Land Transport and Maritime R&D Report

건설기술혁신사업 3차년도 최종보고서

R&D/06건설핵심C05

산업부산물의 경제적 재활용과 시공품질 향상을 위한 분말형 레디믹스트 (Ready-mixed) 숏크리트 개발

2010. 03. 10.

주관연구기관 / (주)태 영 건 설
협동연구기관 / 한국건설기술연구원
한국건자재시험연구원
한 일 시 멘 트 (주)
(주)동성엔지니어링
(주)삼 보 기 술 단
참 여 기 업 / 한국건설관리공사

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

국토해양부 장관 귀하

이 보고서를 "산업부산물의 경제적 재활용과 시공품질 향상을 위한 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 개발"의 최종보고서로 제출합니다.

2010. 03. 10.

주관연구기관명 : (주)태영건설
주관연구책임자 : 상 무 남 관 우
연 구 원 : 상 무 이 강 석
: 부 장 이 윤 규
: 차 장 안 덕 형
: 차 장 김 상 호
: 차 장 정 우 정
: 차 장 김 영 수
: 과 장 김 철
: 과 장 남 기 목
: 과 장 김 주 태
협동연구기관명 : 한국건설기술연구원
협동연구책임자 : 책임연구원 마 상 준
연 구 원 : 책임연구원 김 진 만
: 책임연구원 구 호 본
: 선임연구원 유 준
: 연 구 원 김 동 민
: 연 구 원 최 희 섭
: 연 구 원 이 홍 수
: 연 구 원 강 은 구

협동연구기관명 : 한일시멘트(주)
협동연구책임자 : 소 장 김 정 환
연 구 원 : 팀 장 노 현 승
: 팀 장 김 경 덕
: 과 장 서 신 석
: 연구원 박 길 수
: 연구원 이 건 호
협동연구기관명 : (주)삼보기술단
협동연구책임자 : 부사장 소 충 섭
연 구 원 : 차 장 최 창 림
: 대 리 김 도 형
: 주 임 정 용 식
협동연구기관명 : (주)동성엔지니어링
협동연구책임자 : 전 무 김 동 용
연 구 원 : 이 사 김 건 호
: 과 장 구 자 호
: 대 리 박 지 훈
협동연구기관명 : 한국건자재시험연구원
협동연구책임자 : 선임연구원 최 재 석
연 구 원 : 책임연구원 김 상 명
: 선임연구원 박 주 원
: 선임연구원 신 진 용
: 연 구 원 김 명 훈
: 연 구 원 신 현 철
: 연 구 원 장 필 성
: 연 구 원 김 정 표
: 연 구 원 나 승 찬

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>06건설핵심
C05</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2008.06.17
~2009.12.16.</td><td>단 계 구 분</td><td>3차년/3차년</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">건설기술혁신사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4">산업부산물의 경제적 재활용과 시공품질 향상을 위한 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">남 관 우</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 22명
내부 : 15명
외부 : 7명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부: 515,000천원
기업: 610,000천원
계: 1,125,000천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 39명
내부 : 32명
외부 : 7명</td><td>총연구비</td><td>정부: 851,000천원
기업: 1,130,000천원
계: 1,981,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명
및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">(주)태영건설 토목본부</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">(주)태영건설, 한일시멘트(주),
(주)삼보기술단,
(주)동성엔지니어링,
한국건설관리공사</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="2">상대국명 :</td><td colspan="3">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="2">연구기관명 :</td><td colspan="3">연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">본 연구에서는 현장타설 숏크리트가 가지는 불확실한 시공 품질, 강도 및 내구성 등의 품질저하에 대한 고질적인 문제를 해결하고, 산업부산물을 경제적으로 재활용 가능한 공장생산형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 숏크리트 재료를 개발하였다. 골재의 철저한 토립분 관리, 확실한 입도관리, 전문배합 장치를 이용한 엄격한 품질관리 및 재료의 규격화 등을 거쳐 생산되는 레디믹스트 숏크리트의 재료 성능 및 현장 적용성 평가를 통해 현장배합 숏크리트보다 우수한 품질을 검증하였고, 체계적인 시공 프로세스 및 경제성 평가를 수행하였다. 또한, 실제 현장에 적용 가능한 공장생산 시스템 구축 및 일체형 사일로 타설 시스템을 개발하였다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">레디믹스트 숏크리트, 산업부산물, 재료 규격화,</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Ready-Mixed Shotcrete, Industrial By-product,
Material Standardization,</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

산업부산물의 경제적 재활용과 시공품질 향상을 위한 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구개발의 최종목표는 현장타설 숏크리트가 가지는 불확실한 시공 품질, 강도 및 내구성 등의 품질저하에 대한 고질적인 문제를 해결하고, 산업부산물인 고로슬래그를 재활용하여 숏크리트 품질향상과 산업부산물의 경제적 재활용을 통해 국가자원을 확보하고 시공 품질을 향상시킬 수 있는 새로운 숏크리트 재료를 개발하고자 하는 것이다. 본 연구에서 개발하고자 하는 "분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트"란 기존에 현장에서 배합되던 숏크리트의 문제점들을 효과적으로 개선하기 위해, 숏크리트 재료의 배합 및 제조를 건조 모르타르 제조 전문업체에서 사전에 미리 실시하여, 골재의 철저한 토립분 관리, 확실한 입도관리, 전문배합 장치를 이용한 엄격한 품질관리 및 재료의 규격화 등을 거쳐 시공 품질을 극대화 시킬 수 있게 제조되는 숏크리트 재료를 말하는 것이다.

본 연구개발을 위해 설정한 최종목표는 다음과 같다.

○ 산업부산물의 경제적 재활용과 시공품질향상을 위한 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 개발을 통한 숏크리트 건설기술의 확보

- 산업부산물을 재활용한 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 개발
- 규격화된 재료의 생산
- 현장 시공품질 개선 및 숏크리트 시공성 향상을 통해 터널 구조물의 안정성 확보
- 기존 레미탈 생산체계를 활용한 경제성 있는 숏크리트 공법의 실용화

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

최종목표를 달성하기 위해 본 연구개발에서는 다음과 같은 연구개발 내용을 수행하였다.

■ 1차년도 연구내용 및 범위

(1) 국내외 레디믹스트 기술의 현황 조사
- 자료, 문헌 조사를 통한 국내외 레디믹스트 기술관련 품질규정 조사
- 국내 민간기업이 보유 레디믹스트 기술 수준 분석 및 국내외 레디믹스트 관련 제품 현황 파악
- 국내 레디믹스트 생산 시스템 분석

(2) 현장배합 숏크리트의 국내 시공실태 파악 및 레디믹스트 숏크리트의 개발 방향 모색
- 현장배합 숏크리트의 국내외 품질규정 조사
- 현장 실무기술자들을 대상으로 한 숏크리트 현장설문조사 수행 및 결과분석을 통한 시공실태 및 문제점 파악
- 실무 의견 수렴을 통한 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발 방향 결정

(3) 분말형 레디믹스트 숏크리트 개발을 위한 숏크리트 재료의 고품질화 방안 제시
- 국내에서 생산되는 숏크리트 재료의 품질평가
- 국내 민간업체의 골재 생산시스템 분석
- 국내 터널 현장에서 적용되는 숏크리트용 골재의 품질성능 평가
- 분말형 레디믹스트 숏크리트의 품질 선진화를 위한 재료 규격화 방안 제시

(4) 다기능 레디믹스트 숏크리트 개발을 위한 국내 터널 현장의 시공특성 파악
- 국내 터널 현장의 시공 특성 조사
- 시공 특성에 따른 터널 현장의 분류법 제시 및 조사된 터널 현장 분류

- 분말형 레디믹스트 숏크리트의 다기능 부여를 위한 기능 인자 설정

(5) 숏크리트 굵은골재 최대치수에 따른 숏크리트의 성능평가
- 숏크리트 타설시험용 몰드제작
- 국내외 숏크리트 굵은골재 최대치수에 따른 물리성능 평가자료 조사
- 숏크리트 굵은골재 최대치수(8,10,13mm)에 따른 현장타설시험 수행

(6) 숏크리트 타설실험의 효율성 증대를 위한 숏크리트 타설시험기 설계
- 국내외 숏크리트 타설장비 현황 조사
- 타설시험기 설계를 위한 고려 인자 결정
- 숏크리트 타설시험기의 설계도면 작성

■ 2차년도 연구내용 및 범위

(1) 국내 고로슬래그의 현황 및 물리·화학적 특성 파악
- 고로슬래그의 국내 발생 현황, 생산능력(파이넥스공법) 및 발생 메커니즘 조사
- 국내외 고로슬래그의 경제적 재활용 사례 조사
- 고로슬래그 미분말의 화학조성 분석
- 고로슬래그 미분말의 물성 및 재료특성 파악

(2) 현장 적용성 평가를 통한 분말형 레디믹스트 숏크리트의 초기개발 및 재료분리 최소화 방안 연구
- 분말형 레디믹스트 숏크리트의 초기배합 결정
- 현장타설실험을 통한 초기배합의 품질 평가
- 골재 입도 조정을 통한 재료분리 최소화 방안 및 최적 믹싱 시간 도출
- 동일배합의 현장 숏크리트와의 품질 비교

(3) 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 초기배합 설계
- 고로슬래그 미분말의 숏크리트에 대한 적용성 평가

- 현장타설실험을 통한 초기배합의 품질 평가
- 고로슬래그 치환율에 따른 레디믹스트 숏크리트의 강도특성 분석

(4) 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 양생 특성 및 환경영향 평가
- 숏크리트 공시체의 SEM 촬영을 통한 양생특성 및 메트릭스의 변화특성 파악
- 숏크리트 공시체의 용출시험을 통한 산업부산물의 환경영향 평가 수행

(5) 다기능 레디믹스트 숏크리트의 초기배합 설계
- 설정된 다기능 인자에 따른 레디믹스트 숏크리트의 초기배합 설계 실시
- 각종 혼화재 특성에 따른 다기능 인자의 성능발휘 시험 수행
- 성능발휘 시험 평가를 통한 다기능 레디믹스트 숏크리트의 초기 배합비 결정

(6) 초기개발된 분말형 레디믹스트 숏크리트의 현장 시공성 및 경제성 평가
- 현장 숏크리트 교반장비 실태 조사
- 분말형 레디믹스트 숏크리트의 효율적인 운송 방법 및 현장 믹싱 시스템 분석
- 현장배합 숏크리트와의 설계 단가 비교를 통한 초기개발 제품의 경제성 평가

(7) 숏크리트 장기내구성 평가를 위한 고려 인자 파악
- 숏크리트 성능저하에 영향을 미치는 열화인자 고찰
- 숏크리트 타설 환경에 따른 장기내구성 평가 인자 설정

(8) 숏크리트 타설실험의 효율성 증대를 위한 숏크리트 타설시험기 제작
- 국내 실험실의 타설시험기 현황 조사
- 실내 타설 시공성을 고려한 타설시험기의 적정 용량 산출
- 숏크리트 타설시험기의 시제품 제작

■ 3차년도 연구내용 및 범위

(1) 레디믹스트 숏크리트의 최종 배합비 결정

- 초기배합 개선을 통한 최종 배합비 결정
- 현장타설실험을 통한 최종 배합비의 품질 평가
- 현장배합 숏크리트와의 비교 실험을 통한 레디믹스트 숏크리트의 품질 우수성 평가

(2) 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 최종 배합설계
- 경제성과 품질을 고려한 고로슬래그 미분말의 최적 치환율 도출
- 현장타설실험을 통한 최종 배합비의 품질 평가
- 일반 레디믹스트 숏크리트와의 비교 평가를 통한 강도특성 및 품질평가

(3) 고로슬래그 숏크리트의 재료품질 평가
- 일반 숏크리트와 고로슬래그 치환 숏크리트의 수은압입시험 실시
- 고로슬래그 치환율에 따른 숏크리트의 수은압입시험 결과 고찰
- 고로슬래그 숏크리트의 공극분포특성 파악

(4) 적용인자에 따른 다기능 레디믹스트 숏크리트 최종 배합설계
- 적용인자별 다기능 레디믹스트 숏크리트의 최종 배합비 결정
- 실내실험을 통한 다기능 레디믹스트 숏크리트의 적용인자별 품질성능 평가

(5) 단일 열화인자 평가를 통한 레디믹스트 숏크리트 내구성 평가
- 레디믹스트 숏크리트의 실내촉진시험 수행 및 단일내구성 평가

(6) 복합열화시험을 통한 레디믹스트 숏크리트의 장기내구특성 평가
- 레디믹스트 숏크리트 복합열화시험 및 옥외폭로시험 수행
- 레디믹스트 숏크리트 복합열화특성 파악

(7) 대량생산 및 규격화생산을 위한 레디믹스트 숏크리트 자동생산 시스템 확보
- 기존 레디믹스트 콘크리트의 생산 시스템 분석
- 레디믹스트 숏크리트 재료의 규격화에 적합한 생산 시스템 설계
- 재료 생산시 믹싱, 재료 거출, 운반과정의 재료분리 가능성 평가

- 레디믹스트 숏크리트의 판매용 시제품 제작

(8) 레디믹스트 숏크리트 현장시공 프로세스 분석을 통한 시공 우수성 평가
- 현장배합 숏크리트 시공 프로세스 분석
- 설계된 자동 생산 시스템의 시공 프로세스 분석
- 레디믹스트 숏크리트 제품의 공급망관리(SCM) 평가를 통한 시공 프로세스 분석
- 현장배합 및 공장배합 숏크리트의 시공 프로세스 비교 및 평가

(9) 레디믹스트 숏크리트의 운송시간 경과에 따른 품질 변화 양상 평가
- 레디믹스트 숏크리트의 운송시간 경과에 따른 슬럼프 및 공기량 변화 측정
- 운송시간에 따른 레디믹스트 숏크리트의 품질 유지 방안 고려

(10) 레디믹스트 숏크리트 최종 경제성 평가
- 고로슬래그 치환율 변화에 따른 경제성 분석
- 레디믹스트 숏크리트의 재료비 상승단가 검토
- 현장배합과 레디믹스트 숏크리트의 품질 대비 경제성 비교
- 시공시스템 간소화로 인한 간접비 감소율 파악
- 레디믹스트 숏크리트의 국내 수요 및 시장성 조사

(11) 레디믹스트 숏크리트의 공정관리 및 시공·품질관리 편람(안)
- 재료생산 및 공정관리 편람(안) 제안
- 시공 및 품질관리 편람(안) 제안

(12) 숏크리트 타설시험기를 이용한 레디믹스트 숏크리트 품질 평가 수행
- 개발된 타설시험기의 성능 평가를 위한 실내 시험 수행
- 실내 시험 평가를 통한 타설시험기의 문제점 분석 및 보완
- 숏크리트 타설시험기의 사용 매뉴얼 작성

Ⅳ. 연구개발결과

■ 레디믹스트 관련 기술현황 조사

국내외 레디믹스트 기술의 현황 조사를 위해 레디믹스트 관련 국내 품질 규정을 조사하였고, 국내외 기술 수준 및 산업동향과 레디믹스트 제품의 생산량 등을 조사하였다. 그리고 레디믹스트 생산 시스템의 분석을 통해 차후 개발될 분말형 레디믹스트 숏크리트의 공장생산 시스템 확립을 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

■ 현장배합 숏크리트의 국내 시공실태 파악

현장배합 숏크리트의 국내 시공실태 파악을 위해 숏크리트의 국내외 품질규정을 고찰하였고, 문제점 파악을 위해 실시한 현장설문조사 결과를 분석하였다. 그리고 실무의견 수렴을 통한 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발방향을 모색하였다.

■ 레디믹스트 숏크리트 재료 고품질화

국내 숏크리트 재료의 품질을 고찰하고 골재 생산 시스템에 대해 조사하였다. 그리고 숏크리트 재료의 성능 실험과 현장 배합용 숏크리트 골재의 품질관리 실태 파악을 통해 레디믹스트 숏크리트 재료의 품질 선진화를 위한 방안을 모색하였다.

■ 레디믹스트 숏크리트 개발

공장에서 사전 배합하여 엄격한 품질관리 및 재료의 규격화를 이루어 현장에서 시공성과 품질을 개선 할 수 있는 레디믹스트 숏크리트 개발에 대한 연구를 수행하였다. 레디믹스트 숏크리트의 품질 개선과 재료 분리 방지를 위해 최대골재치수를 8mm로 결정하여 압축강도 및 리바운드율 시험을 통해 적용성을 검토하였고 레디믹스트 숏크리트의 재료 분리를 최소화 할 수 있는 최적 믹싱 시간 및 혼합 회전속도를 도출하였다. 그리고 실내시험을 통해 합성섬유 및 혼화재의 최적 배합량을 산정하고 현장에 적용성 평가를 실시하여 레디믹스트 숏크리트의 최적 배합을 제안하였다.

■ **고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 개발**

산업부산물로 생성되는 고로슬래그 미분말을 활용한 레디믹스트 숏크리트 개발 연구를 위해 국내·외 고로슬래그의 재활용 상황을 파악하고 성능평가를 실시하여 고로슬래그의 치환율을 도출하였고 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 양생특성 파악을 위한 실내실험 및 현장적용성 평가를 실시하여 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 최적 배합을 제안 하였다.

■ **다기능 레디믹스트 숏크리트 개발**

현장상황에 따라 특성화된 기능을 발휘하는 다기능 레디믹스트 숏크리트의 개발을 위해 국내 터널 현장의 시공시 발생하는 문제들을 파악하고 개발이 시급한 다기능 인자를 도출하였다. 그리고 다기능 인자에 따른 초기 배합을 결정하고 성능 발휘 실험을 실시한 뒤 현장에 타설하여 적용성 평가를 수행하였으며 이 결과를 토대로 다기능 레디믹스트 숏크리트의 최적 배합을 제안 하였다.

■ **레디믹스트 숏크리트 장기내구성 평가**

레디믹스트 숏크리트의 단일열화 및 복합열화에 의한 성능저하 요인을 분석하기 위하여 시험을 실시하였다. 단일열화 시험 결과는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 보통강도 콘크리트 보다 레디믹스트 숏크리트 배합의 경우에 다소 양호한 결과를 나타내었다. 복합열화 시험결과 또한 특수한 상황을 제외 하고는 일반강도 콘크리트 보다는 우수한 결과를 나타냈다. 그리고 레디믹스트 숏크리트의 장기내구성 평가를 위해 수은압입 시험을 수행한 결과 현장 골재에 비해 우수한 장기내구성능을 확인 할 수 있었다.

■ **레디믹스트 공장생산 및 시공 시스템 구축**

레디믹스트 숏크리트의 공장 규격화 생산 시스템을 구축하고 현장에서 가장 효과적으로 시공이 가능한 현장 시공시스템을 제안하기 위해 국내 현장 배치플랜트 실태 조사를 실시하였다. 그리고 기존 레디믹스트 생산 시스템 분석을 통해 개발 재료의 규격화된 생산 시스템을 구축하였고, 실제 제조공정 적용을 통해 각 규격별 레디믹스트 숏크리트 시제품을 생산하였다. 또한, 현장 배치플랜트 설비를 대처할 시공시스템을 도출함으로써, 재료 개발과 동시에 실제적인 현장적용이 가능한 연구개발이 되고자 하였다.

■ 레디믹스트 숏크리트 시공성 및 경제성 평가

레디믹스트 숏크리트의 시공성 및 경제성 평가를 위해 설계단가 비료를 통해 초기 경세성 평가를 실시하였다. 그리고 현장 배치플랜트 활용시와 일체형 사일로 믹서 활용시의 시공프로세스 분석을 실시하여 공정, 자원 및 부지활용에 대한 분석을 실시하였다. 또한, 최종 경제성 평가를 위해 터널 공사 유형에 따른 생산 및 운반 단위 공사비 분석을 실시하였고, 성능 및 비용을 통해 VE에 의한 가치평가를 실시하였다.

■ 숏크리트 타설시험기 개발

현장과 같은 조건에서 타설실험이 가능한 타설 시험기 제작을 위한 연구를 수행하였다. 기존에 운용되고 있는 숏크리트 타설장비의 특성을 파악하고 시험기를 제작하여 성능 평가를 수행하였고 그 결과 현장타설 장비와 매우 유사한 성능을 발휘하는 것으로 나타나 현장타설시험의 한계 및 제약 조건을 극복하고 숏크리트 재료의 표준화 및 규격화 시험에 효과적으로 활용 할 수 있을 것이라 판단된다.

■ 공정관리 및 시공·품질관리 편람(안) 제안

레디믹스트 숏크리트의 실제적인 현장 적용을 확대하고, 생산 공장 및 건설 현장에 종사하는 실무기술자들이 어려움 없이 개발 재료를 활용할 수 있도록 공장에서의 재료 생산 단계에서부터 현장 시공 및 품질 관리, 적용된 재료의 품질시험 방법을 설명한 레디믹스트 숏크리트 공정관리 및 시공·품질관리 편람(안)을 제안하였다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

본 연구개발을 통해 얻은 결과와 이를 통해 개발된 기술들은 다음과 같은 측면에서 활용 가능할 것으로 판단된다.

■ 시공성을 갖춘 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 개발을 통한 숏크리트 건설기술의 확보

- 연구를 통해 개발되는 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 공법은 공장형 배합의 최적 골재관리, 각기 다른 입도 및 비중을 갖는 재료들의 최적혼합 등을 꾀할 수 있으며, 현장에서 재료 계량, 재료 야적 및 재료 품질관리 등이 필요없이 공장에서 생산되어 포장된 재료를 믹싱만 해서 사용하면 되므로 숏크리트 시공 품질을 월등하게 향상시킬 수 있음.
- NATM 개념에 의한 터널 굴착시 노출되는 암반의 특성에 따라 공장 주문형 다기능 숏크리트를 시공할 수 있는 기술개발이 가능함.
- 터널 시공과정 중 발생되는 암특성에 따른 숏크리트 설계 강도 변화, 누수량에 따른 설계 변화, 공사비 및 공사기간의 변경으로 인한 숏크리트 설계 변화 등의 상황일 때 공장 주문형 다기능 숏크리트 기술을 통해 유동적이며 효율적인 숏크리트 시공이 가능하며, 공장형 배합을 통해 다품종 소량생산 및 최적의 생산시스템 확립을 통해 경제적인 제품생산으로 활용이 가능함.
- 기능성 혼화재의 혼입을 통해 터널 굴착 후 노출된 암반의 특성에 따라 주문형 레디믹스트(ready-mixed) 숏크리트의 생산 및 시공이 가능해져, 터널 지보재로서의 장기내구성 확보뿐만 아니라 고부가 가치의 토목 건절재료의 생산이 가능함.
- 분말형 레디믹스트(ready-mixed) 숏크리트 개발로부터 얻어지는 신기술을 국내 및 해외에 특허 출원하여 산업재산권화 함으로써 건설기술 관련 국내산업을 보호하고, 각종 국·내외 학술지에 발표하여 국내 관련 산업의 선진화를 이루는 초석으로 활용 가능함.
- 숏크리트 공법에 대한 고로슬래그 재활용이 가능해져, 국가 자원을 절감하고 경제적인 자원 재활용으로 국가 정책에 기여할 수 있음.
- 숏크리트 재료를 생산하고 있는 국내 민간기업이 본 연구개발에 직접적으로 참여함으로서 기술 경쟁력을 향상시킬 수 있으며, 체계적인 공장 생산 시스템의 설

치 및 개발을 통해 민간기업의 국가 산업 기여도 향상, 인적 자원의 고용증대, 신제품 개발을 통해 국내 시장 확산 등의 효과를 거둘 수 있음.

- 각종 기능성 혼화재와의 혼입을 통하여 방수용, 고강도용, 고인성용, 저리바운드용 등 터널 시공시 발생할 수 있는 모든 상황에 대한 맞춤형 숏크리트 생산이 가능하고 기존의 일률적인 숏크리트 시공을 떠나 각 현장별 차별화된 시공이 가능해짐.

■ 경제적인 분말형 레디믹스트(Ready-mixed)공법 적용으로 인한 국가 예산 절감

- 숏크리트 관련 제품의 기술개발을 촉진하여 관련 제품의 가격인하 및 수입대체 효과가 있음.

- 고내구성 숏크리트의 개발 및 시공으로 인한 유지·보수 비용 절감에 따른 경제적 이익효과가 발생하며, 관련 분야 시공기술 개발을 촉진하여 소요 자금 및 인력의 절감효과가 발생.

- 국내 지반환경에 적합한 가장 경제적이고 우수한 내구성을 가지는 숏크리트의 제조·배합기법의 도출 기대

- 공장 생산 시스템의 개발로 현장 배치 플랜트 시설의 축소 및 설치비 절감이 가능하여 건설업체 입장에서는 현장 시설 소모를 줄이고 고품질의 공장 생산 제품을 직접 사용가능하게 되어 경제적인 시공이 가능하게 됨.

- 공장에서부터 관리되는 골재품질, 정확한 배합 계량 및 산업부산물을 재활용한 경제적 생산 등의 이점을 보유하고 있어, 현장에서 고품질 시공이 가능하고 특별한 시설 투자가 필요 없으며 터널 시공 상황에 따라 공장 주문형 다기능 숏크리트 생산도 가능하므로 건설재료 시장의 점유율이 높음.

- 성능 및 비용분석을 종합한 가치분석 결과 현장배합 숏크리트에 비해 8~16% 정도의 가치향상을 보이며, 비용측면에서는 성능개선 효과가 우수한 성능강조형으로 성장 가능. 또한, 현장 여건이 복잡한 철도, 지하철 터널에서는 비용 절감효과가 같이 나타나 가치혁신적인 측면을 나타내어 경제성의 개선효과의 극대화가 가능함.

■ 일체형 사일로 믹서 제작 및 테스트베드 평가를 위한 추가 연구 필요성

- 개발된 레디믹스트 숏크리트 재료를 가장 효과적으로 현장에 적용시킬 수 있는 시공 시스템 도출.
- 현장 배치플랜트를 통하지 않고 공장생산된 숏크리트 재료를 믹싱과 함께 타설 장비에 공급하여, 개발된 재료의 품질을 가장 효과적으로 발휘할 수 있는 일체형 사일로 믹서 장비 설계.
- 설계된 일체형 사일로 믹서에 대한 테스트베드 평가를 통해 최종적인 레디믹스트 숏크리트의 현장 적용성 평가가 요구되며, 이를 위해서는 후속적인 연구개발이 필요함.

SUMMARY

Ⅰ. Subject

Development of Ready-mixed Shotcrete for the Economical Recycling of Industrial by-product and the Improvement of Construction Quality

Ⅱ. Objective and Necessity of Research and Development

The final objective of this Research and Development is that solving chronic problems which are unreliable constructional quality, low-quality of compressive and durability. There are many methods to improve the performance of concrete. Especially, Blast-furnace Slag, industrial by-product used in shotcrete as the replacement material of cement, could contribute to improve the fluidity, resistance of chemical attack and strength of shotcrete. Also, it could contribute to decrease the rate of generating hydration heat, in addition to cost-down of shotcrete and prevention of environmental pollution. So, "Development of Ready-mixed Shotcrete" is possible to improve a construction ability and solve the chronic problem of shotcrete method.

The following are detail objectives of this Research and Development.

○ Obtaining of shotcrete construction technique through development of ready-mixed shotcrete for the economical recycling of industrial by-product and the improvement of constructional quality

- Development of ready-mixed shotcrete through recycling industrial by-product

- Production of standard materials
- Obtaining of the safety in tunnel structure through improving shotcrete operation technique and construction quality of field
- Practical using economical shotcrete method applied Remital production system

Ⅲ. Contents and Range of Research and Development

The following are Contents and Range of this Research and Development in a first period

■ Contents and range of research and development in the first year

(1) Investigation of present conditions about ready-mixed technique in domestic and foreign
- Research of the domestic and foreign ready-mixed technique through data and records
- Investigation of the present condition of the domestic and foreign Ready-mixed technique and analysis of the level in domestic enterprise technique
- Analysis of domestic Ready-mixed production system

(2) Searching a development direction of ready-mixed shotcrete and investigating domestic construction conditions of field-mixing shotcrete
- Research into quality rules of domestic and foreign in field-mixing shotcrete
- Taking an opinion poll of field engineers about shotcrete method and investigation of problems and construction state of domestic shotcrete

method through analyzing the results

- Deciding a direction of development for ready-mixed shotcrete through collecting practical opinion

(3) Presenting a plan of high-quality shotcrete materials for development of ready-mixed shotcrete

- Evaluation of domestic shotcrete materials
- Analyzing an aggregate production system of domestic enterprises
- Evaluation of aggregate quality used in shotcrete of domestic tunnels
- Presenting a plan about material standards for improving quality of ready-mixed shotcrete

(4) Investigation of construction conditions in domestic tunnels for development of special function ready-mixed shotcrete

- Investigation of construction conditions in domestic tunnel sites
- Proposing classification system of tunnel sites according to construction conditions and sorting investigated tunnel sites
- Deciding function factors for giving a special function to ready-mixed shotcrete

(5) Performance test of shotcrete with maximum aggregate size

- Manufacturing molds for shotcrete test
- Investigation of evaluated data about physical properties according to maximum aggregate size of shotcrete in domestic and foreign
- Performing the field test about maximum aggregate size of shotcrete(8, 10, 13mm)

(6) Design of shotting test machine for promoting efficiency in shotcrete test

- Investigation of shotting machine conditions in domestic and foreign
- Deciding considerable factors for design of shotting test machine

- Making out the drawing design of shotting test machine

■ Contents and range of research and development in the second year

(1) Investigation of present condition, physics and chemical quality about blast furnace slag of domestic

- Investigation of Domestic occurrence present condition, productive capacity and occurrence mechanism of blast furnace slag(Finex method)
- Investigation of economical recycling case about blast furnace slag of domestic and foreign
- Analysis of chemical composition about blast furnace slag micropowder
- Investigation of physical properties and material quality of blast furnace slag powdered

(2) Research of powdered Ready-mixed Shotcrete about initially development and material segregation minimization plan through field application evaluation

- Deciding initially mix proportion of powdered Ready-mixed Shotcrete
- Quality evaluation of initially mix proportion through field shooting experiment
- An aggregate grading adjustment which material segregation minimization plan and optimum mixing time escape
- Quality comparison with field shotcrete of equality mix proportion

(3) Initially mix proportion plan of blast furnace slag Ready-mixed Shotcrete

- About shotcrete of blast furnace slag fine powder application evaluation
- Quality evaluation of initially mix proportion through field shooting experiment
- Analysis of Ready-mixed Shotcrete strength quality about blast furnace slag replacement ratio

(4) Evaluation of curing quality and environmental influence about blast furnace slag Ready-mixed Shotcrete

- Investigation of curing quality and matrix variation quality through SEM photographing of shotcrete specimen
- Environmental influence evaluation of industrial by-product through gushing test of shotcrete specimen

(5) Initially mix proportion plan of special function Ready-mixed Shotcrete
- Initially mix proportion plan of Ready-mixed Shotcrete follows in the special function factor which is set
- Performance test of special function factor which follows in various additive quality
- Deciding initially mix proportion of special function Ready-mixed Shotcrete through performance test evaluation

(6) Field construction quality and economical efficiency evaluation of powdered ready-mixed shotcrete which is developed initially
- Investigation of field shotcrete agitation equipment actual condition
- Analyzing a field mixing system and efficient transportation method of powdered Ready-mixed Shotcrete
- Economical efficiency evaluation of the initially development powdered ready-mixed shotcrete through plan cost comparison with field mixing shotcrete

(7) The consideration factor grasp for a shotcrete long-term durability evaluation
- Investigation of the deterioration factor which affects in shotcrete performance degradations
- Deciding long-term durability evaluation factor which follows in shooting environment of shotcrete

(8) Interior shooting equipment produce for effectiveness augmentation of shotcrete shooting experiment
- Investigation of shooting equipment present conditions about a laboratory in domestic

- Moderate capacity production of shooting equipment which considers the interior shooting quality
- Prototype production of interior shooting equipment

■ Contents and range of research and development in the third year

(1) Determination of final mixing plan for Ready-mixed Shotcrete
- Improving the Initial mixing plan deduce the final ready-mixed shotcrete mixing proportion
- Quality evaluation of final mix proportion through field shooting experiment
- Conducting quality test for final ready-mixed shotcrete mixing proportion through comparison with field mixing shotcrete

(2) Determination of Final mixing plan for blast furnace Ready-mixed Shotcrete.
- Considering economical efficiency and quality, deduce the final blast furnace ready-mixed shotcrete mixing proportion
- Quality evaluation of final mix proportion through field shooting experiment
- Conducting quality test for final blast furnace ready-mixed shotcrete mixing proportion through comparison with normal ready-mixed shotcrete

(3) Material quality test for blast furnace ready-mixed shotcrete.
- Conducting Mercury intrusion porosimetry(MIP) test for ready-mixed shotcrete and blast furnace ready-mixed shotcrete.
- Investigating the result of MIP test according to blast furnace slag replacement level
- Investigating the characteristics of blast furnace ready-mixed shotcrete pore distribution.

(4) Determination of special function ready-mixed shotcrete final mix proportion according to various shotcrete factors
- Determination of special function ready-mixed shotcrete for each factors
- Performance test of special function ready-mixed shotcrete for each factors

through indoor experiment.

(5) Evaluation of ready-mixed shotcrete long-term durability depend on single deterioration factor.
- Conducting indoor acceleration test and single deterioration factor test for ready-mixed shotcrete

(6) Evaluation of ready-mixed shotcrete long-term durability depend on complex deterioration factor.
- Conducting complex deterioration factor test and outdoor test for ready-mixed shotcrete
- Investigation of characteristics of ready-mixed shotcrete depend on complex deterioration factor.

(7) Establishing the automatical production system for large scale production and standardized production.
- Analysis of Preexisting ready-mixed shotcrete production system.
- Design of production system suited for standardized ready-mixed shotcrete material.
- Evaluation of material separation during mixing, shipment and transporting process.
- Producing the ready-mixed shotcrete for sale

(8) Evaluation of construction priority of ready-mixed shotcrete through analysis of field construction process.
- Analysis of field shotcrete construction process.
- Analysis of construction process for automatical production system
- Analysis of construction process through evaluation of ready-mixed shotcrete Supply chain management(SCM) .
- Comparing and evaluation field shotcrete construction process with ready-mixed shocrete constructon process.

(9) Evaluation of ready-mixed shotcrete quality variation depend on transporting time

- Measurement of slump and air quantity variation depend on transporting time
- Finding a solution to prevent variation of ready-mixed shotcrete quality because of transporting.

(10) Evaluation of ready-mixed shotcrete economical efficiency.

- Analysis of economical efficiency about blast furnace slag replacement ratio
- Investigation of rising shotcrete unit price
- Comparing ready-mixed shotcrete with field shotcrete about price and quality
- Investigation of overhead cost decreased by simplified construction process.
- Investigation of demand and marketability of ready-mixed shotcrete.

(11) Construction process control manual and Construction/material quality control manual of ready-mixed shotcrete

- Suggest the construction process control manual
- Suggest the construction and material quality control manual.

(12) Conducting the ready-mixed shotcrete quality Evaluation by using shotcrete shotting test machine.

- Conducting indoor test for the purpose of evaluating the shotcrete shotting test machine.
- According to indoor test results, analyzing problems of the test machine and improving capability of the test machine.
- Make out the shotcrete shotting test machine operation maual.

Ⅳ. Research and Development Results

■ Investigation of present conditions about ready-mixed technique in domestic and foreign

It was research of the domestic and foreign ready-mixed technique through data and records. And we accomplished a good grasp of the present condition of the domestic and foreign ready-mixed technique and ready-mixed technique analysis of domestic enterprise. Also, we have used basic reports for domestic ready-mixed production system for development of ready-mixed shotcrete that analysis of ready-mixed production system.

■ Searching a development direction of ready-mixed shotcrete and investigating domestic construction conditions of field-mixing shotcrete

We were considerable research into quality rules of domestic and foreign in building site-mixing shotcrete and analysed result of an opinion poll in the field for a good grasp of problems. And we groped for development direction decision of ready-mixed shotcrete under reflection of affair ideas

■ Presenting a plan of high-quality shotcrete materials for development of ready-mixed shotcrete

We investigated quality test of shotcrete materials producing domestic and conducted the analysis of aggregate production system in domestic enterprises. Also, we groped for the quality performance test of shotcreted aggregate applying tunnel site in domestic

■ Developement of ready-mixed shotcrete

We have carried out a series of experiments on developeing ready-mixed shotcrete that can improve applicability and quality through strict quality control and standardization of ingredients at production sight. In this report examined applicability through compression and rebound test based on assumption that the

maximum size of coarse aggregates is 8mm, so to improve quality and prevent separation of ready-mixed shotcrete and induced the optimal mixing time and mixing speed that can minimize the separation of ingredients in ready-mixed short-crete. Also, suggested is the optimal mixing proportion of ready-mixed short-crete by calculating the optimal mixing ratio of synthetic fabric and admixture in a laboratory experiment and later executing field experiment for applicability.

■ Developement of blast furnace ready-mixed shotcrete

We have calculated rate replacement of blast furnace through examination of domestic-foreign cases of blast furnace recycling and quality experiment, to support development of ready-mixed shotcret using blast furnace that is usually considered as a industrial by-product, and suggest the optimal mixing ratio of blast furnace ready-mixed shotcrete.

■ Developement of special function ready-mixed shotcrete

We have identified multifuctional factor that needs to be developed urgentlgly by examining problems that arise when constructing tunnels in domestic field in order to develop multi-functional ready-mixed shotcrete that can perform under various field conditions.

■ Evaluation of ready-mixed shotcrete long-term durability

We carried out experiments to analyze the quality-degrading factors due to single deterioration factors and complex deterioration factors of ready-mixed shotcrete. The results shows that ready-mixed shotcrete mixture exhibit better performance than portland cement mixture under single deterioration factor test. Also, under complex deterioration factor test, ready-mixed shortcrete shows better results than regular concrete except for a few special cases. in addition, we affirmed better long-term durability of ready-mixed shortcrete than field aggregate based on Mercury Itrusion Porosimetry test.

■ **Esablishing the plant production system and construction system of ready-mixed shotcrete.**

We have executed field-experiment of domestic batch plant in order to establish standardized production of ready-mixed shotcrete and suggest optimal application of field construction system. Also, after analyzing the existing ready-mixed shotcrete production system, we have established standardized production for newly developed material, and manufactured tentative ready-mixed shotcrete. By designing construction system that replaces field batch plant equipment, our research has a few contibutions in developing material and field-applicabiilty.

■ **Evaluation of construction quality and economical efficiency of ready-mixed shotcrete.**

We have carried out an cost-benefit test of ready-mixed shotcrete at early stage using unit price. And we analyzed the process, resources and land use through examining construction process under field batch plant and single-body type silo mixer. Also, for the final cost-benefit test, we executed production and transportation cost for different types of tunnel construction and carried out an VE evaluation of performance and cost

■ **Develoment of shotcrete shotting test machine**

We have done experiments regarding the production of laboratory shotcrete shotting test machine that enables test under field-identical conditions. We have developed a shotting test machine based on properties of the existing shotcrete shotting equipments and carried out a performance test, which showed a nearly identical result compared to field shotting equipment, therefore can be effectively used for standardization test of shortcrete material without limitations of field test.

■ **Suggest the Construction process control manual and Construction /material quality control manual**

We suggested a ready-mixed shotcrete construction process control and construction/material quality control manual that explains manufacturing, field construction, quality management, mixture quality test for the ready-mixed shotcrete to promote easy utilization of ready-mixed shotcrete by practical engineers at production and construction site and real life application of ready-mixed shotcrete.

Ⅴ. Utilization Plan for Research and Development Results

It was expected that the results of this research and development were used and applied in following contents.

■ **Obtaining the shotcrete construction technique through development of ready-mixed shotcrete that equipped a constructing capacity.**

- Ready-mixed shotcrete method develops by this research that performed first year research and development can attempt the best suited aggregate management of factory mix and best suited mixing of material have different grading and gravity with each other, also can improve construction quality superiorly cause it possible use material only one way of mixing without material measuring, storage and quality management.
- It is possible to develop technique of construct the lots of ability shotcrete that factory order form by exposure bedrock characteristic when tunnel digging in concept of NATM
- It is possible to fluid and efficiency construction of shotcrete through the factory order form and lots of ability shotcrete technique when conditions of shotcrete design strength changed according to characteristic of rock occurrence during tunnel construction, design changed according to amount

of leaking water and shotcrete design changed by alteration of construct expense and period, also can utilize economical goods production by many species small quantity production through factory form mixing and establishment and the best suited production system.

- it is possible that ordering production of ready-mixed shotcrete though exposed base rock character after mixing a capacity admixtures. So, ready-mixed shotcrete is possible for production of valuable construction material and take the durability.
- It is ready-mixed shotcrete that can contribute government pollution to reducing a nation resources and economical resources recycling because recycling of Blast-furnace Slag in shotcrete method is possible.
- It will be improve technique competitive power through domestic private organization that product material of shotcrete participate directly to this research and development and can get effective of improve domestic private organization's contribution to national industry by installation & development systematic factory production system, increase employment of human resources and development a new product.
- Through mixing of various kinds functional additive possible to product the custom-made shotcrete about all situation occurrence when tunnel construction like waterproof, high strength, high tension and it also possible discrimination construction.

■ **Retrenchment of national finance by applying economical ready-mixed method.**

- It facilitates technology development of shotcrete relevance products so that causes cutting down price of relevance products and has import alternative effect.
- Cutting down on expenses of maintenance and repairing by developing and constructing highly-durable shotcrete makes over 100 billion won profit effect per year.

- It facilitates developing relevance engineering method so causes over 10 billion won cost-cut effect for necessary capital and manpower.

- We expect manufacturing and compounding technique for shotcrete, which fits for our domestic ground and has excellent durability.

- By developing factory manufacturing system, it is possible to retrench field placement plant facility and cut down installation cost therefore construction company is able to reduce field facility expenses and construct more efficiently by using high-quality factory producing goods.

- It has benefits which come from factory direct-managing aggregate quality, accurate measuring for compounding, recycling byproduct therefore construction companies are able to conduct high-quality construction. There is no need to invest for specific facility, even new technology makes it possible to produce factory order type multi-function shotcrete following tunnel constructing situation so it has high market share for construction aggregates.

- As a result of value evaluation, ready-mixed shotcrete shows rising its value 8~16% comparing with field shotcrete. And it is possible for ready-mixed shotcrete to be developed both improving strength type and cost effective type. Especially in complex field condition ;like train and metro tunnel, the cost of ready-mixed shotcrete are lower than field shotcrete. According to this results we expect that ready-mixed shotcrete maximize the economical value innovatively.

■ **Making the single-body type silo mixer and need of futher study for the purpose of evaluating the test bed.**

- In order to applicating ready-mixed shotcrete to field effectively, new construction process were derived.

- As a result of making the single-body type silo mixer, shotcrete material doesn't need to transport to field batch plant. So shotcrete materials producing in ready-mixted shotcrete plant are transporting to shotting

machine directly. By this process, shotcrete materials are effectively constructed in field.

- It is necessary to test field applicability of ready-mixed shotcrete through evaluating the test bed for single-body type silo mixer. So further studies are needed.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction ····· 1

I. Background and Necessities ····· 1

II. Scope and Contents ····· 4

1. Objective of study ····· 4

2. Contents of study ····· 5

Chapter 2. State of Technical Development ····· 11

I. Status of Development in Domestic ····· 11

II. Status of Development in Foreign ····· 16

Chapter 3. Accomplishment Content and Results ····· 33

I. Introduction ····· 33

II. Research in the Present Conditions of Ready-mixed Technique ····· 35

1. Quality criterions of ready-mixed method in domestic ····· 35

2. Analysis of ready-mixed technology ····· 39

3. Closing remarks ····· 46

III. Domestic Construction States of Field-mixing Shotcrete ····· 47

1. Research in quality rules of field-mixing shotcrete in domestic and foreign ····· 47

2. Investigation of problems and construction states through field opinion poll ····· 58

3. Deciding a direction of development for ready-mixed shotcrete through collecting practical opinion ····· 73

4. Closing remarks ····· 79

IV. Study on High-quality Shotcrete materials for development of Ready-mixed Shotcrete ····· 81

1. Research of material construction system in domestic ····· 81

2. Performance test of shotcrete materials ····· 85

3. Evaluating quality control conditions of field-mixing shotcrete materials ····· 96

4. Proposing a plan for improving quality of ready-mixed shotcrete materials ····· 102
5. Closing remarks ····· 108
V. Developement of Ready-mixed shotcrete ····· 111
1. Performance test of Shotcrete according to change of maximum aggregate size ····· 112
2. Collecting ideas on application of maximum aggregate size ····· 120
3. Minimization Stratigy of ready-mixed segregation ····· 129
4. Determination of optimum mixing rate of synthetic fiber ····· 145
5. Evaluation of Field applicability of ready-mixed shotcrete ····· 180
6. Determination of optimum mixing rate of ready-mixed shotcrete ····· 197
7. Closing remarks ····· 198
VI. Developement of blast furnace slag ready-mixed shotcrete ····· 201
1. Performance test of Shotcrete mixed industrial by-product ····· 202
2. Grasp of Domestic the present condition and quality of blast furnace slag powdered ····· 216
3. Evaluation of applicability of blast furnace for ready-mixed shotcrete ·· 241
4. Ready-mixed shotcrete Strength characteristic according to blast furnace slag replacement level ····· 249
5. Curing quality of blast furnace slag ready-mixed shotcrete ····· 253
6. Evaluation of Field applicability of blast furnace ready-mixed shotcrete ····· 263
7. Determination of Optimum mixing rate of blast furnace slag ready-mixed shotrete ····· 304
8. Closing remarks ····· 305
VII. Development of special function Ready-mixed Shotcrete ····· 307
1. Special function Factors of Ready-mixed Shotcrete ····· 308
2. Initially development of special function Ready-mixed Shotcrete ····· 331
3. Evaluation of Field applicability of Special function ready-mixed shotcrete ····· 343
4. Determination of Optimum mixing rate of Special function ready-mixed shotrete ····· 350
5. Closing remarks ····· 351

VIII. Evaluation of shotcrete long-term durability ····· 353
1. Evaluation of considertion factors shotcrete long-term durability ····· 353
2. Evaluation of dry shringkage ····· 377
3. Evaluation of shotcrete long-term durability through estimate the a single deterioration factor ····· 381
4. Evaluation of shotcrete long-term durability through estimate the complex deterioration factor ····· 393
5. Evaluation of shotcrete long-term durability through Mercury Intrusion Porosimetry(MIP) test ····· 404
6. Closing remarks ····· 425
IX. Establishing of plant production system and construction system of ready-mixed shotcrete ····· 428
1. Investigation of domestic field batch plant ····· 428
2. Analysis of preexistance ready-mixed concrete production system ····· 437
3. Design of standardized production system of ready-mixed shotcrete material ····· 448
4. Evaluation of material segregation occurred in plant ····· 457
5. Manufacturing the initial ready-mixed shotcrete product ····· 460
6. Establishing ready-mixed shotcrete field construction system ····· 462
7. Closing remarks ····· 467
X. Evaluation of economical efficiency and construction condition of ready-mixed shotcrete ····· 469
1. Evaluation of economical efficiency on comparing a plan unit cost ····· 469
2. Analysis the field construction process and economical efficiency of ready-mixed shotcrete ····· 480
3. Closing remarks ····· 503
XI. Development of shotting test machin ····· 506
1. Development of indoor shotting test machine ····· 506
2. The production of shotting test machine ····· 521
3. Evaluation of applicability for shotting test machine ····· 532
4. Closing remarks ····· 537
XII. Construction process control manual and Construction/material quality control manual of ready-mixed shotcrete ····· 538

1. Construction process control manual ····· 538
2. Construction/Material quality control manual ····· 553
XIII. Conclusion ····· 567

Chapter 4. Accomplishment Level for Research Goal and Contribution to Related Research Field ····· 585

Chapter 5. Engineering Application of Research Results ····· 593

Chapter 6. A Related Foreign techniquenical Information ····· 597

Chapter 7. References ····· 625

Appendix

I. Techinical menual of the shotting test machine
II. Process control manual and Construction/material quality control manual of ready-mixed shotcrete

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 1

제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성 ····· 1

제 2 절 연구개발의 내용 및 범위 ····· 4

1. 연구개발 최종 목표 ····· 4

2. 연구개발 내용 ····· 5

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 11

제 1 절 국내기술개발 현황 ····· 11

제 2 절 국외기술개발 현황 ····· 16

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 33

제 1 절 서 언 ····· 33

제 2 절 레디믹스트 관련 기술현황 조사 ····· 35

1. 레디믹스트 관련 국내 품질 규정 ····· 35

2. 레디믹스트 관련 기술 분석 ····· 39

3. 소결론 ····· 46

제 3 절 현장배합 숏크리트의 국내 시공실태 파악 ····· 47

1. 현장배합 숏크리트의 국내외 품질규정 고찰 ····· 47

2. 현장설문조사를 통한 숏크리트 시공실태 및 문제점 파악 ····· 58

3. 실무의견 수렴을 통한 레디믹스트 숏크리트 개발방향 모색 ····· 73

4. 소결론 ····· 79

제 4 절 레디믹스트 숏크리트 재료 고품질화 ····· 81

1. 국내 골재 생산 시스템 조사 ····· 81

2. 숏크리트 재료의 성능 실험 ····· 85

3. 현장배합용 숏크리트 골재의 품질관리 실태 파악 ····· 96

4. 레디믹스트 숏크리트 재료의 품질 선진화를 위한 제안 ····· 102

5. 소결론 ····· 108

제 5 절 레디믹스트 숏크리트 개발 ····· 111
1. 골재 최대치수 변화에 따른 숏크리트의 성능 평가 ····· 112
2. 굵은골재 최대치수 적용에 대한 국내 의견 수렴 ····· 120
3. 레디믹스트 숏크리트 재료분리 최소화 방안 도출 ····· 129
4. 합성섬유 최적 혼입량 도출 ····· 145
5. 레디믹스트 숏크리트 현장적용성 평가 ····· 180
6. 분말형 레디믹스트 숏크리트 최적 배합 도출 ····· 197
7. 소결론 ····· 198
제 6 절 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 개발 ····· 201
1. 산업부산물을 혼합한 숏크리트의 성능평가 ····· 202
2. 고로슬래그 미분말의 특성 및 국내 현황 파악 ····· 216
3. 고로슬래그 미분말의 숏크리트 적용성 평가 ····· 241
4. 고로슬래그 치환율에 따른 레디믹스트 숏크리트 강도특성 ····· 249
5. 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 양생특성 ····· 253
6. 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 현장적용성 평가 ····· 263
7. 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 최적 배합 도출 ····· 304
8. 소결론 ····· 305
제 7 절 다기능 레디믹스트 숏크리트 개발 ····· 307
1. 레디믹스트 숏크리트 다기능 인자 부여 ····· 308
2. 다기능 레디믹스트 숏크리트 초기개발 ····· 331
3. 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장적용성 평가 ····· 343
4. 다기능 레디믹스트 숏크리트 최적 배합 도출 ····· 350
5. 소결론 ····· 351
제 8 절 레디믹스트 숏크리트 장기내구성 평가 ····· 353
1. 숏크리트 장기내구성 고려 인자 파악 ····· 353
2. 건조수축 영향 평가 ····· 377
3. 단일열화인자 평가를 통한 장기내구특성 평가 ····· 381
4. 복합열화시험을 통한 장기내구특성 평가 ····· 393
5. 수은압입시험을 통한 장기내구성 평가 ····· 404
6. 소결론 ····· 425

제 9 절 레디믹스트 숏크리트 공장생산 및 시공 시스템 구축 ····· 428
1. 국내 숏크리트 현장 배치플랜트 조사 ····· 428
2. 기존 레디믹스트 생산 시스템 분석 ····· 437
3. 레디믹스트 숏크리트 규격화 생산 시스템 설계 ····· 448
4. 공장생산 과정의 재료분리 가능성 평가 ····· 457
5. 레디믹스트 숏크리트 시제품 제작 ····· 460
6. 레디믹스트 숏크리트 현장 시공시스템 도출 ····· 462
7. 소결론 ····· 467
제 10 절 레디믹스트 숏크리트 시공성 및 경제성 평가 ····· 469
1. 설계단가 비교를 통한 경제성 평가 ····· 469
2. 현장 시공프로세스 분석 및 최종 경제성 평가 ····· 480
3. 소결론 ····· 503
제 11 절 숏크리트 타설시험기 개발 ····· 506
1. 숏크리트 타설시험기 개발 ····· 506
2. 숏크리트 타설시험기 제작 ····· 521
3. 숏크리트 타설 시험기 적용성 평가 ····· 532
4. 소결론 ····· 537
제 12 절 공정관리 및 시공·품질관리 편람(안) 제안 ····· 538
1. 재료생산 및 공정관리 편람(안) ····· 538
2. 시공 및 품질관리 편람(안) ····· 553
제 13 절 결론 ····· 567

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 585

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 593

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 597

제 7 장 참고문헌 ····· 625

부록

1. 숏크리트 타설시험기 사용 메뉴얼
2. 분말형 레디믹스트 숏크리트 공정관리 및 시공·품질관리 편람(안)

그 림 차 례

그림 2.2.1 숏크리트의 발전단계(영국) ····· 16
그림 2.2.2 국내외 급결제 사용현황 ····· 19
그림 2.2.3 1970년~1994년까지 브라질에서의 숏크리트 소비량(Filho, 1995) ····· 25
그림 2.2.4 Double unite system(Takashi, 1995) ····· 27
그림 2.2.5 강섬유보강 숏크리트의 휨강도 시험 결과(Morgan D. R., 1982) ····· 29
그림 2.2.6 건식공법과 습식공법의 비교(Knut Garshol, 1995) ····· 30
그림 2.2.7 The Roll-Over Shutterbelt 방법 ····· 31
그림 2.2.8 Gliding Formwork ····· 31
그림 3.2.1 분말형 레미탈 제품의 연간 생산량 ····· 41
그림 3.2.2 국내 시멘트 업체의 드라이 모르타르 매출 비중 추이 ····· 42
그림 3.2.3 국외 레디믹스트 관련 기술의 발전 동향 ····· 43
그림 3.2.4 레디믹스트 제품의 해외시장 성장추이 ····· 44
그림 3.3.1 설문 응답 대상현장 ····· 59
그림 3.3.2 설문 응답 대상자의 업무종사기간 ····· 59
그림 3.3.3 숏크리트 타설 거리 분포 ····· 60
그림 3.3.4 숏크리트 타설 두께를 설계서보다 크게 하는 이유 ····· 61
그림 3.3.5 숏크리트 품질 중에서 가장 중요한 항목 ····· 61
그림 3.3.6 숏크리트 리바운드량에 영향을 미치는 요인 ····· 62
그림 3.3.7 국내 건설현장에서의 리바운드량 측정 빈도 ····· 63
그림 3.3.8 숏크리트 리바운드량 감소를 위한 조치 ····· 63
그림 3.3.9 1회 타설량 ····· 63
그림 3.3.10 1회 타설에 소요작업시간 ····· 63
그림 3.3.11 숏크리트 타설 공정 중 가장 많이 소요되는 작업 ····· 64
그림 3.3.12 노즐 및 호스의 막힘과 파손의 가장 큰 원인 ····· 64
그림 3.3.13 국내 숏크리트 장비의 문제점 ····· 65
그림 3.3.14 국내 숏크리트 타설 장비의 노즐직경 분포 ····· 65
그림 3.3.15 숏크리트 장비에서 가장 많이 개조하는 부분 ····· 66
그림 3.3.16 배합설계의 강섬유 혼입량 ····· 67
그림 3.3.17 실제 투입되는 강섬유 혼입량 ····· 67
그림 3.3.18 배합설계보다 강섬유를 많이 혼입하는 이유 ····· 67
그림 3.3.19 강섬유가 갖추어야할 조건 ····· 67
그림 3.3.20 숏크리트 급결제의 국내 사용 분포 ····· 68
그림 3.3.21 현장에서 사용되고 있는 급결제의 문제점 ····· 68
그림 3.3.22 숏크리트 현장에서의 골재최대치수 분포 ····· 69

그림 3.3.23 골재 수분함유량 측정빈도 ····· 69
그림 3.3.24 골재 반입 후 세척작업 유무 ····· 70
그림 3.3.25 골재에 포함된 석분 및 이물질의 영향 ····· 70
그림 3.3.26 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발 필요성 ····· 71
그림 3.3.27 분말형 레디믹스트 숏크리트로 인한 예상 효과 ····· 71
그림 3.3.28 분말형 레디믹스트 숏크리트로 개발로 예상되는 이점 ····· 71
그림 3.3.29 분말형 레디믹스트 숏크리트의 최적 골재최대치수 ····· 71
그림 3.3.30 다기능 숏크리트가 필요한 특성화된 기능 ····· 72
그림 3.4.1 석산의 골재 생산 시스템 ····· 84
그림 3.4.2 석산의 골재 생산 시스템 모습 ····· 89
그림 3.4.3 골재 크기에 따른 슬럼프와 공기량의 변화 ····· 90
그림 3.4.4 골재 크기에 따른 압축강도와 동탄성계수 변화 ····· 90
그림 3.4.5 혼화재의 종류 및 치환량에 따른 슬럼프와 공기량의 변화 ····· 91
그림 3.4.6 혼화재 치환량에 따른 재령별 압축강도 변화 ····· 92
그림 3.4.7 혼화재 치환량에 따른 재령별 동탄성계수 변화 ····· 92
그림 3.4.8 급결제 종류에 따른 재령별 압축강도 변화 ····· 94
그림 3.4.9 X-ray 회절분석결과[(a)alkali aluminate, (b)AF1, (c)AF2] ····· 95
그림 3.4.10 발생지별 잔골재/부순골재의 표층과 심층부의 함수율 차이 ····· 97
그림 3.4.11 발생지별 잔골재 및 부순골재의 입도 분포 ····· 98
그림 3.4.12 발생지별 굵은 골재의 입도 분포 ····· 99
그림 3.4.13 시공현장의 골재 품질 상태 ····· 101
그림 3.4.14 세척 후 골재 석분 및 이물질 모습 ····· 101
그림 3.5.1 골재 최대치수 도출을 위한 현장타설 숏크리트의 모습 ····· 112
그림 3.5.2 숏크리트 슬럼프 시험 모습 ····· 115
그림 3.5.3 압축강도 시험 모습 ····· 115
그림 3.5.4 굵은 골재 크기 및 혼화재 종류에 따른 압축강도 변화 ····· 117
그림 3.5.5 굵은 골재 크기 및 혼화재 종류에 따른 리바운드율 변화 ····· 118
그림 3.5.6 굵은 골재 크기 및 혼화재 종류에 따른 슬럼프 변화 ····· 119
그림 3.5.7 설문 응답 업체 주요 출하 현장 ····· 121
그림 3.5.8 설문 응답자 업무 종사 기간 ····· 121
그림 3.5.9 골재 생산시 최대시간 소요 공정 ····· 122
그림 3.5.10 골재 생산시 최대비용 소요 공정 ····· 122
그림 3.5.11 골재 세척작업 실시 여부 ····· 123
그림 3.5.12 골재 수분함유량 측정 실시 여부 ····· 123
그림 3.5.13 각 골재업체의 주요 생산 품목 ····· 124
그림 3.5.14 0~5mm 골재 납품단가 ····· 124

그림 3.5.15 5~3mm 골재 납품단가 ····· 125
그림 3.5.16 5~25mm 골재 납품단가 ····· 125
그림 3.5.17 숏크리트용 골재 납품사례 ····· 126
그림 3.5.18 숏크리트용 골재 납품시 굵은골재 최대치수(Gmax) ····· 126
그림 3.5.19 8mm 골재 생산 가능 여부 ····· 126
그림 3.5.20 8mm 골재 생산 불가능 사유 ····· 127
그림 3.5.21 8mm 골재 도입시 필요사항 ····· 127
그림 3.5.22 8mm 골재 도입시 적정 생산 단가 ····· 127
그림 3.5.23 콘크리트 재료분리 현상 ····· 129
그림 3.5.24 건조 레디믹스트 숏크리트 골재 조합 입도분포 (유럽통합기준(EFNARC)) ···· 131
그림 3.5.25 건조 레디믹스트 제조공장 공정 프로세스 개략도 ····· 132
그림 3.5.26 분말형 레디믹스트 숏크리트 Pilot plant 생산 과정 ····· 133
그림 3.5.27 각 선별입도 건조사 골재입도분포 ····· 134
그림 3.5.28 분말형 레디믹스트 숏크리트 입도분포 ····· 135
그림 3.5.29 분말형 레디믹스트 숏크리트 톤백생산 채취시 제품입도분포 ····· 137
그림 3.5.30 공정 확인 시험 샘플링 위치 ····· 138
그림 3.5.31 믹서 부분 샘플링 시료 입도분포 ····· 139
그림 3.5.32 분말형 레디믹스트 숏크리트 믹싱후 입도분별 재료 사진 ····· 139
그림 3.5.33 Airbelt 이송간 샘플링 시료 입도분포 ····· 140
그림 3.5.34 BCT 직상차 이송전· 후 부분 샐플링 시료 입도분포 ····· 140
그림 3.5.35 BCT 직상차 이송후 제품 사일로&믹서 시스템에 충전 및 거출 ····· 141
그림 3.5.36 현장 사일로&믹서시스템 충전후 거출시 분말형 숏크리트 입도분포 ····· 141
그림 3.5.37 분말형 레디믹스트 제품 믹서(EIRICH사 Type R19) ····· 143
그림 3.5.38 믹싱시간에 따른 레디믹스트 숏크리트의 입도분포 결과 ····· 144
그림 3.5.39 레디믹스트용 골재 ····· 150
그림 3.5.40 숏크리트의 혼합순서 ····· 154
그림 3.5.41 섬유보강 숏크리트 배합시험 모습 ····· 154
그림 3.5.42 섬유 혼입량 별 슬럼프 감소량(1차시험) ····· 156
그림 3.5.43 CP 계열 압축강도 시험결과 ····· 157
그림 3.5.44 HP 계열 압축강도 시험결과 ····· 158
그림 3.5.45 CV 계열 압축강도 시험결과 ····· 158
그림 3.5.46 CP 계열 휨인성 시험결과 ····· 160
그림 3.5.47 섬유 종류별 휨인성 비교(최고_최저 비교값) ····· 164
그림 3.5.48 섬유 혼입량 별 슬럼프 감소량(2차시험) ····· 168
그림 3.5.49 CP 계열 압축강도 시험결과 ····· 171
그림 3.5.50 HP 계열 압축강도 시험결과 ····· 171

그림 3.5.51 CV 계열 압축강도 시험결과 ····· 172
그림 3.5.52 CP 계열 휨인성 시험결과 ····· 175
그림 3.5.53 CV 계열 휨인성 시험결과 ····· 177
그림 3.5.54 HP 계열 휨인성 시험결과 ····· 178
그림 3.5.55 1차 현장타설 실험 모습 ····· 182
그림 3.5.56 1차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 185
그림 3.5.57 1차 현장타설 실험 배합의 하중-처짐 그래프 ····· 186
그림 3.5.58 2차 현장타설 실험 모습 ····· 189
그림 3.5.59 2차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 190
그림 3.5.60 3차 현장타설 실험 모습 ····· 193
그림 3.5.61 3차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 195
그림 3.6.1 고로슬래그 미분말의 제조과정 ····· 202
그림 3.6.2 고로슬래그 미분말의 활용 현황(일본) ····· 204
그림 3.6.3 현장실험에서 사용된 번들형 강섬유 ····· 208
그림 3.6.4 숏크리트 타설 실험에 사용된 원통형 코어 채취용 몰드(mm) ····· 210
그림 3.6.5 숏크리트 타설부터 압축강도 측정 ····· 211
그림 3.6.6 급결제 종류에 따른 숏크리트의 재령별 압축강도 ····· 214
그림 3.6.7 급결제 종류에 따른 숏크리트의 재령별 강도증진율 ····· 215
그림 3.6.8 고로슬래그 미분말의 제조과정 ····· 217
그림 3.6.9 용도별 철강슬래그 처리 현황(한국철강협회, 2002) ····· 229
그림 3.6.10 슬래그 발생량 및 재활용율(한국철강협회, 2003) ····· 230
그림 3.6.11 슬래그 발생량 현황(한국철강협회, 2005년) ····· 233
그림 3.6.12 슬래그 재활용 현황(한국철강협회, 2005) ····· 233
그림 3.6.13 철강슬래그의 발생공정 및 재활용 ····· 234
그림 3.6.14 EU의 제강슬래그 재활용 현황(한국철강협회, 2002) ····· 235
그림 3.6.15 독일의 철강슬래그 재활용 현황(한국철강협회, 2000) ····· 236
그림 3.6.16 일본의 고로슬래그 재활용 현황(한국철강협회, 2000) ····· 236
그림 3.6.17 용광로와 파이넥스 공법 비교 ····· 238
그림 3.6.18 혼화재 종류 및 치환량에 따른 변화 ····· 247
그림 3.6.19 혼화재에 따른 재령별 압축강도 변화 ····· 248
그림 3.6.20 각 혼화재의 재령별 동탄성계수 변화 ····· 248
그림 3.6.21 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 공시체 제작 ····· 250
그림 3.6.22 고로슬래그 미분말 혼입 재령별 압축강도 변화 ····· 252
그림 3.6.23 Plain 및 고로슬래그 혼입 페이스트 SEM 사진 ····· 258
그림 3.6.24 연구에 사용된 고로슬래그의 화학조성 ····· 259
그림 3.6.25 레디믹스트 및 현장골재사용 숏크리트의 실내시험 압축강도 ····· 265

그림 3.6.26 고로슬래그 분말도별 압축강도 결과 ····· 266
그림 3.6.29 C사 합성섬유 공시체의 하중-처짐 그래프 ····· 267
그림 3.6.30 합성섬유별 레디믹스트 숏크리트 압축강도 결과 ····· 268
그림 3.6.31 1차 현장타설 실험 모습 ····· 270
그림 3.6.32 1차 현장타설 배합의 리바운드율 결과 ····· 272
그림 3.6.33 1차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 274
그림 3.6.34 1차 현장타설 실험 배합의 휨강도 결과 ····· 275
그림 3.6.35 1차 현장타설 실험 배합의 하중-처짐 그래프 ····· 277
그림 3.6.36 알칼리 자극제에 의한 고로슬래그 미분말 입자의 활성 매커니즘 ····· 280
그림 3.6.37 알칼리 활성제 혼입에 따른 압축강도 ····· 283
그림 3.6.38 2차 현장타설 실험 모습 ····· 285
그림 3.6.39 2차 현장타설 실험 배합의 리바운드율 결과 ····· 287
그림 3.6.40 2차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 288
그림 3.6.41 2차 현장타설 실험 배합의 휨강도 ····· 289
그림 3.6.42 3차 현장타설 실험 모습 ····· 292
그림 3.6.43 3차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 294
그림 3.6.44 3차 현장타설실험 배합의 하중-처짐 그래프 ····· 295
그림 3.6.45 4차 현장타설 실험 모습 ····· 299
그림 3.6.46 4차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 300
그림 3.6.47 4차 현장타설 실험 배합의 하중-처짐 그래프 ····· 302
그림 3.7.1 터널 설계 및 시공 흐름도 ····· 309
그림 3.7.2 터널붕락 형태별 모식도 ····· 316
그림 3.7.3 크리프 형태의 터널붕락 ····· 317
그림 3.7.4 터널종류 ····· 320
그림 3.7.5 터널지반의 암종 분류 ····· 320
그림 3.7.6 터널막장의 지하수 유출 정도 ····· 320
그림 3.7.7 터널막장의 절리군 ····· 320
그림 3.7.8 터널막장의 RQD ····· 320
그림 3.7.9 대상터널의 심도 ····· 320
그림 3.7.10 대상터널의 붕락형태 ····· 321
그림 3.7.11 지하수, 붕락형태 및 붕락현장수와의 관계 ····· 321
그림 3.7.12 대상터널의 종류 ····· 322
그림 3.7.13 대상터널의 암석 종류 ····· 322
그림 3.7.14 대상터널의 지하수 유출 정도 ····· 322
그림 3.7.15 대상터널의 절리군 분포 ····· 322
그림 3.7.16 대상터널의 RQD ····· 323

그림 3.7.17 대상터널의 심도 ····· 323
그림 3.7.18 대상터널의 암반 풍화도 ····· 323
그림 3.7.19 대상터널의 절리상태 ····· 323
그림 3.7.20 대상터널의 절리간격 ····· 323
그림 3.7.21 붕락형태 분류 ····· 324
그림 3.7.22 풍화도와 붕락형태 ····· 325
그림 3.7.23 절리군과 붕락형태 ····· 325
그림 3.7.24 터널붕락현장의 암석종류와 RQD ····· 326
그림 3.7.25 암석종류와 붕락형태 ····· 327
그림 3.7.26 시멘트 혼화용 폴리머의 분류 ····· 334
그림 3.7.27 초산비닐 바세테이트(VAVeoVa)의 화학구조 ····· 335
그림 3.7.28 폴리머-시멘트 Comatrix 형성과정 ····· 337
그림 3.7.29 시멘트 수화물상에 있어서 폴리머-필름 형성과정 ····· 337
그림 3.7.30 부착강도 시험모습 ····· 339
그림 3.7.31 염소이온투과시험 ····· 339
그림 3.7.32 재유화형 분말수지 종류별 압축강도 ····· 340
그림 3.7.33 재유화형 분말수지 종류별 부착강도 ····· 341
그림 3.7.34 재유화형 분말수지 혼입 레디믹스트 숏크리트 통과 전하량 ····· 342
그림 3.7.35 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 모습 ····· 345
그림 3.7.36 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 압축강도 ····· 346
그림 3.7.37 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 하중-처짐 그래프 ····· 348
그림 3.7.38 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 공극량 ····· 349
그림 3.8.1 수분이동과 열화인자 이동의 개념 ····· 355
그림 3.8.2 건조과정 중 열화인자의 개념 ····· 355
그림 3.8.3 흡수과정동안의 열화인자의 개념 ····· 355
그림 3.8.4 동결과정 중에서의 수분의 이동 ····· 357
그림 3.8.5 알칼리 프리계 및 변성 실리케이트 급결제를 이용한 숏크리트의 투수 시험 결과 (Concrete Society Technical Report, 1998) ····· 360
그림 3.8.6 백색표면의 XRD 분석결과 ····· 362
그림 3.8.7 백색표면의 DSC 분석결과 ····· 362
그림 3.8.8 황색표면의 XRD 분석결과 ····· 364
그림 3.8.9 황색표면의 DSC 분석결과 ····· 365
그림 3.8.10 황색표면의 XRD 분석결과(현장샘플) ····· 366
그림 3.8.11 황색표면의 DSC 분석결과(현장샘플) ····· 366
그림 3.8.12 시멘트 겔의 세공구조 ····· 369
그림 3.8.13 동결에 의한 세공의 팽창 ····· 369

그림 3.8.14 중성화와 건조수축에 의한 질량감소 ····· 374
그림 3.8.15 상대습도에 따른 건조수축과 중성화 ····· 374
그림 3.8.16 서울 지하철의 CO2 농도 ····· 375
그림 3.8.17 물/시멘트와 골재함량에 따른 건조수축량의 변화 ····· 378
그림 3.8.18 배합수량의 증가에 따른 건조수축량의 변화 ····· 378
그림 3.8.19 길이변화 시험 모습 ····· 378
그림 3.8.20 건조수축 배합 재료 및 공시체 모습 ····· 379
그림 3.8.21 시간에 따른 건조수축량 ····· 380
그림 3.8.22 고로슬래그미분말의 미세구조(SEM ×2000) ····· 384
그림 3.8.23 시험체 제작 모습 ····· 387
그림 3.8.24 동결융해 시험 모습 ····· 387
그림 3.8.25 촉진 탄산화 시험 모습 ····· 388
그림 3.8.26 상대 동탄성계수 측정 결과 ····· 390
그림 3.8.27 상대 동탄성계수 측정 모습 ····· 390
그림 3.8.28 촉진 탄산화 깊이 측정 결과 ····· 392
그림 3.8.29 촉진 탄산화 깊이 측정 모습 ····· 392
그림 3.8.30 내약품성 시험 모습 ····· 394
그림 3.8.31 장기폭로 시험 모습 ····· 395
그림 3.8.32 상대 동탄성계수 측정 결과 ····· 396
그림 3.8.33 탄산화 침투 깊이 (동결융해 후 탄산화) ····· 397
그림 3.8.34 압축강도 (10% CaCl2 용액 침지 후 동결융해 노출) ····· 398
그림 3.8.35 압축강도 (10% Na2SO4 용액 침지 후 동결융해 노출) ····· 399
그림 3.8.36 압축강도 (5% H2SO4 용액 침지 후 동결융해 노출) ····· 399
그림 3.8.37 장기 옥외폭로 시험 압축강도 측정 결과 ····· 401
그림 3.8.38 장기 옥외폭로 시험 압축강도 측정 모습 ····· 401
그림 3.8.39 장기 옥외폭로 시험 휨강도 측정 결과 ····· 403
그림 3.8.40 장기 옥외폭로 시험 휨강도 측정 모습 ····· 403
그림 3.8.41 MIP의 기본 원리 ····· 408
그림 3.8.42 MIP 시험을 위한 시료의 전처리 과정 ····· 409
그림 3.8.43 Poremaster GT ····· 410
그림 3.8.44 MIP 시험 과정 ····· 410
그림 3.8.45 직경에 따른 공극량(배합 RM-P1) ····· 412
그림 3.8.46 직경에 따른 공극의 누적%(배합 RM-P1) ····· 412
그림 3.8.47 직경에 따른 공극량(배합 RM-P2) ····· 413
그림 3.8.48 직경에 따른 공극의 누적%(배합 RM-P2) ····· 413
그림 3.8.49 직경에 따른 공극량(배합 RM-BFS) ····· 414

그림 3.8.50 직경에 따른 공극의 누적%(배합 RM-BFS) ····· 414
그림 3.8.51 직경에 따른 공극량(배합 K) ····· 415
그림 3.8.52 직경에 따른 공극의 누적%(배합 K) ····· 415
그림 3.8.53 직경에 따른 공극량(배합 N) ····· 416
그림 3.8.54 직경에 따른 공극의 누적%(배합 N) ····· 416
그림 3.8.55 배합에 따른 수은 압입량 비교 ····· 418
그림 3.8.56 직경에 따른 공극량 (P-SF) ····· 420
그림 3.8.57 직경에 따른 공극의 누적% (P-SF) ····· 420
그림 3.8.58 직경에 따른 공극량 (RM-HP1) ····· 421
그림 3.8.59 직경에 따른 공극의 누적% (RM-HP1) ····· 421
그림 3.8.60 직경에 따른 공극분포 (RM-HP2) ····· 422
그림 3.8.61 직경에 따른 공극의 누적% (RM-HP2) ····· 422
그림 3.8.62 배합에 따른 수은압입량 비교 ····· 424
그림 3.9.1 설문 응답 대상현장 ····· 429
그림 3.9.2 배치플랜트 설치비용 ····· 429
그림 3.9.3 배치플랜트 생산능력 ····· 429
그림 3.9.4 배치플랜트 설치 소요기간 ····· 429
그림 3.9.5 배치플랜트 설치경과기간 ····· 430
그림 3.9.6 숏크리트 생산비용(원/m3) ····· 430
그림 3.9.7 빙설에 노출로 인한 상실 ····· 433
그림 3.9.8 골재유입 과다로 인한 상실 ····· 433
그림 3.9.9 골재유입 과다로 인한 혼입 ····· 433
그림 3.9.10 스크린 기능이 상실된 경우 ····· 433
그림 3.9.11 골재 잔량으로 인한 문제 ····· 434
그림 3.9.12 바닥의 토사로 인한 혼입 ····· 434
그림 3.9.13 골재저장소 외기노출 ····· 435
그림 3.9.14 골재저장소 공간확장 문제 ····· 435
그림 3.9.15 골재 낙반시설 설치 ····· 435
그림 3.9.16 낙반시설 미설치로 인한 손실 ····· 435
그림 3.9.17 혼합믹서 내부 상태불량 ····· 436
그림 3.9.18 골재저장소 상태불량 ····· 436
그림 3.9.19 탑형 배치 플랜트의 구성 ····· 438
그림 3.9.20 급경사 컨베이어용 벨트 ····· 439
그림 3.9.21 수직 컨베이어 시스템 ····· 439
그림 3.9.22 회전 노즐 셔틀 세척 ····· 442
그림 3.9.23 로봇세척 ····· 442

그림 3.9.24 슬럼프와 전동기 부하전류와의 관계 ····444
그림 3.9.25 에지테이터 드럼의 구조 ····447
그림 3.9.26 건조 레디믹스트 생산 공정 ····449
그림 3.9.27 건조 레디믹스트 생산 공정 사진 ····450
그림 3.9.28 레디믹스트 숏크리트 생산 시스템 설계(안) ····450
그림 3.9.29 레디믹스트 숏크리트 제조공정 흐름도 ····455
그림 3.9.30 유럽의 건조 레디믹스트 제조 공장라인 및 적용골재 모습 ····458
그림 3.9.31 제품 제조공정에서의 재료분리 발생 가능 구간 ····459
그림 3.9.32 레디믹스트 숏크리트 시제품 출시 모습 ····461
그림 3.9.33 레디믹스트 숏크리트의 현장 시공시스템(안) ····462
그림 3.9.34 일체형 사일로 믹서 ····466
그림 3.10.1 레디믹스트 숏크리트 단계별 시공개요 ····481
그림 3.10.2 NATM 터널 시공프로세스 ····483
그림 3.10.3 현장 배치플랜트 활용시 시공프로세스 ····485
그림 3.10.4 전용장비(일체형 사일로 믹서) 활용시 시공프로세스 분석 ····485
그림 3.10.5 터널전체 예정(개략)공정표 ····488
그림 3.10.6 숏크리트 타설공사 세부공정계획 ····488
그림 3.10.7 배치플랜트 평면계획(예) ····490
그림 3.10.8 골재적치장 배치계획(예) ····490
그림 3.10.9 경제성 분석 프로세스 ····492
그림 3.10.10 운반거리변화에 따른 공사비 변화 ····496
그림 3.10.11 조골재 단가변동에 따른 공사비 변화 ····496
그림 3.10.12 성능평가 수행절차 ····499
그림 3.10.13 평가항목 결정을 위한 계층구조 ····499
그림 3.10.14 성능분석 결과 ····501
그림 3.10.15 비용분석 결과 ····501
그림 3.10.16 가치분석 결과 ····502
그림 3.11.1 ARM AMV 7450 모습 ····509
그림 3.11.2 JSP 840 ····510
그림 3.11.3 SPRAYMEC 9140 ····511
그림 3.11.4 SSM20PLUS의 액상타입 및 분말타입 ····511
그림 3.11.5 SSM20PLUS 외관도 ····512
그림 3.11.6 AL 500 ····512
그림 3.11.7 PAS 307 D/E6 모습과 작업반경도 ····513
그림 3.11.8 동력인출 및 유체발생장치 설계도면 ····516
그림 3.11.9 콘크리트 펌프장치 설계도면 ····516

그림 3.11.10 호퍼 및 에스벨브 절환장치 설계도면 ····517
그림 3.11.11 유압 컨트롤 블록 설계도면 ····518
그림 3.11.12 숏크리트 타설시험기 NCPT-10의 제작 도면 ····522
그림 3.11.13 NCPT-10 장치구성도 ····524
그림 3.11.14 NCPT-10 펌프시스템 ····525
그림 3.11.15 호퍼 ····526
그림 3.11.16 교반장치 ····526
그림 3.11.17 펌프 시스템 ····526
그림 3.11.18 동력 엔진 ····526
그림 3.11.19 워터 펌프 ····527
그림 3.11.20 급결제 펌프 ····527
그림 3.11.21 플로우 메터 ····527
그림 3.11.22 분사장치(노즐) ····527
그림 3.11.23 물 탱크 ····528
그림 3.11.24 급결제 탱크 ····528
그림 3.11.25 구동형식 ····528
그림 3.11.26 아웃 트리거 ····528
그림 3.11.27 숏크리트 타설시험기 NCPT-10 본체 모습 ····529
그림 3.11.28 타설시운전 위한 레디믹스트 재료 준비(골재 및 유동화재) ····529
그림 3.11.29 재료 믹싱 및 타설시험기의 호퍼 투입 ····530
그림 3.11.30 숏크리트 타설전 물 분사 ····530
그림 3.11.31 재료 믹싱 및 타설시험기의 호퍼 투입 ····530
그림 3.11.32 레디믹스트 숏크리트 타설 모습 ····533
그림 3.11.33 압축강도 시험결과 비교 ····535
그림 3.11.34 휨인성 시험결과 비교 ····536
그림 3.12.1 시험용 패널 규격 ····562
그림 3.12.2 휨인성 시험시 중앙점 순수 처짐 측정장치 ····565
그림 3.12.3 휨인성을 구하기 위한 기준 처짐 지점 ····566

표 차 례

표 2.1.1 숏크리트 관련 국내 연구동향 ····· 13
표 2.1.2 숏크리트 관련 국내 연구현황 ····· 14
표 2.2.1 숏크리트 보강재 비교 ····· 17
표 2.2.2 국내외 급결제 사용현황 ····· 18
표 2.2.3 숏크리트 관련 기술 동향 ····· 20
표 2.2.4 유럽 숏크리트 발전 동향 및 향후 예상(Clements, 2002) ····· 20
표 2.2.5 국가별 한해 숏크리트 시공량의 분포(ITA, 1996) ····· 21
표 2.2.6 국가별 습식 및 건식 숏크리트 사용 비율(ITA, 1996) ····· 22
표 2.2.7 국가별 숏크리트 노즐의 운용 방법(ITA, 1996) ····· 22
표 2.2.8 터널공사에 타설된 숏크리트(Filho, 1995) ····· 25
표 2.2.9 이탈리아의 숏크리트 생산량의 비교(Geol, 1995) ····· 28
표 3.2.1 재래식 방법과 공장배합 방법 기술 비교 ····· 39
표 3.2.2 국내 레디믹스트 기술 수준의 변천과정 ····· 40
표 3.2.3 국내 레디믹스트 제품의 종류 및 특성 ····· 40
표 3.2.4 각 업체별 분말형 레디믹스트 모르타르의 생산규모 현황(2005년 기준) ····· 41
표 3.2.5 레미콘 및 레미탈용 제품에 공급되는 시멘트량 ····· 42
표 3.2.6 중국의 드라이 모르타르 현황(2005년 기준) ····· 44
표 3.3.1 국내 숏크리트 강도기준 ····· 48
표 3.3.2 한국도로공사 숏크리트 관련 품질기준(2002) ····· 48
표 3.3.3 급결제 품질규격(KCI-SC-102, JSCE-1986) ····· 49
표 3.3.4 숏크리트용 급결제의 품질기준(응결시간) ····· 50
표 3.3.5 국내외 숏크리트용 급결제의 품질기준(압축강도) ····· 50
표 3.3.6 국내외 숏크리트용 급결제의 허용 첨가량 ····· 51
표 3.3.7 숏크리트 압축강도 등급 및 현장강도 기준(EFNARC, 1996) ····· 52
표 3.3.8 숏크리트 휨강도 등급(EFNARC, 1996) ····· 52
표 3.3.9 숏크리트 잔류강도 Class 기준(EFNARC, 1996) ····· 53
표 3.3.10 숏크리트 잔류강도 Level 정의(prEN 14487-1, 2002) ····· 53
표 3.3.11 Sprayed Concrete Association(1990)의 숏크리트 압축강도 등급 ····· 53
표 3.3.12 오스트리아 품질기준의 숏크리트 강도 등급 ····· 54
표 3.3.13 핀란드 숏크리트 품질지침의 숏크리트 강도등급 ····· 54
표 3.3.14 노르웨이 숏크리트 품질기준의 압축강도 및 인장강도 등급 ····· 55
표 3.3.15 타설 전후의 강도등급(Norwegian Concrete Association 1992) ····· 55
표 3.3.16 일본 숏크리트 강도 기준 ····· 55

표 3.3.17 일본 고품질 강섬유보강 숏크리트 기준(싱글쉘 터널, 2000) ····· 55
표 3.3.18 유럽의 숏크리트 발전 동향 및 향후 예상 ····· 56
표 3.3.19 골재에 대한 추천 입도 ····· 56
표 3.3.20 숏크리트 급결제에 대한 추천사항 ····· 57
표 3.3.21 설문조사 응답 업체 ····· 59
표 3.3.22 숏크리트 골재최대치수에 대한 국내외 품질기준 ····· 74
표 3.3.23 일본의 고로슬래그 미분말 응용제품 조달실적 ····· 77
표 3.3.24 실외 폭로 중성화실험 결과 ····· 77
표 3.3.25 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 단가 절감 비교표 ····· 77
표 3.4.1 국내 골재 부존량 (한국지질자원연구원, 2003) ····· 81
표 3.4.2 연도별 잔골재 공급량(건교부, 2004) ····· 81
표 3.4.3 시멘트의 물리적 성질 ····· 85
표 3.4.4 시멘트의 화학적 성분 및 광물 조성 ····· 85
표 3.4.5 실리카 흄 및 고로슬래그의 물리적 특성 ····· 86
표 3.4.6 실리카 흄 및 고로슬래그의 화학적 성분 ····· 86
표 3.4.7 잔골재의 물리적 특성 ····· 87
표 3.4.8 굵은 골재의 최대 치수에 따른 물리적 특성 ····· 87
표 3.4.9 골재 최대 치수에 따른 콘크리트 시험(Lab. Test) ····· 88
표 3.4.10 혼합재의 종류 및 치환량에 따른 콘크리트 시험(Lab. Test) ····· 88
표 3.4.11 급결제의 종류에 따른 페이스트 및 모르타르 시험 ····· 88
표 3.4.12 실험 배합 조건 및 변수 ····· 89
표 3.4.13 급결제의 기초 물성 평가 ····· 93
표 3.4.14 길모어침에 의한 페이스트의 응결 시간 ····· 93
표 3.4.15 발생지별 잔골재 및 부순골재의 표면수 ····· 97
표 3.4.16 발생지별 잔골재 및 부순골재의 물리적 특성 ····· 98
표 3.4.17 발생지별 굵은 골재의 물리적 특성 ····· 101
표 3.4.18 숏크리트용 재료로서 고로슬래그 미분말에 대한 추천 방안 ····· 103
표 3.4.19 숏크리트용 실리카 흄에 대한 규격화 방안 ····· 103
표 3.4.20 숏크리트에 사용되는 시멘트에 대한 규정 시방배합표 ····· 105
표 3.4.21 국내의 골재에 대한 추천 입도(KS F 2566) ····· 106
표 3.4.22 국외의 골재에 대한 추천 입도 ····· 106
표 3.4.23 콘크리트용 굵은 골재와 모래에 대한 규정 ····· 107
표 3.5.1 골재 최대치수 도출을 위한 현장실험의 실험 요소 ····· 112
표 3.5.2 골재 최대치수 도출을 위한 현장실험 배합표 ····· 113
표 3.5.3 현장실험 시험항목 ····· 115
표 3.5.4 골재최대치수 변화에 따른 압축강도/슬럼프/리바운드율 결과 ····· 116

표 3.5.5 설문조사 응답 업체 ····· 121
표 3.5.6 재료분리의 원인 ····· 130
표 3.5.7 숏크리트 골재의 입도분포 (EFNARC, 1996) ····· 131
표 3.5.8 각 선별입도 건조 입도분포율 ····· 134
표 3.5.9 파일롯 플랜트 생산 적용 Test 배합비 ····· 135
표 3.5.10 파일롯 플랜트 생산제품 믹서 배치별 입도분석 결과-1 ····· 136
표 3.5.11 파일롯 플랜트 생산제품 믹서 배치별 입도분석 결과-2 ····· 137
표 3.5.12 분말형 레디믹스트 숏크리트 톤백생산 채취시 제품입도분포(M : mesh) ····· 137
표 3.5.13 분말형 레디믹스트 숏크리트 생산 시험조건 ····· 138
표 3.5.14 분말형 레디믹스트 숏크리트 입도분석을 위한 샘플링 ····· 138
표 3.5.15 섬유보강재에 따른 특성비교 ····· 147
표 3.5.16 숏크리트 보강재 비교 ····· 147
표 3.5.17 시멘트의 물리적 성질 ····· 148
표 3.5.18 레디믹스트용 골재 혼입량(kg/m3) ····· 149
표 3.5.19 [PNS-나프탈렌계]/PNS-Naphthalene type ····· 151
표 3.5.20 실험에 사용된 보강섬유의 종류 및 특성 ····· 151
표 3.5.21 합성섬유 혼입량 시험 인자 및 수준(1차시험) ····· 152
표 3.5.22 합성섬유 혼입량 시험 배합표(1차시험) ····· 153
표 3.5.23 골재 크기에 의한 구분 ····· 153
표 3.5.24 슬럼프 시험결과 ····· 155
표 3.5.25 섬유 종류별 압축강도 시험결과 ····· 157
표 3.5.26 섬유 종류별 휨강도 시험결과 ····· 159
표 3.5.27 합성섬유 혼입량 시험 인자 및 수준(2차시험) ····· 165
표 3.5.28 합성섬유 혼입량 시험 배합표(2차시험) ····· 166
표 3.5.29 슬럼프 시험결과 ····· 167
표 3.5.30 섬유 종류별 압축강도 시험결과 ····· 170
표 3.5.31 섬유 종류별 휨강도 시험결과 ····· 173
표 3.5.32 합성섬유 보강 숏크리트 배합표 ····· 180
표 3.5.33 합성 섬유별 휨, 등가휨강도, 휨인성지수 ····· 181
표 3.5.34 1차 현장타설 실험 배합표 ····· 182
표 3.5.35 1차 현장타설 실험 배합의 리바운드율 결과 ····· 184
표 3.5.36 1차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 184
표 3.5.37 1차 현장타설 실험 배합의 휨강도, 등가휨강도, 휨인성지수 ····· 186
표 3.5.38 2차 현장타설 실험 배합표 ····· 188
표 3.5.39 2차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 190
표 3.5.40 2차 현장타설 실험 배합의 휨강도, 등가휨강도, 휨인성지수 ····· 191

표 3.5.41 3차 현장타설 실험 배합표 ····· 193
표 3.5.42 3차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 195
표 3.5.43 3차 현장타설 실험 배합의 휨강도, 등가휨강도, 휨인성지수 ····· 196
표 3.5.44 분말형 레디믹스트 숏크리트 최적 배합 ····· 197
표 3.5.45 분말형 레디믹스트 숏크리트 최적 배합 ····· 200
표 3.6.1 고로슬래그 미분말의 사용 용도에 따른 치환율 범위 ····· 203
표 3.6.2 콘크리트용 고로슬래그 미분말의 규격(KS F 2563, 1997) ····· 205
표 3.6.3은 고로슬래그 미분말의 품질 ····· 205
표 3.6.4 고로슬래그 숏크리트 성능 평가를 위한 현장실험의 실험 요소 ····· 206
표 3.6.5 고로슬래그 미분말의 화학조성 및 물리적 특성 ····· 207
표 3.6.6 실리카흄의 화학조성 및 물리적 특성 ····· 207
표 3.6.7 플라이 애쉬의 화학조성 및 물리적 특성 ····· 207
표 3.6.8 현장실험에 사용된 숏크리트 강섬유의 특징 ····· 208
표 3.6.9 고로슬래그 숏크리트 성능 평가를 위한 현장실험 배합표 ····· 209
표 3.6.10 현장실험 시험항목 ····· 211
표 3.6.11 고로슬래그의 용도 ····· 217
표 3.6.12 고로슬래그 미분말의 사용 용도에 따른 치환율 범위 ····· 218
표 3.6.13 고로슬래그 미분말의 물리적 특성 ····· 219
표 3.6.14 고로슬래그 미분말의 화학적 특성 ····· 219
표 3.6.15 보통포틀랜드 시멘트의 화학적 특성 ····· 219
표 3.6.16 국내·외 고로슬래그 미분말 사용 및 규격화 현황 ····· 222
표 3.6.17 국외 고로슬래그 미분말의 규격 ····· 223
표 3.6.18 국내 고로슬래그 미분말의 규격(KS F 2563, 1997) ····· 224
표 3.6.19 고로슬래그 미분말의 품질 ····· 224
표 3.6.20 국내 철강 지표 ····· 229
표 3.6.21 슬래그 발생량 및 재활용율(2003) ····· 230
표 3.6.22 주요 용도별 처리내역(한국철강협회, 2003) ····· 231
표 3.6.23 국내 슬래그 발생량 및 처리현황(단위 : 톤) ····· 232
표 3.6.24 국내 제강슬래그 및 조강생산량(단위 : 톤) ····· 232
표 3.6.25 독일의 슬래그 발생량(한국철강협회, 2000) ····· 235
표 3.6.26 실외 폭로 중성화실험 결과 ····· 243
표 3.6.27 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 단가 절감 비교표(안) ····· 243
표 3.6.28 시멘트 물리적 특성 ····· 244
표 3.6.29 시멘트 화학적 특성 ····· 244
표 3.6.30 실리카 흄 및 고로슬래그 미분말 물리적 특성 ····· 245
표 3.6.31 실리카 흄 및 고로슬래그 미분말 화학적 특성 ····· 245

표 3.6.32 혼화재 종류별 치환량에 따른 배합표 ····· 245
표 3.6.33 조건별 실험방법 ····· 246
표 3.6.34 고로슬래그 미분말 치환 배합표 ····· 249
표 3.6.35 고로슬래그 미분말 혼입 재령별 압축강도 ····· 252
표 3.6.36 슬래그와 시멘트간의 화학적 차이점 ····· 256
표 3.6.37 슬래그 혼합 시멘트의 반응 생성물 ····· 257
표 3.6.38 국내외 용출시험 방법 ····· 261
표 3.6.39 분석 및 실험에 사용된 시약 ····· 261
표 3.6.40 분석 및 실험기기 ····· 262
표 3.6.41 용출시험 결과 ····· 262
표 3.6.42 레디믹스트 골재와 현장골재사용 숏크리트 배합표 ····· 264
표 3.6.43 레디믹스트 및 현장골재사용 숏크리트의 실내시험 압축강도 결과 ····· 264
표 3.6.44 고로슬래그 분말도별 레디믹스트 숏크리트 배합 ····· 265
표 3.6.45 고로슬래그 분말도별 압축강도 결과 ····· 266
표 3.6.46 합성섬유별 레디믹스트 숏크리트 배합표 ····· 267
표 3.6.47 합성섬유별 휨, 등가휨강도, 휨인성 시험 결과 ····· 267
표 3.6.48 합성섬유별 레디믹스트 숏크리트 압축강도 결과 ····· 268
표 3.6.49 1차 현장타설 실험 배합표 ····· 269
표 3.6.50 1차 현장타설 실험 배합의 리바운드율 결과 ····· 272
표 3.6.51 1차 현장타설 실험 배합의 압축강도 결과 ····· 273
표 3.6.52 1차 현장타설 실험 배합의 휨강도 결과 ····· 275
표 3.6.53 1차 현장타설 실험 배합의 휨, 등가휨강도, 휨인성지수 ····· 276
표 3.6.54 알칼리활성제 및 합성섬유 보강 숏크리트 배합표 ····· 282
표 3.6.55 알칼리 활성제 혼입에 따른 압축강도 ····· 282
표 3.6.56 2차 현장타설 실험 배합표 ····· 284
표 3.6.57 2차 현장타설 실험 배합의 리바운드율 결과 ····· 286
표 3.6.58 2차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 288
표 3.6.59 2차 현장타설 실험 배합의 휨강도, 등가휨강도, 휨인성지수 ····· 289
표 3.6.60 3차 현장타설 실험 배합표 ····· 291
표 3.6.61 3차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 293
표 3.6.62 3차 현장타설 실험 배합의 휨강도, 등가휨강도, 휨인성지수 ····· 295
표 3.6.63 4차 현장타설 실험 배합표 ····· 298
표 3.6.64 4차 현장타설 실험 배합의 압축강도 ····· 300
표 3.6.65 4차 현장타설 실험 배합의 휨강도, 등가 휨강도, 휨인성지수 ····· 301
표 3.6.66 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 최적 배합 ····· 304
표 3.6.67 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 최적 배합 ····· 306

표 3.7.1 국외터널 조사 자료에 적용되었던 지반조사 분류(Cecil, 1964) ····· 319
표 3.7.2 재유화형 분말수지 혼입 배합표 ····· 338
표 3.7.3 재유화형 분말수지 종류별 압축강도(단위 : MPa) ····· 340
표 3.7.4 재유화형 분말수지 종류별 부착강도 ····· 341
표 3.7.5 재유화형 분말수지 혼입 레디믹스트 숏크리트 통과 전하량 ····· 342
표 3.7.6 ASTM에서 제시한 염소이온 투과 평가 기준 ····· 342
표 3.7.7 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 배합표 ····· 344
표 3.7.8 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 압축강도 ····· 346
표 3.7.9 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설실험 휨강도, 등가휨강도, 휨인성지수 ····· 347
표 3.7.10 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 공극량 비교 ····· 349
표 3.7.11 다기능 레디믹스트 숏크리트 최적 배합 ····· 350
표 3.7.12 다기능 레디믹스트 숏크리트 최적 배합 ····· 352
표 3.8.1 동결융해에 따른 숏크리트 내구성(Morgan et al, 1989) ····· 372
표 3.8.2 동결융해에 따른 숏크리트 내구성 2 (Morgan et al. 1989) ····· 372
표 3.8.3 지하철 구조물의 중성화 깊이 ····· 376
표 3.8.4 건조수축실험 배합설계표 ····· 379
표 3.8.5 4주 경과시 건조수축량 ····· 380
표 3.8.6 시멘트의 물리적 성질 ····· 381
표 3.8.7 시멘트의 화학적 성분 및 광물 조성 ····· 382
표 3.8.8 레디믹스트용 골재 혼입량(Kg/㎥) ····· 382
표 3.8.9 현장타설실험 사용 고로슬래그 미분말의 특성 ····· 383
표 3.8.10 고로슬래그 미분말의 물리적 특성 ····· 384
표 3.8.11 플라이애시의 물리·화학적 특성 ····· 385
표 3.8.12 나프탈렌계 고성능 유동화제 ····· 385
표 3.8.13 콘크리트 배합표 (Kg/㎥) ····· 386
표 3.8.14 상대동탄성계수 ····· 389
표 3.8.15 탄산화깊이(mm) ····· 391
표 3.8.16 콘크리트 배합표 (Kg/㎥) ····· 393
표 3.8.17 상대동탄성계수 ····· 396
표 3.8.18 탄산화깊이 (동결융해 후 탄산화) ····· 397
표 3.8.19 압축강도 (10% CaCl2 용액 침지 후 동결융해 노출) ····· 398
표 3.8.20 압축강도 (10% Na2SO4 용액 침지후 동결융해 노출) ····· 398
표 3.8.21 압축강도 (5% H2SO4 용액 침지 후 동결융해 노출) ····· 399
표 3.8.22 시험체의 압축강도 시험 결과 ····· 400
표 3.8.23 시험체의 휨강도 시험결과 ····· 402
표 3.8.24 공극 크기와 특성에 관한 요약 (Uchikawa, 1990) ····· 405

표 3.8.25 수화된 시멘트 페이스트의 공극 크기의 분류 (Mindess 등) ····· 406
표 3.8.26 수화된 페이스트에 대한 공극 크기의 영향 (Mindess 등) ····· 406
표 3.8.27 1차 수은압입시험 배합표 ····· 411
표 3.8.28 배합별 공극 분포 비교 ····· 418
표 3.8.29 2차 수은압입시험 배합표 ····· 419
표 3.8.30 배합별 공극 분포 비교 ····· 423
표 3.9.1 설문조사 응답업체 ····· 429
표 3.9.2 현장 배치플랜트 조사항목 ····· 432
표 3.9.3 믹서 특징 비교 ····· 441
표 3.9.4 트럭 에지테이터 보유현황 ····· 446
표 3.9.5 골재 인수검사의 품질 기준 ····· 451
표 3.9.6 골재 건조 선별 및 저장작업 설비 ····· 452
표 3.9.7 골재 건조 공정관리 기준 ····· 452
표 3.9.8 레디믹스트 제조공정 검사항목 ····· 453
표 3.9.9 레디믹스트 숏크리트 원재료 계량, 혼합 및 제품 저장 작업설비 ····· 453
표 3.9.10 레디믹스트 숏크리트 제품검사 ····· 454
표 3.9.11 레디믹스트 숏크리트 제품 포장 및 저장 작업설비 ····· 454
표 3.9.12 레디믹스트 숏크리트 제품 제조공정 품질관리 체계도 ····· 456
표 3.9.13 레디믹스트 숏크리트 시제품 생산 배합비 ····· 460
표 3.9.14 숏크리트 시공 시스템 개선안 ····· 464
표 3.10.1 숏크리트 설계단가 산출조건 ····· 469
표 3.10.2 현장배합용 숏크리트 설계단가 ····· 470
표 3.10.3 분말형 레디믹스트 숏크리트 설계단가 ····· 474
표 3.10.4 분말형 레디믹스트 숏크리트의 설계단가 증감사유 ····· 477
표 3.10.5 현장타설 숏크리트와의 시공프로세스 비교·분석 ····· 481
표 3.10.6 NATM 터널 주요 공종별 작업 분석 ····· 483
표 3.10.7 레디믹스트 숏크리트 시공프로세스 특징 ····· 486
표 3.10.8 분석터널 전체현황 ····· 487
표 3.10.9 NATM 구간 설계패턴 ····· 487
표 3.10.10 현장 배치플랜트 설치에 따른 자원 소요량 ····· 489
표 3.10.11 현장부지 활용예시 ····· 490
표 3.10.12 숏크리트 버력처리량 변경(리바운드량 평균 4%) ····· 492
표 3.10.13 레디믹스트 숏크리트 생산단가 변경(평균 운반거리 적용) ····· 493
표 3.10.14 도로 터널 숏크리트 단위공사비 ····· 493
표 3.10.15 철도 터널 숏크리트 단위 공사비 ····· 494
표 3.10.16 지하철 터널 숏크리트 단위 공사비 ····· 494

표 3.10.17 현장 배치플랜트 설치 및 철거 ····· 495
표 3.10.18 도로 터널 사례 현장의 항목별 공사비 비교표 ····· 497
표 3.10.19 철도 터널 사례 현장의 항목별 공사비 비교표 ····· 498
표 3.10.20 지하철 터널 사례 현장의 항목별 공사비 비교표 ····· 498
표 3.10.21 AHP 분석 결과 매트릭스 ····· 500
표 3.10.22 성능분석 결과 ····· 500
표 3.11.1 급결제 착안점 ····· 507
표 3.11.2 숏크리트 건 및 장비 착안점 ····· 508
표 3.11.3 숏크리트 타설시험기 세부장치에 대한 설계 내용 ····· 519
표 3.11.4 숏크리트 타설시험기 NCPT-10의 기본 제원 ····· 523
표 3.11.5 숏크리트 타설 시험기 적용 배합표 ····· 532
표 3.11.6 압축강도 시험결과 비교표 ····· 534
표 3.11.7 휨인성 시험결과 비교표 ····· 535
표 3.12.1 원재료 작업설비 ····· 541
표 3.12.2 원재료 작업명, 작업방법 및 작업조건 ····· 542
표 3.12.3 원재료 공정 검사 및 관리 ····· 543
표 3.12.4 선별 작업설비 ····· 544
표 3.12.5 선별 작업명, 작업방법 및 작업조건 ····· 544
표 3.12.6 선별 공정관리 ····· 545
표 3.12.7 배합 작업설비 ····· 545
표 3.12.8 배합 작업명, 작업방법 및 작업조건 ····· 546
표 3.12.9 배합 공정 검사 및 관리 ····· 547
표 3.12.10 포장 작업설비 ····· 547
표 3.12.11 포장 작업명, 작업방법 및 작업조건 ····· 548
표 3.12.12 포장 공정 검사 및 관리 ····· 549
표 3.12.13 골재최대치수 10mm에 사용되는 추천 입도분포(도로공사 표준시방서) ····· 550
표 3.12.14 골재최대치수 8mm에 사용되는 추천 입도분포(EFNARC 참고) ····· 550
표 3.12.15 분말형 레디믹스트 숏크리트 구분 ····· 554
표 3.12.16 배합별 분말형 레디믹스트 숏크리트 배합비(예시) ····· 555
표 3.12.17 타설 장비의 검사항목 및 검사내용 ····· 555
표 3.12.18 일반 분말형 레디믹스트 숏크리트 품질기준 ····· 557
표 3.12.19 요구강도별 분말형 레디믹스트 숏크리트(KS F 2781 및 터널설계기준) ····· 557
표 3.12.20 한국도로공사 숏크리트 관련 품질기준(2002) ····· 558
표 3.12.21 급결제를 혼입한 시험 모르타르의 압축강도 품질기준(KS F 2782) ····· 558
표 3.12.22 급결제 혼입 페이스트의 응결시간 품질기준(KS F 2782) ····· 558
표 3.12.23 국내외 숏크리트용 급결제의 품질기준(압축강도) ····· 559
표 3.12.24 숏크리트용 급결제의 품질기준(응결시간) ····· 559

표 3.12.25 유해중금속 용출 기준(폐기물관리법 시행규칙[별표1]) ····· 566
표 4.1.1 연구개발목표별 계획대비 달성도 ····· 586

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성

숏크리트는 굴착 직후 발생하는 원지반의 초기변위를 제어하고 풍화 방지를 통해 굴착면의 안정을 도모하기 위한 구조물로서, 최근 들어 구조물의 장기적인 사용성과 안전성의 개념에서 그 역할이 매우 중요하게 부각되고 있다. 터널 분야에서는 NATM(New Austrian Tunnelling Method : 이하 NATM) 공법이 획기적인 공법으로 인정받게 되면서, 대부분의 터널에서 NATM 개념을 기본으로 시공되고 있다. 재래식 터널공법과 비교하여 NATM 공법의 가장 큰 특징은 지보재로서 Steel Rib, Rock Bolt 및 숏크리트를 사용함으로써 지반의 이완을 억제하여 원지반의 지보능력을 최대한 활용한다는 점이다. 1970년대 중반 이후 지하철 건설로 인한 지하공간의 활용과 도로, 철도 등의 건설로 인해 대단면 터널공사가 활발하게 이루어졌고, 이러한 NATM 공법의 도입 및 활용과 연계되어 숏크리트 관련 기술도 상당한 발전을 이루었다. 그러나 아직까지 국내 숏크리트 관련 기술은 국가적인 제도의 미비와 재료 단가의 부담 및 시공현장에서의 의식 부족 등으로 선진국에 비해 상당히 낮은 수준이다.

국외에서는 2차 라이닝의 대체나 숏크리트의 장기적인 거동 및 내구성의 관점에서 39.2~58.8MPa에 이르는 고강도 숏크리트가 일반적으로 시공되고 있으나, 국내의 경우 숏크리트의 설계기준강도가 설계, 시공상의 문제점 및 품질관리의 부족 등으로 인해 20.58MPa 내외의 저강도에 머무르고 있다. 국외의 새로운 숏크리트 기술 중에서 숏크리트의 고강도화와 장기내구성 향상을 위해 적용되고 있는 일반적인 방법은 고품질 혼화재와 고성능 급결제를 사용하는 것이다. 고품질 혼화재로는 숏크리트의 품질을 향상시키고 고강도화 및 장기강도 저하를 방지하는 실리카 흄, 플라이 애쉬 및 고로슬래그 등이 많이 적용되고 있고, 고성능 급결제로는 기존 알칼리성 급결제가 가지고 있는 장기강도 저하와 인체에 유해한 문제를 해결할 수 있는 알칼리 프리계 급결제와 시멘트광물계 급결제가 많이 사용되고 있다.

그러나 국외의 향상된 숏크리트 공법 및 기술은 단순히 혼화재 및 급결제의 개선

만을 통해 이루어진 것은 아니다. 가장 중요한 숏크리트용 골재에 대해 골재 품질 개선, 규격화된 입도 관리 및 현장 배합에서의 확실한 품질관리가 선행되어 있었고, 여기에 추가적인 고품질 혼화재와 고성능 급결제가 더하여져서 고성능 및 고내구성 숏크리트의 타설, 싱글쉘 라이닝 공법의 시공 및 국가적인 차원의 품질관리 규준의 확보 등이 가능할 수 있었다.

지금까지 국내에서도 숏크리트의 성능개선 및 품질 향상을 위해 많은 연구들이 수행되어 왔었다. 고품질 혼화재인 실리카 흄의 특성에 대한 연구(장동일 등, 1998), 실리카 흄을 적용한 숏크리트에 대한 실험적인 연구(백신원 등, 1996) 및 새로운 급결제를 적용하여 고품질 숏크리트를 개발하고자 하는 연구(박해균 등, 2001) 등에서는 고품질 혼화재를 적용하여 숏크리트의 고강도화와 장기내구성 향상을 위한 방법을 연구하였고, 고성능 급결제를 적용하여 숏크리트의 초기강도 저하를 막고 품질 향상을 위한 방법을 모색하였었다. 또한, 강섬유보강 숏크리트의 휨강도 및 휨인성을 향상시킬 수 있는 연구들도 꾸준히 진행되어 왔었다(한국도로공사, 2001 ; SK건설, 2003). 그러나 이러한 연구들은 숏크리트의 품질 문제를 급결제 및 혼화재의 문제로만 국한시켜 가장 근본적인 숏크리트 재료의 품질 문제는 간과하는 결과를 가져왔다. 실제적으로는 숏크리트 사용 재료의 품질 저하에 따른 숏크리트 품질 저하가 더 큰 요인으로 작용하고 있는 것이다.

현재 국내 시공현장에서 사용되고 있는 현장배합 숏크리트의 문제점을 살펴보면, 숏크리트용 골재만을 살펴봐도 굵은골재 최대치수의 부정확을 시작으로 골재 토립분 및 석분토의 과다 함량, 입도 불량, 함수율의 부정확, 편장석의 과다 함량, 조립률의 불량 및 규격화된 골재 품질 규준의 미비 등 많은 문제점들을 가지고 있다. 한 예로 골재업체의 품질관리 부족으로 토립분과 석분토 등의 이물질이 15~30% 이상 섞여 있고, 국내 지질특성상 층리구조 분포가 많아 이러한 지역에서 채취된 골재는 편장석 비율이 기준 20% 이상으로 높아서 골재 입도분포 기준범위를 크게 벗어나고 있다. 비단 숏크리트용 골재뿐만 아니라 현장 배치 플랜트에서의 품질 관리 부족, 현장배합의 부정확성 및 표준화된 숏크리트 품질 관리 기준의 부족 등의 문제들도 여전히 존재하고 있다. 따라서, 국내 숏크리트의 품질 향상을 위해서는 숏크리트 재료의 품질 변동 요인의 변수를 줄이고, 엄격한 품질관리 및 규격화를 통해 시공 품질을 향상시키기 위한 노력이 필요하다.

본 연구에서는 숏크리트의 품질 개선 및 성능 향상을 위한 대안으로 혼화재 및

급결제에만 국한되어 있던 연구를 탈피하고 숏크리트용 원재료에 대한 품질 개선을 통해 강도 및 내구성을 효과적으로 개선할 수 있는 새로운 숏크리트 재료를 개발하고자 한다. 또한, 산업부산물의 경제적 재활용을 위해 고로슬래그 미분말을 혼합한 재료를 개발하고자 한다. 본 연구에서 개발하고자 하는 "분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트"는 숏크리트 재료의 배합 및 제조를 건조 모르타르 전문 제조업체에서 사전에 미리 실시하여, 골재의 철저한 토립분 관리, 확실한 입도관리, 전문배합 장치를 이용한 엄격한 품질관리 및 재료의 규격화 등을 거쳐 시공 품질을 극대화 시키고 현장에서의 시공성과 품질을 개선할 수 있게 제조되는 숏크리트 재료이다.

규격화된 재료를 사전에 공장에서 생산 및 배합하여 포장용으로 판매 가능한 분말형 레디믹스트 숏크리트는 공장형 배합의 최적 골재관리, 각기 다른 입도 및 비중을 갖는 재료들의 최적혼합 등을 꾀할 수 있으며, 현장 배치 플랜트에서의 계량 및 배합 과정을 간략화 및 생략할 수 있고 고품질 숏크리트 시공으로 터널 안정성을 확보할 수 있으며, 기존 레미탈 생산체계를 활용 가능하여 경제성 있는 숏크리트 생산 및 시공 체계를 실용화할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트의 개발을 통해 NATM 개념에 의한 터널 굴착시 노출되는 암반의 특성에 따라 공장 주문형 다기능 레디믹스트 숏크리트를 시공할 수 있는 기술개발이 가능하다. 터널 시공과정 중 발생되는 암특성에 따른 숏크리트 설계 강도 변화, 막장 출수량에 따른 설계 변화, 공사비 및 공사기간의 변경으로 인한 숏크리트 설계 변화 등의 상황에서 현장의 모든 상항에 직접 대처하기 보다는 공장 주문형 다기능 숏크리트 개발 기술을 통해 유동적이며 효율적인 숏크리트 시공이 가능하게 되며, 공장형 배합을 통해 다품종 소량생산 및 최적의 생산시스템 확립을 통해 경제적인 제품생산 및 개발이 가능하게 된다. 그리고 실제 공장 생산 시스템 개발을 통해 규격화된 숏크리트 재료를 현장에 지원할 수 있게 되고, 규격화된 재료 생산 기술은 현장 시공 품질의 향상뿐만 아니라 산업 전반에 걸친 건설재료의 규격화를 유도하게 되며, 현재 각 정부 관처에서 적극적으로 추진하고 있는 국가 표준화 정책에 기여할 수 있게 된다.

특히, 산업부산물인 고로슬래그를 이용하여 숏크리트 배합에서 시멘트량의 30~50% 까지 치환시켜 건조수축을 최소화하고 균열예방 및 장기내구성을 향상시킬 수 있는 경제적인 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 개발이 가능하다. 현재까지 산업

부산물인 고로슬래그를 재활용하여 많은 기술개발이 이루어져 왔으나 아직까지 숏크리트 공법에 적용된 적은 없으며, 본 연구개발을 통해 숏크리트 공법에 대한 산업부산물 적용 기술 개발이 가능하며 국가 자원을 절감하고 경제적인 자원 재활용으로 국가 정책에 기여할 수 있을 것이다.

제 2 절 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구개발 최종목표

본 연구개발의 최종목표는 현장에서 직접 배합되어 타설되고 있는 숏크리트가 가지는 고질적인 문제들인 불확실한 품질관리, 골재 품질 불량, 강도 및 내구성의 저하 등을 효과적으로 개선할 수 있는 새로운 숏크리트 재료를 개발하는 것이다. 또한, 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 재활용하여 숏크리트 품질을 향상시키고 산업부산물의 경제적 재활용을 통해 국가자원을 절감하는 것이다.

본 연구에서 개발하고자 하는 "분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트"란 숏크리트 재료의 배합 및 제조를 건조 모르타르 전문 제조업체에서 사전에 미리 실시하여, 골재의 철저한 토립분 관리, 확실한 입도관리, 전문배합 장치를 이용한 엄격한 품질관리 및 재료의 규격화 등을 거쳐 시공 품질을 극대화 시키고 현장에서의 시공성과 품질을 개선할 수 있게 제조되는 숏크리트 재료이다. 분말형 레디믹스트 숏크리트의 주요 구성물로는 규격화되고 품질 관리된 골재, 숏크리트 성능향상을 위한 혼화재, 유동화제 혹은 감수제 등의 혼화제, 산업부산물로 재활용되는 고로슬래그 미분말 등이며, 현장에서 물만 믹싱하여 급결제와 함께 타설하게 된다. 또한, 현장상황이나 설계조건 등에 따라 강섬유를 혼합하여 사용하게 된다.

분말형 레디믹스트 개발과 본 연구를 위해 설정한 최종목표는 다음과 같다.

○ 산업부산물을 재활용한 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 개발, 규격화된 재료 생산, 현장 시공품질 개선 및 숏크리트 시공성 향상을 통해 터널 구

조물의 안정성 확보와 기존 레미탈 생산체계를 활용한 경제성 있는 숏크리트 공법의 실용화

- 산업부산물을 재활용한 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 개발
- 숏크리트 구성재료의 품질 선진화를 통해 30MPa 이상의 고강도 숏크리트 개발
- 산업부산물의 재활용을 통해 국가자원 확보와 경제적인 건설기술 개발
- 규격화된 숏크리트 재료의 공장 생산체계 확보
- 개발 제품의 공급망관리(SCM) 평가를 통해 현장배합 숏크리트보다 우수한 시공 프로세스 증명

본 연구개발의 최종목표는 이론적 아이디어, 시작품 및 제품 개발, 공정 개발의 성격을 가지고 있으며, 다음과 같은 그 세부적인 최종 성과물을 지향하고자 한다.

- 이론적 아이디어 : 분말형 레디믹스트 숏크리트의 최종 배합비 도출, 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 최종 배합비 도출
- 시작품 및 제품 개발 : 분말형 레디믹스트 숏크리트 제품 개발, 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 제품 개발
- 공정개발 : 분말형 레디믹스트 숏크리트의 공장 생산 시스템 설계

2. 연구개발 내용

본 연구개발의 최종목표와 세부목표를 달성하기 위해 다음과 같은 연구개발 내용을 계획하였고 3차년에 걸쳐 연구개발을 수행하였다.

가. 1차년도 연구개발 내용

(1) 국내외 레디믹스트 기술의 현황 조사

- 레디믹스트 기술관련 국내외 품질규정 조사
- 국내외 민간기업이 보유하고 있는 레디믹스트 기술 수준 분석
- 국내외 레디믹스트 관련 제품의 현황 파악 및 레디믹스트 생산 시스템 분석

(2) 현장배합 숏크리트의 국내 시공실태 파악 및 개발 방향 모색

- 현장배합 숏크리트의 국내외 품질규정 조사
- 현장 실무기술자들을 대상으로 한 숏크리트 현장설문조사 수행
- 설문조사 결과 분석을 통한 현장배합 숏크리트의 시공실태 및 문제점 파악
- 실무 의견 수렴을 통한 레디믹스트 숏크리트의 개발 방향 결정

(3) 레디믹스트 숏크리트 개발을 위한 숏크리트 재료의 고품질화 방안 제시

- 국내에서 생산되는 숏크리트 재료의 품질평가
- 국내 민간업체의 골재 생산시스템 조사 및 분석
- 국내 현장에서 적용되는 숏크리트용 골재의 관리실태 조사 및 품질성능 평가
  · 골재 품질시험을 통한 품질규정과의 적합성 평가
- 레디믹스트 숏크리트의 품질 선진화를 위한 재료 규격화 방안 제시

(4) 다기능 레디믹스트 숏크리트 개발을 위한 국내 터널 현장의 시공특성 파악

- 국내 터널 현장의 시공 특성 조사
- 터널 막장 시공조건 및 주요인자 분류
- 레디믹스트 숏크리트의 다기능 부여를 위한 기능 인자 설정

(5) 숏크리트 굵은골재 최대치수에 따른 숏크리트의 성능평가

- 숏크리트 타설시험용 몰드제작
- 국내외 숏크리트 굵은골재 최대치수에 따른 물리성능 평가자료 조사
- 숏크리트 굵은골재 최대치수에 따른 현장타설실험 수행
  · 숏크리트 굵은 골재 치수별 유동성, 리바운드율 및 압축강도 평가

(6) 숏크리트 타설실험의 효율성 증대를 위한 숏크리트 타설시험기 설계

- 국내외 숏크리트 타설장비 현황 조사
- 타설시험기 설계를 위한 고려 인자 결정
- 숏크리트 타설시험기의 설계도면 작성

나. 2차년도 연구개발 내용

(1) 국내 고로슬래그의 현황 및 물리·화학적 특성 파악
- 고로슬래그의 국내 발생 현황 및 발생 메커니즘 조사
- 국내외 고로슬래그의 경제적 재활용 사례 조사
- 고로슬래그 미분말의 화학조성 및 재료특성 파악

(2) 숏크리트 장기내구성 평가를 위한 고려 인자 파악
- 숏크리트의 성능저하에 영향을 미치는 열화인자 고찰
- 숏크리트 타설 환경에 따른 장기내구성 평가 인자 설정

(3) 현장 적용성 평가를 통한 레디믹스트 숏크리트의 초기개발 및 재료분리 최소화 방안 연구
- 레디믹스트 숏크리트의 초기배합 결정
- 현장타설실험을 통한 초기배합의 품질 평가
- 골재 입도 조정을 통한 재료분리 최소화 방안 검토
- 재료분리를 최소화하기 위한 최적 믹싱 시간 도출
- 동일배합의 현장 숏크리트와의 품질 비교

(4) 초기개발된 레디믹스트 숏크리트의 현장 시공성 및 경제성 평가
- 현장 숏크리트 교반장비 실태 조사
- 레디믹스트 숏크리트의 효율적인 운송 방법 및 현장 믹싱 시스템 분석
- 현장배합 숏크리트와의 시공 단가 비교를 통한 초기개발 제품의 경제성 평가

(5) 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 초기배합 설계
- 고로슬래그 미분말의 숏크리트에 대한 적용성 평가
- 현장타설실험을 통한 초기배합의 품질 평가
- 고로슬래그 치환율에 따른 레디믹스트 숏크리트의 강도특성 분석

(6) 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 양생 특성 및 환경영향 평가

- 숏크리트 공시체의 SEM 촬영을 통한 양생특성 및 메트릭스의 변화특성 파악
- 숏크리트 공시체의 용출시험을 통한 산업부산물의 환경영향 평가 수행

(7) 다기능 레디믹스트 숏크리트의 초기배합 설계
- 설정된 다기능 인자에 따른 레디믹스트 숏크리트의 초기배합 설계
- 각종 혼화재 특성에 따른 다기능 인자의 성능발휘 시험 수행
- 성능발휘 시험 평가를 통한 다기능 레디믹스트 숏크리트의 초기 배합비 결정

(8) 숏크리트 타설실험의 효율성 증대를 위한 숏크리트 타설시험기 제작
- 실내 타설 시공성을 고려한 타설시험기의 적정 용량 산출
- 숏크리트 타설시험기의 시제품 제작

다. 3차년도 연구개발 내용

(1) 레디믹스트 숏크리트의 최종 배합비 결정
- 초기배합 개선을 통한 최종 배합비 결정
- 현장타설실험을 통한 최종 배합비의 품질 평가
- 현장배합 숏크리트와의 비교 실험을 통한 레디믹스트 숏크리트의 품질 우수성 평가

(2) 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 최종 배합설계
- 경제성과 품질을 고려한 고로슬래그 미분말의 최적 치환율 도출
- 현장타설실험을 통한 최종 배합비의 품질 평가
- 일반 레디믹스트 숏크리트와의 비교 평가를 통한 강도특성 및 품질평가

(3) 고로슬래그 숏크리트의 재료품질 평가
- 일반 숏크리트와 고로슬래그 치환 숏크리트의 수은압입시험 실시
- 고로슬래그 치환율에 따른 숏크리트의 수은압입시험 결과 고찰
- 고로슬래그 숏크리트의 공극분포특성 파악

(4) 적용인자에 따른 다기능 레디믹스트 숏크리트 최종 배합설계
- 적용인자별 다기능 레디믹스트 숏크리트의 최종 배합비 결정
- 실내실험을 통한 다기능 레디믹스트 숏크리트의 적용인자별 품질성능 평가

(5) 단일 열화인자 평가를 통한 레디믹스트 숏크리트 내구성 평가
- 레디믹스트 숏크리트의 실내촉진시험 수행 및 단일내구성 평가

(6) 복합열화시험을 통한 레디믹스트 숏크리트의 장기내구특성 평가
- 레디믹스트 숏크리트 복합열화시험 및 옥외폭로시험 수행
- 레디믹스트 숏크리트 복합열화특성 파악

(7) 대량생산 및 규격화생산을 위한 레디믹스트 숏크리트 자동생산 시스템 확보
- 기존 레디믹스트 콘크리트의 생산 시스템 분석
- 레디믹스트 숏크리트 재료의 규격화에 적합한 생산 시스템 설계
- 재료 생산시 믹싱, 재료 거출, 운반과정의 재료분리 가능성 평가
- 레디믹스트 숏크리트의 판매용 시제품 제작

(8) 레디믹스트 숏크리트 현장시공 프로세스 분석을 통한 시공 우수성 평가
- 현장배합 숏크리트 시공 프로세스 분석
- 설계된 자동 생산 시스템의 시공 프로세스 분석
- 레디믹스트 숏크리트 제품의 공급망관리(SCM) 평가를 통한 시공 프로세스 분석
- 현장배합 및 공장배합 숏크리트의 시공 프로세스 비교 및 평가

(9) 레디믹스트 숏크리트의 운송시간 경과에 따른 품질 변화 양상 평가
- 레디믹스트 숏크리트의 운송시간 경과에 따른 슬럼프 및 공기량 변화 측정
- 운송시간에 따른 레디믹스트 숏크리트의 품질 유지 방안 고려

(10) 레디믹스트 숏크리트 최종 경제성 평가
- 고로슬래그 치환율 변화에 따른 경제성 분석

- 레디믹스트 숏크리트의 재료비 상승단가 검토
- 현장배합과 레디믹스트 숏크리트의 품질 대비 경제성 비교
- 시공시스템 간소화로 인한 간접비 감소율 파악
- 레디믹스트 숏크리트의 국내 수요 및 시장성 조사

(11) 레디믹스트 숏크리트의 공정관리 및 시공·품질관리 편람(안)
- 재료생산 및 공정관리 편람(안) 제안
- 시공 및 품질관리 편람(안) 제안

(12) 숏크리트 타설시험기를 이용한 레디믹스트 숏크리트 품질 평가 수행
- 개발된 타설시험기의 성능 평가를 위한 실내 시험 수행
- 실내 시험 평가를 통한 타설시험기의 문제점 분석 및 보완
- 숏크리트 타설시험기의 사용 매뉴얼 작성

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내기술개발 현황

NATM 공법이 국내에 도입되면서 초기에는 건식 공법에 의한 숏크리트 시공이 일반적으로 이루어졌으나, 현재는 소규모 터널 및 지하철 공사 등 일부를 제외하고는 습식 숏크리트의 시공이 보편화되어 수행되고 있다. 그래서 1990년대 중반 이전의 국내 숏크리트 관련 연구는 대부분 건식 숏크리트에 중심을 두었다(안상기, 1993 ; 오병환 등, 1994 ; 백신원 등, 1996). 이는 주로 작업공간이 비교적 협소한 지하철 현장에서 연구가 수행되었는데 습식장비가 국내에 정착되지 않았기 때문이었다. 그러나 그 이후 습식장비가 국내에 정착되고 작업환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 최근의 숏크리트는 대부분 습식장비를 사용하여 타설되고 있다.

숏크리트용 보강재의 동향을 살펴보면 최근까지의 숏크리트 시공은 와이어 메쉬(Wire mesh)를 암반에 부착시킨 다음 그 위에 숏크리트를 타설하는 방법인데, 이 방법은 리바운드율이 크고 와이어 메쉬 설치기간이 과다 소요되며 정확한 설치가 곤란한 점 등으로 인해, 빠른 보강작업이 이루어지지 못하고 공기가 지연되고 비용이 증가하는 단점이 있다. 따라서 시공상의 편리, 공기단축, 보강특성 향상 등의 이유로 섬유보강 숏크리트가 사용되기 시작하였으며, 이중 대표적으로 사용되고 있는 것이 강섬유 보강 숏크리트(Steel Fiber Reinforcement Shotcrete : SFRS)이다. 이 방법은 기존의 와이어 메쉬를 사용한 공법보다 시공이 간편하고 여굴 부위의 밀실한 충전이 가능하며, 인성특성 우수, 빠른 보강 가능 등의 장점으로 인해 적용이 늘어나고 있다.

국내의 경우 최근 들어 강섬유의 국산화가 이루어지고 강섬유 보강 숏크리트 지침이 수립되는 등 고속도로 터널 공사를 중심으로 강섬유 보강 숏크리트의 적용이 늘고 있다. 그런데 강섬유 보강 숏크리트는 혼합시의 균등분포 문제, 숏크리트 장비 및 압송호스의 마모손상 및 파열, 강섬유의 튐으로 인한 안전관리상의 문제 등이 발생되고 있다. 특히 내수성 및 내산성이 불량하여 부식으로 인한 균열 및 박리현상 발생의 여지가 있고 별도의 마감처리가 필요하며, 가격이 고가인 점 등이 단점으로 지적되어 왔다.

강섬유 보강 숏크리트의 단점을 보완한 대안으로서 폴리프로필렌 섬유 및 셀룰로스 섬유 등이 숏크리트에 고려되었으나 망사형 및 단사형 폴리프로필렌의 경우 다

량 함유시 섬유뭉침현상(Fiber Balling)이 발생하고 휨인성 측면에서 미흡해 터널의 숏크리트용으로 사용하기에는 한계가 있다. 국내의 경우 터널의 크라운(Crown)부분, 도로 포장, 교량 및 건축물 슬래브의 균열방지, 마모 및 충격저항성 증진의 목적으로 콘크리트 구조물 시공이 이루어지고 있다. 따라서 최근 기존의 섬유보강 숏크리트의 작업성, 안전성, 내구성을 보완한 보강합성섬유(Structural Synthetic Fiber) 습식 숏크리트의 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되어 시제품에 대한 인발강도 실험 및 성능평가실험이 이루어지고 있다.

보강합성섬유는 부식의 요인이 없고 리바운드량의 감소가 뛰어나며 인장강도가 철과 비슷하면서도 상대적으로 값이 싸며 국산화 대체가 가능한 재료로서 수축균열 억제 및 노즐, 압송호스의 마모 감소, 압송성 개선 등의 효과가 우수하다. 기존 시제품의 품질개선 및 국산화, 습식 숏크리트 공법의 적용 및 실용화에 관한 보다 깊은 연구가 진행되고 있다.

숏크리트용 보강재와 함께 숏크리트의 고강도, 고내구성을 위한 구성재료 중의 하나인 급결제를 살펴보면, 국내에서는 알칼리성 급결제가 주로 사용되고 있으나 환경적인 영향과 장기적 안정성 등의 문제를 발생시키고 있다. 이러한 기존 알칼리성 급결제의 문제를 해결하기 위해 국내에서도 알칼리 프리계급결제의 개발이 활발히 이루어지고 있으나, 아직은 현장중심의 실용화 연구 및 국산화 연구가 더 필요한 실정이다. 또한 숏크리트의 장기강도 저하 및 내구성 측면에서 최근에 많은 관심이 대두되고 있는 급결제를 변수로 고려하여 수행된 연구는 아직까지 부족한 실정이다(박해균 등, 2002 ; 한국도로공사, 2001 ; SK건설, 2001). 박해균 등(2002)은 실리케이트계 급결제와 알칼리프리계 급결제를 비교하였으며, 한국도로공사(2001)에서는 실리케이트계, 알루미네이트계 및 시멘트광물계 급결제를 사용하였다. 그리고 SK건설(2001)은 알칼리프리계, 알루미네이트계 및 실리케이트계 급결제를 비교하였다. 이외에도 숏크리트에 실리카 흄, 플라이애쉬, 고성능 감수재 등의 혼화재료 사용에 대한 연구는 국내에서도 계속 이루어져 왔으며, 최근 터널 지보패턴의 발전으로 2차 라이닝의 대체나 숏크리트의 장기적인 안전성을 고려한 고강도 숏크리트에 대한 인식이 새롭게 정립되면서 이 분야에 대한 연구가 부각되고 있다.

표 2.1.1은 국내의 숏크리트 관련 연구 동향을 나타낸 것이고, 표 2.1.2는 지금까지 국내에서 수행된 숏크리트 연구내용을 나타낸 것이다. 초기에는 건식 숏크리트와 관련한 연구내용이 대부분이며 습식 숏크리트의 경우에도 현장 자체의 품질개선을 위한 것이거나 기본적인 숏크리트 배합설계에만 치우친 경향이 있다. 또한, 숏크리트용 원자재의 품질 개선에 대한 연구는 많이 부족한 상황이다.

표 2.1.1 숏크리트 관련 국내 연구동향

구분		기술 및 연구동향
공법		-NATM 도입 초기에는 건식공법에 의한 시공이 일반적 -현재는 습식 숏크리트 시공이 보편화
보강재	동향	-1990년대 말까지 와이어 메쉬의 시공이 일반적(리바운드율이 크고 설치기간 과다소요 및 정확한 설치가 곤란한 단점 등으로 공기 지연 및 공사비용 증가의 원인) -현재는 시공상의 관리, 공기단축, 보강능력 향상 등의 이유로 섬유보강 숏크리트(SFRC)가 보편화되어 있음
	강섬유	-강섬유의 국산화 및 관련 지침 수립에 따른 SFRC의 적용 증가 -숏크리트내 강섬유의 분포문제, 장비 및 압송호스의 마모손상 및 파열, 강섬유의 튐으로 인한 안전관리상 문제 발생 -내수성 및 내산성이 불량하여 부식으로 인한 균열 및 박리현상 발생 여지, 별도의 마감처리가 필요한 점, 가격이 고가인 문제 발생
	합성섬유	-강섬유 보강 숏크리트의 단점 보완용으로 개발됨 -폴리프로필렌 섬유 및 셀롤로이스 섬유 등(Fiber ball 현상 발생은 적으나 휨인성 품질특성이 낮음) -최근 기존의 섬유보강 숏크리트의 작업성, 안정성, 내구성을 보완한 보강합성섬유 습식 숏크리트 개발에 대한 연구가 활발하게 진행중 -보강합성섬유는 부식요인이 없고 리바운드량의 감소가 뛰어나고, 인장강도가 철과 비슷하면서 상대적으로 가격이 저렴하며 국산화 대체가 가능한 재료
급결제		-국내에서는 알칼리성 급결제가 주로 사용됨(실리케이트, 알루미네이트계 급결제) → 환경적인 영향과 장기적 안정성 문제 발생 -알칼리프리계 급결제의 개발 및 실용화 연구가 이루어지고 있음
혼화재료		-실리카흄, 플라이애쉬, 고성능 감수제 등의 혼화재료에 대한 연구도 꾸준히 진행됨 -최근 터널지보패턴의 발전으로 2차 라이닝의 대체나 숏크리트의 장기 안정성을 고려한 고강도 숏크리트에 대한 인식이 정립되면서 이 분야에 대한 연구가 부각되고 있음
연구동향		-90년대 중반까지는 건식 숏크리트와 관련된 연구실적이 대부분이었으나, 90년대 말부터는 습식 숏크리트에 대한 연구가 주를 이루고 있음 -건설제품의 패러다임의 변화 추세에 따라 숏크리트의 내구성이나 영구적인 숏크리트에 대한 연구가 진행되기 시작함 -숏크리트 특성상 관련 연구는 시공현장을 중심으로 이루어져야 하므로 대형 건설사를 중심으로 신재료 개발 및 현장적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음

표 2.1.2 숏크리트 관련 국내 연구현황

No	연구명	연구기관 및 연구자	연구 기간	연구내용	비고
1	섬유보강 숏크리트의 강도특성에 관한 실험	SK 건설	1993	◦U-1-1 Project 현장실험 관련 ◦습식 강섬유보강 숏크리트 특성 실험	습식
2	강섬유보강 숏크리트의 현장 적용성 연구	삼성건설	1995	◦고성능 숏크리트 공법 고찰	자료 조사
3	숏크리트 공법 개선연구	한국통신	1995	◦건식 숏크리트 최적배합비 도출실험	건식
4	습식 숏크리트 최적배합비 개발	한국통신 (서울대)	1996	◦습식 숏크리트 최적배합비 도출실험	습식
5	폴리프로필렌 섬유보강 건식 숏크리트의 인정지수 특성에 관한 연구	SK 건설 (서울대)	1996	◦부산 지하철 현장실험 관련 ◦건식 폴리프로필렌섬유보강 숏크리트의 역학적 특성	건식
6	급결제 사용에 따른 숏크리트 탈락량 감소	이순복	1997	◦급결제의 종류에 따른 리바운드량 실험	습식
7	강섬유와 실리카 흄이 숏크리트의 리바운드율에 미치는 영향	장동일	1998	◦보강방법, 강섬유 혼입율, 실리카 흄 혼입율, 타설 부위 등에 따른 리바운드율 파악	습식
8	습식 숏크리트 공법 고성능화 연구	SK건설	1999	◦고강도/고품질/고내구성 숏크리트 개발 ◦숏크리트 시공성 향상	습식
9	강섬유 사용 숏크리트의 휨인성 평가 방법 연구	김덕영	1999	◦숏크리트 휨인성 평가기준 항목의 타당성 검토 ◦강섬유 보강 숏크리트의 품질기준 검토를 통한 관리규정 개선	실내 실험
10	터널지보특성 개선을 위한 보강합성섬유 습식숏크리트공법개발	SK건설	2001	◦보강 합성섬유 숏크리트 개발 ◦보강 합성섬유 숏크리트 공법 실용화	습식
11	숏크리트용 급결제의 품질, 응결 및 경화특성	안태송 외 2인	2002	◦국내에 유통중인 급결제의 품질특성 평가	실내
12	강섬유보강 숏크리트의 휨인성에 관한 실험적 연구	안태송 외 4인	2002	◦강섬유 보강 콘크리트 휨인성 시험방법의 상관성 평가	실내
13	Permanent shotcrete tunnel lining 구축을 위한 고성능 숏크리트 개발 Ⅰ, Ⅱ	안병제 외 3인	2002	◦공사비용절감 및 시공능률 향상을 위한 고강도 숏크리트 개발(Alkali Free 계, 시멘트 광물계)	습식
14	강섬유보강 숏크리트의 휨 성능평가를 위한 보시편과 패널시편의 상관성 연구	이상돈 외 4인	2003	◦시험편의 종류에 따른 숏크리트의 휨인성 성능평가	실내 실험
15	영구 숏크리트 터널 라이닝 구축을 위한 고성능 숏크리트 개발	김재권 외 2인	2003	◦급결제의 영향에 따른 숏크리트 품질특성 검토 및 적용성 파악	실내 실험
16	Permanent shotcrete tunnel lining 구축을 위한 고성능 숏크리트 개발 Ⅲ	김용하 외 3인	2003	◦숏크리트용 급결제의 현장적용을 통한 성능검토(시멘트 광물계, Alkali-Free 계)	습식

박해균 등(2002)은 급결제를 주변수로 하여 강섬유보강 숏크리트에 대한 모형시험을 실시하고 고품질 숏크리트의 적용 가능성을 검토하고자 하였다. 이 연구에서는 알칼리 프리계 급결제와 실리케이트계 급결제를 각각 시멘트량의 7.0% 및 10.0%로 적용하여 사용하였다. 그 결과 실리케이트계 급결제를 사용한 경우보다 알칼리 프리계 급결제를 사용했을 때 압축강도는 62%, 휨강도는 10%, 등가휨강도는 30% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 이 연구를 통해 고품질의 고강도 숏크리트를 확보하는데 있어 알칼리 프리계 급결제가 효과적임을 알 수 있었다.

이외의 국내 숏크리트 연구는 주로 강도와 내구성 증진에 있어 뛰어난 효과를 가지고 있는 실리카 흄의 적용성 평가에 중점을 두었다(정상국 등, 2000 ; 장동일 등, 1998 ; 백신원 등, 1996). 그 결과 실리카 흄은 리바운드를 크게 감소시킨다는 측면에서 매우 효과적으로 나타나 리바운드를 고려하여 경제성 분석을 하면 실리카 흄 숏크리트를 적용하는 경우에 공사비가 보다 저렴한 것으로 나타났다. 또한 강도증진 뿐만 아니라 내구성과 내투수성이 크고 장기적인 강도증진 효과가 큰 것으로 나타났다. 그러나 실리카 흄은 국내 실정상 전량 수입할 수밖에 없다는 문제점을 가지고 있다.

이상의 국내 연구동향을 분석하면 아직까지 국내 숏크리트 연구는 초기 단계라는 것을 알 수 있으며, 숏크리트의 특성을 좌우하는 가장 중요한 인자 중의 하나인 급결제와 혼화재에 대한 연구에만 국한되어 숏크리트용 원자재에 대한 연구는 아직 미흡한 것으로 나타났다. 또한, 국외의 경우와 비교할 때 숏크리트의 제반 품질기준 및 품질관리를 위한 시험방법들이 잘 규정되어 있지 못하며, 숏크리트의 장기 내구성에 대한 연구와 내구성을 증진시키기 위한 연구들이 아직도 많이 부족한 실정이다.

제 2 절 국외기술개발 현황

1910년대 최초로 광산에 적용된 이후에 숏크리트의 많은 발전이 이루어져 왔다. 특히, 숏크리트는 과거의 목재지보를 대체하게 되었고 이를 계기로 터널의 주지보재로서 NATM이 제안 되었다. 오스트리아의 Rabcewicz(1963)는 터널 지보재로서 목재지보를 숏크리트로 대체하는 Shotcrete method를 NATM(New Austrian Tunneling Method)로 명명하였고, 이로써 숏크리트는 록볼트와 함께 NATM의 주지보재로서 사용되게 되었다(Kovari, 2003). NATM은 제안된 후 전 세계적으로 널리 적용되고 있으며 최근에는 고성능 숏크리트의 개발로 인해 현장타설 콘크리트 라이닝을 설치하지 않고 숏크리트 라이닝을 영구 지보 및 영구 라이닝으로 설치하는 각종 싱글쉘 터널 공법들이 제안되고 있다.

재료적인 측면에서 1980년대 중반 이후의 영국의 숏크리트 발전 동향은 그림 2.2.1과 같다. 그림과 같이 국외에서 분말형 급결제를 사용하는 건식 숏크리트는 1980년대 중반까지 사용되었으며 숏크리트의 고강도화와 고내구성화에 뛰어난 성능을 가지고 있는 Micro silica, 즉 실리카 흄은 1980년대 후반부터 사용되었다. 1990년대 초에는 건식 숏크리트에서 분말형 급결제가 액상형 급결제로 대체되었으며 그 이후에 습식 숏크리트와 강섬유가 일반화되었다. 또한 국내보다 일찍 1990년대 중반에 알칼리 프리계 급결제를 사용하기 시작했으며 실리카 흄의 사용이 일반화되었다. 1990년대 후반에는 고성능 감수제의 성능이 향상되면서 물-시멘트비를 0.36에서 0.4까지 낮추어 숏크리트의 고강도, 고내구성화를 꾀하고 있다.

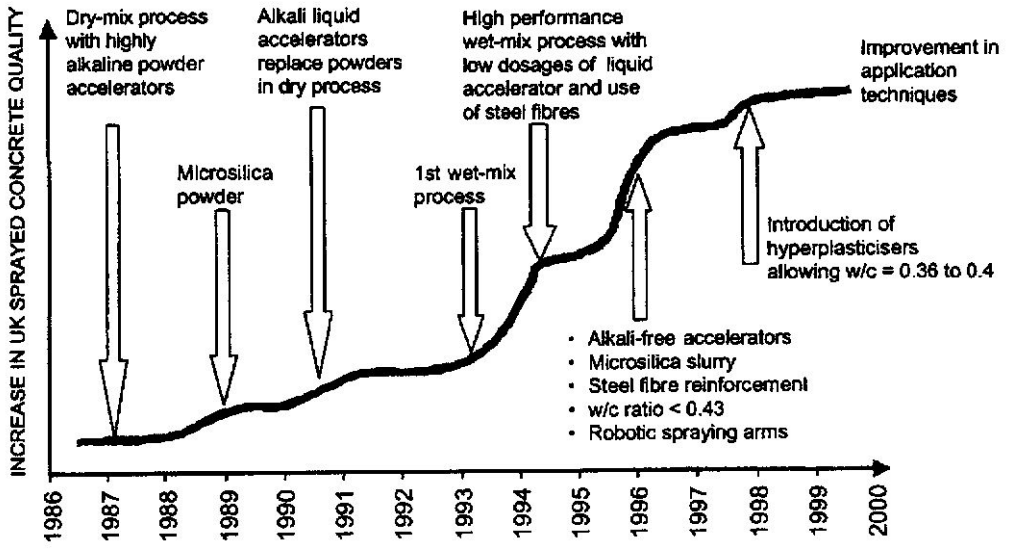


그림 2.2.1 숏크리트의 발전단계(영국)

표 2.2.1 숏크리트 보강재 비교

구분		Wire Mesh	Steel Fiber	Polypropylene Fiber	High Performance Polymer Fiber
물성	재질	Steel	Steel	Polypropylene	Polyolepine
	내산성	불량	불량	우수	우수
	내알칼리성	보통	보통	우수	우수
	내수성	불량 (부식작용으로 균열 및 박리현상 발생)	불량 (부식작용으로 균열 및 박리현상 발생)	우수	우수
사용효과		-균열 확산 억제 -평면적 보강	-수축균열 억제 -균열확산 억제 -충격파손 억제 -강도 증대 -인성 대폭적 증가 -입체적 보강	-수축균열 억제 -균열확산 억제 -충격파손 억제 -내구성 증대 -인성이 다소 취약 -입체적 보강 -부착력 증가	-수축균열 억제 -균열확산 억제 -충격파손 억제 -내구성 증대 -인성 증가 -입체적 보강 -부착력 증가
작업성	분포성		혼합시 Fiber ball 현상이 발생되기도 하며 균등분포가 어려움	다량 혼입시 작업성 저하	다량 혼입시 작업성 저하
	시공성 및 안전성	-자재취급이 불편 -설치장소까지 운반 -설치작업 여건이 불편 -안전사고 유의필요 -적정피복이 어려움	-작업이 간편 -숏크리트 작업시 호스 파열 또는 강섬유의 bound로 작업인원 안전사고 위험	-작업이 간편 -자재 취급/시공중 안정	-작업이 간편 -자재 취급/시공중 안정
	장비마모 및 손상		숏크리트 장비 및 호스 마모 손상 발생	장비의 마모 및 손상에 영향을 끼치지 않음	장비의 마모 및 손상에 영향을 끼치지 않음

표 2.2.1은 숏크리트용 보강재의 특성을 기술한 것인데 국외에서는 고성능 재료의 숏크리트 적용 및 시공, 품질관리에 대한 세부적인 지침과 아울러 재료 및 시공 특성을 고려한 장비의 개발이 병행되어 고품질 숏크리트 시공의 시스템화가 이루어지고 있다. 숏크리트용 보강재에 있어서는 강섬유 이외의 섬유로 폴리프로필렌 섬유가 스웨덴, 홍콩, 캐나다, 호주 등에서 리바운드의 개선 및 내구성의 보완, 경제적인 이유 등으로 터널, 공동 등의 지하굴착공사 및 수로, 운하 등의 수리구조물, 사면안

정공사 등에 일부 사용되고 있으며 셀룰로스 섬유 등의 적용이 검토되고 있다. 이와 아울러 보강 합성섬유(Structure Synthetic Fiber)가 미국, 캐나다, 일본에서 최근 개발되었는데 이 섬유의 특징은 강섬유의 부식저항성 취약 및 기존 폴리프로필렌 섬유의 단점인 인성특성 취약과 다량 첨가시의 작업성 저하를 개선한 것인데, 터널 시공실적도 일부 가지고 있는 것으로 ACI 숏크리트 분과와 Tunneling Workshop에서 최근 발표되었다.

표 2.2.2와 그림 2.2.2는 국내외 급결제의 사용현황을 나타낸 것이다. 급결제의 경우 선진국에서는 기존 알칼리성 급결제에 대해 장기강도의 저하 및 독성 등의 이유로 사용규제 움직임이 확산되어 사용실적이 감소하고 있는 추세이며, 대신 알칼리 프리계 급결제의 시장 점유율이 유럽 및 일본 등을 중심으로 높아지고 있다. 알칼리 프리계 급결제는 크게 두 가지 형태로, 유럽을 중심으로 한 무정형 무기질계와 일본을 중심으로 한 시멘트 광물계가 현재 주를 이루고 있다.

표 2.2.2 국내외 급결제 사용현황

구 분	사용량 (%)						비 고
	한국	일본	아시아	아프리카	유럽	미국	
Silicate 계	70		40	30			◦Silicate 계 : 세계적으로 감소추세, 변성 실리케이트 계 증가 ◦Aluminate 계 : 가장 많이 사용됨, 알칼리 프리계로 대체중, 국내 사용량 증가추세. ◦Alkali Free 계 : 선진국에서 사용증가, 무독성, 장기강도 저하 방지, 고가
변성 Silicate 계			10			25	
Aluminate 계	30		40	70	50	50	
Alkali Free 계			10		50	25	
시멘트계		80					
기타		20					

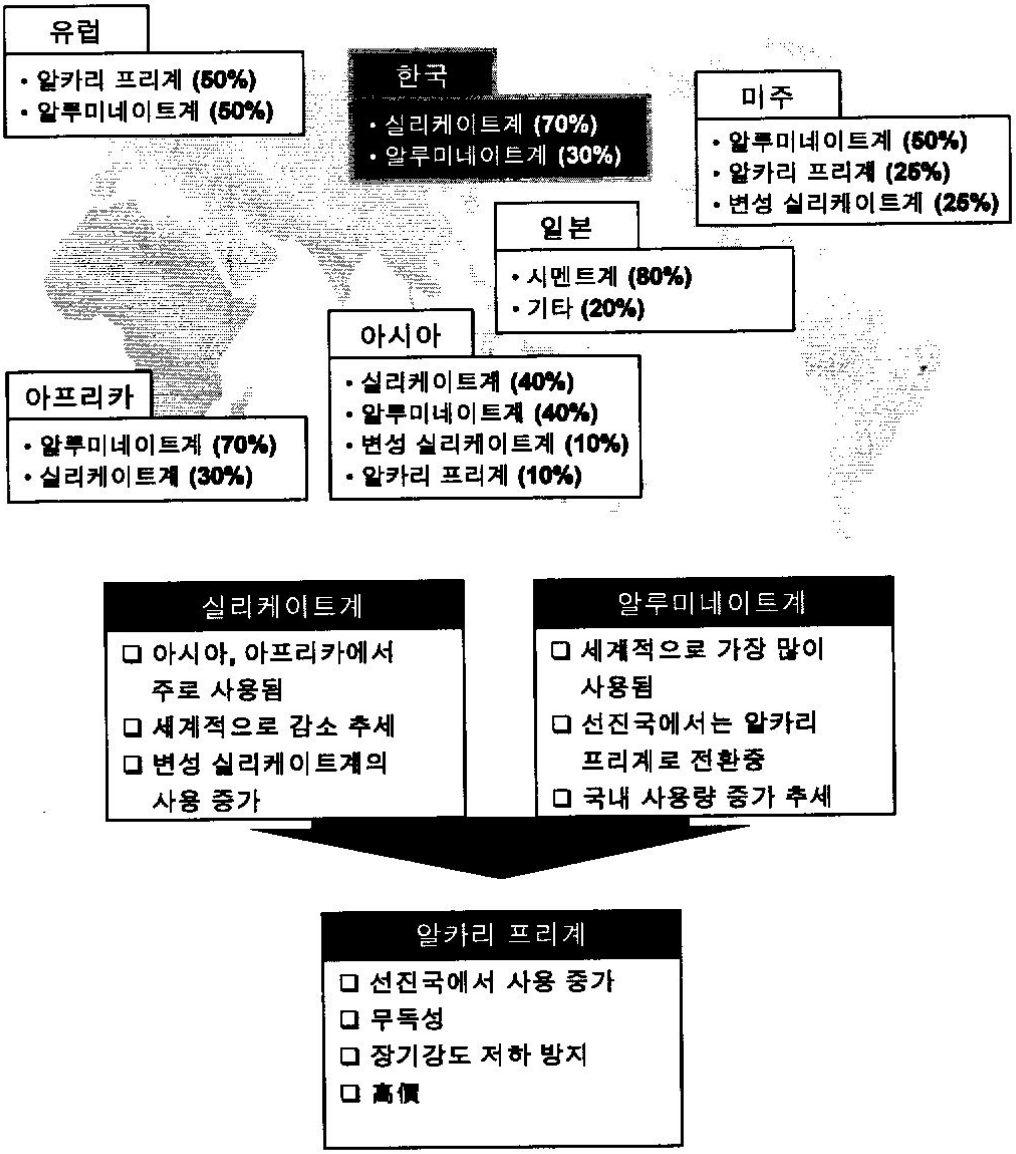


그림 2.2.2 국내외 급결제 사용현황

숏크리트 관련 기술을 선도하고 있는 유럽에서는 표 2.2.3과 같은 동향으로 숏크리트가 발전되어 왔으며, 특히 내구성을 고려하여 1980년대 이후로는 숏크리트의 압축강도 기준이 40MPa 정도로 규정되어 있다(표 2.2.4).

국외 숏크리트 기술개발 현황을 국가별로 살펴보면 다음과 같다.

표 2.2.3 숏크리트 관련 기술 동향

구 분	기술 및 연구동향
시공시스템	◦숏크리트의 적용 및 시공, 품질관리에 대한 세부적인 지침 확립됨. ◦관련 장비의 개발이 병행되어 고품질 숏크리트 시공의 시스템화. ◦1980년대 중반까지 숏크리트 시공방법은 건식공법이 주를 이루었으며, 현재까지는 습식공법이 주를 이루고 있음.
보강재료	◦보강재는 강섬유의 사용이 주를 이루고 있지만, ◦폴리프로필렌 섬유가 스웨던, 홍콩, 캐나다, 호주 등에서 리바운드의 개선 및 내구성의 보완, 경제적인 장점 때문에 사용량이 증가. ◦합성섬유(Structural Synthetic Fiber)가 미국, 캐나다, 일본에서 개발되고, 현장 적용성 연구가 활발히 이루어지고 있음.→기존 폴리프로필렌 섬유의 취약한 인성특성 및 다량 첨가시의 작업성 저하를 개선한 것임.
급결제	◦알칼리성 급결제의 경우 장기강도저하 및 인체 유해성 등의 문제로 사용량이 감소하고 있는 추세임.(1990년대 중반부터 알칼리 프리계 급결제의 사용을 시작하였으며, 그 사용량은 시멘트 중량의 10%까지 사용하도록 함) ◦알칼리프리계의 시장 점유율이 유럽(무정형 무기질계)과 일본(시멘트 광물계)을 중심으로 증가하는 추세임.
혼화재료	◦터널기술선진국에서는 Silica Fume 및 고성능 감수제의 적용이 보편화됨.(Silica Fume은 1980년대 후반부터 사용되기 시작함) ◦2차 라이닝의 대체나 장기적 안정성을 고려한 50MPa 정도에 이르는 숏크리트의 시공이 보편화되어 있음.
최근 연구 동향	◦고성능/고강도 콘크리트의 개발 및 실용화 ◦숏크리트의 내구성 증진 ◦알칼리프리계 및 실리카 흄과 같은 고성능 숏크리트 재료 적용 ◦최신 숏크리트 타설장비 개발 ◦현장 타설 콘크리트 라이닝을 설치하지 않고 숏크리트 라이닝을 영구지보 및 영구 라이닝(Permanent Lining)으로 설치하는 각종 싱글쉘 공법들이 제안되고 있음 (대표적인 싱글쉘 터널공법 : 노르웨이 터널공법)

표 2.2.4 유럽 숏크리트 발전 동향 및 향후 예상(Clements, 2002)

변수	1980년대	2000년대	2020년대
압축강도	25 MPa	40 MPa	40 MPa
리바운드	30 %	10 %	5 %
급결제	물유리계 실리케이트 급결제	알루미네이트계, 알칼리프리계 급결제	안전하고, 품질 좋은 급결제
인성 (Round Panel)	200 J	400 J	1,000 J
유해성 및 안정성	나쁨	우수	훨씬 좋음

1. 국제터널협회(ITA)

국제터널협회(이하 ITA)에서는 1989년 토론토에서 ITA Working group on Shotcrete Use in tunnelling을 설립하면서 국외 숏크리트 공법에 대한 전반적인 연구활동 및 기술교류를 시작하였다. 또한, 국외에서 시공되고 있는 숏크리트의 재료, 공법 및 기술에 대한 종합적인 자료 수집 및 적용 실태 파악을 수행하였다. 표 2.2.5에서 2.2.7까지는 ITA에서 조사한 국외 숏크리트 공법 관련 자료이다(ITA, 1996). 표 2.2.5는 ITA에서 조사한 국가별 한해 숏크리트 시공량을 나타낸 표인데, 유럽 국가들의 숏크리트 시공량 못지않게 일본과 미국에서도 숏크리트 공법이 많이 적용되고 있는 것으로 나타났다. 또, 표 2.2.6은 각 국가별 습식 숏크리트 공법과 건식 숏크리트 공법의 사용비율을 나타낸 것인데, 전 세계적으로 볼 때 건식 숏크리트 공법이 아직까지 더 사용되고 있는 것으로 나타났다.

ITA working group에서는 숏크리트를 터널의 영구 라이닝으로 적용하는데 필수적인 문제인 내구성에 중점을 두고 있다. 이에 대해 2003년에 공개된 working group 보고서에는 숏크리트 내구성과 관련된 자료를 처리하기 위한 지침과 세계 각국에서 숏크리트를 영구 라이닝으로 적용한 151개의 사례가 정리되어 있다(Franzen 등, 2001).

표 2.2.5 국가별 한해 숏크리트 시공량의 분포(ITA, 1996)

국가	지보재로서 한해 숏크리트 시공량(in ㎥)	
오스트리아	?	1992년도
캐나다	50,000	1993년도
프랑스	70,000	1992년도
독일	500,000	1993년도
헝가리	60,000	1992년도
일본	2,000,000	1991년도
모로코	20,000	
노르웨이	80,000	1993년도
포르투칼	3,000	1989년도
스웨덴	50,000	매년
스위스	100,000 ~ 150,000	1993년도
영국	1,500	
미국	500,000	1994년도

표 2.2.6 국가별 습식 및 건식 숏크리트 사용 비율(ITA, 1996)

국가	습식 숏크리트(%)	건식 숏크리트(%)
오스트리아	5	95
캐나다	5	95
프랑스	60	40
독일	15	85
헝가리	10	90
이탈리아	90	10
일본	80	20
모로코	10	90
노르웨이	99	1
포르투칼	20	80
스웨덴	80	20
스위스	65	35
영국	10	90
미국	60	40

표 2.2.7은 각 국가별로 숏크리트 노즐의 운용방법에 대해 조사한 것인데 유럽 국가들 중에서 몇몇 나라와 미국 및 캐나다에서는 아직까지 인력에 의한 숏크리트 노즐 운영방법이 더 많이 사용되고 있는 것으로 나타났고, 아시아에서 일본의 경우에는 숏크리트 머신 및 기술 개발로 기계에 의한 숏크리트 노즐 운영 비율이 상당히 높은 것으로 나타났다.

표 2.2.7 국가별 숏크리트 노즐의 운용 방법(ITA, 1996)

국가	기계에 의한 숏크리트 노즐 운용(%)	인력에 의한 숏크리트 노즐 운용(%)
오스트리아	10	90
캐나다	15	85
독일	10	90
헝가리		100
이탈리아	80	20
일본	90*	10
모로코		100
노르웨이	98	2
스웨덴	80	20
스위스	습식 : 95 건식 : 10	습식 : 5 건식 : 90
영국	10	90
미국	30	70

*일반적으로 굴착지역이 50m 이상인 경우에 적용됨

다음은 ITA에서 각 국가들을 대상으로 숏크리트 타설 시스템 및 재료에 대해 조사한 내용들이다(ITA, 1996).

(1) 터널 안에서 숏크리트 타설시의 먼지 측정 여부

○ 일반적으로 측정하지 않은 국가 : 캐나다, 모로코

○ Low-volume air sampler를 사용하는 국가 : 오스트리아, 일본, 이탈리아, 노르웨이, 영국, 미국

○ High-volume air sampler를 사용하는 국가 : 독일, 노르웨이, 스위스

○ Piezometric balance dust meter를 사용하는 국가 : 오스트리아, 일본

○ Digital dust meter를 사용하는 국가 : 일본, 노르웨이, 스위스

(2) 숏크리트에서 추가적인 혼화재의 사용으로 인한 국가별 공사비의 증가(%)

○ 이탈리아 : 10%

○ 일본 : 10~20%

○ 스위스 : 5%

(3) Dust scrubber 사용 여부

○ 일반적으로 사용하지 않는 국가 : 오스트리아, 독일, 헝가리, 이탈리아, 노르웨이, 스웨덴, 미국

○ 가끔 사용하는 국가 : 스위스, 영국

○ 자주 사용하는 국가 : 일본(1986년 : 47% → 1990년 : 38% →1991년 : 37%)

○ 거의 항상 사용하는 나라 : 캐나다

(4) Dust scrubber 효과

○ 효과적으로 나타난 국가 : 캐나다, 일본, 독일, 스위스, 영국

○ 효과 여부가 명확하지 않게 나타난 국가 : 오스트리아, 스웨덴, 미국

(5) 숏크리트 타설시 스프레이 로봇의 사용

○ 일반적으로 사용하지 않는 국가 : 헝가리, 모로코, 스위스

○ 가끔 사용하는 국가 : 캐나다(원격 spray boom 장비가 거의 없음)

○ 자주 사용하는 국가 : 오스트리아, 프랑스, 독일, 영국, 미국

○ 거의 항상 사용하는 국가 : 일본, 노르웨이, 포르투갈, 스웨덴

(6) 숏크리트 기계 및 시스템

○ 이미 개발이 완료된 국가 : 캐나다, 이탈리아, 모로코

○ R & D가 더 필요한 국가 : 오스트리아, 프랑스, 일본, 스웨덴, 영국

○ 아직까지 개발이 완료되지 않았지만 현재 기술로도 충분한 국가 : 독일, 헝가리, 노르웨이, 스위스

2. 브라질

브라질에서의 숏크리트 공법은 60년대 중반에 처음 시작되었다. 스위스 회사인 알리바에서 알리바 BS-12 숏크리트 머신을 이용하여 구조물 결함을 수리할 때 숏크리트 공법을 적용하기 시작하였다. 1970년~1973년 사이에 상파울로에서 주요 해변까지 연결하는 도로가 건설되었는데, 11개 터널은 숏크리트와 일시적인 앵커를 지보재로 하고 현장타설 콘크리트 라이닝을 사용하는 NATM 공법의 원리로 건설되었다. 총 연장은 3.8km이며 약 15,000m^3이상의 숏크리트가 타설되었다. 1975년 이후 70여개의 도로 건설이 수행되어 총 연장 400km 도로에 80km를 터널로 건설하게 되었다. 모든 터널은 NATM 공법으로 건설되면서 숏크리트 타설량은 더욱 증가하였다. 이 터널들을 건설하는데 260,000m^3의 숏크리트가 소비되었다. 1988년 상파울로에서 처음으로 도시형 NATM 터널이 건설되었는데 하수도 터널이었다(Filho, 1995).

최초의 NATM 지하철 터널은 1981년 시공이 시작되어 30m^2의 교차단면과 총 연장길이 550m의 터널로 건설되었으며, 1차선과 2차선의 모든 터널에 숏크리트가 지보재로서 적용되었다. 1987년 Campinas시의 도로 굴착시 중간 및 대규모 단면의 터널 건설을 위해 숏크리트 로봇이 적용되었다. 당시 적용된 숏크리트 로봇은 고압의 분사가 가능하였으며 액상배합이 가능하였다. 이후 1992년에 지하철 공사가 시작되었는데, 6.5km의 NATM 터널 건설에 총 60,000m^3 이상의 숏크리트가 타설되었고 건조 및 습식 배합 기계나 액화 가속 펌프 등의 장비가 적용되었다. 그림 2.2.3과 표 2.2.8은 브라질에서 타설된 숏크리트의 소비량을 나타낸 것이다(Filho, 1995).

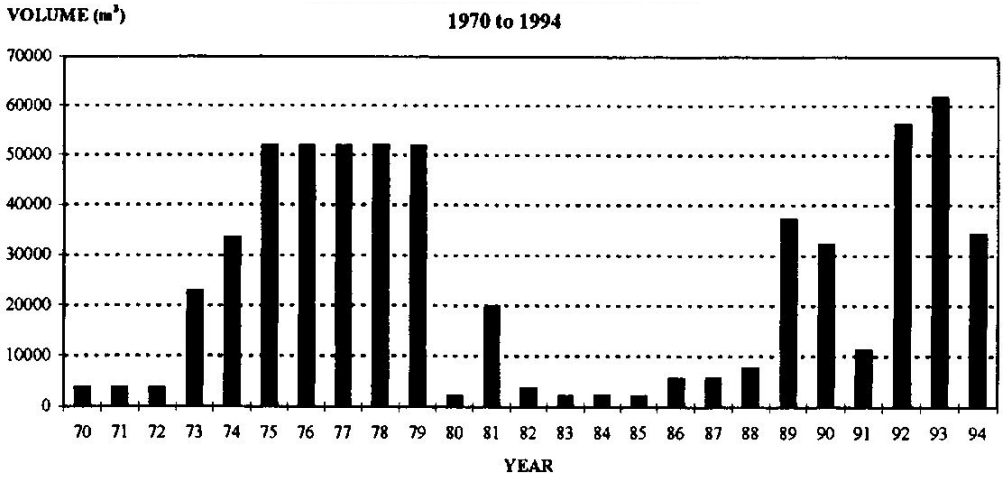


그림 2.2.3 1970년~1994년까지 브라질에서의 숏크리트 소비량(Filho, 1995)

표 2.2.8 터널공사에 타설된 숏크리트(Filho, 1995)

프로젝트	길이(m)	타설량(m^3)	공사기간
Ferrovia do Aco	79,729	28,1276	1975~1994
Cantareira	28,354	70,178	
Imigrantes	3,812	23,149	1970~1973
Line 1	2,251	20,711	1982~1992
Line 2	620	42,481	1989~1992
Line 3	1,757	31,265	1989~1994
Brasilia Subway	6,500	62,113	1992~1994
Maria Maluf	2×750	14,185	1987~1994
Rio Pinheiros	880	7,244	1987~1994
Av. Sto Amaro	390+435	14,498	
Ayrton Senna	1,350	7,077	from 1987
Header Pipe	13,830	4,940	1984~1994
Sewer	2,950	3,442	1987~1989
Sewer Repair	10,000	12,000	1992~1993
Sanegran	2,000	21,000	1980~1988
A.B.V	73	50	1978
TOTAL	156,340	578,404	

3. 일본

일본에서는 습식 숏크리트 공법과 배합과 건식배합 모두 쓰이고 있는데, 시공과 작업의 효율성을 고려하면 최근에는 구조물의 60% 정도가 습식 공법으로 건설되고 있다. 특히, 분말형 급결제 개발로 인해 습식 공법이 광범위하게 사용되고 있는데, 작업성을 좋게 하고 건조배합과 동일한 시멘트 함유량(360kg/cu m)을 보여준다. 분말형 급결제의 함유량은 시멘트 중량의 1~2% 이상이며, 높은 함유량은 콘크리트 장기강도에 악영향을 미치게 된다. 습식 공법에서는 배치플랜트에서 조절되고 배합된 콘크리트를 사용하게 되므로 재료의 품질관리 측면에 있어서는 건식보다 더 유리하나 물-시멘트비가 건식보다 더 커지게 된다(습식 : 55~65%, 건식 : 45~55%). 또한, 플랜트에서 배합하여 타설하기까지의 시간이 건식보다 더 길어지게 되며, 이것은 콘크리트의 강도 측면에서는 단점을 가지고 있다. 일반적으로 습식 배합의 경우 초기강도는 건식 배합의 50~60% 정도로 나타난다(Takashi, 1995).

현재 일본에서 개발된 새로운 숏크리트 기술로는 석탄회를 활용한 숏크리트 타설공법이 있다. 일본에서는 환경 문제의 일환으로 석탄 화력발전소에서 발생하는 석탄회의 재활용을 추진하여 왔고, 터널이나 사면 공사에 사용되는 숏크리트의 석탄회 활용 기술을 개발했다. 이 기술은 숏크리트에 사용하는 시멘트와 모래의 일부를 석탄회로 치환하여 사용하는 기술로, 장기적으로 견고한 품질이 되고 뿜칠 시의 콘크리트의 리바운드량을 대폭적으로 감소시키는 등 비용절감을 도모할 수 있다. 또한, 터널내의 분진 발생량을 억제할 수 있어, 작업환경의 개선을 도모하는 것이 가능하다. 숏크리트에 석탄회를 활용하게 되면 석탄회가 미세한 구형으로 암반에 타설되면서 다짐되는 특성이 있고 콘크리트의 점성도 높아지기 때문에 리바운드 양이 적고, 초기의 강도 발현성이 좋아지는 성질을 갖는 동시에 분진의 발생이 대폭적으로 저하되어 작업 환경의 개선이 도모된다. 특히, 석탄회는 장기간에 걸쳐 경화하는 특성이 있고 급결제의 영향을 받지 않아서 보통의 콘크리트와 비교하여 강도가 높은 품질이 된다. 히라세 터널 공사에서는 석탄회를 시멘트 중량의 30%로 치환하여 사용함으로써 재료비를 절감할 수 있었고, 숏크리트 공사비를 5 % 정도(히라세 터널의 절감 실적 : 1,000엔/㎥)를 절감할 수 있었다(Takashi, 1995).

일본에서는 숏크리트 장비의 개발에도 많은 연구와 투자가 이루어지고 있으며, Spraying robot for a specific section 타입이나 Multi-hinged manipulator 타입, Multi-hinge+slide mechanism manipulator 타입 등이 개발되어 사용되고 있다. 일본에서 사용되고 있는 숏크리트 로봇의 자동화 기능으로는 숏크리트 표면에 대해 노즐의 거리와 각을 일정하게 유지시켜 주고, 표면이 일정하지 않은 숏크리트 면에

대해 노즐 움직임 예측 속도를 조절해준다. 또 예상노선을 따라 노즐의 자동 배치가 가능하게 해주기 때문에 타설시 고효율의 타설이 가능하게 된다. 그림 2.2.4는 일본에서 사용되고 있는 Double unite system을 보여주고 있다(Takashi, 1995).

일본에서는 작업자가 좋지 않은 환경에 노출되는 것을 피할 목적으로 숏크리트 공법의 자동화가 진행되었다. 좋지 않은 작업환경에 영향을 미치는 중대한 문제는 타설시 발생하는 분진과 떨어지는 리바운드이다. 이러한 단점을 줄이기 위해 지금까지 많은 연구가 진행되었고 그 결과로 분진을 5mg/cu m 보다 적게, 30분 이상의 연속된 숏크리팅이 가능하게, 막장 내에서 어떤 물리력을 가하지 않아도 통풍이 되게 하는 기술이 발전했다. 일본에서 수행될 앞으로의 숏크리트 기술 개발 방향은 더 높은 레벨의 자동화 시스템의 개발, 더 작은 분진량, 더 적은 리바운드, 더 높은 품질, 더 빠른 작업 등과 같은 보다 넓은 보완에 초점이 맞추어져 있다. 이와 같은 목표를 이루기 위해 공학적인 숏크리트 로봇, 배출장비, feeder accelerator 등의 다양한 아이템 개발 연구가 수행중이다(Takashi, 1995).

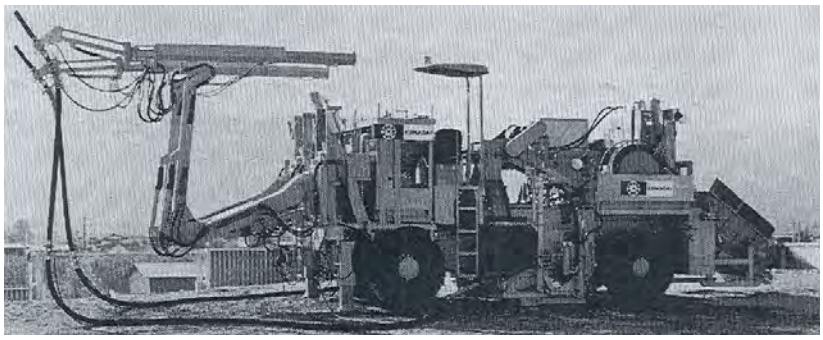


그림 2.2.4 Double unite system(Takashi, 1995)

4. 이탈리아

이탈리아에서는 습식 숏크리트 공법이 전체 숏크리트 공법 중 98% 이상을 차지하고 있다. 이탈리아에서 습식 공법을 건식 공법에 비해 많이 사용하고 있는 이유는 습식 공법이 건식 공법에 비해 리바운드가 적고, 습식 공법에 적용되는 펌프의 분출량(cm/h)이 더 높으며, 습식 공법은 숏크리트 타설시 먼지의 양이 매우 적어서 작업자에게 해가 적은 것으로 나타났기 때문이다. 또 건식 공법에서 숏크리트 노즐을 잡고 타설하는 노즐맨을 점점 구하기가 어려워지고 있고, 이탈리아의 산업안전 표준이 매우 엄격해져서 일반적으로 공사 계획에 타설 기계의 사용이 필연적으로

포함되야 한다. 따라서 현재 이탈리아에서 타설 기계를 사용하는 경우는 습식 공법 밖에 없는 것으로 나타났다(Geol, 1995).

이탈리아에서는 강섬유보강 숏크리트가 전체 숏크리트의 27% 정도가 시공되고 있다. 초기에는 많은 연구와 시험 결과가 풍부한 강섬유가 많이 적용되었는데, 최근에는 합성섬유에 대한 연구들이 좋은 결과들은 산출하고 있다. 또한, 숏크리트의 공학적인 성질을 향상하기 위해 많은 연구가 수행되고 있는데, 그 주요 목표로는 더 적은 리바운드, 숏크리트 타설 두께의 감소 및 와이어메쉬의 완벽한 대체 등이 있다. 이탈리아에서 생산되는 숏크리트의 98%가 습식 공법으로 시공되며, 그것의 95%는 방수재로 적용되고 있다. 소디움이나 포타슘 알루미네이트와 같은 알칼리 급결제는 시멘트 중량의 3~6% 이내로 사용되도록 규정하고 있는데, 알칼리프리계나 Non-caustic 급결제의 평균 사용량은 시멘트 중량의 6%를 적용하고 있다(Geol, 1995). 표 2.2.9는 이탈리아에서의 최근 시멘트, 콘크리트 및 숏크리트의 생산량을 비교한 것이다.

표 2.2.9 이탈리아의 숏크리트 생산량의 비교(Geol, 1995)

재료종류	생산량(㎥)			
년도	1992	1993	1994	1995
시멘트	41,100,000	33,700,000	32,800,000	38,000,000
콘크리트	133,000,000	106,000,000	102,000,000	118,000,000
숏크리트	1,350,000	900,000	700,000	900,000

이탈리아에서 숏크리트 공법이 적용되기 시작했을 때는 숏크리트 장비 및 기계는 모두 해외 제품이었으나, 25년이 지난 현재는 적용되는 숏크리트 장비의 90%가 국산화가 이루어졌다.

이탈리아에는 아직까지 표준적인 숏크리트 규격이 없으며 오스트리아 품질 규격인 The Österreichischer Betonverein의 Guideline on Shotcrete의 내용을 이용하고 있다. 여기에서 적용되고 있는 숏크리트 기술적 규격의 내용에는 다음과 같은 사항들이 포함되어 있다(Geol, 1995).

○ 숏크리트 배합시의 최소 시멘트 량(400kg/㎥ 이상)
○ 시멘트 종류
○ 숏크리트 코어의 재령 28일 압축강도(25MPa 이상)
○ 수분에 접했을때의 골재와 시멘트의 화학적 및 물리적 특성
○ 흡수 에너지(500J 이상)

5. 스위스

최근 많은 프로젝트에서 숏크리트의 압축강도는 35~50MPa 정도로 나타났는데, 이것은 낮은 w/c 비율과 고성능 급결제 및 고품질의 혼화재의 사용으로 가능하였다. 실리카 흄은 숏크리트의 여러 가지 특성을 향상시키는 것으로 연구되었고 특히, 황산염에 대한 저항력을 크게 향상시키는 것으로 나타났다. 반면 황산염 저항 시멘트 종류는 시험결과 효과가 좋지 않은 것으로 나타났다(Knut Garshol, 1995).

1970년대부터 1985년 사이 와이어 메쉬 시스템과 강섬유보강 숏크리트(SFRS)의 성능을 비교하기 위한 실제 스케일의 모델시험이 스칸디나비아와 북아메리카에서 많이 수행되었다. 시험 결과 강섬유는 와이어 메쉬와 동등하거나 혹은 높은 휨강도를 나타내었다(그림 2.2.5). 또한, 터널 현장에서 와이어 메쉬의 설치 장소는 조절하기 어려운 반면, SFRS는 모든 부분에서 보강이 가능하기 때문에 기술적인 이점을 가지고 있고, 강섬유는 수축을 막고, 암반과의 접착력을 향상시키는 효과가 있는 것으로 나타났다(Knut Garshol, 1995).

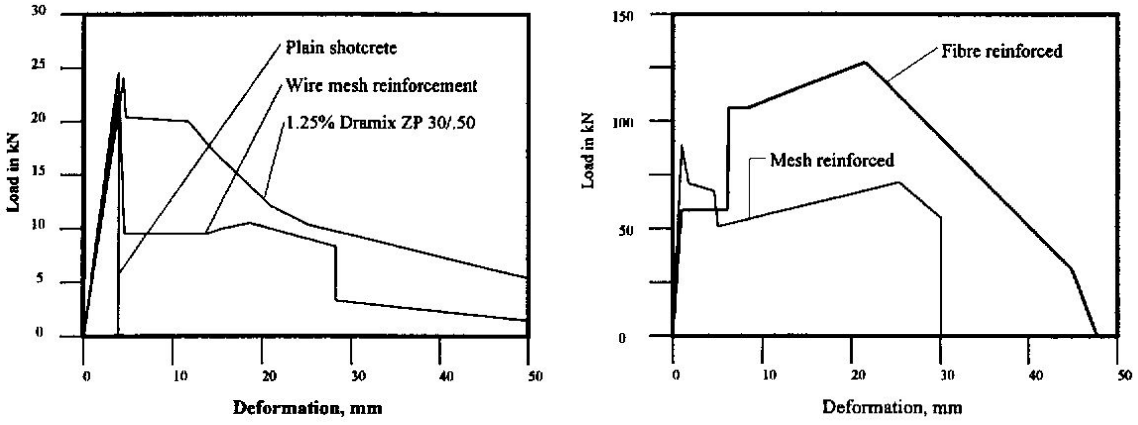


그림 2.2.5 강섬유보강 숏크리트의 휨강도 시험 결과(Morgan D. R., 1982)

스위스에서 이루어진 강섬유보강 숏크리트의 연구에서 SFRS가 공기를 단축시킬 수 있는 이유를 다음 4가지로 꼽았으며, 모든 경우에서 다른 경우에 비해 뛰어난 경제성을 가진다고 결론지었다. 그리고 그림 2.2.6은 단면이 60㎡의 터널에서 드릴링과 발파로 2000m를 굴착하고 100mm의 숏크리트 두께를 적용한 경우의 건식과 습식 공법의 경제성을 비교한 것이다(Knut Garshol, 1995).

○ 최근의 습식 펌프와 숏크리트 로봇 시스템은 최대 분출량이 약 20㎥/h로서 높은 분출이 가능하여 공기 단축이 가능한 것으로 나타났다.

○ 와이어 메쉬를 설치하는데 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다. 부가적으로 와

이어 메쉬를 사용할 때와 비교하여 작업 공정이 줄어져서 3배의 시간을 단축시킬 수 있다. 발파된 암 표면에서 와이어 메쉬의 이론적인 두께는 100~150mm이므로 약 50%의 추가적인 콘크리트가 메쉬를 덮기 위해 필요한 것으로 나타났다.

○ 숏크리트 공법을 고려해 볼 때 와이어 메쉬의 적용은 리바운드를 증가시킨다. 건식+와이어 메쉬 공법과 습식+강섬유보강 공법을 비교해 볼 때, 리바운드율 차이는 약 20%이며, 66%까지 리바운드율을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

○ 고품질 SFRS를 사용하면 설계에 가장 근접한 시공이 가능하며 프로젝트의 공기와 공사비를 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

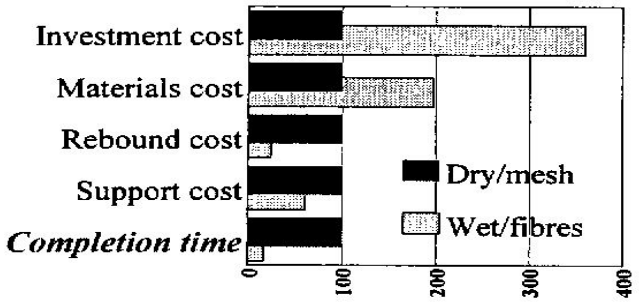


그림 2.2.6 건식공법과 습식공법의 비교(Knut Garshol, 1995)

6. 오스트리아

오스트리아에서는 새로운 숏크리트 타설 시스템인 Rolling and Gliding Formwork를 개발하였다. 이 시스템의 주요한 개발 목적은 리바운드로 인한 숏크리트 재료 손실을 저감하는 것으로, 초기 배합시 생산되는 숏크리트의 40% 정도의 재료 손실을 저감시킬 수 있다. 재료 투입의 개선과 습식 노즐의 사용으로 리바운드되는 재료를 많이 저감시키고는 있지만, 현장의 최적 상황에서조차도 약 20%의 리바운드량이 숏크리트의 타설 방법에 의해 좌우된다. 또 다른 주요한 개발목적은 최대 두께의 싱글쉘 라이닝에 대한 요구 때문이다. 부가적인 리바운드의 발생과 숏크리트 타설시의 먼지로 인해 완벽한 타설 두께를 시공하지 못할 경우, 계속적으로 지속되는 지반의 압력으로 인해 더 높은 수준의 시공을 필요로 하게 된다(Heinz, 1995).

Rolling and Gliding Formwork의 주요 특징은 리바운드로 인한 재료 손실을 저

감시킬 수 있고 숏크리트 타설시 발생되는 먼지를 감소시킬 수 있으며, 작업환경 개선으로 작업자의 건강에 도움이 된다. 또한, 싱글쉘 라이닝용 숏크리트를 적용할 때 적용성이 우수하고 고품질의 무독성 숏크리트의 타설이 가능하다. 그림 2.2.7은 Rolling and Gliding Formwork 시스템의 The Roll-Over Shutterbelt 방법의 개요를 나타낸 것이고, 그림 2.2.8은 Gliding Formwork를 나타낸 것이다.

The Roll-Over Shutterbelt는 크롤러 원리에 따라 flexible endless drive belt의 운전에 의해 완벽한 shuttering 시스템을 제공할 수 있다.

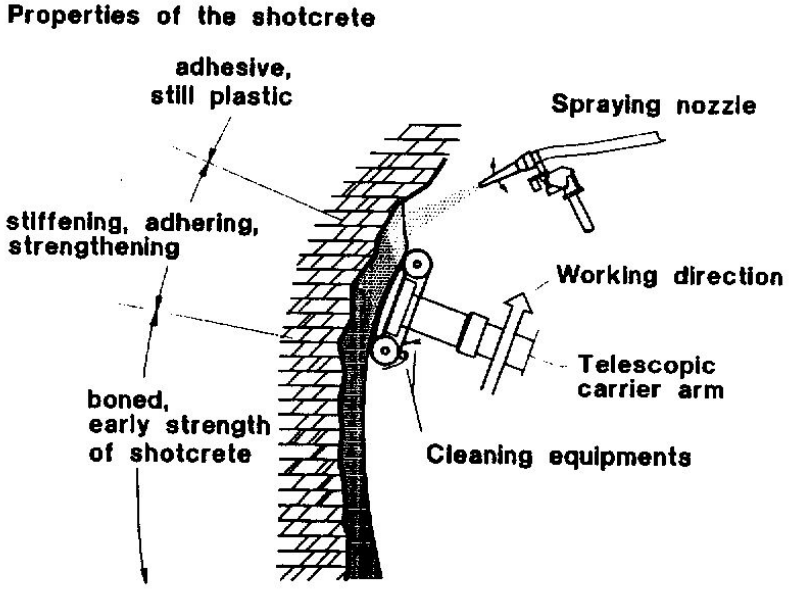


그림 2.2.7 The Roll-Over Shutterbelt 방법

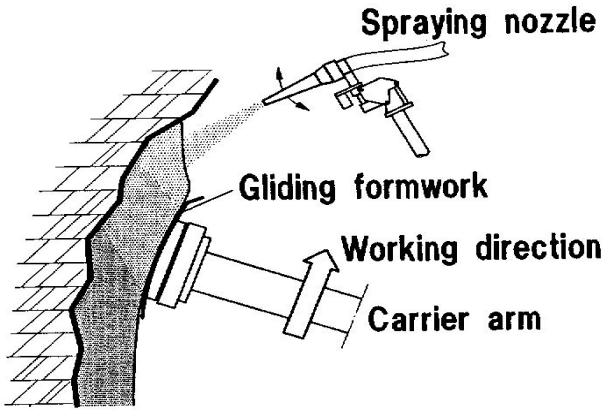


그림 2.2.8 Gliding Formwork

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 서 언

분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발을 위한 1차년도 연구에서는 현장배합 숏크리트의 국내 시공실태 조사를 통해 근본적인 문제점들을 파악하고자 하였다. 시공현장에서 실제적으로 타설되고 있는 숏크리트의 문제점을 파악하기 위해 본 연구에서는 실무기술자들을 대상으로 한 현장설문조사를 실시하였고, 실무 의견 수렴을 통해 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발 방향을 결정하고자 하였다. 또한, 레디믹스트 제조 기술의 숏크리트 공법으로의 적용 가능성을 파악하기 위해 국내외 기술 수준을 조사하였고, 국내외 민간기업이 보유하고 있는 레디믹스트 제조 기술 및 생산 시스템을 분석하였다.

레디믹스트 숏크리트의 원재료에 대한 품질 정립 및 재료 규격화 방안을 제시하기 위해 숏크리트 재료의 품질 특성 및 국내외 품질 규정을 조사하였고, 가장 근간이 되는 재료인 골재의 국내 생산 시스템, 생산 품질 상태, 현장 품질관리 실태 및 품질시험을 통한 품질 성능 평가를 실시하였다. 특히, 실제 현장에서 사용되고 있으며 숏크리트 품질 성능과 직결되는 골재 시료를 채취하여 물성 실험을 수행하여 앞으로의 연구개발에서 기본 자료로 활용하고자 하였다.

현장 상황에 따른 숏크리트 설계강도 변화, 막장 출수량에 따른 설계 변화, 공사비 및 공사기간의 변경으로 인한 설계 변화 등의 상황에서 효과적이며 유동적으로 대처가능한 다기능 레디믹스트 숏크리트 개발을 위해 국내 터널 막장의 시공조건을 조사하였고, 숏크리트의 다기능 부여를 위한 기능 인자를 설정하고자 하였다.

2차년도 연구에서는 고로슬래그 미분말의 국내 발생현황 및 물리·화학적 특성을 고찰하고, 경제적 재활용 사례 조사를 통해 이론적 자료를 축적하고자 하였다. 특히, 부산물로서 고로슬래그 미분말이 발생되는 않는 파이넥스 공법에 대한 조사를 통해 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 개발에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

레디믹스트 숏크리트 개발에 있어서 믹싱, 운반 및 시공 과정에서 발생 가능할 수 있는 골재재료의 분리 현상은 제품의 품질과 직결되는 매우 중요한 사항이기 때문에 골재 입도 조정을 통한 재료분리 최소화 방안 검토와 최적 믹싱 시간 도출을 통한 재료분리 최소화 방안을 검토하고자 하였고, 도출된 레디믹스트 숏크리트 및 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 초기배합에 대한 현장 타설실험을 실시하여 현

장배합용 숏크리트와의 품질 평가를 실시하였다. 또한, 국내 현장 숏크리트 배치플랜트의 운용 및 실태 파악을 통해 레디믹스트 숏크리트 제품의 효율적인 현장 공급을 위한 새로운 일체형 시스템을 도출하고자 하였다.

초기 개발된 레디믹스트 숏크리트의 실제적인 경제성 평가를 위해 현장배합 숏크리트와의 설계 단가 비교 및 분석을 실시하였고, 고로슬래그 미분말의 숏크리트에 대한 적용성 평가와 양생특성 및 매트릭스 변화 특성을 파악하였고 산업부산물로서 환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 용출시험을 실시하였다. 그리고 설정된 다기능 인자에 대한 초기배합을 도출하여 각종 혼화재 특성에 따른 다기능 인자의 성능 발휘 시험을 수행하였고, 숏크리트 타설시험기 시제품을 제작·완료하여 기본적인 운전 및 작동 시험을 완료하였다.

3차년도 연구에서는 분말형 레디믹스트 숏크리트, 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 및 다기능 레디믹스트 숏크리트의 최적 배합을 도출하였고, 이에 대한 최종 현장 적용성 평가를 실시하였다. 특히, 레디믹스트 숏크리트 및 일반 숏크리트에 대한 수은압입시험을 통해 공극분포특성을 파악하여 재령 및 양생 과정에 따른 품질 우수성을 평가하였고, 고강도 및 고차수성 다기능 레디믹스트 숏크리트의 적용인자에 따른 품질성능 평가를 수행하였다. 또한, 실내촉진시험 및 옥외폭로시험을 통해 레디믹스트 숏크리트의 단일 및 복합열화특성을 파악하고 심도 있는 장기내구성 평가를 실시하였다. 그리고

레디믹스트 숏크리트의 대량생산 및 규격화 생산을 위한 자동생산 시스템 확보를 위해 참여업체의 기존 생산 라인의 변화를 통해 재료 생산 시스템을 설계하였고, 실제 건설현장에 대한 판매가 가능한 레디믹스트 숏크리트 시제품을 생산하여 현장 적용성 평가에 적용하였다. 그리고 레미콘 공장에서 현장까지의 운송시간 경과에 따른 레디믹스트 숏크리트의 슬럼프 및 공기량 변화를 측정하여, 균일한 품질 유지 방안을 고려하였다.

최종 경제성 및 시공공 평가를 위해 현장 시공 프로세스 분석을 실시하여 기존 현장배합 숏크리트와 비교 평가하여, 레디믹스트 숏크리트의 경제적 우수성을 검증하였고, 2차년도 연구개발서 제작된 숏크리트 타설시험기를 활용하여 실제적인 재료 품질 평가를 실시하고 사용 매뉴얼을 작성하였다.

최종적으로 재료생산 및 공정관리편과 시공 및 품질관리편으로 구분된 레디믹스트 숏크리트 공정관리 및 시공·품질관리 편람(안)을 제안하여, 실제 건설 현장에서 레디믹스트 숏크리트 적용시 효과적인 시공 및 품질관리가 가능하도록 하였다.

제 2 절 레디믹스트 관련 기술현황 조사

레디믹스트 공법이란 공장이나 기타 타설 현장이 아닌 곳에서 사전에 재료를 규정된 배합으로 믹싱을 한 후, 현장에 운반하여 지정된 장소에 시공하는 공법을 말한다. 현재 국내외를 통틀어 레디믹스트 형태의 숏크리트는 개발된 사례가 없으며, 레디믹스트 기술의 대부분은 일반적으로 레미콘(Ready-mixed concrete, Remicon, 이하 레미콘)에 관련된 것이다. 국내에서도 콘크리트 사용량의 85% 이상이 레미콘 형태로 시공되고 있는 상황이다.

따라서, 현재 레디믹스트 관련 기술의 대부분은 레미콘과 관련된 기술이며, 본 연구에서 개발하고자 하는 분말형 레디믹스트 숏크리트도 근본적인 개념은 레미콘과 동일하다고 할 수 있다. 레미콘과의 차이점은 공장에서 배합수가 혼합되어 현장으로 운반되는 레미콘과는 달리 레디믹스트 숏크리트는 배합수가 혼합되지 않은 건조형태로 포장되어 출시된다는 것이다. 최근 들어 그 사용량이 증가하고 있는 레디믹스트 모르타르(이하, 레미탈)도 같은 형태의 재료라고 할 수 있다.

본 절에서는 국내외 레디믹스트 관련 기술의 현황을 파악하고 새로운 레디믹스트 재료의 개발을 위한 기본 자료로 활용하고자 한다.

1. 레디믹스트 관련 국내 품질 규정

가. 레디믹스트 콘크리트의 KS 규정

최근 들어 건설시장의 추세는 고품질 및 고성능 제품으로의 발전이 계속되고 있고 이런 시대적 상황에 대처할 수 있는 규정이 절실히 필요한 실정이다. 레디믹스트 콘크리트 및 레디믹스트 건설 재료는 건설공사에서 구조물을 형성하는 가장 중요한 재료로서 각종 시방서, 설계기준 등에 인용되어 사용되고 있으나, 규격내용에 대한 해석 내용을 달리하여 생산자와 수요자간의 혼동을 종종 일으키고 있다. 건축·토목 분야 공법별 제품개발 종류는 다양하나 그에 준하는 KS규격 제정 현황은 아직도 상당히 미비한 수준이다. 레디믹스트 건설재료 관련 KS규격의 제정 현황은 다음과 같다.

○ 건조시멘트모르타르 KS 제정(KS F 5220) : 1993년 5월 21일

○ 건조시멘트모르타르 KS 개정 : 2003년 12월 4일

○ 수경성 시멘트 무수축 모르타르 KS 제정 (KS F 4044) : 2004년 10월 19일
○ 시멘트계 자기수평 모르타르 KS 제정 (KS F 4041) : 1999년 5월 24일

레미콘에 대한 한국산업규격은 KS F 4009(레디믹스트 콘크리트)이며, 품질에 영향을 미치는 주요사항만을 정리하면 다음과 같다.

(1) 재료
① 시멘트 : 보통 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 시멘트, 포틀랜드 포졸란 시멘트, 플라이 애쉬 시멘트의 사용가능
② 골재 : 염화물 함유량 0.04% 이하

(2) 대상
① 종류 : 보통콘크리트, 경량콘크리트
② 공기량 : 보통 콘크리트에서는 4.5%, 경량 콘크리트에서는 5.0%
③ 슬럼프 : 5~21cm

(3) 품질(공사현장의 배출지점 기준)
① 압축강도 : 1회의 강도시험 결과치의 평균치는 호칭강도의 85% 이상이어야 하고, 3회의 강도시험 결과치의 평균치는 호칭강도 이상
② 슬럼프 : 슬럼프 8cm 이상, 18cm 이하일 때 허용차는 ±2.5cm
③ 공기량 : 허용차 ±1.5%
④ 염화물량 : 염소이온으로서 0.3kg/m^3 이하

(4) 제조
① 재료저장 설비
- 시멘트 : 풍화방지
- 골재 : 최대출하량의 1일분 이상의 저장설비, 바닥, 콘크리트 위에 배수시설, 골재분리가 없는 균등한 골재를 공급할 수 있는 저장 및 운반설비
- 혼화재료 : 품질변화장치
② 배치플랜트
- 연속적으로 각 재료를 계량할 수 있는 장치와 지시계
- 잔골재의 표면수량의 계량 및 보정장치
- 믹서 : 고정믹서

- 운반 : 트럭믹서 또는 트럭에지테이터로 혼합 시작시부터 1.5시간 이내에 공사지점에 배출
- 계량오차 : 시멘트는 1%이내, 골재는 3%이내, 물은 1%이내, 혼화재는 2%이내, 혼화제는 3%이내
- 혼합 : 공장내에서 균일하게 혼합

(5) 시험 항목

① 강도, 슬럼프, 공기량, 염화물량, 단위용적질량 시험

② 강도시험은 $150m^3$당 1회의 비율로 수행

③ 1회의 시험결과는 임의의 한 대의 운반차로부터 채취한 시료로 제작한 3개의 공시체의 시험치 평균값을 의미함

나. 레디믹스트 콘크리트의 표준시방서 규정

레미콘에 대한 콘크리트 표준시방서(건설교통부, 2003)에서 품질에 영향을 미치는 주요사항만을 정리하면 다음과 같다.

(1) 공장의 선정

① 공장은 KS 표시허가 공장이고 재료시험기사 자격을 지닌 기술자 혹은 이와 동등 이상의 지식, 경험이 있는 기술자가 상주하는 공장을 선정

② 운반시간, 배출시간, 콘크리트 제조능력, 운반차의 수, 제조설비, 품질관리상태 등을 고려

(2) 품질에 대한 지정

① 종류 : 보통콘크리트, 경량콘크리트

② 공기량 : 보통콘크리트일때는 45%, 경량콘크리트의 경우는 5%

③ 구입자와 생산자간의 협의사항

- 시멘트의 종류
- 굵은골재 최대치수
- 혼화재료의 종류
- 염화물 함유량의 한도
- 호칭강도를 보증할 재령
- 경량콘크리트의 경우는 콘크리트의 단위체적질량

- 콘크리트의 최고 또는 최저온도
- 물-시멘트의 상한치
- 단위수량의 상한치
- 단위시멘트량의 하한치 또는 상한치
- 유동화 콘크리트의 경우 유동화하기 전 레디믹스트 콘크리트에서 슬럼프의 증대량
- 그 외 필요한 사항

④ 받아들이기
- 콘크리트 치기에 앞서 납품일시, 콘크리트의 종류, 수량, 배출장소, 납품속도 등을 협의
- 콘크리트 치기가 중단되지 않도록 긴밀한 연락
- 안전한 운반과 원활한 출입을 위한 콘크리트 배출장소
- 재료분리가 일어나지 않는 콘크리트 배출작업

(3) 제조설비
① 재료의 저장설비 : 콘크리트의 품질이 저하되지 않도록 하는 시멘트, 골재, 혼화재료의 저장 설비
② 배치플랜트 : 각 재료를 위한 별도의 저장빈과 정확한 계량을 확인할 수 있는 지시계를 갖춘 플랜트
③ 믹서 : 고정식 믹서
④ 운반차 : 트럭믹서 또는 트럭애지테이터의 사용을 원칙으로 하고 슬럼프가 낮은 콘크리트를 운반할 때는 덤프트럭 사용가능

(4) 시험방법
① 레디믹스트 콘크리트는 슬럼프시험, 공기량시험, 강도시험, 염화물 함유량 시험, 단위체적질량시험 등을 KS에서 규정하는 기준에 따라 수행함

(5) 검사
① 검사는 강도, 슬럼프, 공기량 및 염화물 함유량에 대하여 시행하고 그 합격 여부를 판정

2. 레디믹스트 관련 기술 분석

가. 국내 기술 수준 및 산업동향 분석

(1) 레디믹스트 관련 기술 수준

레디믹스트 콘크리트는 현대사회의 기반구조물로서 국내에서 연간 4억m^3가 생산되는 대표적인 건설재료로 철저한 품질관리가 요구되고 있으며, 취급과정의 부주의는 바로 부실공사의 원인으로 나타나므로 매우 엄격한 품질관리가 요구되는 제품이다. 표 3.2.1은 국내에서 사용 중인 레디믹스트 재료가 가지는 특징 및 장점을 재래식 현장배합 공사방식과 비교 서술하여 나타낸 것이다. 현대적인 공장배합 제조 방식을 채택함으로서 현장배합 방식의 최대 단점인 품질 불균일 및 시공 공정의 복잡성을 해결하려는 추세이다.

표 3.2.2는 레디믹스트 재료의 혼합, 이송 및 시공과 관련된 국내 기술 수준의 변천과정을 나타낸 것으로, 레디믹스트 재료는 기계화 및 기술력의 발전으로 완전 자동화 단계로 전환되고 있는 추세이다. 또한, 국내 레디믹스트(Ready-mixed) 제품들은 숏패치를 비롯하여 용도별로 많은 제품이 생산되고 있으며, 주로 작업시간단축, 공사비 절감, 작업환경 개선 등의 효과가 있어 여러 시멘트업체에서는 소비자가 요구하는 성능에 따라 각각의 용도에 맞는 다양한 모르타르 제품을 생산하고 있다. 표 3.2.3은 국내 레디믹스트 제품의 종류 및 특성을 나타낸 것이다.

표 3.2.1 재래식 방법과 공장배합 방법 기술 비교

재래식 현장배합 방식	현대적인 공장배합 방식
-현장준비에 많은 시간을 필요 -현장배합은 품질 불균일 -현장 품질관리 어려움 -동절기 dispersions 동결 -인력에 의한 재료운반, 복잡함 -포장방식에 따라 공사공정 복잡 -복잡한 공정의 시공품질 하자요인	-현장준비 작업이 간단함 -정량 첨가방식 생산 품질 균일 -장비system 현장시공 품질관이 용이 -동절기 dispersion 가능 -현장 환경조건 의거 운송장비로 운반 -장비system 현장시공 공사공정 용이 -같은 품질로 시공 -안정적, 경제적 -품질 균질성 -사용 간편 -취급이 용이 -공기단축 -효과적,지속성 -높은 기술성
느리고 비효과적 수준	빠르고 효과적

표 3.2.2 국내 레디믹스트 기술 수준의 변천과정

종래 레디믹스트 모르타르	-원료: 현장으로 개별수송 -배합: 현장배합 -혼합: 수작업(삽비빔) -시공: 수작업 시공 , 생산성: 100%, 10m^2/人
수동에 의한 건조혼합 레디믹스트 모르타르	-원료: 공장 건조분급 혼합 -배합: 적량계량 -이송: 지대포장 현장이송 -혼합: 수작업을 위한 물투입 -시공: 수작업 시공, 생산성: 200%, 20m^2/人
반자동화 건조혼합 레디믹스트 모르타르	-원료: 공장 건조분급 혼합 -배합: 적량계량 -이송: 지대포장 현장이송 -혼합: 혼합기 이용 혼합, 자재투입 수동 -시공: 기계시공, 생산성: 400%, 40m^2/人
완전자동화 건조혼합 레디믹스트 모르타르	-원료: 공장 건조분급 혼합 -배합: 적량계량 -이송: silo포장 현장이송 -혼합: 자동믹셔 이용 혼합 -시공: 기계시공, 생산성: 500%, 50m^2/人

표 3.2.3 국내 레디믹스트 제품의 종류 및 특성

종 류	특 성	주 용 도
그라우트용	높은 유동성으로 틈새를 메우는 작업에 사용되며 조기강도 및 강재와의 부착강도가 높고, 재료분리가 없고 무수축으로 침하현상이 없음	기계기초, 교량의 이음부 및 받침부 기초, 철주·철골기초, 구조물 보강, 공장바닥보수
자동수평조절용	스스로 자동으로 수평을 형성하여 평탄하고 우수한 바닥면 형성 작업에 사용되며 내구성이 높고, 시공이 간편하고 공기단축 효과가 뛰어남	백화점, 전시장, 아파트 등 바닥면적이 넓거나 정밀한 수평을 요하는 건물의 바닥 마감
접지저항저감용	발·변전소, 송전철탑 등의 접지에 사용하며 토양과 융화가 쉽고 접촉면적 확대가 가능하여 접지효과가 우수하고 자유로운 시공이 가능함	발·변전소, 송전철탑 접지, 유무선 기지국 통신접지, 전자유도 및 정전기 방지접지
단열용	구조물의 열손실 방지, 흡음·차음을 요하는 공사에 사용하며 열전도율이 낮고 습기 및 곰팡이 방지효과가 우수하고 건조수축에 의한 균열현상이 없음	방송국, 극장 등의 대형건물 및 기계실, 공조실, 수조실의 결로방지

(2) 레디믹스트 제품의 생산량

그림 3.2.1은 국내 레디믹스트 모르타르의 연간 생산량을 나타낸 것인데, 매년 증가하고 있는 추세이며 각 업체별 생산 규모현황은 표 3.2.4와 같다.

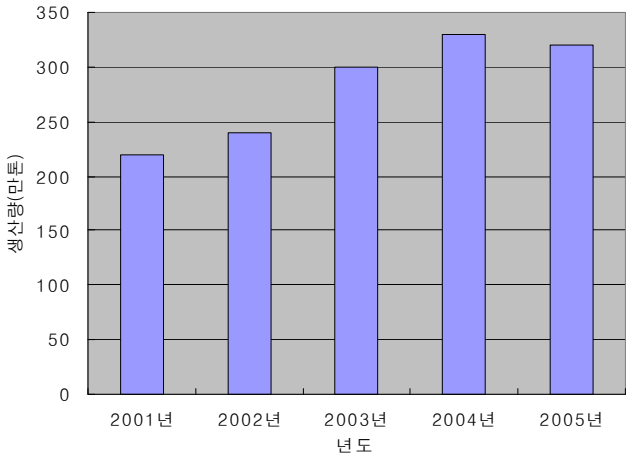


그림 3.2.1 분말형 레미탈 제품의 연간 생산량

표 3.2.4 각 업체별 분말형 레디믹스트 모르타르의 생산규모 현황(2005년 기준)

업 체 명	생산규모(만톤)	점유율(%)
H 시멘트	150	47
S 양회	98	31
A 시멘트	50	15
D 시멘트	22	7
합 계	320	100

최근 드라이 모르타르가 시멘트업계의 효자제품으로 급부상하고 있는 상황에서 시멘트업계가 건설경기 침체로 고전하고 있지만 드라이 모르타르 매출은 해를 거듭할수록 늘어나 국내 업체들은 공장 증설에 나서고 있는 상황이다. 드라이 모르타르는 시멘트와 모래를 미리 혼합한 제품으로 공사현장에서 물만 섞으면 간편하게 사용할 수 있는 제품이다. 현재 국내 드라이 모르타르 시장의 선두주자인 H 시멘트는 지난해 드라이 모르타르에서만 모두 1,010억원의 매출을 올렸는데, 이는 전체 매출 4,849억원의 20.8%에 이르는 수준이다. H 시멘트의 드라이 모르타르 매출비중은 지난 2000년까지만 해도 10% 수준을 간신히 넘겼지만 2002년 12.9%, 2003년 15.9%, 2004년 17.8% 등으로 가파른 상승을 보여주고 있다. 또한, S 양회도 지난해 매출

4,820억원 중 드라이 모르타르가 321억원을 차지했는데, 전체 매출은 16% 줄어들었지만 드라이 모르타르 비중은 오히려 두 배나 높아진 결과를 나타내 국내 레디믹스트 시장의 확대를 실감할 수 있었다. 후발주자인 A 시멘트의 드라이 모르타르 매출 비중도 2003년 4.1%에서 2004년 5.5%, 지난해 6.7% 등으로 확대되고 있는 것으로 나타났다. 그림 3.2.2는 레디믹스트 제품인 드라이 모르타르의 최근 5년간 국내 시장규모를 보여주고 있다.

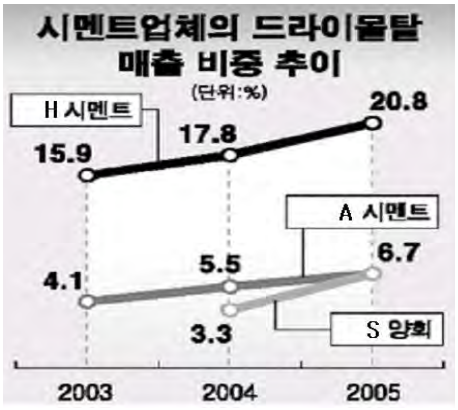


그림 3.2.2 국내 시멘트 업체의 드라이 모르타르 매출 비중 추이

국내에서 생산중인 레미콘 및 레미탈용 제품에 공급되는 시멘트량은 레미콘용으로(33%) 1,675만톤이 공급되고 있으며, 레미탈용 및 그외 재료에 공급되는 양은(67%) 3,385만톤 정도이다. 표 3.2.5는 레미콘 및 레미탈용 제품에 공급되는 시멘트량을 나타낸 것이다.

표 3.2.5 레미콘 및 레미탈용 제품에 공급되는 시멘트량

시멘트 공급량(05년)		
총 생산	레미콘용	레미탈용 외
5040만톤 100% 생산:4700만톤+수입340만톤) 3조(60000원/톤)	비율 : 33% , 금액: 1조 공급량 : 1,675만톤 레미콘12567m^3 생산(7조5천억)	비율 : 67%, 금액: 2조 공급량 : 3385만톤 Dry레미탈 3200천톤 생산

비고) 시멘트 : 60000원/톤 , 레미콘 : 60000원/m^3

나. 국외 기술 수준 및 산업동향 분석

(1) 레디믹스트 관련 기술의 발전 동향

그림 3.2.3은 국외 레디믹스트 관련 기술의 발전 동향을 나타낸 것이다. 레미콘 및 레디믹스트 건설재료의 기술력 확보와 시공 선진화를 주도하는 국가들은 유럽지역임을 알 수 있고, 터키, 그리스, 호주, 남아프리카 등은 유럽 다음으로 매우 활발한 연구 및 발전이 진행 중인 것으로 나타났다. 우리나라는 레디믹스트 기술력 확보 및 고품질 재료 개발에 주력하는 개발 단계로 나타났다.

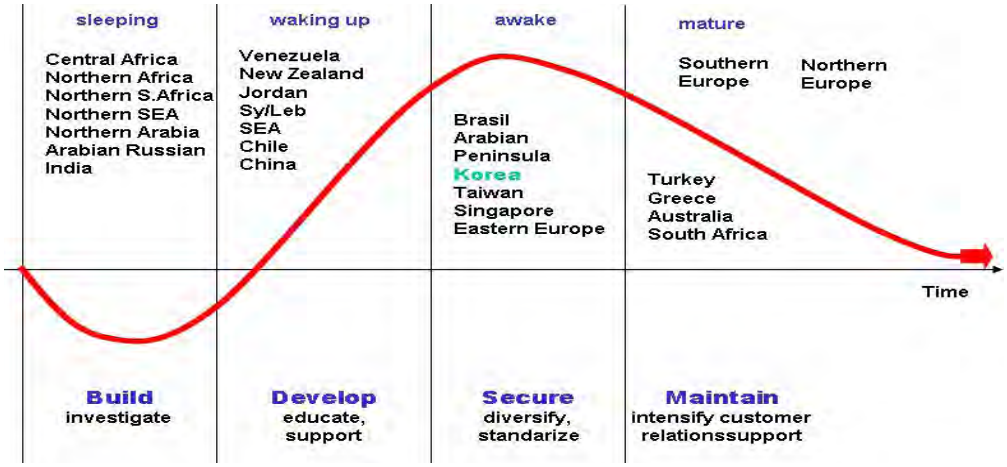


그림 3.2.3 국외 레디믹스트 관련 기술의 발전 동향

레디믹스트 제품의 해외시장 성장추이는 그림 3.2.4와 같으며 2005년까지 매년 15% 이상의 성장을 보이고 있는 것으로 나타났다. 신흥시장으로 부각을 나타내는 곳은 동아시아(중국) 및 남아메리카이며 최근에는 최종 소비자의 요구에 따라 품질, 내구성 및 기능성을 향상시키고 사용성을 극대화한 소포장 제품(20kg 이내)의 개발도 매우 빠르게 성장하는 추세이다.

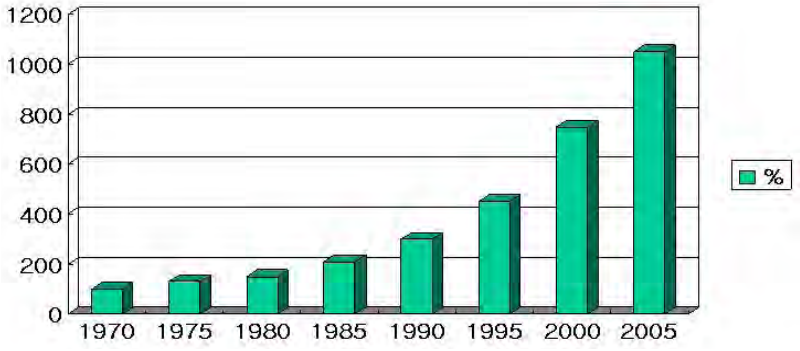


그림 3.2.4 레디믹스트 제품의 해외시장 성장추이

표 3.2.6은 중국의 드라이 모르타르 현황을 나타낸 것으로 중국은 총 1,800만톤에 달하는 드라이 모르타르의 생산능력을 보유하고 있으며, 2005년에는 연간 4백만 톤을 시공하고 있는 것으로 조사되었다. 중국의 경우 2008년 북경올림픽과 2010년 세계박람회를 계기로 모르타르 산업이 크게 발전할 전망이며, 향후 20년은 드라이 모르타르의 상업화를 실현하는 시기가 될 것으로 예상된다. 중국의 주요도시의 향후 드라이 모르타르의 수요전망을 살펴보면 북경이 1,000만톤, 상해가 1,000~1,500만톤을 사용할 것으로 예상된다.

표 3.2.6 중국의 드라이 모르타르 현황(2005년 기준)

구 분	생산 능력 (톤)	사용량 (톤)
상 해	10,070,750	904,200
북 경	1,510,000	526,000
광 동	1,830,000	470,000
기 타	4,500,000	2,166,000
합 계	17,910,750	4,066,200

(2) 미국 레디믹스트 콘크리트의 산업동향

(가) 산업개요

미국의 레디믹스트 콘크리트 산업은 1913년 메릴랜드주의 볼티모어시에 최초의 레미콘 플랜트가 건설되면서 시작되었다. 당초에는 샌트럴믹스(central mix) 방식으로 플랜트에서 반죽되어 덤프트럭으로 운반 되어 품질에 대한 평판이 나빴으나 13년이 지난 1926년 믹서트럭의 발명으로 품질문제가 해결됨에 따라 급속하게 발전하였다. 현재는 매년 3억m^3 이상의 레디믹스트 콘크리트를 생산하고 있으며 미국 전

반에 걸친 배치 플랜트 시설과 믹서트럭들은 양과 질적인 면에서 세계 제일 이라고 할 수 있다.

미국은 전체 53개주에서 균등한 분포를 갖고 레디믹스트 콘크리트가 사용되고 있으며 매년 지역별 통계를 내어 볼 때 텍사스와 캘리포니아주가 전체 20%로 가장 많은 레디믹스트 콘크리트를 생산하고 있다. 레디믹스트 콘크리트는 생산방식에 있어서 트럭믹서 방식과 센트럴믹스 방식 그리고 시멘트, 골재탱크, 계량장치, 믹서 등을 모아서 트레일러와 트럭샤시 위에 탑재한 것으로 자유롭게 이동할 수 있는 모빌믹서 방식이 사용되고 있다. 이러한 방식들은 광활한 미국의 대지에서 지역특색에 맞게 자유롭게 사용되고 있으며 전미 시멘트 소비량의 75% 이상이 레디믹스트 콘크리트로 사용되어 콘크리트 분야에서 매우 중요한 부분을 차지하고 있다.

(나) 미국의 레디믹스트 콘크리트 표준규격

레디믹스트 콘크리트의 본격적인 사용은 정부의 표준규격제정에 따라 이루어졌다. 최근 2002년에 새롭게 개정된 레디믹스트 콘크리트 표준 규격은 ASTM-C-94로 레디믹스트 콘크리트의 구분, 품질규정, 제조, 시험방법 및 검사방법과 품질관리 방법이 구체적으로 명시되어 있어 이 규격을 바탕으로 제조하고 있다

미국에서 사용되는 레디믹스트 콘크리트의 단위는 부피의 단위인 yd^3를 사용하고 있으며 한국에서 사용되고 있는 m^3단위와는 0.76451의 차이가 있다. 즉 yd^3에 0.76451을 곱하면 한국과 같은 m^3단위의 레디믹스트 콘크리트량을 구할 수가 있다.

(다) 미국의 레디믹스트 콘크리트 수송

미국에서의 레미콘 운반은 광대한 지역으로 인해 국내와 같은 믹서트럭을 사용하고 있으며 전형적으로 믹서트럭은 9~10yd^3의 것이 사용되고 있다. 이 믹서트럭에는 약 80%의 레미콘을 채워 분당 약 30회의 회전으로 운반하고 있어 국내와 큰 차이를 보이지는 않는다. 믹서트럭은 전 지역에 걸쳐 골고루 분포가 되어 있으며 90분 이내에 도달할 수 있도록 신속한 준비가 되어있다.

(라) 미국의 레디믹스트 콘크리트 발달

미국 레디믹스트 콘크리트 생산시설은 1950년에 1,320개 도시에 1,700여개의 플랜트가 건설되었던 것을 바탕으로 1960년에는 4,000개의 공장이 건설되었고, 현재는 5,000~6,000개의 공장시설이 생겼다. 더불어 기업수도 증가하여 2,700여개에 이르며 믹서트럭 수는 약 80,000대, 레디믹스트 콘크리트 회사의 고용자 수도 14만명에 이르고 있다.

3. 소결론

본 절에서는 국내외 레디믹스트 기술의 현황 조사를 위해 레디믹스트 관련 국내 품질 규정을 조사하였고, 국내외 기술 수준 및 산업동향과 레디믹스트 제품의 생산량 등을 조사하였다. 본 절에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 레디믹스트 재료는 재래식 현장배합 방식과 비교하여 품질의 균질성, 공기의 단축, 현장 준비 작업의 간단함 등의 장점을 가지고 있어 계속적으로 발전하고 있으며, 국내 기술 수준도 레디믹스트 재료의 혼합, 이송 및 시공과 관련하여 기계화 및 기술력의 발전으로 완전 자동화 단계로 전환되고 있는 추세인 것으로 조사되었다.

(2) 국내 산업동향을 조사한 결과 일반적인 시멘트 업계는 계속되는 건설경기 침체로 고전하고 있지만, 특성화된 레디믹스트 제품의 매출은 해를 거듭할수록 늘어나고 있는 것으로 조사되어 본 연구에서 개발하고자 하는 분말형 레디믹스트 숏크리트도 건설 현장에서 충분히 적용 가능성을 가질 것으로 판단된다.

(3) 국외 레디믹스트 관련 기술의 발전 동향을 조사한 결과 레미콘 및 레디믹스트 건설재료의 기술력 확보와 시공 선진화를 주도하는 국가들은 유럽지역으로 조사되었고, 우리나라는 개발 단계로 나타나 새로운 레디믹스트 제품 개발에 대한 연구가 계속적으로 필요한 것으로 나타났다. 또한, 레디믹스트 제품의 해외시장 성장추이는 매년 15% 이상의 성장을 보이고 있는 것으로 조사되었는데, 본 연구에서 개발하고자 하는 분말형 레디믹스트 숏크리트는 국외에서도 시도되지 않은 재료 개발로서 국외 시장 진출에 대해 충분한 가능성이 있는 것으로 판단된다.

제 3 절 현장배합 숏크리트의 국내 시공실태 파악

1. 현장배합 숏크리트의 국내외 품질규정 고찰

숏크리트 품질기준에는 설계기준강도를 비롯하여 휨인성 기준, 휨인성 평가방법, 숏크리트 재료의 품질기준, 숏크리트 배합 및 품질관리기준, 시공규정 등이 있다.

국외의 경우에는 숏크리트 관련기술과 함께 품질기준 및 시험평가 방법 등이 지속적으로 발전되어 좀 더 합리적이고 과학적인 시공 및 품질 관리가 이루어지고 있고, 국가적인 차원에서도 품질의 규격화가 이루어져 있다. 반면, 국내의 경우에는 아직까지 국가적인 차원의 품질평가 기준이 없어 건설현장마다 재료, 배합, 시공, 장비 및 공법 선정 등의 선택에 일관성이 없고, 표준배합 뿐만 아니라 외국의 시방, 품질기준 및 기존 시공사례를 그대로 답습하고 있는 실정이다.

국내에서도 몇몇 기관에서 숏크리트의 재료 및 시공에 대한 시방규정을 가지고 있지만, 국외 품질기준을 그대로 도입하거나 국내 건설 현장과는 현실적으로 상이한 면이 많아 체계적으로 적용되지 못하고 있는 상황이다.

가. 국내 숏크리트 품질규정

국내에서 주로 사용되고 있는 숏크리트 품질규정에는 터널표준시방서(건교부, 1999), 터널설계기준(건교부, 1999), 도로설계요령(도로공사, 2001), 터널지보공관련품질기준개정(도로공사, 2002) 등이 있다.

건설교통부에서 제정한 터널표준시방서와 터널설계기준을 참고하면 숏크리트는 필요 강도와 내구성을 확보하고 부착성과 시공성이 양호하며 재령 1일 압축강도가 9.8MPa 이상, 재령 28일 압축강도가 20.6MPa 이상 되도록 배합할 것을 규정하고 있다(건교부, 1999). 또한, 숏크리트의 최소두께는 사용목적, 지반조건, 단면크기 등을 고려해서 정하되 3~5㎝로 할 것을 규정하고 있다. 그러나 골재, 시멘트, 급결제, 강섬유 등이 복합된 숏크리트 혼합물에 대한 국가적인 표준은 아직까지 마련되어 있지 않다. 따라서 실제 건설현장에서는 골재 재료에 대한 국가 규격(KS F 2577, 2003)을 제외한 다른 부분에 대해서는 현장상황이나 설계사 및 시공사 임의의 품질기준을 적용하고 있는 실정이다. 특히, 급결제에 대한 국내 품질기준은 장기강도에 영향을 미치지 않도록 과다한 량이 사용되지 않게 규정하고 있을 뿐, 급결제의 품질항목에 대한 국가 표준이나 관련 단체 지침 등은 없는 실정이다.

표 3.3.1은 국내에서 주로 적용되고 있는 숏크리트 품질규정을 나타낸 것이고, 표 3.3.2는 숏크리트 압축강도, 휨강도, 휨인성 및 강섬유혼입량 등에 대해 한국도로공사에서는 제시한 품질 기준을 나타낸 것이다. 그러나 외국의 고성능 숏크리트에 대한 기준과 비교할 때는 아직까지 다소 낮은 수준이며 숏크리트 재료 및 제반 품질관리 시험에 대한 규정이 부족한 실정이다.

표 3.3.1 국내 숏크리트 강도기준

구 분	강섬유		강섬유 보강 숏크리트(MPa)					
	인장강도 (MPa)	형상비 (%)	휨강도		압축강도		코어 압축강도	등가 휨강도
			3일	28일	1일	28일	28일	28일
한국고속철도공단	68.6	60~80	2.94	4.5	10	21	21[1)]	3.06
한국도로공사	68.6	40~100	2.94	4.5	10	20	17[2)]	3.06

주 1) 코어 3개의 평균강도는 설계강도의 85% 이상이어야 하고, 각각의 코어강도는 75% 이상.

2) Steel Fiber 미사용 숏크리트 구간

표 3.3.2 한국도로공사 숏크리트 관련 품질기준(2002)

구분		내용
배합비	기준	지반 특성, 강섬유 혼입 등을 고려하여 구분 적용
압축강도 일반 숏크리트	기준	재령 28일 강도=19.6MPa, 재령 1일 강도=9.8MPa ⇒ 패널코어강도 85%, 최소 72% 이상
	빈도	1회/200㎡ 이상 또는 1일 1회 이상
휨강도	기준	재령 28일 f_{28bk}=4.4MPa , 재령 1일 f_{1bk}=2.05MPa
	빈도	B/P 당 1회/200㎡ 또는 1회/일 이상
휨인성	기준	휨인성계수 평균 68%, 최소 58% 이상 (몰드규격: 50*50*12.5㎝, 15*15*55㎝ 병용 가능)
	빈도	휨 몰드 사용시 1회/1,000㎡ 및 휨 인성패널 1회/3000㎡이상
강섬유 혼입량 시험	기준	투입 기준량의 90%이상
	빈도	1회/1000/㎡ 이상(굳지 않은 콘크리트) 구간내 임의위치 1회(6공)이상/ 50m (숏크리트 타설 면에서 코어 채취)
두께측정	기준	평균: 설계 이상, 최소: 설계 75% 이상
	빈도	검사공:1회(7공)/20m 이상 및 강섬유혼입량 코어시료 등
코어압축 강도(28일)	기준	재령 28일 f_{28}=16.7MPa (일반 숏크리트) 재령 28일 f_{28}=19.6MPa (강섬유 숏크리트)
	빈도	구간내 임의 위치 3공/20m

숏크리트용 급결제에 대하여 KS F 1004에서는 “시멘트의 수화반응을 빠르게 하고 응결시간을 현저하게 단축시키기 위하여 사용하는 혼화제” 라고 정의하고 있다. 또한 콘크리트 표준시방서에서는 “터널 등의 숏크리트에 첨가하여 뿜어 붙인 콘크리트의 조기강도를 증진시키기 위해서 사용되는 혼화재료”로 정의하고 있다. 급결제는 조기에 강도를 발현시킴으로써 숏크리트가 지보재로서의 역할이 가능하도록 하는 혼화제로서, 숏크리트 외에도 긴급공사용 지수 급결제 등이 있으며 용도 및 목적에 따라 품질의 차이가 있을 수 있기 때문에 아직 규격화는 이루어지지 않고 있다.

숏크리트용 급결제에 대한 품질규격은 1999년 콘크리트 표준시방서 개정과 더불어 한국콘크리트학회에서 표 3.3.3과 같이 KCI SC-102 “숏크리트용 급결제 품질규격”을 마련하였으나, 이 규격은 일본토목학회 JSCE-1986 ‘뿜칠 콘크리트용 급결제 품질규격(안)”과 동일하다.

표 3.3.3 급결제 품질규격(KCI-SC-102, JSCE-1986)

항 목	모르타르 압축강도(MPa)			응결시간(분)	
규격값	12시간	24시간	28일	초결	종결
	0.98 이상	8.82 이상	플레인(plain)대비 75% 이상	5분 이내	15분 이내

이 규격에서는 모르타르의 압축강도 및 응결시간을 측정하도록 하고 있고 모르타르의 배합은 물-시멘트비 50%, 잔골재-시멘트비(S/C)는 3으로 규정하였으며, 잔골재는 표준사가 아닌 조립률 2.6~2.8 범위의 잔골재를 사용하도록 하고 있다. 그러나 급결제 제조사 및 터널현장에서의 품질시험에서는 표 3.3.3의 품질규준보다는 시멘트 페이스트의 응결시간 측정방법인 Gillmore 응결시간 및 콘크리트의 압축강도를 측정하고 있다.

표 3.3.4는 국내외의 숏크리트용 급결제의 응결시간 품질기준 및 시험규격을 정리한 것이다. 이 표에서 보면 숏크리트용 급결제의 응결 측정방법은 시멘트 페이스트를 대상으로 하는 경우에는 Vicat 및 Gillmore 시험방법이 사용되고 있으며, 모르타르를 대상으로 하는 경우에는 Proofer 관입저항침에 의한 응결시간 측정방법이 사용되고 있음을 알 수 있다.

표 3.3.4 숏크리트용 급결제의 품질기준(응결시간)

규격		W/C	S/C	응결시간		시험방법
				초결	종결	
Mortar	KCI SC 102 JSCE 1986	50	3	5	15	관입저항시험
	ITA	-	-	3~10	9~30	관입저항시험
Paste	KTA	-	-	1~5	12~20	Gillmore시험
	ASTM C 1141	24~30	-	1~3	12	Gillmore시험
	EFNARC	35	-	10	60	Vicat시험

표 3.3.5는 국내외 숏크리트용 급결제의 품질관리를 위한 압축강도 규격을 나타낸 것인데 대부분 숏크리트에 대하여 규정하고 있다. 그러나 타설된 숏크리트의 품질에 미치는 요인은 급결제 자체의 품질 뿐만 아니라 콘크리트의 배합, 펌핑, 타설속도, 작업원의 숙련도 등 여러 가지 요인에 의하여 좌우되기 때문에 급결제의 품질 특성만을 파악하기는 곤란하다.

표 3.3.5 국내외 숏크리트용 급결제의 품질기준(압축강도)

규 격 명	압축강도 규정	비 고
KCI SC 102 JSCE 1986	12시간 : 0.98MPa 이상 24시간 : 8.82MPa 이상 28일 : 플레인 대비 75% 이상	모르타르 (5×5×5cm)
대한터널협회(KTA)	1일 : 9.8MPa 이상 28일 : 17.6MPa 이상	실린더 공시체 강도
한국도로공사 전문시방서	1일 : 9.8 MPa 이상 28일 : 19.6 이상	일반 숏크리트 (공시체 강도)
EFNARC	28일 : 플레인 대비 75% 이상 90일 : 플레인 28일 강도 이상	숏크리트 코어강도

급결제의 품질기준을 정하고 있는 한국콘크리트학회 규준(KCI SC 102)에 의하면 급결제를 첨가한 모르타르의 재령 12시간 및 24시간 압축강도는 각각 0.98MPa 및 8.82MPa 이상으로 규정하고 있다. 이 규정을 국내에서 사용하고 있는 급결제에 적용할 경우 실리케이트계 급결제는 응결시간 뿐만 아니라 압축강도도 품질기준을 만족 할 수 없다. 이는 본 규격이 일본 토목학회 규정을 번역한 것에 지나지 않아 우리 실정에 맞지 않기 때문이라 할 수 있다. 즉 일본의 경우 터널내 용수문제가 많아서 대부분의 현장에서는 응결시간이 매우 빠른 시멘트 광물계 급결제를 사용하고

있으며, 액상 급결제의 경우에도 대부분 알루미네이트계이고, 부분적으로 알칼리프리계를 사용하지만 실리케이트계 급결제는 거의 사용하지 않으므로 급결제의 품질규격상 응결시간이 느린 실리케이트계 급결제에 대하여 고려할 필요가 없다고 할 수 있다. 그러나 국내 터널현장에서는 실리케이트계 급결제를 사용하는 경우 장기강도의 저하가 큰 단점이 있는 반면 숏크리트 타설시 1회 타설두께를 크게 할 수 있는 장점이 있기 때문에 아직도 국내의 많은 터널현장에서 실리케이트계 급결제를 사용하고 있다. 숏크리트용 급결제는 콘크리트의 초기강도를 발현하여 타설된 숏크리트가 터널 굴착면에 고착되고 소요의 강도를 발휘하게 함으로써 숏크리트가 터널의 1차 지보재 역할을 하도록 하지만, 실리케이트계 및 알루미네이트계와 같이 알칼리 성분이 많은 경우 콘크리트의 장기강도를 저하시키고 강알칼리성으로 인하여 환경오염을 발생시키는 등의 문제점이 있다. 따라서 급결제는 가능한 소량을 사용하여야 하며, 이를 위하여 국내외 숏크리트 관련 시방서에서는 급결제의 허용 첨가량을 표 3.3.6과 같이 규정하고 있다.

표 3.3.6 국내외 숏크리트용 급결제의 허용 첨가량

규 격 명	급결제 허용량
고속도로공사 전문시방서	5%
EFNARC	4~8%
Norway	3~7%
Austria	5~7%

알루미네이트계 급결제의 경우 표 3.3.6의 규정을 어느 정도 만족할 수 있으나, 실리케이트계 급결제의 경우에는 국내 터널현장에서의 첨가량이 10% 이상이 되고 있다. 이와 같이 실리케이트계 급결제의 첨가량이 높은 이유는 급결성이 좋은 고가의 변성 실리케이트계 급결제보다는 저가의 일반형 실리케이트계 급결제만 사용되고 있는데다가 숏크리트의 부착력을 높임으로써 시공속도를 빠르게 하기 위하여 숏크리트 작업원이 첨가량을 높이기 때문이다. 그러나 실리케이트계 급결제의 첨가량을 증가시키면 콘크리트의 강도는 크게 저하되어 사용량이 10% 이상인 경우 플레인 콘크리트의 재령 28일 압축강도에 비하여 약 40~50% 정도의 강도손실이 일어난다. 이 때문에 ACS(Austrian Concrete Society)에서는 실리케이트계 급결제를 사용한 콘크리트의 최종강도저하가 플레인 콘크리트와 비교하여 30% 이하, 실리케이트계 급결제의 최대 사용량은 15% 이하로 규정하고 있다. 도로공사의 고속도로 전문시방서에서는 숏크리트용 급결제의 표준 첨가량을 5%로 규정하고 있으나, 예외규정을 두어 감독원의 승인이 있는 경우에는 첨가량을 늘릴 수 있도록 하고 있다.

나. 국외 숏크리트 품질규정

유럽통합규격에서는 숏크리트 압축강도를 표 3.3.7과 같이 등급으로 규정하고 있으며, 지름 50㎜, 길이 100㎜인 코어에 대한 것으로 현장 코어링의 영향을 고려하기 위하여 0.85의 감소지수가 포함되어 있다. 강섬유보강 숏크리트의 휨인성에 대해서는 빔 시험에 의한 잔류강도등급과 플레이트 시험에 의한 에너지 흡수 등급으로 구분하여 규정하고 있다(EFNARC, 1996). 표 3.3.8은 숏크리트 휨강도 등급을 나타낸 것으로 휨강도는 최초의 최대 하중에서 등가 최대 탄성인장응력으로 정의된다.

표 3.3.7 숏크리트 압축강도 등급 및 현장강도 기준(EFNARC, 1996)

구분		강도 등급 및 강도기준 (MPa)						
		C24/30	C28/35	C32/40	C36/45	C40/50	C44/55	C48/56
압축강도 등급	원통형 공시체	24	28	32	36	40	44	48
	입방형 공시체	30	35	40	45	50	55	56
현장강도 기준	코어강도 (28일)	20.5	24	27	30.5	34	37.5	41

표 3.3.8 숏크리트 휨강도 등급(EFNARC, 1996)

구분	강도 등급 및 최소 휨강도 기준(MPa)		
	C24/30	C36/45	C44/55
빔 휨강도	3.4	4.2	4.6

비고 1) 3개의 빔 공시체의 휨강도 시험 평균이 최소 휨강도와 같거나 이상이어야 한다.
2) 1개의 빔 공시체의 휨강도도 최소 휨강도의 75%보다 작아서는 안된다.

표 3.3.9는 각 잔류강도등급 사이의 경계를 정의하는 4개의 좌표에 대해 나타낸 것인데, 1등급을 제외한 어떠한 경우도 그 다음 낮은 등급으로 떨어지는 응력/처짐 곡선을 가져서는 안 되게 규정하고 있다(EFNARC, 1996). 그러나 실제적으로 빔 시험 결과 응력/처짐 곡선을 도시해 보면 한 등급에만 위치하지 않고 다른 등급으로 떨어지는 경우가 대부분이며, 이러한 경우 평가자의 주관적인 판단에 의해 잔류강도등급이 결정되는 단점이 있다.

유럽통합규격 개선을 위한 prEN 14487-1 코드에서는 표 3.3.10을 이용한 새로운 잔류강도등급을 정의하였다. 빔 시험은 동일하게 이루어지며 D2S2 등급은 중앙점 처짐 0.5, 1.0 그리고 2.0mm에서의 휨강도가 최소 2.0MPa 이상인 것을 의미한다.

표 3.3.9 숏크리트 잔류강도 Class 기준(EFNARC, 1996)

Deformation class	Beam deflection(mm)	Residual stress(MPa) for strength class			
		1	2	3	4
	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
Low	1	1.3	2.3	3.3	4.3
Normal	2	1.0	2.0	3.0	4.0
High	4	0.5	1.5	2.5	3.5

표 3.3.10 숏크리트 잔류강도 Level 정의(prEN 14487-1, 2002)

Deformation range		Strength level (Minimum strength, MPa)			
	Deflection(mm)	S1	S2	S3	S4
D1	0.5~1.0	1	2	3	4
D2	0.5~2.0				
D3	0.5~4.0				

새로운 잔류강도등급은 응력/처짐 곡선이 다른 등급으로 떨어지는 경우에도 각 처짐 구간별로(D1, D2, D3) 강도등급이 결정되므로 세분화되고 구체적인 평가가 가능하며, 평가자의 주관적인 판단이 영향을 미치지 않는 장점이 있다. 그러나 유럽통합규격의 잔류강도등급은 중앙점 변위 0.5mm 이후의 구간에서 획득한 결과만을 적용하기 때문에, 0.5mm 이내의 구간에서 높은 강도를 발현하는 숏크리트의 경우 이를 정확하게 반영하지 못하는 단점을 여전히 가지고 있다.

표 3.3.11은 Sprayed Concrete Association(1990)에 의한 숏크리트 압축강도의 세 가지 등급을 나타낸 것이고, 표 3.3.12는 오스트리아 품질기준의 숏크리트 강도등급을 나타낸 것이다(Austrian Concrete Society, 1990). 그리고 표 3.3.13은 핀란드의 숏크리트 품질지침의 용도에 따른 강도등급을 나타낸 것이다.

표 3.3.11 Sprayed Concrete Association(1990)의 숏크리트 압축강도 등급

등급	재령 28일의 특성강도
30	30 MPa
40	40 MPa
50	50 MPa

표 3.3.12 오스트리아 품질기준의 숏크리트 강도 등급

등급	최소 평균압축강도 (MPa)	비고
SC12	12	
SC16	16	
SC19	19	일반적으로 재령 28일에 얻어지는 강도
SC22.5	23	재령 28일에 얻어질 수 있는 최대강도
SC25	25	
SC28	28	재령 90일에 얻어질 수 있는 최대강도
SC30	30	조기재령의 숏크리트에 대해 특정 규정이 없는 경우 (예: 보수작업에 사용되는 경우)
SC40	40	

표 3.3.13 핀란드 숏크리트 품질지침의 숏크리트 강도등급

등급	최소 압축강도	적용
I	K30	구조적인 기능이 크게 요구되는 경우 (예: 교량)
II	K30	암반 보강, 일반적인 콘크리트 구조물 등
III	K20	되채움 숏크리트, 구조적인 중요성이 없는 경우
IV	K20	임시 지보재로 사용되는 경우

표 3.3.14는 노르웨이 숏크리트 품질기준의 압축강도와 인장강도 등급을 나타낸 것으로 일반적으로 C45 이상의 숏크리트를 사용하고 있다. 또한 노르웨이에서는 타설 전의 콘크리트 강도와 숏크리트 강도 사이의 관계를 표 3.3.15와 같이 제시하였다(Norwegian Concrete Association 1992).

표 3.3.16은 일본터널협회기준 이외에 일본에서 사용되고 있는 숏크리트 강도기준을 나타낸 것이고, 고품질의 강섬유보강 숏크리트를 사용하는 싱글쉘 터널에 대해서는 표 3.3.17과 같은 기준안이 제시되어 있다.

표 3.3.18은 유럽에서의 숏크리트 관련기술의 지금까지 발전 동향과 앞으로의 향후 예상을 나타낸 표인데, 내구성을 고려하여 1980년대 이후로 숏크리트의 압축강도 기준이 40MPa 정도까지 높게 규정될 것으로 예상하였다(Clements, 2002).

표 3.3.14 노르웨이 숏크리트 품질기준의 압축강도 및 인장강도 등급

Characteristic (MPa)	C25 LC25	C35 LC35	C45 LC45	C55 LC55	C65 LC65	C75 LC75	C85 LC85	C95	C105
Cube strength	25	35	45	55	65	75	85		
Cylinder strength	20	28	36	44	54	64	74	84	94
Design strength	16.8	22.4	28.0	33.6	39.2	44.8	50.4	56.0	61.6
Tensile strength	2.10	2.55	2.95	3.30	3.65	4.00	4.30	4.60	4.90
Design Tensile strength	1.40	1.70	2.00	2.25	2.50	2.60	2.70	2.70	2.70

표 3.3.15 타설 전후의 강도등급(Norwegian Concrete Association 1992)

숏크리트 강도 등급	C30	C35	C40	C45	C50	C55
타설 전의 최소 강도 등급	C38	C43	C48	C54	C60	C65

표 3.3.16 일본 숏크리트 강도 기준

양생일수	3시간(MPa)	24시간(MPa)	28일(MPa)
표준배합	-	5	18
고품질배합 (신간선터널)	1.5	8	18
고강도 강섬유보강 배합 (고속도로 터널)	2	10	36

표 3.3.17 일본 고품질 강섬유보강 숏크리트 기준(싱글쉘 터널, 2000)

압축강도			휨강도(MPa)	부착강도(MPa)
재령 3시간	재령 1일	재령 28일	재령 28일	재령 28일
1.0~3.0	10	36	4.5	0.5이상

표 3.3.18 유럽의 숏크리트 발전 동향 및 향후 예상

변수	1980년대	2000년대	2020년대
압축강도	25MPa	40MPa	40MPa
리바운드	30%	10%	5%
급결제	물 유리계 실리케이트 급결제	알칼리프리계 급결제	안전하고 작업성이 좋은 급결제
생산성	6㎥/hr	8㎥/hr	10㎥/hr
비용($)	100	125	75
인성(round panel)	200J	400J	1,000J
유해성 및 안전성	나쁨	우수	훨씬 좋은

국외 숏크리트 품질기준에서 골재의 추천입도는 표 3.3.19와 같고, 표 3.3.20은 숏크리트 급결제의 추천 사용량을 나타낸 것이다.

표 3.3.19 골재에 대한 추천 입도

체(㎜)	중량비, 통과한 체의 크기 (㎜)				
	습식		건식	규정되어 있지 않은 경우[1]	
	8	16	16	8	16
32	100[2]	100[3]	100[3] 100[4]	100[5] 100[6]	100[5] 100[6]
16	100	85~100	80~100 85~97	100 100	100 100
8	90~100	70~100	56~100 66~81	100 100	60~88 71~88
4	73~100	58~99	40~100 46~66	61~85 68~80	36~74 51~69
2	55~90	42~78	28~58 20~50	36~71 48~63	21~62 38~52
1	37~72	30~56	18~32 18~30	21~57 32~48	12~49 28~40
0.5	22~50	19~38	10~20 8~20	14~39 20~30	8~34 18~30
0.25	11~26	10~25	4~11 7~18	5~21 10~16	3~18 10~19
0.125	4~12 4~6[7]	8~15	3~10 3~10	3~9 5~10	1~9 7~10

주) (1) 대부분 건식 숏크리트의 경우 (2) 노르웨이 콘크리트 협회(1992)
(3) 스웨덴 콘크리트 핸드북(Swedish concrete handbook) (4) 미국콘크리트협회
(5) DIN-1045 (6) AFTES(1992) (7) 일본터널협회(1991)

표 3.3.20 숏크리트 급결제에 대한 추천사항

특징/ 규정		출처
추천 사용량		
분말형	6~8% 평균 6%	오스트리아 콘크리트 학회(1990) EFNARC (1992)
액상형	4~6% 6~8%	오스트리아 콘크리트 학회(1990) EFNARC (1992)
물유리계	10~15%	오스트리아 콘크리트 학회(1990)
규정되어 있지 않은 경우	2~5%	Morgan (1991)
건식	4~7%	일본터널협회 (1991)
습식	5~10%	일본터널협회 (1991)
허용가능한 사용량		
분말형	≤ 10%	오스트리아 콘크리트 학회(1990)
액상형	≤ 8%	오스트리아 콘크리트 학회(1990)
규정되어 있지 않은 경우	≤ 3%	오스트리아 콘크리트 학회(1990)
허용가능한 강도저하	≤ 45% (분말형 급결제) ≤ 30% (액상형 급결제)	오스트리아 콘크리트 학회(1990)
승인시험: Proctor test 10분	≥ 130N	EFNARC (1992)
수용성 알루미네이트	SO_4^{2-} 함유량이 600mg/l 이상인 용수에 숏크리트가 노출된 경우, 0.6% 미만	오스트리아 콘크리트 학회(1990)

2. 현장설문조사를 통한 숏크리트 시공실태 및 문제점 파악

가. 현장설문조사 개요

본 연구에서는 분말형 레디믹스트 숏크리트의 전문적인 개발에 앞서, 실제 현장에서 적용되고 있는 숏크리트 공법의 문제점이 무엇인지를 정확히 파악하기 위해 실무기술자들을 대상으로 현장설문조사를 실시하였다. 설문조사에서는 현장배합 숏크리트의 시공실태에 대한 의견, 숏크리트용 골재의 현장품질 관리에 대한 의견, 분말형 레디믹스트 숏크리트 개발에 대한 의견 및 다기능 레디믹스트 숏크리트 개발에 대한 의견 등을 조사하였다.

현장설문 대상자는 도로, 철도, 터널 및 사면 현장에서 현재 숏크리트 타설공정에 종사하고 있거나 종사한 경험이 있는 실무자를 대상으로 하였으며, 대상자 선별은 현장 여건이 허용하는 범위에서 무작위로 선별하였는데 설문응답자는 총 151명으로 집계되었다.

현장설문조사 결과가 국내 숏크리트 공법의 모든 시공실태와 문제점을 보여준다거나 국내 모든 실무기술자들의 수렴된 의견이라고는 할 수 없지만, 현장배합 숏크리트의 일반적이며 포괄적인 시공 현황과 문제점들은 충분히 이해할 수는 있다고 판단된다. 또한, 실제 현장에서 실무기술자들이 몸소 체험한 의견들을 수렴한다는 데에 의의가 있다고 생각된다.

본 연구에서는 현장설문조사 결과 분석을 통해 숏크리트용 골재의 규격화, 현장배합 숏크리트의 성능 및 품질 개선 방향, 레디믹스트 숏크리트의 개발 방향, 다기능 숏크리트의 기능 인자 부여 등을 설정하고자 한다.

나. 현장설문조사 결과 및 분석

표 3.3.21은 설문조사에 응답한 국내 건설업체에 대해 나타낸 것이다. 총 15개 이상의 건설업체에 종사하면서 현장에서 숏크리트 시공을 담당하고 있는 실무기술자들이 설문조사에 응해 주어, 연구 자료로서 조사 결과의 대표성을 충분히 확보할 수 있었다고 판단된다. 그림 3.3.1은 설문조사가 실시된 시공현장의 종류에 대해 나타낸 것인데, 터널 현장이 대부분을 차지하였고 그 중에 도로터널 현장이 가장 많았다. 그림 3.3.2는 설문조사 응답 대상자가 숏크리트 관련 업무에 종사한 기간을 나타낸 것이다. 5년 이하 경력의 기술자가 전체의 74%(111명)를 차지하였고 비교적 숙련된 기술자라고 할 수 있는 10년 이상 경력의 기술자는 많이 부족한 것으로 나

타났다.

표 3.3.21 설문조사 응답 업체

응답업체	응답수
HD건설	5
SB 토건	1
SS 시공사	1
NG 토건	15
DB 시공사	8
GS 건설	5
DW 시공사	1
HH 건설	3
SH 기업	16
LD 건설	6
KR 개발	33
DS 시공사	27
SY 건설	13
SK 건설	4
기타	13
합계	151

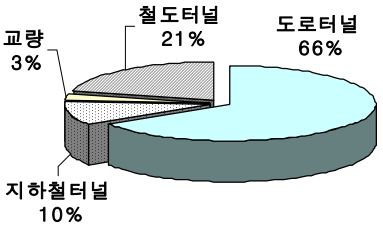


그림 3.3.1 설문 응답 대상현장

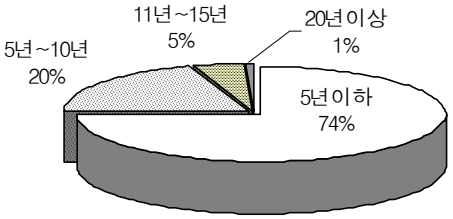


그림 3.3.2 설문 응답 대상자의 업무종사기간

(1) 국내 숏크리트 현장 시공에 대한 설문조사 결과

(가) 숏크리트 현장 시공시스템

숏크리트 현장 시공시스템에 대한 설문에서 장비운용, 효율성, 정확성, 안전성, 기술성 및 시공규정준수 항목에서 잘되고 있다고 응답하였고, 경제성 항목에 대해서는 보통의 수준이라고 응답하였다. 이와 관련하여 숏크리트 시공시스템에서 가장 문제점이라고 생각하는 부분에 대해서는 높은 리바운드율(27.3%)을 첫째로 꼽았고, 현장골재의 품질관리 부족(26.1%)과 현장배합의 부정확(27.5%)이 또한 문제점이라고 응답하였다.

(나) 숏크리트 타설 거리 및 두께

설문조사 결과 숏크리트 평균타설 거리는 1.0~1.5m가 총 응답자의 41.0%로 가장 많았는데(그림 3.3.3), 숏크리트 타설 거리는 숏크리트 품질과 리바운드량에 영향을 미치는 중요한 인자로서 유럽통합규격에서는 0.5~1.0m를 유지하도록 규정하고 있고, 오스트리아 숏크리트 시공규정에서는 0.5~2.0m를 유지하도록 규정하고 있다(EFNARC, 1996 ; Austrian Concrete Society, 1990). 국내 건설현장에서는 대부분 효과적인 타설 거리를 유지하고 있는 것으로 조사되었으나, 2.0m 이상으로 타설하는 경우도 15.6%로 조사되어 고품질 숏크리트 시공을 위해서는 타설 거리에 대한 현장관리도 필요한 것으로 나타났다.

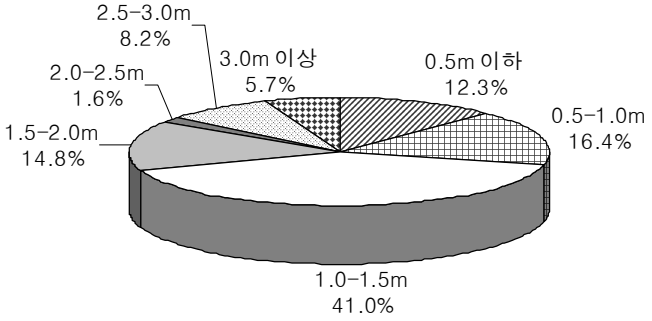


그림 3.3.3 숏크리트 타설 거리 분포

설계서에서 제시한 타설 두께를 현장 시공 중에 정확히 준수하고 있는지에 대한 설문에서는 응답자의 48.8%만이 설계서의 타설 두께를 정확히 준수한다고 응답하였고, 3.1%은 타설 두께를 더 작게, 48.0%는 더 크게 타설하고 있다고 응답하였다. 타설 두께를 설계서보다 더 크게 타설하는 이유로는 발파로 인한 여굴량 과다(31.7%), 현장 안전성 증대 목적(22.0%) 및 노즐맨의 타설 능력 부족(17.1%) 등으로 나타났다(그림 3.3.4).

국내 숏크리트 규정에서는 1회 타설 숏크리트 두께를 10cm 이내로 유지하도록 제안하고 있는데(한국도로공사, 2001), 타설 두께가 두꺼우면 타설 직후 숏크리트가 탈락하기 쉽고 빠른 급결을 촉진시키기 위해 급결제가 과다하게 사용되어야 한다. 급결제의 과다 사용은 숏크리트 강도 저하를 유발하는 치명적인 원인이므로 적절한 타설 두께를 유지하는 것은 숏크리트 품질향상을 위해서도 중요하다. 그러나 실제 현장에서는 여러 가지 이유로 인해 설계 두께를 준수하지 못하고 있다. 특히, 여굴량 과다로 인해 터널 단면의 여유간격이 증가하게 되면 숏크리트 타설 두께를 증가시켜 여유간격을 조절하게 되는데, 이러한 경우 숏크리트 품질 뿐만 아니라 라이닝 품질의 저하까지도 유발시키게 된다. 또한 현장 안전성 증대나 숏크리트 강도가 부

족하여 타설 두께를 크게 한다는 응답도 28.1%로 나타나 고강도 숏크리트 개발을 통한 현장 안정성 증대와 적정 타설 두께 유지를 통해 고품질 시공 시스템의 확보가 필요한 것으로 나타났다.

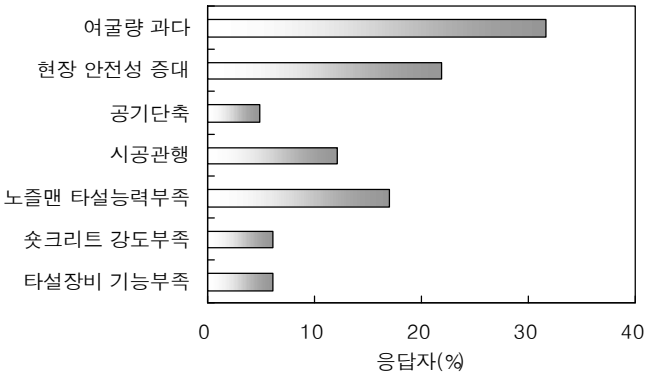


그림 3.3.4 숏크리트 타설 두께를 설계서보다 크게 하는 이유

(다) 숏크리트 품질

숏크리트 품질 중에서 실무기술자들이 가장 중요하게 생각하고 있는 것은 골재 품질 및 입도(26.3%)와 신뢰성 있는 장기내구성(20.6%)으로 나타나, 숏크리트 원재료의 품질과 이로 인해 얻어지는 내구성을 중요하게 생각하는 것으로 나타났다. 숏크리트 품질에 대한 설문은 실무기술자들의 의견으로만 국한되는 것이 아니라 현재 국내 숏크리트의 품질 수준과 개선 방향을 보여주는 것으로, 국내 숏크리트 품질 향상을 위해서는 현장 골재의 품질관리와 장기내구성 확보가 필요할 것으로 판단된다.

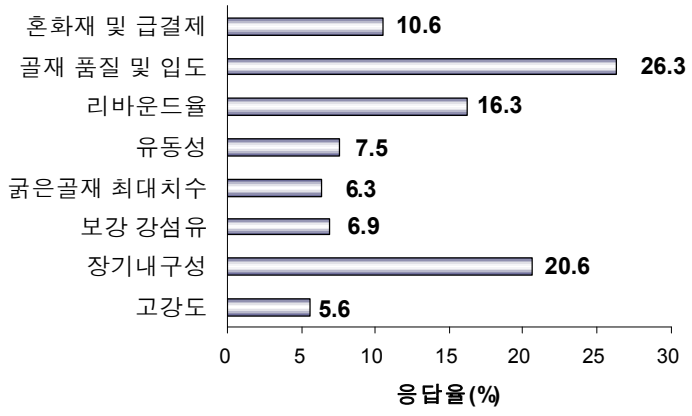


그림 3.3.5 숏크리트 품질 중에서 가장 중요한 항목

(라) 숏크리트 리바운드

숏크리트 타설시 발생되는 리바운드량은 작업자의 숙련도, 타설면의 상태, 공기압, 타설 두께, 타설 각도, 타설 부위의 위치 및 숏크리트 배합 등 여러 가지 복합적인 원인에 의해 많은 차이가 발생하게 된다. 실무기술자들이 실제 타설 공정에서 숏크리트 리바운드량에 가장 큰 영향을 미치는 요인이라고 생각하고 있는 것은 숏팅 거리 및 각도(24.5%), 골재최대치수 및 품질상태(19.9%), 숏크리트 배합의 적정성(14.6%) 등의 순으로 나타났다(그림 3.3.6). 예상 밖으로 혼화재나 급결제의 성능보다는 골재최대치수나 품질이 리바운드량에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타나, 숏크리트 원재료의 품질관리가 매우 중요함을 보여주었다.

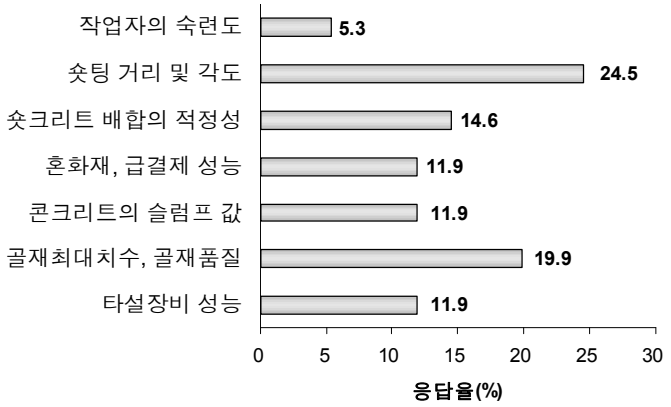


그림 3.3.6 숏크리트 리바운드량에 영향을 미치는 요인

그림 3.3.7은 국내 건설현장에서의 숏크리트 리바운드 측정 빈도에 대한 설문결과이다. 터널표준시방서(건설교통부, 1999)의 숏크리트 현장 품질관리 사항에서는 리바운드량 측정 시험을 ① 공사 착수전, ② 골재원, 급결제 및 현장배합설계가 바뀔 때마다 1회, ③ 필요할 때마다 실시하도록 규정하고 있다. 설문결과 1개월에 1회 이상 리바운드량을 측정한다는 응답이 가장 많았고(36.0%), 다음으로 1주에 1회 이상(28.0%) 측정한다고 응답하였다.

그림 3.3.8은 숏크리트 리바운드량을 줄이기 위해 현재 가장 시급한 조치라고 생각하는 부분에 대한 설문결과이다. 숏크리트 공법의 개선 및 개발이 26.1%로 가장 많았고 다음으로 골재 고품질화 및 품질관리 개선이 24.8%로 나타났는데, 숏크리트 공법에 대한 근본적인 개선과 함께 숏크리트 원재료인 골재의 고품질화와 품질관리가 필요한 것으로 나타났다.

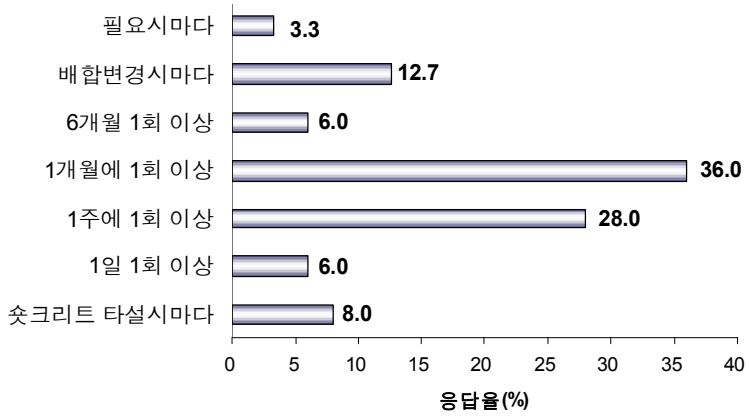


그림 3.3.7 국내 건설현장에서의 리바운드량 측정 빈도

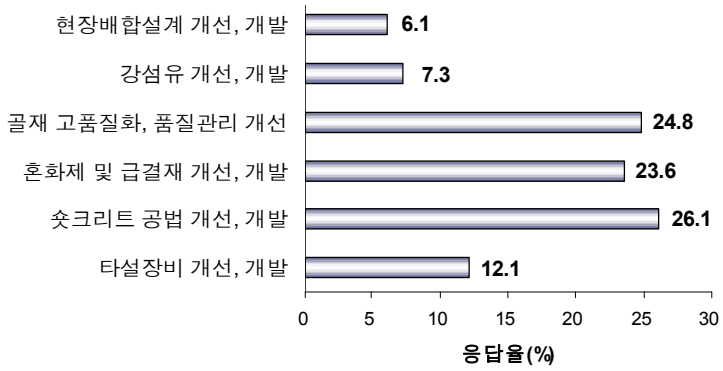


그림 3.3.8 숏크리트 리바운드량 감소를 위한 조치

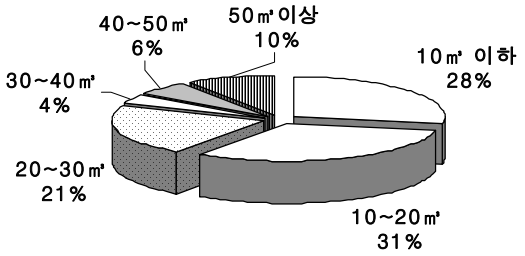


그림 3.3.9 1회 타설량

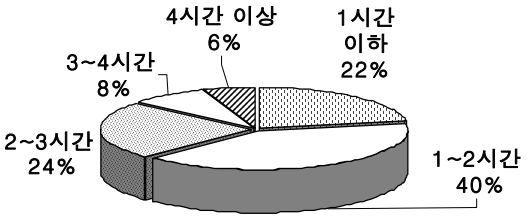


그림 3.3.10 1회 타설에 소요작업시간

(마) 숏크리트 타설

그림 3.3.9는 숏크리트 타설시 1회 공정(발파 및 버럭 처리 후 숏크리트 타설장비가 막장면이나 터널 지점에 진입하여 숏크리트 작업 수행 후, 다시 타설장비가 철수할 때까지의 과정)에 소요되는 숏크리트의 타설량에 대한 설문결과이고, 그림 3.3.10은 1회 공정시 숏크리트 타설에 소요되는 작업시간에 대한 설문결과이다. 국내 현장에서는 1회 타설시 일반적으로 10~20m^3 (31%) 정도의 숏크리트 량을 타설

하며, 작업은 1~2시간(40%) 정도 소요되는 것으로 나타났다. 현장에 따라서는 50m^3 (10%)이상의 숏크리트를 1회 공정 내에 타설하는 경우도 있고, 작업 시간이 3시간(14%) 이상 걸리는 경우도 적지 않는 것으로 나타났다.

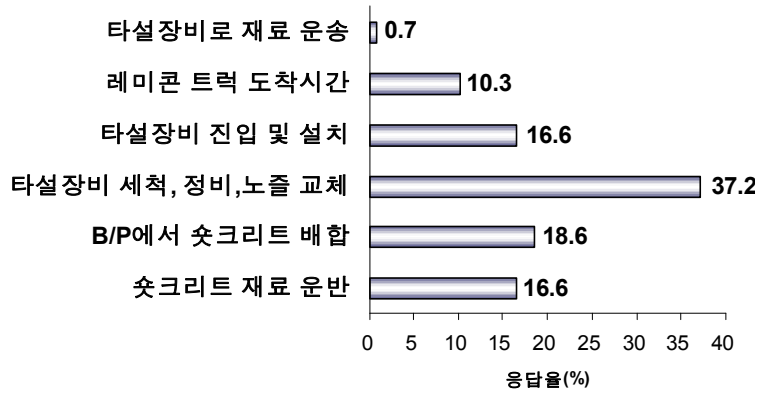


그림 3.3.11 숏크리트 타설 공정 중 가장 많이 소요되는 작업

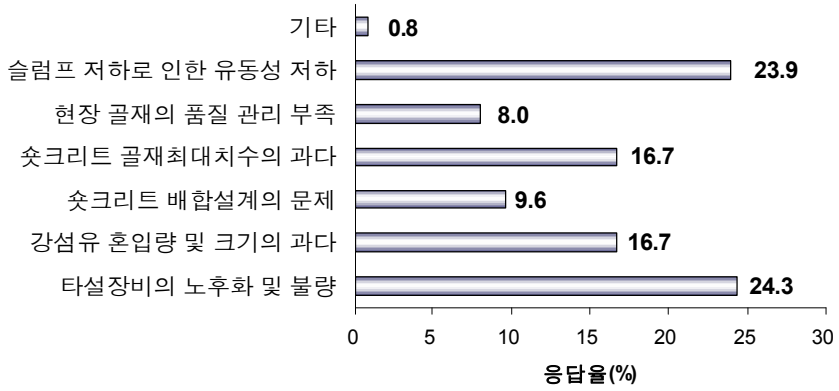


그림 3.3.12 노즐 및 호스의 막힘과 파손의 가장 큰 원인

그림 3.3.11은 숏크리트 타설공정에서 가장 많은 시간이 소요되는 작업에 대한 설문결과인데, 타설장비를 세척하고 정비 및 노즐 교체에 걸리는 시간이 가장 많은 것으로 나타났다(37.2%). 그리고 그림 3.3.12는 노즐 막힘, 호스 막힘 등이 발생되는 가장 큰 원인에 대한 설문결과인데, 타설장비의 노후화(24.3%), 슬럼프 저하로 인한 유동성 저하(23.9%), 골재최대치수의 과다(16.7%) 등의 이유로 나타났다. 여기서, 타설장비에 대한 부분은 제외하더라도 슬럼프 값의 불량은 골재 품질에 대한 관리가 부족하여 골재 함수율을 정확하게 파악하지 못했기 때문이며, 골재최대치수의 과다 역시 골재 품질에 대한 관리가 부족해서 나타난 결과라고 할 수 있다. 즉, 현장 골재의 품질관리를 철저히 하기만 하여도 리바운드 저감, 타설 시간 절감, 장비 마모 방지, 경제성 향상 등 많은 긍정적인 파급효과를 가져올 수 있음을 알 수 있다.

(바) 숏크리트 장비

최근 들어 국외에서 자동화된 숏크리트 타설 및 계량장비가 많이 개발되고 있어 건설현장에서도 효과적으로 적용되고 있는데, 국내의 기계화 및 자동화 숏크리트 시공 수준은 어느 정도인지 파악하고자 숏크리트 장비에 대한 내용을 질문하였다. 앞에서 타설장비의 노후화로 인해 노즐 막힘 등의 현장이 빈번하게 발생하고, 작업시간이 길어진다는 결과를 알 수 있었는데, 그림 3.3.13은 국내 건설현장에서 사용되고 있는 숏크리트 장비의 문제점에 대한 설문결과로, 노후화로 인해 고장이 빈번하다는 의견이 34.4%, 장비의 타설 능력이 부족하다는 의견이 25.4%로 나타났다.

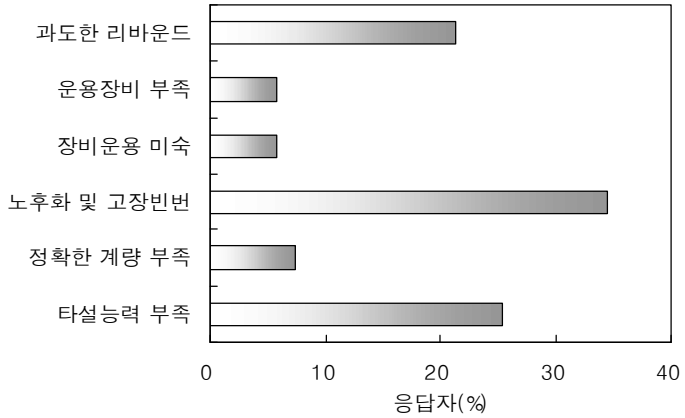


그림 3.3.13 국내 숏크리트 장비의 문제점

그림 3.3.14는 현장에서 사용되고 있는 숏크리트 타설 장비의 노즐직경에 대한 설문결과이다. 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 노즐직경은 50mm(48.3%)로 나타났고 다음으로 40mm(27.6%)가 많이 사용되는 것으로 나타났다.

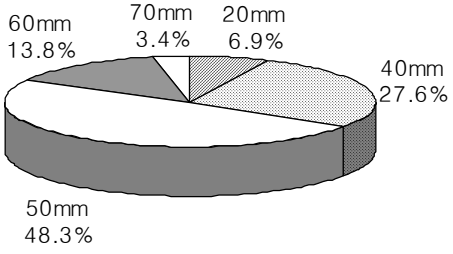


그림 3.3.14 국내 숏크리트 타설 장비의 노즐직경 분포

숏크리트 타설장비에서 노즐직경의 크기는 숏크리트 타설 작업의 시공성 뿐만 아니라 숏크리트 품질에도 큰 영향을 미치는 요소이지만, 국내 숏크리트 시공지침에

서는 아직까지 타설 장비에 대한 규정은 전혀 없는 실정이다. 최근 도로공사에서는 이에 대한 품질기준의 중요성을 인식하고 연구가 진행 중이다(도로공사, 2003).

타설 장비에 대해 인식해야할 또 하나의 문제는 장비개조에 대한 부분이다. 일반적으로 외산장비를 국내 반입시에 공기단축과 시공성만을 목적으로 토출량을 증가시키기 위해 장비를 개조한 후 현장에 투입하는 경우가 빈번하다. 본 연구에서 수행한 설문조사 결과에서도 사용하고 있는 숏크리트 장비가 개조된 경우가 40%로 나타났다. 또한, 노즐맨을 대상으로 타설 장비 개조에 대한 의견을 물어본 결과 국내 규정상 명확한 규정이 없으므로 현장여건에 맞추어 사용하면 된다(60%)라는 의견이 지배적으로 나타나, 효율성 중시로 인해 숏크리트 품질의 저하를 유발할 가능성이 많은 것으로 나타났다.

그림 3.3.15는 숏크리트 장비에서 가장 많이 개조하는 부분에 대한 설문조사 결과이다. 노즐직경을 확대하는 경우가 가장 많았고(52%), 배송파이프를 확대하는 경우가 다음으로 많았는데(60%), 이에 대한 정부 차원의 규제가 필요하다고 판단된다.

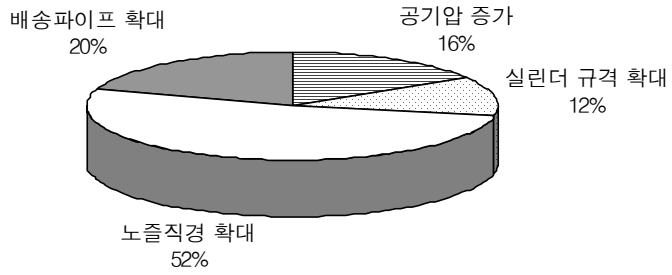


그림 3.3.15 숏크리트 장비에서 가장 많이 개조하는 부분

(사) 숏크리트 강섬유

그림 3.3.16은 각 현장에서 사용되고 있는 숏크리트 배합설계에서 강섬유 혼입량에 대해 조사한 결과이고, 그림 3.3.17은 실제적으로 B/P에서 투입되는 강섬유 혼입량에 대해 조사한 결과이다. 배합설계상의 강섬유 혼입량은 $1m^3$당 40kg이 80%로 가장 많았고, 40~50kg이 14%로 나타났지만, 실제 투입되는 강섬유 혼입량은 $1m^3$당 40kg이 38%에 불과하고 40~50kg이 46%로 더 많은 것으로 나타났다. 즉 배합설계보다 실제로는 더 많은 강섬유를 혼입하는 것으로 나타났다.

이렇게 실제보다 더 많은 강섬유를 혼입하는 이유로는 분급장치의 성능 부족(35.7%) 및 설계서대로 혼입하면 최초 설계강도에 미치지 못하기 때문(35.7%)인 것으로 나타났다(그림 3.3.18).

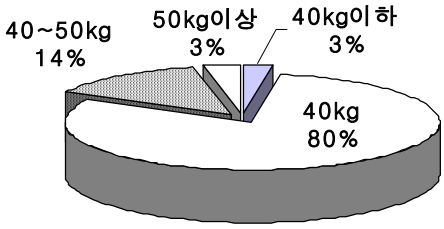


그림 3.3.16 배합설계의 강섬유 혼입량

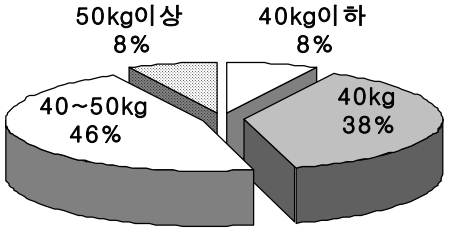


그림 3.3.17 실제 투입되는 강섬유 혼입량

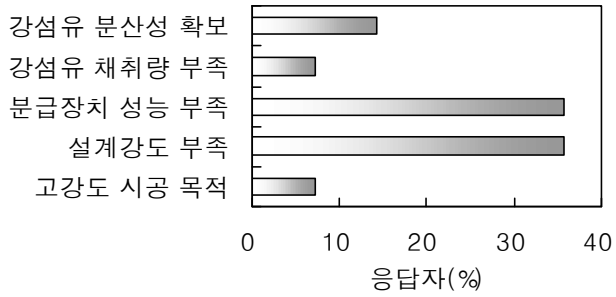


그림 3.3.18 배합설계보다 강섬유를 많이 혼입하는 이유

강섬유가 갖추어야할 가장 중요한 조건을 묻는 설문에서는 첫째로 분산성(41.4%)을 꼽아 강섬유의 막힘 현상이나 Fiber ball 현상이 현장에서 어려운 해결과제임을 알 수 있었고, 다음은 인장강도(35.1%)와 정착성(22.5%)으로 나타났다(그림 3.3.19).

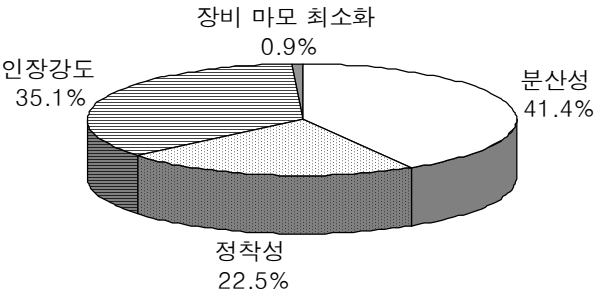


그림 3.3.19 강섬유가 갖추어야할 조건

(아) 급결제

그림 3.3.20은 국내에서 사용되고 있는 숏크리트 급결제 종류에 대한 설문 결과이다. 현재 국내에서는 알루미네이트계 급결제가 가장 많이 사용되고 있으며, 다음으로 실리케이트계 그리고 분말형 급결제인 시멘트 광물계가 많이 사용되고 있는 것으로 나타났다. 알루미네이트계 급결제가 가장 많이 사용되고 있는 이유는 성능 면에서는 다른 급결제에 비해 떨어지지만, 재료 단가가 저렴하여 공사비 절감을 위해

일반적으로 사용되고 있는 것으로 판단된다.

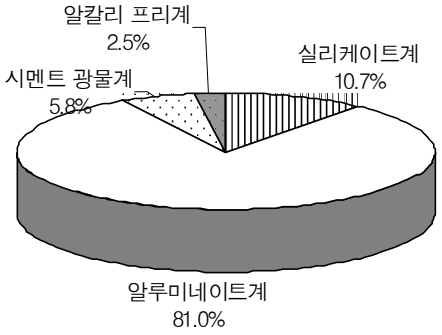


그림 3.3.20 숏크리트 급결제의 국내 사용 분포

그림 3.3.21은 건설현장에서 가장 많이 사용되고 있는 급결제의 문제점에 대한 설문조사 결과이다. 가장 큰 문제점으로는 부족한 장기내구성(22.3%)과 인체에 유해한 성질(20.0%)로 나타났고, 과도한 리바운드량(18.6%) 및 늦은 초기강도 발현속도(14.5%) 등도 문제점으로 나타났다. 특히, 장기내구성 부족과 늦은 초기강도 발현속도의 문제는 숏크리트의 품질과 직결되는 것으로 터널의 초기 안전성과 숏크리트의 장기내구성 향상을 위해서는 급결제의 개선이 불가피할 것으로 판단된다.

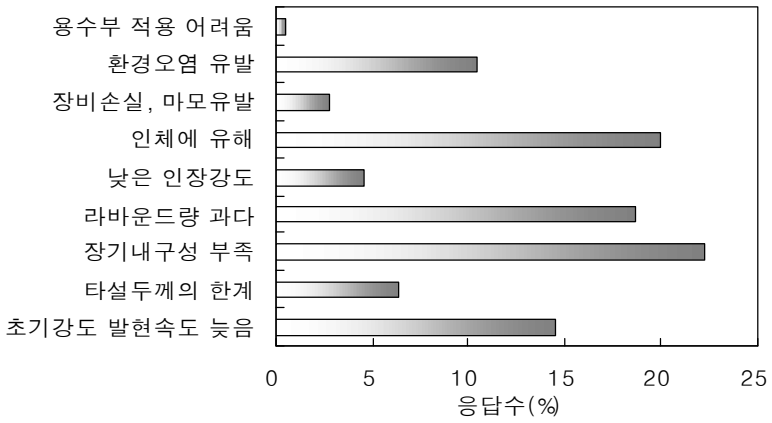


그림 3.3.21 현장에서 사용되고 있는 급결제의 문제점

(2) 국내 숏크리트 골재의 현장품질에 대한 설문조사 결과

그림 3.3.22는 국내 숏크리트 타설 현장에서 사용되고 있는 골재최대치수에 대한 조사결과이다. 현재 국내 숏크리트 타설현장에서는 가장 많이 사용되고 있는 골재최대치수는 13mm(62%)로 나타났고, 10mm를 사용하는 경우는 10%에 불과하였다.

그리고 15mm 이상이 사용되는 경우도 28%로 나타났다.

터널설계기준(건교부, 1999)에서는 골재최대치수를 15mm 이하로 규정하고 있으므로 이 기준에 의하면 숏크리트 타설현장의 골재최대치수는 적정한 것으로 판단되나, 한국도로공사의 품질기준에는 골재최대치수를 13mm로 규정하고 있기 때문에 이 기준에 의하면 국내 숏크리트 타설현장의 28%는 품질기준을 준수하고 있지 않는 것으로 나타났다.

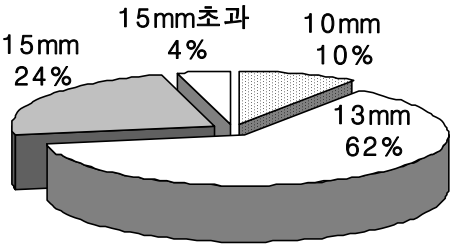


그림 3.3.22 숏크리트 현장에서의 골재최대치수 분포

골재재료의 현장 수분함유량 측정빈도에 대한 질문에서는 1일 1회 이상 측정한다는 응답이 53.3%로 가장 많게 나왔고, 1주일에 1회 이상 측정하는 응답은 19.0%로 나타나 골재 함수량 관리는 비교적 잘 되고 있는 것으로 나타났다.

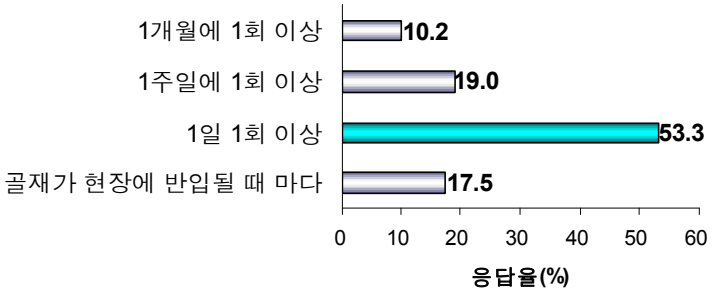


그림 3.3.23 골재 수분함유량 측정빈도

그림 3.3.24는 각 현장에서 골재가 반입된 후 세척작업을 실시하는지에 대한 조사결과인데, 세척작업을 실시하거나 사용 전 세척작업을 하는 경우가 54.1% 이지만 골재에 대해 전혀 세척작업을 실시하지 않는다는 응답도 39.7% 정도로 나타났다. 또 골재에 포함된 석분 및 미분말에 대한 설문에서는 석분 및 미분말이 골재에 섞여 있으며, 이로 인해 숏크리트 품질에 영향이 있을 것이라고 생각하는 실무기술자들이 32.2%로 나타났다(그림 3.3.25). 이러한 결과는 현장에서의 골재 품질 관리 실태를 단적으로 보여주며 골재 품질 향상을 통해 숏크리트 자체의 품질을 충분히 개

선할 수 있음을 보여주는 것이라고 판단된다.

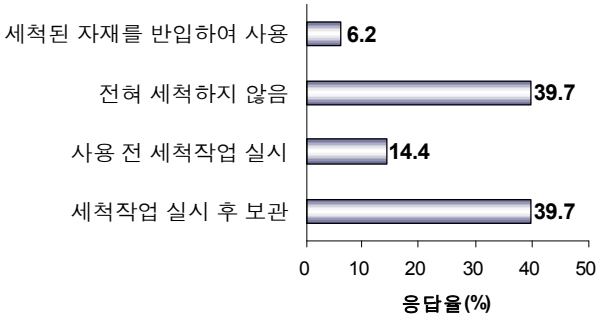


그림 3.3.24 골재 반입 후 세척작업 유무

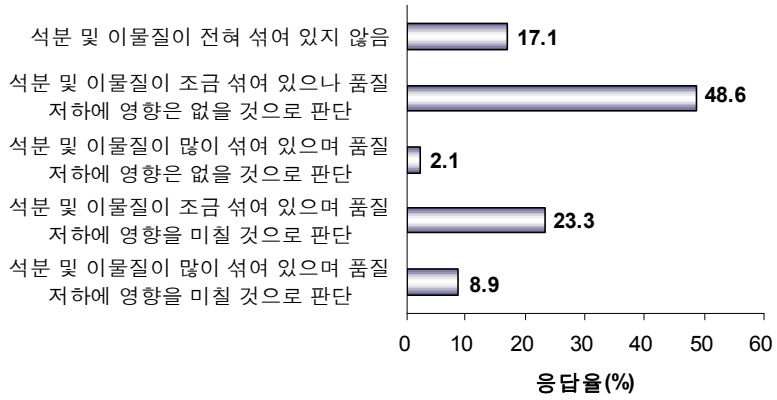


그림 3.3.25 골재에 포함된 석분 및 이물질의 영향

(3) 분말형 레디믹스트 숏크리트 개발에 대한 설문조사 결과

그림 3.3.26은 본 연구개발에서 수행하고 있는 "분말형 레디믹스트 숏크리트"의 개발 필요성에 대해 실무기술자들의 의견을 물은 것인데, 필요하다는 의견이 53.7%로 나타났고 매우 필요하다는 의견도 19.7%로 나타났다. 또한, 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발 및 활용을 통해 현장배합 숏크리트의 문제점들이 개선되고 숏크리트의 품질향상이 가능할지에 대한 설문에는 70% 이상이 개선 및 향상될 것이라고 응답하여 새로운 숏크리트 재료의 개발 필요성 및 활용 가능성에 대해 매우 긍정적인 의견을 보였다(그림 3.3.27). 이에 더하여 얻을 수 있는 개선 사항으로는 숏크리트 골재의 효과적인 품질관리가 가능할 것이라는 의견이 31.0%로 가장 많았고, 골재 품질관리 개선으로 인해 숏크리트의 고강도화가 가능하다는 의견이 16.2%로 나타났다(그림 3.3.28).

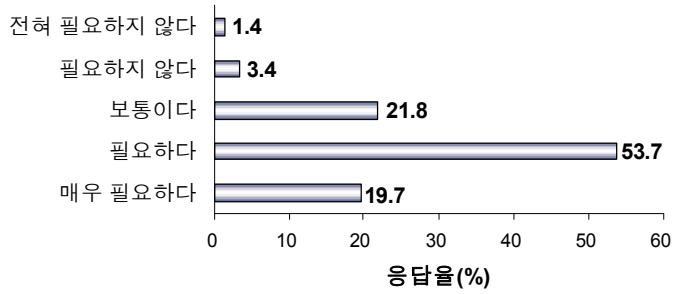


그림 3.3.26 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발 필요성

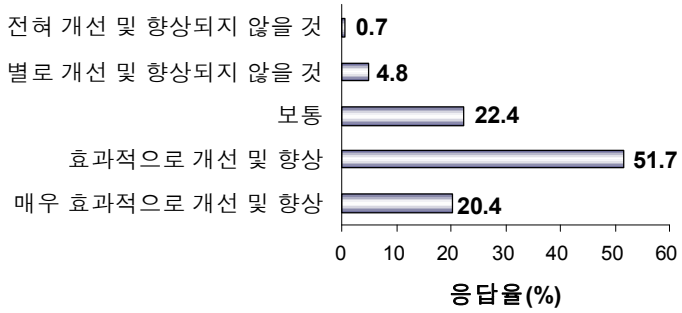


그림 3.3.27 분말형 레디믹스트 숏크리트로 인한 예상 효과

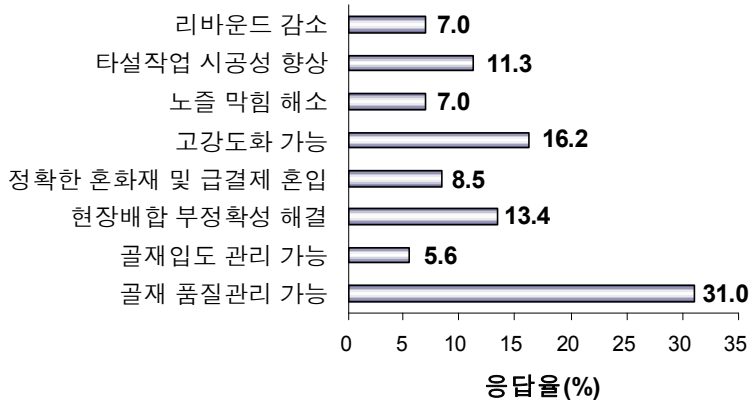


그림 3.3.28 분말형 레디믹스트 숏크리트로 개발로 예상되는 이점

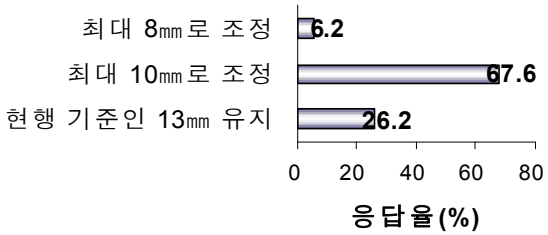


그림 3.3.29 분말형 레디믹스트 숏크리트의 최적 골재최대치수

그림 3.3.29는 공장배합으로 레디믹스트 숏크리트를 제조할 때 리바운드량을 줄이고 노즐 막힘 현상을 줄여 시공성과 경제성을 증대하기 위해 가장 적정한 골재최대치수에 대한 설문결과인데 10mm로 하향 조정해야 한다는 의견이 가장 많은 것으로 나타났다(67.6%).

그림 3.3.30은 다기능 숏크리트의 적용성에 대한 설문결과이다. 다기능 숏크리트란 분말형 레디믹스트 숏크리트의 특성화된 제품으로서 현장상황(파쇄대 출현, 지하수 유입량 과다, 보강효과 증진 필요 등)에 따라 효과적인 대응이 가능하도록 사전에 공장배합을 통해 다양한 기능을 가지도록 제품화된 숏크리트를 말한다. 국내 실무기술자들이 가장 필요하다고 생각하는 다기능 숏크리트는 지하수 유입량이 과다하여 일반 숏크리트로 타설하기 어려운 경우 적용 가능한 숏크리트 제품인 것으로 나타났고(42.1%), 다음으로 예상치 못한 파쇄대 등이 출현했을 경우 적용 가능한 고강도 숏크리트 제품인 것으로 나타났다(31.4%).

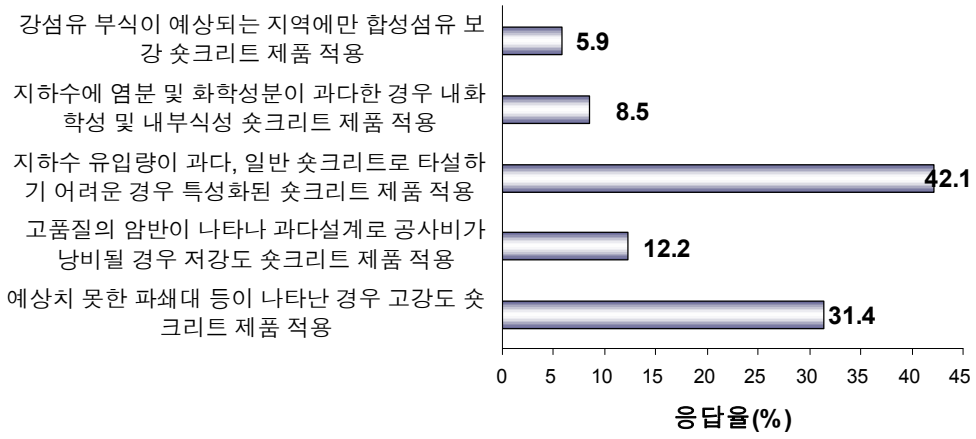


그림 3.3.30 다기능 숏크리트가 필요한 특성화된 기능

3. 실무의견 수렴을 통한 레디믹스트 숏크리트 개발방향 모색

가. 골재최대치수

앞서 살펴본 현장설문조사 결과에서 확인하였듯이 국내 숏크리트 공법에서 가장 문제가 되는 부분이 높은 리바운드량이며, 리바운드량에 가장 큰 영향을 미치는 영향인자가 골재의 최대치수 및 품질상태로 나타났다. 골재최대치수는 숏크리트 공법의 효율성과 시공성 및 경제성에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 숏크리트 골재최대치수의 입경이 과다하게 되면 거친 배합에 따른 숏크리트의 배송 저하가 발생되고, 노즐의 막힘 현상으로 작업지연 및 중단 사례가 빈번하게 발생하게 된다. 이런 문제가 발생했을 경우 현장에서는 시공성 향상과 원활하고 신속한 타설을 위해 슬럼프나 단위수량을 증가시키게 되며, 과다한 급결제를 투입하게 되어 2차적으로 숏크리트 강도저하를 유발하게 된다. 또한, 골재최대치수는 가장 문제점이 되고 있는 숏크리트 리바운드량에 영향을 미쳐 시공성 뿐만 아니라 경제성 면에서도 많은 문제점을 가지고 있다.

현재 골재 생산시에는 단일입도로 파쇄하며 C/R(Crusher)의 성능, Cone C/R의 간격 및 Screen Size에 의해 최대치수 및 입도가 결정되게 된다. 그리고 시방입도를 만족하기 위해 C/R 상부 Screen을 13~15mm로 설치하게 되어 굵은 규격의 골재가 과다하게 분포하게 되는 것이다. 또한, 굵은 규격의 골재가 과다분포 하게 됨으로 합성입도가 자연스럽고 완만한 형태를 이루고 있지 못하며 이는 숏크리트의 유동성을 저하하게 된다. 현장설문조사 결과에서도 골재최대치수가 13mm 이상을 사용하는 경우가 60% 이상으로 과다한 리바운드량은 어쩌면 당연한 결과라고 할 수 있다.

숏크리트 골재최대치수에 대한 품질기준을 살펴보면 표 3.3.22와 같은데, 국외의 경우는 8~10mm로 규정되어 있으나(Austrian Concrete Society, 1990 ; EFNARC. 1996 ; Norwegian Tunneling Society & Norwegian Rock Mechanics), 국내의 경우는 13~15mm로 규정되어 있고(터널설계기준, 1999 ; 도로설계편람, 1999) 최근 들어서야 10mm로 낮추는 연구가 수행중이다(한국도로공사, 2003).

국내에서도 숏크리트 품질 개선을 위해서는 골재최대치수 품질기준을 국외 수준에 맞추어 10mm 이하로 낮추는 것이 합리적이라고 판단된다. 그런데 레디믹스트 숏크리트는 공장에서 배합되어 현장으로 운반 되고 운반 중에 재료의 비중 차이로 인해 재료분리 현상이 발생할 가능성이 있다. 현장에서 배합수와 혼합하면서 믹싱을 추가로 실시하지만 가장 균일한 상태의 분말형 레디믹스트 숏크리트 배합으로

유지하기 위해서는 가장 비중이 큰 골재의 최대치수를 8mm 까지 낮추는 것이 유리하다. 따라서 본 연구개발에서는 분말형 레디믹스트 숏크리트 배합의 골재최대치수를 1차적으로 8mm로 결정하고자 한다.

개선된 골재를 사용하게 되면 부드러운 배합으로 펌프카 노즐의 막힘현상이 해소되고 과도한 급결제 사용이 억제되어 숏크리트 강도 저하를 막고, 우수한 시공성을 확보할 수 있게 된다. 또한, 숏크리트 품질에 있어서 수밀하고 내수성이 우수하게 되며 무엇보다 리바운드량을 대폭적으로 감소시킬 수 있게 된다.

골재최대치수를 줄이게 되면 골재생산업체의 생산 단가가 상승하게 되고 이로 인해 숏크리트 공정의 시공 단가도 당연히 상승하게 된다. 하지만, 리바운드량의 감소와 시공성의 개선, 공기의 단축 및 고품질 숏크리트의 시공 등으로 인해 간접경비는 오히려 감소하게 되어 전체 터널 공사비는 차이가 거의 없을 것으로 예상된다.

골재의 세척 및 토분제거 문제도 중요한 사항인데, 현장설문조사 결과 반입된 골재에 대한 세척작업을 전혀 하지 않는 경우가 40%에 달하고 이로 인해 숏크리트 품질에 영향을 미칠 것이라는 의견이 30%를 넘는 것으로 나타났다. 또한, 골재 생산시 철저한 토분제거를 위한 세척을 시행하여 슬러지를 최대한 제거하는 것이 골재의 품질관리 면에서도 필요하다고 판단된다.

본 연구에서 개발하고자 하는 분말형 레디믹스트 숏크리트는 공장에서 엄선된 골재 세척 및 입도 관리 등을 거쳐서 특정 배합으로 포장된 제품이 출시되고, 현장에서는 배합수와 규정된 혼입량의 강섬유만을 혼합하여 타설하게 되므로 골재, 시멘트, 혼화재, 유동화제, AE감수제 등의 숏크리트 재료에 대한 현장 품질관리가 전혀 필요하지 않게 된다. 따라서, 재료의 품질 저하로 인한 숏크리트의 품질 저하는 발생하지 않게 된다.

표 3.3.22 숏크리트 골재최대치수에 대한 국내외 품질기준

구분		숏크리트 골재최대치수(G_{max})
국내	한국도로공사	13mm
	터널설계기준	15mm
국외	미국 콘크리트 학회	10mm
	노르웨이 품질기준	8mm
	오스트리아 품질기준	8mm
	유럽통합규격	8mm

나. 설계기준강도의 다양화 및 기능별 인자 고려

시공현장에서 숏크리트가 적용되는 분야는 매우 다양하며 대상 구조물의 중요도, 적용목적, 시공 상황 등에 따라 다양한 품질관리 기준이 요구된다. 일반적으로 싱글쉘 공법이나 PCL 터널공법의 경우에는 고강도 및 고내구성의 숏크리트가 필요하며, 사면안정이나 임시 지보재 시공, 굴착표면 관리 등의 경우에는 저강도 숏크리트로도 충분히 시공이 가능하다.

고강도 숏크리트가 활발하게 적용되고 있는 국외 숏크리트 강도기준에서는 압축강도 및 휨강도를 등급에 따라 규정화하고 있으며(Austrian Concrete Society, 1990 ; Norwegian Tunneling Society, 1999 ; EFNARC, 1996), 타설 현장의 상황이나 변화하는 타설 목적에 따라 다양한 배합비와 품질등급으로 숏크리트 배합이 규정되어 있다. 이것은 숏크리트가 적용되는 목적, 현장상황, 구조물의 중요도 및 요구 설계강도 등에 따라 강도 기준을 구분하여 관리하는 것으로, 과다설계를 예방하고 시공목적에 맞는 합리적인 품질관리가 가능한 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

국내 숏크리트 강도기준(터널설계기준, 1999 ; 터널표준시방서, 1999 ; 한국도로공사, 2002)에서는 단일 설계기준강도만이 제시되어 있어, 실제 시공현장에서는 사용목적에 적합하지 않은 과다설계로 인해 공사비가 낭비되거나, 혹은 대상 구조물에는 부적합한 저강도 숏크리트가 단순히 설계기준강도만을 통과하여 시공되는 경우도 발생하고 있다. 또한, 원지반의 강도나 강섬유의 혼입 유무에 관계없이 동일한 배합비가 적용되고 있어 숏크리트 강도특성에 대한 고려가 전혀 되지 않고 있다.

국외에서는 2차 라이닝의 대체나 숏크리트의 장기적인 거동 및 내구성의 관점에서 39.2~58.8MPa에 이르는 고강도 숏크리트가 시공되고 있으나, 국내의 경우 숏크리트의 설계기준강도가 설계, 시공상의 문제점 등으로 인해 20.58MPa 내외의 저강도에 머무르고 있다. 그래서 구조물의 장기적인 내구성 저하로 인해 터널의 유지관리 비용이 과다하게 지출되어 경제적인 손실을 초래하고 있는 실정이다.

이러한 문제점들을 해결하고 숏크리트의 강도증진과 장기내구성의 확보를 위해서는 국내에서도 숏크리트 강도기준의 다양화가 필요할 것으로 판단된다. 이것은 대상 구조물의 종류, 기능 및 숏크리트 타설목적 등에 적합하게 구조물 설계와 품질관리가 이루어지는 것을 의미한다.

본 연구개발에서는 숏크리트 적용대상, 현장여건, 설계조건 등에 맞추어서 변화되는 설계기준강도를 가지는 분말형 레디믹스트 숏크리트를 개발할 계획이다. 포장된 제품형태로 출시될 때 구매자의 요구에 따라 필요한 설계기준강도를 부여할 수 있고, 연약한 암반대 출현시 적용 가능한 고강도용 및 과도한 출수 지역 출현시 적용

가능한 차수용 등 다기능 인자를 고려한 레디믹스트 숏크리트를 개발하고자 한다.

설계기준강도의 상향 조정은 숏크리트 재료 및 시공 단가의 상승을 유발하겠지만, 결과적으로는 구조물의 장기적인 내구성 저하를 방지하여 보수·보강에 소요되는 유지관리 비용을 대폭적으로 감소시켜 오히려 더 경제적인 이점이 있을 것으로 판단된다.

다. 산업부산물의 재활용

본 연구에서는 분말형 레디믹스트 숏크리트 개발과 함께 고로슬래그 미분말을 혼입한 레디믹스트 숏크리트를 개발하고자 한다. 고로슬래그 미분말은 지금까지 콘크리트 공법에는 적용된 사례가 다수 있으나 숏크리트 공법에 적용된 사례는 아직 찾아보기 어렵다. 하지만, 산업부산물을 경제적으로 재활용하고 숏크리트의 장기강도 및 내구성을 향상시킬 수 있는 이점을 가지고 있으며, 지금까지 콘크리트 공법에 적용된 사례를 바탕으로 레디믹스트 숏크리트 재료로서 충분한 개발 가능성이 있다고 판단된다. 또한, 숏크리트 품질제고 효과 외에 고로슬래그는 사회·환경적으로도 큰 의미를 가진다. 시멘트 1톤을 제조할 때 석회석이 1.4톤 소비되기 때문에 시멘트의 일정량을 대체해 고로슬래그를 사용하면 석회석 자원 절약과 시멘트 제조에 필요한 경유 사용을 모두 줄일 수 있다.

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 보통 콘크리트와 동일한 용도 및 목적으로 적용할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 고로슬래그 미분말의 비표면적, 치환율 등의 물리적 특성에 따라 보통 콘크리트에 비하여 우수한 특성을 발휘하는 것으로 알려져 있다.

표 3.3.23은 일본의 고로슬래그 미분말 응용제품 조달실적을 나타낸 것으로 선진국에서는 고로슬래그를 폐기물이 아닌 100% 재활용되는 또 하나의 자원으로 인식하고 있음을 알 수 있다. 국내에서도 선진국의 추세에 맞춰 지난 95년 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 설계시공 지침이 마련되었고 97년에는 고로슬래그 미분말에 대한 KS 규격이 제정되었다. 또한, 2003년 4월에는 레디믹스트 콘크리트의 산업규격을 제정, 콘크리트 혼화재료로 공식화하였다.

지하수에 노출되는 터널 내에 사용되는 숏크리트 재료에 고로슬래그 미분말을 사용하면 염화물 침투 저항성 및 내화학성 등이 우수해지나, 중성화 속도가 시멘트만을 사용한 숏크리트보다 빠른 것으로 알려져 있다. 하지만 실제로 구조물을 대상으로 한 연구결과에서는 고로슬래그 미분말이 시멘트와 반응, 치밀한 수화물을 형성하기 때문에 중성화 저항성이 증가하는 것으로 나타났다. 표 3.3.24는 고로슬래그를

혼입한 콘크리트의 옥외 폭로 중성화 실험 결과를 나타낸 것이다.

표 3.3.23 일본의 고로슬래그 미분말 응용제품 조달실적

해당 부처	적용제품명	사용실적	적용비용(%)
국토교통성	레미콘	6,717,248m^3	82.2
농림수산성	슬래그시멘트	20,997	
일본도로공단	레미콘	1,131,400m^3	
수도고속도로공단	레미콘	160,967m^3	
수자원개발공단	레미콘	36,229m^3	96.1
일본철도건설공단	레미콘	9,828m^3	20
제도고속도로 교통공단	레미콘	955,538m^3	13.4
도시기반정비공단	레미콘	3,721m^3	100
문부과학성 공공공사	슬래그시멘트	1,996톤	
총무성 공공공사	슬래그시멘트	1,909톤	
지역진흥정비공단	레미콘	2,953m^3	

표 3.3.24 실외 폭로 중성화실험 결과

구 분	26주		1년	
	중성화깊이 (mm)	비율	중성화깊이 (mm)	비율
보통콘크리트	0.92	1.00	1.28	1.00
고로슬래그계 콘크리트	0.48	0.52	0.41	0.32
플라이 애쉬계 콘크리트	1.00	1.09	1.38	1.08

표 3.3.25 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 단가 절감 비교표

구분 / 치환율	W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	단위량 (kg/m^3)			시멘트+슬래그 단가 (원)
				Water	Cement	Slag	
Slag 0	45	13	65	215	480	0	31,056
Slag 10%					432	48	30,542
Slag 20%					384	96	30,029
Slag 30%					336	144	29,515
Slag 40%					288	192	29,001
Slag 50%					240	240	28,488

표 3.3.25는 시멘트 치환율에 따른 단가 절감을 비교한 것이다. 시멘트와 고로슬래그 단가를 시멘트 64.7원/kg, 고로슬래그 54원/kg으로 계산하였을 때, 일반시멘트만을 사용하는 배합보다 고로슬래그를 치환함으로서 얻어지는 경제적 이득은 고로슬래그 치환율이 10% 증가할 때마다 513.6원/m^3 이 발생하게 된다.

본 연구에서는 숏크리트의 품질적인 측면과 경제적인 측면을 모두 고려할 수 있는 고로슬래그 미분말의 적정 치환율을 찾을 계획이다.

4. 소결론

본 절에서는 현장배합 숏크리트의 국내 시공실태 파악을 위해 숏크리트의 국내외 품질규정을 고찰하였고, 문제점 파악을 위해 실시한 현장설문조사 결과를 분석하였다. 그리고 실무의견 수렴을 통한 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발방향을 모색하였다. 본 절에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 현장설문조사 결과 국내 실무기술자들이 가장 중요하게 생각하고 있는 것은 골재 품질 및 입도와 신뢰성 있는 장기내구성인 것으로 나타나, 새로운 숏크리트 재료 개발을 위해서는 철저한 골재 품질 관리를 통해 장기내구성을 높일 수 있는 방안을 모색해야 함을 알 수 있었다.

(2) 숏크리트 리바운드량에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 숏팅 거리 및 각도, 골재최대치수 및 품질상태와 함께 숏크리트 배합의 적정성인 것으로 조사되었는데, 혼화재나 급결제의 성능보다는 골재 최대치수나 품질이 리바운드량에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타나 숏크리트 원재료의 품질관리가 매우 중요함을 보여주었다.

(3) 현장에서 사용되고 있는 골재 품질에 대한 설문조사 결과 가장 많이 사용되고 있는 골재최대치수는 13mm로 나타났는데, 국외 품질 규준과 비교하여 적정하지 않는 것으로 판단되었다. 또한, 골재최대치수의 과다로 인해 노즐 막힘, 작업지연 및 중단 사례가 발생하고 있고, 숏크리트 리바운드량을 크게 해서 시공성 뿐만 아니라 경제성 면에서도 문제점을 가지고 있는 것으로 나타났다.

(4) 숏크리트 타설 현장에서 골재가 반입된 후 세척작업을 실시하거나 사용 전 세척작업을 하는 경우는 조사대상의 54.1%로 나타났고, 세척작업을 전혀 실시하지 않는 경우는 39.7%로 나타났다. 또한, 석분 및 미분말이 골재에 섞여 있으며 이로 인해 숏크리트 품질에 영향이 있을 것이라고 의견이 전체의 32.2%로 나타나, 현장 반입 골재의 품질관리에 문제가 있는 것으로 나타났다.

(5) 분말형 레디믹스트 숏크리트의 필요성에 대해서 응답자의 70% 이상이 개발이 필요하다는 의견을 나타내었고, 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발 및 활용을 통해 현장배합 숏크리트의 문제점들이 개선되고 숏크리트의 품질향상이 가능하다는 의견도 70% 이상으로 나타났다. 개선 가능한 사항으로는 숏크리트 골재의 효과적인

품질관리가 가능할 것이라는 의견이 31.0%로 가장 많았고, 골재 품질관리 개선으로 인해 숏크리트의 고강도화가 가능하다는 의견이 16.2%로 나타났다.

(6) 현재 국내 터널 현장 상황에서 필요한 다기능 숏크리트의 특성으로는 지하수 유입량이 과다하여 일반 숏크리트로 타설하기 어려운 경우 적용 가능한 숏크리트 특성(42.1%)과 예상치 못한 파쇄대 등이 출현했을 경우 적용 가능한 고강도 숏크리트 특성(31.4%)인 것으로 나타났다.

(7) 본 연구에서는 숏크리트 품질 향상, 운반 중 재료 분리 방지, 골재 품질 규격화 등을 위해 분말형 레디믹스트 숏크리트의 골재최대치수를 8mm로 선정하여 개발하였으며, 골재의 공장생산 시스템 구축 가능성 평가, 경제성 평가, 재료분리 가능성 평가, 포장화 가능성 평가 및 석산 공급 가능성 평가 등을 통해 연구개발을 수행하였다.

(8) 본 연구개발에서는 숏크리트 적용대상, 현장여건, 설계조건 등에 맞추어서 변화되는 설계기준강도를 가지는 분말형 레디믹스트 숏크리트를 개발하였다. 포장된 제품형태로 출시될 때 구매자의 요구에 따라 필요한 설계기준강도를 부여할 수 있고, 연약한 암반대 출현시 적용 가능한 고강도용 및 과도한 출수 지역 출현시 적용 가능한 차수용 등 다기능 인자를 고려한 레디믹스트 숏크리트를 개발하였다.

(9) 본 연구에서는 숏크리트의 품질적인 측면과 경제적인 측면을 모두 고려할 수 있는 고로슬래그 미분말의 적정 치환율을 찾았으며, 재료 실험 및 현장타설 실험을 통해 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트를 개발하였다.

제 4 절 레디믹스트 숏크리트 재료 고품질화

1. 국내 골재 생산 시스템 조사

본 절에서는 숏크리트의 품질에 중요한 영향을 미치는 골재의 국내 생산 시스템에 대해 살펴보고자 한다. 국내에서 생산되는 골재는 이미 1980년대부터 천연골재의 고갈심화에 따라 석산에서 생산되는 쇄석골재가 주를 이루고 있고, 석산에서 생산되는 골재의 품질 상태에 따라 숏크리트의 품질도 크게 좌우되고 있는 현실이다.

가. 국내 골재수급 현황

표 3.4.1은 국내 골재의 부존량을 나타낸 것이고 표 3.4.2는 연도별 잔골재 공급량을 나타낸 것이다. 2003년을 기준으로 골재 부존량은 약 83억㎥으로 나타났고, 개발가능량은 약 52억㎥로서 앞으로 30~40년 정도 채취 가능한 것으로 나타났다. 골재 공급량은 현재 약 1억㎥로서 연 10% 정도 증가하고 있으며 채취원별로는 바다와 하천이 각각 40% 내외로 나타났다. 특히, 수도권의 경우 바다모래의 비중이 높아 2004년에는 약 62%를 차지하였다.

표 3.4.1 국내 골재 부존량 (한국지질자원연구원, 2003)

권 역	개발 가능량(억㎥)					연간수요량 (억㎥)	채취가능 연수(년)
	바다	하천	육상모래	쇄사	합계		
전국	24.1	4.7	17.1	5.9	51.8	1~2	30~40
수도권	18.7	0.4	2.5	1.4	23.0	0.5~1	30

표 3.4.2 연도별 잔골재 공급량(건교부, 2004)

연 도	공급량 (만㎥)	채취원별 비중(%)			
		바 다	하 천	육상모래	쇄 사
'02	9,535	47.0	36.7	9.2	7.1
'03	10,640	45.4	36.4	14.9	3.2
'04	11,796 (4,464)	40.7 (62.2)	39.9 (21.6)	10.9 (2.6)	8.5 (13.6)

* ( )안은 수도권

현행 골재채취 제도의 문제점을 살펴보면 다음과 같다.

○ 부존량 조사가 미흡하고 채취가능 지역이 부족하여 수급에 어려움이 있다.

○ 전국적인 골재부존량 조사가 이루어지지 않아, 일부 채취가능 지역에서만 채취가 이루어지고 있어 안정적 공급에 어려움이 있다.

○ 공공재료적인 성격을 가진 골재를 비계획적이며 영리위주로 채취하여 사용되고 있다.

○ 부존지역이 제한되어 있고 대체 가능한 재료가 결여되어 있는 상황에서 공공성이 강한 골재의 채취·판매를 민간업자가 전담하여, 채취로 인한 사회적 비용에 대한 보전이 미흡하고 불법채취도 성행하고 있다.

○ 해사채취와 관련하여 환경훼손이 심화되고 있고 주민들의 민원도 증대하고 있다.

○ 모래채취가 일부 지역에 집중됨에 따라 환경훼손이 증가하고, 어족자원고갈 등으로 지역주민의 반발이 심화되고 있다.

정부에서는 국내 골재의 안정적이고 지속적인 공급을 위해 "골재수급안정종합대책"을 마련하여 시행하고 있다.

① 골재자원 조사 및 공급원 확대

○ 전국토의 골재 부존가능지에 대한 조사(현재 70% 완료)를 '09년까지 완료

○ 새로운 바다모래 채취지역 개발, 배타적 경제수역(EEZ)에서의 채취, 남한강, 임진강 등의 하천골재 채취 등을 통해 골재공급을 확대

○ 쇄사(부순모래)의 점유비율(현 10%수준)을 확대하고, 재생골재를 레미콘용으로도 사용할 수 있도록 기술개발을 추진하는 한편, 중국 등에서의 골재수입방안 등을 강구

○ 골재수급계획, 제도개선방안 등을 논의하기 위해 관계부처·환경단체·주민대표·민간전문가 등으로 "골재수급심의회"를 구성·운영

② 모래채취 및 공급의 공공성 확대

○ 골재의 안정적 공급을 위해 불가피한 경우 건교부장관이 골재채취단지 및 단지관리자를 지정할 수 있도록 하여 단지관리자(국가, 지자체, 정부투자기관)가 환경영향평가, 골재채취, 환경복원대책을 수립토록 함

③ 환경보호 강화를 위한 제도개선

○ 바다모래 채취시에도 예정지 제도를 도입하여 예정지 지정단계에서 사전환경성 검토 또는 환경영향평가 협의

○ 불법채취 방지를 위해 채취선박의 위치가 기록되는 GPS 설치를 의무화

○ 2005년 중 해양의 환경평가업무를 해수부로 일원화하여 환경평가절차 중복을 해소

나. 석산에서의 골재 생산 시스템

그림 3.4.1은 국내 일반 석산에서의 골재 생산 시스템을 나타낸 것인데, 골재 크기별로 구분하여 생산되고 있다. 이러한 생산 시스템은 전체 석산에서 이루어지고 있는 것이 아니며, 소규모 석산에서는 통상 최대 35mm, 29(25)mm, 13mm, 10mm, 8mm 이하 등을 생산하고 있다. 8mm 이하는 부순 모래 형태의 세척이 아닌 석분의 형태로 생산되는 경우가 많아 본 연구에서 개발하고자 하는 분말형 레디믹스트 숏크리트로 사용하기에는 점토분이 과다하여 사용하기에 적합하지는 않다고 판단된다. 또한, 석산에서의 지속적인 생산이 어려워 초기 선정된 골재를 안정적으로 공급받는 것도 사실상 어렵고, 수요자의 입도 조절을 위해 스크린 교체 등을 요청할 경우 만족스러운 결과를 얻기가 매우 어렵다 그림 3.4.2는 국내 석산에서의 골재 생산 시스템 모습을 나타낸 것이다.

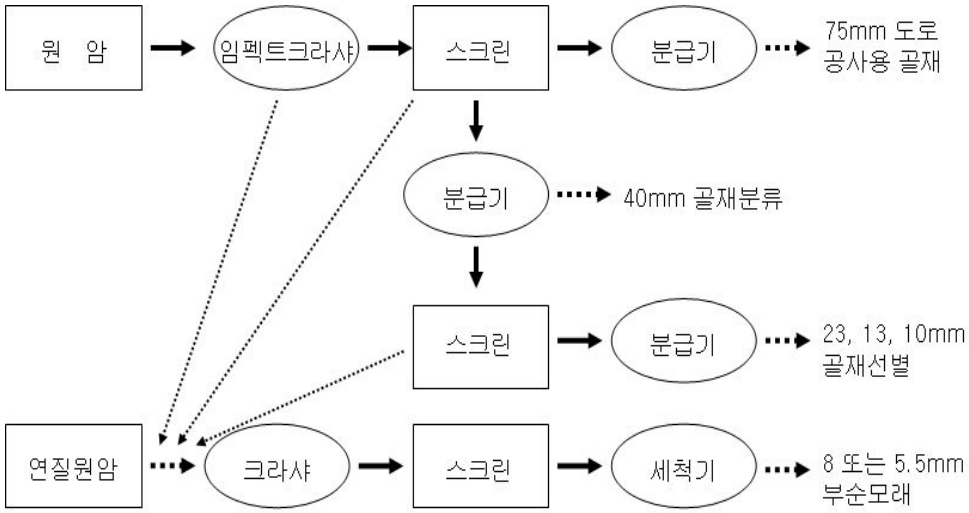


그림 3.4.1 석산의 골재 생산 시스템



(a) 1차 임펙트 크라샤



(b) 1차 분쇄기 및 스크린



(c) MAIN 분급기



(d) 75mm 골재 분급



(e) 13mm 골재 분급



(f) 8mm 이하 골재 분급

그림 3.4.2 석산의 골재 생산 시스템 모습

2. 숏크리트 재료의 성능 실험

본 절에서는 숏크리트용으로 사용되는 각 재료의 시험 결과를 기초로 고찰하였다. 특히 숏크리트 구성 재료 중 골재, 급결재, 혼화재에 대한 특성 평가와 배합 조건에서 이들 재료의 적정 배합 조건을 도출하고자, 굳지 않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트의 기본 물성을 조사하였다.

가. 사용재료 및 실험계획

(1) 시멘트

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 H사에서 제조된 KS L 5201 규정에 보통 포틀랜트 시멘트를 사용하였고 시멘트의 물리적, 화학적 성질 및 광물 조성은 표 3.4.3과 3.4.4에 나타내었다.

표 3.4.3 시멘트의 물리적 성질

종류	비중	분말도	응결		안정도 (%)	압축강도(kgf/㎠)		
			초결	종결		3일	7일	28일
I 종	3.15	3,267	4:10	7:40	0.08	219	271	397
KS L 5201	-	2,800	>1hr	>10hr	0.80이하	130이상	200이상	290이상

표 3.4.4 시멘트의 화학적 성분 및 광물 조성

화학조성 (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Ig. loss	Free CaO	Insoluble
	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7	0.8	1.0	0.5
광물조성 (%)	LSF	LCF	HM	SM	IM	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
	90	88.6	2.1	2.6	1.7	48	27	12	8

(2) 혼화재

본 실험에서 사용된 시멘트 대체 혼화재는 실리카 흄과 고로 급냉 슬래그 2종을 사용하였는데, 각각 결합재로서 잠재 수경 반응에 의해 콘크리트, 숏크리트의 역학적 특성과 내구성을 개선하는 것으로 알려져 있다.

실리카 흄은 노르웨이 E사의 제품을 사용했고 고로 급냉 슬래그는 선철 공정 중 부산물로 발생된 것으로 KS F 2563 「콘크리트용 고로슬래그 미분말」의 3종을 사용하여 실험하였으며, 실험에 사용된 각각 혼화재의 물리·화학적 특성과 화학 조성은 표 3.4.5와 표 3.4.6에 나타내었다.

표 3.4.5 실리카 흄 및 고로슬래그의 물리적 특성

종류	비중	분말도 (㎠/g)	강열감량 (%)	염화이온 (%)	활성도지수(%)		
					7일	28일	91일
실리카 흄	2.3	200,000	1.3	0.19	99	-	-
고로슬래그	2.9	4,355	0.83	0.008	84	120	123

표 3.4.6 실리카 흄 및 고로슬래그의 화학적 성분

종류	화학 성분(%)					
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
실리카 흄	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7
고로슬래그	33.5	15.2	0.5	43.9	2.6	2.5

(3) 급결제

본 실험에 사용된 급결제는 알루미네이트(Sodium Aluminate)계와 알칼리 프리계 급결제를 사용했으며, 알루미네이트계 액상급결제는 수산화나트륨, 수산화알루미늄을 사용하여 $NaAlO_2$의 함량이 40±5wt.%이며, 알칼리 프리 액상급결제는 황산알루미늄, 디에탄올아민를 주성분으로 하는 것(AF1)과 황산알루미늄, 공업용 비정질 수산화알루미늄을 주성분(AF2)으로 한 것을 사용하였다.

(4) 골재

본 실험에 사용된 잔골재는 최대치수가 2.5㎜인 양질의 하천사를 사용하였으며 물리적 특성은 표 3.4.7과 같다. 굵은 골재는 동일 석산의 부순 골재를 사용하였으며, 굵은 골재 최대 치수에 따른 콘크리트의 물성을 조사하기 위해서 본 실험에서는 최대 치수가 8, 10, 13㎜ 크기인 것을 사용하였다. 굵은 골재의 물리적 특성은 표 3.4.8과 같다.

표 3.4.7 잔골재의 물리적 특성

시험항목		단위	결과	시험방법
입도 (체를 통과하는 것의 질량 백분율)	10㎜	%	100	KS F 2502 ; 2005
	5㎜	%	100	
	2.5㎜	%	93	
	1.2㎜	%	78	
	0.6㎜	%	46	
	0.3㎜	%	19	
	0.15㎜	%	8	
조립율		-	2.57	KS F 2502 ; 2005
안정성(Na_2SO_4)		%	5	KS F 2507 ; 2002
표면건조 포화상태의 밀도		g/㎤	2.54	KS F 2504 ; 2002
절대 건조 밀도		g/㎤	2.50	KS F 2504 ; 2002
흡수율		%	1.21	KS F 2504 ; 2002
점토 덩어리		%	0.6	KS F 2512 ; 2002
0.08㎜체 통과율		%	3.0	KS F 2511 ; 2002
염화물		%	0.001	KS F 2515 ; 2002
유기불순물		-	표준색 용액보다 연함	KS F 2510 ; 2002
단위용적질량 (다짐봉실험)		kg/ℓ	1.529	KS F 2505 ; 2002

표 3.4.8 굵은 골재의 최대 치수에 따른 물리적 특성

시험항목		단위	결과			시험방법
			8㎜	10㎜	13㎜	
입도 (체를 통과하는 것의 질량 백분율)	20㎜	%	100	100	100	KS F 2502 ; 2005
	13㎜		100	100	99	
	10㎜	%	100	97	82	
	5㎜	%	77	64	11	
	2.5㎜	%	35	4	3	
	1.2㎜	%	8	1	2	
조립율		-	5.57	5.94	6.28	KS F 2502 ; 2005
연석량		%	0.5	0.8	0.8	KS F 2516 ; 2002
안정성(Na_2SO_4)		%	4	4	5	KS F 2507 ; 2002
표면건조 포화상태의 밀도		g/㎤	2.60	2.61	2.72	KS F 2504 ; 2002
절대 건조 밀도		g/㎤	2.59	2.60	2.70	KS F 2504 ; 2002
흡수율		%	1.47	0.94	0.97	KS F 2504 ; 2002
0.08㎜체 통과율		%	1.8	0.6	0.8	KS F 2511 ; 2002
마모율		%	23.2	21.3	44.1	KS F 2508 ; 2002
단위용적질량 (다짐봉실험)		kg/ℓ	1.515	1.532	1.612	KS F 2505 ; 2002
실적률		%	57	60	59	KS F 2505 ; 2002
입자모양 판정 실적률		-	56	58	58	KS F 2527 ; 2002

나. 실험계획 및 배합조건

(1) 실험 계획

분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 개발을 위한 실내 시험은 콘크리트 실험과 페이스트 및 모르타르 실험을 병용해 실시하였다. 콘크리트 시험은 굳지 않은 콘크리트의 특성과 경화 콘크리트의 특성은 굵은 골재의 최대 치수, 혼합재의 종류와 치환량에 따라 평가하였고, 페이스트 시험 및 모르타르 시험은 급결제의 종류에 따른 특성을 파악하기 위해서 평가하였으며, 측정 항목은 급결제의 기초 물성, 응결 시간, 압축 강도, 그리고 수화 특성을 평가하였다. 표 3.4.9에서 3.4.11까지는 실내시험 항목을 나타낸 것이다.

표 3.4.9 골재 최대 치수에 따른 콘크리트 시험(Lab. Test)

구분	시험 항목	측정시기
굳지 않은 콘크리트	슬럼프	제작 시
	공기량	제작 시
굳은 콘크리트	압축강도	3, 7, 28일
	동탄성 계수	3, 7, 28일

표 3.4.10 혼합재의 종류 및 치환량에 따른 콘크리트 시험(Lab. Test)

구분	시험 항목	측정시기
굳지 않은 콘크리트	슬럼프	제작 시
	공기량	제작 시
굳은 콘크리트	압축강도	3, 7, 28일
	동탄성 계수	3, 7, 28일

표 3.4.11 급결제의 종류에 따른 페이스트 및 모르타르 시험

구분	시험 항목	측정시기
모르타르	압축강도	0.5, 1, 3, 7, 28d
페이스트	응결 시간	-
	XRD	1, 3, 28일
	SEM	1, 28일

(2) 배합 조건

표 3.4.12는 본 연구에서 적용된 시험 배합 조건을 나타낸 것으로 ①~③은 굵은 골재 최대 치수 변화에 의한 콘크리트 물성 변화를 고찰하기 위한 배합 조건이며, ①, ④~⑨는 Plain 대비 혼화재의 종류 및 치환량에 의한 콘크리트 특성을 평가하기 위한 배합 조건이다.

표 3.4.12 실험 배합 조건 및 변수

Comp. / Sample	W/B (%)	Gmax (㎜)	S/a (%)	단위량(kg/㎥)							
				W	C	S	G	SF	BFS	SP	비고
① 8-Plain	33.7	8	67	155	460	1062	524	-	-	2.3	골재 최대 크기 평가
② 10-Plain		10						-	-		
③ 13-Plain		13						-	-		
④ 5-SF		8			437			23	-		혼합재에 종류 및 치환량에 의한 평가
⑤ 10-SF		8			414			46	-		
⑥ 15-SF		8			391			69	-		
⑦ 10-BFS		8			414			-	46		
⑧ 20-BFS		8			368			-	92		
⑨ 30-BFS		8			322			-	138		

비고) SF : 실리카 흄, BFS : 고로 급냉 슬래그, SP : 유동화제

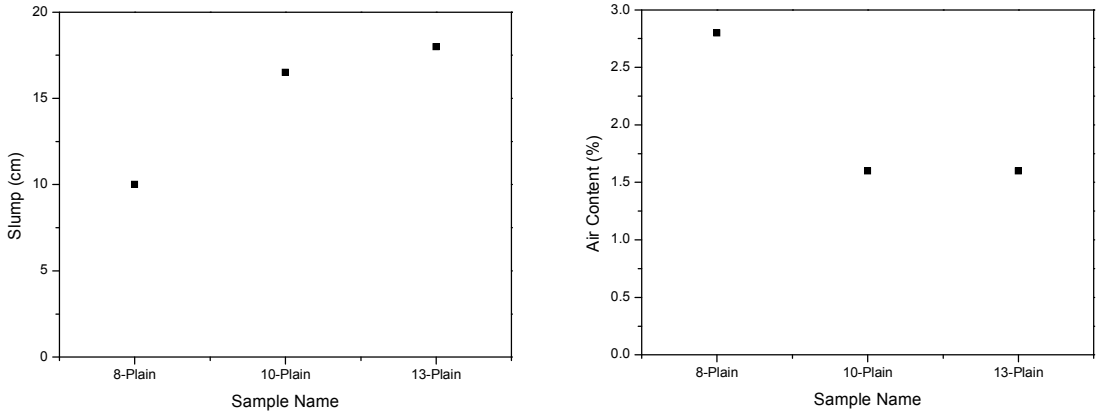
다. 실험 결과

(1) 골재 최대 치수에 의한 영향

그림 3.4.3은 굳지 않은 콘크리트의 물리적 성상을 나타낸 것이다. 굵은 골재의 크기가 커질수록 슬럼프가 증가하는 경향을 보이고 있고 콘크리트의 컨시스턴시(반죽질기) 측면에서는 동일 단위수량 및 단위시멘트량의 경우 골재의 크기가 작을수록 불리해짐을 알 수 있었다. 반면, 연행공기는 굵은 골재의 크기가 커질수록 감소하는 경향성을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 결과적으로 골재 크기가 커질수록 공기연행제의 함량이 증가되어야 하고, 반대로 골재 최대 크기가 작아질수록 유동화제(감수제)의 첨가량이 높아져야 할 것으로 판단된다.

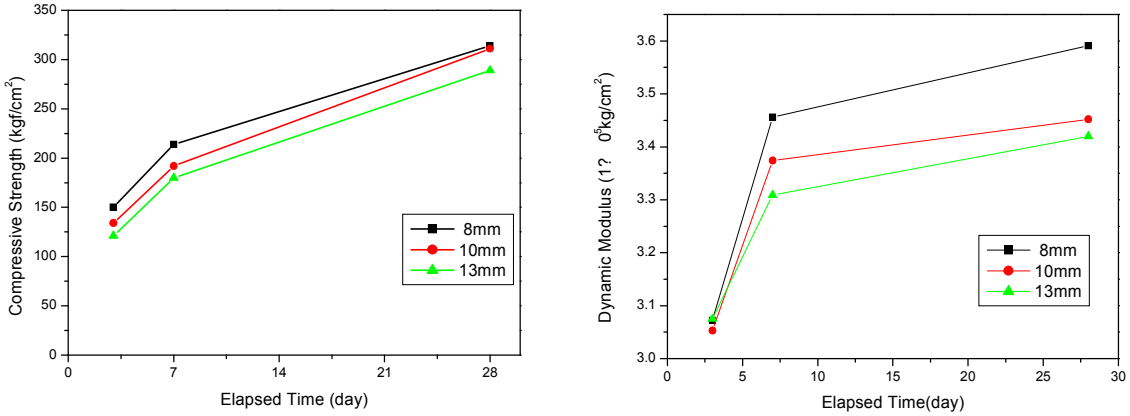
그림 3.4.4는 경화 콘크리트의 압축강도 및 동탄성계수를 나타낸 것이다. 굵은 골재의 크기와 압축 강도의 상관관계를 살펴보면 굵은 골재의 크기가 커질수록 압축강도가 감소하는 경향성을 나타내었다. 굵은 골재의 크기와 동탄성 계수와의 관계는 재령 3일에서는 약간 불규칙적인 경향성을 보였고, 재령 7, 28일에서는 골재의

크기가 커질수록 동탄성 계수가 감소하는 경향성을 나타내 내구성적인 측면에서는 불리한 영향을 보일 것으로 판단된다.



(a) 슬럼프 변화 (b) 공기량 변화

그림 3.4.3 골재 크기에 따른 슬럼프와 공기량의 변화



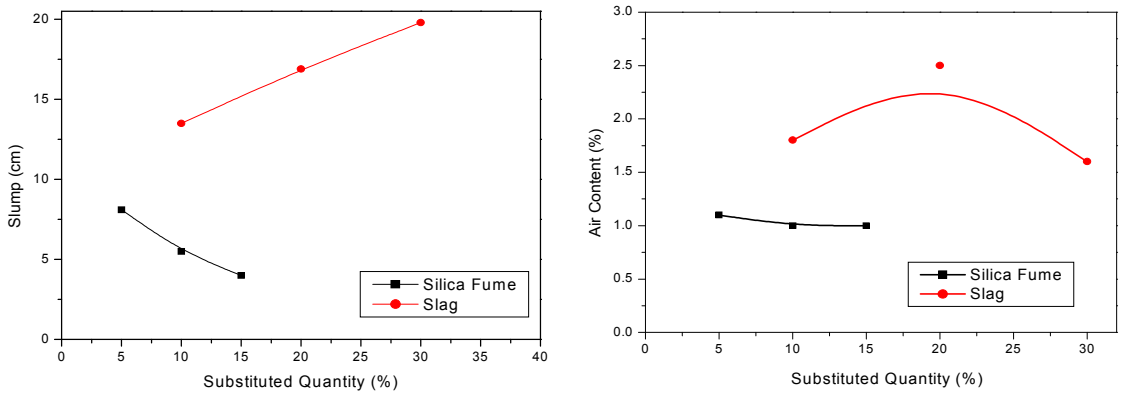
(a) 압축강도 (b) 동탄성계수

그림 3.4.4 골재 크기에 따른 압축강도와 동탄성계수 변화

결과적으로 굵은 골재 최대치수가 작아질수록 초기의 굳지 않은 콘크리트에서는 유동성 측면에서 점성이 증가하여 좋지 않은 결과를 보였으나, 골재 입자의 충전 효과로 인해 연행 공기량은 높게 나타났다. 또한, 경화된 콘크리트에서는 골재 치수가 작을수록 강도 증진 및 동탄성계수 증가가 나타났으며 내구성적인 측면에서 우수할 것으로 판단된다. 따라서 이후 혼화재 적용 시험에서는 굵은 골재 최대 치수를 8㎜로 결정하여 실험을 수행하고자 한다.

(2) 혼화재의 종류 및 치환량에 의한 영향

그림 3.4.5는 혼화재의 종류 및 치환량에 따른 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프와 공기량의 시험 결과를 나타낸 것이다. 고로 슬래그의 경우 치환량 증가에 따라 수화반응이 지연되고 슬래그의 유리질 표면에 의한 윤활 작용으로 슬럼프 수치는 증가하는 경향을 보였다. 반면, 실리카 흄을 적용한 경우에는 콘크리트의 점성 증가로 인해 유동성이 크게 상실되는 경향을 보였다. 공기량은 혼화제의 종류 및 치환량에 따라 크게 상관성은 보이지 않았으나, 일반적으로 실리카 흄 혼입에 따른 슬럼프 감소에 의해 공기량 저하가 두드러졌다.



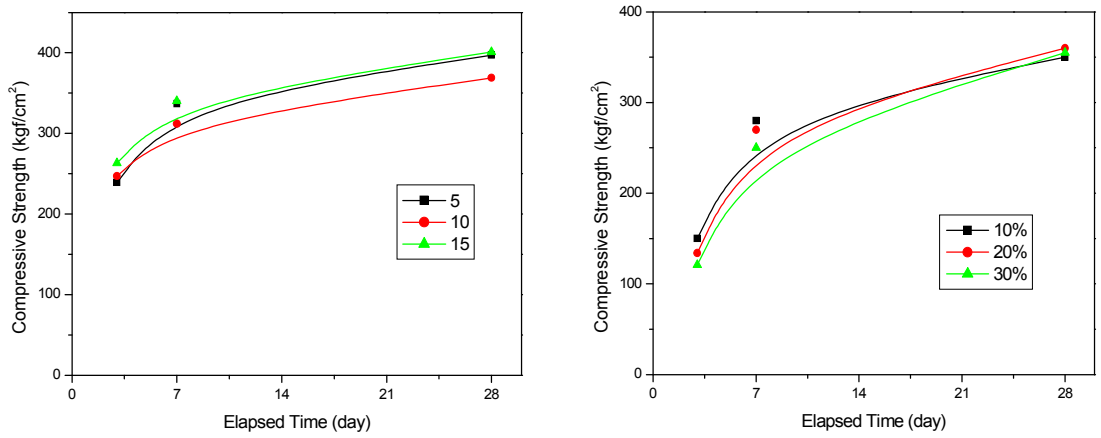
(a) 슬럼프 (b) 공기량

그림 3.4.5 혼화재의 종류 및 치환량에 따른 슬럼프와 공기량의 변화

혼화재의 종류 및 치환량에 따른 굳은 콘크리트의 특성을 압축강도와 동탄성계수 값을 측정하여 평가하였다. 그림 3.4.6과 3.4.7은 혼화재의 종류와 치환량에 따른 압축강도와 동탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 압축강도 및 동탄성계수 측정 결과 실리카 흄을 혼입한 경우에는 측정값이 Plain과 대비하여 크게 증가되는 경향을 나타내었는데, 실리카 흄의 미세한 입자에 의한 미세 충전 효과와 높은 비표면적에 의한 것으로 판단된다. 고로슬래그를 혼입한 경우에는 실리카 흄의 경우보다는 압축강도 및 동탄성계수가 크게 증가되지는 않았으나, 동일 슬럼프를 기준으로 할 때 단위 수량이 대폭 감소될 수 있는 경향이 크기 때문에 실리카 흄에 필적할만한 강도와 내구 특성을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

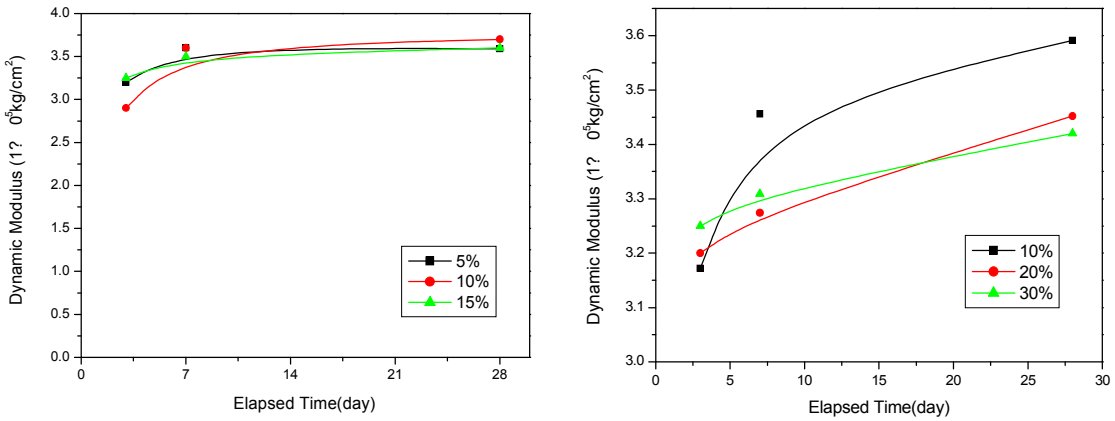
즉, 실리카 흄을 사용할 경우보다 고로슬래그를 숏크리트 및 콘크리트 배합에 적용할 경우에 단위 수량이 감소되고 슬럼프 증가에 의해 강도증진 및 내구성 개선 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 경제성 측면에서도 고로슬래그의 가격이 실

리카 흄 가격의 약 5% 수준으로 더 저렴하기 때문에 고성능 숏크리트나 고성능 콘크리트의 혼화재로 사용하는 것이 보다 유리하다고 판단된다.



(a) 실리카 흄 (b) 고로슬래그

그림 3.4.6 혼화재 치환량에 따른 재령별 압축강도 변화



(a) 실리카 흄 (b) 고로슬래그

그림 3.4.7 혼화재 치환량에 따른 재령별 동탄성계수 변화

(3) 급결제에 의한 영향

본 연구에서 사용된 3종의 숏크리트 액상 급결제의 기초 물성은 표 3.4.13과 같고, 길모어침에 의한 페이스트의 응결 시간 시험 결과는 표 3.4.14와 같다.

알루미네이트 액상급결제와 알카리 프리 액상급결제의 가장 큰 차이는 pH 값으로서 알루미네이트계가 11이 넘는 높은 pH 값을 나타내는 것과 대조적으로 알카리 프리 액상급결제는 pH가 2와 3사이의 측정값을 나타냈다. 두 급결제 사이에 pH 값

이 큰 차이를 보이는 것은 각각의 주 원료인 수산화칼슘과 황산알루미늄이 용해되면 각각 알카리와 산성의 수소이온농도를 나타내기 때문이다.

표 3.4.13 급결제의 기초 물성 평가

Type	Color	Viscosity (cPs)	Specific gravity	pH
alkali aluminate	Transparent light yellow	120	1.4±0.1	11.2
alkali-free (AF1)	opaque brown	450	1.4±0.1	2.4
alkali-free (AF2)	translucency colorlessness	60	1.4±0.1	2.8

표 3.4.14 길모어침에 의한 페이스트의 응결 시간

Type	Setting time (min. : sec.)	
	initial set	final set
alkali aluminate	3:20	6:30
alkali-free (AF1)	4:10	8:30
alkali-free (AF2)	2:40	6:10

점도 및 색상에 있어서는 황산알루미늄을 주원료로 하는 AF1은 불투명한 색상과 함께 다른 제품과 비교하여 매우 높은 점도를 나타냈다. 이와 같은 원인은 급결성을 부여하기 위하여 과량의 황산알루미늄을 과포화상태로 만들었기 때문에 완전 액상(absolute solution)이 아닌 현탁(suspension) 상태를 유지하기 때문인 것으로 판단된다.

길모아침을 사용한 응결시간 측정 결과에서는 AF2가 기존의 알루미네이트계 액상급결제보다 초결 및 종결이 다소 빠른 경향성을 보였다. AF2 첨가로 인한 빠른 응결 특성은 급결제 중에 존재하는 알루미늄 성분과 풍부한 황산염이 $3CaO \cdot Al_2O_3$(C_3A)와 반응하여 다량의 에트링자이트 침상 결정을 반응 초기에 생성했기 때문인 것으로 판단된다. 동일한 알카리 프리 급결제 임에도 불구하고 AF1의 응결시간이 보다 지연된 원인은 급결원으로 사용된 혼합물들이 용매에 완전 용해되지 않은 채 현탁 상태로 존재하기 때문에 C_3A와 용액 이온 반응 속도가 상대적으로 느리고, 높은 점도로 인하여 급결제와 시멘트와의 혼합 능력이 감소되었기 때문인 것으로 판단된다.

일반적으로 알루미네이트 및 실리케이트 등의 알칼리계 급결제를 사용한 시편의 장기강도는 급결제를 사용하지 않은 동일한 배합의 시편보다 최종 강도가 20~25% 정도 감소되는 것으로 알려져 있다. 그림 3.4.8은 급결제의 종류에 따른 재령별 압축강도 변화를 나타낸 것인데, 알루미네이트계 급결제를 사용한 시편의 최종 압축강도는 급결제를 사용하지 않은 Plain 또는 알카리 프리계 급결제를 사용한 시편에 비해 약 20~30% 정도 낮은 압축강도를 나타냈다.

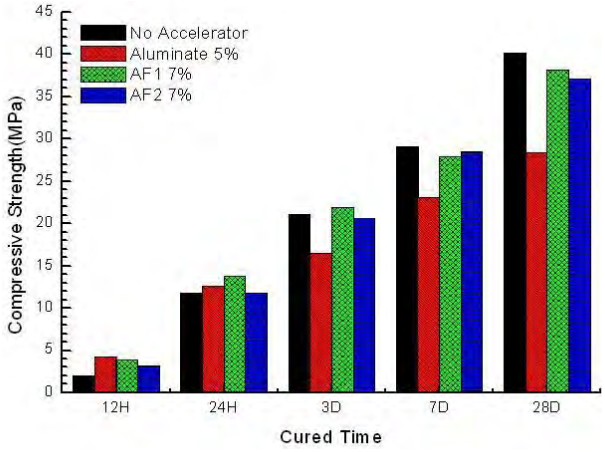


그림 3.4.8 급결제 종류에 따른 재령별 압축강도 변화

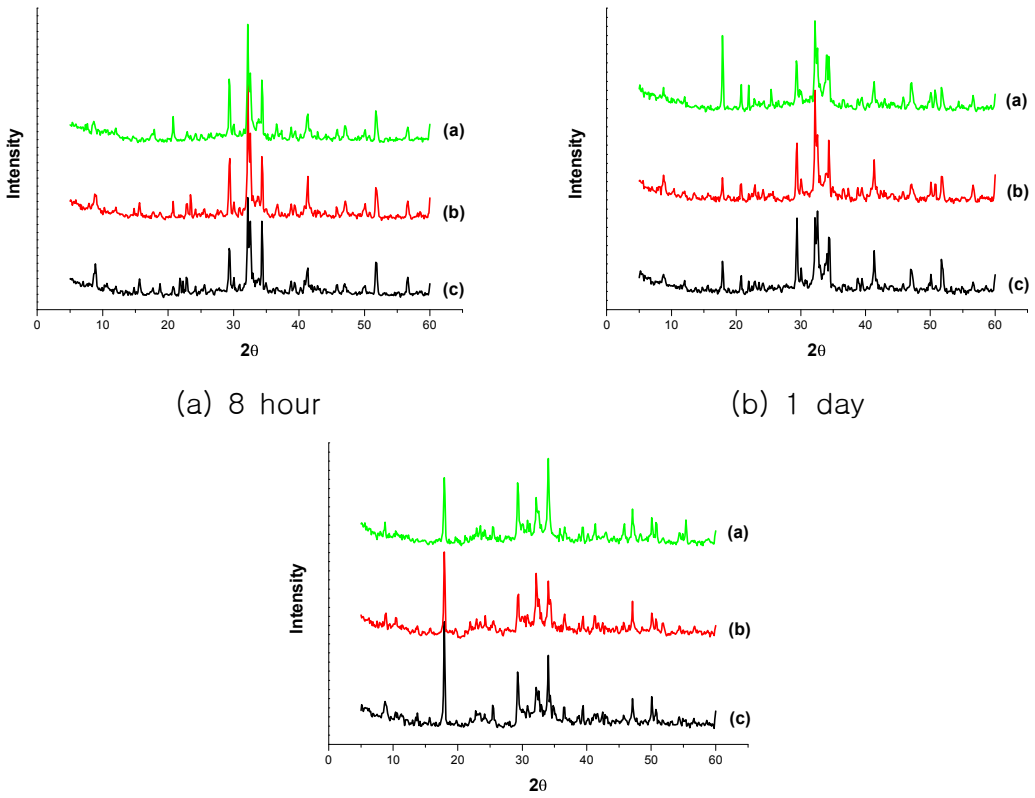
알루미네이트계 급결제를 첨가할 경우 압축강도 저하 현상은 높은 알칼리 함량으로 인해 골재에 함유되어 있는 반응성 실리카와 알칼리-골재 반응을 일으켜 시멘트계가 열화되어 발생된 것으로 판단된다. 또, 알루미네이트계 급결제가 석고와의 반응으로 시멘트 주위에 에트링자이트 생성을 막고 C_3A와 급결 반응함으로써 시멘트 수화물의 충진성에 영향을 미치게 되고, 과량의 수산화칼슘 생성으로 강도 발현에 주로 기여하는 수화 반응 생성물인 C-S-H 겔의 성장에 악영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.

알칼리 프리 급결제의 경우에는 반응 초기에 황산염의 지속적인 공급이 이루어지고 반응 1~2분 단계에서 가소(plasticity) 상태를 유지하기 때문에, 충분한 작업 시간의 제공으로 밀실한 충진이 가능하고 정상적인 C-S-H 겔의 성장으로 Plain과 동일한 중·장기 압축강도를 나타낸 것으로 판단된다.

그림 3.4.9는 페이스트 경화체의 X-ray 회절분석결과를 나타낸 것이다. 두 종류의 알칼리 프리계 급결제는 수산화칼슘 피크 및 에트링자이트 피크의 강도 측면에서는 다소 차이를 보이고 있으나, 전체적으로는 매우 유사한 수화 진행 형태를 나타냈다. 알루미네이트계와 알칼리 프리계 급결제를 사용한 시편사이의 가장 큰 차이점은 8

시간 시편과 1일 시편의 결과 중 수산화칼슘에 해당하는 약 18°, 34° 피크(2Θ deg.)에 있다. 알칼리 프리계 적용 시편의 경우 1일 경과 후에도 수산화칼슘 판상 결정 피크가 발달해 있지 않다. 따라서 alite와 belite의 수화가 다소 지연된 것으로 판단된다. 그러나 에트링자이트 피크(2Θ deg. = 9°)는 매우 발달되어 있는 형태를 나타내고 있다. 이와 비교해 알루미네이트계 급결제를 사용한 1일 시편에서는 수산화칼슘의 피크가 상대적으로 크게 성장해 있고 에트링자이트 피크도 존재하고 있다.

7일 경과된 알카리프리계 적용 시편에서도 역시 수산화칼슘 피크가 뚜렷하게 관찰된다. 특히 수산화칼슘의 피크 중 약 18° 피크(2Θ)는 AF1과 AF2가 오히려 높게 나타나고 있으나, 34° 피크는 알루미네이트계 적용 시편의 강도가 더 크게 나타났다. 이것으로 (001)면의 $Ca(OH)_2$ 결정이 알루미네이트 급결제가 첨가될 경우, 알칼리 프리 급결제 첨가에 비해 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서 주로 강도에 기여하는 C-S-H 겔과 교착하여 생성되는 $Ca(OH)_2$ 결정 성장이 상이한 것으로부터 C-S-H 겔 성장에도 영향을 미친 것으로 판단된다.



(a) 8 hour (b) 1 day

(c) 7 day

그림 3.4.9 X-ray 회절분석결과[(a)alkali aluminate, (b)AF1, (c)AF2]

3. 현장배합용 숏크리트 골재의 품질관리 실태 파악

국내 터널 현장에서 실제적 숏크리트용으로 사용되고 있는 골재의 품질 파악을 위해 일정 규모와 생산량을 갖춘 15개소의 터널 현장 골재를 1차와 2차로 나누어 채취하였고, 이에 대한 품질 특성을 분석하였다. 1차적으로 7개 현장에 대한 분석을 실시하였고, 2차 조사 및 분석은 8개 현장에 대해 실시하였다.

숏크리트용 잔골재에 대해서는 표면과 내부의 표면수 차, 입도, 조립율, 밀도, 흡수율, 점토 덩어리, 0.08㎜ 통과분, 염화물 등에 대한 시험 분석이 실시되었고, 숏크리트용 굵은 골재에 대해서는 입도, 편장석 함유량, 미립 석분량, 조립율, 밀도흡수율, 점토 덩어리, 0.08㎜ 통과분 등에 대해 시험 분석이 실시되었다. 각각의 분석은 KS 골재 관련 규격에 의거하여 실시되었다.

숏크리트 골재 관련 품질규격인 KS F 2577 "숏크리트 골재" 에서는 아직까지 입도 이외의 다른 항목에 대해서는 규정이 마련되어 있지 않아, 일반적인 콘크리트용 골재의 세부 시험 방법에 준해 시험 분석이 실시되었다. 항목에 대한 규정 수치는 국외의 숏크리트 골재 관련 규정(일본 터널협회, 노르웨이 콘크리트 협회 등)에 근거하여 설정하였다.

가. 콘크리트용 잔골재 및 부순잔골재 비교검토

(1) 잔골재 및 부순잔골재의 표면수

표 3.4.15는 터널 현장에서 실제적으로 사용하고 있는 숏크리트용 골재의 발생지별 표면수를 분석할 결과이고, 그림 3.4.10은 발생지별 골재의 표층과 심층부의 함수율 차이를 나타낸 것이다.

잔골재는 표면수의 관리가 매우 중요한데 건식인 경우 표면수는 3~6% 정도가 적당하다. 표면수가 7%를 넘으면 뿜어 붙이기 전에 시멘트와 수화작용이 시작되며 특히, 분말형 급결제를 사용하는 경우에는 시멘트와 급결제가 반응을 시작하는 등 호스 폐쇄나 기타 사고의 원인이 되는 경우가 많다. 또한, 표면수가 적으면 분진발생이 심해지고 작업환경을 악화시키기 때문에, 잔골재의 표면수를 3~6% 정도의 범위로 유지시키고 변동을 작게 하기 위한 조치가 필요하다.

그러나 국내 터널 현장 7개소에서 입수된 잔골재 및 부순잔골재의 경우 표면수의 기준은 만족하고 있으나, 표면과 내부의 함수율 차이가 많게는 4% 이상 차이가 발생하였다. 그리고 표층부의 경우 약 30%, 내부에서는 약 50% 정도 요구되는 표면

수 요건을 만족시키지 못하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 터널 현장에서는 골재 관리시 직사광선 및 강우 등으로부터 골재를 보호할 수 있는 가설장소를 설치할 필요가 있으며, 표면수 측정시 표면과 내부 간의 편차를 가능한 줄일 수 있는 방안을 강구해야 할 것으로 판단된다.

표 3.4.15 발생지별 잔골재 및 부순골재의 표면수

발생지	표층부(%)	심층부(%)	함수율차이(%)	비고
A	4.14	7.66	3.52	잔골재
B	1.08	5.52	4.44	잔골재
C	5.90	8.06	2.16	잔골재
D	2.20	7.17	4.97	부순잔골재
E	3.03	3.06	0.03	부순잔골재
F	3.86	8.71	4.85	부순잔골재
G	3.58	5.38	1.8	잔골재

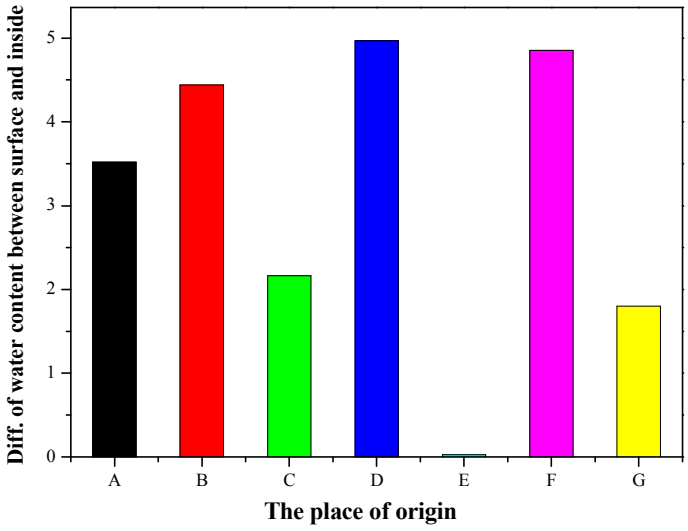


그림 3.4.10 발생지별 잔골재/부순골재의 표층과 심층부의 함수율 차이

(2) 잔골재 및 부순잔골재의 물리적 특성 및 입도 분포

표 3.4.16은 발생지별 골재의 물리적 특성을 나타낸 것이고, 그림 3.4.11은 발생지별 골재의 입도분포를 나타낸 것이다. 통상 권장되고 있는 잔골재의 조립률은 2.3~3.1 정도로 국내 발생 골재의 대부분은 이에 대한 규정을 만족하고 있고, 밀도 등 물리적 특성도 전반적으로 만족하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

ACI 506-66, ASTM C 33의 “콘크리트 골재의 규격”에 규정된 잔골재의 권장입도 분포는 균등질의 숏크리트를 타설하기 위해서는 공급되는 잔골재의 입도가 일정하여야 하기 때문에 생긴 규정으로, 그림 3.4.11의 굵은 실선 영역 밖의 두 현장의 골재(자연사)를 제외하고는 70% 이상의 잔골재가 표준 입도에 준하는 것으로 확인할 수 있었다.

표 3.4.16 발생지별 잔골재 및 부순골재의 물리적 특성

항목	A	B	C	D	E	F	G	기준치
조립률(%)	3.26	2.61	2.86	2.95	3.15	2.90	2.70	2.3 ~ 3.1
표건밀도(g/cm^3)	2.57	2.58	2.56	2.60	2.61	2.61	2.58	2.50이상
절건밀도(g/cm^3)	2.53	2.55	2.51	2.56	2.57	2.57	2.54	2.50이상
흡수율(%)	1.89	1.36	1.80	1.44	1.36	1.38	1.46	3.00이하
점토덩어리(%)	0.3	0.3	0.4	-	-	-	0.4	1.00이하
0.08mm체 통과량(%)	2.7	1.2	2.8	3.5	3.8	3.3	2.6	5.00이하
염화물(%)	0.001	0.001	0.001	-	-	-	0.001	0.04이하

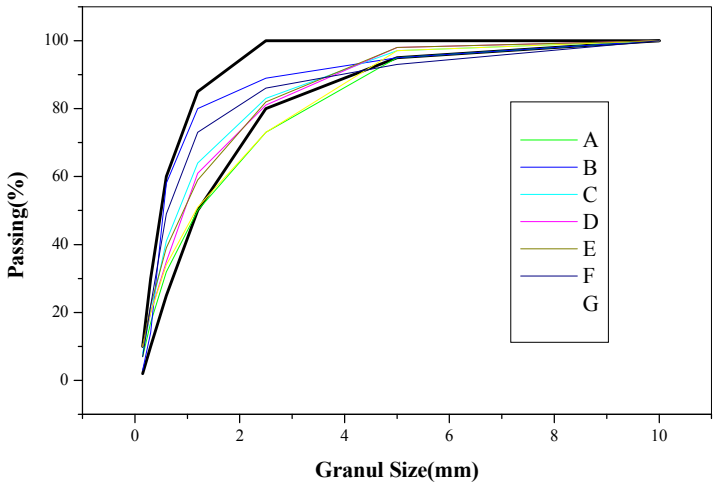


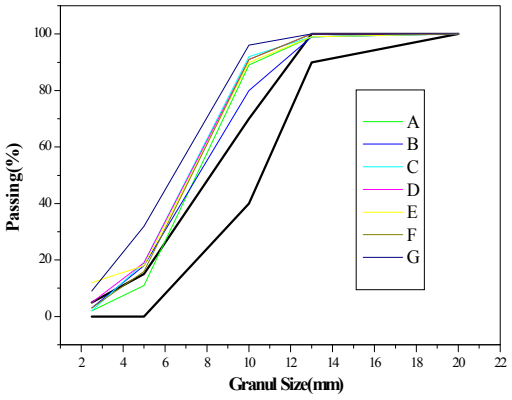
그림 3.4.11 발생지별 잔골재 및 부순골재의 입도 분포

나. 콘크리트용 굵은 골재 비교검토

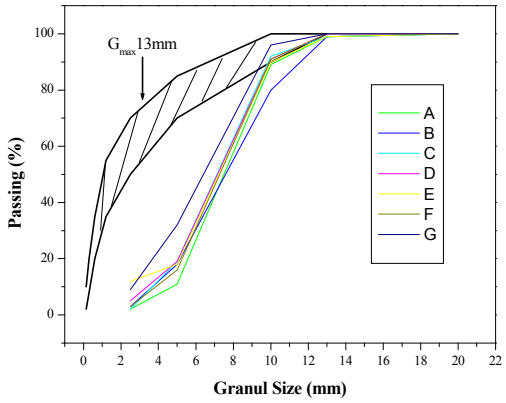
(1) 굵은 골재의 입도 분포

굵은 골재의 최대치수 커질수록 밀도의 증대, 건조수축의 감소, 부착력과 휨강도

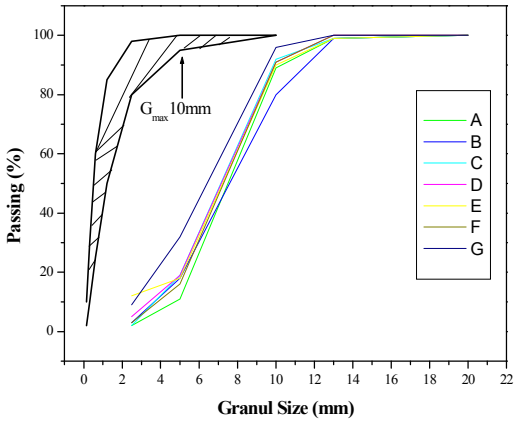
를 증대를 기대할 수 있지만, 호스 폐쇄, 리바운드 량의 증가로 인한 재료손실 과다 등의 문제점이 발생한다. 따라서 숏크리트용 굵은 골재의 국가별, 현장 시방 등에 따라 다소 차이는 있으나, 일반적으로 최대입경(Gmax)은 보통 15mm 이하로 제한되고 있다(최대 20㎜). 그러나 KS F 2577 "숏크리트용 재료" 중 포함되어 있는 국내 숏크리트용 굵은 골재의 최대 치수는 13㎜, 10㎜(향후 가능)이며, 이에 대해 규정하고 있기 때문에 국내 골재 대부분의 최대 치수는 13㎜에 적합한 수준으로 전환되어 있는 것이 실정이다.



(a) Gmax 20㎜(일본터널협회 등)



(b) Gmax 13㎜(KS F 2577)



(c) Gmax 10㎜(KS F 2577)

그림 3.4.12 발생지별 굵은 골재의 입도 분포

그림 3.4.12는 골재 채취 현장별 굵은 골재의 입도분포를 나타낸 것이다. (b), (c)에서 볼 수 있듯이 조사된 굵은 골재의 입도 분포는 KS 기준에 비해 크기가 큰 쪽으로 상당히 치우쳐 있는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 숏크리트용 골재(보통 최대 치수 13㎜)가 다른 콘크리트용 골재와 같이 별도로 관리되고 있는 것

이 아니라, 콘크리트용 골재를 부순 다음 생산되기 때문에 현실적으로 입도 조정이 시행되고 있지 않기 때문인 것으로 판단된다. 이런 여건은 숏크리트의 충진성 등 역학적 물성에 많은 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 현장 골재에 대한 입도 제어를 위한 별도의 방안으로 레디믹스트 형태의 숏크리트 배합이 진행되는 것이 타당한 것으로 판단된다.

숏크리트 품질에서 골재가 차지하는 비중은 매우 높고 숏크리트 배합설계에서도 골재에 대한 개선방안이 계속적으로 요구되고 있다. 그러나 숏크리트 골재 입도에 대한 지침이나 규정이 명문화되어 있지 않을 뿐만 아니라, 실제 현장에서도 이와 관련된 시험이나 관리를 소홀히 하고 있는 실정이다. 성능 및 목적에 맞는 콘크리트 및 숏크리트를 타설하기 위해서는 적합한 골재의 입도 조정과 골재 불순물의 세척관리가 필요하며, 향후 이에 대한 개선방안으로 레디믹스트 숏크리트는 골재로 인한 품질저하 및 품질변동을 확실하게 해소해 줄 것이라고 판단된다.

일부 유럽에서는 숏크리트 품질 개선을 위한 노력으로 굵은 골재 최대치수를 8㎜ 수준으로 제한함으로서, 숏크리트 리바운드 감소에 의한 경제성 및 내구성 개선 등 다양한 효과를 보고하고 있으며, 향후 국내에서도 굵은 골재 크기에 대한 개선 노력이 절실히 필요하다고 판단된다.

(2) 굵은 골재의 물리적 특성

표 3.4.17은 채취 현장별 굵은 골재의 물리적 특성을 나타낸 것이다. 국내에서 생산되는 숏크리트용 굵은 골재의 경우 밀도, 흡수율, 0.08㎜체 통과율, 및 점토 덩어리 등의 기준을 대부분 만족하고 있으나, 쇄석에 의한 편장석 함유량이 높고 미립석 분량이 기준치보다 상당히 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 문제로 인해 콘크리트 유동성을 포함하는 물성이 저하되고 결합재(주로 시멘트)와의 부착력이 약화되는 등 많은 문제를 발생시킬 수 있는 개연성에 노출되어 있는 것으로 판단된다.

일부 관리가 되고 있는 품질에서는 앞서 설명된 바와 같이 국내 골재가 큰 문제가 없어 보이지만, 골재 생산업체에서 출하되는 골재는 앞서 지적된 바와 같이 별도의 생산 관리 시스템이 마련되어 있지 않아 석분토 및 이물질의 완벽한 세척이 어렵고, 골재 입도 상태도 불완전한 상태로 이와 같은 현재의 골재 생산 및 공급 시스템이 현장타설 콘크리트나 숏크리트의 품질 저하 요인의 상당한 부분을 차지하고 있는 것으로 판단된다.

표 3.4.17 발생지별 굵은 골재의 물리적 특성

항목	A	B	C	D	E	F	G	기준치
조립률(%)	5.97	5.97	5.86	5.80	5.73	5.87	5.59	-
편장석함유량(%)	**13.0**	**12.7**	**11.1**	**11.7**	**15.5**	**13.8**	**18.2**	**-**
미립 석분량(%)	**3.1**	**2.8**	**0.7**	**0.5**	**2.5**	**3.1**	**2.2**	**1이하**
표건밀도(g/cm^3)	2.64	2.64	2.79	2.63	2.74	2.62	2.60	2.5이상
절건밀도(g/cm^3)	2.62	2.62	2.77	2.60	2.72	2.60	2.58	2.5이상
흡수율(%)	0.89	0.89	0.95	1.17	1.10	0.83	1.16	3이하
0.08mm체 통과량(%)	0.2	0.6	0.4	0.7	2.5	0.8	0.7	1.0이하
점토덩어리(%)	0.02	0.02	0.04	0.08	0.10	0.07	0.05	0.25이하



그림 3.4.13 시공현장의 골재 품질 상태



그림 3.4.14 세척 후 골재 석분 및 이물질 모습

4. 레디믹스트 숏크리트 재료의 품질 선진화를 위한 제안

숏크리트 품질기준에는 설계기준강도를 비롯하여 휨인성 기준, 휨인성 평가방법, 숏크리트 재료의 품질기준, 숏크리트 배합 및 품질관리기준, 시공규정 등 여러 가지가 있다.

국외의 경우에는 숏크리트 관련기술과 함께 품질기준 및 시험평가 방법 등이 지속적으로 발전되어 좀 더 합리적이고 과학적인 시공 및 품질 관리가 이루어지고 있고, 국가적인 차원에서도 품질의 규격화가 이루어져 있다. 반면, 국내의 경우에는 아직까지 국가적인 차원의 품질평가 기준이 없어 건설현장마다 재료, 배합, 시공, 장비 및 공법 선정 등의 선택에 일관성이 없고, 표준배합 뿐만 아니라 외국의 시방, 품질기준 및 기존 시공사례를 그대로 답습하고 있는 실정이다.

국내에서도 몇몇 기관에서 숏크리트의 재료 및 시공에 대한 시방규정을 가지고 있지만, 국외 품질기준을 그대로 도입하거나 국내 건설 현장과는 현실적으로 상이한 면이 많아 체계적으로 적용되지 못하고 있는 상황이다.

숏크리트를 포함해 콘크리트 배합 조건에서 가장 많은 부분을 차지하고 있고 물성에 가장 많은 영향을 미치는 골재(특히 굵은 골재)에 대한 규정 역시 입도 및 최대 크기 정도만 마련되어 있을 정도며, 아직까지 숏크리트의 품질 선진화를 위한 표준화/규격화 방안이 설정되어 있지 않은 것이 현실이다.

현장에서 사용되고 있는 골재의 품질은 앞 절에서 제시된 바와 같이 KS 규격에서 정해진 최대 입도 수준 정도만 만족하고 있고, 입도 분포 기준은 만족하지 못하며 골재의 물리적 품질 수준은 콘크리트용 골재 수준에 준해 사용되고 있는 실정이다. 따라서 숏크리트용 재료의 품질을 만족시키기 위한 방안으로는, 현장 배합이 아닌 레디믹스트(Ready-mixed) 형태로 사전 품질관리를 통해 적용하는 방법이 숏크리트 재료 품질의 선진화 및 개선을 위해 가장 타당한 방안으로 판단된다.

본 절에서는 레디믹스트 숏크리트의 품질 개선을 위한 숏크리트 재료의 규격화 방향에 대해 살펴보고자 한다.

가. 혼화재료

표 3.4.18과 표 3.4.19는 숏크리트 성능 향상을 위해 본 연구에서 사용된 고로슬래그 분말과 기존에 일반적으로 사용되고 있는 실리카 흄의 표준화를 위한 제안 권고사항을 나타낸 것이다.

표 3.4.18 숏크리트용 재료로서 고로슬래그 미분말에 대한 추천 방안

특성	추천사항	출처
포틀랜드 시멘트 치환 수준	≤ 30%	
비표면적	3,000 ~ 5,000 (고로슬래그 미분말 1종)	KS F 2563 「콘크리트용 고로슬래그 미분말」
강열감량(%)	< 3%	
SO_3 함유량(%)	≤ 4.0 (시멘트 내의 총 SO_3 + PFA)	

표 3.4.19 숏크리트용 실리카 흄에 대한 규격화 방안

특징/규정/추천 사용량(습식)	출 처
3~5% (터널지보)	노르웨이 콘크리트 협회 (1992)
4~8% (영구지보로서 PFA 시멘트와 사용할 경우)	노르웨이 콘크리트 협회 (1992)
6~10% (영구지보로서 포틀랜드 또는 SR시멘트와 사용할 경우)	노르웨이 콘크리트 협회 (1992)
8~13%	Morgan (1992)
사용량의 허용 한계 (습식): 3~15%	노르웨이 콘크리트 협회 (1992)
표면적: ≥1,800㎡/kg (densified)	SANCOT (1991)
표면적: ≥1,200㎡/kg (BET)	EFNARC (1992)
입자크기: 평균 0.2 micron	노르웨이 콘크리트 협회 (1992)
SiO_2 함유량: ≥85~90%	SANCOT (1991), EFNARC (1992)
탄소 함유량: ≤ 5%	SANCOT (1991)
총 알칼리: ≤ 1%	SANCOT (1991)
용해성 SO_3: ≤ 1%	오스트리아 콘크리트 학회 (1990)
연소손실: ≤ 4%	EFNARC (1992)
자유 CaO: ≤ 1.0%	EFNARC (1992)
수리 유효성 (hydraulic effectiveness): 100%	오스트리아 콘크리트 학회 (1990)
활동지수 (activity index): ≥95% (재령28일)	EFNARC (1992)

고로슬래그 분말의 경우 본 연구에서 10~50% 수준으로 시멘트를 치환해 시험을 진행하였으며, 고로슬래그를 사용하였을 경우 초기 수경반응 지연현상과 슬래그 유리질 표면의 전단 미끄럼 현상에 의한 유동성 개선 효과로 인해 단위 수량을 3~17% 수준으로 감소시킬 수 있었다. 그 결과 압축 강도를 Plain 대비 최대 70% 이

상을 증진시킬 수 있었다. 또한 고로슬래그의 잠재 수경반응에 의해 장기 내구성 역시 증진되는 것을 확인할 수 있었기 때문에 숏크리트 재료의 선진화를 위해서는 고로슬래그의 활용이 우선되어야 할 것으로 판단된다. 그러나 30%를 넘는 배합 조건에서는 초기응결 지연 및 경화불량이 발생될 수 있기 때문에 그 이하로 사용되는 것이 타당하다고 판단된다.

실리카 흄을 숏크리트에 적용하고자 하는 노력은 북유럽(특히 노르웨이, 오스트리아)에서 지속적으로 진행되어, 현재 숏크리트용 혼화재로서 성능 요건을 규격화된 상태이다. 국내에서는 2000년대에 들어서면서 적극적으로 적용되고 있는 실정으로 아직 국내 기준은 마련되어 있지 않고 대부분 국외의 관련 규격에 준해 적용하고 있으나, 향후 숏크리트 선진화를 위해서는 숏크리트용 혼합재(고로슬래그, 실리카 흄)에 대한 표준화 작업이 필요한 것으로 판단된다.

나. 시멘트 및 골재

표 3.4.20은 숏크리트에 사용되는 시멘트에 대한 각국의 규정을 나타낸 것이다. 일반적으로 국내에서는 1종 보통 포틀랜트 시멘트가 사용되고 있으나, 국외에서는 C_3A 함유량에 대한 규정을 마련하는 등 속경 시멘트를 숏크리트용 결합재로 사용하려는 추세이다. 그러나 아직까지 국내에서는 경제성으로 인해 숏크리트용으로 속경 시멘트에 대한 연구를 추진한 경우는 거의 미미하며, 최근 일부 숏크리트 재료 전문 기관에서 이에 대한 연구를 진행하고 있다. 그 결과 포틀랜트 시멘트보다는 초기 강도, 부착성 등이 우수한 결과를 제시하고 있으나, 아직 중·장기 내구 성능에 대한 결과가 검토되지 않고 있다. 일반적으로 속경 시멘트의 경우 장기 물성 및 내구성적 측면에서 다소 불리한 것이 단점으로 제기되고 있으나, 숏크리트는 일반 콘크리트와 다른 조건이기 때문에 이에 대한 충분한 검토가 선행되어야 할 것으로 판단된다. 골재를 제외하고 가장 많은 사용량을 갖는 시멘트에 대해 보다 적극적인 연구와 규격화 작업이 필요하다고 판단된다.

현재의 국내 현장 여건상 속경 시멘트를 사용하는 것은 경제성, 현장 관리 미숙, 수급이 원활치 못한 점 등 현실적으로 어려움이 많기 때문에, 이에 대한 국내 표준 작업 이후 숏크리트 품질 선진화 추세에 긍정적인 결과가 도출될 때(외국의 경우 일반적으로 사용되고 있음) 레디믹스트 형태의 숏크리트 배합으로 전환되는 것이 타당할 것으로 판단된다.

표 3.4.20 숏크리트에 사용되는 시멘트에 대한 규정

구 분	규 정	출 처
초결	1.5 ~ 4시간	오스트리아 콘크리트 학회(1990)
	1시간 이상	일본터널협회(1991)
분말도	3,500 ~ 4,500 ㎠/g	오스트리아 콘크리트 학회(1990)
	2,500 ㎠/g 이상	일본터널협회(1991)
블리딩 (bleeding)	20 ㎤ 이상	
C_3A 함유량	1) 용수에 포함된 $SO4^{2-}$ 함유량이 40mg/l 이상인 경우 C_3A 함유량은 3% 이하 2) SO_4^{2-} 함유량이 1000mg// 이상인 경우 C_3A 함유량은 가능한 작아야 함 (높은 황산염 저항성을 가진 시멘트)	
알칼리 함유량 ($Na_2O+0.65K_2O$)	0.6% 이하	일본터널협회(1991)
필요한 경우 시멘트 온도와 화학적 성분이 반응시간에 미치는 영향을 평가		오스트리아 콘크리트 학회(1990)
사일로에 채웠을 때 시멘트 온도는 70℃ 보다 낮아야 함		오스트리아 콘크리트 학회(1990)

표 3.4.21에서 3.4.23까지는 국·내외 숏크리트 품질기준에서 골재의 추천입도와 굵은 골재 및 잔골재에 대한 제반 규정들을 정리한 것이다. 국내 숏크리트용 골재의 추천 입도는 합성 입도 1, 2로 구분되며 각각 최대 골재 크기가 10, 13㎜로 설정되어 있고, 앞서 조사된 실제 터널 현장의 골재 입도보다는 상당히 크기가 작은 경향으로 조정되어 있는 것을 알 수 있다. 국외 숏크리트 굵은 골재에 대한 추천 입도에서는 최대 크기를 8㎜로 규정해 숏크리트 재료의 선진화를 추구하고 있다.

공장 생산 방식의 레디믹스트 형태로 전환될 때 골재 재료분리 현상을 방지하기 위해서는 골재 치수를 기존의 13, 10㎜보다는 작을 쪽으로 이동하는 것이 바람직하며, 국외의 경우를 비추어 최대 크기가 8㎜ 수준으로 규격화될 경우 숏크리트의 품질 역시 개선될 수 있기 때문에 충분한 사전 조사 및 분석과 실험이 진행되어야 할 것으로 판단된다.

표 3.4.21 국내의 골재에 대한 추천 입도(KS F 2566)

체의 크기	각 체를 통과하는 동과량(%)	
	합성 입도 1	합성 입도 2
13	-	100
10	100	90~100
5	95~100	70~85
2.5	80~98	50~70
1.2	50~85	35~55
0.6	25~60	20~35
0.3	10~30	8~20
0.15	2~10	2~10

표 3.4.22 국외의 골재에 대한 추천 입도

체(㎜)	중량비, 통과한 체의 크기 (㎜)				
	습 식		건 식	규정되어 있지 않은 경우(1)	
	8	16	16	8	16
32	100(2)	100(3)	100(3) 100(4)	100(5) 100(6)	100(5) 100(6)
16	100	85 ~ 100	80 ~ 100 85 ~ 97	100 100	100 100
8	90 ~ 100	70 ~ 100	56 ~ 100 66 ~ 81	100 100	60 ~ 88 71 ~ 88
4	73 ~ 100	58 ~ 99	40 ~ 100 46 ~ 66	61 ~ 85 68 ~ 80	36 ~ 74 51 ~ 69
2	55 ~ 90	42 ~ 78	28 ~ 58 20 ~ 50	36 ~ 71 48 ~ 63	21 ~ 62 38 ~ 52
1	37 ~ 72	30 ~ 56	18 ~ 32 18 ~ 30	21 ~ 57 32 ~ 48	12 ~ 49 28 ~ 40
0.5	22 ~ 50	19 ~ 38	10 ~ 20 8 ~ 20	14 ~ 39 20 ~ 30	8 ~ 34 18 ~ 30
0.25	11 ~ 26	10 ~ 25	4 ~ 11 7 ~ 18	5 ~ 21 10 ~ 16	3 ~ 18 10 ~ 19
0.125	4 ~ 12 4 ~ 6(7)	8 ~ 15	3 ~ 10 3 ~ 10	3 ~ 9 5 ~ 10	1 ~ 9 7 ~ 10

(1) 대부분 건식 숏크리트의 경우 (2) 노르웨이 콘크리트 협회(1992)

(3) 스웨덴 콘크리트 핸드북(Swedish concrete handbook)

(4) 미국콘크리트협회 (5) DIN-1045 (6) AFTES(1992)

(7) 일본터널협회(1991)

표 3.4.23 콘크리트용 굵은 골재와 모래에 대한 규정

굵은 골재	규정	출처
최대골재크기 (건식)	16㎜, 일반적으로 10㎜ (20㎜ 가능)	일본터널협회(1991) Sprayed concrete Association(1990)
최대골재크기 (습식)	8㎜ 16㎜	일본터널협회(1991) Sprayed concrete Association(1990)
어떠한 단일 fraction도 전체 골재의 30%를 어서는 안됨		노르웨이 콘크리트협회 (1992)
비중	≥ 2.5 kg/d㎥	일본터널협회(1991)
흡수율	≥ 3.0 %	일본터널협회(1991)
세척손실	≥ 1.0 %	일본터널협회(1991)
점토	≥ 0.25 %	일본터널협회(1991)
모래	규정	출처
미세도 계수 (Fineness Modulus)	2.8~3.2	일본터널협회(1991)
표면수	4~6% 2~4% 추선, 최대 7%	일본터널협회(1991) AFTES (1992)
비중	≥ 2.5 kg/d㎥	일본터널협회(1991)
흡수율	≥ 3.0 %	일본터널협회(1991)
세척손실	≥ 5.0 %	일본터널협회(1991)

5. 소결론

본 절에서는 국내 숏크리트 골재 생산 시스템에 대해 조사하였고, 숏크리트 재료의 성능 실험과 현장 배합용 숏크리트 골재의 품질관리 실태 파악을 통해 레디믹스트 숏크리트 재료의 품질 선진화를 위한 방안을 모색하였다. 본 절에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 현장에서 적용되고 있는 숏크리트용 골재의 최대치수는 13mm를 포함한 이상의 것을 사용하는 경우가 80%가 넘는 것으로 조사되어, 시공성 및 경제성 저하와 함께 숏크리트 품질 저하를 유발하는 것으로 나타났다. 따라서 골재최대치수에 대한 개선이 필요할 것으로 판단된다.

(2) 국내 숏크리트 배합설계의 개선을 위해서는 골재최대치수를 가능한 한 범위 내로 낮추어 골재 입도 개선을 통한 숏크리트 품질 향상을 모색하고, 강섬유 혼입량 품질기준을 80~90%로 개선하고 합리적인 혼입량 결정을 통해 숏크리트의 시공성, 휨 인성 및 에너지 흡수 능력을 향상시켜야 한다.

(3) 굳지 않은 콘크리트의 물리 특성을 분석할 결과 굵은 골재 크기가 커질수록 슬럼프가 증가하는 경향을 보였고, 동일 단위수량 및 단위 시멘트량의 경우 골재의 크기가 작을수록 컨시스턴시는 불리해짐을 알 수 있었다. 그러나 연행공기는 굵은 골재의 크기가 커질수록 감소하는 경향을 나타내어 골재 크기가 커질수록 공기연행제의 함량이 증가되어야 하고, 골재 크기가 작아질수록 유동화제의 첨가량이 증가되어야 할 것으로 판단된다.

(4) 경화된 콘크리트의 압축강도 및 동탄성계수를 분석한 결과 굵은 골재의 크기가 커질수록 압축강도가 감소하는 경향을 보였고, 재령 7, 28일에서 골재 크기가 커질수록 동탄성 계수가 감소하는 경향을 보여 내구성적인 측면에서는 불리한 결과를 나타내었다.

(5) 굵은 골재 최대치수가 작아질수록 굳지 않은 콘크리트에서는 유동성 측면에서 점성이 증가하여 좋지 않은 결과를 보였으나, 골재 입자의 충전 효과로 인해 연행 공기량은 높게 나타났다. 또한, 경화된 콘크리트에서는 골재 치수가 작을수록 강도 증진 및 동탄성계수 증가가 나타났으며 내구성적인 측면에서 우수할 것으로 판

단된다.

(6) 혼화재 종류 및 치환량에 따른 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프를 분석한 결과 고로슬래그의 경우 치환량 증가에 따라 수화 반응이 지연되고 슬래그의 유리질 표면에 의한 윤활 작용으로 슬럼프 수치는 증가하는 경향을 보였다. 반면, 실리카 흄을 적용한 경우에는 콘크리트의 점성 증가로 인해 유동성이 크게 상실되는 경향을 보였다.

(7) 혼화재 종류 및 치환량에 따른 굳은 콘크리트의 압축강도와 동탄성계수를 분석한 결과 실리카 흄을 혼입한 경우에는 측정값이 Plain과 대비하여 크게 증가되는 경향을 나타내었는데, 실리카 흄의 미세한 입자에 의한 미세 충전 효과와 높은 비표면적에 의한 것으로 판단되었다. 고로슬래그를 혼입한 경우에는 실리카 흄의 경우보다는 압축강도 및 동탄성계수가 크게 증가되지는 않았으나, 동일 슬럼프를 기준으로 할 때 단위 수량이 대폭 감소될 수 있는 경향이 크기 때문에 실리카 흄에 필적할만한 강도와 내구 특성을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

(8) 실리카 흄을 사용할 경우보다 고로슬래그를 숏크리트 및 콘크리트 배합에 적용할 경우에 단위 수량이 감소되고 슬럼프 증가에 의해 강도증진 및 내구성 개선 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대되고, 경제성 측면에서도 고로슬래그의 가격이 실리카 흄 가격의 약 5% 수준으로 더 저렴하기 때문에 고성능 숏크리트나 고성능 콘크리트의 혼화재로 사용하는 것이 보다 유리하다고 판단된다.

(9) 급결제의 종류에 따른 재령별 압축강도 변화 살펴본 결과 알루미네이트계 급결제를 사용한 시편의 최종 압축강도는 급결제를 사용하지 않은 Plain 또는 알카리프리계 급결제를 사용한 시편에 비해 약 20~30% 정도 낮은 압축강도를 나타내었다.

(10) 국내 터널 현장에서 실제 사용되고 있는 숏크리트용 골재의 표면수와 표층 및 심층부의 함수율 차이를 비교한 결과, 표면수는 기준에 만족하고 있으나 표면과 내부의 함수율 차이가 많게는 4% 이상 차이가 발생하였다. 그리고 표층부의 경우 약 30%, 내부에서는 약 50% 정도로 요구되는 표면수 요건을 만족시키지 못하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 터널 현장에서는 골재 관리시 직사광선 및 강우 등으로부터 골재를 보호할 수 있는 가설장소를 설치할 필요가 있으며, 표면수 측정시

표면과 내부 간의 편차를 가능한 줄일 수 있는 방안을 강구해야 할 것으로 판단된다.

(11) 골재 채취 현장별 굵은 골재의 입도분포를 살펴본 결과 조사된 굵은 골재의 입도 분포는 KS 기준에 비해 크기가 큰 쪽으로 상당히 치우쳐 있는 것으로 나타났는데, 이와 같은 결과는 숏크리트용 골재가 다른 콘크리트용 골재와 같이 별도로 관리되고 있는 것이 아니라, 콘크리트용 골재를 부순 다음 생산되기 때문에 현실적으로 입도 조정이 시행되고 있지 않기 때문인 것으로 판단된다.

(12) 국내에서 생산되는 숏크리트용 굵은 골재의 경우 밀도, 흡수율, 0.08㎜체 통과율, 및 점토 덩어리 등의 기준을 대부분 만족하고 있으나, 쇄석에 의한 편장석 함유량이 높고 미립석 분량이 기준치보다 상당히 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 문제로 인해 콘크리트 유동성을 포함하는 물성이 저하되고 결합재(주로 시멘트)와의 부착력이 약화되는 등 많은 문제를 발생시킬 수 있는 개연성에 노출되어 있는 것으로 나타났다.

(13) 골재 생산업체에서 출하되는 골재는 별도의 생산 관리 시스템이 마련되어 있지 않아 석분토 및 이물질의 완벽한 세척이 어렵고, 골재 입도도 불완전한 상태로 이와 같은 현재의 골재 생산 및 공급 시스템이 현장타설 콘크리트나 숏크리트의 품질 저하 요인의 상당한 부분을 차지하고 있는 것으로 판단된다.

(14) 본 연구에서는 고로슬래그 분말을 10~50% 수준으로 시멘트를 치환해 시험을 진행하였으며, 고로슬래그를 사용하였을 경우 초기 수경반응 지연현상과 슬래그 유리질 표면의 전단 미끄럼 현상에 의한 유동성 개선 효과로 인해 단위 수량을 3~17% 수준으로 감소시킬 수 있었고, 압축 강도를 Plain 대비 최대 70% 이상을 증진시킬 수 있었다. 또한 고로슬래그의 잠재 수경반응에 의해 장기 내구성 역시 증진되는 것을 확인할 수 있었기 때문에 숏크리트 재료로서 고로슬래그의 활용이 충분히 가능함을 알 수 있었다. 그러나 30%를 넘는 배합 조건에서는 초기응결 지연 및 경화불량이 발생될 수 있기 때문에 그 이하로 사용되는 것이 타당하다고 판단된다.

제 5 절 레디믹스트 숏크리트 개발

분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트는 숏크리트 재료의 배합 및 제조를 건조 모르타르 전문 제조업체에서 사전에 미리 실시하여, 골재의 철저한 토립분 관리, 확실한 입도관리, 전문배합 장치를 이용한 엄격한 품질관리 및 재료의 규격화 등을 거쳐 시공 품질을 극대화 시키고 현장에서의 시공성과 품질을 개선할 수 있게 제조되는 숏크리트 재료이다. 규격화된 재료를 사전에 공장에서 생산 및 배합하여 포장용으로 판매 가능한 분말형 레디믹스트 숏크리트는 공장형 배합의 최적 골재관리, 각기 다른 입도 및 비중을 갖는 재료들의 최적혼합 등을 꾀할 수 있으며, 현장 배치 플랜트에서의 계량 및 배합 과정을 간략화 및 생략할 수 있고 고품질 숏크리트 시공으로 터널 안정성을 확보할 수 있으며, 기존 레미탈 생산체계를 활용하여 경제성 있는 숏크리트 생산 및 시공 체계를 실용화할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 절에서는 분말형 레디믹스트 숏크리트의 최적화 된 배합을 도출하기 위한 연구를 수행하였다. 먼저 분말형 레디믹스트 숏크리트의 강도, 리바운드율, 유동성, 시공성능 등 숏크리트의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요인인 골재의 최대치수를 도출하기 위한 현장 타설실험을 수행하였다. 그리고 레디믹스트 숏크리트 굵은 골재 최대치수에 대한 국내 적용성을 파악하기 위하여 골재 협회 및 숏크리트 업체를 대상으로 설문조사를 실시하였다.

그리고 레디믹스트 숏크리트에서 가장 문제가 될 수 있는 재료분리를 최소화 할 수 있는 방안을 도출하기 위한 연구를 수행하였으며 강섬유를 대체 할 수 있는 합성섬유의 최적 혼입량을 구하기 위해 실내 및 현장실험을 실시하였다.

끝으로 본절에서는 실내 및 현장실험을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 3차에 걸친 현장타설 실험을 실시하여 분말형 레디믹스트 숏크리트의 최적화된 배합을 제안하기 위한 연구를 수행하였다.

1. 골재 최대치수 변화에 따른 숏크리트의 성능 평가

가. 현장실험 개요

(1) 숏크리트 배합

굵은골재 최대치수의 변화에 따라 숏크리트의 강도 특성을 비교하기 위해 3종류의 굵은골재에 대한 현장실험을 수행하였다.

숏크리트 품질 개선과 공장 배합 후 운반 중의 재료 분리 방지를 위해 본 연구에서 개발하고자 하는 분말형 레디믹스트 숏크리트의 굵은골재 최대치수는 8mm로 결정되었기 때문에, 본 현장 실험에서는 8, 10, 13mm의 굵은골재를 이용하여 배합을 결정하였다.

급결제는 알칼리 프리계만을 사용하였으며, 혼화재는 실리카 흄과 고로슬래그를 배합에 적용하였다. 표 3.5.1은 본 현장실험에서 고려한 실험요소에 대해 나타낸 것이다.

표 3.5.1 골재 최대치수 도출을 위한 현장실험의 실험 요소

구분	급결제	강섬유	굵은골재 최대치수	혼화재
인자	알칼리 프리계	보강	8, 10, 13mm	실리카 흄 8% 고로슬래그 30%
수준	1	1	3	2



그림 3.5.1 골재 최대치수 도출을 위한 현장타설 숏크리트의 모습

본 현장실험에서는 굵은골재 최대치수 차이에 따른 숏크리트의 성능을 최대한 효과적으로 비교하기 위해 굵은골재 최대치수만을 변화시키고 다른 배합조건은 동일하게 고정시켜 실험을 수행하였다. 즉, 일반시멘트 배합에 3종류의 골재치수를 적용시키고, 실리카 흄 8% 배합과 고로슬래그 30% 배합에 역시 3종류의 골재치수를 적용시켜 실험을 수행하였다. 표 3.5.2는 배합표를 나타낸 것이다.

표 3.5.2 골재 최대치수 도출을 위한 현장실험 배합표

구분[1]		W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	단위량 (kg/m^3)						
					Water	Cement	잔골재	굵은골재	급결제	강섬유	혼화재
1	8-OPC	45.7	8	67	210	460	1062	524	36.8 (알칼리 프리계 : 8%)	40(∅0.5×30mm)	-
2	10-OPC		10								
3	13-OPC		13								
4	8-SF8		8			423.2					36.8
5	10-SF8		10								
6	13-SF8		13								
7	8-BF30		8			322					138
8	10-BF30		10								
9	13-BF30		13								

주1) W/B : 물 바인더(시멘트+혼화재)비　　S/a : 잔골재율
Gmax : 골재최대치수　　OPC : 일반시멘트
SF8 : 실리카흄 치환율 8%　　BF30 : 고로슬래그 치환율 30%

(2) 숏크리트 타설용 몰드 제작

본 실험에서는 숏크리트 타설 실험을 통해 압축강도 측정용 공시체를 채취하기 위해 타설 몰드를 제작하였는데, 원통형 코어를 각 배합별로 채취하여 압축강도를 측정하기 위해 원통형 코어 채취용 몰드를 사용하였다. 각 배합별로 3개의 코어가 채취 가능하고 몰드 중간에 칸막이를 설치하여 코어 채취 시 다른 배합의 코어에 최대한 영향이 적게 미치도록 하였다. 또한 리바운드 실험과 슬럼프 실험은 각각 숏크리트 타설 시와 굳기전의 숏크리트를 사용하였으므로 특별히 몰드 제작은 실시하지 않았다.

나. 현장실험 결과

(1) 시험 항목

현장실험 결과 측정은 표 3.5.13의 시험항목에 따라 실시하였다. 압축강도는 28일 양생을 실시한 후 각 배합별로 Ø100×200mm 크기의 시편을 채취하여 측정하였고 골재최대치수에 따른 숏크리트의 리바운드율을 측정하였으며, 굳지 않은 숏크리트의 특성을 알아보기 위해 슬럼프실험을 실시하였다. 특히 압축강도 측정 시 숏크리트 현장실험에서 숏크리트가 타설된 몰드는 일반적으로 무게가 과다하여 운반이나 취급에 어려움이 많고, 대형 몰드를 운반하고 코어를 채취하는 과정에서 충격이 가해져 공시체에 균열이 발생되는 경우도 나타났다.

표 3.5.3 현장실험 시험항목

시험항목	관련 시험방법 규격
압축강도 측정 (1, 3, 7, 28일)	○ KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법 -시편크기 : Ø100×200mm ○ KS F 2412 콘크리트 코어의 길이 측정 시험방법
리바운드율 측정 (타설시)	○ 콘크리트 표준시방서의 숏크리트 리바운드율 측정방법(리바운드된 재료의 전 질량을 토출된 재료의 전 질량으로 나눈 값 사용.)
슬럼프 측정 (제작시)	○ KS F 2402 콘크리트 슬럼프 시험방법



그림 3.5.2 숏크리트 슬럼프 시험 모습



그림 3.5.3 압축강도 시험 모습

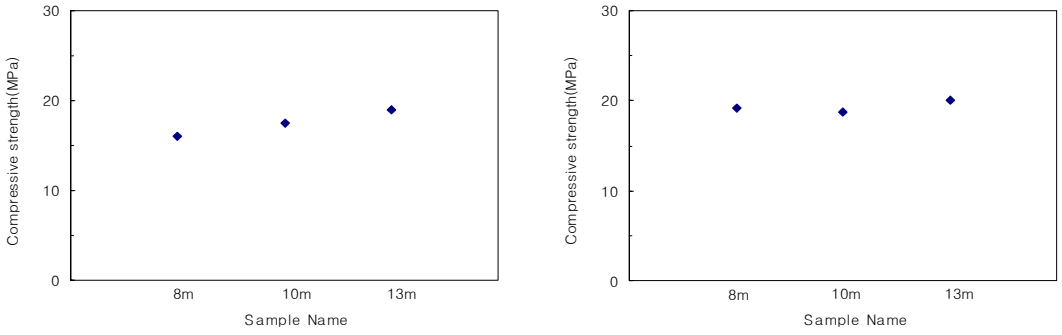
(2) 시험 결과

표 3.5.4는 골재최대치수 변화에 따른 압축강도, 슬럼프 및 리바운드율 실험의 결과를 나타낸 것이며, 각 실험의 결과를 종합해보면 고로슬래그로 치환한 8mm 골재의 현장적용성을 증명하는 계기가 되었으며, 골재최대치수를 8mm 사용 시 유동성 및 시공성능 뿐만 아니라 경제성에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

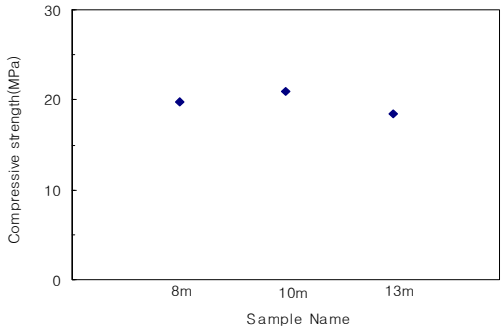
표 3.5.4 골재최대치수 변화에 따른 압축강도/슬럼프/리바운드율 결과

구 분 / 치환율	Gmax (mm)	압축강도 (MPa)	Slump (cm)	Time for shotting (min:sec)	Rebound	
					Amount (kg)	Ratio (%)
8mm-일반배합	8	16	9	2:40	23.4	10.3
10mm-일반배합	10	17.5	7	3:04	20.2	8.9
13mm-일반배합	13	19	6.8	3:24	39.7	17.6
8mm-실리카흄 8%	8	19.1	5.5	3:15	19.4	8.6
10mm-실리카흄 8%	10	18.8	6	2:45	24.1	10.6
13mm-실리카흄 8%	13	20.1	4.5	3:01	32.8	14.5
8mm-고로슬래그 30%	8	19.7	11	3:02	22.6	10
10mm-고로슬래그 30%	10	20.9	8.5	3:14	32.4	14.3
13mm-고로슬래그 30%	13	18.5	8.3	3:27	37.2	16.5

그림 3.5.4은 굵은 골재 크기 및 혼화재 종류에 따른 압축강도 변화를 나타낸 것으로서 일반배합은 13mm일때가 19MPa로 강도가 가장 크게 측정되었으며 8mm일때가 16MPa로 13mm에 비해 약 16%정도 강도가 낮게 측정되었다. 또한 실리카흄 배합(8%)의 배합은 8mm일때가 약 19MPa로 나타났고 13mm일때가 약 20MPa로 나타났으며 차이는 크지 않았다. 그리고 고로슬래그 배합(30%) 배합은 8mm와 10mm가 약 20MPa로 유사하게 나타났으며 13mm가 18.5MPa로 가장 낮게 측정되었다. 즉, 압축강도 시험결과 골재치수별 압축강도 차이는 8mm 골재에 의한 숏크리트의 강도차이가 10mm 나 13mm의 골재크기에서 압축강도와 크게 나타나지 않았으며 이는 골재치수보다는 급결제 및 타설조건에 영향을 더 받는 것으로 판단되었고 이로 인해 본 연구에서 8mm의 골재를 현장타설 시 적용할 수 있는 가능성을 가진다고 판단된다.



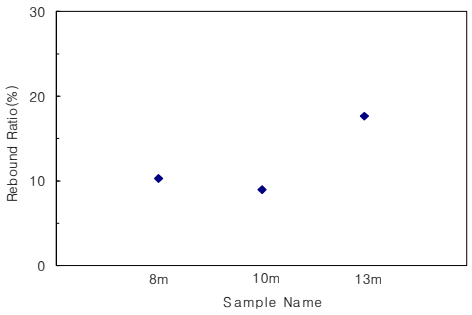
(a) 일반배합 (b) 실리카 흄 배합



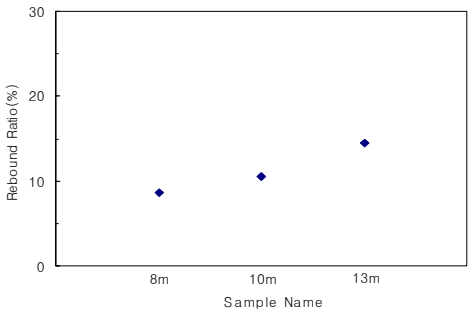
(c) 고로슬래그 배합

그림 3.5.4 굵은 골재 크기 및 혼화재 종류에 따른 압축강도 변화

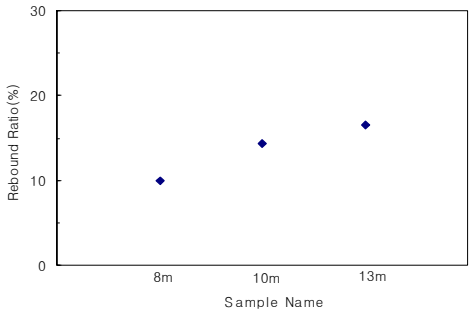
그림 3.5.5는 굵은 골재 크기 및 혼화재 종류에 따른 리바운드율 변화를 나타낸 것으로서 국내 숏크리트 공법에서 가장 문제가 되는 부분이 높은 리바운드량으로 나타났으며, 리바운드량에 가장 큰 영향을 미치는 영향인자가 골재의 최대치수 및 품질상태로 나타난 바 다음과 같은 실험을 수행하였다. 우선 일반배합에서는 약 8~18%로 나타났으며 8mm 일때 리바운드율은 약 10%정도로 13m와는 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 실리카흄 배합(8%)에서는 8mm 일때가 8.6%로 가장 우수하게 나타났으며 그 다음 10mm(10.6%)와 13mm(14.5%) 순으로 나타났다. 고로슬래그 배합(30%)에서는 8mm 일때가 10%로 가장 우수하게 나타났으며 10mm(14.3%), 13mm(16.5%)순으로 나타났다. 즉, 실험결과를 종합해보면 8mm의 골재를 사용하여 리바운드율을 측정하였을 때 리바운드에 대한 저감효과가 다른 골재치수에 비해 우수하게 나타났으며, 골재최대치수가 8mm이고 고로슬래그로 치환한 경우 실리카흄에 비해 다소 리바운드율이 낮게 나타났지만 차이가 크지 않아 숏크리트 배합에 적용할 수 있는 가능성을 가지고 있다고 판단된다.



(a) 일반배합



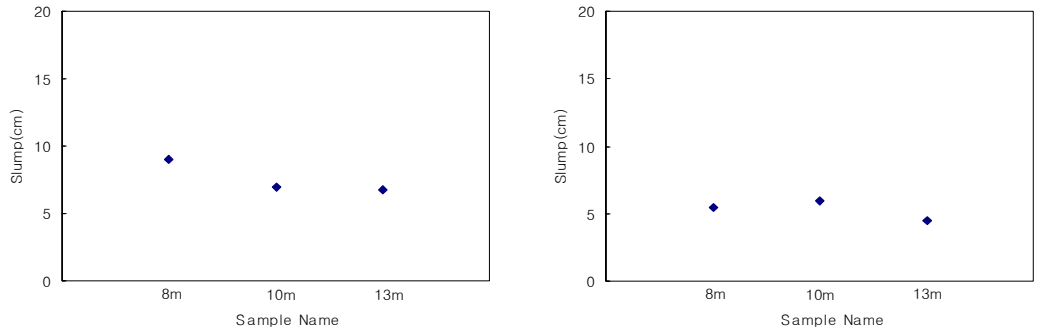
(b) 실리카 흄 배합



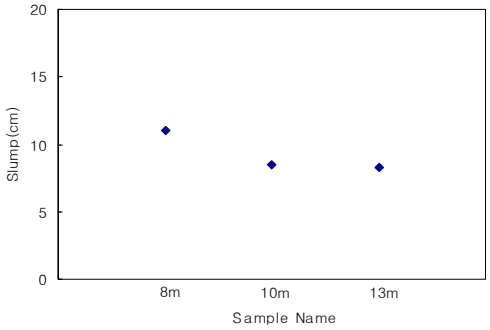
(c) 고로슬래그 배합

그림 3.5.5 굵은 골재 크기 및 혼화재 종류에 따른 리바운드율 변화

그림 3.5.6은 굵은 골재 크기 및 혼화재 종류에 따른 슬럼프 변화를 나타낸 것으로서 슬럼프 변화를 통해 굳지않은 숏크리트의 특성을 파악하였으며, 숏크리트의 작업성을 평가하는데 이용하였다. 우선, 일반배합에서는 8mm 일때 9cm, 10mm 일때 7cm, 13mm 일때 6.8cm 순으로 나타났으며, 실리카 흄 배합(8%)에서는 8mm 일때 5.5cm, 10mm 일때 6cm, 13mm 일때 4.5cm로 나타났다. 또한 고로슬래그 배합(30%)에서는 8mm 일때 11cm, 10mm 일때 8.5cm, 13mm 일때 8.3cm로 나타났다. 각 배합별로 슬럼프를 살펴보면 8mm 일때가 실리카 흄 배합을 제외하고는 가장 크게 나타나 유동성 및 작업성이 우수할 것으로 판단된다. 즉, 표 3.5.4의 결과에서 보여 지듯이 슬럼프 저하에 따른 작업성 저하를 8mm의 골재를 사용함으로서 경감시킬 수 있으며, 또한 고로슬래그의 윤활작용과 재료의 충전성 증가로 인해 숏크리트 타설시간을 줄일 수 있어 숏크리트 타설에 대한 시공성능과 경제성에 기여할 것으로 판단된다.



(a) 일반배합 (b) 실리카 흄 배합



(c) 고로슬래그 배합

그림 3.5.6 굵은 골재 크기 및 혼화재 종류에 따른 슬럼프 변화

2. 굵은골재 최대치수 적용에 대한 국내 의견 수렴

가. 현장설문조사 개요

본 연구에서는 현재 골재 생산 과정에서의 문제점을 파악하고 숏크리트용 골재 최대치수를 선진국에서 사용이 활발한 8mm수준으로 개선하는 문제에 관한 의견을 검토하기 위해 실무기술자들을 대상으로 현장설문조사를 실시하였다. 설문조사에서는 각 업체별 골재 생산과정 현황, 골재 품질관리 시험 및 크기별 단가, 숏크리트용 골재 납품 전례, Gmax = 8mm 숏크리트용 골재 생산에 대한 의견 등을 조사하였다.

현장설문 대상자는 도로, 철도, 터널 및 사면 등 각종 건설 현장으로 골재를 납품하고 있는 골재 생산업체에서 현재 골재 생산 공정에 종사하고 있거나 종사한 경험이 있는 실무자를 대상으로 하였으며, 대상자 선별은 현장 여건이 허용하는 범위에서 무작위로 선별하였고 설문응답자는 총 121명으로 집계되었다.

현장설문조사 결과가 국내 골재 생산과정의 모든 현황이나 문제점들을 포함하거나 국내 모든 실무기술자들에게서 수렴된 의견이라고는 할 수 없지만, 관련분야의 일반적이며 포괄적인 생산 현황과 문제점들을 어느 정도는 대변할 수 있을 것이라고 판단된다. 또한, 실제 현장에서 실무기술자들이 몸소 체험한 의견들을 수렴한다는 데에 의의가 있다고 생각된다.

본 연구에서는 현장설문조사 결과 분석을 통해 숏크리트용 골재의 최대치수를 8mm로 개선하였을 시 발생할 수 있는 문제점들에 대한 해결책을 찾고 해당 골재의 효과적인 사용을 위해 필요한 기능 인자, 품질 성능 개선 방향 등을 설정하고자 한다.

나. 현장설문조사 결과 및 분석

표 3.5.5 는 설문조사에 응답한 국내 골재업체에 대해 나타낸 것이다. 총 10여개의 골재 생산업체에서 채취, 가공, 출하를 담당하고 있는 실무기술자들이 설문조사

에 응해 주어, 연구 자료로서 조사 결과의 대표성을 충분히 확보할 수 있었다고 판단된다. 그림 3.5.7은 설문조사에 참여한 골재 업체들이 출하하는 대상 현장의 비율을 나타낸다. 도로 건설현장이 가장 많은 부분을 차지하고 있었고 철도, 터널 현장 등이 그 뒤를 이었다. 그림 3.5.8은 설문조사 응답자들의 해당 관련 업무 종사 기간을 나타낸다. 5년 이하의 경력을 가지는 기술자가 전체의 69%(84명)를 차지하였고, 5년에서 15년 경력을 가지는 기술자가 약 30% 가량으로 나타났다.

표 3.5.5 설문조사 응답 업체

응답업체	응답수
KH골재	15
KB공영	13
MD기업	9
NP생산	14
SW산업개발	17
IW산업	8
HB개발	7
DJ산업	9
DR골재	11
HS골재	18
합계	121

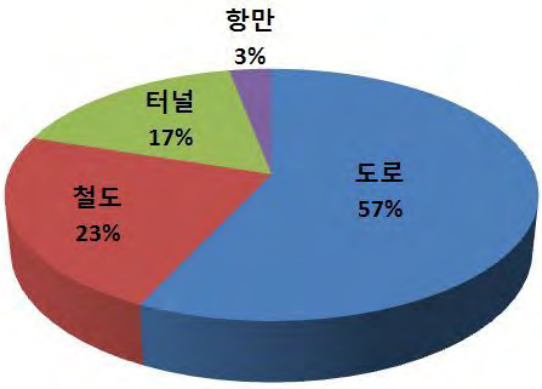


그림 3.5.7 설문 응답 업체 주요 출하 현장

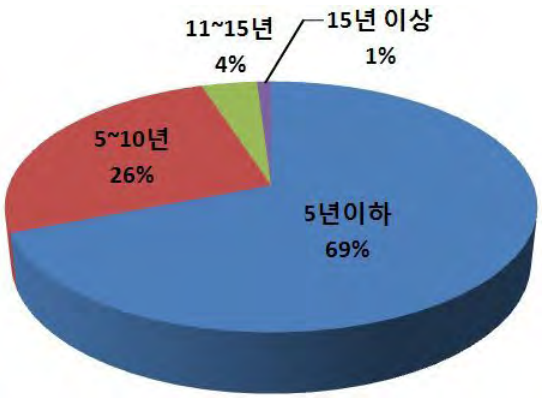


그림 3.5.8 설문 응답자 업무 종사 기간

(1) 골재 생산 시스템 현황에 대한 설문조사 결과

(가) 골재 생산 시 최대시간 및 비용 소요공정

골재 생산 현장에서 골재 출하 전까지 가장 많은 시간이 소요되는 공정에 대한 설문에서 골재 크러싱 작업을 선택한 응답자가 약 58%로 가장 많았고, 원석 재료의 확보 및 운반(27%), 골재 스크린 작업(8%) 등이 그 뒤를 이었다. 골재 생산 시 가장 많은 비용이 소요되는 공정에 대한 설문에서도 역시 골재 크러싱 작업이 전체의 45%로 가장 많았고, 원석 재료의 확보 및 운반이 27%, 골재 스크린 작업 및 출하지점까지의 골재 운송작업이 각각 13%, 11%로 뒤를 이었다.

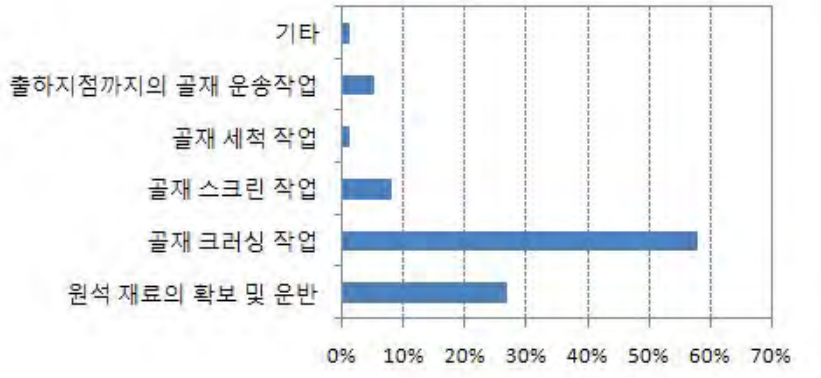


그림 3.5.9 골재 생산시 최대시간 소요 공정



그림 3.5.10 골재 생산시 최대비용 소요 공정

(나) 골재 세척작업 및 수분함유량 측정 실시 여부

세척작업 및 수분함유량 측정에 관한 설문결과, 골재 출하 직전에 세척을 실시하는 업체가 47%로 가장 많았고 골재 채취 후 바로 세척을 한 후 보관하는 업체가 28%였으며, 세척을 하지 않거나 요청에 의해서 세척을 하고 있는 업체가 전체의 약 25%정도 수준인 것으로 나타났다. 또한 수분함유량의 경우, 출하 직전에 측정하는 업체가 전체의 84%로 가장 많았고 요구 시에만 측정하거나 측정하지 않는 경우가 약 14%정도 수준으로 나타났다.

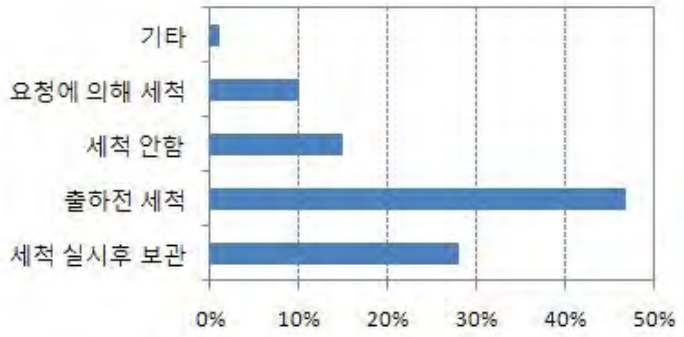


그림 3.5.11 골재 세척작업 실시 여부

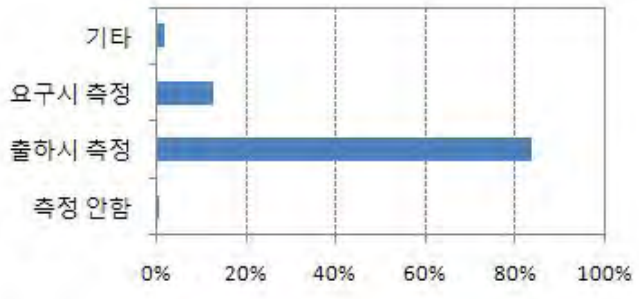


그림 3.5.12 골재 수분함유량 측정 실시 여부

(다) 골재 생산 크기 및 납품단가(원/m^3)

각 업체에서 주로 생산되는 골재의 크기에 대한 질문의 대한 답으로 5~25mm 골재가 전체의 47%로 가장 크게 나타났고, 0~5mm 골재가 39%로 그 뒤를 이었다. 현재 숏크리트용 골재로 이용되는 13mm 내외 수준의 골재는 전체의 12%수준으로 나타났다. 골재 품목별 가격으로는 0~5mm 골재의 경우 15,000원~20,000원 선이 67%, 10,000원~15,000원 선이 21%, 20,000원 이상이 12%로 나타났고, 5~13mm 골재의 경우 15,000원~20,000원 선이 49%, 10,000원~15,000원 선이 19%, 20,000원 이상이 32%로 나타났으며, 5~25mm 골재의 경우 15,000원~20,000원 선이 56%, 10,000원~15,000원 선이 34%, 20,000원 이상이 10%로 나타났다.

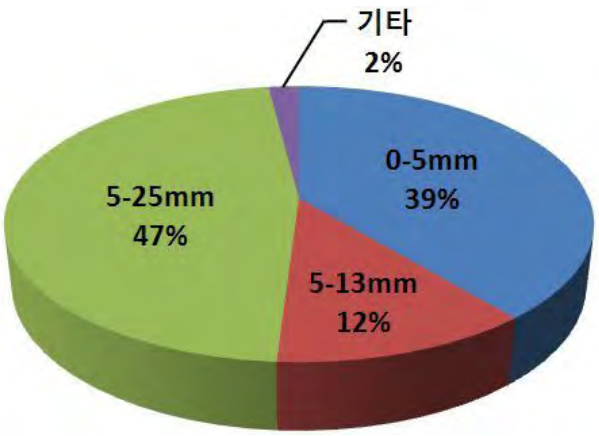


그림 3.5.13 각 골재업체의 주요 생산 품목

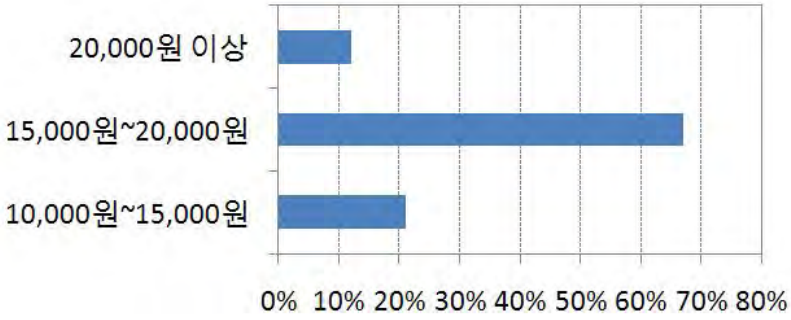


그림 3.5.14 0~5mm 골재 납품단가

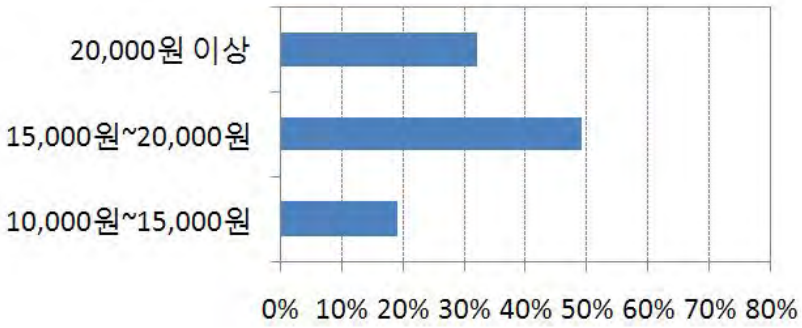


그림 3.5.15 5~13mm 골재 납품단가

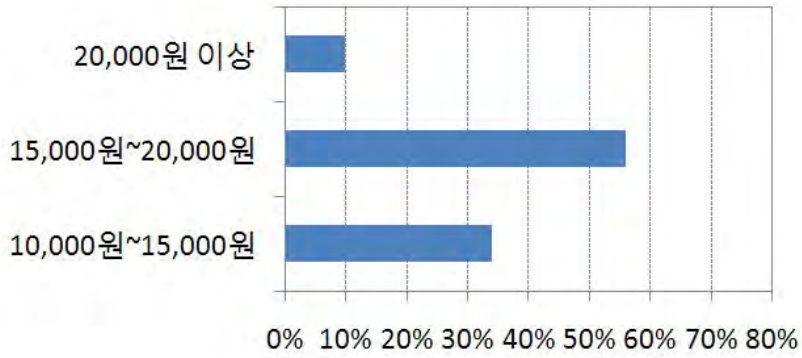


그림 3.5.16 5~25mm 골재 납품단가

(2) 8mm 이하 숏크리트용 골재 생산시스템에 관한 설문조사 결과

(가) 숏크리트용 골재 납품 사례 및 굵은골재 최대치수

설문에 참여한 10개 업체 121명 중 약 84%가 숏크리트용 골재를 납품한 사례가 없다고 대답했다. 숏크리트용 골재를 납품한 사례가 있다고 대답한 16%의 응답자들은 굵은골재 최대치수(Gmax)가 13~15mm인 골재가 납품되었던 골재 중 가장 많은 부분(약 87%)을 차지한다고 답했다.

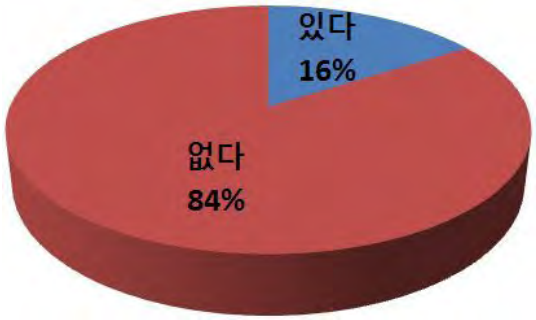


그림 3.5.17 숏크리트용 골재 납품사례

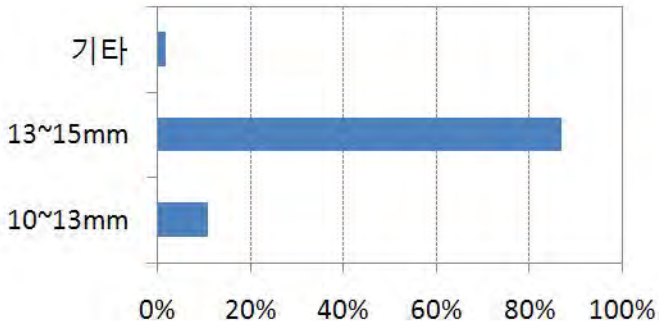


그림 3.5.18 숏크리트용 골재 납품시 굵은골재 최대치수(Gmax)

(나) 8mm 골재 생산 가능 여부 및 생산 시스템

각 업체에서 현재 보유하고 있는 골재 생산 시설을 활용하여 8mm 이하 골재 생산이 가능한지 여부에 관한 질문에 불가능하다고 답한 인원이 전체 응답자의 68%에 달했으며, 그 이유에 대해서는 크러싱 설비 및 골재 스크린 등의 설비 문제가 약 66%, 기술적인 문제와 기타 현장 사정이 34%로 나타났다. 이에 따라 8mm 골재 도입 시 가장 우선시 되어야 하는 선행과정으로 골재 생산 설비 교체(58%)가 꼽혔고, 골재 스크린 추가(22%), 골재 야적장 추가 확보(12%) 등이 그 뒤를 이었다.

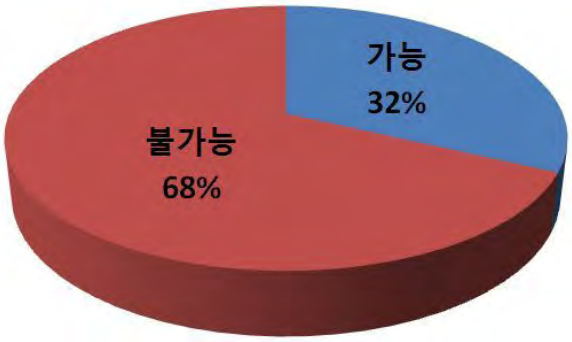


그림 3.5.19 8mm 골재 생산 가능 여부

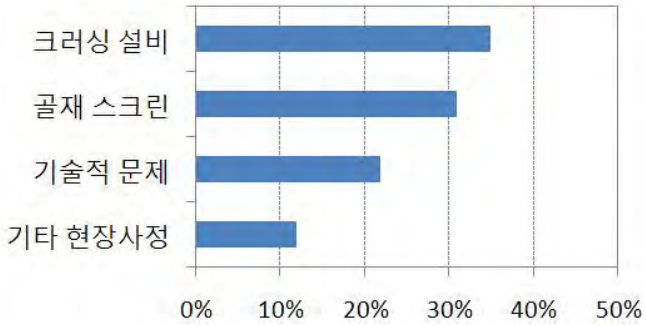


그림 3.5.20 8mm 골재 생산 불가능 사유

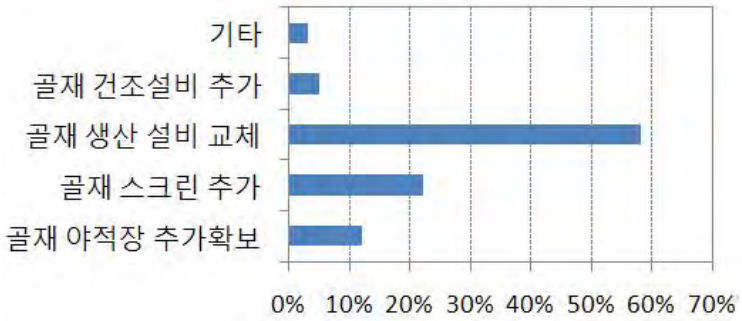


그림 3.5.21 8mm 골재 도입시 필요사항

(다) 8mm 골재 생산 시 생산단가(원/m^3)

레디믹스트 숏크리트용 골재는 특성상 골재 내의 수분을 완벽히 제거하여야 한다. 기존 골재 생산 시스템에 골재 건조 시설설비를 추가로 설치한 후 레디믹스트 숏크리트용 골재를 생산 한다면 골재 제조(8mm이하) 및 건조과정에 소요되는 비용을 모두 감안한 생산단가는 대략 얼마정도 수준에 책정하는 것이 합당한가에 대한 질문에 20,000원~25,000원 선이 62%로 가장 많았고, 15,000원~20,000원 선이 23%, 25,000원 이상이 15%로 나타났다.

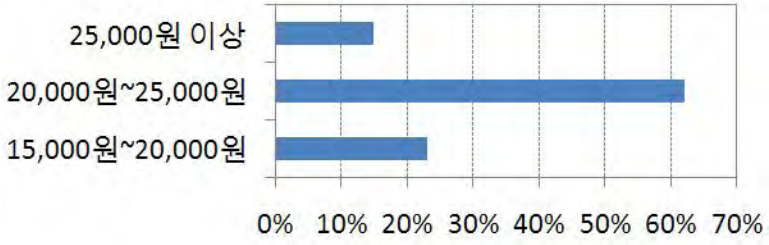


그림 3.5.22 8mm 골재 도입시 적정 생산 단가

다. 결론

현재 골재 생산 과정에서의 문제점을 파악하고 숏크리트용 골재 최대치수를 선진국에서 사용이 활발한 8mm수준으로 개선하는 문제에 관한 의견을 검토하기 위해 실무기술자들을 대상으로 현장설문조사를 실시하였다.

골재 생산업체에서 근무하고 있는 대부분의 기술자들은 최대치수 8mm 수준의 숏크리트용 골재의 필요성에 대하여 충분히 공감하고 있는 것을 확인하였으며, 이에 대한 필요사항으로서 생산 설비 확충을 최우선으로 꼽았다. 따라서 크러싱 장비와 스크린 등의 확충을 통해 최대치수 8mm 숏크리트용 골재 생산을 가능케 하고 생산원가를 절충하면 숏크리트 품질 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 보인다.

3. 레디믹스트 숏크리트 재료분리 최소화 방안 도출

가. 재료분리 현상 고찰

재료분리란 콘크리트 구성요소 (시멘트, 물, 잔골재, 굵은골재)가 골고루 분포되지 않고 균질성이 소실되는 현상을 말한다.

재료분리에 의한 피해는 콘크리트 강도저하, 부착강도 저하, 균열의 원인, 수밀성 및 내구성 저하, 리바운드양 증가의 원인 등 그 피해는 실로 막대하다고 판단되며, 그림 3.5.23은 다짐불량으로 인한 재료분리 현상과 부착강도 저하가 발생하여 구조물에서 콘크리트 일부가 탈락한 현상을 나타내고 있다.



(a) 다짐불량으로 인한 현상



(b) 부착강도 저하 현상

그림 3.5.23 콘크리트 재료분리 현상

재료분리가 일어나는 원인으로는 굵은 골재치수가 너무 큰 경우, 시멘트량이 부족한 경우, 골재의 입도 및 입경이 불량인 경우, 믹싱시간 지연 및 미준수 등 다양한 원인으로 기존 연구에 의해 규명되었다. 그러나, 아직까지 재료분리 방지대책에 관하여 명확한 대안이 없고, 그 기준이 불분명 하여 재료분리로 인한 피해는 심각해지고 있는 실정이다. 표 3.5.6은 재료분리의 원인을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 재료분리 원인 인자 중 골재의 입도조정불량, 현장배합시 믹싱시간 지연 및 미준수로 인한 재료분리 현상에 대하여 다양한 변수를 주어 실험을 실시하였으며, 이에 따른 결과를 토대로 레디믹스트 숏크리트 재료분리 최소화를 위한 골재입도조정과 최적 믹싱시간을 도출하여 최적의 방안을 제시하고자 하였다.

표 3.5.6 재료분리의 원인

원 인	굵은골재의 최대치수가 40mm초과 및 입형분량
	최대 단위 시멘트량 부족
	슬럼프가 높을 경우
	골재의 비중차
	비빔시간의 지연 및 규정 미준수
	물시멘트비가 크고 점성이 떨어질 때
	블리딩 현상
	운반지연 및 타설불량
	시공연도 불량
	입도 및 입경 불량

나. 골재입도조정을 통한 재료분리 최소화 방안 검토

레디믹스트 숏크리트의 자동혼합 공정시스템에 의한 공장 생산시, 구성 재료의 70% 이상을 차지하고 있는 골재는 숏크리트 제품의 물성을 좌우할 수 있는 매우 중요한 인자이다. 즉, 구성골재의 강성, 입형, 잔분외에 입도 선별후 골재 크기별 혼합율에 따른 숏크리트의 입도분포 조정은 숏크리트의 재료분리를 제어할 수 있는 주요인자로 작용하게 되며 숏크리트의 시공성 및 최종물성(리바운드율, 강도 등)에 있어 매우 큰 영향을 미치게 된다.

숏크리트 골재가 일정 입도골재 크기만을 가질 경우, 재료분리 및 작업성(workability) 저하 등을 유발하며, 이로인한 작업수 과첨가로 물리적 특성 저하까지 연결되게 된다. 따라서, 제품 내 골재의 입도분포를 가능한 넓게 분포시켜, 가장 밀하게 충진시킴으로써(이하, 최밀충전) 최소한의 작업수로 작업성을 유지시킬 수 있으며, 이로인해 물성 향상에 기여하게 된다. 또한, 골재의 넓은 입도분포에 의한 최밀충전은 제품이송간의 진동에 의한 분체들의 재료분리를 막을 수 있는 효과(다짐 효과)도 기대할 수 있다.

숏크리트에 있어 잔골재의 입도는 압축강도 및 리바운드율에 크게 영향을 미치며 굵은 입자의 함유량이 많으면 압축강도는 높아지는 반면 리바운드가 많아지고 중간 입자나 가는 입자의 함유량이 많으면 리바운드는 적으나, 압축강도가 낮아져 양자를 적절히 조합시키는 것이 필요하며, 이를 위해서는 그림 3.5.24 및 표 3.5.7의 유

럽통합기준(EFNARC, 1996)에 규정된 골재의 입도곡선 상하한치에서 보는바와 같이 전체적으로 넓은 입도분포를 구성하고 있어야 함을 제시하고 있다.

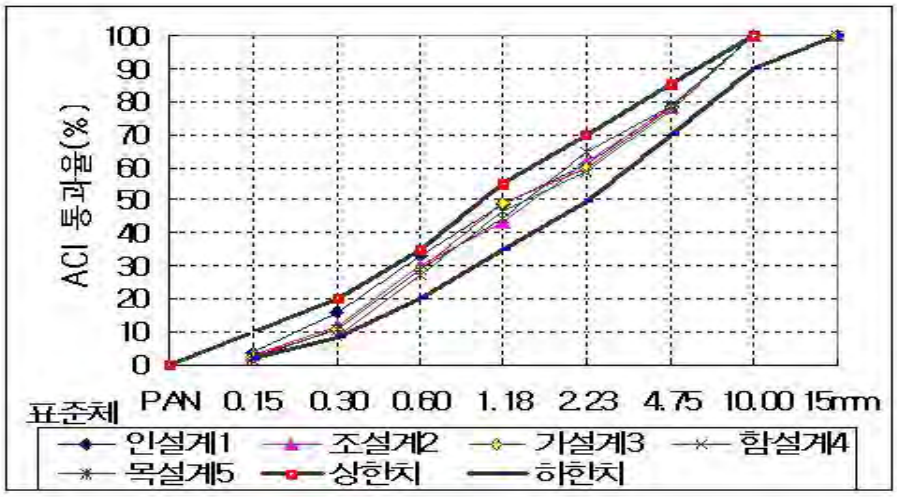


그림 3.5.24 건조 레디믹스트 숏크리트 골재 조합 입도분포
(유럽통합기준(EFNARC))

표 3.5.7 숏크리트 골재의 입도분포 (EFNARC, 1996)

Sieve(mm)	최소(%)	최대(%)
16.0	100	100
8.0	90	100
4.0	73	100
2.0	55	90
1.0	37	72
0.50	22	50
0.25	11	26
0.125	4	12

본 연구에 있어 상기 추천 숏크리트 골재 입도분포를 만족시키기 위해 레디믹스트 제조공장에서 사용되고 있는 건조골재를 이용, 각 공장별 입도선별 골재를 이용하여 규정 입도분포 조합이 가능함을 예측할 수 있다. 즉, 그림 3.5.25의 건조 레디믹스트 제조공장 공정 프로세스에서 보는바와 같이, 입고된 골재를 로터리 건조기에서 수분함량 0.3% 이하로 건조시키고 건조된 골재를 입도선별하기 위해, 각 입도

별 체가름 선별기 공정에 의해 S1(0.7mm 이하), S2(0.7~2.0mm), S3(2.0~5.6mm), S5(6~8mm)등으로 입도 선별하게 된다. 입도선별된 골재는 각 규정입도 골재 사일로에 저장되고, 제품 배합설계에 의거하며 자동 컴퓨팅 시스템에 의해 입도별 투입 혼합됨으로써 최종적으로 설계 요구 입도에 맞는 제품이 생산되어지게 된다.

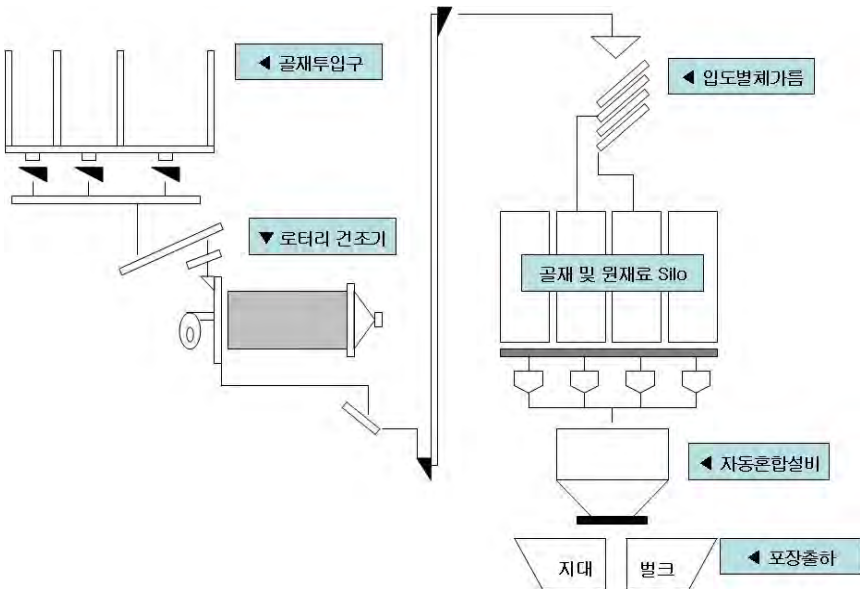


그림 3.5.25 건조 레디믹스트 제조공장 공정 프로세스 개략도

본 연구에서는 건조 레디믹스트 공장생산 적용에 앞서, 그림 3.5.26 에서 보는바와 같이 파일롯 플랜트 믹서에서 레디믹스트 숏크리트의 혼합 골재입도분포 최적화 검증을 위해 공정생산적용 예비 실험을 실시하였다.



(1) 파일롯 플랜트 믹서



(2) 미니사일로에 골재투입



(3) 사일로에 시멘트 투입



(4) 사일로 믹서 투입구 이송



(5) 믹서상부(재료투입구)



(6) 사일로 믹서 장착



(7) 믹서 컨트론 판넬



(8) 믹싱후 제품거출



(9) 사일로에서 톤백포장

그림 3.5.26 분말형 레디믹스트 숏크리트 Pilot plant 생산 과정

골재 혼합 배합비는 유럽통합기준(EFNARC, 1996)의 추천 골재입도분포를 만족시키기 위해 표 3.5.8 및 그림 3.5.27의 레디믹스트 공장생산에 적용되는 건조사 선별입도 골재(S5, S3, S2, S1)의 각 입도를 고려하여 조합하였는데, 전체적으로 넓은 입도분포의 구성을 갖도록 숏크리트 제품의 규정 입도를 맞추고자 하였다. 표 3.5.9는 생산 적용 배합비를 나타낸 것이며, 각 제품의 입도분포는 그림 3.5.28과 같다.

표 3.5.8 각 선별입도 건조 입도분포율

kS체		모래입도분포율			
mesh	mm	S5	S1	S2	S3
3/8 in	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
#4	4.75	97.68	0.00	0.00	3.05
#8	2.23	2.32	0.00	2.99	73.88
#12	1.70	0.00	0.00	17.07	19.86
#16	1.18	0.00	0.00	36.42	2.62
#30	0.60	0.00	8.65	39.93	0.25
#50	0.30	0.00	55.28	2.92	0.07
#70	0.21	0.00	15.89	0.42	0.04
#100	0.15	0.00	10.71	0.17	0.02
#170	0.088	0.00	6.59	0.20	0.05
	PAN	0.00	2.88	0.48	0.16
계		100.00	100.00	100.00	100.00

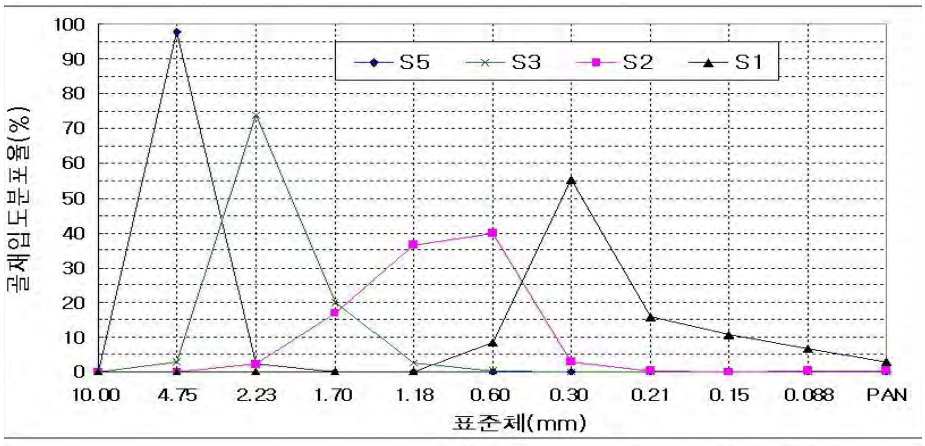


그림 3.5.27 각 선별입도 건조사 골재입도분포

표 3.5.9 파일롯 플랜트 생산 적용 Test 배합비

구 분	S5	S3	S2	S1	OPC	Slag	S/F	팽창제	Fiber
	8mm골재	2~5.6mm	0.7~2mm	0.7mm이하	시멘트	슬래그분말	실리카흄		강섬유
1 Plain	17.0	16.3	19.4	24.8	22.50	0.00	0		1.96
2 BFS4	17.0	16.3	19.4	24.8	15.72	6.77	0		1.96
3 BFS4합	17.0	16.3	19.4	24.8	15.72	6.77	0		0.29
4 BFS6	17.0	16.3	19.4	24.8	15.72	6.77	0		1.96
5 BFS8	17.0	16.3	19.4	24.8	15.72	6.77	0		1.96
6 SF	17.0	16.3	19.4	24.8	20.71	0.00	1.8		1.96

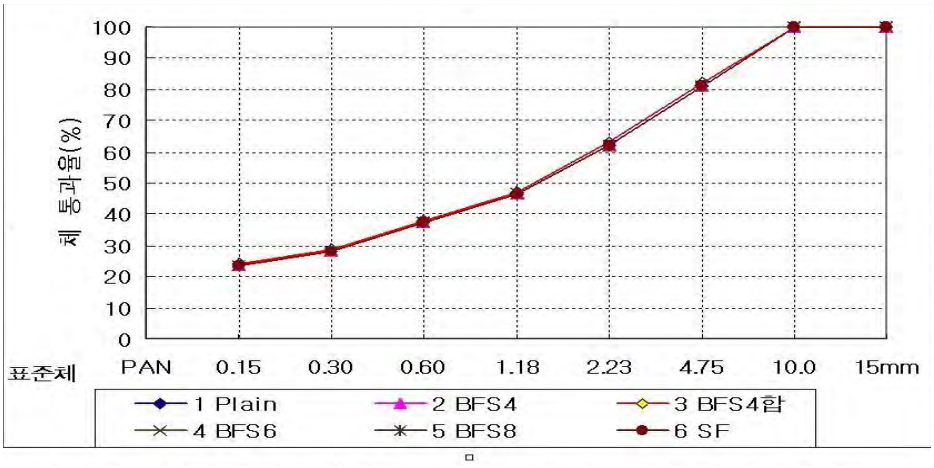


그림 3.5.28 분말형 레디믹스트 숏크리트 입도분포

설계 배합비를 근거로 각 제품별 파일롯 플랜트 생산시 제품의 입도분포를 검토하였으며, 그 결과를 표 3.5.10과 표 3.5.11, 표 3.5.12 및 그림 3.5.29에 나타내었다.

강섬유의 경우 투입량 1.9% 대비 채취시 상부에서 다소 차이를 보이고 있지만, 그림 3.5.29 에서와 같이 조골재인 6~8mm골재(4mesh 잔량분)는 대체로 안정적인 입도분포를 보이고 있다. 전체적으로 골재 구성분에 있어 요구하고 있는 넓은 입도분포를 형성하고 있었으며, 파일롯 플랜트 믹싱 후 시제품 채취분에 대한 입도분포 편차에 있어서도 1~2% 수준으로 안정적인 믹싱 분산상태 및 입도분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

강섬유의 분산성은 믹서의 혼합시간 및 브레이드의 회전속도, 원재료 투입순서 변경에 의거 개선될 수 있는데, 파일롯 플랜트 믹서의 날개 및 외통과의 유격 사이에 굵은 골재가 끼어 부서지는 현상이 발견되었으나, 2차 실공정생산 적용 검토시

공장생산 믹서 설비의 날개(Blade)와 외통과의 유격을 좁혀(6mm→4mm 이하) 상기 문제점을 개선하도록 하였다.

표 3.5.13은 레디믹스트 숏크리트의 생산 시험조건을 나타낸 것이다.

표 3.5.10 파일롯 플랜트 생산제품 믹서 배치별 입도분석 결과-1

구 분	Test 1-1			Test 1-2			Test 1-3			Test 1-4		
SteelFiber	1.2	1.5	1.4	1.6	1.9	1.7	1.6	2.6	2.1	1.4	2.3	1.8
4mesh	7.5	12.0	9.8	12.6	11.4	12.0	13.5	14.3	13.9	13.1	13.6	13.4
8mesh	15.3	12.2	13.8	19.5	15.9	17.7	15.2	15.7	15.4	15.5	16.7	16.1
12mesh	8.4	7.5	8.0	7.8	8.0	7.9	7.7	8.4	8.1	7.4	8.1	7.7
16mesh	8.8	8.1	8.5	8.9	7.8	8.4	8.6	8.6	8.6	8.3	7.6	8.0
30mesh	11.2	9.8	10.5	8.9	9.7	9.3	8.8	8.6	8.7	9.1	8.2	8.7
50mesh	15.2	13.2	14.2	13.0	14.0	13.5	14.3	13.6	14.0	16.0	14.3	15.2
70mesh	4.1	3.6	3.8	3.4	4.2	3.8	3.9	2.9	3.4	3.6	3.0	3.3
100mesh	2.9	2.8	2.9	2.4	2.7	2.6	2.3	2.3	2.3	3.0	2.3	2.7
170mesh	2.1	4.8	3.4	1.6	1.7	1.7	1.6	1.5	1.6	1.5	1.6	1.6
PAN	76.7	75.6	76.2	79.7	77.3	78.5	77.4	78.4	77.9	78.8	77.7	78.3

표 3.5.11 파일롯 플랜트 생산제품 믹서 배치별 입도분석 결과-2

구 분	Test 2-1			Test 2-2			Test 2-3			Test 2-4		
Steel Fiber	2.3	1.2	1.8	1.8	0.9	1.3	1.4	2.0	1.7	2.3	1.7	2.0
4mesh	8.8	11.0	9.9	8.8	11.6	10.2	10.5	13.1	11.8	11.6	9.7	10.6
8mesh	17.6	19.4	18.5	16.2	17.4	16.8	21.8	21.4	21.6	15.4	16.7	16.1
12mesh	8.8	9.2	9.0	4.4	7.0	5.7	7.7	7.5	7.6	7.5	7.7	7.6
16mesh	9.5	9.6	9.6	8.7	6.7	7.7	7.7	6.8	7.3	8.0	8.3	8.2
30mesh	8.8	7.9	8.4	13.1	12.1	12.6	12.0	11.1	11.5	10.2	10.8	10.5
50mesh	15.1	12.8	13.9	15.2	13.7	14.4	11.8	11.6	11.7	14.6	15.2	14.9
70mesh	3.3	3.4	3.4	4.0	3.2	3.6	3.0	2.7	2.9	3.2	2.8	3.0
100mesh	2.4	2.2	2.3	2.9	2.4	2.7	2.1	2.2	2.1	2.6	2.4	2.5
170mesh	1.3	1.4	1.4	1.7	1.6	1.7	1.4	1.4	1.4	1.4	1.7	1.5
PAN	78.0	78.0	78.0	76.8	76.7	76.8	79.5	79.7	79.6	76.9	77.0	76.9

표 3.5.12 분말형 레디믹스트 숏크리트 톤백생산 채취시 제품입도분포(M : mesh)

구 분	Fibre	4M	8M	12M	16M	30M	50M	70M	100M	170M	PAN
TEST (하)	1.80	9.68	17.18	7.23	7.70	10.80	14.23	4.42	1.78	0.90	75.73
TEST (중)	1.93	10.72	18.60	7.02	7.50	9.95	12.80	3.93	2.68	1.88	77.02
TEST (상)	1.48	10.85	16.98	7.13	8.23	10.58	13.18	4.00	2.82	1.95	77.22

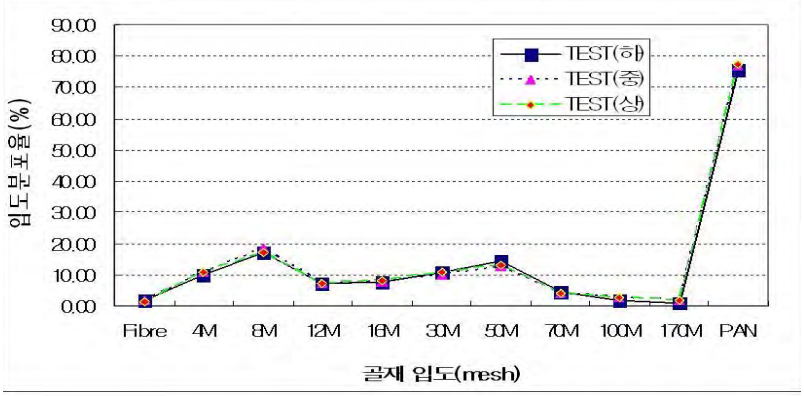


그림 3.5.29 분말형 레디믹스트 숏크리트 톤백생산 채취시 제품입도분포

표 3.5.13 분말형 레디믹스트 숏크리트 생산 시험조건

생산 Batch	혼합시간 (초)	믹서 Rotor Speed	A/B Speed	원재료 투입 방법 및 순서
3ton/batch	150	투입 전 35% 투입 후 80% 거출 시 35%	35%	① S1, S2, S3(투입) ② 섬유, Silica Fume(투입) ③ 시멘트, 슬래그, S5(투입)

실 공정시 생산된 분말형 레디믹스트 숏크리트의 시생산품의 입도분포를 살펴보기 위한 공정 프로세스에서 샘플링 채취는 표 3.5.14와 그림 3.5.30과 같다.

표 3.5.14 분말형 레디믹스트 숏크리트 입도분석을 위한 샘플링

샘플링 위치	샘플링 방법
① 믹 서	생산 배치별 각 2회 샘플링
② 믹서하부 A/B	믹서에서 제품 거출 시 제품 이송 중 3회 샘플링(상중하)
③ BCT상차 및 이동후	BCT 제품 상차 및 BCT 4시간(350km) 이동후 샘플링(상중하)
④ 사일로 제품 거출	사일로에서 제품 거출 시 샘플링(상중하)

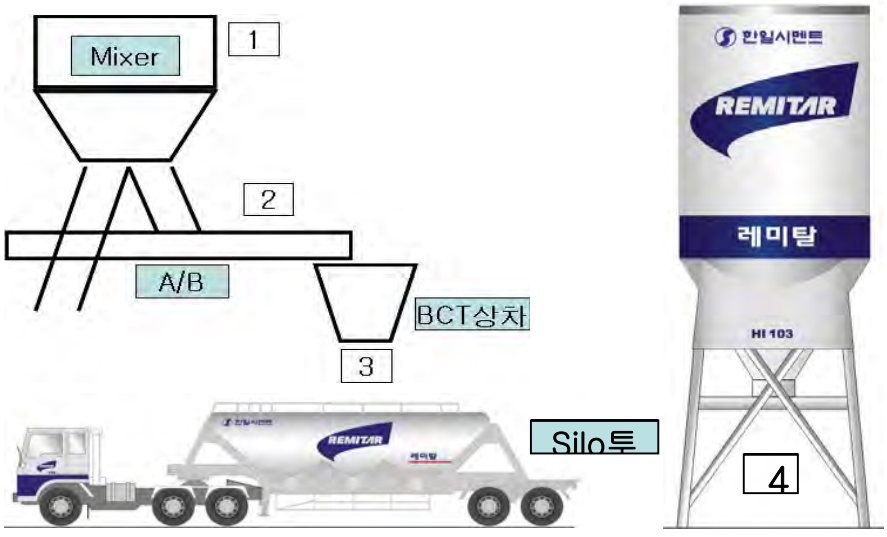


그림 3.5.30 공정 확인 시험 샘플링 위치

그림 3.5.31 및 그림 3.5.32에서와 같이 믹서부분에서 채취된 시료의 입도분포 및 분산상태를 살펴본 결과 믹싱 혼합상태는 조골재(6~8mm) 및 섬유를 포함하여 표

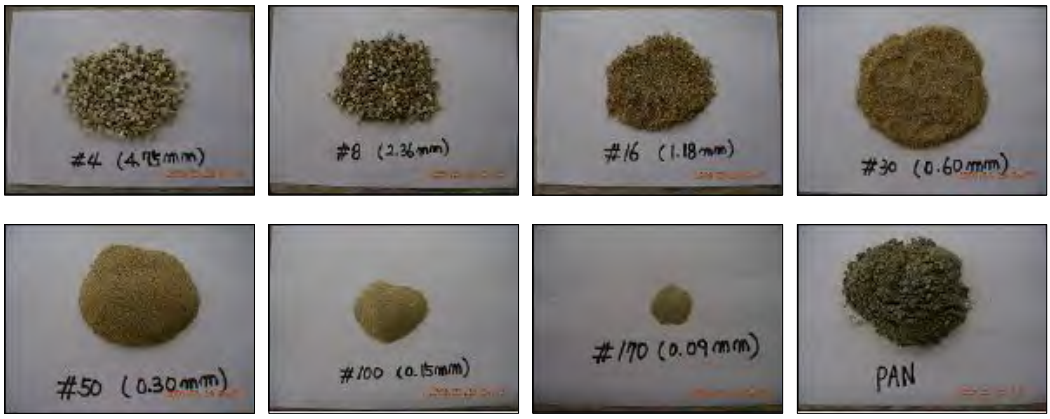
준편차 0.68%로 매우 양호한 것으로 나타났다. 반면, 그림 3.5.33 믹싱 후 제품 상차를 위한 이송간(A/B)에 믹서하부에서의 낙차(약1.5m)로 인해 다소 굵은골재의 재료분리가 확인되었으나(표준편차 1.53%), 전반적으로 양호한 입도분포 및 분산성을 확인할 수 있다. 특히, 강섬유의 경우 1차 파일롯 플랜트 생산 검토시에는 다소의 분산 편차를 보였으나 실공정 믹서에서는 양호한 분산 상태를 나타내었다.



그림 3.5.31 믹서 부분 샘플링 시료 입도분포



(a) 입도분석후 섬유 분산 상태



(b) 입도분석후 골재 분산상태

그림 3.5.32 분말형 레디믹스트 숏크리트 믹싱후 입도분별 재료 사진

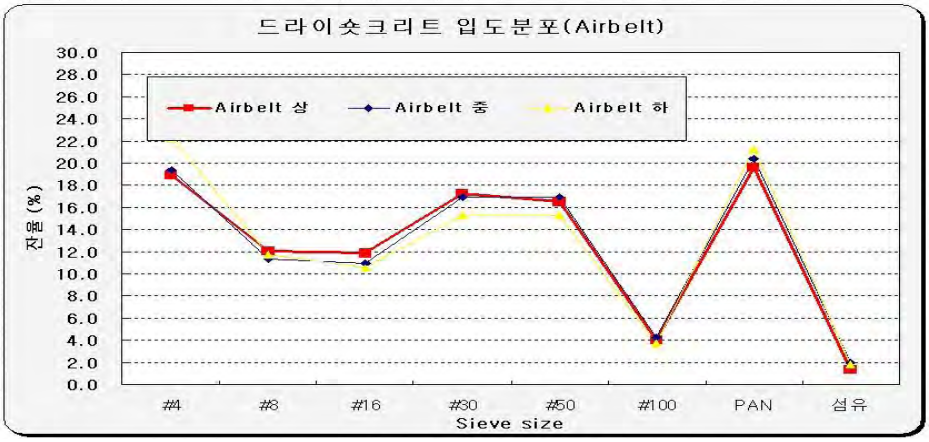


그림 3.5.33 Airbelt 이송간 샘플링 시료 입도분포

그림 3.5.34은 제품 이송차량인 BCT 차량에 직상차시 제품의 재료분리 상태를 검토한 것이다. BCT 상차시 A/B로부터 낙하되는 높이가 약 3m로 슛트를 통해 상차되지만 높은 낙차로 인해 굵은 골재의 재료분리가 다소 발생하였으며, 골재입도분포를 넓게 분포시킴에 따른 제품의 충전밀도 증가로 제품의 흐름성(안식각)이 저하되는 경향을 보임에 따라 BCT 제품 상차시 거출투입부위로 제품이 쌓이는 현상이 발견되었다. 즉, BCT 상차시 분말형 레디믹스트 숏크리트의 조골재 흐름성 저하에 따라 BCT 맨홀 하부(끝단)의 잔분량이 다소 늘어남을 알 수 있으며, 이는 BCT 상차시 상부 맨홀(앞단, 중간단, 끝단)의 위치를 바꿔가며 상차를 할 경우 상기 문제점은 해결될 것으로 판단된다.

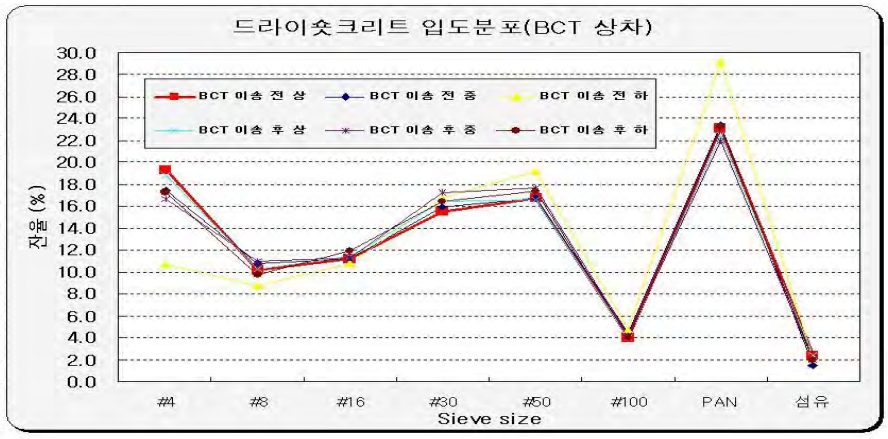


그림 3.5.34 BCT 직상차 이송전· 후 부분 샐플링 시료 입도분포

BCT 상차 후 이송시 차체 진동에 의한 재료분리 상태를 검토하기 위해 350 km 주행 후 동일 채취 부위에서 시료를 채취하여 입도 분석한 결과, 골재의 넓은 최적 입도분포로 인해 제품의 최밀충전성이 높아짐에 따라 차체 이동 진동에 의한 재료의 상하 재료분리 현상은 나타나지 않았으며, 이는 재료의 높은 최밀충전성에 의한 다짐효과에 의해 각 구성재료의 상하 분리가 발생되지 않은 것으로 판단된다.

레디믹스트 숏크리트의 골재입도조정(넓은 입도분포의 최밀충전)을 통한 제품 이송간의 재료분리 현상을 최소화 할 수 있었으며, 이는 앞서 언급한 바와 같이 이후 물 혼련공정에 있어서도 보다 적은양의 혼련수로도 요구하는 작업성(슬럼프 10~12cm)을 나타낼 수 있고, 타설 숏크리트의 제반물성(리바운드량 및 강도, 내구성 등)에도 긍정적 효과를 보일 것으로 판단된다.

그림 3.5.35와 그림 3.5.36은 BCT 이송후 레디믹스트 숏크리트를 현장 사일로&믹서 시스템 장비에 충전하고, 거출시 골재 입도분포 상태와 재료분리 상태를 검토한 결과는 나타낸 것이다.



(a) 현장 이동식 사일로&믹서시스템에 제품 충전 (b) 분말 제품 거출 상태

그림 3.5.35 BCT 직상차 이송후 제품 사일로&믹서 시스템에 충전 및 거출



그림 3.5.36 현장 사일로&믹서시스템 충전후 거출시 분말형 숏크리트 입도분포

최초 거출시 조골재의 양이 상대적으로 높이 분포되어 있음을 알 수 있는데, 이는 일반적으로 사일로&믹서 시스템에 제품 충전시 초기 제품분이 사일로 낙하높이가 높아(약10m) 나타나는 굵은골재의 재료분리 현상으로서, 이후 제품군 거출에 있어서는 양호한 골재 입도분포 및 편차를 보임을 알 수 있다.

제품 충전 후 숏크리트의 연속타설 시공시 사일로의 제품충전 운영관리를 통해 최종적으로 균질한 레디믹스트 숏크리트의 제품품질을 확보할 수 있으며, 국내의 경우 조골재 함유량이 높은 제품에서 사일로내 제품의 Low level 관리를 통해 거출시의 재료분리 현상을 최소화하고 있다. 즉, 초기 사일로 충전시 사일로 콘 부위의 제품은 배출 제거시키고 이후 연속 믹싱 타설에 의해 제품을 채취하여 사용하게 되며, 사일로 콘 부위 이하 level 까지는 제품을 소모하지 않은 상태에서 다시 사일로에 제품을 충전시키는 방식을 택하고 있다.

제품 이송간 재료분리를 최소화시키기 위해서는 골재의 입도분포를 넓게 분포 하여 제품의 최적 최밀충전을 유도시키고, 이로 인한 제품의 충전 다짐효과에 의해 재료분리를 최소화 시킬 수 있음을 확인하였다. 그리고 앞 공정 프로세스에서의 이송간 낙차에 의한 다소간의 재료분리 발생은 제품의 이송 낙차높이를 줄일 수 있는 공정개선(믹서하부 서브저장탱크 만실운영, A/B 이송속도 저감, BCT 직상차 슈트 상부 호퍼개조 등)으로 향후 해결하고자 한다.

최종적으로 현장 제품 저장 사일로&믹서시스템에서 제품의 Low level 충전/거출 방식 관리를 통해 재료분리를 최소화함으로써 설계된 바와 동일한 균질 품질의 레디믹스트 숏크리트를 안정되게 연속적으로 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

다. 재료분리를 최소화하기 위한 최적 믹싱 시간 도출

레디믹스트 제조공정에 있어 생산 제품의 품질을 좌우할 수 있는 인자로는 사용 원재료의 품질 및 자동계량에 의한 계량 정확도 외에 원재료 투입순서, 믹서 효능, 믹싱 방법(믹서 종류, 믹싱시간, 믹서 혼합 회전속도 등)등 있다. 따라서 고품질의 레디믹스트 숏크리트를 생산하기 위해서는 고효능의 믹서 선택이 필요하며, 이에 따른 최적 믹싱시간 및 혼합속도 결정, 원재료 투입순서 등 최적의 믹싱상태를 갖추기 위한 믹싱방법이 요구된다.

본 연구개발에서 사용된 믹서는 독일 믹서제조 전문 업체인 EIRICH사의 R19 모델을 적용하였는데, 그림 3.5.37과 같이 믹싱 브레이드의 강력한 회전 속도와 믹서 내통의 역회전을 이용함과 동시에 믹서본체의 기울기(약 20°)를 줌으로써 구성재료 전체를 고르게 분산 혼합시킬 수 있는데, 구성재료의 비중 및 특성에 따라 회전속도를 조정하여 혼합하게 된다(경량재료 및 분체만 있을 경우 low speed 혼합/Fiber, 착색안료 및 고체함유량이 많을 경우의 분산성을 위해선 high speed 혼합/일반적 높은 분산효율을 위해선 midium speed 등).



그림 3.5.37 분말형 레디믹스트 제품 믹서(EIRICH사 Type R19)

레디믹스트 숏크리트에 첨가되는 섬유보강재의 높은 분산성을 위해서 잔골재 투입 후 섬유를 투입하여 1차 high speed(약 35→약 80%)로 프리 믹싱 하게 되면, 잔골재 및 믹싱 날개의 마찰에 의해 섬유 보강재의 분산성이 확보되며, 이 상태에서 시멘트 및 혼합재를 투입하고 이후 조골재를 투입함으로써 섬유의 고른 분산성을 확보할 수 있다(샘플링 입도분석결과 섬유 분산 표준편차는 약 0.16%로 매우 양호한 분산성을 확인함).

본 연구에서도 원재료 투입순서를 ① 잔골재 투입(S1,S2,S3)→② 강섬유 및 경량혼합재 (Silica fume)→③ 시멘트, 슬래그분말, S5(조골재) 순으로 투입함으로써, 그

림 3.5.38의 결과에서 보는바와 같이 균질한 혼합 분산성을 얻을 수 있었다. 너무 높은 믹싱 회전 속도는 구성재료의 비중차이 및 내통 회전 원심력에 의해 재료분리를 유발시키거나, 골재 충돌 마찰에 의해 골재 부서짐 현상을 유발할 수 있기 때문에 믹서의 회전속도를 단계별로 가변하여야 한다. 따라서, 본 실험에서도 최초 믹싱 개시전 믹서 속도 35%→믹싱 개시중 속도 80%→믹싱 마무리 속도 35%로 가변하면서 믹싱을 하였다.

그림 3.5.38은 믹싱시간(120초, 150초, 180초, 300초)에 따른 레디믹스트 숏크리트의 입도분포 결과는 나타낸 것이다. 일반적으로 믹싱을 장시간 한다고 믹싱 효율이 증가하는 것은 아니며, 실험결과 믹싱시간 120초~180초에서는 시제품의 입도 분포에서 약 1~2% 정도의 미세한 입도분포 차이를 보였다. 강섬유의 분산성에 있어서도 믹싱시간에는 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나, 믹싱시간 300초의 경우에는 입도분포가 3~5% 정도의 편차를 보였는데, 이는 믹싱 혼합 속도 및 믹싱 시간이 지나치게 높거나 길어지게 되면 믹서의 회전 원심력에 의해 조골재가 바깥쪽으로 벗어나기 때문으로 판단된다.



그림 3.5.38 믹싱시간에 따른 레디믹스트 숏크리트의 입도분포 결과

4. 합성섬유 최적 혼입량 도출

가. 구조용 합성섬유

(1) 적용 개요

콘크리트의 낮은 인장강도 및 인장 변형률 그리고 취성적 거동을 보완하기 위하여 보강바 및 스터럽이 사용되어 왔으나 불연속 적인 단섬유를 사용하여 숏크리트를 보강하기 위한 노력은 1960년대부터 시작되어 30년 동안 꾸준하게 발전해 왔다.

기존의 숏크리트 공법은 건식공법에 의한 방법이 주를 이루어 왔으나 숏크리트 공법이 대형화, 다양화, 기계화 시공의 확산 및 작업환경의 개선, 품질관리 등의 이유로 현재는 습식 숏크리트 공법이 주로 사용되고 있는 추세이다. 일반적으로 숏크리트는 휨하중을 받는 터널 및 지하구조물에 주로 사용됨으로서 콘크리트 인성을 증가시킬 필요성이 있다. 이와 같은 이유로 철근 및 와이어매쉬를 적용함에 있어서 야기되는 문제점 등(지보시기, 지보설치 제한)으로 새로운 보강재의 개발이 요구되어 왔다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 현재 국내외에서는 강섬유 보강 숏크리트가 널리 사용되고 있다.

강섬유 보강 숏크리트는 기존 숏크리트의 균열저항성, 인성, 충격저항성 등을 향상시켜 널리 사용되고 있는 제품인데 반해 자체 비중이 높아 터널 및 지하구조물의 숏크리트 공사시 리바운드 양의 증대 및 강섬유 반발현상으로 인한 안정성 문제, 구조물 자체의 중량이 커지는 단점 및 수분이 다량 포함되어 있는 현장에서의 사용시 강섬유 자체의 부식에 대한 우려가 있다.

최근 들어 강섬유의 단점을 보완하기 위한 새로운 보강재로서 구조용 합성섬유가 북미의 터널공사에서 적용된 이후 꾸준한 연구가 수행되어 왔으며 미국, 캐나다, 일본에서 터널 시공 실적이 보고되고 있다.

Fibermesh Synthetic Industrues에서 개발한 S-152 HPP Fiber와 Grace Construction Products에서 개발한 Grace Structural Fiber가 그 대표적인 제품으로, 이러한 구조용 합성섬유들은 이미 뚜렷한 인성의 향상효과가 입증되었다.

구조용 합성섬유는 섬유 보강재로 일반적으로 사용되고 있는 강섬유가 지니고 있

는 인장강도, 휨강도, 피로기간의 연장, 충격저항성 증대, 지보내력 향상 및 박리방지, 인성의 증대 및 균열 저항성 향상 등의 이점을 모두 가지고 있다. 그 이외에도 내화학성 및 부식의 우려가 없으며 자체 비중이 낮아 운반의 용이성과 현장타설 장비 호스의 마모 및 작업자에게 위험이 적은 것이 특징이다. 또한 강섬유와 비교하여 경제적인 측면에서도 우수하다고 평가 되어 그 사용량이 증가되고 있는 추세이다.

본 연구에서 개발한 레디믹스트 숏크리트의 특징은 미리 숏크리트 재료를 혼합하여 운송후 타설하는 개념으로서, 강섬유의 사용시 장기적인 측면에서의 부식문제 및 재료분리의 가능성이 매우 커지는 것으로 나타났다. 따라서 강섬유에 준하는 성능을 나타내면서 레디믹스트 숏크리트의 제조에 중요 요소인 내부식성 향상 및 경제적인 측면을 고려하여 국내에서 생산 및 사용 중인 구조용 합성섬유의 적용성 검토를 실시하였다.

(2) 보강섬유 품질특성

보강재는 숏크리트가 구조적인 하중작용을 받는다고 예상되는 부위에 이동이나 처짐이 생기지 않도록 단단히 설치해야 하며, 현재 국내·외에서 주로 사용되고 있는 보강재료는 Wire mesh, 철근, 강 섬유(Steel fiber), 합성섬유(Polypropylene fiber) 등이 있다.

Steel Fiber Reinforced Shotcrete(SFRS)는 숏크리트에 강섬유를 첨가한 것으로 인장강도와 휨강도의 증대, 피로기간의 연장, 충격저항성 증대, 지보내력 향상 및 박리 방지, 인성(toughness)의 증대 및 균열 저항성 향상 등의 효과를 가지고 있으나, 압축강도의 증대는 미미하다. 강섬유의 단면은 원형 또는 구형형상으로 길이가 20~40mm 정도이며, 25mm 길이의 섬유가 주로 사용되는데, 콘크리트 내에서의 부착특성을 높이기 위해 양단을 구부린 Hooked Steel Fiber가 사용된다.

강섬유는 통상 콘크리트 전체 부피의 0.5~1.0%, 약40~50kg 정도를 사용하며 첨가량이 2%를 초과하면 숏크리트용으로는 적당하지 못하다. 강섬유보강 숏크리트의 최대 단점은 재료가 상당히 고가인 점과 강섬유 자체의 리바운드량이 많다는 점으로서 Ryan(1975)에 의하면 강섬유 자체의 리바운드율은 35~60% 정도인 것으로 보고되고 있다. 숏크리트용 섬유보강재의 종류별 특성 비교는 표 3.5.15와 같고, 숏크리트용 보강재의 종류별 특성비교는 표 3.5.16과 같다.

표 3.5.15 섬유보강재에 따른 특성비교

분류	종류	특성	비고
강섬유 (Steel Fiber)	원형 강섬유 평형 강섬유	휨강도, 인성,충격강도 증가 균열저감 및 피로저항증가	혼합시 Balling 현상 및 재료분리 발생
유리섬유 (Glass Fiber)	알칼리 저항 유리섬유 유기물 코팅 유리섬유	상동	Glass 재료만으로는 알칼리성에 약함
석면섬유 (Asbestos)	광물성 섬유	휨강도 증가	가격저렴 작업환경에 악영향
합성(유기)섬유 (Synthetic Organic Fiber)	Polypropylene, Polyester, Acryl 등	균열억제능력 및 마모 충격등에 우수	일반 Polyester 섬유는 알칼리성에 약함

표 3.5.16 숏크리트 보강재 비교

구분	Wire Mesh	Steel Fiber	Polypropylene Fiber	High Performance Polymer Fiber
재질	Steel	Steel	Polypropylene	Polyolepine
내산성	불량	불량	우수	우수
내알칼리성	보통	보통	우수	우수
내수성	불량(부식작용으로 Crack 및 Laminate 박리현상 발생)	불량(부식작용으로 Crack 및 Laminate 박리현상 발생)	우수	우수
사용효과	· 균열확산 억제 · 평면적 보강	· 수축균열 억제 · 균열확산 억제 · 충격파손 억제 · 휨강도 증대 · 인성 대폭증가 · 입체적 보강	· 수축균열 억제 · 균열 확산 억제 · 충격파손 억제 · 내구성 증대 · 인성다소 취약 · 입체적 보강 · 부착력 증가	수축균열 억제 균열 확산 억제 충격파손 억제 내구성 증대 인성 증가 입체적 보강 부착력 증가
분포성		· 혼합시 Balling 현상발표 · 균질분포어려움	· 다량 혼입시 작업성 저하	· 다량 혼입시 작업성 저하
시공성 및 안정성	자재취급 불편 설치장소까지 운반 필요 작업여건 불편 안전 유의 필요 적정 피복 어려움	작업 간편 숏팅시 Hose 파열 또는 Steel fiber의 bound로 인한 작업 인원의 위해 우려	· 작업 간편 ·자재취급/시공중 안정	· 작업 간편 · 재취급/시공중 안정
장비의 마모손상		숏팅 건 및 Hose의 마모손상 있음	장비 마모, 손상에 영향 없음	장비 마모 손상에 영향 없음

나. 시험 계획

(1) 사용재료

(가) 시멘트

숏크리트에 사용되는 시멘트는 사용목적 때문에 초기강도가 높고 균질한 것이 요구되며 KS L 5021, ASTM C 150, ASTM C 595 기준에 적합한 포틀랜드 시멘트가 많이 사용된다. 일반현장에서는 1종 보통포틀랜드 시멘트와 초속경 포틀랜드 시멘트가 사용될 수 있으며 조기강도 증진은 탈락(blasting)에 대한 저항성을 향상시킬 수 있다. 내황산염 시멘트는 토양 또는 토양수에 존재하는 황산염이 있는 지역에서 사용되어 진다. 염분의 영향을 받는 특수 조건에 노출되는 경우에는 고로시멘트와 같은 내구성이 높은 시멘트를 사용하는 것도 가능하다.

본 숏크리트 합성섬유 적용 성능시험에 사용된 시멘트는 레디믹스트 숏크리트 현장타설 시험시 사용하였던 시멘트와 동일한 것을 사용하여 시멘트 종류의 변화에 대한 오차를 줄여 일관성 있는 시험 결과 값을 확보하였다.

국내산 H사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물리·화학적 특성은 표 3.5.17과 같다.

표 3.5.17 시멘트의 물리적 성질

종류	비중	분말도	응결		안정도 (%)	압축강도(kgf/㎠)		
			초결 (분)	종결 (시간)		3일	7일	28일
물리적특성	3.15	3,267	210	5:15	0.09	219	271	397
화학적특성	강열 감량(%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Free CaO
	1.3	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7	1.0

(나) 레디믹스트 골재

골재는 일반 콘크리트와 마찬가지로 깨끗하고 내구적이고 적당한 입도를 가져야 하며 흙, 유기 불순물, 얇은 석편, 가늘고 긴 석편, 염분 등의 유해물 함량을 KS 규정 이상으로 함유해서는 안 되며, 알칼리 골재반응에 대해서도 안정한 것이어야 한다. 대부분 초기에 적용된 숏크리트에서는 굵은 골재가 없이 시멘트와 잔골재로 구성되어 높은 크리프와 수축변형량이 커져 결과적으로 균열발생 사례가 빈번하였다.

잔골재의 입도는 압축강도 및 리바운드율에 크게 영향을 주는데 굵은 입자의 함유량이 많으면 압축강도는 높아지는 반면 리바운드가 많아지고, 중간입자나 가는 입자의 함유량이 많아지면 리바운드는 적으나 압축강도가 낮아져서 양자를 동시에 만족시키기는 어렵다. 0.2mm 이하 미분의 첨가는 조건이 나쁜 시공 면에서도 잘 부착되도록 하고 리바운드도 적으며 비교적 두꺼운 층의 시공을 가능케 하는 반면 미분의 양이 많아지면 소요수량이 많아져서 건조 수축량을 증대시키고 시공기계 내부 혹은 호스 내부에서 막힘 현상이 발생할 수 있다.

레디믹스트용 골재는 국내 H사에서 분리/세척 및 건조작업을 거친 골재를 사용하여 상기와 같은 문제점을 해결하였으며, 입도조정은 ACI 및 유럽규격의 숏크리트 골재 입도기준에 맞게 초기 혼입량을 결정한 뒤 여러 번의 현장타설을 통해 재료분리, 타설성 및 압축강도 시험 값이 가장 양호한 결과를 나타낸 입도를 사용하였다. 레디믹스트 숏크리트 골재의 입자크기별 $1m^3$ 당 혼입량은 다음 표 3.5.18과 같으며, 입자 크기별 모양은 그림 3.5.39와 같다.

표 3.5.18 레디믹스트용 골재 혼입량(kg/m^3)

골재크기	S1	S2	S3	S4
Gmax=8mm	0~0.8mm	0.8~2.4mm	2.4~5.6mm	5.6~8mm
	537	325	310	325

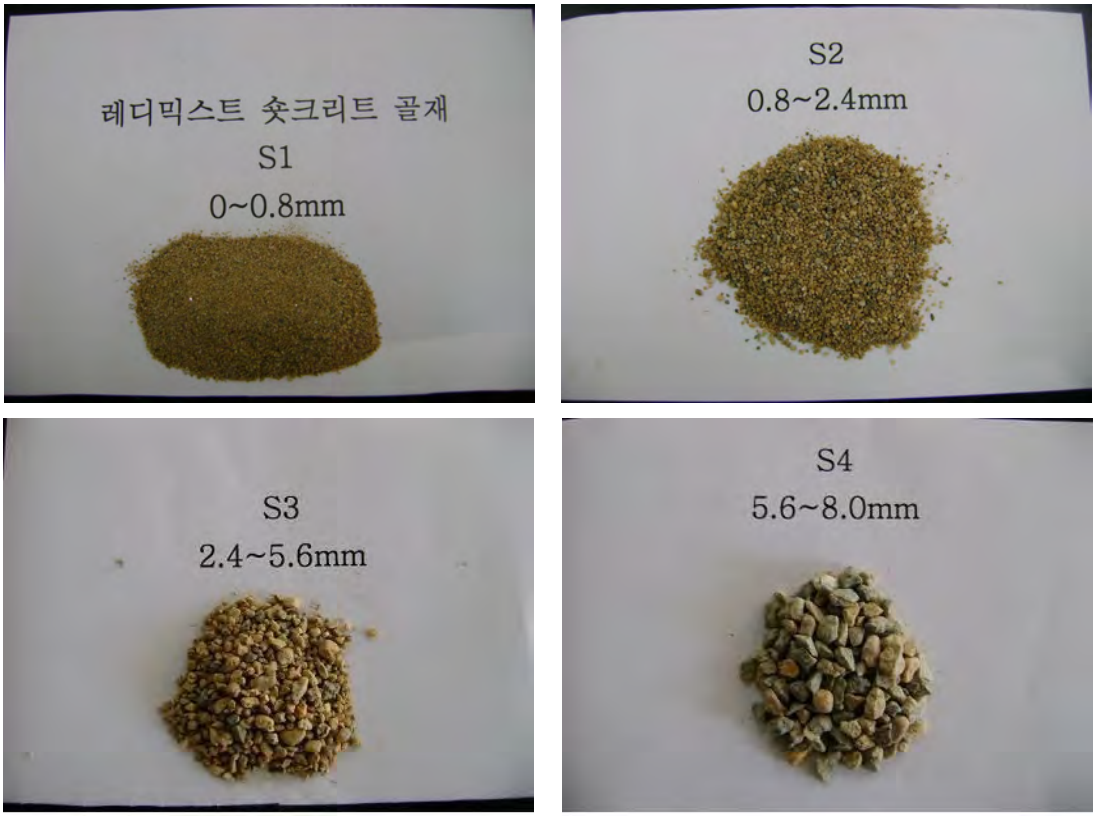


그림 3.5.39 레디믹스트용 골재

(다) 혼화재료

유동화제의 특징은 강도 증진 및 작업성 개선의 목적으로 사용하였으며, 강도증진 효과를 위하여 단위수량을 20~30% 줄일 수 있어 고강도 숏크리트 제조에 용이하다. 또한 고품질 숏크리트 생산에 있어 단위 수량 저감 및 타설성 향상에 매우 필수적인 혼화재료로서 분말형 레디믹스트 숏크리트에는 건식 혼합방법의 특성을 고려하여 분말형 유동화제를 혼입하여 제조하였다.

본 연구에서는 합성섬유 혼입별 성능 평가를 실시하기 위하여 기존 1차년, 2차년 혼화재 성능평가 시 사용하였던 액상형 유동화제(폴리카르본산계(Polycarbonate type) 고성능감수제)를 사용하였다. 사용량은 시멘트 중량의 0.85%를 사용하였으며, 유동화제를 고정하여 사용한 뒤 섬유혼입량 대비 슬럼프 변화에 대한 성상을 시험하였다. 본 연구에서 사용된 액상형 유동화제 및 현장타설에서 사용된 분말형 유동화제의 특성은 표 3.5.19와 같다.

표 3.5.19 [PNS-나프탈렌계]/PNS-Naphthalene type

형태 shape	색상 color	고형분 solid %	비중 S.G	pH	사용량 (CXwt%)
액상 liquid	암갈색 dark brown	Min 40%	1.19~1.23	8.0~10.0	0.5~2.5
분말 powder	연갈색 light brown	Min 92%	-	8.0~10.0	0.2~1.0

(라) 합성섬유

본 연구에서는 표 3.5.20과 같은 국내에서 생산/ 납품중인 구조용 합성섬유를 대상으로 실시하였다. 국내·외산의 폴리프로필렌 섬유보강재 중 단사형 6종, 폴리비닐알코올 섬유보강재 2종 및 비교군으로 강섬유 1종 등 총 9종의 보강섬유를 KS 시험 규격에 준하여 압축강도, 휨강도 및 휨인성 시험을 실시하였다.

표 3.5.20 실험에 사용된 보강섬유의 종류 및 특성

섬유구분	재질	형상	길이 (mm)	탄성계수 (GPa)	권장사용량 (kg/m3)
CP-A	PP	8자노즐 절곡형	30	10~12	4~9
CP-B	PP	일반원형노즐 절곡형	30	10~12	4~9
CP-C	PP	8자노즐 절곡형(개량)	40	10~12	4~9
CP-D	PP	일반원형노즐 절곡형(개량)	40	10~12	4~9
CV-A	PVA	절곡형	20	10~15	2~4
CV-B	PVA	절곡형	30	10~15	2~4
HP-S	PP	절곡형	35	4~6	4~7
HP-L	PP	절곡형	50	4~6	4~7
Steel fiber	Steel	후크형	30	200	40

다. 1차 합성섬유 혼입 시험

(1) 1차시험 배합표

시멘트 매트릭스에 섬유보강재를 사용하는 것은 기본적으로 시멘트 경화체의 기계적 성질, 특히 인장강도와 인성을 개선시키기 위한 것이 목적이나 섬유의 길이, 섬유의 혼입율에 따라 그 정도의 차이가 있고, 특히 섬유가 매트릭스에 혼입되어 균일하게 분산되는 분산성에 따라 크게 좌우 된다. 따라서 본 연구에서는 실내시험을 통해 보강용 합성섬유의 성능평가를 실시하기 위하여 시멘트, 골재, 단위수량 및 유동화제를 고정한 뒤 섬유 혼입량만을 변수로 하여 시 현장에서 가장 경제적이고 요구 강도에 적합한 배합설계를 선정하고자 하였다.

국내에서 생산 및 판매중인 대표적인 합성섬유를 선택하여 적정 혼입량 별로 단계를 두어 배합시험을 실시하였다. C사의 폴리프로필렌 및 폴리비닐알코올 합성섬유의 경우 권장사용량을 참고하여 3단계로 구분을 두어 시험을 실시하였으며, H사의 폴리비닐알코올 합성섬유의 경우도 마찬가지로 3단계로 혼입량을 조절하여 시험을 실시하였다. 강섬유의 경우에는 일반적으로 혼입되는 권장 혼입량인 40kg/m^3로 배합을 실시하여 비교군으로 활용하였다. 각 보강섬유의 혼입량 구분은 표 3.5.21에 나타냈으며, 1차시험 배합비는 다음 표 3.5.22와 같다.

표 3.5.21 합성섬유 혼입량 시험 인자 및 수준(1차시험)

배합명	적정혼입량	1차시험 배합적용
CP-A	4~9kg/m^3	4,6,8kg/m^3
CP-B	4~9kg/m^3	4,6,8kg/m^3
CV-A	2~4kg/m^3	3,4,5kg/m^3
CV-B	2~4kg/m^3	3,4,5kg/m^3
HP-S	4~7kg/m^3	4,5,6kg/m^3
HP-L	4~7kg/m^3	4,5,6kg/m^3

표 3.5.22 합성섬유 혼입량 시험 배합표(1차시험)

배합명	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재 (kg)				합성 섬유 (kg/m^3)	액상형 유동화 제 (kg)
						S1	S2	S3	S4		
CP-A1	8	12	45.6	212	465	537	325	310	325	4	3.95
CP-A2										6	
CP-A3										8	
CP-B1										4	
CP-B2										6	
CP-B3										8	
CV-A1	8	12	45.6	212	465	537	325	310	325	3	
CV-A2										4	
CV-A3										5	
CV-B1										3	
CV-B2										4	
CV-B3										5	
HP-S1	8	12	45.6	212	465	537	325	310	325	4	
HP-S2										5	
HP-S3										6	
HP-L1										4	
HP-L2										5	
HP-L3										6	
Steel	8	12	45.6	212	465	537	325	310	325	40	

표 3.5.23 골재 크기에 의한 구분

골재크기	S1	S2	S3	S4
Gmax=8mm	0~0.8mm	0.8~2.4mm	2.4~5.6mm	5.6~8mm

(2) 시험체 제작

본 연구에서 수행한 섬유혼입량 시험은 섬유 혼입량에 의한 휨인성 변화 정도의 기초 데이터를 확보하기 위한 목적으로 실시하였다. 따라서 실내에서 급결제를 사용하지 않고 시험을 실시하였으며, 각 재료의 투입순서 및 사전 믹싱 시간은 레디믹스트 모르타르(섬유혼입) 제조 공법을 참고하여 실시하였다(그림 3.5.40). 배합시

섬유 혼입량에 따른 슬럼프 변화를 측정하였으며, 양생은 숏크리트 현장을 고려하여 KS 기준에 준하는 기건양생을 실시하였다. 시험체는 각 배합별로 압축강도, 휨강도 및 휨인성 공시체를 제작한 후, 압축강도는 재령 1일, 7일, 28일을 측정하였으며, 휨강도 및 휨인성은 재령 28일째 측정을 실시하였다. 그림 3.5.41은 1차 섬유보강 숏크리트의 배합시험 모습을 나타낸 것이다.



그림 3.5.40 숏크리트의 혼합순서



그림 3.5.41 섬유보강 숏크리트 배합시험 모습

(3) 시험결과

(가) 슬럼프

시멘트, 골재, 단위수량, 고성능 유동화제를 고정한 뒤 섬유의 첨가에 따라 유동성의 변화를 측정하였다. 각 섬유 종류별 혼입량이 각각 다르므로 각 제품마다 초기 혼입량을 기준으로 하여 슬럼프 감소율을 구하여 각제품 혼입량 증가에 따른 슬럼프 감소율을 측정하였다.

표 3.5.24 슬럼프 시험결과

배합명	CP-A1	CP-A2	CP-A3	CP-B1	CP-B2	CP-B3
슬럼프 (cm)	11.6	10.5	9.8	12.2	11.8	10.6
슬럼프 감소율(%)	0	9.5	15.5	0	3.3	13.1
배합명	CV-A1	CV-A2	CV-A3	CV-B1	CV-B2	CV-B3
슬럼프 (cm)	10.9	9.2	8.2	10.2	9.6	8.8
슬럼프 감소율(%)	0	15.6	24.8	0	5.9	13.7
배합명	HP-S1	HP-S2	HP-S3	HP-L1	HP-L2	HP-L3
슬럼프 (cm)	12.5	11.5	10.2	11.2	9.5	8.5
슬럼프 감소율(%)	0	8.0	18.4	0	15.2	24.1

섬유를 각 제품별로 2~9 kg 까지 첨가율을 다르게 하여 측정한 배합의 슬럼프 시험결과를 표 3.5.24 및 그림 3.5.42 에 나타내었다. CP 계열은 폴리프로필렌 보강섬유로서 혼입량이 4kg에서 8kg까지 증가할수록 슬럼프 감소율이 최대 15.5%로 나타났으며 슬럼프 저하율도 거의 선형적으로 감소하고 있었다. 이는 소수성을 지니는 섬유 특성상 섬유 혼입량에 의한 슬럼프 저하현상만 발생된 것으로 판단된다.

CV계열은 폴리비닐알코올 보강섬유로서 혼입율 3kg에서 5kg까지 증가할수록 최대 24.8% 슬럼프 감소율을 나타내었다. 폴리비닐알코올 계열의 합성섬유는 친수성

계열로서 섬유의 혼입량에 따른 슬럼프 감소 뿐만 아니라 섬유자체가 단위수량을 흡수함으로서 슬럼프 저하가 급격이 발생한 것으로 사료된다.

HP계열은 CP와 마찬가지로 폴리프로필렌계열로서 소수성의 섬유이지만 섬유길이가 35mm에서 50mm로 길어짐에 따라 유동성 저하를 발생시켜 슬럼프 저하율이 HP-L3배합에서 24.1%로 다소 크게 나타났다.

본 연구에서 도출된 슬럼프 저하율 및 유동화제 혼입량은 추후 최종 제품 생산에 사용되는 섬유의 종류 및 혼입량을 결정 한 뒤 분말형 유동화제 혼입량 산정시 필수 설계 인자 데이터로 활용하였다.

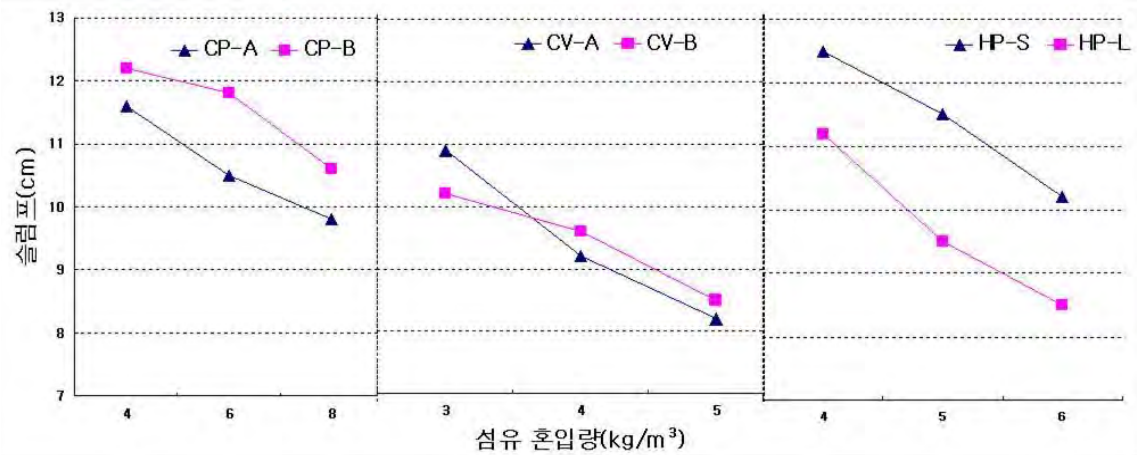


그림 3.5.42 섬유 혼입량 별 슬럼프 감소량(1차시험)

(나) 압축강도

합성섬유의 사용에 따른 강도의 영향은 휨과 압축강도에서 약간의 차이를 나타낸다. 섬유가 혼입되면 일반적으로 강도의 증가는 거의 없거나 약간 증가한다는 연구결과가 보고되고 있고, 섬유의 사용량이 많아지면 섬유의 압축성과 섬유의 첨가에 따른 공극의 증가로 강도특성은 감소하는 경향이 나타난다고 보고되고 있다.

본 연구에서는 각 제품의 권장량을 사용함으로서 강도저하의 우려는 없는 것으로 판단되나, 일정량 이상 증가시 강도저하 현상이 발생할 수 있는 가능성이 있기 때문에 검증 시험 차원에서 압축강도 시험도 병행하여 수행하였다. 압축강도는 1일, 7일, 28일 재령에 실시하였으며 압축강도 시험결과는 다음 표 3.5.25 및 그림3.5.43에 나타나 있다.

표 3.5.25 섬유 종류별 압축강도 시험결과

재령 / 배합	압축강도 (MPa)		
	1일	7일	28일
CP-A1	15.6	27.1	37.7
CP-A2	15.0	28.6	38.6
CP-A3	14.6	28.0	37.9
CP-B1	14.8	29.6	40.2
CP-B2	16.2	30.6	41.5
CP-B3	15.8	28.5	39.6
CV-A1	14.2	27.1	38.9
CV-A2	15.5	29.6	40.2
CV-A3	15.9	30.5	41.5
CV-B1	14.5	26.5	38.1
CV-B2	14.0	28.6	40.5
CV-B3	13.7	28.9	42.0
HP-S1	14.0	28.1	37.9
HP-S2	15.2	27.9	39.6
HP-S3	14.8	28.0	38.4
HP-L1	15.9	30.2	38.2
HP-L2	15.0	30.9	39.0
HP-L3	15.5	29.4	37.4
Steel	16.0	27.4	38.0

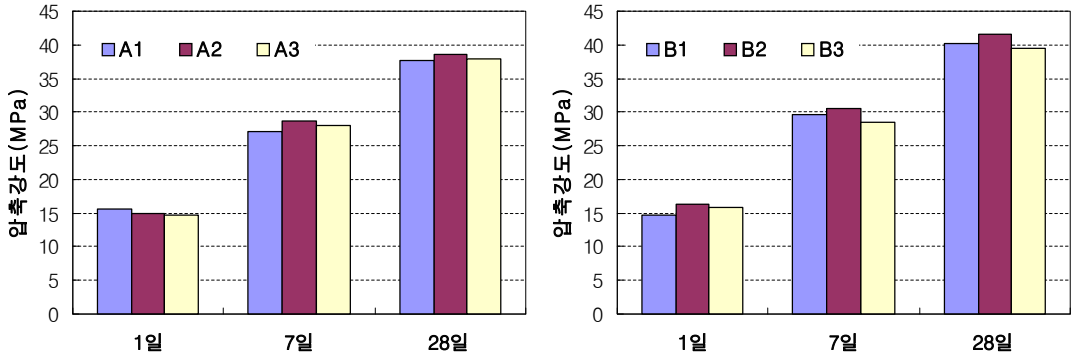


그림 3.5.43 CP 계열 압축강도 시험결과

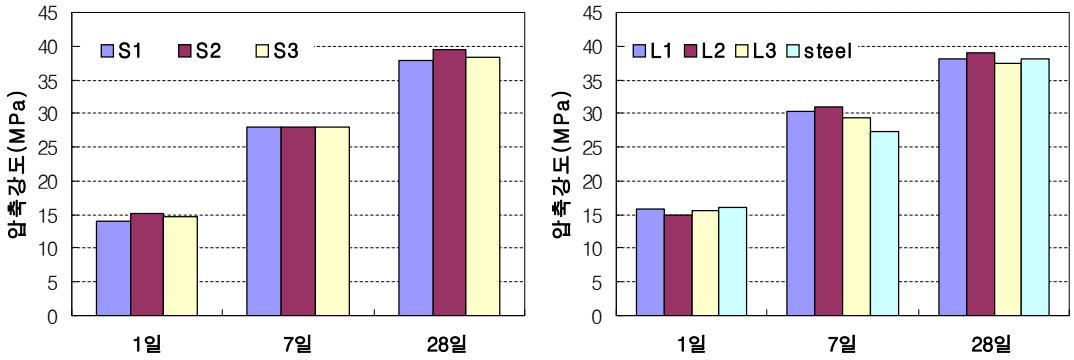


그림 3.5.44 HP 계열 압축강도 시험결과

합성섬유 혼입율이 증가할수록 압축강도의 저하가 일어나는 임계 합성섬유 혼입량을 도출하기 위하여 압축강도 시험을 실시하였다. 혼입율별 시험결과 CP 및 HP 계열인 폴리프로필렌 합성섬유의 압축강도 발현은 그림 3.5.43 및 그림 3.5.44를 보면, 혼입율이 증가할수록 강도 저하현상은 나타나지 않았다. 또한 제품별 압축강도 특성도 비슷한 결과를 나타내어 폴리프로필렌 합성섬유 권장 혼입량 이내에서 최적 혼입량을 결정한다면 압축강도 저하 현상은 나타나지 않을 것으로 판단된다.

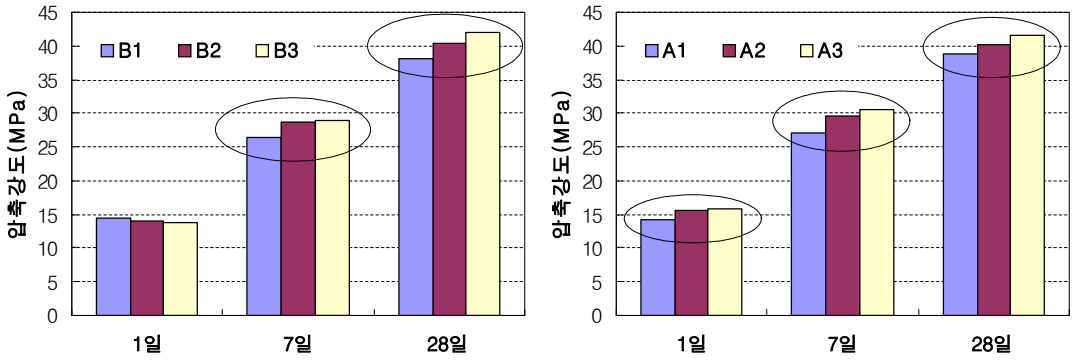


그림 3.5.45 CV 계열 압축강도 시험결과

폴리비닐알코올 계열 합성섬유의 압축강도 시험결과를 나타낸 것이 그림 3.5.45 이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 혼입량이 증가 할 수록 압축강도가 조금씩 증가하는 경향을 보였다. 이는 친수성 계열인 합성섬유의 혼입에 의해 배합수가 다소 흡수되어 상대적으로 단위수량이 작아지는 결과로 발생하는 현상으로 판단된다.

(다) 휨강도 및 휨인성

합성섬유 보강 숏크리트의 휨강도 특성은 섬유가 보강되지 않은 숏크리트에 비하여 10%정도의 휨강도 증진이 관찰되는 것이 일반적이다. 이와 같은 결과는 섬유를 첨가하지 않은 숏크리트의 경우 일정한 변형이후에 파괴되어 하중에 대한 저항능력을 상실하지만, 섬유를 첨가하면 균열이후에도 어느 정도의 하중저항에 대하여 저항능력을 상실하지 않고 유지하고 있다가, 섬유의 뽑힘 혹은 단락으로 저항능력이 상실하기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

본 연구에서는 각 제품의 권장량을 사용하여 휨인성 시험을 수행하였으며, 제품 별, 혼입량별 휨강도/등가휨강도 및 휨인성 지수를 평가함으로서 레디믹스트 숏크리트에 적용할 최적 합성섬유의 종류를 선택하고 및 혼입량을 결정하는데 중요 데이터로 활용하고자 한다. 섬유의 종류별 휨강도 시험결과는 표 3.5.26에 나타나 있다.

표 3.5.26 섬유 종류별 휨강도 시험결과

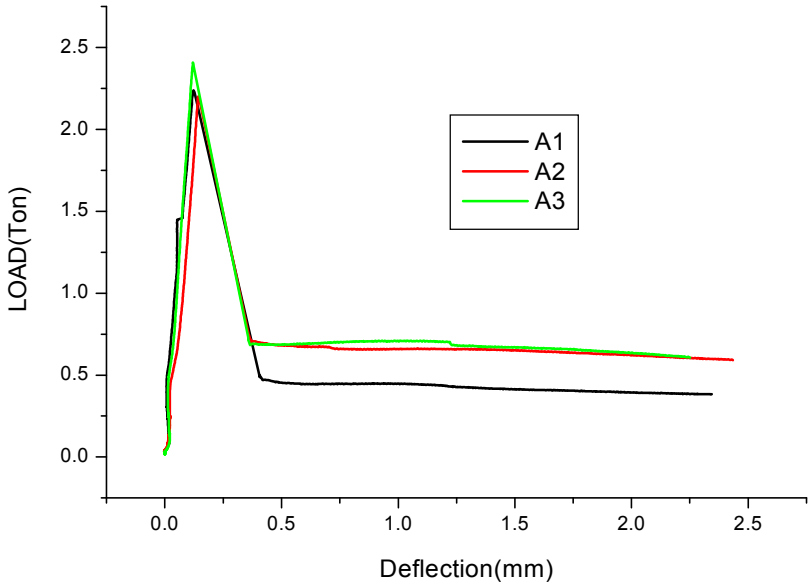
	휨강도 평균	등가휨강도 평균	%	휨인성지수 평균		
				I5	I10	I20
CP-A1	5.78	1.74	30.14	3.37	4.55	6.75
CP-A2	5.89	1.95	33.18	3.27	4.85	7.85
CP-A3	5.94	2.10	35.28	3.50	5.08	8.26
CP-B1	4.62	1.44	31.09	3.58	5.32	8.78
CP-B2	5.38	1.96	36.37	3.31	4.76	7.67
CP-B3	**5.26**	**2.25**	**42.82**	**3.32**	**5.09**	**8.74**
CV-A1	**4.93**	**1.06**	**21.50**	**3.30**	**4.43**	**5.95**
CV-A2	5.34	1.05	19.68	3.95	5.19	6.98
CV-A3	5.49	1.26	22.88	3.26	4.98	6.95
CV-B1	5.09	1.29	25.27	3.71	5.25	7.79
CV-B2	5.15	1.98	38.39	3.09	4.51	7.40
CV-B3	5.35	1.85	34.49	3.57	5.14	8.19
HP-S1	5.58	1.37	24.62	4.56	5.72	7.91
HP-S2	5.64	1.63	28.97	2.90	4.26	6.42
HP-S3	5.65	1.59	28.13	4.40	5.84	8.67
HP-L1	5.82	1.91	32.87	4.09	6.91	12.18
HP-L2	5.54	1.88	33.90	3.35	4.91	7.57
HP-L3	5.27	2.07	39.33	3.69	5.16	8.31
Steel	**5.49**	**4.37**	**79.66**	**4.43**	**8.84**	**16.69**

휨강도 시험결과 모든 배합에서 4.5MPa 이상을 나타내어 휨강도 특성은 모두 만족하는 것으로 나타났다. 휨강도는 4.62MPa~5.89Mpa 범위를 나타내었으며, 제품별 차이 및 합성섬유 혼입율 증가에 따른 휨강도의 상관성은 나타나지 않았다.

휨인성의 경우 KS품질기준인 등가휨강도 68%를 모든 합성섬유 배합에서 만족하지 못하는 것으로 나타났으며, 실내시험 결과를 토대로 분석한 결과 현장 타설시에는 급결제 혼입 및 타설장비의 특성상 섬유의 분산성이 고르지 못한 점을 감안할 때 본 연구에서의 결과보다 다소 적은 값이 나타날 것으로 판단된다.

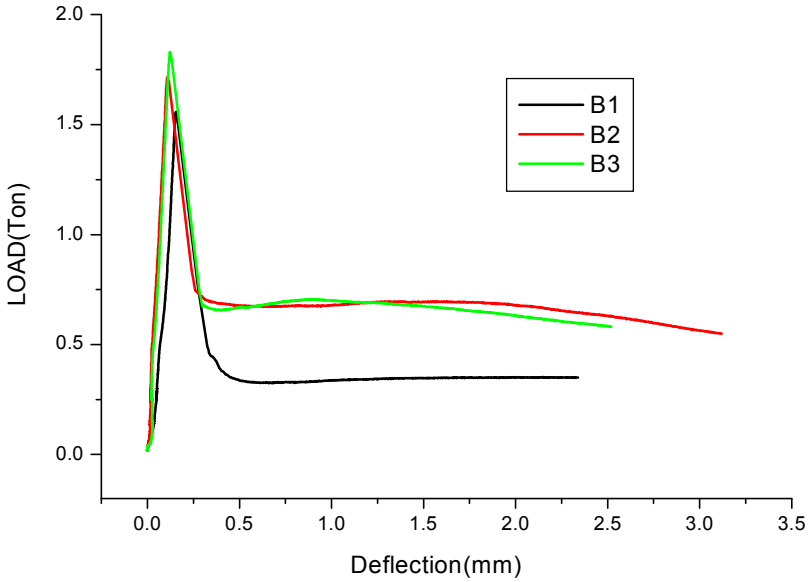
1차 배합시험의 결과를 살펴보면 각 제품별로 혼입율 증가에 따른 휨인성 증가가 다소 나타나기는 하였으나, KS기준을 만족하기에는 등가 휨강도의 20% 이상의 증가가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 1차시험에서 혼입한 섬유량보다 증가시킨 배합으로 2차 시험을 실시하였으며, KS 기준을 만족시키는 제품의 선택 및 최적 합성섬유 혼입량을 결정하기로 하였다. 그림 3.5.46은 제품 및 섬유 혼입량별 휨인성 그래프를 나타낸 것이다.

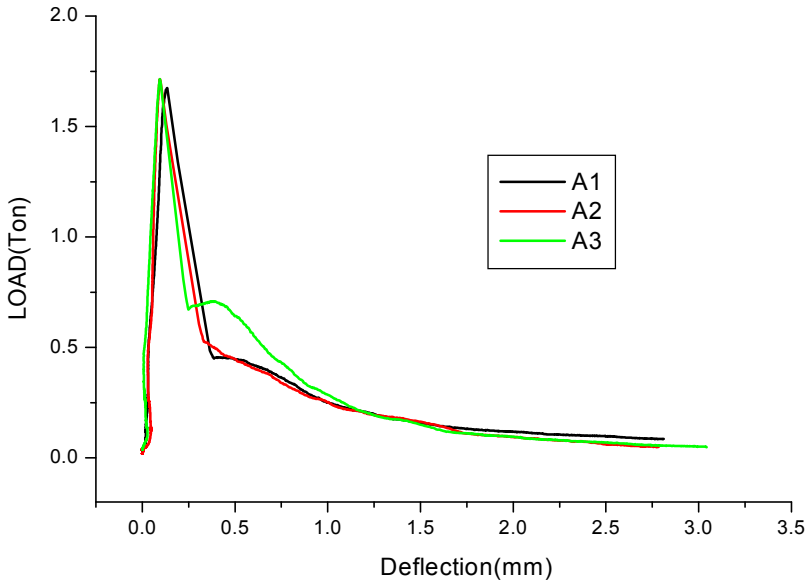


(a)

그림 3.5.46 CP 계열 휨인성 시험결과

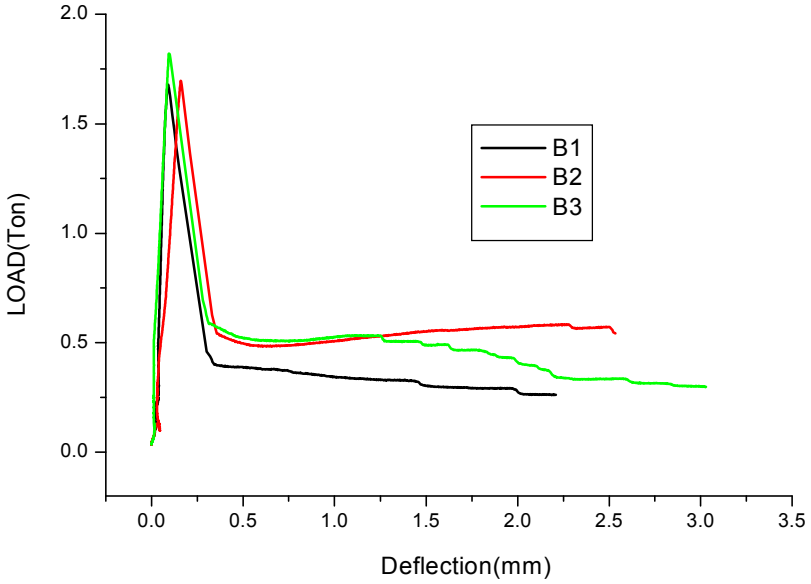


(b)

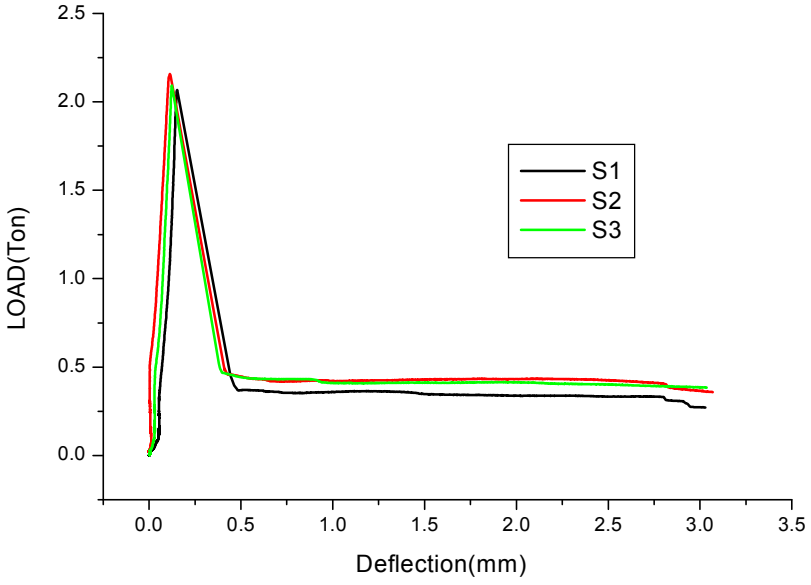


(c)

그림 3.5.46 CP 계열 휨인성 시험결과(계속)

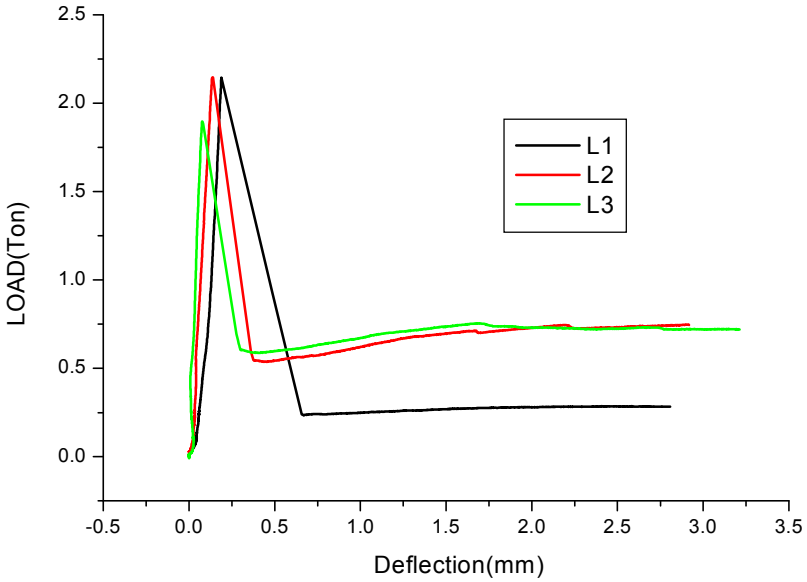


(d)



(e)

그림 3.5.46 CP 계열 휨인성 시험결과(계속)



(f)

그림 3.5.46 CP 계열 휨인성 시험결과(계속)

(라) 고찰

본 장에서는 국내 생산 및 판매되는 합성섬유를 선별하여 길이 및 혼입량에 의한 숏크리트 기본 물성 평가를 실시하였다.

○ 슬럼프 저하의 경우 PP 섬유군에서는 일정한 상관성이 나타나지 않았으나, 혼입량이 증가할수록 다소 슬럼프가 저하되는 경향을 보였다. PVA 섬유군에서는 슬럼프 감소율이 다소 크게 나타났는데 이는 PVA 섬유특성상 친수성 계열로서 섬유의 혼입량에 따른 슬럼프 감소뿐만 아니라 섬유자체가 단위수량을 흡수함으로서 슬럼프 저하가 급격이 발생한 것으로 보이며 레디믹스트 숏크리트에 PVA 섬유를 사용시 유동화제 혼입량 산정에 각별한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

○ 압축강도의 경우 PVA 계열의 합성섬유일때 혼입량이 많아질수록 압축강도가 다소 증진되는 경향을 보였으며, PP계열 군에서는 길이 및 혼입량 변화에 의한 압축강도 변화 현상은 발견 되지 않았다.

○ 휨인성 시험결과 각 제품 모두 권장 혼입량내에서는 KS 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 그림 3.5.47을 보면 각 제품별로 최대 휨인성 수치를 나타낸 것과 최소 휨인성 수치를 나타낸 것으로서 비교군인 강섬유와 비교할 때 매우 낮은 휨인성 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 추후 보완시험이 필수적이라 판단하여, 권장 혼입량 보다 많게는 2배 이상의 섬유를 혼입하여 2차시험을 실시 하기로 하였다.

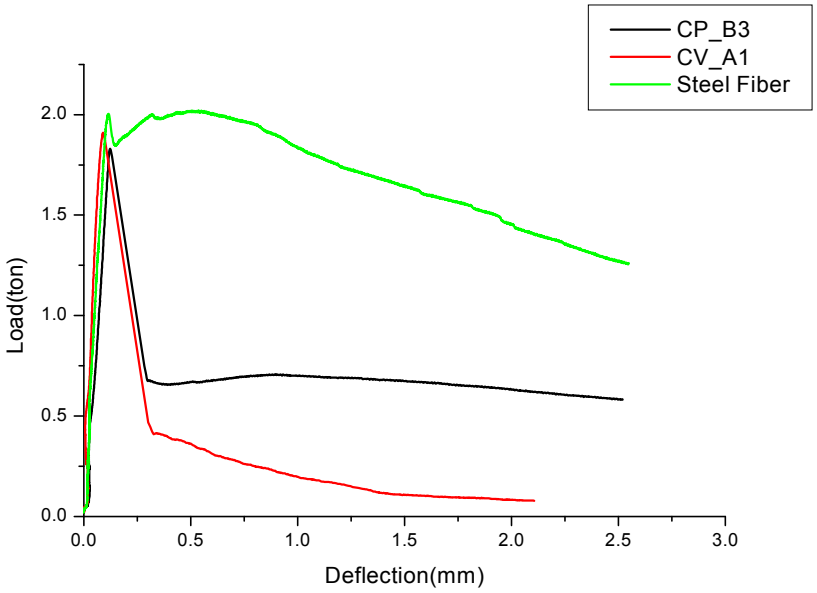


그림 3.5.47 섬유 종류별 휨인성 비교(최고_최저 비교값)

라. 2차 합성섬유 혼입 시험

(1) 2차시험 배합표

1차시험에서 모든 제품의 길이 및 혼입량에 의한 휨인성의 결과가 KS 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타나, 본 시험에서는 혼입량을 최대 2배정도 증가 시켜 2차 시험을 실시하였다. 또한 국내 C사의 PP계열의 합성섬유를 단위 체적당 개체수를 증가시키기 위하여 40mm의 길이 및 두께를 감소시킨 CP-C종 및 CP-D종을 추가로 시험을 실시하였다. 또한 혼입량 증대에 따른 유동화제 혼입량 관련 예비시험을 거쳐 시멘트 중량 대비 1%로 증가시켜 4.65kg/m^3을 혼입하여 배합시험을 실시하였다. 2차혼입시험의 보강섬유의 혼입량 구분은 표 3.5.27 에 나타냈으며, 2차시험 배합비는 다음 표 3.5.28과 같다.

표 3.5.27 합성섬유 혼입량 시험 인자 및 수준(2차시험)

배합명	1차시험 배합적용(kg/m^3)	**2차시험 배합적용(kg/m^3)**
CP-A	4,6,8	**10,12,14**
CP-B	4,6,8	**10,12,14**
CP-C(신규)	-	**10,12,14**
CP-D(신규)	-	**10,12,14**
CV-A	3,4,5	**6,8,10**
CV-B	3,4,5	**6,8,10**
HP-S	4,5,6	**8,10,12**
HP-L	4,5,6	**8,10,12**

표 3.5.28 합성섬유 혼입량 시험 배합표(2차시험)

배합명	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재 (kg)				합성 섬유 (kg/m^3)	액상형 유동화 제 (kg)
						S1	S2	S3	S4		
CP-A4	8	12	45.6	212	465	537	325	310	325	10	4.65
CP-A5										12	
CP-A6										14	
CP-B4										10	
CP-B5										12	
CP-B6										14	
CP-C4	8	12	45.6	212	465	537	325	310	325	10	
CP-C5										12	
CP-C6										14	
CP-D4										10	
CP-D5										12	
CP-D6										14	
CV-A4	8	12	45.6	212	465	537	325	310	325	6	
CV-A5										8	
CV-A6										10	
CV-B4										6	
CV-B5										8	
CV-B6										10	
HP-S4	8	12	45.6	212	465	537	325	310	325	8	
HP-S5										10	
HP-S6										12	
HP-L4										8	
HP-L5										10	
HP-L6										12	
Steel	8	12	45.6	212	465	537	325	310	325	40	

(2) 시험체 제작

2차 합성섬유 혼입시험은 1차 시험때와 동일한 재료 및 방법으로 시험체를 제작하였다. 혼입방법 및 시험항목도 통일하여 상관성을 유지하였다.

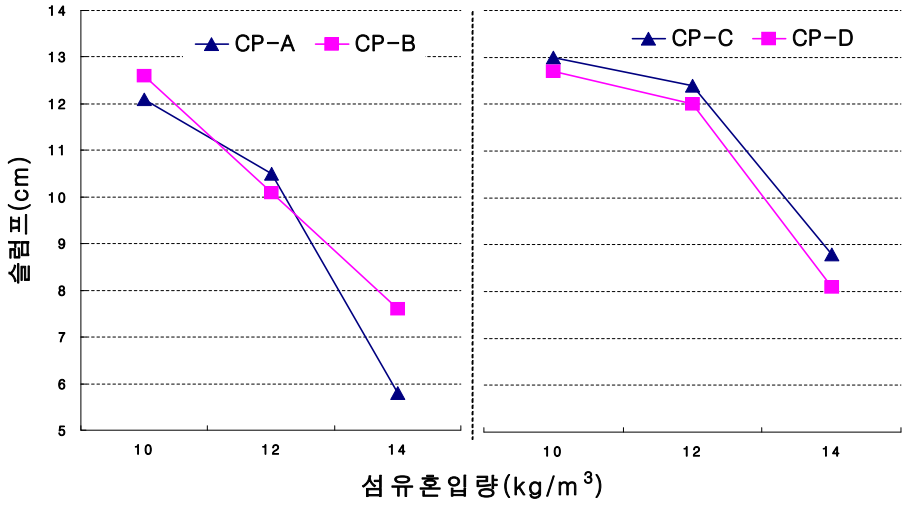
(3) 시험결과

(가) 슬럼프

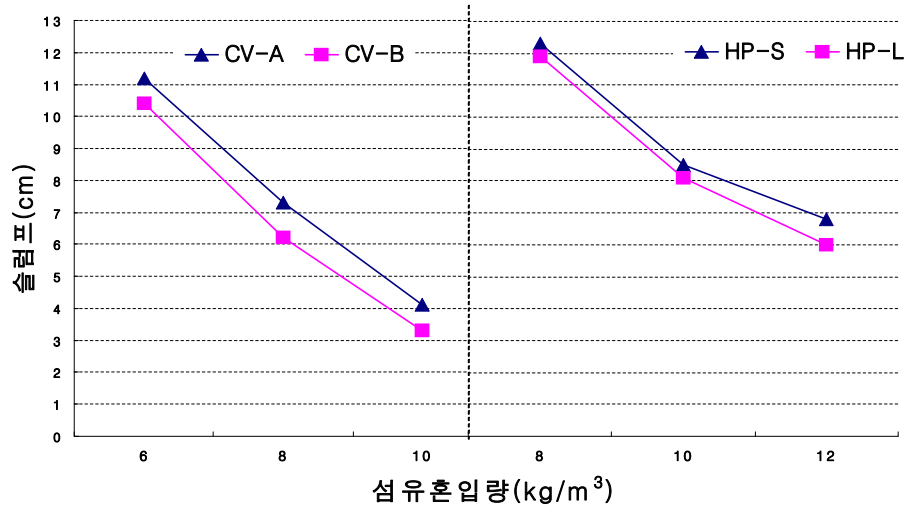
1차 시험과 동일하게 시멘트, 골재, 단위수량, 고성능 유동화제를 고정한 뒤 섬유의 첨가에 따라 유동성의 변화를 측정하였다. 각 제품 혼입량 증가에 따른 슬럼프 감소율 결과는 표 3.5.29 와 같다.

표 3.5.29 슬럼프 시험결과

배합명	CP-A4	CP-A5	CP-A6	CP-B4	CP-B5	CP-B6
슬럼프 (cm)	12.1	10.5	5.8	12.6	10.1	7.6
슬럼프 감소율(%)	0	13.2	52.1	0	19.8	39.7
배합명	CP-C4	CP-C5	CP-C6	CP-D4	CP-D5	CP-D6
슬럼프 (cm)	13.0	12.4	8.8	12.7	12.0	8.1
슬럼프 감소율(%)	0	4.6	32.3	0	5.5	36.2
배합명	CV-A4	CV-A5	CV-A6	CV-B4	CV-B5	CV-B6
슬럼프 (cm)	11.2	7.3	4.1	10.4	6.2	3.3
슬럼프 감소율(%)	0	34.8	63.8	0	40.4	68.3
배합명	HP-S4	HP-S5	HP-S6	HP-L4	HP-L5	HP-L6
슬럼프 (cm)	12.3	8.5	6.8	11.9	8.1	6.0
슬럼프 감소율(%)	0	30.9	44.7	0	31.9	49.6



(a)



(b)

그림 3.5.48 섬유 혼입량 별 슬럼프 감소량(2차시험)

섬유를 각 제품별로 6~14 kg 까지 첨가율을 다르게 하여 측정한 배합의 슬럼프 시험결과를 그림 3.5.48에 나타내었다. CP 계열은 초기 혼입량 4,6,8kg일때 보다 10, 12, 14kg이 혼입되었을시 슬럼프 저하율이 32.3~52.1% 까지 다양하게 나타나 섬유량이 일정량 증가할 때 슬럼프 감소율은 선형적이지 않고 급격이 떨어지는 패턴을 보였다. PVA 계열에서는 슬럼프 저하율이 68.3%까지 떨어서 유동화제 선택 및 혼입량 결정에 있어 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.

2차 혼입배합시 추가로 실시된 CP-C, CP-D 섬유의 경우 슬럼프 저하율이 12kg 까지는 안정된 저하율을 보이다가 14kg 혼입시에는 급격히 감소하는 경향을 나타내었다.

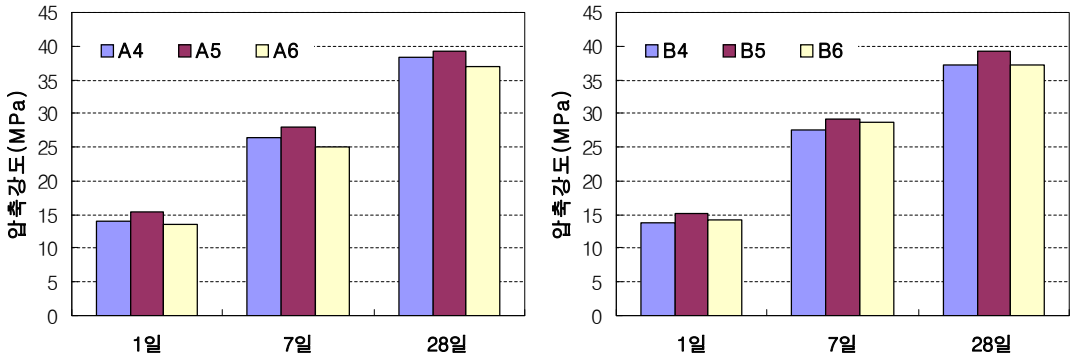
섬유 종류 및 길이에 관계없이 1차 시험때와 비슷한 양상을 보였으나, 합성섬유의 혼입량이 많아지면서 슬럼프 저하율이 급격히 저하되는 지점이 각 제품마다 상이하였다. 이러한 결과를 바탕으로 분말형 유동화제 선택시 예비시험을 통한 적정 슬럼프 관리가 매우 중요한 요소로 판단된다.

(나) 압축강도

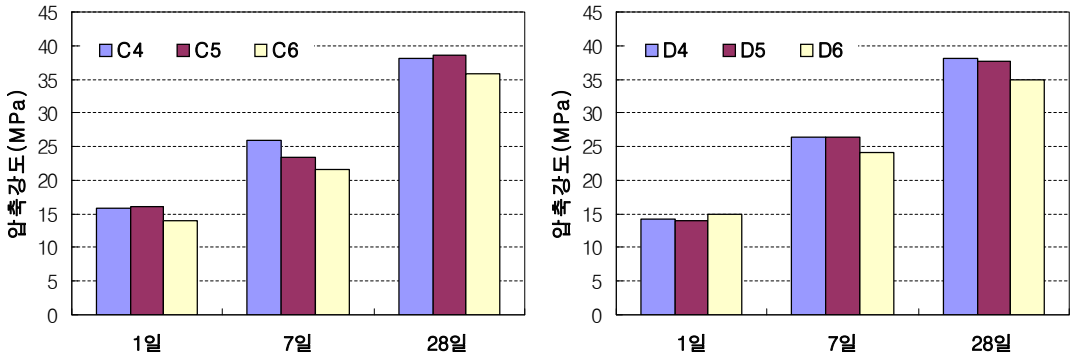
본 2차 시험에서는 각 제품마다 일정 혼입 이상량에서의 압축 강도 저하의 정도를 알아보기 위하여 재령 1일, 7일, 28일 재령에 실시하였으며 압축강도 시험결과는 다음 표 3.5.30 및 그림 3.5.49~3.5.51 에 나타나 있다.

표 3.5.30 섬유 종류별 압축강도 시험결과

재령 / 배합	압축강도 (MPa)		
	1일	7일	28일
CP-A4	14.1	26.3	38.4
CP-A5	15.4	27.9	39.2
CP-A6	13.6	25.0	36.9
CP-B4	13.8	27.5	37.2
CP-B5	15.2	29.1	39.3
CP-B6	14.2	28.6	37.1
CP-C4	15.9	25.9	38.1
CP-C5	16.0	23.5	38.5
CP-C6	14.0	21.5	35.9
CP-D4	14.2	26.4	38.1
CP-D5	14.0	26.3	37.6
CP-D6	14.9	24.1	34.9
CV-A4	13.2	26.1	37.1
CV-A5	14.3	28.6	37.2
CV-A6	15.1	29.6	37.4
CV-B4	14.1	27.3	38.1
CV-B5	14.7	29.6	41.3
CV-B6	13.5	29.1	42.9
HP-S4	12.9	28.5	39.1
HP-S5	14.2	27.2	39.3
HP-S6	14.2	27.8	39.5
HP-L4	14.0	30.2	39.0
HP-L5	15.8	31.9	39.1
HP-L6	14.5	30.2	39.6
Steel	15.8	29.4	40.1



(a)



(b)

그림 3.5.49 CP 계열 압축강도 시험결과

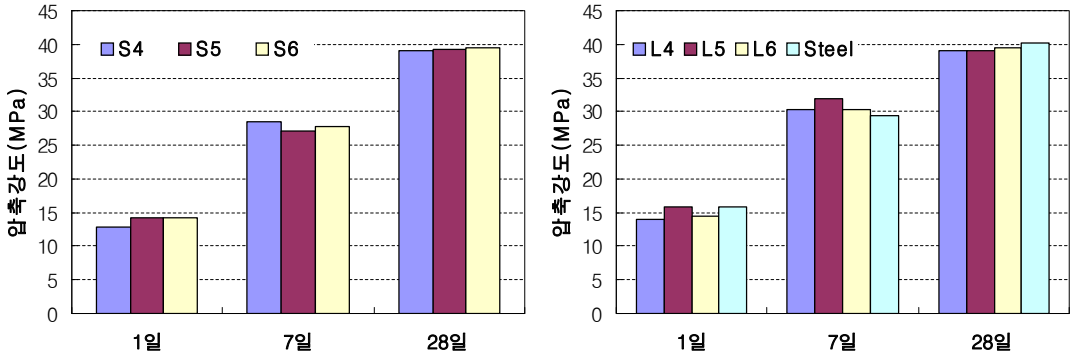


그림 3.5.50 HP 계열 압축강도 시험결과

CP 계열 PP섬유의 경우 1차시험에서의 혼입량 4~8kg/m^3 의 경우에서는 압축강도 저하 현상이 발생하지 않았으나, 10~14kg/cm^3 배합의 2차시험의 경우 14kg에서 압축강도 저하 현상이 발생하였다. 이는 섬유의 사용량이 많아지면서 섬유의 압축성과 섬유의 첨가에 따른 공극의 증가로 인해 강도 저하 경향이 나타난 것으로 판단된다. CP계열 PP 섬유를 14kg이상을 사용하려면, 압축강도 배합 설계시 강도 저하에 대한 부분을 반영하여 배합설계를 실시하여야 강도저하에 따른 압축강도 기준을 만족 시킬 수 있을 것이라 판단된다.

HP 계열의 최대혼입량은 12kg으로서 CP계열의 14kg보다 적은 량으로 배합시험을 실시하였다. 시험결과 12kg이내에서까지는 압축강도 감소 현상이 발견되지 않았으나 14kg 이상의 배합에서는 강도 저하가 발생될 가능성이 매우 클 것으로 사료된다.

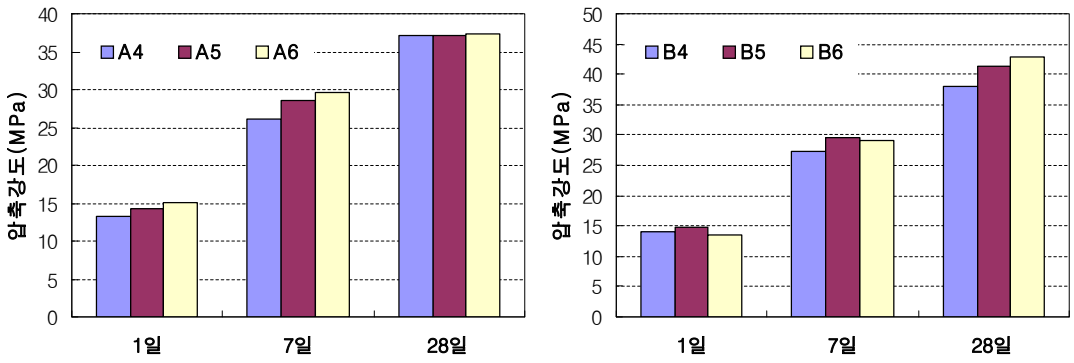


그림 3.5.51 CV 계열 압축강도 시험결과

PVA 계열 합성섬유의 압축강도 시험결과를 나타낸 것이 그림 3.5.51 이다. 혼입량이 증가할수록 슬럼프 저하율이 급격해진 반면 압축강도는 서서히 증가하는 것으로 나타났다. 이는 1차 시험에서와 마찬가지로 친수성 계열인 합성섬유의 혼입에 의해 배합수가 다소 흡수되어 상대적으로 단위수량이 적어져 발생되는 결과라 판단된다.

(다) 휨강도 및 휨인성

본 연구에서는 1차시험에 이어 추가적으로 섬유 혼입량을 증대시켜 휨인성 시험을 수행하였으며, 섬유 종류별 휨강도 시험결과는 표 3.5.31에 나타나 있다.

표 3.5.31 섬유 종류별 휨강도 시험결과

	휨강도 평균	등가휨강도 평균	%	휨인성지수 평균		
				I5	I10	I20
CP-A4	5.15	2.73	53.18	3.52	6.00	10.80
CP-A5	5.12	2.94	57.36	3.76	6.69	12.51
CP-A6	5.63	3.91	70.46	4.13	8.58	16.80
CP-B4	4.88	2.91	59.29	3.98	6.50	11.54
CP-B5	5.21	3.65	71.06	3.65	6.35	11.98
CP-B6	**4.70**	**3.80**	**81.68**	**3.89**	**7.23**	**14.51**
CP-C4	4.97	3.53	71.58	2.96	6.94	15.18
CP-C5	**4.76**	**3.94**	**82.73**	**3.99**	**8.45**	**17.45**
CP-C6	5.17	3.54	68.90	3.58	6.52	12.91
CP-D4	5.24	3.30	63.25	4.25	6.94	12.55
CP-D5	**5.51**	**4.31**	**78.39**	**3.54**	**6.34**	**12.24**
CP-D6	5.22	3.71	70.98	3.52	6.48	13.54
CV-A4	4.80	2.11	44.22	3.65	6.16	10.30
CV-A5	4.96	2.40	48.54	3.31	5.55	9.42
CV-A6	4.91	2.39	48.89	3.90	6.81	11.44
CV-B4	4.29	2.36	54.90	3.40	5.64	9.74
CV-B5	5.05	3.04	60.28	3.51	5.95	10.59
CV-B6	5.37	3.51	65.44	3.85	6.79	12.23
HP-S4	5.42	1.96	36.78	4.63	7.99	14.07
HP-S5	5.49	2.92	53.38	3.18	5.05	8.22
HP-S6	4.81	2.91	59.63	4.82	7.26	11.62
HP-L4	4.27	2.68	62.94	4.57	7.66	13.06
HP-L5	4.88	3.34	68.68	3.44	5.70	10.16
HP-L6	5.21	3.34	66.59	3.69	5.16	8.30
Steel	**5.49**	**4.37**	**79.66**	**4.43**	**8.84**	**16.69**

2차시험의 휨강도 시험결과도 1차시험과 마찬가지로 모든 배합에서 4.5MPa 이상을 나타내어 휨강도 특성은 모두 만족하는 것으로 나타났다.

휨인성의 경우 KS품질기준인 등가휨강도 68%를 만족하는 배합은 CP계열의 경우 CP-A6, CP-B5,B6, CP-C4,5,6, CP-D5,6 번 배합으로 나타났다. CP계열중 섬유 혼입량 대비 가장 우수한 휨인성 시험결과를 보인 배합은 CP-C5로서 8자 노즐방식으로 생산되어진 2가닥의 절곡형 합성섬유로 나타났다.

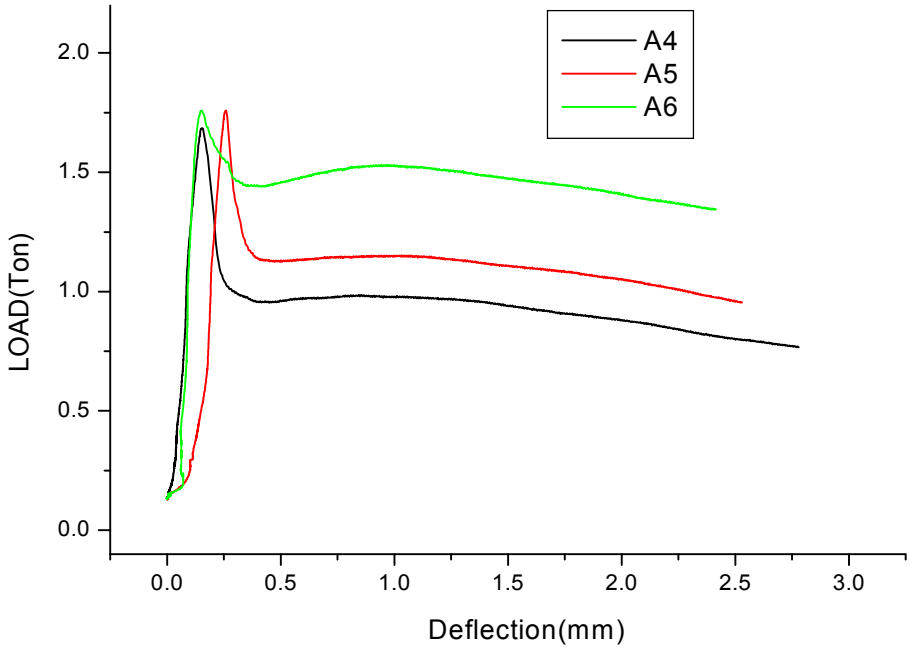
CP-C,D 제품은 1차시험에서의 결과를 바탕으로 길이 및 특성을 개선시킨 섬유로

서 단위체적당 개체수를 증가시키기 위하여 길이를 40mm로 정한 뒤 두께를 감소시킨 제품이다. 시험결과, 기존 제품보다 동일혼입량 대비 우수한 휨인성 결과를 나타내 본 연구과제의 레디믹스트 숏크리트 최종배합에 적용한다면 경제적이면서 우수한 휨인성 결과가 나올 것으로 판단된다.

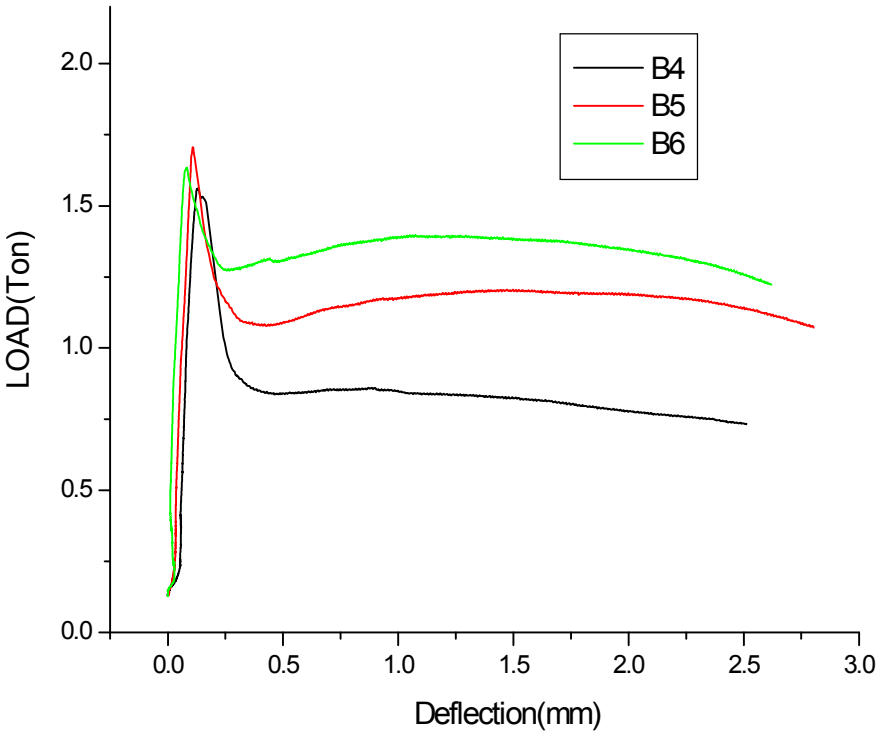
PVA계열의 경우 혼입량을 증대시켰지만 KS 기준에는 만족시키지 못하는 것으로 나타나 PVA계열 섬유의 다양한 활용처에 터널용 섬유보강재로서 PVA계열의 섬유는 다소 적절하지 못한 것으로 사료된다.

HP계열의 합성섬유도 KS기준에 준하는 시험결과를 나타내어 보통 폴리프로필렌계열의 합성섬유는 대체적으로 12~14kg/m^3 정도가 적당하다는 결론을 얻었다.

그림 3.5.52~그림 3.5.54는 제품 및 섬유 혼입량별 휨인성 그래프를 나타낸 것이다.

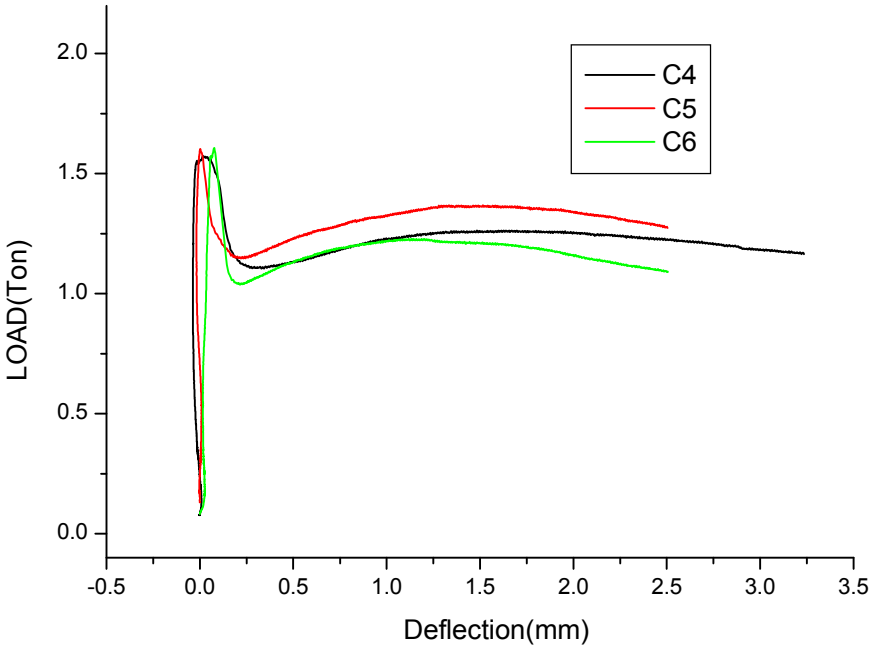


(a)

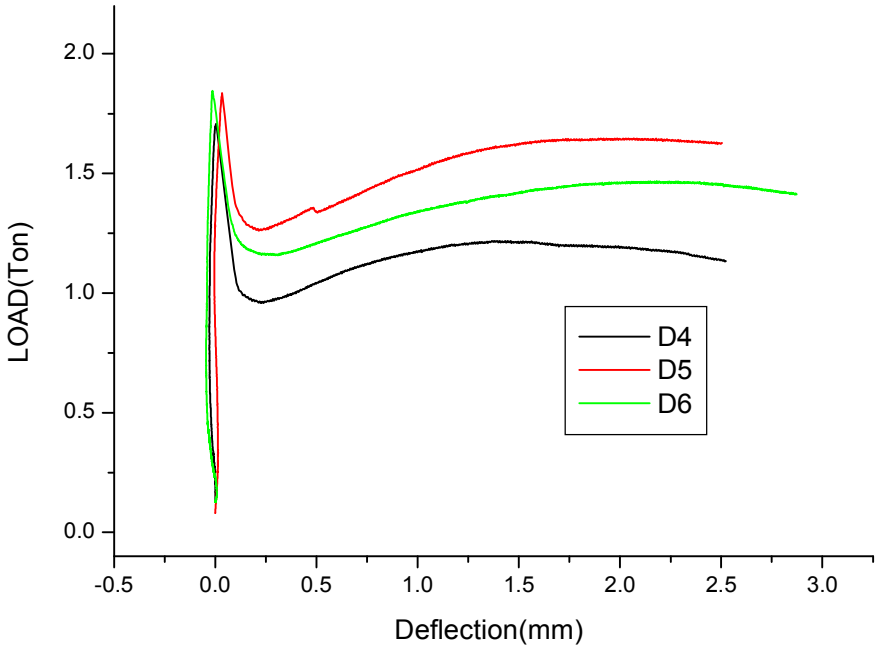


(b)

그림 3.5.52 CP 계열 휨인성 시험결과

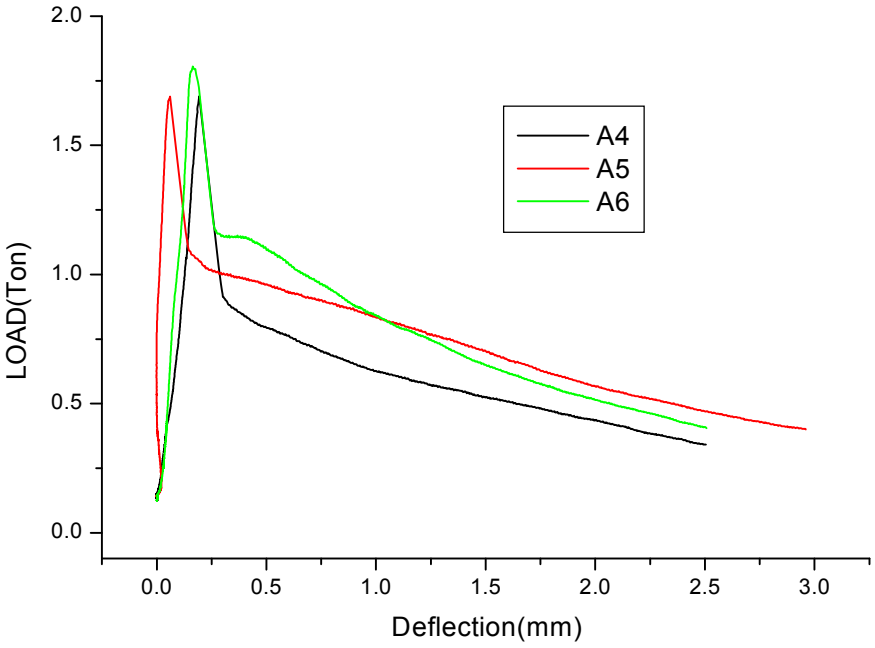


(c)

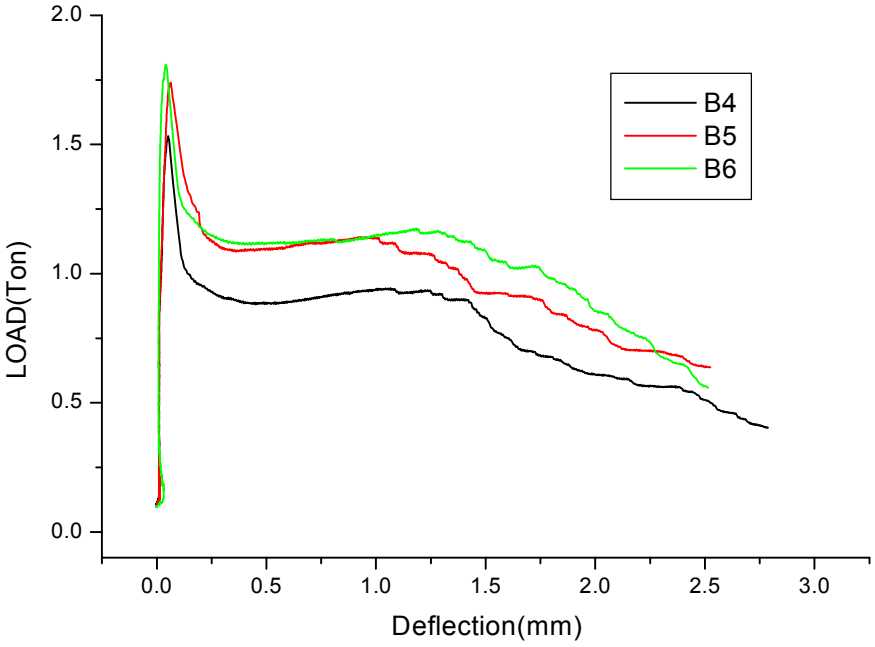


(d)

그림 3.5.52 CP 계열 휨인성 시험결과(계속)

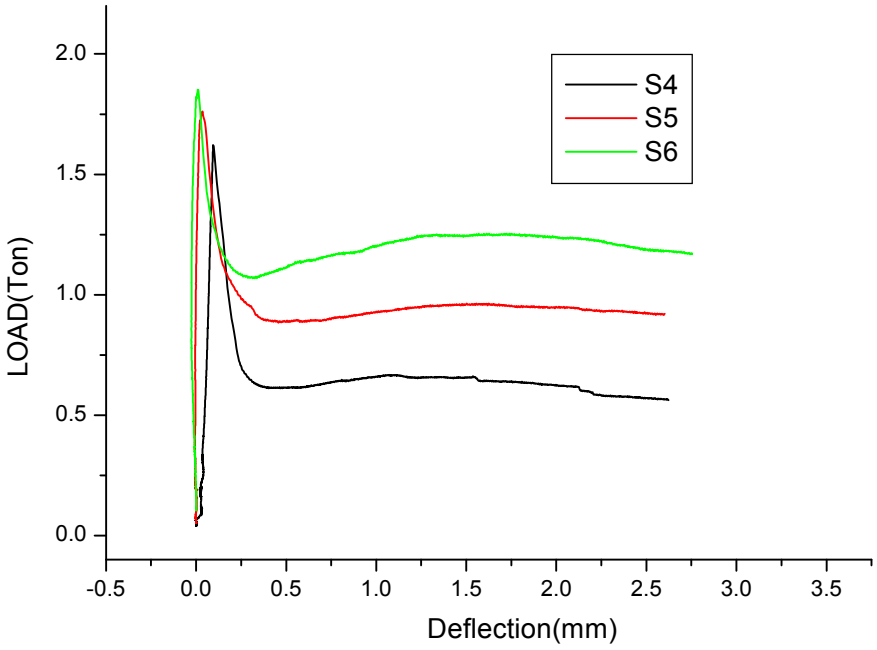


(a)

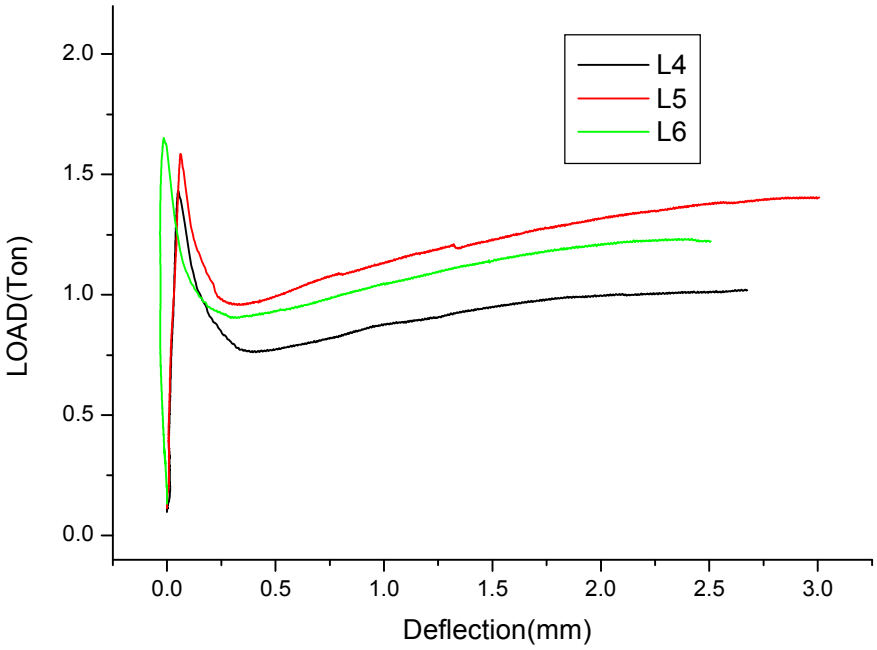


(b)

그림 3.5.53 CV 계열 휨인성 시험결과



(a)



(b)

그림 3.5.54 HP 계열 휨인성 시험결과

(라) 고찰

본 장에서는 1차 합성섬유 성능시험에 이어 혼입량을 증가시켜 2차 합성섬유 성능 시험을 실시하였다. 슬럼프, 압축강도, 휨강도 및 휨인성 결과는 아래와 같다.

○ 슬럼프 감소율의 경우 섬유 종류 및 길이에 관계없이 1차 시험때와 비슷한 양상을 보였으나, 합성섬유의 혼입량이 많아지면서 슬럼프 저하율이 급격히 저하되는 지점이 각 제품마다 상이하였다. 이러한 결과를 바탕으로 분말형 유동화제 선택시 예비시험을 통한 적정 슬럼프 관리가 매우 중요한 요소로 판단된다.

○ 압축강도의 경우 CP계열 PP 섬유를 14kg이상을 사용하려면, 압축강도 배합 설계 시 강도 저하에 대한 부분을 반영하여 배합설계를 실시하여야 강도저하에 따른 압축강도 기준을 만족 시킬 수 있을 것이라 판단된다.

○ HP 계열의 최대 혼입량은 12kg으로서 CP계열의 14kg보다 적은 량으로 배합시험을 실시하였다. 시험결과 12kg이내에서까지는 압축강도 감소 현상은 발견되지 않았으나 14kg 이상의 배합에서는 강도 저하가 발생될 가능성이 매우 클 것으로 사료된다.

○ PVA 계열 합성섬유의 압축강도 시험결과 혼입량이 증가할수록 슬럼프 저하율이 급격해진 반면 압축강도는 서서히 증가하는 것으로 나타났다.

○ 휨인성의 경우 KS품질기준인 등가휨강도 68%를 만족하는 배합은 CP계열의 경우 CP-A6, CP-B5,B6, CP-C4,5,6, CP-D5,6 번 배합으로 나타났다. CP계열중 섬유 혼입량 대비 가장 우수한 휨인성 시험결과를 보인 배합은 CP-C5로서 8자노즐방식으로 생산되어진 2가닥의 절곡형 합성섬유로 나타났다.

○ CP-C,D 제품은 1차시험에서의 결과를 바탕으로 길이 및 특성을 개선시킨 섬유로서 단위체적당 개체수를 증가시키기 위하여 길이를 40mm로 정한 뒤 두께를 감소시킨 제품으로 기존 제품보다 동일혼입량 대비 우수한 휨인성 결과를 나타내 본 연구과제의 레디믹스트 숏크리트 최종배합에 적용한다면 경제적이면서 우수한 휨인성 결과가 나올 것으로 판단된다.

5. 레디믹스트 숏크리트 현장적용성 평가

가. 1차 현장적용성 평가

(1) 타설실험 개요

레디믹스트 숏크리트 현장적용성 평가를 위한 1차 현장타설실험에서는 강섬유의 대체 재료로서 합성섬유의 적용 가능성을 평가하기 위해 근래에 개발되어 우수한 성능을 인정받은 C사의 PP-PE 공중합체인 폴리올레핀 섬유 및 구조용 PVA 합성섬유의 적용가능성을 검토하였다. 숏크리트 타설 시험은 1차 타설 시험장소인 분당구 신분당선에 위치한 터널시공 현장에서 수행하였다.

(2) 타설실험 계획

(가) 숏크리트 재료의 실내 성능 시험

강섬유 대체 합성섬유의 적용성 평가를 위해 표 3.3.43과 같이 실내 배합설계를 실시하였다. 시멘트는 국내 H사의 1종 보통 포틀랜트시멘트를 사용하였으며 레디믹스용 숏크리트 골재 및 현장골재는 앞에서 언급한 재료를 사용하였다. 합성섬유로서 PP-PE 폴리올레핀 및 PVA 섬유 적용성 평가를 위해 실리카흄을 혼입한 동일한 배합에 섬유 적정 혼입량을 투입하여 시험을 실시하였다. 정확한 물성평가를 위하여 급결제의 혼입은 제외하였다.

표 3.5.32 합성섬유 보강 숏크리트 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재 (kg)	혼화재(kg)			
								고로 슬래그 C*30%	실리카흄 C*8%	보강 섬유	알칼리 활성제
레디믹스트 배합											
1	SF	8	12	45.6	212	428	1602	-	37	40	-
2	SF PP-PE					428		-	37	9	-
3	SF PVA					428		-	37	5	-

합성섬유 PP-PE 폴리올리핀 및 PVA의 적용성 평가를 위하여 각 제조사의 물성 및 혼입량을 참고하여 시험체의 휨인성 평가를 수행하였다. 표 3.5.33은 각 제품별 등가 휨강도 및 휨인성지수를 나타낸 것으로서 각 제품별로 등가 휨강도가 60% 이상을 나타내 품질 기준에 만족하였다. PVA 합성섬유가 등가 휨강도 80.7% 및 휨인성 지수가 양호하게 나타나 가장 우수한 성능을 나타냈으며 PP-PE 합성섬유도 강섬유와 비슷한 성능을 나타내어 적용 가능성을 확인했다. PVA 구조용 합성섬유는 친수성으로서 숏크리트 매트릭스 내에서 탁월한 부착성능으로 인해 휨인성 증대에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 하지만 PVA 구조용 합성섬유를 실제 현장에서 적용하기에는 고가의 생산단가 때문에 아직은 가능하지 못할 것으로 판단되나 추후 경쟁력 있는 생산으로 인하여 숏크리트에 적용하게 되면 고품질 고인성 숏크리트의 생산이 가능해 질 것으로 사료된다.

표 3.5.33 합성 섬유별 휨, 등가휨강도, 휨인성지수

배합명	휨강도	등가휨강도	휨인성지수		
			I_5	I_{10}	I_{20}
SF	4.8	78.3	4.95	8.64	18.55
SF PP-PE	4.8	77.4	5.56	9.87	17.10
SF PVA	5.2	80.7	5.90	11.58	21.21

(나) 현장 실험계획

분말형 레디믹스트 숏크리트 개발을 위한 1차 현장타설 실험은 강섬유를 대체하는 새로운 종류의 합성섬유 사용시 적용성 평가를 실시하였다.

현장타설 실험은 신분당선 3공구에 위치한 터널 시공현장에서 실시하였으며 표 3.5.34는 실험 배합표를 나타낸 것이다. 합성섬유는 PP-PE 및 구조용 합섬섬유 PVA를 사용하여 실내시험을 통해 등가휨강도 및 휨인성이 검증된 혼입량을 각각 혼입하여 수행하였다. 본 실험에서는 일반 레디믹스트 숏크리트인 Plain 배합과 실리카 흄 혼합 레디믹스트 숏크리트인 SF 배합을 비교군으로 두었으며, 합성섬유 보강 배합에 실리카 흄을 혼입하여 레디믹스트 숏크리트에 실리카 흄 혼입시 강도특성 평가와 합성섬유 혼입시 휨인성 특성을 동시에 고찰하고자 하였다. 시험항목으로는 리바운드율, 압축강도, 휨강도, 휨인성 시험을 실시하였다.

표 3.5.34 1차 현장타설 실험 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재	보강 섬유	혼화재		혼화제	
									고로 슬래그 C*30%	실리 카흄 C*8%	유동 화제 (kg)	알칼리 활성제
레디믹스트 배합												
1	Plain	8	12	45.6	212	465	1,602	40.5	_	_	4.65	-
2	SF					428		40.5	-	37	5.58	-
3	SF PP-PE					428		9	_	37	5.58	-
4	SF PVA					428		5	-	37	5.58	-

주1) SF - 실리카흄

W/B:물 바인더(시멘트+혼화재)비, S/a:잔골재율, Gmax:골재최대치수

(3) 타설실험 수행

타설시험은 미리 공장에서 혼입해온 레디믹스트 숏크리트 4배합을 실시하여 타설하였다. 급결제는 알칼리 프리계를 사용하였으며 혼입량은 시멘트량 대비 8%(wt)를 사용하였고 강도측정용 패널을 사용하여 코어채취 후 강도 시험을 실시하였다. 압축강도는 재령 1일, 7일, 28일에 실시하였으며, 휨강도 및 휨인성 시험은 재령 28일에 절단된 빔 형 공시체로 시험하였다. 그림 3.5.55는 1차 현장타설 실험의 모습을 나타낸 것이다.



(a) 레디믹스트 숏크리트 재료 운반



(b) 레디믹스트 숏크리트 재료 보관

그림 3.5.55 1차 현장타설 실험 모습



(c) 타설용 몰드 거치



(d) 리바운드 측정 준비



(e) 타설 실시



(f) 타설 완료된 몰드

그림 3.5.55 1차 현장타설 실험 모습(계속)

(4) 타설실험 결과

(가) 리바운드

레디믹스트 숏크리트 및 현장골재 사용 숏크리트의 리바운드 시험을 실시하기 위하여 숏크리트 타설 기계의 2회 토출량을 반복시험을 통하여 계량하였다. 총 10회의 스트로크를 측정하여 리바운드된 숏크리트를 수거하고 이를 계량 한 뒤 리바운드율을 각 배합마다 산출 하였다. 표 3.5.35는 각 배합별 리바운드율을 나타 내었다. 리바운드 실험 결과 강섬유가 혼입된 SF 배합의 경우 리바운드량이 가장 작게 나타났고 실리카 흄이 혼입되지 않은 Plain 배합에서 가장 많은 양이 리바운드 되었다. 이는 실리카 흄이 혼입됨으로써 숏크리트의 반응성이 높아져 숏크리트 배합의 부착성이 증진되는 효과가 발생되었기 때문이라고 생각된다. 그리고 SF 배합 중 합성섬유가 혼입된 배합의 리바운드율은 SF 강섬유 혼입 배합의 리바운드율 보다 작게 측정 되었는데 이는 합성섬유 혼입량이 강섬유를 대체 하기에 충분치 않았기 때문으로 판단된다.

표 3.5.35 1차 현장타설 실험 배합의 리바운드율 결과

배합명		슬럼프 (cm)	2스트로크 (kg)	10스트로크 (kg)	리바운드량 (kg)	리바운드율 (%)
레디믹스트 재료 사용배합	Plain	9	85	425	33.1	7.8
	SF	12			20	4.7
	SF PP-PE	12			25	5.9
	SF PVA	13			31	7.3

(나) 압축강도

레디믹스트 숏크리트의 압축강도 발현 성상을 파악하기 위하여 재령 1, 7, 28일마다 각 배합별로 Φ10×20cm 크기의 공시체를 코어채취 하여 압축강도를 측정하였다. 측정 결과 실리카 흄과 강섬유가 혼입된 SF 배합이 가장 큰 초기 강도와 28일 재령 강도를 보였고 Plain 배합은 실리카 흄이 혼입된 배합에 비해 28일 재령강도가 약 70% 정도만 발현되었다. SF PVA배합은 초기 강도는 가장 작았지만 점차 강도가 발현되어 28일 재령 강도는 우수한 결과를 얻을 수 있었다. Plain 배합과 비교했을 때 실리카 흄 배합의 경우 초기 및 장기 강도가 확실히 증가되는 현상을 확인할 수 있었는데 이는 실리카 흄의 미세한 미분말이 포졸란 반응성이 높아 매우 치밀한 구조를 형성하기 때문으로 생각된다. 각 배합별 압축강도 결과는 표 3.5.36 및 그림 3.5.56에 나타내었다.

표 3.5.36 1차 현장타설 실험 배합의 압축강도

재령 / 배합명	압축강도 (MPa)	
	1일	7일
Plain	11.2	20.5
SF	12.4	28.5
SF PP-PE	12.0	27.1
SF PVA	10.5	25.6

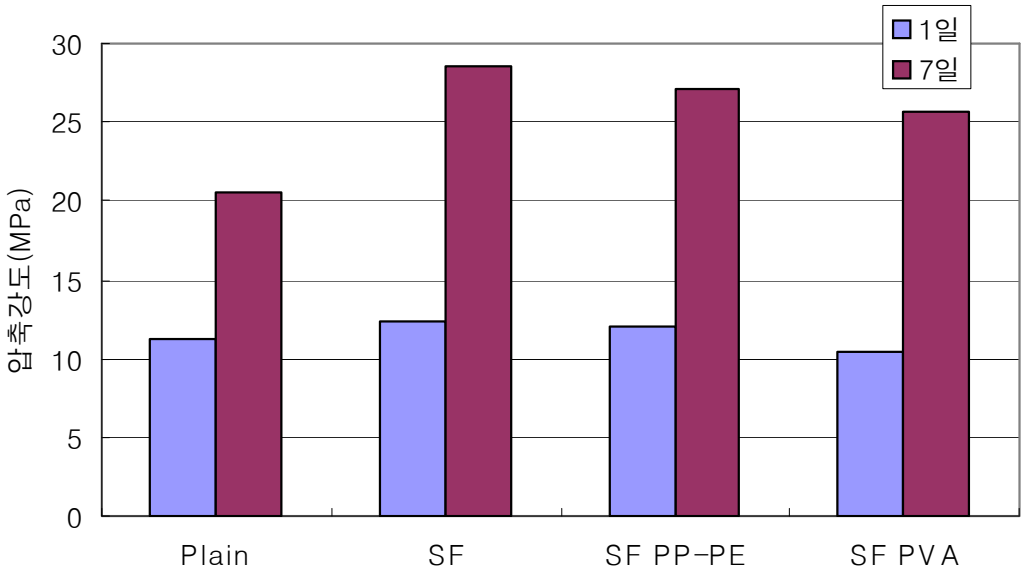


그림 3.5.56 1차 현장타설 실험 배합의 압축강도

(다) 휨강도 및 휨인성

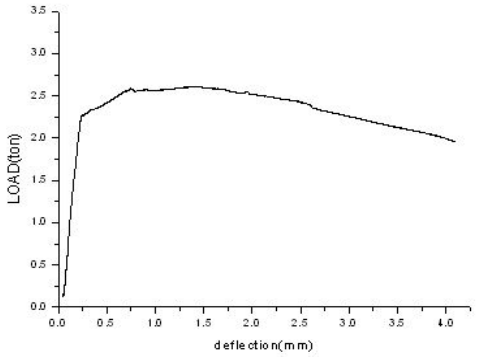
본 현장타설 실험은 강섬유 대체 합성섬유의 성능을 평가하기 위하여 실시하였다. 합성섬유의 적용성 평가를 위해 빔 형 공시체를 채취하여 휨강도 및 휨인성 시험을 실시한 결과 모든 배합에서 숏크리트 휨강도 기준인 4.4MPa을 만족함을 알 수 있었다. 특히 합성섬유인 PP-PE 및 PVA를 혼입한 배합의 경우 강섬유 혼입 배합에 비해 휨강도에서 큰 차이를 보이지 않았으며 등가 휨강도는 오히려 강섬유 혼입 배합 보다도 큰 결과를 얻을 수 있었다. 이 중 PVA 합성섬유는 등가 휨강도가 76.1%로 나타나며 높은 휨인성 특성을 보였다. 그러나 PVA 섬유 배합의 경우 타설 능력에 영향을 미쳐 연속 타설에 지장을 주는 것으로 나타나 섬유 혼입량 조정이 불가피 하다고 사료된다.

하중-처짐 그래프를 살펴보면 합성섬유 혼입배합의 경우 강섬유 혼입 배합의 하중-처짐그래프와 비슷한 경향을 보이며 안정적인 휨인성 특성을 발휘하는 것으로 나타나므로 레디믹스트 숏크리트에 충분히 적용 가능하다고 판단 된다.

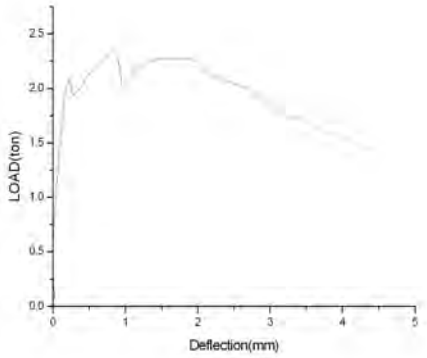
휨 강도 및 휨인성 특성 시험 결과는 표 3.5.37 및 그림 3.5.57에 나타내었다.

표 3.5.37 1차 현장타설 실험 배합의 휨강도, 등가휨강도, 휨인성지수

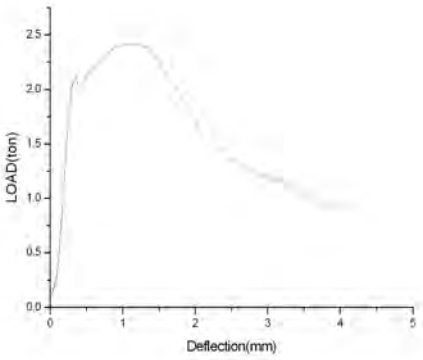
	휨강도	등가휨강도	휨인성지수		
			I_5	I_{10}	I_{20}
Plain	4.4	66.9	3.57	9.40	16.78
SF	4.8	68.6	4.85	9.80	19.21
SF PP-PE	4.8	72.5	5.11	12.11	19.48
SF PVA	4.6	76.1	5.00	6.03	18.49



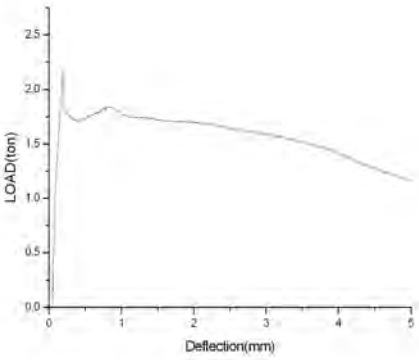
(a) P 배합



(b) SF 배합



(c) SF PP-PE 배합



(d) SF PVA 배합

그림 3.5.57 1차 현장타설 실험 배합의 하중-처짐 그래프

나. 2차 현장적용성 평가

(1) 타설실험 개요

분말형 레디믹스트 숏크리트 개발을 위한 1차 현장타설실험에서는 국내 합성섬유 생산업체인 C사의 PP-PE 합성섬유와 PVA 합성섬유의 강섬유 대체 적용성 평가를 수행하였다. 그 결과 두 합성 섬유 모두 휨강도 및 휨인성 시험에서 강섬유 보강 숏크리트와 거의 비슷한 정도를 보임으로써 강섬유 대체 보강섬유로 충분히 적용이 가능하다는 판단을 할 수 있었다.

2차 현장타설 실험은 1차 현장타설 실험에서 적용성을 검증 한 보강섬유를 적용하여 레디믹스트 숏크리트의 합성섬유 혼입율에 대한 최적 배합비를 도출하기 위해 수행하였다. 2차 현장타설실험에서는 합성섬유 혼입량에 따른 숏크리트의 물리적 특성을 평가함으로써 보다 경제적이고 안전한 레디믹스트 숏크리트의 합성섬유 혼입량을 도출해내고자 하였다. 실험에는 국내 최대 규모의 합성섬유 생산업체인 H사의 PP-PE 합성섬유인 L형제품과 C사의 PP-PE 합성섬유인 C형 섬유 제품을 사용하였다. 그리고 비교군으로 강섬유가 혼입된 현장골재 배합 숏크리트를 배합하여 타설하였다.

타설된 숏크리트의 강도특성 파악을 위해 재령 1일, 3일, 7일, 28일에 공시체를 채취하여 압축강도를 측정하였고, 합성섬유의 영향을 판단하기 위해 빔 형 공시체를 채취하여 휨강도, 휨인성 시험을 수행하였다. 2차 현장타설시험의 배합표는 표 3.5.38과 같다.

표 3.5.38 2차 현장타설 실험 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재		합성섬유			혼화재	혼화제	
									HP-L 50mm	CP-C 40mm	강섬유	실리카흄 C*8%	액상형 유동화제 (kg)	차수용 혼화제 (kg)
현장골재 배합							S	G						
1	P	13	12		214	475	995	660	-	-	40	_	-	-
레디믹스트														
2	RM-HP1	8	12	45.6	212	465	1586		10	-	-	-	4.65 (C*1.0)	-
3	RM-HP2				212	465	1586		12	-	-	-	5.12 (C*1.1)	-
4	RM-HP3				212	465	1586		14	-	-	-	5.58 (C*1.2)	-
5	RM-CP1				212	465	1586		-	10	-	-	4.65 (C*1.0)	-
6	RM-CP2				212	465	1586		-	12	-	-	5.12 (C*1.1)	-
7	RM-CP3				212	465	1586		-	14	-	-	5.58 (C*1.2)	-

(2) 타설실험 수행

타설실험은 경기도 화성시의 도로터널 현장에서 이루어졌다. 압축강도 측정용 공시체를 채취하기 위해 공시체 채취용 몰드를 사용하여 원통형 코어를 각 재령 (1, 3, 7, 28일)별로 채취하여 압축강도를 측정하였으며 휨강도용 패널을 사용하여 10×10×40cm 각주형 공시체를 절단 가공하여 휨 인성시험을 실시하였다. 그림 3.5.58은 현장에 숏크리트를 타설하는 과정이다.



(a) 숏크리트 타설 장비



(b) 타설용 몰드 거치



(c) 타설 실시



(d) 타설 완료된 몰드



(e) 공시체 채취



(f) 실험용 공시체

그림 3.5.58 2차 현장타설 실험 모습

(3) 타설실험 결과

(가) 압축강도

합성섬유 혼입률 별 압축강도 발현 성상을 파악하기 위하여 1일, 3일, 7일, 28일마다 배합별로 Φ10×20cm 크기의 원주형 공시체를 채취하여 강도시험을 실시하였다. 각 배합별 압축강도는 표 3.5.39에 나타내었다.

시험 결과 모든 레디믹스트 숏크리트 제품에서 초기강도에서 숏크리트 품질기준 강도인 9.8MPa 보다 2배 가까이 높은 결과를 보였으며 28일 재령 강도도 약 40MPa에 이르는 결과를 보였다. 합성섬유의 혼입률이 증가함에 따라 압축강도가 미소하게 증가하는 경향을 보이지만 큰 영향은 없는 것으로 판단되며 압축강도 실험 결과 H사와 C사 제품 모두 레디믹스트 숏크리트에 강섬유 대체로 혼입했을 시 충분히 강도가 발현 되어 강섬유를 대체 할 수 있을 것으로 판단된다.

표 3.5.39 2차 현장타설 실험 배합의 압축강도

재령 / 배합명	압축강도 (MPa) 공시체 평균			
	1일	3일	7일	28일
P	11.61	21.52	23.62	31.34
RM-HP1	18.05	27.08	30.22	40.46
RM-HP2	19.17	26.22	29.16	39.82
RM-HP3	19.45	25.78	29.45	41.93
RM-CP1	18.95	27.65	28.98	40.15
RM-CP2	18.72	26.78	30.21	41.33
RM-CP3	19.30	27.00	29.41	41.90

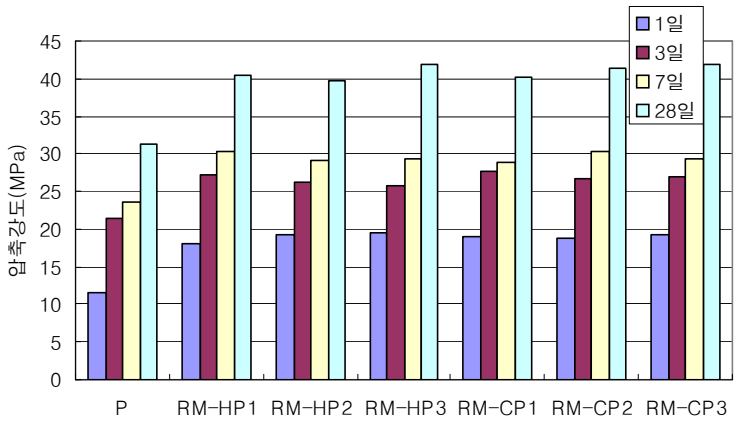


그림 3.5.59 2차 현장타설 실험 배합의 압축강도

(나) 휨강도 및 휨인성

본 2차 현장타설 실험은 강섬유를 대체 할 수 있는 합성섬유로 HP-L과 CP-C 합성섬유의 혼입량을 변화시켜 최적 배합을 도출하고자 실시하였다. 섬유 혼입량에 대한 영향을 검토하기 위해 휨강도 및 휨인성 시험을 수행하였고 결과는 표 3.5.40에 나타내었다.

시험 결과 휨강도는 모든 배합에서 숏크리트 품질기준인 4.5MPa을 만족함을 볼 수 있었다. 휨인성 시험 결과 강섬유가 혼입된 현장골재 배합에서는 68%이상의 등가 휨강도를 얻을 수 있었고 합성섬유 혼입량 증가에 따라 등가 휨강도가 증가하는 경향을 확인 할 수 있었다. HP-L 합성섬유 혼입배합은 섬유량이 14kg/m^3 혼입된 RM-HP3에서만 68%이상의 등가휨강도가 나타났고 CP-C의 합성섬유 혼입배합은 섬유량 12kg/m^3, 14kg/m^3 이 혼입 된 RM-CP2와 RM-CP3에서 기준 이상의 등가 휨강도를 얻을 수 있었다. 이 결과로 미루어 CP-C 합성섬유가 HP-L 합성섬유에 비해 같은 량 대비 휨강도 및 휨인성에서 좀 더 유리한 특성을 나타냄을 볼 수 있었고 HP-L 섬유 14kg/m^3, CP-C 섬유 12kg/m^3 혼입시 강섬유 대체 합성섬유로서 충분한 성능 확보를 할 수 있을 것으로 생각된다.

표 3.5.40 2차 현장타설 실험 배합의 휨강도, 등가휨강도, 휨인성지수

재령 / 배합명	휨인성 (MPa) 공시체 평균				
	휨강도 MPa	등가휨강도 %	휨인성지수		
			I_5	I_{10}	I_{20}
P	5.90	68.14	3.89	6.86	11.18
RM-HP1	7.87	44.45	3.70	5.40	9.01
RM-HP2	7.59	60.52	4.00	7.62	15.41
RM-HP3	6.08	68.14	3.58	8.19	16.16
RM-CP1	6.39	60.23	3.86	7.23	14.54
RM-CP2	7.39	69.22	3.42	6.11	11.77
RM-CP3	7.07	71.91	4.47	8.43	17.03

다. 3차 현장적용성 평가

(1) 타설실험 개요

분말형 레디믹스트 숏크리트 개발을 위한 2차 현장타설 실험에서는 합성섬유 혼입량을 달리하여 배합함으로써 강섬유 대체 합성섬유 적용시 보다 경제적이고 최적화된 레디믹스트 숏크리트의 배합을 도출하고자 하는 실험을 수행하였다. 그 결과 HP-L의 합성섬유와 CP-C 합성섬유 모두 강섬유를 대체 할 수 있는 합성섬유로서 적용성이 있음을 알 수 있었고 CP-C가 휨강도 및 휨인성 특성이 좀 더 우수한 것으로 판단되었다.

3차 현장타설시험에서는 2차 현장실험에서 도출된 결과를 토대로 CP-C 합성섬유 적용하여 분말형 레디믹스트 숏크리트의 성능평가를 수행하였다. 비교군으로는 시멘트 대비 30%를 치환한 고로 슬래그 레디믹스트 숏크리트와 강섬유를 혼입한 현장골재 배합 숏크리트를 타설하였다.

타설시험에는 CP-C 합성섬유를 $1m^3$ 당 10kg, 12kg 으로 혼입하여 레디믹스트 숏크리트 2배합, 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 2배합을 타설하였고 비교군으로 최대 골재치수 13mm의 현장골재를 사용한 현장골재 배합을 타설하였다.

타설된 숏크리트의 강도특성 파악을 위해 재령 7일, 28일에 공시체를 채취하여 압축강도를 측정하였고, 합성섬유의 적용성을 판단하기 위해 빔 형 공시체를 채취하여 휨강도, 휨인성 시험을 수행하였다. 현장타설에 적용된 배합표는 표 3.5.41에 나타내었다.

표 3.5.41 3차 현장타설 실험 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재	합성 섬유		혼화재	혼화제	
								CP-C 40mm	강섬유	고로 슬래그	액상형 유동화제 (kg)	폴리머
보강섬유량 결정												
1	P	13	12	-	-	-	1586	-	40	_	-	-
2	RM-C1	8	12	45.6	212	465	1586	10	-	-	4.65 (C*1.0)	-
3	RM-C2				212	465	1586	12	-	-	5.12 (C*1.1)	-
4	RM-B-C1				212	465	1586	10	-	139.5	4.65 (C*1.0)	-
5	RM-B-C2				212	465	1586	12	-	139.5	5.12 (C*1.1)	-

(2) 타설실험 수행

현장타설은 강원도 삼척시의 광산갱도에서 이루어졌으며 압축강도 측정용 공시체를 채취하기 위해 공시체 채취용 몰드를 사용하여 원통형 코어를 각 재령 (7, 28일)별로 채취하여 압축강도를 측정하였다. 그리고 10×10×40cm 각주형 공시체를 절단 가공하여 휨 인성시험을 실시하였다. 그림 3.5.60은 현장에 숏크리트를 타설하는 과정이다.



(a) 재료 운반 (b) 몰드 거치

그림 3.5.60 3차 현장타설 실험 모습



(c) 몰드 타설



(d) 타설 완료된 몰드



(e) 공시체 채취



(f) 실험용 공시체

그림 3.5.60 3차 현장타설 실험 모습(계속)

(3) 타설실험 결과

(가) 압축강도

합성섬유 혼입률 별 성능평가를 위해 압축강도 발현 성상을 파악하고자 재령 7일, 28일 마다 배합별로 ϕ10×20cm 크기의 원주형 공시체를 채위하여 강도시험을 실시하였다.

시험 결과 모든 배합에서 재령 28일 숏크리트 품질기준인 21MPa 이상의 압축강도가 발현됨을 확인 할 수 있었다. CP-C 합성섬유가 혼입된 레디믹스트 숏크리트의 28일 압축강도는 RM-C1이 39.32MPa, RM-C2가 38.99MPa로 2차 현장타설 실험의 결과와 거의 유사한 강도를 나타내었으며 고로슬래그가 혼입된 RM-B-C1, RM-B-C2는 고로 슬래그가 혼입되지 않은 레디믹스트 숏크리트에 비해 약간 더 큰 강도가 발현되었다. 이는 고로슬래그의 경우 잠재수경성이 있어 그 자체는 경화하는 성질이 미약하지만 알칼리에 의해 경화하는 과정에서 초기 수화생성물의 크기

가 작고 균일하게 분포하기 때문에 공극의 크기가 작아 장기적으로 치밀한 조직이 생성되기 때문으로 판단된다.

강도시험 결과 레디믹스트 숏크리트에 CP-C 합성섬유 적용시 우수한 강도 발현이 나타남을 확인 할 수 있었고, 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트에도 강섬유 대체 합성섬유로서 충분히 적용이 가능하다는 판단을 내릴 수 있었다.

표 3.5.42 3차 현장타설 실험 배합의 압축강도

재령 / 배합명	압축강도 (MPa) 공시체 평균	
	7일	28일
P	26.78	34.20
RM-C1	28.56	39.32
RM-C2	29.63	38.99
RM-B-C1	26.12	39.62
RM-B-C2	26.90	40.55

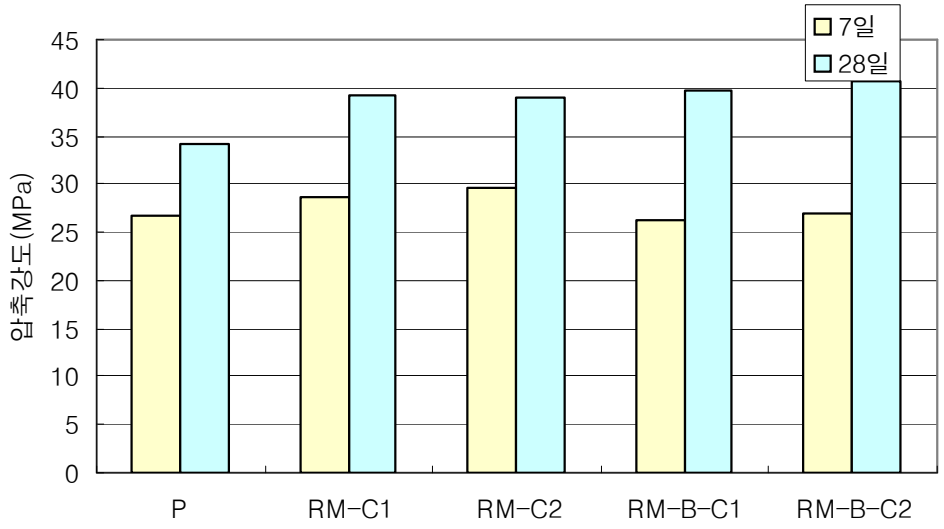


그림 3.5.61 3차 현장타설 실험 배합의 압축강도

(나) 휨강도 및 휨인성

본 3차 현장타설 시험은 강섬유 대체 합성섬유로 CP-C 합성섬유를 레디믹스트 숏크리트와 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트에 적용하여 그 성능평가를 위해 실시하였다. 합성섬유의 평가를 위해 배합별로 빔 형 공시체를 채취하여 휨강도 및 휨인성시험을 수행하였다. 시험의 결과는 표 3.5.43에 나타내었다.

시험결과 휨강도는 모든 배합에서 숏크리트 품질기준인 4.5MPa을 만족함을 볼 수 있었다. 휨인성 시험 결과 강섬유가 혼입된 현장골재 배합에서는 68%이상의 등가 휨강도를 얻을 수 있었다. CP-C 합성섬유가 혼입된 레디믹스트 숏크리트인 RM-C1, RM-C2 는 합성섬유의 양이 증가함에 따라 휨강도가 다소 감소하고 등가휨강도는 증가하는 경향을 보였는데 12kg/m^3 혼입시에 68% 이상의 등가 휨강도 결과가 나타났다. 그리고 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 배합인 RM-B-C1, RM-B-C2 에서도 합성섬유의 양이 증가함에 따라 휨강도는 감소하였지만 등가휨강도는 증가하는 경향을 보였다.

성능평가 결과 레디믹스트 숏크리트와 고로슬래그 숏크리트 모두 합성섬유가 12kg/m^3 혼입된 RM-C2, RM-B-C2에서 등가 휨강도가 68%이상으로 나타나 품질기준을 만족함을 확인 할 수 있었으며 강섬유를 대체 할 수 있는 혼입량으로 12kg/m^3 이 적정 할 것으로 판단 된다.

표 3.5.43 3차 현장타설 실험 배합의 휨강도, 등가휨강도, 휨인성지수

재령 / 배합명	휨인성 (MPa) 공시체 평균				
	휨강도 MPa	등가휨강도 %	휨인성지수		
			I_5	I_{10}	I_{20}
P	5.65	78.04	3.22	8.10	14.99
RM-C1	6.09	61.62	3.02	7.26	15.21
RM-C2	5.99	71.21	4.52	8.99	16.58
RM-B-C1	5.89	67.46	4.32	8.21	15.64
RM-B-C2	5.85	74.12	3.88	7.19	13.82

6. 분말형 레디믹스트 숏크리트 최적 배합 도출

본 절에서는 기존 현장골재 배합 숏크리트에서 발생되는 불확실한 시공품질, 강도 및 내구성의 품질저하 등의 문제점을 해결하기 위해 숏크리트 재료의 배합 및 제조를 건조 모르타르 전문 제조업체에서 사전에 미리 실시하여, 골재의 철저한 토립분 관리, 확실한 입도관리, 전문배합 장치를 이용한 엄격한 품질관리 및 재료의 규격화 등을 거쳐 시공 품질을 극대화 시켜, 현장에서의 시공성과 품질을 개선할 수 있는 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발에 대한 연구를 수행하였다. 경제성 및 시공성, 그리고 고품질을 만족하는 레디믹스트 숏크리트 제품의 개발을 위해 국내·외 숏크리트 골재 현황에 대한 조사를 실시하고 골재의 최대 치수 및 보강섬유의 양 등의 혼입률을 변화시켜 수차례의 실내타설 실험과 현장타설 실험을 수행하였다. 그 결과 골재최대치수 8mm 사용시 유동성 및 시공성, 강도 등에서 가장 만족 할 만한 결과를 얻을 수 있었고 강섬유 대체 보강 섬유로서 국내에서 생산되는 CP-C 합성섬유를 적용 할 때 12kg/m^3의 양을 혼입시 최적의 효과가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

본 연구에서는 분말형 레디믹스트 숏크리트의 최적 표준 배합으로 표 3.5.44와 같은 제품 배합을 제안한다.

표 3.5.44 분말형 레디믹스트 숏크리트 최적 배합

Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재 (kg)				합성섬유 (kg/m^3)
					S1	S2	S3	S4	
8	12	45.6	212	465	560	347	332	347	12

7. 소결론

본 절에서는 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발에 대한 연구를 수행하였다. 레디믹스트 숏크리트의 품질 개선과 재료 분리 방지를 위해 최대골재치수를 8mm로 결정하여 압축강도 및 리바운드율 시험을 통해 적용성을 검토하였고 레디믹스트 숏크리트의 재료 분리를 최소화 할 수 있는 최적 믹싱 시간 및 혼합 회전속도를 도출하였다. 그리고 실내시험을 통해 합성섬유 및 혼화재의 최적 배합량을 산정하고 현장에 적용성 평가를 실시하였다. 본 절에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 골재최대치수를 8mm, 10mm, 13mm로 변화시켜 현장에 타설하여 압축강도, 슬럼프 및 리바운드율 실험을 실시한 결과 압축강도 차이는 8mm 골재에 의한 숏크리트의 강도차이가 10mm나 13mm 골재에 비해 큰 차이를 보이지 않았으며 리바운드 저감효과는 다른 골재 치수에 비해 우수하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 슬럼프 실험 결과 8mm 골재의 경우 가장 큰 값을 보임으로써 유동성 및 작업성이 가장 우수할 것이라고 판단되었다. 그리고 고로슬래그 및 실리카 흄 등의 혼화재를 혼입한 배합에 골재최대치수 8mm를 적용하였을 경우에도 우수한 강도, 리바운드율, 슬럼프 특성을 보여 레디믹스트 숏크리트 배합에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

(2) 현재 골재 생산과정에서의 문제점을 파악하고 숏크리트용 골재최대치수 개선에 대한 의견을 검토하기 위해 실무기술자들을 대상으로 현장설문조사를 실시한결과 대부분의 기술자들이 골재최대치수 8mm수준의 숏크리트용 골재 필요성에 대해 공감하였고 이에 대한 필요사항으로 생산설비 확충을 최우선으로 꼽았다. 따라서 크러싱 장비와 스크린 등의 확충을 통해 최대치수 8mm 숏크리트용 골재 생산을 가능케 하여 생산원가를 절충한다면 숏크리트의 품질 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

(3) 레디믹스트 숏크리트 생산공정 시 재료분리를 확인하기 위해 믹서, 믹서 하부, BCT 상차 및 이동후, 사일로 제품 거출 시의 골재 샘플을 채취하여 입도분포 및 분산상태를 살표본 결과 믹서 및 믹서 하부에서 전반적으로 양호한 입도 분포 및

분산성을 확인 할 수 있었다. 또한 BCT 차량에 직상차 시 분말형 레디믹스트 숏크리트의 조골재 흐름성 저하에 따라 BCT 맨홀 하부의 잔분량이 다소 늘어남을 알 수 있었는데 이는 BCT 상차시 상부 맨홀(앞단, 중간단, 끝단)의 위치를 바꿔가며 상차할 경우에 해결 할 수 있는 문제로 보인다. 그리고 이동 진동에 의한 재료의 분리 현상은 나타나지않았으며, 이는 재료의 넓은 입도분포의 최밀충전에 의한 결과라고 생각된다. 마지막으로 사일로에서 제품 거출시 제품의 Low level 충전/거출 방식의 관리를 통해 재료 분리를 최소화 할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

(4) 재료분리를 최소화 할 수 있는 믹싱시간 및 혼합속도 도출 결과 투입순서를 ① 잔골재 투입(S1,S2,S3)→② 강섬유 및 경량혼합재 (Silica fume)→③ 시멘트, 슬래그분말, S5(조골재) 순으로 투입함으로써 균질한 혼합 분산성을 얻을 수 있었고 ① 최초 믹싱 개시전 믹서 속도 35%→② 믹싱 개시중 속도 80%→③ 믹싱 마무리 속도 35%로 가변하면서 120~180초 동안 믹싱할 경우 재료 분리 현상이 거의 발생하지 않음을 확인 할 수 있었다,

(5) 1,2차 합성섬유 혼입량 시험 결과 PP계열과 PVA계열의 경우 혼입량이 증가할수록 슬럼프가 저하되는 경향을 보였으며 특히 PVA 계열에서는 슬럼프 감소가 크게 나타나 레디믹스트 숏크리트에 PVA 섬유 사용시 유동화제 혼입량 산정에 각별한 주의가 필요할 것으로 생각된다. 그리고 압축강도 실험 결과 PVA계열은 혼입량 증가에 따라 압축강도가 다소 증진되는 경향을 보였지만 PP 계열에서는 혼입량 및 길이 변화에 의한 압축강도 변화 현상이 발견되지 않았다. 그리고 C사의 PP계열 제품인 CP-C,D 제품은 기존 제품보다 동일 혼입량 대비 우수한 휨인성 시험 결과를 보여 레디믹스트 숏크리트 최종배하에 적용시 경제적이며 우수한 품질을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

(6) 현장타설 실험 결과 레디믹스트 골재 사용 배합의 28일 재령 강도가 현장골재 배합에 비해 약 15~25% 정도 증진되는 것을 알 수 있었으며 숏크리트 품질 기준인 21MPa보다도 훨씬 우수한 강도 특성을 보임을 알 수 있었다. 또한 휨강도 역시 숏크리트 품질기준을 훨씬 상회하는 결과를 보였다. 그리고 강섬유 대체 합성섬유로 CP-C 합성섬유 적용시 12kg/m^3 이상 혼입한 경우 강섬유와 비슷한 정도의

휨특성을 보였다.

(7) 실내실험과 현장실험을 통해 다음과 같은 분말형 레디믹스트 숏크리트 최적 표준배합을 도출 하였다.

표 3.5.45 분말형 레디믹스트 숏크리트 최적 배합

Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재 (kg)				합성섬유 (kg/m^3)
					S1	S2	S3	S4	
8	12	45.6	212	465	560	347	332	347	12

제 6 절 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 개발

본 절에서는 산업 부산물로 생성되는 고로슬래그 미분말을 활용한 레디믹스트 숏크리트 개발 연구를 수행하였다. 고로슬래그 미분말은 선철의 제련시에 부산물로서 발생하는 고온용융상태의 고로슬래그를 물로 급랭 처리한 고로수쇄슬래그를 건조 및 분쇄하여 제조하며, 다시 급랭시켜서 유리화한 것으로 반응성이 높아 고로시멘트용 슬래그나 시멘트·콘크리트용 혼화재료로 사용되고 있다. 산업부산물 분말형 레디믹스트 숏크리트에 고로슬래그 미분말을 혼입하는 이유는 산업부산물을 재활용하여 경제성을 향상시키려는 목적과 함께, 숏크리트의 워커빌리티를 개선하고 지하수에 노출되는 숏크리트 재료에 염화물 침투 저항성 및 내화학성 등을 향상시키려는 다양한 목적 때문이다. 따라서 기존 숏크리트 배합과 비교하여 경제성은 물론, 숏크리트 성능도 모두 만족시킬 수 있는 고로슬래그 미분말의 시멘트 치환율을 찾는 것이 레디믹스트 숏크리트 연구 개발에 중요한 과제라고 할 수 있다.

본 절에서는 먼저 고로슬래그의 물리·화학적 특성을 파악하고 고로슬래그의 반응 기구에 대한 연구를 수행하였다. 또한 국내·외 고로슬래그의 재활용 기술 현황 및 재활용 실태를 파악하여 고로슬래그의 시장성 조사 및 개발 방향을 모색하였다.

그리고 숏크리트 재료로서 고로슬래그의 적용성 평가를 위해 기존 콘크리트 적용 사례를 바탕으로 실내 타설 실험 및 현장 숏크리트 타설실험을 수행하여 고로슬래그를 활용한 숏크리트의 특성을 파악하고 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 사전 배합을 도출하였다.

끝으로 본절에서는 고로 슬래그 치환율 및 혼화재의 혼입양 변화에 따라 얻어진 실험 결과를 토대로 도출된 고로슬래그를 레디믹스트 숏크리트의 배합을 4차에 걸쳐 터널 및 광산 현장에 타설함으로써 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 실제 현장발현특성을 파악하고 최적배합을 도출하기 위한 연구를 수행하였다.

1. 산업부산물을 혼합한 숏크리트의 성능평가

가. 고로슬래그 미분말의 적용성 조사

(1) 고로슬래그 미분말의 제조방법 및 활용현황

고로슬래그 미분말은 선철의 제련시에 부산물로서 발생하는 고온용융상태의 고로슬래그를 물로 급랭 처리한 고로수쇄슬래그를 건조 및 분쇄하여 제조하며, 다시 급랭시켜서 유리화한 것이기 때문에 반응성이 높아 고로시멘트용 슬래그나 시멘트·콘크리트용 혼화재료로 사용되고 있다. 그림 3.6.1은 고로슬래그 미분말의 제조과정을 나타낸다.

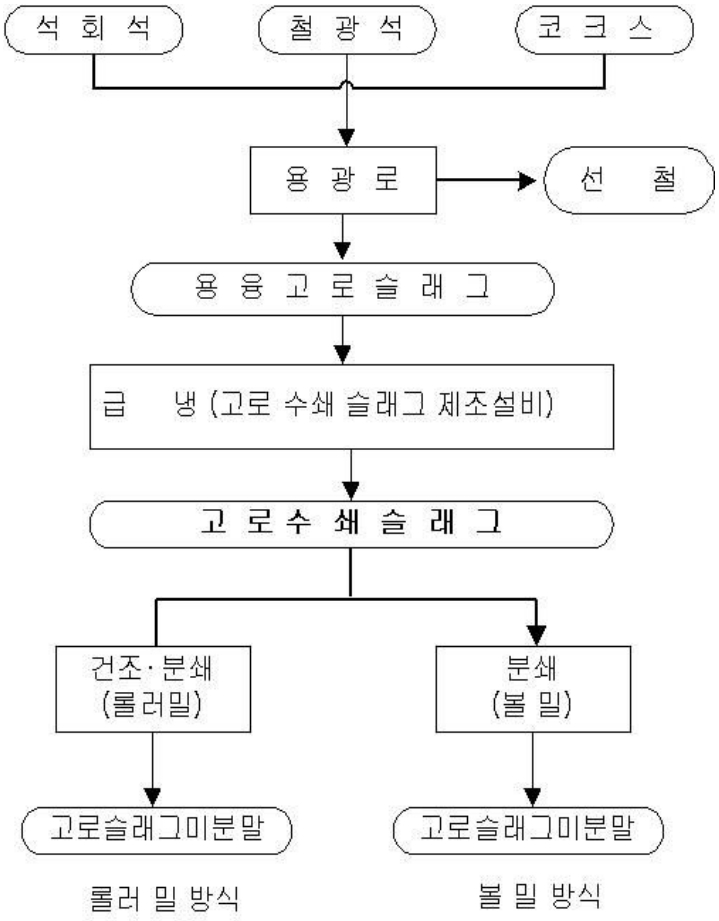


그림 3.6.1 고로슬래그 미분말의 제조과정

고로슬래그 미분말은 주로 내구성 향상을 목적으로 한 토목구조물에 사용되고 있으며 건축구조물의 경우에는 지중에 매설되는 기초 매스콘크리트에 한정되어 사용된다. 고로슬래그 미분말의 종류는 비표면적은 4000~8000 cm^2/g이 있으나 국내에서는 주로 4000급을 사용하고 있다. 그러나 국외에서는 분쇄 기술, 설비 등의 발달로 인하여 고분말도의 고로슬래그 분말의 생산이 가능해졌으며, 주로 고분말도의 고로슬래그 미분말을 이용한 매스 콘크리트용 저발열 시멘트, 수중불분리성 콘크리트, 고강도 콘크리트, 고유동화 콘크리트, 그라우트재 등 특수한 제품의 제조에 이용하는 사례가 늘어나고 있다.

표 3.6.1은 고로슬래그 미분말의 사용 용도에 따른 치환율 범위를 나타낸 것인데, 고로슬래그 미분말의 장점을 살리기 위한 치환율 범위는 주로 30~70% 정도이다. 치환율 30% 미만인 경우에는 사용한 효과가 현저하게 나타나지 않으며, 오히려 초기재령의 콘크리트 강도발현이 나쁘다는 점과 레미콘 공장에서 고로슬래그 미분말을 사용하는 것에 의한 사일로 증설, 계량관리, 품질관리 업무가 번잡하기 때문에 사용하지 않는 것이 일반적이다. 또한, 고로슬래그 미분말의 치환율이 70%를 넘는 경우에는 초기강도가 현저하게 작게 되고 사용실적도 거의 없으며 그 물성이 충분하게 확인되어 있지 않으므로 사용되고 있지 않다. 그림 3.6.2는 일본에서의 고로슬래그 미분말의 활용 현황을 나타낸 것이다.

표 3.6.1 고로슬래그 미분말의 사용 용도에 따른 치환율 범위

사용 목적	고로슬래그 미분말 치환율 (%)		
	분말도 4000	분말도 6000	분말도 8000
수화열에 의한 온도상승 억제	50~70	60~70	30~70
알칼리골재반응 억제	40~70	40~70	40~70
내황산염성의 향상	50~70	50~70	50~70
해수에 대한 화학저항성(염해 포함)향상	45~55	45~60	45~70
고유동화	30~70	30~70	30~60
고강도화	-	30~50	30~60

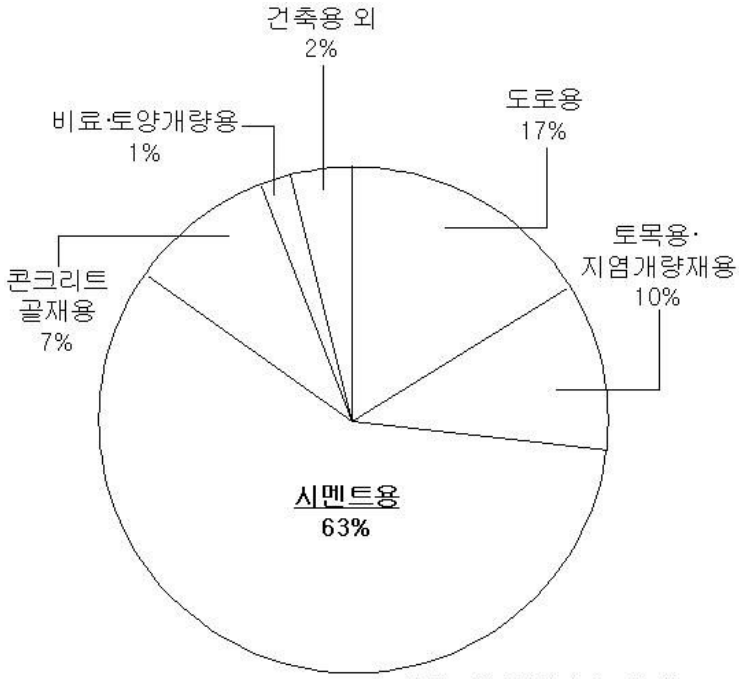


그림 3.6.2 고로슬래그 미분말의 활용 현황(일본)

(2) 고로슬래그 미분말 품질 규격

국내 고로슬래그 미분말에 관한 KS규격은 KS F 2563 「콘크리트용 고로슬래그 미분말」에 규정되어 있으며 표 3.6.2와 같이 고로슬래그 미분말의 분말도(비표면적)에 따라 고로슬래그 미분말 1종, 2종 및 3종으로 분류하고 있다.

표 3.6.3은 고로슬래그 미분말의 분말도에 따른 활성도 지수 및 플로우값비를 나타낸 것이다. 분말도가 클수록, 즉 미분화가 될수록 활성도 지수 및 플로우값비는 커지는 것을 알 수 있으며, 이는 콘크리트용 혼화재료로 사용하였을 경우 고분말일수록 압축강도 발현이 우수한 것을 나타내므로 초기강도 발현성을 높이기 위해서는 분말도가 높은 고로슬래그 미분말을 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

표 3.6.2 콘크리트용 고로슬래그 미분말의 규격(KS F 2563, 1997)

품 질 \ 종 류		고로슬래그 미분말 1종	고로슬래그 미분말 2종	고로슬래그 미분말 3종
비 중		2.80 이상	2.80 이상	2.80 이상
비표면적(㎠/g)		3,000~5,000	5,000~7,000	7,000~10,000
활성도지수 (%)	재령 7일	55이상(1)	75이상	95이상
	재령 28일	75이상	95이상	105이상
	재령 91일	95이상	105이상	105이상
플로우 값 (%)		95이상	95이상	90이상
산화마그네슘 (MgO) (%)		10.0 이하	10.0 이하	10.0 이하
삼산화황 (SO_3) (%)		4.0 이하	4.0 이하	4.0 이하
강 열 감 량 (%)		3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하
염화물 이온 (%)		0.02 이하	0.02 이하	0.02 이하

표 3.6.3은 고로슬래그 미분말의 품질

종 류	비표면적(㎠/g)		활성도지수 SAI(%)			플로우 값비(%)	
	범 위	평 균	재 령	범 위	평 균	범 위	평 균
고로슬래그 분말도 4000	3,760~4,950	4,320	7일 28일 91일	55~96 80~127 94~144	68.2 100.8 116.5	96~116	102.7
고로슬래그 분말도 6000	5,290~6,880	6,160	7일 28일 91일	80~97 97~127 110~133	87.8 111.4 119.5	99~118	105.9
고로슬래그 분말도 8000	7,420~9,410	8,310	7일 28일 91일	90~129 110~146 110~153	107.1 127.9 130.3	93~118	102.8

나. 현장실험 개요

(1) 숏크리트 배합

산업부산물을 혼합한 숏크리트의 성능 평가를 위해 급결제와 혼화재의 종류와 투입량을 변화시킨 총 12가지 배합에 대해 현장타설실험을 수행하였다. 표 3.6.4는 현장실험에서 고려한 실험요소에 대해 나타낸 것이다. 실험 인자로서는 급결제, 강섬유 및 혼화재 3가지를 선택하였고, 각 인자마다 2~6가지의 수준을 고려하였다.

표 3.6.4 고로슬래그 숏크리트 성능 평가를 위한 현장실험의 실험 요소

구분	급결제	강섬유	혼화재
인자	알루미네이트계, 알칼리프리계	보강, 무보강	실리카 흄 7.5% 고로슬래그 10, 20, 30% 플라이 애쉬 10, 15%
수준	2	2	6
기호	AL, AF	R, N	SF7.5 BF10, 20, 30 FA10, 15

급결제는 기존 알칼리성 급결제가 가지고 있는 장기강도 저하 및 인체에 유해한 단점을 보완할 수 있어, 최근 유럽 및 일본 등을 중심으로 사용빈도가 높아지고 있는 알칼리 프리계를 적용하였다. 그리고 비교실험을 위해 알루미네이트계 급결제를 실험변수로 추가하였다. 국내 품질규정에서 일반적으로 적용되고 있는 급결제 혼입량은 5~12% 이다(도로공사, 2001). 그러나 현장상황이나 타설 조건 등에 따라 차이가 있으므로 기존에 발표된 연구들을 참고하여 알루미네이트계 5%, 알칼리 프리계 7%로 결정하였다(이상필 등, 2004 ; 류종현 등, 2005).

숏크리트 혼화재로는 고로슬래그 미분말을 시멘트량의 10, 20, 30% 까지 변화하면서 치환하였고, 실리카 흄은 7.5%, 플라이 애쉬는 10, 15%로 인자를 결정하여 비교 평가하고자 하였다.

실리카 흄은 초미립분말로서 조기재령에서 포졸란 반응이 발생하고 숏크리트의 유동성을 좋게 하는 특성이 있다. 또한, 점도를 향상시켜 반발률을 작게 하며 배합

설계시 급결제 사용량을 줄여서 숏크리트의 품질을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 특히, 숏크리트 내의 공극 형성에 의한 내동해성 향상과 투수계수 감소로 숏크리트의 장기 내구성을 향상시키는 작용을 하는 것으로 알려져 있다(이상필 등, 2004). 그러나 국내에서 생산되지 않는다는 점 때문에 일반시멘트에 비해 단가가 5배 정도 되고 숏크리트 시공단가를 증가시키는 요인으로 작용하고 있다.

플라이 애쉬는 석탄을 미분말 형태의 연료로 사용하는 발전소에서 이를 연소할 때, 굴뚝을 통해 대기 중으로 확산되는 재의 미립자를 집진장치로 포집한 것이다. 콘크리트의 혼화재로서 플라이 애쉬는 콘크리트의 워커빌리티를 개선하고, 낮은 반응속도는 매시브한 구조물에 있어서 초기 수화열 발생을 억제한다. 또한, 투수성을 개선하고 침식성 화학물질에 대한 침투성을 억제함으로서 콘크리트의 강도와 내구성 증진에 기여한다. 현재 국내에서는 플라이 애쉬를 치환한 숏크리트의 시공사례는 없고 이에 대한 연구도 많이 부족한 상황이다.

표 3.6.5에서 3.6.7까지는 본 현장실험에 사용된 고로슬래그, 실리카 흄, 플라이 애쉬의 화학조성 및 물리적 특성을 나타낸 것이다.

표 3.6.5 고로슬래그 미분말의 화학조성 및 물리적 특성

구분	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	TiO_2	기타	수분 함량	분말도 (㎠/g)	비중
함량(%)	33.1	13.8	42.4	6.1	0.29	0.96	3.35	0.14	4000	2.91

표 3.6.6 실리카흄의 화학조성 및 물리적 특성

구분	SiO_2	C	Fe_2O_3	Al_2O_3	Na_2O_3	K_2O	기타	수분 함량	분말도 (㎠/g)	비중
함량(%)	92	1.2	2.4	1.3	0.1	1.2	1.8	0.1	220,000	2.1

표 3.6.7 플라이 애쉬의 화학조성 및 물리적 특성

구분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	기타	분말도 (㎠/g)	비중
함량(%)	52.6	33.5	4.6	0.7	0.7	0.6	4.5	2.8	3510	2.2

강섬유 혼입량은 국외 및 국내 품질기준이 각기 다르기 때문에 기존연구내용(한국도로공사, 2001)을 참고하고, 건설현장에서 일반적으로 적용되고 있는 40kg/㎥를 혼입하였다. 강섬유의 규격은 ∅0.5×30mm이며 번들형을 사용하였다. 그림 3.6.3은 현장실험에 사용된 번들형 강섬유의 모습을 나타낸 것이며, 표 3.6.8은 강섬유의 특징을 나타낸 것이다.



그림 3.6.3 현장실험에서 사용된 번들형 강섬유

표 3.6.8 현장실험에 사용된 숏크리트 강섬유의 특징

제품	길이(cm)	직경(mm)	형상비	형태	$1m^3$당 배합비
A사 제품	30	0.5	60	[1)]Hooked ends type	40

주 1) 숏크리트내 응력이 작용할 때 뽑히지 않도록 양끝단이 구부러진 형태

숏크리트 현장실험에서 실험결과에 영향을 미치는 변수에는 혼화재 및 급결제뿐만 아니라 골재 품질상태, 편광석 비율, 골재 수분상태, 골재 파쇄상태, 골재의 최대치수, 타설 장비, 타설 위치, 고성능 감수제, 강섬유, B/P의 여건 등 많은 변수가 있다. 현실적으로 이 모든 변수를 고려하여 현장실험을 수행하기에는 많은 제약이 있다. 본 현장실험은 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 개발을 위해 다른 혼화재를 치환한 숏크리트와 고로슬래그를 치환한 숏크리트의 성능을 비교하기 위한 것이므로 혼화재외의 골재, 강섬유, 혼합수 등 다른 영향변수는 모두 동일하게 설정하여 실험적 오차를 최대한 줄이고자 하였다. 본 실험에서 사용된 골재의 최대치수는 13mm, 잔골재율은 65%이며, 표 3.6.9는 본 현장실험의 배합표를 나타낸 것이다.

표 3.6.9 고로슬래그 숏크리트 성능 평가를 위한 현장실험 배합표

구분[1]		W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	단위량 (kg/m^3)						
					Water	Cement	잔골재	굵은 골재	급결제	강섬유	혼화재
1	AL-N	43.5	13	68	200	450	1050	500	22.50 (알루미네이트계 : 5%)	0	-
2	AL-SF 7.5-R					416				40(∅0.5 ×30mm)	34
3	AL-BF 10-R					405					45
4	AL-BF 20-R					360					90
5	AL-BF 30-R					315					135
6	AF-N					450			31.50 (알칼리 프리계 : 7%)	0	-
7	AF-SF 7.5-R					416				40(∅0.5 ×30mm)	34
8	AF-BF 10-R					405					45
9	AF-BF 20-R					360					90
10	AF-BF 30-R					315					135
11	AF-FA 10-R					405					45
12	AF-FA 15-R					383					67.5

주1) AL:알루미네이트, AF:알칼리 프리, SF7.5:실리카흄 치환율 7.5%,
BF10, 20, 30 : 고로슬래그 치환율 10, 20, 30%
FA10, 15 : 플라이 애쉬 치환율 10, 15% N:강섬유 무보강, R:강섬유 보강
W/B:물 바인더(시멘트+혼화재)비, S/a:잔골재율, Gmax:골재최대치수

(2) 숏크리트 타설용 몰드 제작

숏크리트 타설 실험을 통해 압축강도 측정용 공시체를 채취하기 위해 타설 몰드를 제작하였는데, 원통형 코어를 각 재령(1, 3, 7, 28일)별로 채취하여 압축강도를 측정하기 위해 그림 3.6.4와 같은 원통형 코어 채취용 몰드를 제작하였다. 각 재령별로 3개의 코어가 채취 가능하고 몰드 중간에 칸막이를 설치하여 코어 채취시 다른 재령의 코어에 최대한 영향이 적게 미치도록 제작하였다. 또한, 숏크리트 타설

작업, 운반 및 코어링 작업시 내구성과 안전성을 확보하기 위해 두께 3mm의 강판으로 제작하였고, 운반이 용이하게 4개의 손잡이를 설치하였다.

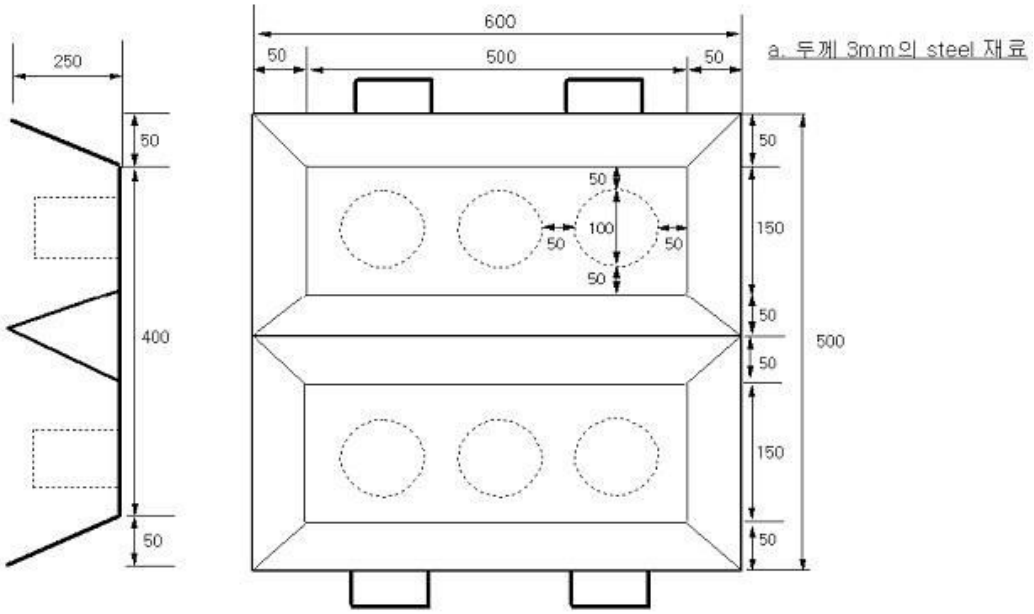


그림 3.6.4 숏크리트 타설 실험에 사용된 원통형 코어 채취용 몰드(mm)

다. 현장실험 결과

(1) 시험 항목

현장실험 결과 측정은 표 3.6.10의 시험항목에 따라 실시하였는데, 양생 1, 3, 7, 28일마다 각 배합별로 Ø100×200mm 크기의 시편을 채취하여 측정하였다. 숏크리트 현장실험에서 숏크리트가 타설된 몰드는 일반적으로 무게가 과다하여 운반이나 취급에 어려움이 많고, 대형 몰드를 운반하고 코어를 채취하는 과정에서 충격이 가해져 공시체에 균열이 발생되는 경우도 있었다. 그림 3.6.5는 숏크리트 타설부터 압축강도를 측정하는 과정을 나타낸 것이다.

표 3.6.10 현장실험 시험항목

시험항목	관련 시험방법 규격
압축강도 측정 (1, 3, 7, 28일)	○ KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법 -시편크기 : Ø100×200mm ○ KS F 2412 콘크리트 코어의 길이 측정 시험방법



(a) 공시체 채취용 몰드



(b) 숏크리트 타설모습



(c) 숏크리트 슬럼프 시험 모습



(d) 타설 중인 숏크리트 몰드



(e) 타설이 완료된 숏크리트 몰드



(f) 강도 측정용 코어 채취

그림 3.6.5 숏크리트 타설부터 압축강도 측정



(g) 채취된 강도 측정용 공시체



(h) 압축강도 시험 모습

그림 3.6.5 숏크리트 타설부터 압축강도 측정(계속)

(2) 강도 변화

그림 3.6.6은 급결제 종류에 따른 숏크리트 실험배합의 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 알루미네이트계 급결제를 사용한 경우 초기재령(1, 3일)에서는 배합별 강도 차이가 크게 나타나지 않았지만, 재령 7일 이후부터는 실리카 흄 7.5%를 치환한 배합의 강도 증가가 뚜렷이 나타나 재령 28일에서 32.5MPa로, 혼화재를 치환하지 않은 배합에 비해 13MPa 이상 강도증진이 있었다. 반면, 고로슬래그 10%를 치환한 배합은 재령 7일까지는 실리카 흄을 치환한 배합과 비슷한 강도 증진을 보였지만, 이후에는 크게 증가하지 않았고 압축강도는 재령 28일에 26.6MPa로 나타났다. 고로슬래그 20, 30%를 혼입한 배합도 비슷한 경향을 보였지만 혼화재를 치환하지 않은 배합에 비해서는 25~38%의 강도증진을 나타내었다. 특히 혼화재를 치환하지 않은 배합은 도로공사 품질 규정인 20MPa에도 미치지 못하는 결과를 보였다.

알칼리 프리계 급결제를 사용한 경우에도 혼화재를 치환한 배합의 강도증진 현상이 두드러지게 나타났는데, 특히, 고로슬래그를 30% 치환한 배합이 재령 7일부터 큰 강도증진을 보이면서 재령 28일에는 압축강도 47.1MPa로 가장 높게 나타났다. 실리카 흄을 7.5% 치환한 배합의 경우에도 혼화재 특성에 걸맞는 강도증진 현상으로 재령 28일에 압축강도 45.2MPa로 나타났다. 반면, 플라이 애쉬를 치환한 배합은 다른 배합에 비해 상대적으로 낮은 강도를 보였는데, 플라이 애쉬를 15% 치환한 배합은 재령 7일까지 혼화재를 치환하지 않은 배합보다 낮은 강도증진을 보이다가 재령 28일에서야 비슷한 강도를 나타내었다.

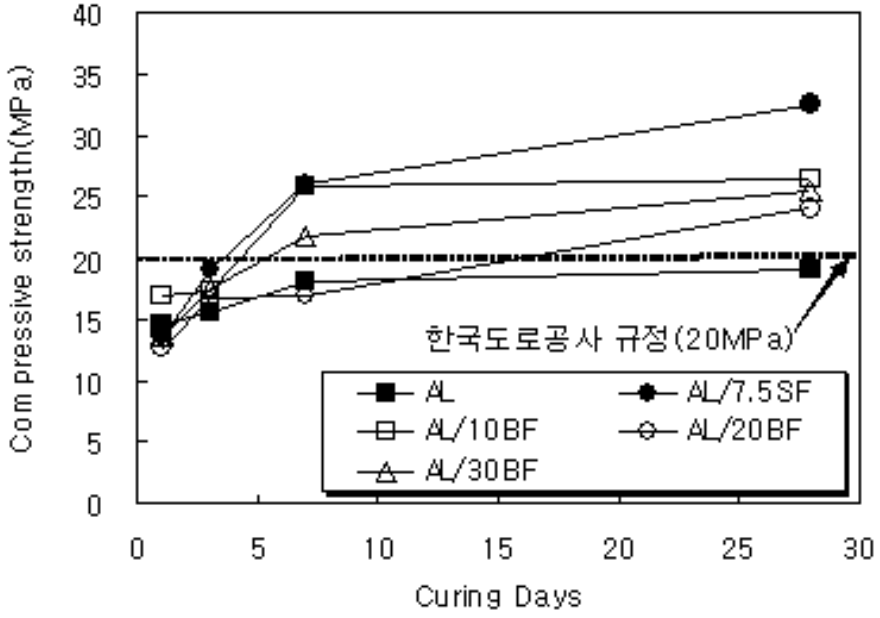
알루미네이트계 급결제를 적용한 저강도의 숏크리트에서는 고로슬래그를 치환한

배합이 실리카 흄을 치환한 배합의 약 74~81% 정도 수준의 강도 발현을 나타냈지만, 알칼리 프리계 급결제를 적용한 고강도의 숏크리트에서는 고로슬래그를 치환한 배합의 강도 발현이 실리카 흄을 치환한 배합과 유사하거나 4% 정도 더 크게 나타났다.

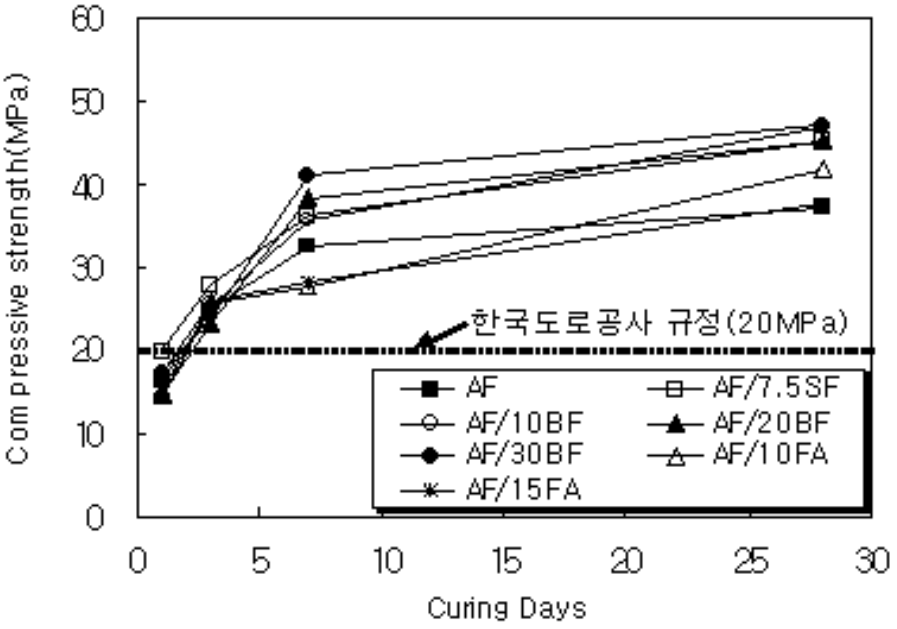
그림 3.6.7은 배합비에 따른 재령별 압축강도의 증진율을 나타낸 것이다. 알루미네이트계 급결제를 사용한 경우 재령 3일의 강도증진율은 실리카 흄을 7.5% 치환한 배합이 41%로 가장 크게 나타났고, 다음으로 고로슬래그를 20% 치환한 배합이 30.8%로 나타났다. 고로슬래그를 30% 치환한 배합은 28.6%로 나타났다.

알칼리 프리계 급결제를 사용한 경우 재령 3일의 강도증진율은 고로슬래그를 10% 치환한 배합이 79.5%로 가장 크게 나타났고, 다음으로 플라이 애쉬를 10% 치환한 배합이 72.1%로 나타났다.

혼화재 종류에 따른 숏크리트의 현장타설실험을 실시하고 각 배합의 압축강도 및 강도증진율을 분석한 결과 급결제 종류에 상관없이 고로슬래그를 치환한 배합은 국내 숏크리트 강도 규정을 만족하여, 현장배합 고로슬래그 숏크리트가 충분히 적용가능성이 있음을 알 수 있었다. 또한, 앞으로 추가적인 실험과 세부적인 경제성 평가를 더 거쳐야겠지만, 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 공법에 적용하기에 가장 적정한 고로슬래그의 치환율은 20~30% 정도라고 판단된다.

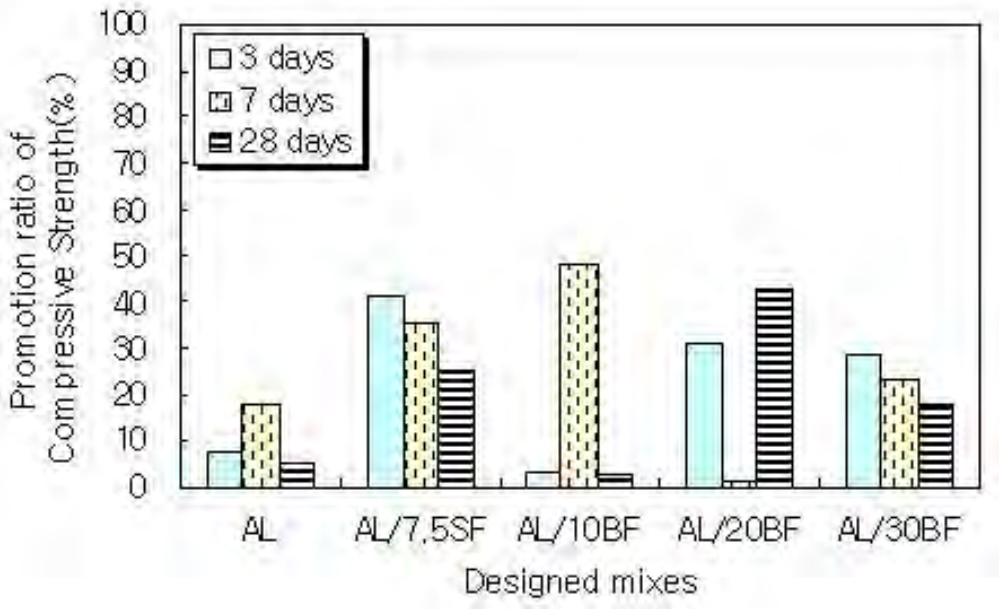


(a) 알루미네이트계 급결제

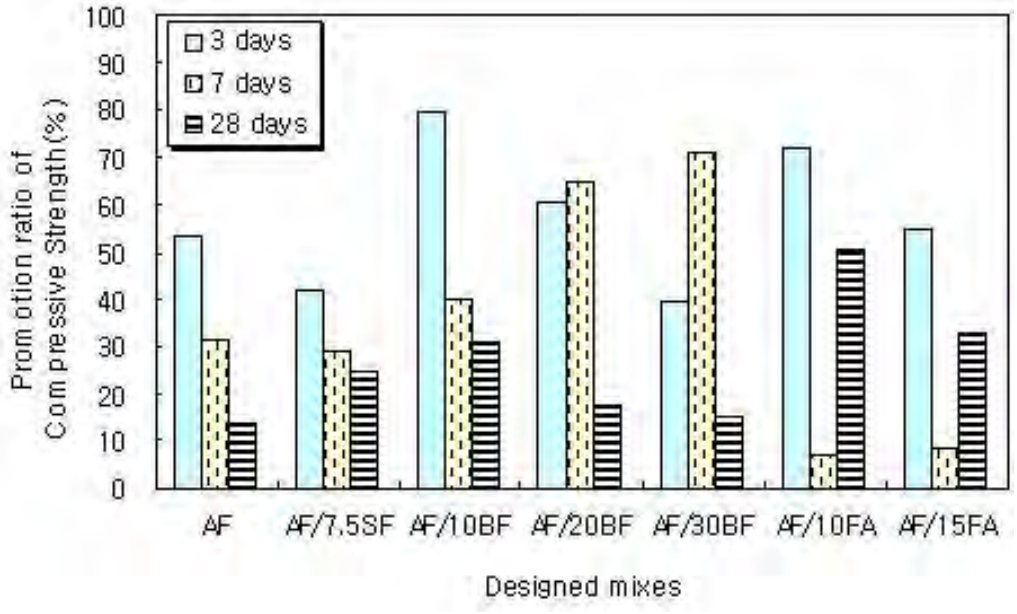


(b) 알칼리 프리계 급결제

그림 3.6.6 급결제 종류에 따른 숏크리트의 재령별 압축강도



(a) 알루미네이트계 급결제



(b) 알칼리 프리계 급결제

그림 3.6.7 급결제 종류에 따른 숏크리트의 재령별 강도증진율

2. 고로슬래그 미분말의 특성 및 국내 현황 파악

가. 고로슬래그 미분말의 특성

(1) 제조 및 용도

1774년 Lorit가 고로슬래그 미분말과 소석회를 혼합한 모르타르를 제조한 이후 1862년 독일의 E. Langen은 고로에서 발생하는 철 찌꺼기의 취급을 용이하게 하기 위해 과립화 처리공정을 제안하였다. 고로슬래그 미분말의 혼화재로서 사용은 독일의 N. sutterneim이 1953년에 발표한 건조 고로슬래그 미분말부터 사용되기 시작하였다. 1958년 이후 남아메리카에서는 3,500 cm^2/g 이상의 분말도를 가진 고로슬래그 미분말이 일반적인 혼화재로 사용되었고, 이후 레디믹스트 콘크리트의 보급으로 신뢰성이 높은 콘크리트를 제조할 수 있게 되었다.

고로슬래그 미분말의 제조과정을 살펴보면, 고로에서 선철과 동시에 생성되는 용융 고로슬래그를 물 또는 공기로 급냉하여 유리질 입상의 고로수쇄슬래그로 건조한 후 소요 구조물의 특성 및 용도에 적합하도록 ball-mill, jet-mill로서 미분쇄하여 얻어진다. 그림 3.6.8은 고로슬래그 미분말의 제조공정을 요약하여 나타낸 것이다. 고로슬래그 미분말은 고로방식의 선철공정에서 선철과 동시에 주로 알루미노규산염으로 구성되는 슬래그가 발생하게 된다. 이 용융상태의 고온 슬래그를 물, 공기 등에 의해 급냉하게 되면, 유리화한 비결품질의 고로수쇄슬래그를 얻게 된다. 보통 철광석, 코크스, 매용제의 량을 각각 38%, 16%, 46%로 가하면 이때 고로슬래그의 발생량은 용선 1톤당 약 300kg의 고로슬래그가 발생하는 것으로 알려지고 있다.

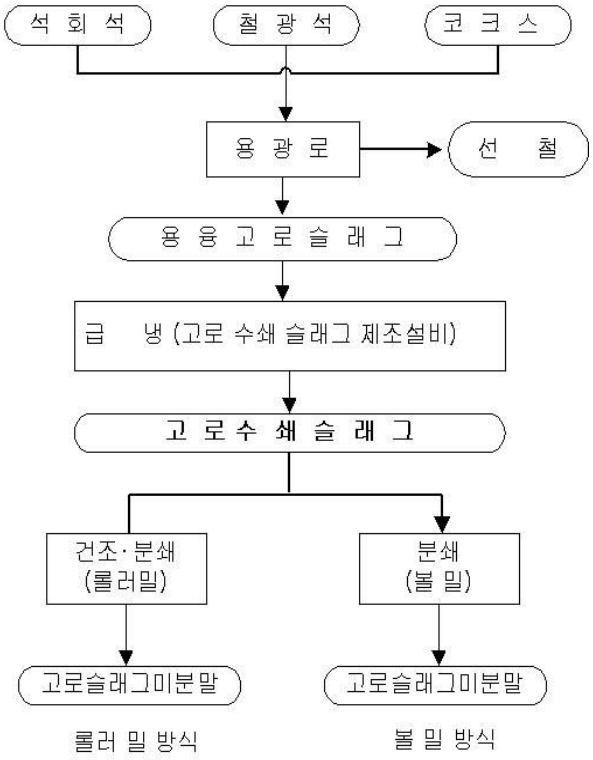


그림 3.6.8 고로슬래그 미분말의 제조과정

표 3.6.11 고로슬래그의 용도

종 류	용 도
서냉슬래그 (괴상슬래그)	도로용(표층, 노반, 충진), 콘크리트용 골재, 항만재료, 지반개량재 시멘트, 그링카원료, 규산석회 비료 등
급냉슬래그 (수쇄슬래그, 입상회슬래그)	고로슬래그 시멘트용(시멘트혼합재), 시멘트 크링카원료, 콘크리트 혼합재, 경량기포콘크리트 원료(ALC), 노반안정처약, 규산석회 비료, 항만재료, 토목공사용
반급냉슬래그 (팽창슬래그)	경량콘크리트용 골재, 경량 매립재, 기타 보온재

선철을 제조할 때 고로에서 생성되는 용융슬래그를 찬공기나 냉수로서 급냉시킨 급냉고로슬래그를 미분쇄한 분말을 고로슬래그 미분말이라 하며, 처리방법에 따라 제품의 결정상태 및 품질이 달라지고 크게 서냉슬래그, 반급냉슬래그, 급냉슬래그 등으로 분류하게 된다. 이들 제품 각각의 용도는 표 3.6.11과 같다.

고로슬래그 미분말은 대부분이 유리질인 비결정구조이며, 유리질의 고로슬래그는

그 속에 포함된 각종 광물이 구조상 불안전한 상태로 알카리성 물질의 자극에 의하여 경화하는 잠재수경성을 가지고 있으며, 유리질량이 많은 고로슬래그 일수록 잠재수경이 크다고 알려져 있다.

고로슬래그 미분말의 사용 용도에 따른 치환율 범위를 살펴보면, 고로슬래그 미분말의 장점을 살리기 위한 치환율 범위는 주로 30~70% 정도이며, 이에 대한 내용은 표 3.6.12와 같다. 치환율 30% 미만인 경우에는 사용한 효과가 현저하게 나타나지 않으며, 오히려 초기재령의 콘크리트 강도발현이 나쁘다는 점과 레미콘 공장에서 고로슬래그 미분말을 사용하는 것에 의한 사일로 증설, 계량관리, 품질관리 업무가 번잡하기 때문에 사용하지 않는 것이 일반적이다. 또한, 고로슬래그 미분말의 치환율이 70%를 넘는 경우에는 초기강도가 현저하게 작게 되고 사용실적도 거의 없으며 그 물성이 충분하게 확인되어 있지 않으므로 사용되고 있지 않다.

표 3.6.12 고로슬래그 미분말의 사용 용도에 따른 치환율 범위

사용 목적	고로슬래그 미분말 치환율 (%)		
	분말도 4000	분말도 6000	분말도 8000
수화열에 의한 온도상승 억제	50~70	60~70	30~70
알칼리골재반응 억제	40~70	40~70	40~70
내황산염성의 향상	50~70	50~70	50~70
해수에 대한 화학저항성(염해 포함)향상	45~55	45~60	45~70
고유동화	30~70	30~70	30~60
고강도화	-	30~50	30~60

(2) 물리·화학적 특성

고로슬래그 미분말에 초기강도의 개선 및 건조수축의 감소와 수화열의 억제를 위하여 분말도 4000cm^2/g에서는 석고를 첨가하는 경우가 많다. 석고류가 첨가된 고로슬래그 미분말은 석고류가 첨가되지 않은 고로슬래그 미분말보다 CaO 함유량이 높고, 겉보기상 고로슬래그의 염기도가 커진다.

급냉시킨 유리구조에 수쇄슬래그는 잠재수경성을 가지고 있는데, 고로슬래그 미분말을 물과 혼합하여 경화작용을 부여하기 위해서는 알카리성 또는 황산염에 자극

을 가하여 OH^-나 SO_4^{2-} 이온의 존재하에서 고로슬래그 미분말은 포틀랜드 시멘트와 같은 수경성을 발휘한다. 일단 수화가 시작되면 장기적으로는 석회 결합 가능성도 나타내기 때문에 고로슬래그 미분말은 포졸란 반응도 함께 갖고 있는 물질로 해석되고 있다. 공장에서 제조한 고로슬래그 미분말의 물리적 특성은 표 3.6.13과 같으며, 표 3.6.14와 표 3.6.15는 고로슬래그 미분말과 보통포틀랜드 시멘트의 화학성분을 나타낸 것이다.

표 3.6.13 고로슬래그 미분말의 물리적 특성

구 분	안정성(%)	건조비중	흡수율(%)	최대건조밀도	단위용적중량	용출시험	팽창성
고로슬래그 미분말	2.2~2.4	2.3~2.6	1.5~6.5	2.1g/cm^3 이상	1,700~1,750kg/m^3	중금속 불검출	팽창성 없음

표 3.6.14 고로슬래그 미분말의 화학적 특성

구 분	구성성분량(%)											
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	MnO	P_2O_3	TiO_2	S	SO_3	K_2O	CL^-
평균	33.1	13.8	42.4	6.1	0.29	0.40	0.008	0.96	0.66	-	0.31	0.004
최소	30.7	12.6	40.5	4.2	0.02	0.19	0.000	0.42	0.41	-	0.18	0.001
최대	34.9	15.2	43.9	9.2	0.64	0.55	0.016	1.73	1.73	-	0.45	0.007

표 3.6.15 보통포틀랜드 시멘트의 화학적 특성

구 분	구성성분량(%)											
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	MnO	P_2O_3	TiO_2	S	SO_3	K_2O	CL^-
평균	21.5	5.2	64.0	1.6	2.9	0.13	0.12	0.31	-	2.0	0.47	0.005
최소	20.5	4.7	62.7	0.8	2.5	0.04	0.03	0.20	-	1.7	0.26	0.001
최대	22.2	5.9	65.0	3.0	3.4	0.23	0.34	0.42	-	2.3	0.71	0.071

고로슬래그 미분말은 주요 화학성분인 SiO2, Al2O3, CaO 및 MgO가 94~97%를 나타낸다. 포틀랜드 시멘트의 경우 MgO가 5%를 초과하면 유리마그네시아가 생성되어 이상팽창의 원인이 되지만, 고로슬래그 미분말의 경우에는 15% 정도 포함하고 있어도 해가 없는 것으로 보고되고 있으며, 대체로 9% 이하의 함유율을 가지고 있다. 고로슬래그 미분말의 반응성은 일반적으로 염기도 [(CaO+MgO+Al2O3)/SiO2] 및 유리질화율이 높을수록 크게 되는 경향을 보인다.

(3) 수화기구

고로슬래그 미분말이 pH12 이상의 수산화칼슘 포화용액 중에 노출되면, 알루미나 규산염의 결합은 약화되어 수화가 시작되고, 칼슘이온이 소비된다. 그러나 Ca(OH)2의 보급을 중단하고, 알카리 농도가 희석되면 반응은 정지하게 된다. 슬래그가 물과 접촉하게 되면 슬래그 입자표면에 치밀한 불투수성의 산성피막이 생기기 때문에 반응을 계속적으로 이어가기 위해서는 강알카리에 의한 피막의 파괴가 필요하게 된다. 이와 같은 자극작용을 위하여 NaOH, KOH 나 Ca(OH)2 + CaSO4 의 첨가도 유효하게 작용할 수 있다. 또한, 자극작용에 의하여 슬래그 표면으로부터 용해반응이 일어나면, 다음에 그 용액으로부터 불용성 물질이 석출되어 경화가 시작되게 된다. 이 경우 슬래그는 장기적으로는 슬래그 질량의 약 10% 에 상당하는 Ca(OH)2와 결합한다. 포틀랜드 시멘트 클링커는 약 25%의 Ca(OH)2를 생성·방출하기 때문에, 클링커:슬래그=25:75 의 혼합비까지는 슬래그의 전부를 활성화 시킬 수 있는 Ca(OH)2를 확보할 수 있다. 슬래그의 수화물은 자극물질에 의해 다소 차이는 있지만 어떤 경우에도 Tobermorite와 유사한 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H, 대표조성 C3S2H3)를 포함한다. NaOH 등의 알카리자극제의 경우에는 C-S-H, C4AH13 및 Gehlenite 수화물 C2ASH8이 생성되고, Ca(OH)2 자극제의 경우에는 C-S-H와 C4AH13이 생성되고 C2ASH8은 생성되지 않으며, 유산염 자극제에서는 C-S-H, ettringite 와 유사한 C3A.3CS.H32와 수산화알루미늄 Al(OH)3가 생성된다. 경화체 중에서는 Mg(OH)2는 나타나지 않고, 슬래그의 C-S-H에는 MgO가 매우 많이 고용되게 된다.

슬래그의 화학성분을 C5AS3로 단순화하여 다음과 같은 화학양론식으로 나타낼 수 있다.

$$C_5AS_3 + 2CaO + 16H_2O \text{ -----> } C_4AH_{13} + 3[C\text{-}S\text{-}H]$$

$$C_5AS_3 + 2CaSO_4 + 76/3H_2O \text{ -----> } 3[C\text{-}S\text{-}H] + 2/3[C_3A \cdot 3CS \cdot H_{32}] + 2/3Al(OH)_3$$

슬래그의 수화물이 수산화칼슘을 생성하지 않는다는 것을 모델화 하여 설명하기 위해서는, 슬래그의 CaO/SiO2 몰비가 1.3정도인 것을 감안할 때, 슬래그가 C3S2라고 생각하면 클링커 광물의 C3S나 C2S 의 수화와 비교하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$3C_3S + 6H_2O \text{ -----> } C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$$

$$2C_2S + 4H_2O \text{ -----> } C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2$$

$$C_3S_2 + 3H_2O \text{ -----> } C_3S_2H_3$$

C-S-H의 성분을 조사해보면, C-S-H 중에 MgO, Al2O3가 포틀랜드시멘트의 경우보다 매우 많이 포함되어 있고, 전자현미경 관찰에 의하면 C-S-H는 치밀하지만 결정성은 좋지 않다. 또한 ettringite 는 침상결정을 하고 있고, 슬래그 함유량이 많을수록 짧고 얇아진다.

슬래그계 경화체는 초기재령에서는 슬래그 함유량이 많을수록 전 세공용적은 크지만, 수화의 진행과 함께 슬래그의 함유량이 큰 것일수록 전 세공용적은 작아지고, 미소세공량이 커진다. 또한 슬래그의 수화반응성은 슬래그의 화학조성, 분말도, 양생조건, 유리화율 등에 따라 다르다.

(4) 국내 및 국외 품질 규격

고로슬래그 미분말에 대한 외국의 규격은 ASTM C 989-82(Standard Specification for Ground Iron Blast-Furnace Slag for Use in Concrete Mortars), BS 6699-1986(British Standard Specification for Ground Granulated Blast Furnace Slag for Use with Portland Cement) 및 CSA Standard A 363-M 1983 Cementitions Hydraulic Slag 등이 있다. 일본은 토목학회 규준인 “콘크리트용 고로슬래그 미분말 규격” 등이 있으며, 표 3.6.16은 국내·외 고로슬래그 미분말의 사용 및 규격화 현황을 나타내었으며, 표 3.6.17은 각국의 규준을 개략적으로 나타낸 것이다.

표 3.6.16 국내·외 고로슬래그 미분말 사용 및 규격화 현황

년 차	국 외	국 내
1923	독일, 고로슬래그 미분말(Thurament)	-
1933~1934	벨기에, Victor Tnef, 습식분쇄방식 슬래그제조기술 특허	-
1953	남아프리카공화국, 건식고로슬래그 미분말 발표	-
1958	남아프리카공화국, 고로슬래그 미분말 생산 시작	-
1967	일본, 분리방식에 의한 고로슬래그 시멘트 생산	-
1969	영국, 고로슬래그 미분말 생산 및 판매	-
1975	캐나다, 고로슬래그 미분말 본격 생산	-
1977	캐나다, 고로슬래그 미분말 규격 제정(CSA A 363)	고로슬래그시멘트 생산 시작
1981	미국, 고로슬래그 미분말 본격 생산	-
1982	미국, 고로슬래그 미분말 규격 제정(ASTM C 989)	-
1985~1988	일본, 고로슬래그 미분말 생산설비 증설 및 가동	-
1986	영국, 고로슬래그 미분말 규격 제정(BS 9966)	-
1989	일본, 토목학회, 콘크리트용 고로슬래그 미분말 규격(안)제정	-
1989~1993	남아프리카공화국, 고로슬래그 미분말 규격 제정(SABS 1491)	-
1995	일본, 건축학회, 고로슬래그 미분말 연구착수	콘크리트 설계·시공지침(안) 작성
1997	일본, 콘크리트용 고로슬래그 미분말규격 제정(JIS A 6206)	영종도 공항에 적용
1997		콘크리트용 고로슬래그 미분말 규격 제정(KS F 2563)

표 3.6.17 국외 고로슬래그 미분말의 규격

규격 / 항목	일 본 토목학회	미 국 ASTM-C 989	영 국 BS-6699	캐나다 CSA-A 363
염기도 (C+M+A)/S	 1.4 이상	 -	 1.0 이상	 -
insol. (%)	-	-	1.5 이하	-
ig. loss (%)	3.0 이하	-	3.0 이하	-
유황S (%)	2.0 이하	2.5 이하	2.0 이하	-
삼산화유황 SO_3(%)	3.0 이하	4.0 이하	-	2.5 이하
MgO (%)	10.0 이하	-	14.0 이하	-
습분 (%)	1.0 이하	-	1.0 이하	-
분말도 45㎛잔분 (%) 비표면적 (㎠/g)	 - 2750 이상	 20 이하 -	 - 2750 이상	 20 이하 -
활성도지수(SAI)(%)	7일 55 이상 28일 75 이상 91일 95 이상	80 급 - 28일 75 이상 - 100 급 7일 75이상 28일 95이상 120 급 7일 95 이상 28일 115 이상		- 28 80 이상 -
플로우값 비율 (%)	95 이상	-	-	-

국내의 고로슬래그 미분말의 규격은 1997년에 개정된 KS F 2563 이며, 고로슬래그 미분말의 종류를 1종, 2종, 3종 총 3종류로 구분하였다. 다음 표 3.6.18과 표 3.6.19는 국내 고로슬래그 미분말의 규격 및 품질에 대한 규정을 나타내고 있다. 고로시멘트에 사용되는 고로슬래그 미분말의 염기도의 경우 JIS에서는 1.4 이상을 요구하고 있으며, 독일의 경우 1.0 이상으로 규정하고 있다. 그러나 독일의 DIN 4210 "고황산염슬래그시멘트" 에서는 고로슬래그의 염기도가 1.6이상, 산화알루미늄은

13%이상을 요구하고 있다. 또한 결합재로서 가장 중요한 강도특성을 살펴보면, 일본토목학회, ASTM, CAN의 규정에서는 보통포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 미분말을 등량 혼합한 모르타르의 강도를 보통포틀랜드 시멘트만을 사용한 모르타르 강도비로 표시하는 활성도지수(%)로 고로슬래그 미분말의 강도발현성을 나타내는 것이 많다.

표 3.6.18 국내 고로슬래그 미분말의 규격(KS F 2563, 1997)

종 류 / 품 질		고로슬래그 미분말		
		1종	2종	3종
비중		2.80 이상	2.80 이상	2.80 이상
비표면적		8,000~10,000	6,000~8,000	4,000~6,000
활성도지수(%)	재령7일	95 이상	75 이상	55 이상
	재령28일	105 이상	95 이상	75 이상
	재령91일	105 이상	105 이상	95 이상
플로우 값(%)		95 이상	95 이상	95 이상
산화마그네슘(MgO)(%)		10.0 이하	10.0 이하	10.0 이하
삼산화황(SO_3)(%)		4.0 이하	4.0 이하	4.0 이하
강열감량(%)		3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하
염화물 이온(%)		0.02 이하	0.02 이하	0.02 이하

표 3.6.19 고로슬래그 미분말의 품질

종 류	비표면적(㎠/g)		활성도지수 SAI(%)			플로우 값비(%)	
	범 위	평 균	재 령	범 위	평 균	범 위	평 균
고로슬래그 분말도 4000	3,760~4,950	4,320	7일 28일 91일	55~96 80~127 94~144	68.2 100.8 116.5	96~116	102.7
고로슬래그 분말도 6000	5,290~6,880	6,160	7일 28일 91일	80~97 97~127 110~133	87.8 111.4 119.5	99~118	105.9
고로슬래그 분말도 8000	7,420~9,410	8,310	7일 28일 91일	90~129 110~146 110~153	107.1 127.9 130.3	93~118	102.8

(5) 치환한 콘크리트의 특성

(가) 블리딩 및 응결시간에 미치는 영향

일반적으로 고로슬래그 미분말의 분말도가 커짐에 따라 블리딩율은 감소하며, 이는 미분말의 효과에 의한 것으로 판단된다. 한편 응결시간의 경우 기 수행된 연구에서는 고로슬래그 미분말의 혼입율이 증가함에 따라 초결, 종결 모두 지연되지만, 분말도에 따른 응결시간의 변화는 그다지 크지 않은 것으로 보고되고 있다.

(나) 압축강도에 미치는 영향

분말도 3,000~4,500cm2/g의 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 초기강도는 포틀랜드 시멘트보다 작게 나타났으며, 이러한 경향은 고로슬래그 혼입율이 클수록, 또는 물-시멘트비가 작아질수록 현저하게 나타났다. 미국의 경우 ASTM C 989에서는 슬래그 활성도지수의 등급이 120인 고품질 고로슬래그 미분말(5,200cm2/g)이 생산되고 있다. 이 제품은 재령 7일의 슬래그 활성도지수가 90%이상이며, 슬래그 혼입율이 30~65%, 물-시멘트비가 44~76%의 범위에서는 재령 7일 콘크리트 강도가 포틀랜드 강도를 상회하는 것으로 나타났다.

또한 일본의 경우 분말도 8,000cm2/g 이상의 고로슬래그 미분말이 생산되고 있으며, 슬래그 혼입율 50%의 경우에는 재령 7일 강도부터 치환하지 않은 경우의 콘크리트 강도를 상회하는 것으로 보고되고 있다.

(다) 동결융해 및 화학저항성에 미치는 영향

일반 콘크리트의 내동결융해성은 충분한 양의 연행공기를 도입시키고 물-시멘트비를 적게 하여 시공할 경우 크게 향상되는 것으로 알려져 있다. 시멘트의 종류, 또는 시멘트 경화체의 기공구조 상이 등이 내동결융해성에 미치는 영향에 관해서는 학자들간에 다소의 의견차이를 보이고 있지만, 실용적 면에서 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트도 포틀랜드 시멘트와 우사한 결과를 나타내는 것으로 보고되고 있다. 그러나 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트에서는 소요 공기량을 얻기 위한 AE제의 사용량이 슬래그 혼입율에 따라 증가하는 경향을 나타낸다.

고로슬래그 미분말을 사용한 경화체는 세공반경 50μm 이하의 전 세공용적은 포틀랜드 시멘트 경화체와 별 차이는 없지만, 세공경 분포는 현저한 차이를 보인다. 또한 고로슬래그 혼입율이 클수록 미세공이 많아지며, 동경가능한 세공 용적수가 작아져 동결융해에 대해 유리하게 된다. 그러나 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 수화속도 및 수화열 발생량이 작기 때문에 초기 동해에 주의하여야 하며, 이에 대한 방지책으로는 물-시멘트비를 작게 하고 이와 더불어 초기양생기간의 연장이 필요하다.

나. 고로슬래그 미분말의 국내·외 기술개발 현황

(1) 슬래그 재활용 기술

많은 금속은 산화물의 광석형태로 지구상에 존재한다. 즉, 용광로에서 철광석으로부터 철을 만드는 경우에는 철광석 중의 규소, 알루미늄, 칼슘 등은 환원되지 않고 산화물의 형태로 남아 용융하며, 하부에는 철이 모이고, 상부에 이들의 용융산화물이 남는다. 이 용융한 산화물이 슬래그이지만 비철금속의 정련 시에도 슬래그가 발생한다. 더욱이 이 용융한 산화물을 냉각하여 돌이나 모래로 생성된 것도 슬래그로 이같이 금속의 정련에 동반하여 발생한다. 또한 도시 쓰레기 및 하수오니의 소각재도 규소, 알루미늄, 칼슘 등의 산화물이므로 이들의 소각재를 똑같이 고온으로 가열하여 용융, 냉각하여 고화한 것도 슬래그 종류 중 하나이다.

(가) 고로슬래그 처리기술

철광석에는 인체에 유해한 중금속이 포함되어 있는 경우는 적으며, 이로 인해 생성된 슬래그는 그대로 돌이나 모래, 흙의 대체품으로 사용할 수 있다. 기타의 금속 정련로에서 발생하는 슬래그도 거의 같다. 철광석으로부터 철을 만드는 경우는 고로에서 제조된 쇳물에 고압의 산소를 불어넣어 정련하는 과정이 행해진다. 이 두 공정에서 고로슬래그와 전로슬래그가 발생한다.

고로슬래그는 슬래그를 대표하는 재료 중 하나이며, 시멘트 공업에서 대규모로 사용되고 있다. 발생량의 2/3가 시멘트용, 1/5이 도로용으로 사용되며, 이들 양자가 고로슬래그 용도의 대부분으로 차지되고 있다. 고로슬래그 쇄석의 도로재료 이용 역사는 오래되었으며, 용도의 확대로 노반재 뿐만 아니라 표층재, 기층재, 지반개량재, 아스팔트용 골재 등의 도로건설재료 전반에 걸쳐 사용되고 있다. 콘크리트의 골재로서 이용하는 경우도 그 역사가 매우 길며, 입도가 큰 것은 쇄석으로서, 작은 것은 모래로 이용한다. 상당한 고로슬래그 발생량으로 인해 과거부터 중요하게 이용되어 왔으나, 최근 들어 그 발생량과 수요량의 관계가 무너져서 고로슬래그의 새로운 재활용 방도가 필요하게 되었다. 그리하여 현재까지 벽타일, 도기, 유리의 부원료 및 발포조제와 함께 소성하여 경량 건재로 사용하는 연구 등이 이루어지고 있는 실정이다.

(나) 기타 슬래그의 처리기술

전로슬래그는 고로슬래그와는 달리 팽창자괴성(자연적으로 붕괴하는 성질)이 있어, 도로 건설용자재의 이용이 상대적으로 늦어졌다. 이 팽창자괴성은 에이징 및 아스팔트에 덮는 것으로 방지할 수 있게 되었으며, 현재까지도 고로슬래그에 비하여 활용성은 크진 않지만, 향후 개선될 것으로 전망된다. 전로슬래그는 고로슬래그에 비하여 천연석 및 생물의 부착이 많기 때문에 커다란 전로슬래그의 덩어리를 해저에 퇴적하여 어초로 사용하는 방안이 시도되고 있으며, 중간크기의 덩어리는 상자에 넣어 어초로 사용되고 있다. 또한 농업분야에서는 농사용 특수비료 및 밭농사, 목초, 시설원예용의 비료로서도 기개되고 있다.

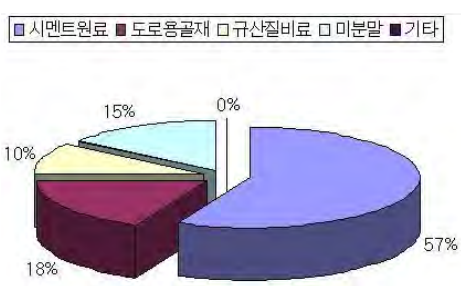
동슬래그는 동의 정련 시에 발생하는 재료로서, 철의 산화물과 규소의 산화물이 주가 되며, 시멘트 원료 및 토목, 건축용 골재, 매립용 자재, 제철용 원료로 이용된다.

(2) 국내 기술개발 현황

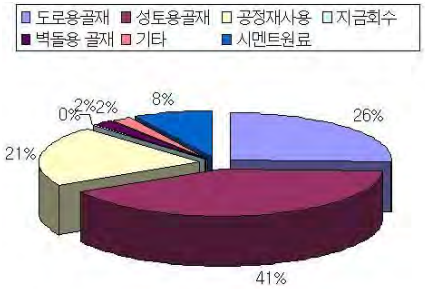
(가) 고로슬래그의 재활용 기술 현황

국내의 철강슬래그 재활용 현황은 포스코(2002)의 조사자료에 의하면 그림 3.6.9에서 나타난 바와 같이 2002년의 경우 고로슬래그는 시멘트용 원료를 포함한 고부가가치로의 재활용율이 82%에 달하며, 단순매립을 위한 도로용 골재는 18%에 지나지 않는다. 따라서, 고로슬래그의 재활용 기술은 선진국과 큰 차이가 없다. 그러나 제강슬래그는 시멘트원료로서의 사용이 약 8% 정도이며, 단순 성토용 골재나 매립용 골재로의 사용이 67%를 차지하고 있다. 이와 같이 국내에서도 Free-CaO 등에 의한 팽창 붕괴성 때문에 제강슬래그의 재활용에 어려움을 겪고 있다.

최근 국내에서는 (주)에코마이터스에서 제강슬래그를 풍쇄화하여 특수가공 기술을 세계최초로 개발함으로서 Free-CaO 에 의한 팽창 붕괴성을 해결하였다. 또한 이렇게 특수가공 처리된 제강슬래그(이하 철강슬래그)는 입형이 둥글고, 경도가 우수하며 안정한 골재 형태를 가지고 있어 콘크리트 보수용 골재로 사용할 경우 우수한 성능을 발휘할 것으로 기대된다.



(a) 고로슬래그



(b) 제강슬래그

그림 3.6.9 용도별 철강슬래그 처리 현황(한국철강협회, 2002)

(나) 고로슬래그 재활용 실태파악

1) 국내 철강 지표

1998년부터 2003년 국내 철강 지표는 표 3.6.20과 같으며, 선철생산량과 조강생산량이 꾸준히 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

표 3.6.20 국내 철강 지표

구 분	단 위	2003	2002	2001	2000	1999	1998
선철생산	천톤	27,314	26,570	25,898	24,937	23,329	23,299
조강생산	천톤	46,310	45,390	43,852	43,107	41,042	39,896
전로비중	%	55.2	54.8	56.4	57.2	58.4	59.7
전기로비중	%	44.8	45.2	43.6	42.8	41.6	40.3
연주비	%	98.5	98.6	98.5	98.6	98.7	98.6
특수강비	%	14.6	13.1	12.4	12.6	13	11.1
강재생산	천톤	53,269	51,676	48,891	48,731	42,936	40,205
1인당 강재소비량	kg	947	918	805	815	724	532
철강근로자수	천명	57	57.1	56.5	57.3	57.5	59.5
생산부문	천명	41.7	42.3	42.1	43	42.9	44.4
철강생산액	억원	585,721	507,003	476,115	476,700	449,559	438,448
설비투자액	억원	16,250	20,551	20,286	12,577	15,923	30,848

* 출처 : 한국철강협회

2) 국내 슬래그 발생량 및 재활용량

① 2003년 슬래그 발생량 및 재활용율 (단위 : 톤, %)

국내 슬래그 발생량은 2003년을 기준으로 고로슬래그 8,075,797톤, 제강슬래그

6,877,053톤으로 표 3.6.21 및 그림 3.6.10과 같다.

표 3.6.21 슬래그 발생량 및 재활용율(2003)

구 분	고로슬래그	제강슬래그	합 계
발생량(톤)	8,075,797	6,877,053	14,952,850
재활용량(톤)	8,075,797	6,768,447	14,844,244
재활용율(%)	100	98.4	99.3

* 출처 : 한국철강협회

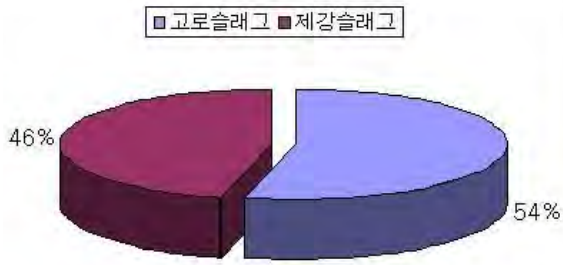


그림 3.6.10 슬래그 발생량 및 재활용율(한국철강협회, 2003)

② 슬래그의 주요 용도별 처리내역(2003)

표 3.6.22의 2003년 슬래그 별 처리내역을 살펴보면, 고로슬래그는 대부분 시멘트 원료로 사용되고 있음을 알 수 있다. 현재 고로슬래그는 처리업자들이 무상 또는 일정의 비용을 제철소에 지출하여 반출하는 반면, 제강슬래그는 부피 팽창과 같은 문제점 때문에 도로용 또는 성토용 골재로 대부분 재활용되고 있고, 반출시 제철소의 슬래그 처리비와 운반비 지원 등의 비용이 추가되므로 고로슬래그와 같이 부가가치가 있는 상품으로는 볼 수 없는 것이 현실이다. 따라서 슬래그 재활용 연구는 고로슬래그보다는 제강슬래그 재활용에 초점이 맞추어 지고 있다.

표 3.6.22 주요 용도별 처리내역(한국철강협회, 2003)

구 분	고로슬래그(톤, %)		제강슬래그(톤, %)	
시멘트원료	6,076,987	75.2%	461,387	6.8%
도로용골재	1,291,811	16.0%	2,368,310	35.0%
성토용골재	-	-	2,117,947	31.3%
규산질비료	6,532,384	8.1%	68,605	1.0%
미분말	-	-	-	-
공정재사용	-	-	1,520,597	22.5%
지금회수	-	-	-	-
벽돌용골재	-	-	137,360	2.0%
건자재용	54,615	0.7%	-	-
기타	-	-	94,241	1.4%
계	8,075,797	100.0%	6,768,447	100.0%

③ 국내 슬래그 발생량 및 처리현황

표 3.6.23에서와 같이 1999년부터 2002년 국내 슬래그 발생량은 제강 생산량과 동일하게 지속적으로 증가함을 알 수 있다. 고로슬래그는 1999년 이래 100%의 재활용율을 나타내고 있고, 제강슬래그는 95%~100%의 재활용율을 나타내고 있다.

④ 국내 제강슬래그 및 조강생산량

표 3.6.24의 1999년부터 2003년 제강슬래그 발생량을 조강생산량으로 나누어 보면, 약 15% 정도의 비율로 일전하게 나타났다. 따라서 조강생산량에 0.15를 곱한 값을 제강슬래그 발생량으로 추산할 수 있다.

표 3.6.23 국내 슬래그 발생량 및 처리현황(단위 : 톤)

구 분		발생량	재활용		종말처리	
			재생이용	처리업자	자가처리	위탁처리
1999	고로슬래그	7,994,204	5,906	7,988,298		
	제강슬래그	6,107,416	1,502,305	4,519,797	496	
	전로	3,878,131	1,315,260	2,562,871		
	전기로	2,229,285	187,045	1,956,926	496	
	기타	69,330	-	75,370		
	계	14,170,950	1,695,256	12,583,456	496	
2000	고로슬래그	8,192,633	3,381	8,189,252		
	제강슬래그	6,545,492	1,600,603	4,755,344	984	
	전로	4,104,611	1,188,077	2,916,534		
	전기로	2,440,811	412,526	1,838,810	984	
	기타	72,256	-	66,927		1,923
	계	14,810,381	1,603,984	13,011,523	984	1,923
2001	고로슬래그	8,257,780	-	8,257,780		
	제강슬래그	6,537,739	1,721,660	4,816,079		
	전로	3,937,681	1,352,700	2,584,981		
	전기로	2,600,058	368,960	2,231,098		
	기타	66,890	-	64,890		
	계	14,862,409	1,721,660	13,138,749		
2002	고로슬래그	8,169,272	-	8,169,272		
	제강슬래그	6,822,520	1,619,950	4,821,063		
	전로	4,049,002	1,397,850	2,651,152		
	전기로	2,773,518	222,100	2,169,911		
	기타	84,454	-	72,630		6,221
	계	15,076,246	1,619,950	13,062,965		6,221

* 출처 : 한국철강협회

표 3.6.24 국내 제강슬래그 및 조강생산량(단위 : 톤)

구 분	1999	2000	2001	2002	2003
고로슬래그	7,994,204	8,192,633	8,257,780	8,169,272	8,075,797
제강슬래그	6,107,416	6,545,492	6,537,739	6,822,520	6,877,053
기타	69,330	72,256	66,890	84,454	-
계	14,170,950	14,810,381	14,862,409	15,076,246	14,952,850
조강슬래그량/조강생산량	14.9%	15.2%	14.9%	15.0%	14.9%

* 출처 : 한국철강협회

⑤ 슬래그 발생량 및 재활용율(2005)

그림 3.6.11와 그림 3.6.12의 (a)와 (b)는 2005년을 기준으로 하여 국내 슬래그 발생량 및 재활용 현황을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 2003년의 1,495만톤과 비교하여 2005년의 슬래그 발생량은 1,681만톤으로 슬래그 발생량 및 재활용량이 약 11% 정도 증가했음을 알 수 있다.

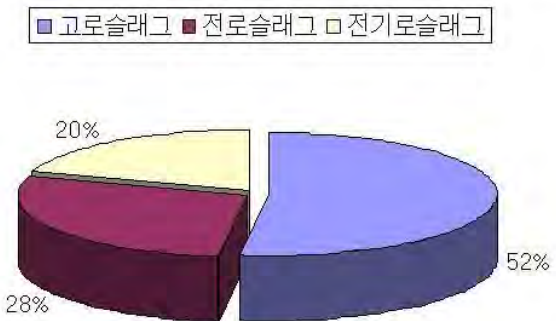
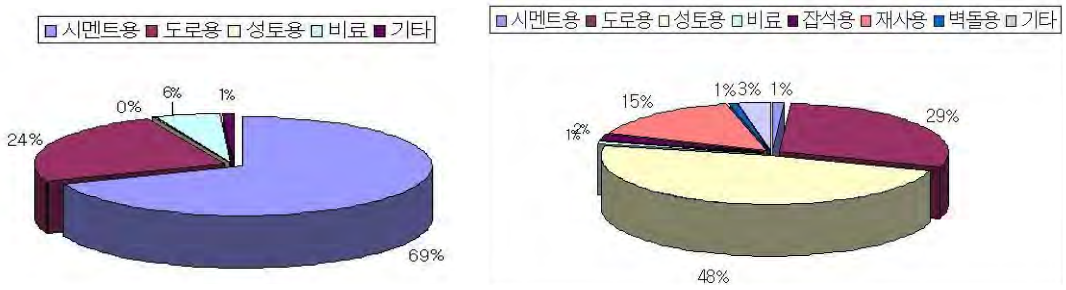


그림 3.6.11 슬래그 발생량 현황(한국철강협회, 2005년)



(a) 고로슬래그 (b) 제강슬래그

그림 3.6.12 슬래그 재활용 현황(한국철강협회, 2005)

(3) 국외 기술개발 현황

(가) 고로슬래그의 재활용 기술 현황

철강 생산에서 발생되는 철강슬래그는 고로슬래그와 제강슬래그로 대별된다. 그림 3.6.13에 나타낸 것과 같이 고로슬래그는 서냉슬래그와 고로수쇄슬래그로 나누어지고, 제강슬래그는 강의 제조방법에 따라 전로슬래그와 전기로 슬래그로 분류되고, 더욱이 전기로 슬래그에는 전기로 산화슬래그와 저기로 환원슬래그로 나누어진다.

이중 고로슬래그에 관한 연구가 일본, 미국, 유럽 등에서 활발히 진행되어 왔다. 현재 고로 서냉슬래그는 분쇄하여 도로용, 콘크리트용 골재로 재활용하고 있고, 고로수쇄슬래그는 콘크리트용 혼화재료로 재활용 하고 있다. 고로수쇄슬래그는 용융상태의 슬래그를 급냉 처리한 후 건조 및 미분쇄하면 잠재수경성을 지니게 된다. 이와 같이 제조된 고로슬래그 미분말을 콘크리트용 혼화재료로 사용할 경우 수화열에 의한 온도상승 억제, 알카리골재반응 억제, 황산염 또는 해수에 대한 화학저항성 향상, 염화물이온 또는 산소의 침투에 대한 저항성이 우수한 장점을 지니고 있다. 이러한 장점으로 인해 일본, 미국, 유럽 등에서 콘크리트용 혼화재료로 유용하게 재활용 하고 있다. 그러나 고로슬래그와 달리 제강슬래그는 Free CaO, MgO, FeO 등을 함유하고 있어 이들이 물과 반응하여 팽창 붕괴하는 성질을 가지고 있기 때문에 건설재료로 재활용하는데 어려움을 가지고 있다. 특히, Free-CaO의 함량이 1% 이상이 되면 Free-CaO 는 슬래그 내부로 침투되는 물과 반응하여 Ca(OH)2를 생성에 의한 체적팽창 때문에 제강슬래그의 붕괴를 초래한다.

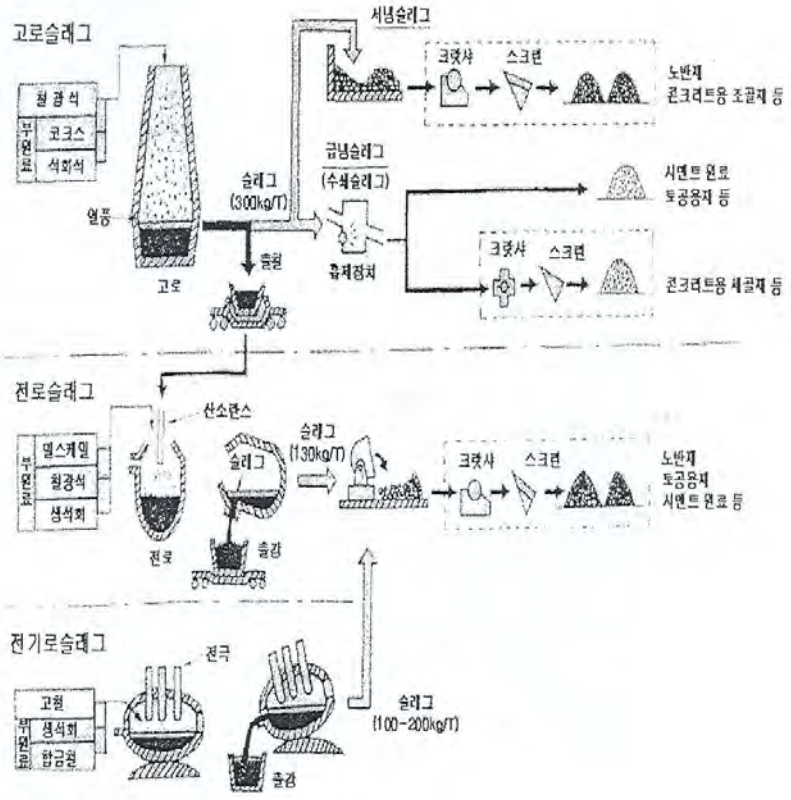


그림 3.6.13 철강슬래그의 발생공정 및 재활용

(나) 국외 슬래그 발생량 및 재활용량

1) 유럽의 슬래그 발생량 및 재활용량(2002)

EU의 경우 그림 3.6.14와 같이 발생되는 제강슬래그를 시멘트 원료로 재활용하는 비율이 국내보다 높음을 알 수 있다. 그러나 결국에는 국내와 마찬가지로 최종매립 등의 방법으로 처리를 하고 있으며, 이는 EU의 경우에도 제강슬래그 처리에 여러 가지 문제점이 있음을 나타낸다.

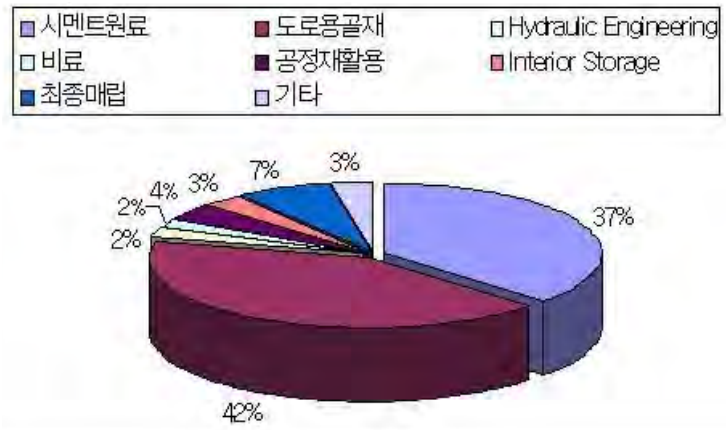


그림 3.6.14 EU의 제강슬래그 재활용 현황(한국철강협회, 2002)

2) 독일의 슬래그 발생량 및 재활용량(2000)

독일의 슬래그 발생현황은 표 3.6.25에 나타난 바와 같이 2000년 기준으로 고로슬래그 7,500천 톤, 제강슬래그 5,800천 톤이 발생되었다. 슬래그의 재활용율은 고로슬래그의 경우 그림 3.6.15의 (a)에 나타난 바와 같이 약 63%가 건설재료로 사용되고 있다. 제강슬래그의 경우도 (b)에 나타난 바와 같이 약 68% 정도가 시멘트용 재료로 사용되고 있어 유럽국가 중 슬래그를 가장 효율적으로 재활용 하고 있다.

표 3.6.25 독일의 슬래그 발생량(한국철강협회, 2000)

구 분	발생량(천톤)	%
고로슬래그	7,500	56.4
제강슬래그	5,800	43.6
합계	13,300	100.0



(a) 고로슬래그



(b) 제강슬래그

그림 3.6.15 독일의 철강슬래그 재활용 현황(한국철강협회, 2000)

3) 일본의 고로슬래그 재활용 현황

일본의 경우 그림 3.6.16과 같이 시멘트용 원료로서의 재활용율이 63%로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 도로용 및 토목용, 콘크리트 골재용으로 재활용을 하고 있다.

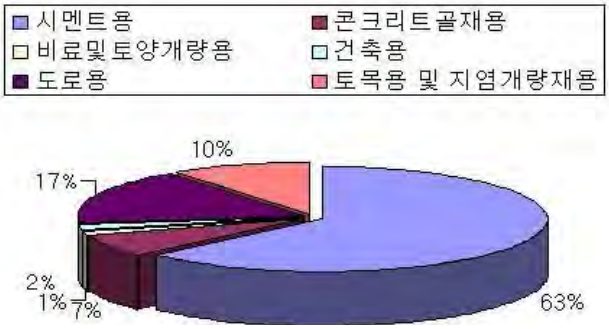


그림 3.6.16 일본의 고로슬래그 재활용 현황(한국철강협회, 2000)

(4) 파이넥스(Finex) 공법

(가) 개요

파이넥스 공법은 기존의 용광로 공법과 달리 자연 상태의 가루형태 철광석과 일반탄을 직접 사용할 수 있는 경제적인 신제철 공법으로, 고급 원료 매장량 감소에 따라 선진 철강사들도 앞다투어 개발에 나섰던 용융환원제철 공법 중의 하나다. 특히 소결공장이 필요해 부지를 많이 차지했던 기존 고로보다 부지사용면적도 적고 발생되는 폐가스가 적은 친환경적인 공법이다. 또 에너지 사용도 적고 고로보다 적은 원료로

제품을 만들 수 있는 공법이다. 지난 1992년부터 차세대 제강기술로 기술개발에 들어간 파이넥스공법은 용광로 공법을 대체하는 신제철 기술로 떠오르게 된다. 파이넥스는 6월 연산 60만톤 규모의 데모 플랜트가 준공돼 연산 80만여톤을 생산해왔으며, 특히 2005년말 최종 상용화 기술이 완료되어 대대적인 상용화가 이어질 것으로 보인다.

선진 철강사들이 기존의 용광로를 대체할 수 있는 혁신 공법 개발에 착수했고, 일본의 DIOS법, 호주의 HISMELT법, 유럽의 CCF법, 브라질의 TECNORED법 등이 거의 동시에 개발에 추진해 왔으나, 연산 80만톤 규모로 상업화 추진중인 호주의 HISMELT법을 제외하고는 개발이 지지부진한 상태이며, 중간단계인 코렉스(COREX) 공법을 먼저 도입해 상용화하고 착실히 기술개발을 추진해 온 포스코건설의 파이넥스 공법이 가장 상업화에 근접했다는 평가를 받고 있다. 이런 평가와 더불어 포스코건설은 2004년 8월 17일 포항제철소에 건설되는 설비용량 150만톤 규모의 파이넥스(FINEX) 플랜트의 착공식을 갖고 공사에 들어감으로써 코렉스(COREX)보다 한 단계 발전된 차세대 제철기술인 파이넥스 건설 분야에서 독보적 기술력을 보유하게 됐다.

(나) 용광로 대체 기술 파이넥스

최근 포스코가 용광로 공법을 대체할 수 있는 차세대 혁신 제철 기술인 파이넥스 개발에 성공해 상용화 설비를 착공함으로서 세계 철강사의 일대 변혁을 예고하고 있다. 파이넥스 공법은 기존 용광로 공법과 달리 가루형태의 철광석과 일반탄을 직접 사용하는 새로운 제철공법이다. 고급 원료 매장량 감소에 따라 미국, 일본, 유럽 등 선진 철강국에서도 앞다투어 개발에 나섰던 '차세대 신제철 기술'이다.

기존의 용광로 공법은 14세기 개발돼 상업화된 후 100여년 동안이나 생산성과 에너지 최적화 등으로 가장 경쟁력 있는 제철공법으로 평가받아 왔지만 결정적으로 철광석과 유연탄을 사전 가공해 원료로 사용해야 된다는 단점을 갖고 있다. 왜냐하면 철광석과 유연탄을 용광로에 넣어 환원작용과 용융작용이 한꺼번에 일어나는 환원이 잘 되도록 하기 위해서는 용광로 내에 공기 유통이 잘돼야하고 그러기 위해서는 원료들을 덩어리 형태로 사전 가공해야 하기 때문이다. 이에 따라 철광석을 덩어리 형태로 가공하는 소결공장이나 유연탄을 코크스로 만드는 화성공장의 건설과 조업에 따른 투자비 부담이 높을 뿐 아니라, 이 공정에서 황산화물(SOx)이나 질소산화물(NOx), 분진 등 오염물질 발생

량 많아 오염방지시설에 대한 추가 투자도 불가피 하다. 더구나 덩어리 형태로 잘 뭉쳐지는 고점결성 유연탄은 세계 석탄 매장량의 약 15%에 불과해 원료 고갈 위협에 직면해 있는 실정이며 철광석도 80% 이상이 분광이다.

파이넥스 공법은 전세계 조강 생산량의 60% 이상을 차지하는 용광로 공법을 대체할 수 있는 용융환원 제철법 중 하나이다. 파이넥스 공법은 가루형태의 철광석과 유연탄을 사전 가공 공정 없이 바로 사용할 수 있어 철광석과 유연탄을 1차 가공하거나 덩어리 형태의 원료를 사용하는 용광로 공법보다 진일보한 기술이다. 이와 함께 파이넥스 공법은 오염물질 발생 가능성도 현저하게 줄어들어서 대표적인 환경 오염물질인 황산화물(SOx)이 용광로의 8%, 질소산화물(NOx)은 4% 수준에 그치는데다 비산먼지도 용광로 공법의 28% 수준으로 크게 낮추는 등 공해물질의 배출량도 크게 줄일 수 있어 환경 친화적인 미래형 제철공정으로 각광받을 전망이다. 이에 따라 파이넥스공법은 원료고갈과 환경규제 강화 등 미래 경영 환경에서 획기적으로 경쟁력을 높일 수 있는 혁신 프로세스로 각광을 받고 있다.

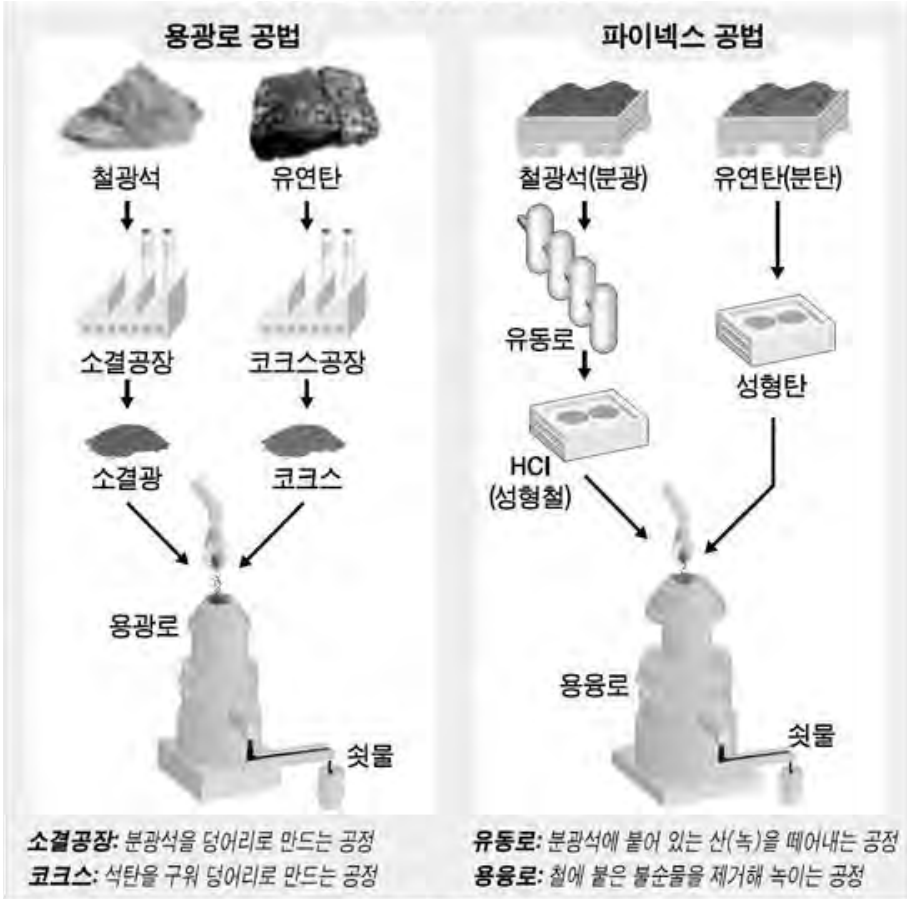


그림 3.6.17 용광로와 파이넥스 공법 비교

(다) 세계 각국의 기술개발 동향

파이넥스 공법과 관련하여 일본은 DIOS 공법, 호주는 HISMELT 공법, 유럽은 CCF 공법, 브라질은 TECNORED 공법이라는 이름으로 개발에 나섰으나, 연산 80만톤 규모로 상업화 추진 중인 호주의 HISMELT 공법을 제외하고는 나머지 공법 개발은 지지부진한 상태이다. 호주의 HISMELT 공법도 상용화를 위한 공사를 시작했으나 아직은 규모가 연산 80만톤 미만이어서 고로를 대체하기에는 아직 규모면에서 미비하여 성능적인 측면도 검증이 되지 못했다. 국내에서는 한보철강이 파이넥스를 추진했으나 현재는 공사가 중단되었고, INI스틸에 매각되면서 코렉스로는 고로로 대체될 것으로 예상된다.

포스코도 중간단계인 코렉스 공법을 먼저 도입해 파이럿 플랜까지는 성공했으나보다 진일보한 파이넥스 공법으로 방향을 선회한 상황이다. 또 파이넥스 연간 150만톤 규모의 상업 플랜트가 완성된 경우 고로를 대체할 수 있는 기술로 각광을 받을 전망이다. 포스코는 1992년부터 오스트리아 푀스트 알피네사와 공동으로 파이넥스공법의 연구개발에 착수했으며 기술의 조기 안정화를 위해 우선 80년대부터 독일, 남아프리카공화국 등에서 개발중에 있던 코렉스공법을 도입한 바 있다.

(라) 국내 슬래그 산업에 미칠 영향

제철소 고로에서 선철을 제조하는 과정에서 발생하는 생성물인 고로슬래그 사용량이 가장 많은 토목 및 건축을 포함한 건설업계일 것이다. 하지만 일부 건설업계 종사자들은 용광로 대체 기술인 파이넥스 공법으로 인해 고로슬래그의 원재료비 상승 및 시공에 차질을 줄 수 있을 것이라 생각하고 있다.

하지만, 앞절에서 조사한 결과를 살펴보면, 슬래그는 고로이외에 전기로에서도 생산이 가능하며, 여기서 생산되는 슬래그를 제강슬래그라 한다. 일반로이외에 제강슬래그는 용융된 슬래그를 서냉시켜 임팩트 브레이크로 파쇄한 후, Free-CaO에 의한 팽창 붕괴성을 해결하기 위해서 약 6개월간 야적하여 에이징 처리를 한 후 사용용도에 맞게 재 분쇄시켜 사용하고 있는 실정이다.

그리하여 고로슬래그 대신에 그 외의 슬래그도 사용될 수 있다고 판단된다. 또한 현재에제강슬래그에 대한 활발한 연구들이 다수의 학자와 기업들에 의하여 수행되어 지고 있으므로, 국내 슬래그산업 및 건설업계에 미칠 영향은 그

다지 크지 않을 것으로 판단된다. 따라서, 고로슬래그를 치환한 레디믹스트 숏크리트 개발에 있어 고로슬래그 발생량의 감소는 크게 염려할 부분이 아닌 것으로 판단된다.

3. 고로슬래그 미분말의 숏크리트 적용성 평가

가. 이론적 고찰

본 절에서는 숏크리트 재료에 고로슬래그 미분말을 혼입하여, 이에 대한 적용성을 평가하고자 한다. 고로슬래그 미분말은 지금까지 콘크리트 공법에는 적용된 사례가 다수 있으나 숏크리트 공법에 적용된 사례는 아직 찾아보기 어렵다. 하지만, 산업부산물을 경제적으로 재활용하고 숏크리트의 장기강도 및 내구성을 향상시킬 수 있는 이점을 가지고 있으며, 지금까지 콘크리트 공법에 적용된 사례를 바탕으로 레디믹스트 숏크리트 재료로서 충분한 개발 가능성이 있다고 판단된다. 또한, 숏크리트 품질제고 효과 외에 고로슬래그는 사회·환경적으로도 큰 의미를 가진다. 시멘트 1톤을 제조할 때 석회석이 1.4톤 소비되기 때문에 시멘트의 일정량을 대체해 고로슬래그를 사용하면 석회석 자원 절약과 시멘트 제조에 필요한 경유 사용을 모두 줄일 수 있다.

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 보통 콘크리트와 동일한 용도 및 목적으로 적용할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 고로슬래그 미분말의 비표면적, 치환율 등의 물리적 특성에 따라 보통 콘크리트에 비하여 우수한 특성을 발휘하는 것으로 알려져 있다.

① 워커빌러티 개선효과

고로슬래그는 분말도가 클수록 콘크리트의 점성, 유동성 개선 및 블리딩 감소의 효과가 있고, 이러한 특성은 낮은 물/시멘트비의 콘크리트 제조를 가능하게 하여 고강도 콘크리트를 생산할 수 있다. 또한, 최근에는 이와 같은 특성을 이용하여 고유동 콘크리트의 혼화재로도 사용하는 경우도 많아, 시공성 향상에 크게 기여하고 있다. 단, 응결시간이 보통콘크리트에 비하여 지연되는 것에 주의할 필요가 있으나, 이러한 특성도 적절히 이용한다면 시중콘크리트에 있어서의 슬럼프로스 저감 또는 콜드조인트의 발생을 억제하는 등의 효과를 얻을 수 있다.

② 수화열로 인한 온도상승 억제

분말도 4,000㎠/g급의 고로슬래그 미분말을 50% 이상 치환하여 사용한다면 충분한 온도상승 억제효과를 거둘 수 있는 것으로 확인되고 있으며, 대규모 매스콘크리트, 건축물의 기초, 지하구조물 및 원자력발전소의 격납용기 등의 콘크리트 공사에서 적용할 수 있다.

③ 콘크리트 고강도화 가능

분말도가 높은 고로슬래그 미분말을 30~50% 정도 치환하면 콘크리트의 고강도화도 가능한 것으로 보고되고 있다. 이러한 물성과 장기강도 증진효과가 크다는 점으로부터 초고층 RC건축물이나 RC조 타워의 저층부 콘크리트 또는 지하구조물이나 강도관리재령을 길게 할 수 있는 구조물에서 특히 유효하게 적용될 수 있다.

④ 화학저항성 향상

보통콘크리트에 비하여 수밀성이 우수하고 염분 차폐성 및 외부 환경조건에서의 화학염에 대한 저항성이 우수하여, 해안구조물이나 황산염이 존재하는 혹독한 환경조건에서 유효하게 적용할 수 있다. 특히, 지하구조물에서 외부로부터의 침수나 토양에 함유되어 있는 여러 가지의 유해 성분에 대한 저항성이 우수한 것으로 검토되어 있다.

⑤ 알칼리-실리카 반응 억제 효과

최근 내구성 측면에서 심각한 문제로 대두된 알칼리-실리카 반응에 대한 저항성이 우수하여 알칼리 골재반응이 의심되는 골재를 사용하는 지역에서 적용을 고려할 수 있다.

표 3.6.26은 고로슬래그를 혼입한 콘크리트의 옥외 폭로 중성화 실험 결과를 나타낸 것이다. 고로슬래그 미분말을 지하수에 노출되는 터널 내에 사용되는 숏크리트 재료에 사용하면, 염화물 침투 저항성 및 내화학성 등이 우수해지나, 중성화 속도가 시멘트만을 사용한 숏크리트보다 빠른 것으로 알려져 있다. 하지만 실제로 구조물을 대상으로 한 연구결과에서는 고로슬래그 미분말이 시멘트와 반응, 치밀한 수화물을 형성하기 때문에 중성화 저항성이 증가하는 것으로 나타났다.

표 3.6.26 실외 폭로 중성화실험 결과

구 분	26주		1년	
	중성화깊이 (mm)	비율	중성화깊이 (mm)	비율
보통콘크리트	0.92	1.00	1.28	1.00
고로슬래그계 콘크리트	0.48	0.52	0.41	0.32
플라이 애쉬계 콘크리트	1.00	1.09	1.38	1.08

표 3.6.27은 시멘트 치환율에 따른 단가 절감을 비교한 것이다. 숏크리트 재료에 고로슬래그 미분말을 사용하였을 경우 원 재료비에 대한 경제성측면을 살펴보게 되면, 시멘트와 고로슬래그 단가를 시멘트 64.7원/kg, 고로슬래그 54원/kg으로 계산하였을 때, 일반시멘트만을 사용하는 배합보다 고로슬래그를 치환함으로서 얻어지는 경제적 이득은 고로슬래그 치환율이 10% 증가할 때마다 513.6원/m^3 이 발생하게 된다.

표 3.6.27 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 단가 절감 비교표(안)

구 분 / 치환율	W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	단위량 (kg/m^3)			시멘트+슬래그 단가 (원)
				Water	Cement	Slag	
Slag 0	45	13	65	215	480	0	31,056
Slag 10%					432	48	30,542
Slag 20%					384	96	30,029
Slag 30%					336	144	29,515
Slag 40%					288	192	29,001
Slag 50%					240	240	28,488

본 연구에서는 숏크리트의 품질적인 측면과 경제적인 측면을 모두 고려할 수 있는 고로슬래그 미분말의 적정 치환율 및 현장적용 가능성을 목적으로 기능이 극대화 된 숏크리트 재료개발의 기반을 마련할 계획이다.

나. 실험적 고찰

고로슬래그 미분말의 숏크리트 적용성 평가를 위해 실내 실험을 수행하였다.

(1) 숏크리트 배합

숏크리트 품질의 성능개선을 통해 분말형 레디믹스트 숏크리트를 개발하고자 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 혼화재로 이용할 때 그 적용성을 평가하고자 실내실험을 실시하였다. 본 실험에서는 유럽통합규격(EFNARC)에 의거해 골재 입도분포 및 골재최대크기를 8mm로 적용하였고, 실리카흄(5, 10, 15%)과 고로슬래그 미분말(10, 20, 30%)을 치환하여 경화 전·후의 콘크리트 물리적 특성실험을 통해 혼화재 종류별 치환량에 따른 성능평가를 실시하였다.

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 H사에서 제조된 KS L 5201 규정에 보통 포틀랜트 시멘트를 사용하였고, 시멘트의 물리·화학적 특성은 표 3.6.28과 표 3.6.29에 각각 나타내었다.

표 3.6.28 시멘트 물리적 특성

비중	분말도 (㎠/g)	응결시간 (hr:min)		압축강도 (MPa)		
		Initial	Final	3d	7d	28d
3.15	3,260	4:10	7:40	21.5	26.6	38.9

표 3.6.29 시멘트 화학적 특성

Chem. Comp (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Ig. loss	Free CaO	Insol
	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7	0.8	1.0	0.5

실리카 흄은 노르웨이 E사의 제품을 사용하였으며, 고로 급냉 슬래그는 선철 공정 중 부산물로 발생된 것으로 KS F 2563(콘크리트용 고로슬래그 미분말)의 3종을 사용하여 실험하였다. 실험에 사용된 각 혼화재의 물리·화학적 특성은 표 3.6.30과와 표 3.6.31에 나타내었다.

표 3.6.30 실리카 흄 및 고로슬래그 미분말 물리적 특성

종 류	비 중	분말도 (㎠/g)	강열감량 (%)	염화이온 (%)	활성도지수(%)		
					7일	28일	91일
실리카 흄	2.3	200,000	1.3	0.19	99	-	-
고로슬래그	2.9	4,355	0.83	0.008	84	120	123

표 3.6.31 실리카 흄 및 고로슬래그 미분말 화학적 특성

종 류	화학 성분(%)					
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
실리카 흄	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7
고로슬래그	33.5	15.2	0.5	43.9	2.6	2.5

플레인 배합, 실리카흄 5, 10, 15% 배합, 고로슬래그 미분말 10, 20, 30% 배합을 통해 혼화재 종류별 치환량에 따른 성능평가를 실시하였으며, 배합 설계는 표 3.6.32와 같다.

표 3.6.32 혼화재 종류별 치환량에 따른 배합표

구 분[1)]	W/B (%)	Gmax (㎜)	S/a (%)	단위량(kg/㎥)							비 고
				W	C	S	G	SF	BFS	SP	
8-Plain	33.7	8	67	155	460	1062	524	-	-	2.3	혼화재 종류별 치환량에 따른 성능평가
5-SF		8			437			23	-		
10-SF		8			414			46	-		
15-SF		8			391			69	-		
10-BFS		8			414			-	46		
20-BFS		8			368			-	92		
30-BFS		8			322			-	138		

주1) SF : 실리카 흄(Silica Fume)
BFS : 고로슬래그 미분말(Blast Furnace Slag)

경화 전 숏크리트의 특성은 시험체 제작 시 슬럼프 시험(KS F 2402)과 공기량 시험(KS F 2401)을 통해 숏크리트의 작업성을 평가하였으며, 경화 후 숏크리트의 특성은 시험체의 재령(3, 7, 28일)에 따라 압축강도 시험(KS F 2405)과 동탄성계수를 측정하여 숏크리트의 강도특성을 분석하였다. 표 3.6.33은 실험방법을 기술한 것이다.

표 3.6.33 조건별 실험방법

구 분	실험방법	실험조건
경화전 콘크리트	슬럼프	즉시
	공기량	즉시
경화후 콘크리트	압축강도	3, 7, 28일
	동탄성계수	3, 7, 28일

(2) 실내실험 결과

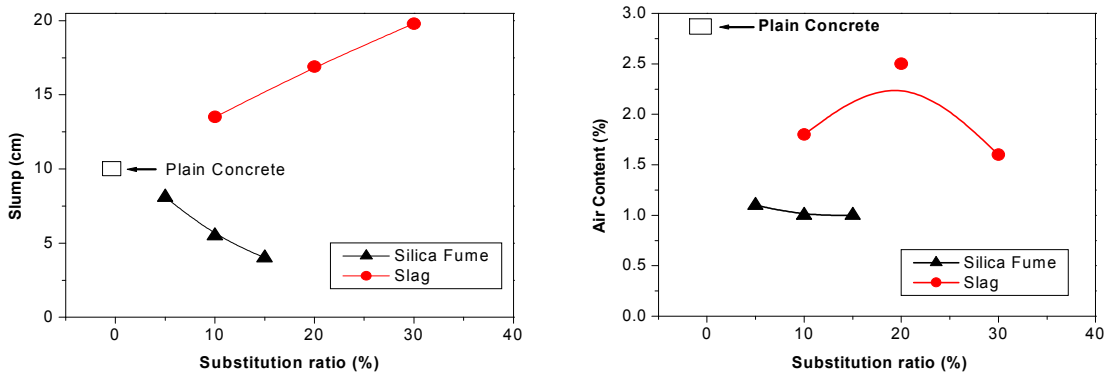
혼화재 종류별 치환량에 따른 성능평가의 실내실험 결과 골재최대크기가 8mm일 때 실리카 흄을 사용할 경우보다 고로슬래그 미분말을 숏크리트 및 콘크리트 배합에 적용할 경우에 단위 수량이 감소되고 슬럼프 증가에 의해 강도증진 및 내구성 개선 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

또한 경제성 측면에서도 고로슬래그 미분말의 가격이 실리카 흄 가격의 약 5% 정도의 수준으로 더 저렴하기 때문에 고성능 숏크리트나 고성능 콘크리트의 혼화재로 사용하는 것이 보다 유리하다고 판단된다. 하지만 기존에 수행된 연구 및 문헌을 살펴보면, 고로슬래그 미분말의 치환율이 30%를 넘을 경우 초기응결 지연 및 경화불량이 발생할 수 있기 때문에 그 이하로 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

그림 3.6.18은 혼화재의 종류 및 치환량에 따른 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프와 공기량의 변화를 나타낸 결과로서, 고로슬래그 미분말을 치환한 경우 치환량 증가에 따라 초기 수화 반응 지연 및 슬래그의 유리질 표면에 의한 윤활 작용으로 슬럼프는 플레인 콘크리트와 비교해 증가하는 경향성을 나타내었다. 그러나 실리카 흄을 치환한 경우 실리카 흄의 높은 비표면적 및 흡수성에 의한 콘크리트의 점성 증가로 유동성은 크게 상실되는 경향을 나타내었다. 이와 같은 유동성 손실에 의해 동일한 작업성을 얻기 위하여서는 일반적인 플레인 콘크리트에서 요구되는 것보다 초기 슬럼프가 대략 5㎝ 정도 증가되어야만 하는 것으로 보고되고 있다.

플레인 콘크리트와 비교해 혼화재를 사용한 굳지 않은 콘크리트의 공기량은 종류 및 치환량에 상관없이 낮아졌다. 혼화재의 치환량이 공기량에 미치는 영향성은 적었지만 종류에 따라 다소 차이점이 인지되었다. 고로슬래그 미분말 치환에 따른 공

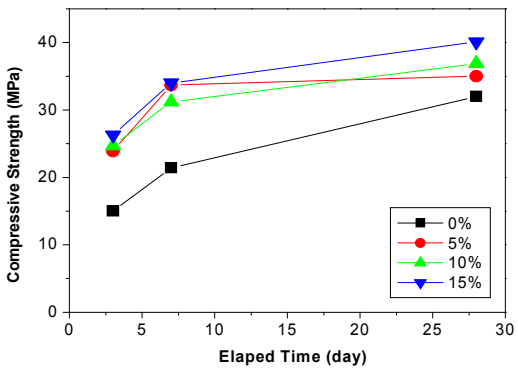
기량 감소는 앞에서 유동성 개선에 따른 콘크리트의 슬럼프 증가에 따라 공기 연행 성능이 감소된 것으로 판단된다. 특히, 실리카 흄 치환 시 공기량 감소 현상은 더욱 분명했으며, 이것은 실리카 흄의 높은 비표면적과 발생 과정에서 포함될 미연소 탄소 함유, 그리고 낮은 슬럼프가 기인된 것으로 판단된다.



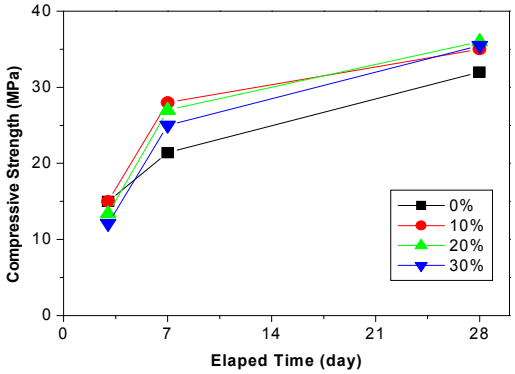
(a) 슬럼프 변화 (b) 공기량 변화

그림 3.6.18 혼화재 종류 및 치환량에 따른 변화

그림 3.6.19와 그림 3.6.20은 혼화재 종류 및 치환량에 따른 경화 콘크리트의 압축 강도와 동탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 압축강도 측정 및 동탄성계수 측정 결과, 실리카 흄의 혼입량 증가에 따라 측정값이 플레인 콘크리트 대비 크게 증가되는 경향성을 나타내었다. 이는 실리카 흄의 미세한 입자(보통 시멘트 입자 크기의 수백분의 일)의 미세 충전 효과(Micro Filler Effect)와 높은 비표면적에 의한 우수한 중·장기 반응성과 관련이 있다. 고로슬래그 미분말 치환시 초기 재령에서는 치환량이 적을수록 유리했다. 그러나 장기 재령에서는 고로슬래그 미분말의 잠재 수경 반응에 의해 치환량은 크게 중요하지 않았으며, 실리카 흄의 강도 개선 효과보다는 적지만 플레인 콘크리트보다는 다소 증진되는 경향성을 나타내었다.



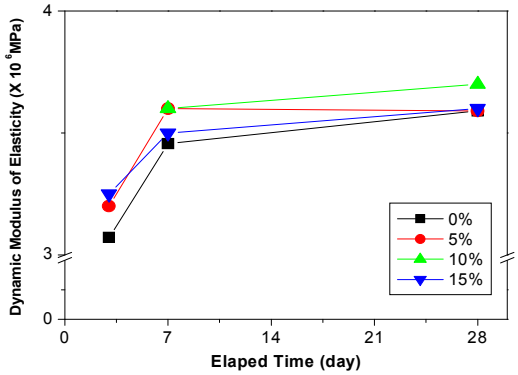
(a) 실리카 흄



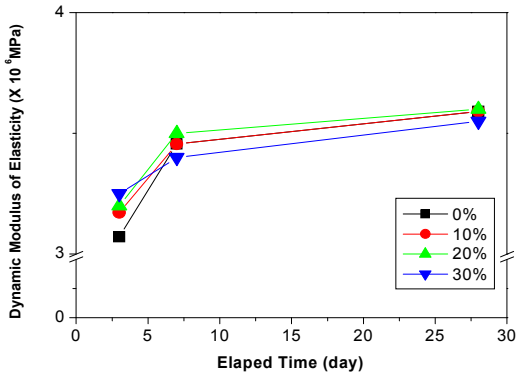
(b) 고로슬래그

그림 3.6.19 혼화재에 따른 재령별 압축강도 변화

실리카 흄 및 고로슬래그 미분말은 보통 내구성 등 구조의 밀실화에 크게 도움이 되는 것으로 알려져 있으나, 혼화재 치환율 변화에 따른 동탄성계수에는 압축강도 결과에 비해 그 영향성은 크지 않았으며 실리카 흄 적용 시 다소 유리한 것을 알 수 있었다. 동탄성계수 특성은 혼화재의 성능보다는 굵은 골재의 최대치수가 콘크리트의 내구성에 미치는 영향성이 보다 지배적인 것으로 판단된다. 하지만 동일 슬럼프를 기준으로 할 때 고로슬래그 미분말의 경우 단위 수량이 일정 수준 감소될 수 있는 여지가 있기 때문에 압축강도 및 동탄성계수와 같은 역학적 특성 및 내구특성은 다소 개선될 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 실리카 흄



(b) 고로슬래그

그림 3.6.20 각 혼화재의 재령별 동탄성계수 변화

4. 고로슬래그 치환율에 따른 레디믹스트 숏크리트 강도특성

가. 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 강도특성

(1) 배합 설계

레디믹스트 숏크리트에 혼입되는 고로슬래그 미분말의 적용성 평가를 위해 치환율에 따른 압축강도 시험을 실시하였다. 배합설계는 고로슬래그 미분말을 혼입하지 않은 Plain 배합과 10, 20, 30%를 치환한 배합으로 수행하였다. 비교 대상으로 급결제를 혼입하지 않은 Plain과 현장골재를 사용한 배합을 추가하여 수행하였다. 알칼리 프리 급결제를 시멘트 대비 8%를 혼입하여 시험을 실시하였으며, 압축강도 측정은 5×5×5cm 입방형 몰드에 타설하여 빠르게 진동테이블을 사용하여 다짐한 후 기중 양생을 실시하였다. 재령 1, 3, 7, 28일에 압축강도 시험을 실시하였으며, 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 배합은 표 3.6.34와 같다.

표 3.6.34 고로슬래그 미분말 치환 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재		급결제	혼화재		혼화제
										고로 슬래그 미분말 C*30%	실리카흄	유동화제 (kg)
1	P1	8	12	45.6	212	465	1,602		×	-	-	4.65
2	P2					465			o	-	-	4.65
3	BFS30					325			o	140.0	-	4.19
4	BFS20					372			o	93.0	-	4.65
5	BFS10					418.5			o	46.5	-	4.65
6	SF					279			o	-	37	4.19
7	현장SF1	13	12	45.0	161	465	997	654	×	-	37	
8	현장SF2	13					997	654	o	-	37	

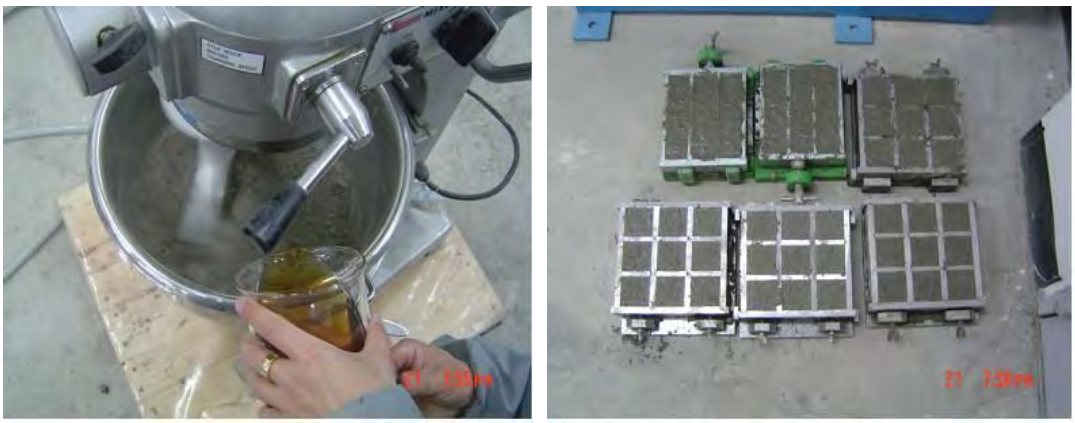
주1) BFS 고로슬래그 미분말 3종 SF 실리카흄 F- 현장골재
W/B:물 바인더(시멘트+혼화재)비, S/a:잔골재율, Gmax:골재최대치수

(2) 공시체 제작

그림 3.6.21과 같이 건조된 레디믹스트 골재를 준비한 후 모르타르 믹서기를 이용하여 혼합을 실시하였다. 1속으로 2분간 혼합한 뒤 2속으로 1분 동안 혼합을 하면서 유동화제를 혼입한 배합수를 투입한 후 1분 동안 더 혼합하였다. 바로 급결제를 혼입한 뒤 40초정도 2속으로 혼합한 뒤 즉시 믹서에서 재료를 꺼내어 진동테이블을 사용하여 30초 이내에 5×5×5cm 입방형 공시체에 다짐 성형하였다. 급결제의 특성상 아주 빨리 굳어버리기 때문에 2단 다짐을 할 경우 공시체내에 층이 생겨 물성 평가가 어려워지므로 1단 다짐을 실시하였다.



(a) 레디믹스트 재료 혼합



(b) 급결제 투입 및 공시체 성형 완성

그림 3.6.21 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 공시체 제작

나. 고로슬래그 미분말 최적 치환율 도출

레디믹스트 숏크리트에 고로슬래그 미분말의 적정 혼입율을 도출하기 위하여 치환율별 압축강도 시험을 실시하였다. 비교군으로 Plain 배합, 실리카흄 혼입배합 및 현장골재 실리카 흄 혼입배합도 같이 수행하였다. 표 3.6.35는 재령별 압축강도를 나타낸 것으로서 실리카 흄을 혼입한 배합이 가장 우수하게 나타났으며 레디믹스트 골재 배합 및 현장골재 배합 모두 급결제를 혼입하지 않은 배합이 우수한 강도 발현을 보였다. 레디믹스트 골재를 사용한 Plain 배합을 비교해 보면 급결제 혼입에 따른 강도감소율은 약 70%로 나타났으며, 현장골재를 사용한 배합 역시 급결제 혼입에 따라 강도 감소율이 약 72% 정도로 나타나 비슷한 경향을 보였다.

급결제를 혼입함으로서 초기 급결성은 좋아지나 초기강도 및 장기 강도에는 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며, 실내시험 결과 역시 급결제를 혼입한 배합의 장기 강도저하가 뚜렷하게 나타났다. 그림 3.6.22를 살펴보면 슬래그 치환율에 따른 초기압축강도는 치환율이 많아질수록 강도발현이 늦어지고 있음을 알 수 있으나, 슬래그 혼입율에 따른 초, 중기 강도 변화의 패턴은 나타나지 않았다.

레디믹스트 골재를 사용한 실리카 흄 배합보다 현장골재를 사용한 실리카 흄 배합의 강도 감소율이 18% 정도 나타나 골재의 품질 및 입도 차이에 의한 강도 저하가 뚜렷이 나타나고 있었다. 또한 Plain 2번 배합과 비교 시 재령 28일 압축강도는 20, 30% 치환하였을 때 Plain 보다 10~15% 정도 더 우수해짐을 알 수 있었다. 초기강도의 보상 문제를 활성도가 큰 슬래그를 사용하거나 알칼리 활성제를 혼입하여 해결한다면 경제성 있는 30% 치환 배합이 가장 적합하다고 판단된다.

표 3.6.35 고로슬래그 미분말 혼입 재령별 압축강도

	1일	3일	7일	28일
P1	6.5	23.2	35.9	36.7
P2	3.0	11.1	25.2	26.4
BFS30	4.3	11.2	24.5	30.4
BFS20	3.7	12.1	24.7	27.1
BFS10	4.6	12.5	24.1	25.1
SF	5.0	14.5	28.7	32.2
현장P1	5.8	19.7	32.9	35.5
현장P2	4.1	14.1	23.7	29.8

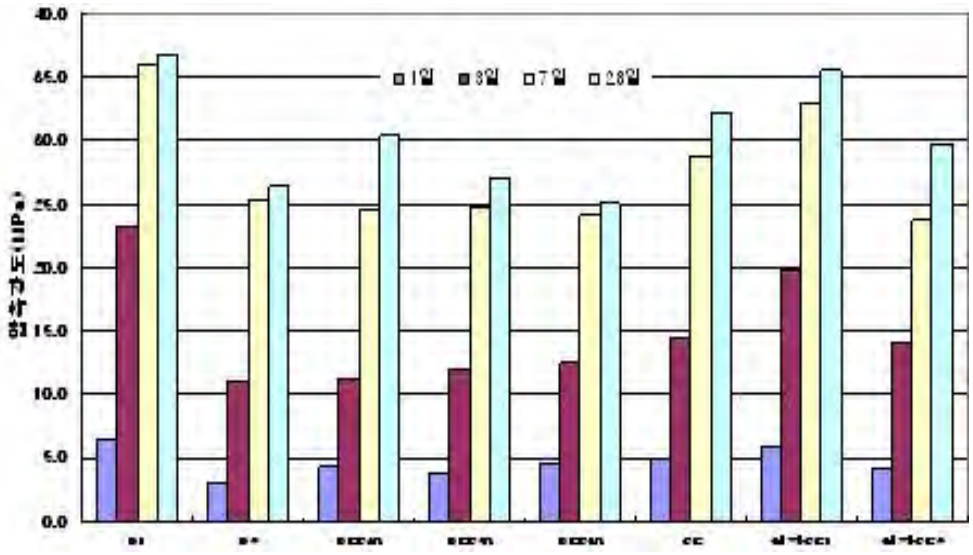


그림 3.6.22 고로슬래그 미분말 혼입 재령별 압축강도 변화

5. 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 양생특성

가. SEM 촬영 및 양생 메커니즘

(1) 시멘트의 수화반응 및 응결

(가) 시멘트의 수화반응

시멘트를 구성하는 주요 광물상은 2CaO · SiO2(di-calcium silicate, 이하 C2S로 표기), 3CaO · SiO2(tri-calcium silicate, 이하 C3S로 표기)를 주조성으로 하는 칼슘실리케이트상과, 3CaO · Al2O3(tri-calcium aluminate, 이하 C3A로 표기)를 주조성으로 하는 칼슘알루미네이트상, 6CaO · 2Al2O3 · Fe2O3-6CaO · Al2O3 · 2Fe2O3의 고용상(solid solution)으로 4CaO · Al2O3 · Fe2O3의 평균조성을 가지는 칼슘페라이트상(calcium alumionferrite, 이하 C4AF로 표기)이 있다. 이들 광물상은 물과 반응하여(hydration reaction) 용해도가 매우 낮은 안정한 상을 생성시키는데 이 과정을 통하여 경화(hardening)하게 된다. 따라서 시멘트 경화체의 물성 및 화학적 특성은 이들 광물상의 반응과 수화생성물에 크게 의존하게 된다. 시멘트 주요광물상의 수화반응 기구를 살펴보면 다음과 같다.

1) C3S의 수화반응 기구

C3S는 시멘트 구성광물 중 함량이 가장 많으며 응결과 경화에 가장 큰 영향을 미치는 주요성분이다. C3S는 상온에서 물과 접촉하게 되면, 일반적으로 C-S-H상(혹은 C-S-H 겔)이라 불리우는 CaO/SiO2의 물비가 3보다 작은 비정형의 칼슘실리케이트 수화물과 수산화칼슘을 생성한다. 이 과정을 간단하게 요약하면 다음과 같다.

$$3CaO \cdot SiO_2 + (3+m-n)H_2O \rightarrow nCaO \cdot SiO_2 \cdot mH_2O + (3-n)Ca(OH)_2$$

2) C2S의 수화반응 기구

C2S의 수화반응 기구는 C3S의 반응기구와 유사하며 반응에 소요되는 결합수와

생성되는 수화생성물(CSH 상, 수산화칼슘)의 양에서 차이을 보인다. 또한 C2S의 수화반응은 C3S 보다 반응속도가 느리기 때문에 시멘트 경화과정에서 두 상의 반응진행은 차이를 가진다.

3) C3A의 수화반응 기구

C3A의 주요 수화생성물은 에트링자이트(ettringite, 3CaO · Al2O3 · 3CaSO4 · 32H2O)와 모노설페이트(monosulfate, 3CaO · Al2O3 · CaSO4 · 12H2O)이다. C3A의 자세한 수화과정은 다음과 같다. C3A는 시멘트 중에 포함된 황산염과 반응하여 에트링자이트를 생성한다.

3CaO · Al2O3 + 3CaSO4 + 26H2O → 3CaO · Al2O3 · 3CaSO4 · 32H2O

에트링자이트의 생성에 필요한 황산염(SO3)이 모두 소진되면, 이미 형성된 에트링자이트는 미반응 상태로 남아 있는 C3A와 반응을 하여 모노설페이트를 생성한다

3CaO · Al2O3 · 3CaSO4 · 32H2O + 2C3A + 4H2O → 3CaO · Al2O3 · CaSO4 · 12H2O

또한, 에트링자이트가 모노설페이트로 전이되는 과정에서 4CaO · Al2O3 · 19H2O (이하 C4AH19로 표기)가 일부 생성되기 시작한다. 이때 생성된 C4AH19는 독립적으로 존재하기도 하지만, 모노설페이트와 고용상(solid solution phase)을 형성하기도 한다.

4) C4AF의 수화반응 기구

C4AF는 수화반응을 통하여 C3A와 마찬가지로 에트링자이트를 생성하고, 황산염이 부족하면 모노설페이트를 생성하는데, 이들 수화생성물은 Al2O3와 Fe2O3가 고용된 조성을 갖는다. C3A와 마찬가지로 모노설페이트가 생성되기 시작하면서, 2CaO · (Al2O3-Fe2O3) · 8H2O와 3CaO · (Al2O3-Fe2O3) · Ca(OH)2 · 12H2O(이하 C4(A,F)H13으로 표기)의 조성을 가지는 수화물을 생성한다.

(나) 콘크리트의 건조수축

수분이 지속적으로 증발하게 되면 콘크리트는 부피가 감소하여 수축현상이 나타나게 된다. 이러한 수축을 건조수축이라고 한다. 건조수축은 경화한 콘크리트로부터 수분이 증발한다고 해서 무조건 발생하는 것은 아니다.

콘크리트의 제조시에 첨가된 과잉의 혼합수가 콘크리트의 초기경화 과정에서 블리딩(bleeding) 및 표면건조로 인하여 증발되어지며, 콘크리트가 경화한 상태에서는 공극의 크기가 50㎚ 이상인 매크로 세공(macro pore)과 10㎚에서 50㎚ 범위의 크기를 가지는 마이크로 세공(micro pore, 모세관 공극)에서 자유수로 존재하거나, 세공벽에 흡착상태로 존재하는 흡착수로 존재하게 된다.

경화된 콘크리트는 주위의 환경(온도, 습도)에 따라 매크로 세공에 존재하는 자유수가 증발되는데, 자유수의 증발은 매크로 세공내의 빈공간에 존재하는 물이 빠져나가는 것이므로 시멘트 경화체의 부피변화에 거의 영향을 미치지 않는다.

10㎚에서 50㎚ 범위의 마이크로 세공에서는 표면장력에 의해 기공속의 물이 유지되기 때문에 모세관 공극이라고도 불리 우는데, 건조가 계속되어 모세관 공극으로부터 수분이 증발하면 모세관 공극에 압축응력이 작용하게 되어 경화체가 수축하게 된다. 크기가 더욱 미세한 10㎚에서 2㎚ 범위의 공극을 겔 공극이라고 하며, 겔 공극에서 강한 수소결합으로 흡착상태에 있는 물을 겔수라고 하는데, 건조가 더욱 진행되어 겔수의 증발이 진행되면 건조수축이 현저히 증가하게 된다. 시멘트가 완전히 수화되었다고 가정한다면, 주위 습도가 30%인 조건하에서의 건조수축은 겔공극을 형성하는 C-S-H겔과 모노설페이트에서의 탈수반응에서 주로 발생하며, 일부는 C4AH13에 의해서 발생한다. 이와 비교하여 동일 조건에서 에트링자이트는 32몰의 수분 중 약 10몰의 수분을 잃지만, 이 물은 제올라이트(zeolite) 수이기 때문에 경화체의 건조수축에는 거의 영향을 미치지 않는다.

(2) 수화된 슬래그-시멘트 계에서의 광물학적 미세 구조적 변화

시멘트의 화학조성과 슬래그의 조성은 크게 다르기 때문에 수화생성물의 광물학적 측면에서 중요한 차이점이 생긴다. 슬래그와 시멘트의 주요 화학적 차이점이 표 3.6.36에 정리되어 있으며, 표 3.6.37에는 보고된 다양한 슬래그 혼합 시멘트의 반응생성물이 정리되어 있다. 시멘트와 슬래그 사이의 유사성 가운데 중요한 한 가지는

슬래그와 시멘트중 많은 Ca 성분이 결과적으로 C-S-H로 된다는 것이다.

사용되어지는 활성화제의 특성은 얻어지는 생성물의 특성에 큰 영향을 준다. 예로써, 슬래그가 NaOH, Na2CO3가 알카리 촉진제로 사용되어지면 그 결과로 brucite, Mg(OH)2이 Mg를 포함하는 주상으로 관찰되어진다. 포틀랜드 시멘트가 활성화제로 사용되어지면, brucite는 일반적으로 관찰되어지지 않으며, 대신 조성에 대해서는 나중에 이야기할 hydrotalcite와 비슷한 상들이 얻어지게 된다. 표 3.4.2에는 다른 중요한 차이점이 나타내어져 있다.

표 3.6.36 슬래그와 시멘트간의 화학적 차이점

Ca:Si ratio	Higher in cements than slag: approximately 2.5 vs 1.0, respectively
MgO content	Low(<2-3%) in cement and limited by national standards but ranging up to 8-12% in slag
Al_2O_3 content	Typically 4-8% in cement, but ranging up to 12-15% in slag, with some up to 22-25%
Fe_xO_y content	Characteristically lower in slag than cement
S content	Less in slag than in most cement, but present as SO_4^{2-} speciation in cement and S^{2-} in slag

혼합물로부터 얻어진 강도에 대한 유추분석은 각각의 상들의 결합력에 대한 어떤 지표를 제공하기는 하지만 이것들은 상들의 결합력을 숫자로 나타내거나 결정하는 것이 실제로 가능한 것은 아니다. 미세구조와 전반적인 부피의 변화는 관찰되어진 강도에 크게 영향을 받는다. 슬래그의 수화의 결과로 생성되어지는 C-S-H는 매우 중요하다. 낮은 밀도의 C-S-H 겔은 공극을 채우고, 다른 결정의 수화상과 결합하며 미 반응의 슬래그 골재등과 강하게 엉겨 붙는다. 비록 C-S-H의 조성과 양은 촉진제와 혼합비율에 따라 변화하지만, 모든 종류의 슬래그 촉진제는 주 수화상으로써 C-S-H를 증가시킨다.

표 3.6.37 슬래그 혼합 시멘트의 반응 생성물

Nature of Activator	Crystalline Phase	Comments
NaOH, Na_2CO_3 Na-silicate	C-S-H, C_4AH_{13}, C_2AH_8 $Mg(OH)_2$	Some Si in C_3AH_{13} C/S in C-S-H less than in OPC
$Ca(OH)_2$	C-S-H, C_4AH_{13}	C_2AH_8 absent
Sulfate, e.g., gypsum, hemihydrate phosphogypsum	C-S-H, AFt, and $AL(OH)_3$	S in slag acts 10 some extent as an autoactivator
Cement	Various: C-S-OH, AFm, AFt, hydrogarnet, hydrotalcite-like phase; $C_3S_2H_3$	Not all these phases are likely to be encountered in the same paste

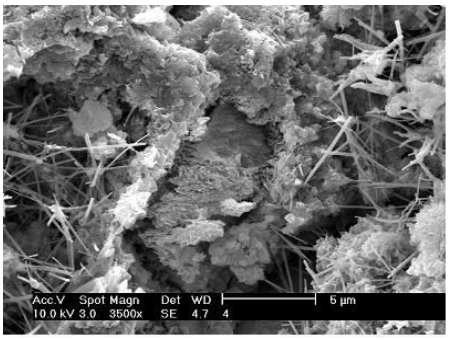
본 연구에서 혼입된 고로슬래그 혼입에 따른 수화 생성물 및 구조적인 차이를 설명하기 위해서 시멘트 페이스트 시편과 고로슬래그 혼입 시편에 대한 SEM 분석을 실시한 결과를 그림 3.6.23에 나타내었다. Plain 시편에 대한 SEM 사진 결과 재령 1일에서는 수㎛ 크기로 성장된 에트링자이트 결정이 잘 발달되어 초기 C-S-H겔(I, II-type)과 판상의 수산화 칼슘이 관찰되었다. 이후 장기 재령에서는 주상 형태의 수산화칼슘과 표면상에 후기 C-S-H겔로 도포된 morphology를 나타내고 있다.

전자현미경 관찰사진에서는 혼화제를 사용하지 않은 시편(OPC 표기)과 비교하여 고로슬래그를 사용한 시편의 미세구조가 가지는 특징은 크게 두 가지로 판단된다.

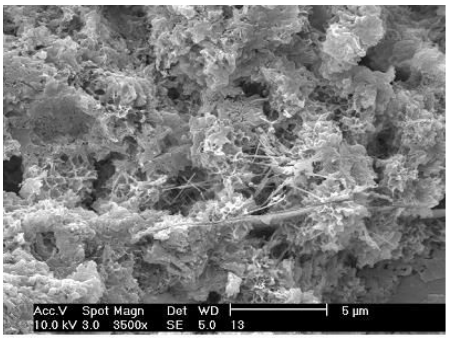
첫째는 양생 1일 시편에 명확하게 나타나는 특징으로, 기준시편(OPC로 표기, ⓐ)과 비교하여 고로슬래그 및 유동화제를 혼입한 시편(ⓓ,ⓔ,ⓕ)에서는 수화생성물의 크기가 감소하고 균일한 분포를 보이는 점이다. 예를 들어 OPC의 에트링자이트 결정(ⓐ)과 고로슬래그의 에트링자이트 결정(ⓓ)은 생성된 결정의 크기 및 분포에서 두드러진 차이를 나타내고 있다. 이와 같은 특징은 혼화제에 의하여 시멘트 입자의 분포가 보다 균일해지기 때문에 수화생성물이 생성될 수 있는 시멘트 입자와 물과의 접촉면이 증가하기 때문으로 판단된다. 따라서 초기 수화생성물이 생성될 수 있는 수화반응 지점이 증가하여 생성물의 크기가 감소하고 균일해지는 것으로 생각된다.

둘째는 28일 시편의 조직의 치밀성의 차이이다. 기준시편(ⓒ)과 비교하여 고로슬래그를 사용한 시편(ⓓ,ⓔ,ⓕ)은 전체적으로 매우 치밀한 구조를 나타내고 있으며

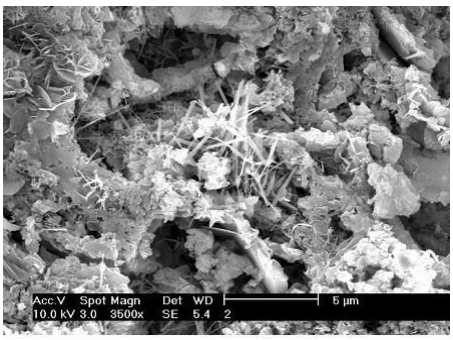
결정의 크기가 작으면서도 수화생성물이 치밀하게 결합되어 있음을 보여주고 있다. 이와 비교하여 기준시편은 상대적으로 큰 결정이 존재하면서 치밀성이 떨어지는 것으로 나타났다. 고로슬래그 및 고유동화제를 사용한 시편의 경우 초기 수화생성물의 크기가 작고 균일하게 분포하기 때문에 공극의 크기가 작아 지속적으로 생성되는 C-S-H겔이 공극을 채우고, 다른 결정의 수화상과 결합하며 미 반응의 슬래그 골재등과 강하게 엉겨 붙어 치밀해지는 것으로 사료되며, 생성물의 크기가 큰 OPC 시편의 경우 추가로 생성되는 C-S-H겔이 공극을 충분히 충진시켜 주지 못하기 때문으로 판단된다. 기준시편과 고로슬래그를 사용한 시편의 전자현미경 관찰결과 기준 시편과 혼화제를 사용한 시편에서 관찰되는 수화생성물은 큰 차이가 없으며 유사한 것으로 확인되었다. 이러한 결과로부터 고로슬래그를 사용하더라도 시멘트의 수화반응이 큰 영향을 받아 전혀 다른 생성물을 형성하는 것은 아닌 것으로 판단된다. 다만 고로슬래그 및 유동화제 사용으로 인하여 시멘트 입자의 분산성이 향상되기 때문에, 경화 초기에는 수화생성물의 크기가 감소하고 고른 분포를 나타내며, 경화 후기에는 보다 치밀한 구조를 형성하는 차이점을 나타내었다.



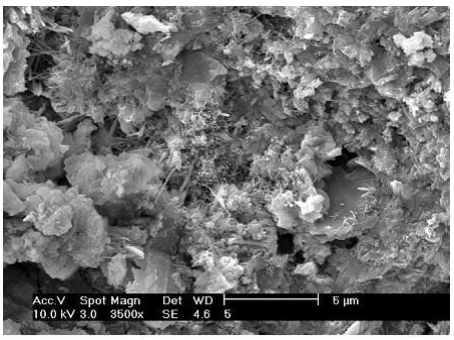
(ⓐ OPC 1일)



(ⓓ 고로슬래그 1일)

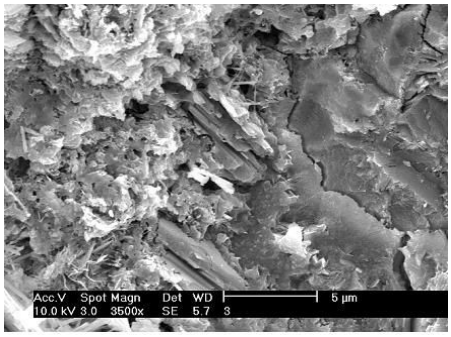


(ⓑ OPC 3일)

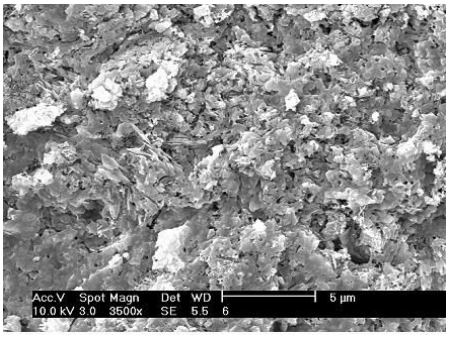


(ⓔ 고로슬래그 3일)

그림 3.6.23 Plain 및 고로슬래그 혼입 페이스트 SEM 사진



(ⓒ OPC 28일)



(ⓕ 고로슬래그 28일)

그림 3.6.23 Plain 및 고로슬래그 혼입 페이스트 SEM 사진(계속)

나. 용출시험에 의한 환경영향 평가

(1) 고로슬래그

그림 3.6.24는 본 연구개발에 사용된 고로슬래그 미분말의 화학조성을 나타낸 것이다. 레디믹스트 숏크리트 배합에 사용된 고로슬래그의 성분은 SiO_2, CaO, Al_2O_3, MgO가 대부분을 차지하며 이들 네 가지 성분이 약 95%를 차지하고 있다. 고로슬래그의 화학조성은 철광석 중의 불순물, 첨가하는 석회석 또는 돌로마이트의 품질 및 환원제로 사용하는 코크스 중의 회분에 따라 달라질 수 있다.

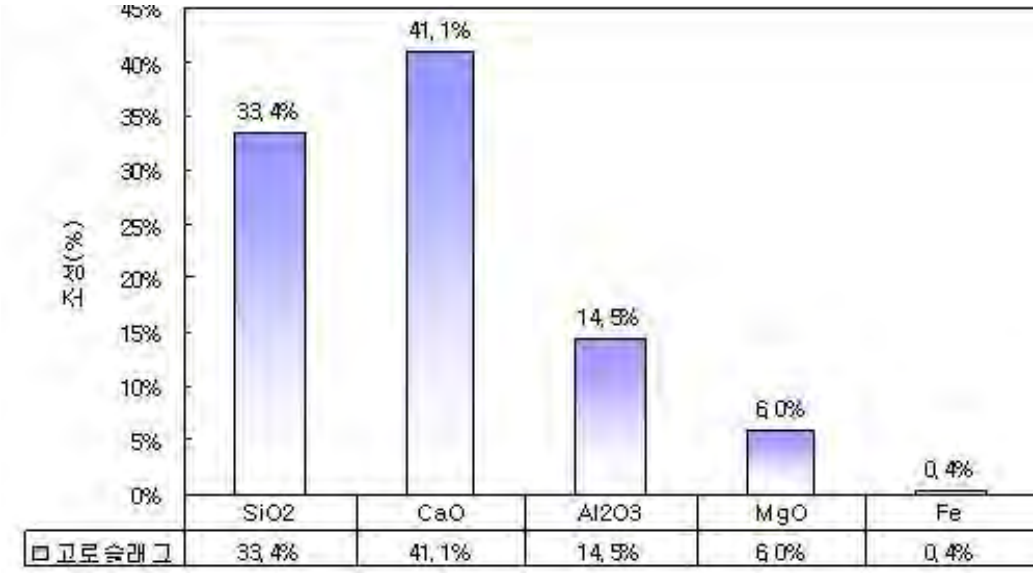


그림 3.6.24 연구에 사용된 고로슬래그의 화학조성

고로슬래그는 용융액 상태에서 냉각하는 방법에 따라 서냉시킨 괴재슬래그와 고압의 물로 급냉시킨 수재슬래그로 구별할 수 있다. 괴재슬래그는 고온의 액상슬래그를 냉각장에서 대기 중에 서서히 냉각시킨 것으로 결정구조가 형성되면서 단단한 암석상태의 슬래그가 되는데 이것을 나중에 파쇄하여 입도구분을 하게 된다. 수재슬래그는 용융상태의 고로슬래그를 고압의 물을 사용하여 빠른 속도로 냉각시킨 것으로 정질이 거의 형성되지 않고 비정질 상의 모래와 유사한 입상으로 생성된다. 수재슬래그를 시멘트와 같이 매우 미세한 입자로 파쇄·분쇄하면 시멘트의 성질을 가지게 되어 시멘트의 혼화제로 사용하기에 적합하게 된다.

(2) 중금속 용출시험

(가) 시험방법

1) 용출시험

① KSLT(Korean Standard Leaching Test)

폐기물 공정 시험법 제2장 제5항에 따라 바닥재, 비산재 및 용융슬래그 시료 10g을 정확히 달아 정제수에 HCl을 가하여 pH 5.8~6.3으로 한 용매 100ml를 500ml 삼각플라스크에 넣어 상온, 상압 하에서 진탕 회수가 매분당 200회, 진폭이 4~5cm인 진탕 기를 사용하여 6시간 연속 진탕한다. 진탕한 용액을 1.0㎛의 유리섬유여지로 여과한 후 검액으로 사용하였다.

② TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure)

시료 5g에 96.5ml의 증류수를 주입 후 격렬히 교반하여 시료의 pH를 측정한다. 본 실험의 시료인 바닥재, 비산재 및 용융슬래그의 경우 모두 pH가 5이상을 나타내었으므로 용출용매로 증류수 500ml에 CH3COOH 5.7ml를 가하여 1L로 희석한 것을 사용하였다. 시료 5g와 용출용매 100ml를 500ml 삼각플라스크에 넣어 22±3℃에서 30rpm으로 18시간 연속 진탕한 다음 1.0㎛의 유리섬유여지로 여과한 여과액을 검액으로 사용하였다. 표 3.6.38은 국내외 용출시험 방법을 나타낸 것이다.

2) 항목별 시험

폐기물 공정 시험법 제2장 제3항의 시료 전처리방법에 따라 금액을 질산으로 전처리한 후 AAS(Atomic Absorption Spectrometry, Perkin Elmer AAnalyst 100)를 이용하여 Pb는 283.3nm, Cu는 324.7nm, Cd는 228.8nm, Cr은 357.9nm의 파장에서 분석하였다.

3) 시약 및 분석기기

본 연구에 사용된 시약과 분석기기의 종류 및 사양을 표 3.6.39과 표 3.6.40에 나타내었다.

표 3.6.38 국내외 용출시험 방법

시 험 법	한국의 KSLT	미국의 EP	미국의 TCLP
개발목적	유해산업폐기물의 판정	EP유해성 폐기물의 판정	침출액의 Monitoring
시료의 전처리	5.0~5.5mm로 분쇄	9.5mm이하로 분쇄	9.5mm이하로 분쇄
진탕장치	수평왕복진탕기 진폭:4~5cm 진탕횟수:200rpm	Stirrer	Rotary Extraction Device 진탕횟수:30rpm
진탕시간	6hr	24hr	18hr
용매의 pH	증류수에 HCl첨가 pH5.8~6.3조절	증류수에 0.5N초산첨가 pH4.8~5.2유지	Fluid 1 : 4.93±0.05 Fluid 2 : 2.88±0.05
용매 : 폐기물	10:1 100g 이상	16:1 or 20:1 100g이상	20:1
고액분리	1μm 유리섬유여지 or 원심분리후상등액	0.45μm menbrane filter or 원심분리후상등액	0.6~0.8μm menbrane filter or 원심분리후상등액
용출용기	2ℓ삼각플라스크	규정없슴	2ℓ의 Teflon or PE(Zero Headspace)

* 참고 : TCLP법의 용매 pH는 용출 전 pH측정하여 5미만이면 fluid 1, 5이상이면 fluid 2

- fluid 1 : 증류수 500mℓ에 glacial Acetic acid 5.7mℓ 가하고 1N NaOH 64.3 mℓ를 가한 후 1ℓ로 희석 한 다.(pH 4.93±0.05)
- fluid 2 : 증류수에 glacial Acetic acid 5.7mℓ를 가하여 1ℓ로 한다.(pH 2.88±0.05)

표 3.6.39 분석 및 실험에 사용된 시약

Reagent	Chemical Formula	Maker
Hydrochloric acid	HCl	松野園製藥所
Acetic acid	CH_3COOH	Merck
Nitric acid	HNO_3	Merck

표 3.6.40 분석 및 실험기기

Analysis equipment	Maker	Model
Atomic Absorption Spectrophotometry	Perkin Elmer	AAnalyst 100
pH meter	Orion	medel 420
Shaker	Lab. companion	sk-600

(나) 중금속 용출시험 결과

표 3.6.41은 KSLT법에 의한 최종배합비로 만든 샘플의 용출시험 사례로 고로슬래그 혼입 레디믹스트 숏크리트의 용출시험결과 Pb, Cu, Cd 등 전 항목에서 거의 검출되지 않았다. 따라서 고로슬래그 혼입 레디믹스트 숏크리트는 유해항목에 대해 환경적으로 안전할 것으로 판단된다.

표 3.6.41 용출시험 결과

(단위 : mg/l)

구 분	Pb	Cu	As	Cr^{6+}	CN	유기인	Cd	TCE	PCE	Hg
고로슬래그 레디믹스트 숏크리트	N.D.	0.005	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	N.D.	N.D.	N.D.
환경기준	3	3	1.5	1.5	1	1	0.3	0.3	0.1	0.005

* N.D. : Not Detected

6. 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 현장적용성 평가

가. 1차 현장적용성 평가

(1) 타설실험 개요

숏크리트는 급결제의 혼입 및 현장특성에 의하여 정확한 특성을 규명하기에 어려움이 있다. 실내에서 믹서를 이용하여 배합한 실험만으로는 숏크리트 급결제의 영향 및 뿜어붙이는 속도 및 위치에 따른 영향성을 평가할 수 없다는 단점이 있다. 이에 최대한의 시공오차를 줄이며 객관적인 숏크리트 특성을 파악하기 위하여 본 1차 고로슬래그 레디믹스트 현장타설 시험에서는 실제 터널 시공 현장의 장비 및 시공시스템을 그대로 도입하여 실시하였으며, 타설 장소는 분당구 신분당선에 위치한 터널시공 현장에서 수행하였다.

1차 현장타설 실험에서는 실내시험에서 도출된 결과를 바탕으로 고로슬래그의 초기강도 보상의 목적으로 슬래그 분말도 분류기준 1종, 2종, 3종에 따른 강도 발현 효과에 중점을 두고 실시하였으며, 비교 군으로 Plain 및 실리카 흄 8% 치환 배합을 추가하여 실시하였다.

(2) 타설실험 계획

(가) 숏크리트 재료의 실내 성능 시험

레디믹스트 숏크리트 및 현장골재사용 숏크리트 간의 물성평가를 위해 실내시험을 실시하였다. 표 3.6.42은 실내시험 배합표를 나타낸 것인데, 급결제를 혼입하지 않고 고로슬래그 3종 30% 치환, 실리카 흄 8% 치환, 현장골재 배합을 기본적으로 배합설계 하였다

압축강도는 1일, 7일, 28일에 실시하였으며 그 결과는 표 3.6.43과 같다. 그림 3.6.25를 보면 알 수 있듯이 고로슬래그를 혼입한 배합이 1일 강도발현이 미흡하였으나 재령 28일로 갈수록 Plain 배합과 비슷한 패턴의 강도 증가율을 보였다. 실리카 흄을 사용한 배합이 재령 28일 강도 48MPa을 나타내 가장 우수한 성능을 보였

으며 Plain 배합이 38MPa로 그 다음으로 강도 발현이 우수하게 나타났다. 동일한 배합에 골재만 변경하여 시험한 결과 레디믹스트용 골재 배합이 약 18% 정도 우수하게 나타나 레디믹스트 숏크리트의 우수함을 실내시험을 통해서 확인 할 수 있었으며, 이는 골재 품질 관리 및 양호한 입도 분포에 의한 것으로 사료된다. 시험결과는 추후 고로슬래그 혼입율에 따른 강도 변화 및 급결제 혼입 후 강도 변화의 비교군으로 사용할 예정이다.

표 3.6.42 레디믹스트 골재와 현장골재사용 숏크리트 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재		혼화재	
									고로슬래그 C*30%	실리카흄 C*8%
레디믹스트 배합										
1	Plain					465			-	-
2	고로슬래그		12	45.6	212	325	1602		140.0	-
3	실리카 흄					428			-	37.0
현장골재 배합							S	G		
4	현장골재		12	45.0		428	1056	535	-	37.0

표 3.6.43 레디믹스트 및 현장골재사용 숏크리트의 실내시험 압축강도 결과

	1일	7일	28일
Plain	14	28.8	37.9
실리카흄(8%)	10.7	35.1	48.4
고로슬래그(30%)	5.6	29.6	37.3
현장골재(실리카 흄 8%)	8.4	24.7	34

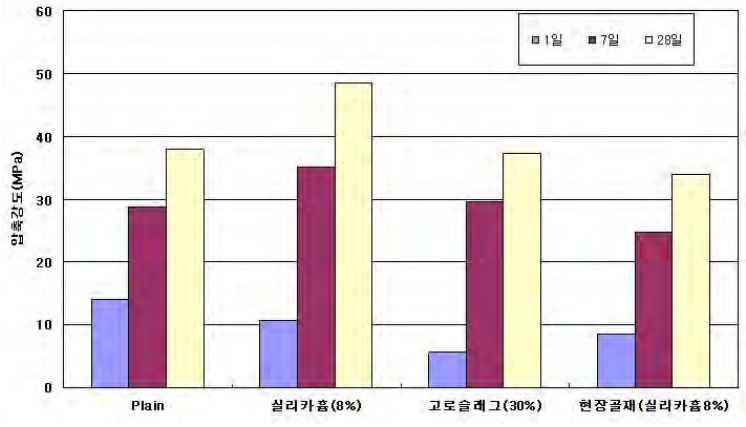


그림 3.6.25 레디믹스트 및 현장골재사용 숏크리트의 실내시험 압축강도

고로슬래그 미분말의 분말도에 따른 초기강도 보상 정도를 알아보기 위하여 표 3.6.44의 배합 설계를 실시하고 급결제를 혼입하지 않은 레디믹스트 숏크리트 실내시험을 실시하였다. 시험 결과는 표 3.6.45 및 그림 3.6.26과 같으며 분말도가 커질수록 초기강도의 발현이 우수함을 알 수 있었으며, 특히 3종 고로슬래그 미분말을 사용하였을 경우보다 1종 고로슬래그 미분말을 사용하였을 경우 1일 압축강도의 발현이 매우 우수하게 나타나 레디믹스트 숏크리트에 적용시 급결제 품질기준인 1일 강도 9.8MPa에 만족하는 성능을 나타낼 것으로 판단된다. 고로슬래그 미분말의 분말도에 따른 활성지수 차이에 의해 초기 강도발현에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 고로슬래그 미분말 1종의 경우 Plain 배합과 유사한 강도 증가율이 나타나는 것을 확인하였다.

표 3.6.44 고로슬래그 분말도별 레디믹스트 숏크리트 배합

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재	혼화재
								고로슬래그 C*30%
1	Plain	8	12	45.6	212	465	1602	-
2	고로슬래그1종					325		140.0
3	고로슬래그2종					325		140.0
4	고로슬래그3종					325		140.0

표 3.6.45 고로슬래그 분말도별 압축강도 결과

	1일	7일	28일
Plain	14	28.8	37.9
고로슬래그1종	12.2	30.1	36.9
고로슬래그2종	8.6	27.4	39.8
고로슬래그3종	6.6	29.6	37.3

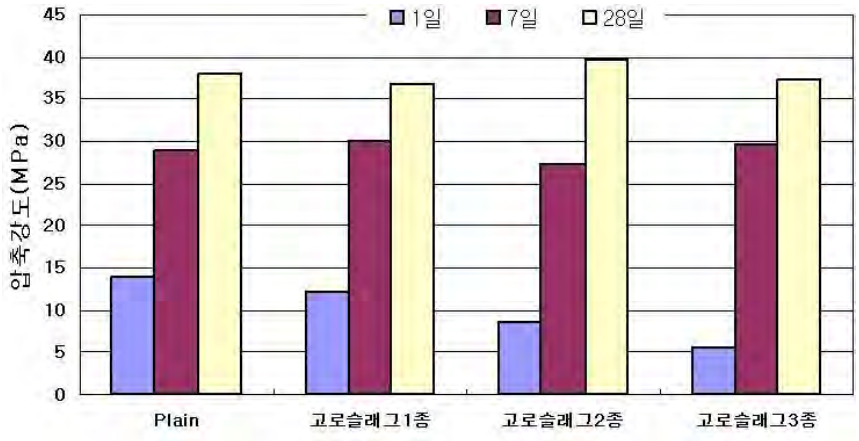


그림 3.6.26 고로슬래그 분말도별 압축강도 결과

합성섬유별 각 제조사의 물성 및 혼입량을 참고하여 시험체의 휨인성 평가를 수행하였다. 표 3.6.47은 각 제품별 등가 휨강도 및 휨인성 지수를 나타낸 것으로서 각 제품별로 등가 휨강도가 60% 이상을 나타내 품질 기준에 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 급결제가 혼입되고 숏크리트 타설기에 의해 타설되는 현장에서는 품질저하가 예상되므로 본 현장 타설 시험을 통하여 검증하고자 한다. H사의 합성섬유가 등가 휨강도 79.6% 및 휨인성 지수가 양호하게 나타나 가장 우수한 성능을 보인 반면 C사의 A종은 가장 낮은 값을 보여 현장시험을 통해 적용 가능성 여부를 판단해야 할 것으로 보인다.

표 3.6.46 합성섬유별 레디믹스트 숏크리트 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재	보강섬유
1	Plain-강섬유	8	12	45.6	212	465	1602	40
2	H사-합성섬유					325		6
3	C사 A종-합성섬유					325		9
4	C사 B종-합성섬유					325		5

표 3.6.47 합성섬유별 휨, 등가휨강도, 휨인성 시험 결과

배합명	휨강도	등가휨강도	휨인성지수		
			I5	I10	I20
Plain	5.2	63.7	3.77	7.37	14.65
H사	4.8	79.6	5.56	11.01	17.10
C사 A종	5.2	65.8	3.89	7.21	12.77
C사 B종	5.4	62.1	4.15	8.45	15.46

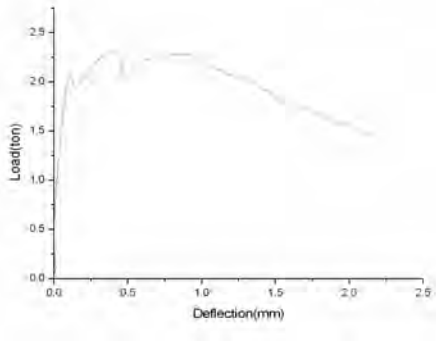


그림 3.6.27 Plain공시체 하중-처짐 그래프

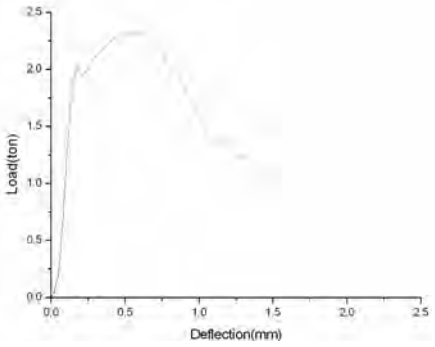
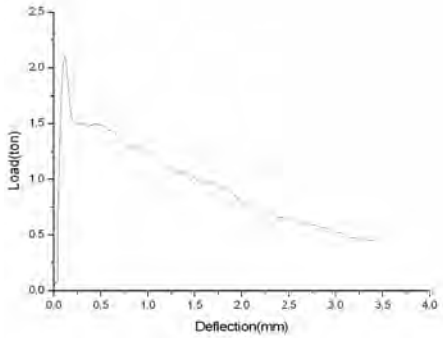
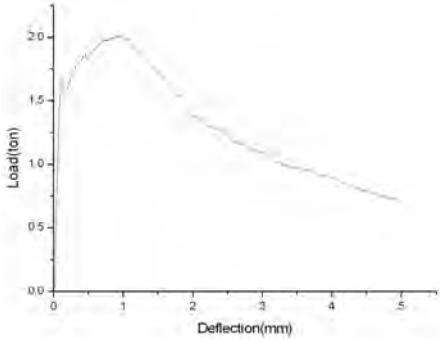


그림 3.6.28 H사 합성섬유 공시체의 하중-처짐 그래프



(a) C사 A종



(b) C사 B종

그림 3.6.29 C사 합성섬유 공시체의 하중-처짐 그래프

합성 섬유별 레디믹스트 숏크리트의 압축강도 시험을 실시한 결과를 표 3.6.48 및 그림 3.6.30에 나타내었다. 각 섬유간에 압축강도에 영향을 주는 경향성은 찾아볼 수 없었다.

표 3.6.48 합성섬유별 레디믹스트 숏크리트 압축강도 결과

	압축강도			
	1	2	3	Average
Plain	-	40.1	37.9	39.0
H사	37.5	39.4	38.0	38.3
C사 A종	35.4	37.2	35.7	36.1
C사 B종	39.1	37.1	37.1	37.8

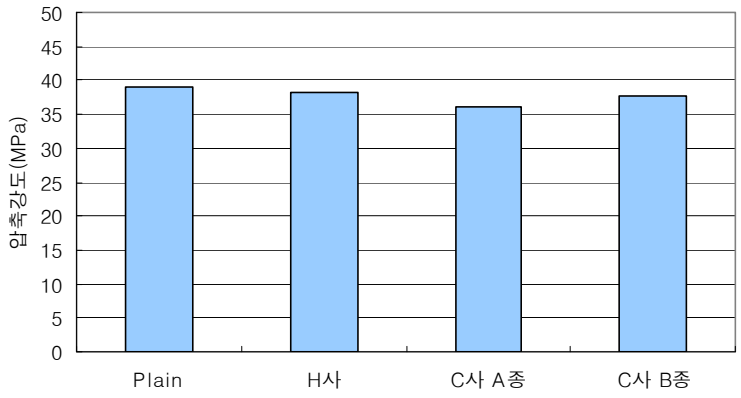


그림 3.6.30 합성섬유별 레디믹스트 숏크리트 압축강도 결과

(나) 현장 실험 계획

고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 개발을 위한 1차 현장타설 실험은 실내시험의 검증을 거쳐 현장적용성 평가 및 제품 실용화에 중점을 두어 실시하였다. 고로슬래그의 초기강도 보상의 대책으로 분말도를 달리 하여 시험 하였으며, 레디믹스트 숏크리트에 적합한 강섬유 대체 합성섬유의 적용성 평가를 실시하였다.

현장타설은 신분당선 3공구에 위치한 터널 시공현장에서 실시하였으며 현장골재 사용배합은 표 3.6.49와 같이 입도 및 표면수를 고려한 현장 배합표를 사용하였다. 급결제는 알칼리 프리계만 사용하였으며, 혼화재로서 고로슬래그는 분말도 분류로 1종, 2종, 3종을 사용하였으며, 비교군으로 실리카 흄 혼입 배합 및 Plain으로 나누

어 타설하였다. 합성섬유는 형상 및 특성 별로 3종류의 섬유를 사용하여 실내시험을 통해 등가휨강도 및 휨인성이 검증된 혼입량을 각각 혼입하여 수행하였다. 시험항목으로는 리바운드율, 압축강도, 휨강도, 휨인성 시험을 실시하였다.

표 3.6.49 1차 현장타설 실험 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재		강섬유	혼화재		혼화제
										고로 슬래그 C*30%	실리카 흄 C*8%	유동 화제 (kg)
레디믹스트 배합												
1	Plain	8	12	45.6	212	465	1602		40.5	_	_	4.65
2	B#3					325			40.5	140.0	_	4.19
3	B#3H					325			6	140.0	_	4.5
4	B#2					325			40.5	140.0	_	4.19
5	B#1					325			40.5	140.0	_	4.19
6	SF					428			40.5	_	37.0	5.58
현장골재 배합							S	G				
7	F-C1	13	12	45.0	161	465	997	535	4	-	-	4.5
8	F-C2				161	465	997	535	4		-	4.5
9	F				161	465	997	654	40.5	-	-	4.5

주1) #1,#2,#3 - 고로슬래그 1종,2종,3종　　SF - 실리카흄

F - 현장골재

H-H사 합성섬유

C1-C사 A종

C2-C사 B종

W/B:물 바인더(시멘트+혼화재)비, S/a:잔골재율,　Gmax:골재최대치수

(3) 타설실험 수행

타설시험은 미리 공장에서 혼입해온 레디믹스트 숏크리트 6배합과 현장골재를 사용한 현장배합 3배합을 실시하였다. 급결제는 알칼리 프리계를 사용하였으며 혼입량은 시멘트량 대비 8%(wt)를 모든 배합에 동일하게 사용하였다. 숏크리트 타설 실험을 통해 압축강도 측정용 공시체를 채취하기 위해 공시체 채취용 몰드를 사용하여, 원통형 코어를 각 재령(1, 3, 7, 28일)별로 채취하여 압축강도를 측정하였다. 각 재령별로 3개의 코어를 채취하였으며 휨강도용 패널을 사용하여 10×10×40cm 각주형 공시체를 절단 가공하여 휨 인성시험을 실시하였다. 레미콘에서 숏크리트 타설기계에 도착한 시점에 슬럼프 시험을 실시하였으며 숏크리트 타설기계의 용량을 산출한 뒤 일정시간 뿜어붙이기를 하여 리바운드량을 산출하였다. 그림 3.6.31은 현장타설실험 모습을 나타낸 것이다.



(a) 타설용 몰드 거치



(b) 타설재료 운반



(c) 슬럼프 측정



(d) 리바운드 측정용 초기 토출량 계량

그림 3.6.31 1차 현장타설 실험 모습



(e) 타설 실시



(f) 타설 완료된 몰드

그림 3.6.31 1차 현장타설 실험 모습(계속)

(4) 타설실험 결과

(가) 리바운드

레디믹스트 숏크리트 및 현장골재 사용 숏크리트의 리바운드 시험을 실시하기 위하여 숏크리트 타설 기계의 2회 토출량을 반복시험을 통하여 계량하였다. 총 10회의 스트로크를 측정하여 리바운드된 숏크리트를 수거하여 계량 한 뒤 리바운드율을 각 배합마다 산출 하였다. 표 3.6.50은 각 배합별 리바운드율을 나타낸 것으로서 레디믹스트 재료 및 합성섬유 사용 배합에서 적은 리바운드량이 발생하였다. 슬래그 3종을 사용 하면서 H사 합성섬유 6kg을 혼입하였을 경우 리바운드율이 5.4%로 가장 작았다. 이는 리바운드율 계산 시 무게비로 환산하여 구하는 방법에 의해 상대적으로 합성섬유의 비중이 크지 않기 때문으로 판단되며, 리바운드량을 수거한 재료에서 섬유 개수의 양을 확인해 본 결과 강섬유와 비슷한 섬유 개수가 리바운드되었음을 알 수 있었다. 하지만 레디믹스트 골재를 사용한 숏크리트는 현장골재를 사용한 숏크리트 보다, 타설 하는 중에도 확연한 차이를 느낄 수 있을 만큼 리바운드량이 현저히 적었다. 이는 리바운드에 가장 큰 영향을 미치는 골재 최대 치수가 레디믹스트 숏크리트의 경우 8mm로 작기 때문인 것으로 판단 된다.

리바운드 율 시험 결과 레디믹스트 골재를 사용 할 경우 기존의 현장골재 보다 수치상으로 약 2~3% 정도의 리바운드량을 줄일 수 있을 것이라 판단된다.

표 3.6.50 1차 현장타설 실험 배합의 리바운드율 결과

배합명		슬럼프 (cm)	2스트로크 (kg)	10스트로크 (kg)	리바운드량 (kg)	리바운드율 (%)
레디믹스트 골재 사용배합	Plain	10	85	425	27	6.4
	B#3	11			25	5.9
	B#3H	9			23	5.4
	B#2	10.5			29	6.8
	B#1	10			31	7.3
	SF	12			26	6.1
현장골재 사용배합	F-C1	10			35	8.2
	F-C2	12.1			37	8.7
	F	11			39	9.2



그림 3.6.32 1차 현장타설 배합의 리바운드율 결과

(나) 압축강도

레디믹스트 골재 사용 배합 및 현장골재 사용 배합의 압축강도 측정은 재령 1, 3, 7, 28일 마다 각 배합별로 Φ10×20cm 크기의 공시체를 코어채취 하여 측정하였다.

표 3.6.51은 각 배합별 압축강도를 나타낸 것이다. 전반적으로 실리카 흄을 혼입한 배합이 초기재령 및 28일 재령의 강도가 가장 우수함을 알 수 있었다. 이는 실내시험에서 얻은 값과 동일한 것으로서 현장타설 시험이 시공오차 없이 정량적으로 잘 시행되었음을 간접적으로 알 수 있었다. 각 배합마다 실내시험의 값보다 약 1

0~20% 정도 낮은 압축강도 발현을 보였는데 이는 급결제 영향 및 현장에서의 양생 조건이 실내시험과 다르기 때문으로 판단된다.

고로슬래그의 초기강도 발현의 지연을 보상 하고자 고로슬래그 분말도별로 나누어 현장타설 시험을 실시하였다. 실내시험에서는 1종, 2종 고로슬래그는 급결제 1일 품질기준인 9.8MPa 이상을 나타내었지만 현장타설 실험 결과 기준에 못 미치는 결과를 나타내었다. 이는 타설 후 양생중 야간에 온도가 낮게 내려가 수화 반응에 영향을 준 것으로 판단된다. 하지만 분말도가 높은 1종의 경우 고로슬래그 배합 중 초기 및 장기 강도에서 가장 큰 결과를 나타내었다.

고로슬래그를 혼입한 배합은 Plain 대비 초기 강도 발현이 다소 낮으나 재령 28일이 지나면서 Plain 보다 약간 상회 하는 경향을 나타내었다. 따라서 초기 강도 보상 문제만 해결된다면 레디믹스트 숏크리트에 적용 가능한 재료이며 장기로 갈수록 안정한 품질을 보장 할 수 있을 것이라 판단된다. 압축강도 시험결과의 상대적인 값을 살펴보면 Plain 대비 1종 고로슬래그를 사용하였을 경우 초기 1일 강도가 어느 정도 보상이 되는 것으로 나타났으며 지속적인 보완 실험을 통하여 경제성 있는 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트를 개발이 가능할 것으로 판단된다.

표 3.6.51 1차 현장타설 실험 배합의 압축강도 결과

재령 / 배합명	압축강도 (MPa)		
	1일	7일	28일
Plain	10.2	22.5	24.7
B#3	7.5	20.4	25.4
B#3H	8.4	21.6	27.9
B#2	8	20.1	27.1
B#1	9.2	23.2	28.7
SF	12.5	25.6	31.5
F-C1	8.2	20.4	27.4
F-C2	7.5	19.5	23.4
F	8	17.7	22.5

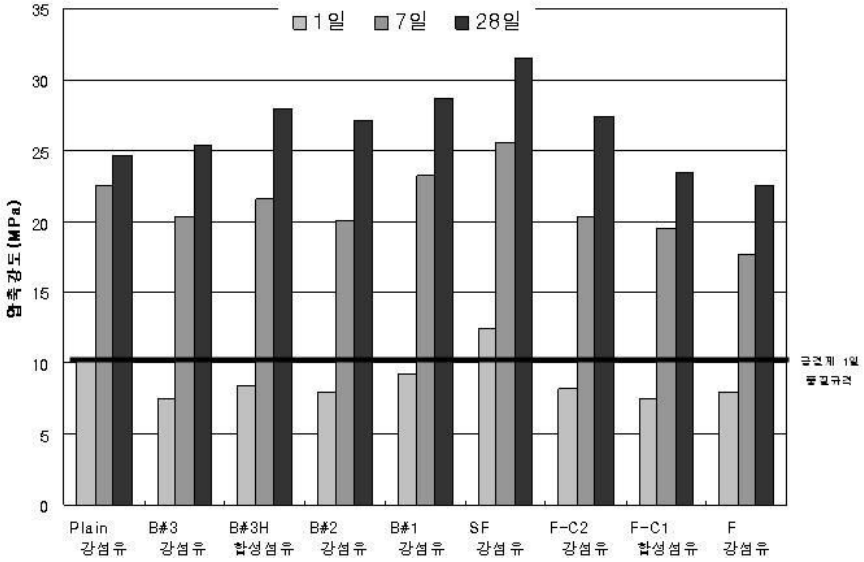


그림 3.6.33 1차 현장타설 실험 배합의 압축강도

(다) 휨강도

숏크리트에서는 압축강도 보다 휨강도 및 휨인성이 중요한 요소로 작용한다. 표 3.6.52는 각 배합별 휨강도를 나타낸 것이며, 대체적으로 설계기준 휨강도인 4.5MPa을 상회하고 있음을 알 수 있다. 특히 압축강도의 경향과 휨강도의 경향이 비슷하게 나타나고 있었으며, 레디믹스트 골재를 사용한 실리카 흄 혼입배합이 5.5MPa을 나타내 가장 우수하였다. 대체적으로 레디믹스트 골재와 현장골재 간의 휨강도 차이의 경향성은 나타나지 않았으며, 섬유별 휨강도의 경향도 나타나지 않았다. 이는 휨강도가 콘크리트 매트릭스의 경화 상태 및 바인더 량에 영향을 받고 있음을 간접적으로 알 수 있었다.

C사의 합성섬유를 혼입한 현장골재 배합의 경우 강섬유 혼입 현장골재 배합에 비해 비슷하거나 우수한 성능을 확인 할 수 있었으며 강섬유를 대체하여 강섬유로부터 발생되는 노즐 막힘 현상, 작업의 안전성 등의 문제를 해결 해줄 수 있는 재료라고 생각된다.

표 3.6.52 1차 현장타설 실험 배합의 휨강도 결과

배합명	재령 28일 휨강도			
	1	2	3	평균
Plain	4.3	4.4	4.8	4.5
B#3	4.6	-	4.8	4.7
B#3H	5.1	4.9	4.6	4.9
B#2	5.2	4.6	4.6	4.8
B#1	4.7	5.3	-	5
SF	5.5	4.9	5.2	5.2
F-C1	5.0	5.4	-	5.2
F-C2	4.7	4.4	4.4	4.5
F	-	4.5	4.7	4.6

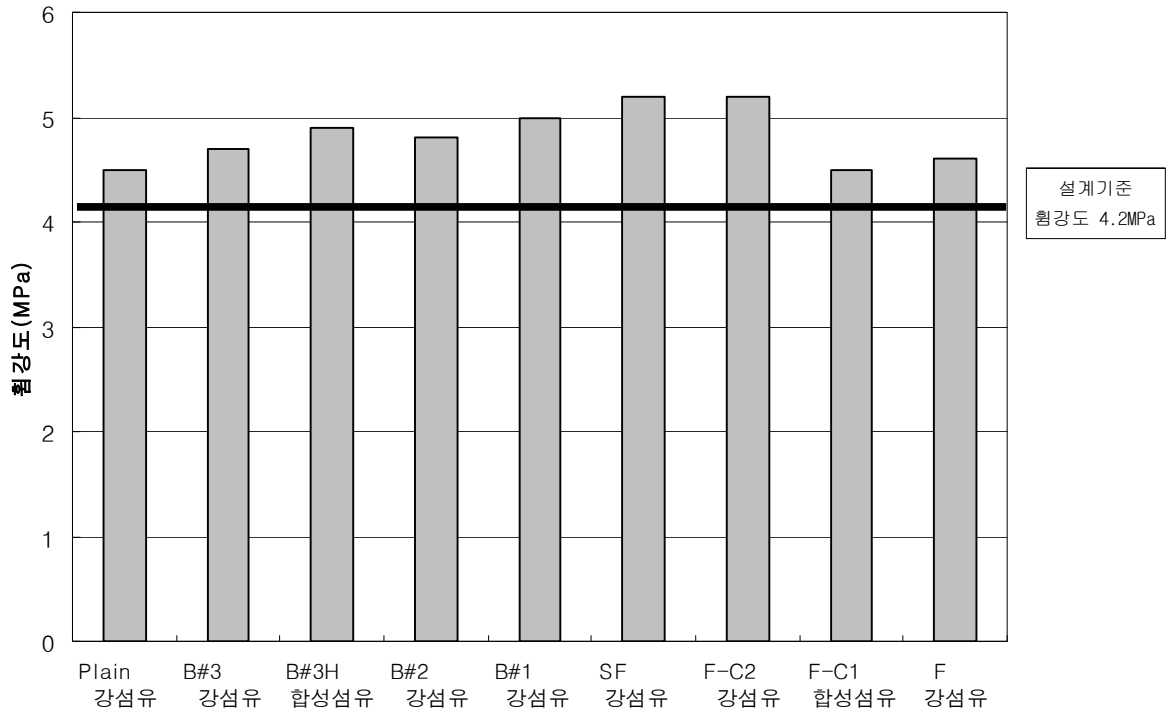


그림 3.6.34 1차 현장타설 실험 배합의 휨강도 결과

(라) 휨인성

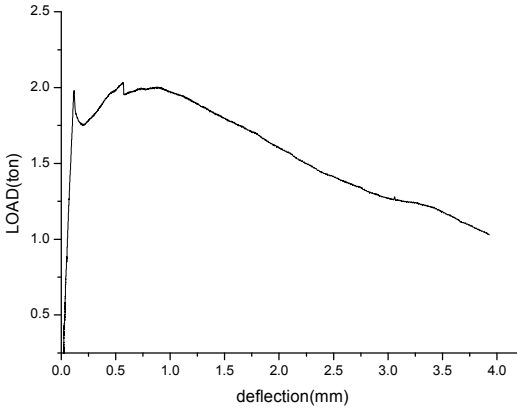
그림 3.6.35는 각 배합별 하중-처짐 그래프를 나타낸 것이다. H사의 합성섬유가 혼입 된 B#3H의 경우 그래프에서 알 수 있듯이 초기 균열이 발생한 뒤에도 높은 인성을 나타내고 있다. 또한 C사의 합성섬유가 혼입된 현장골재 배합인 F-C1, F-C2에서는 강섬유가 혼입된 현장골재 배합인 F 보다 오히려 등가 휨강도에서 더 큰 결과를 얻을 수 있었는데 이 결과로 미루어 강섬유 대체 섬유로서 H사와 C사의 제품 모두 우수한 적용성을 가지고 있다고 평가 할 수 있었고 국내 제조업체의 합성 섬유 품질이 상당한 수준에 도달 하였음을 알 수 있었다.

실리카 흄을 혼입한 배합의 하중 처짐 그래프를 살펴보면 초기 균열 시까지의 변위가 매우 작음을 알 수 있다. 이는 실리카 흄의 특성인 고강도 공시체에서 나타나는 경향이며, 매트릭스가 매우 치밀해서 강섬유를 부착하고 있는 부착력이 좋아져 결과적으로 휨인성이 우수하게 나타난 것으로 판단된다.

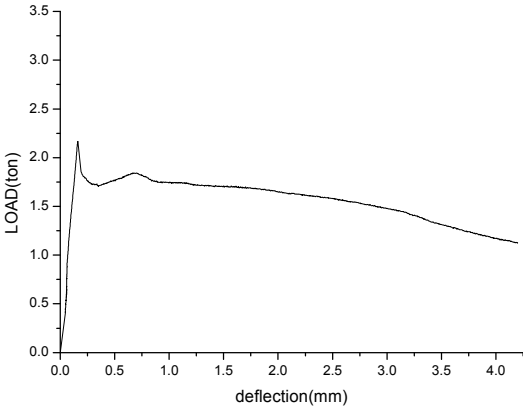
고로슬래그가 혼입된 배합의 경우 Plain 배합에 비해 우수한 휨인성을 보였고 특히 분말도가 커질 수록 우수한 휨강도 특성을 보였는데 이는 고로슬래그의 특성상 수화 생성물이 일반 숏크리트 배합보다 작고 균일하게 분포하기 때문이며 1종 고로슬래그의 경우 그 정도가 더 치밀하기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 하지만 시험 결과 3종 고로슬래그가 혼입된 배합의 경우도 충분한 합성섬유의 혼입이 이루어진다면 우수한 휨인성 특성이 발현 되는 것으로 나타나 레디믹스트 숏크리트로서 적용성을 가지고 있다고 평가 할 수 있었다.

표 3.6.53 1차 현장타설 실험 배합의 휨, 등가휨강도, 휨인성지수

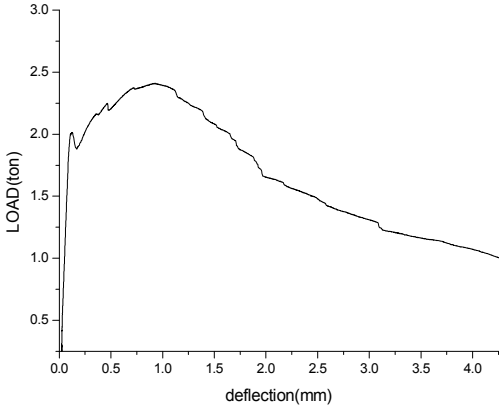
배합명	휨강도 (MPa)	등가휨강도 (%)	휨인성지수		
			I_5	I_{10}	I_{20}
Plain	4.5	63.7	3.77	8.37	17.65
B#3	4.7	64.5	4.55	6.48	15.78
B#3H	4.9	78.2	5.52	9.50	19.10
B#2	4.8	66.4	4.50	6.52	17.50
B#1	5.0	68.4	3.21	8.80	18.45
SF	5.2	82.1	5.29	10.37	21.08
F-C1	5.2	65.8	3.89	7.21	15.77
F-C2	4.5	66.9	3.99	9.47	17.54
F	4.6	62.1	4.15	8.45	15.46



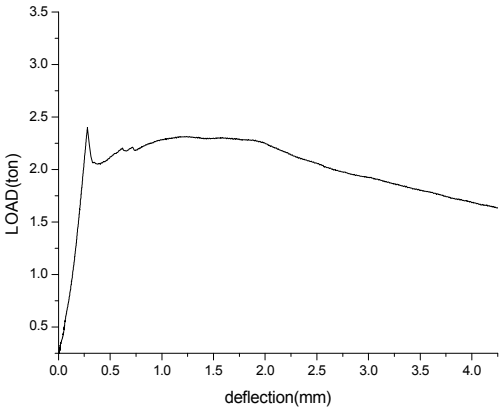
(a) Plain 배합



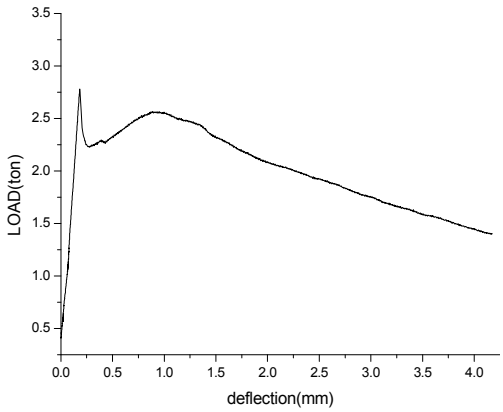
(b) B#3 배합



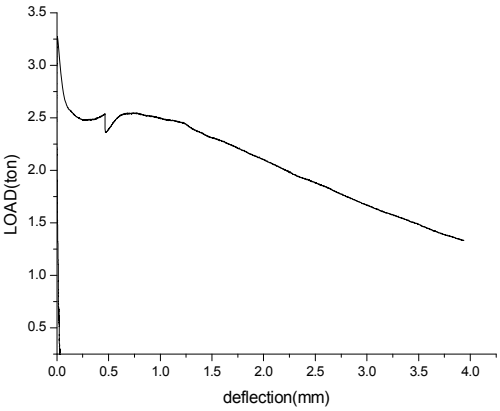
(c) B#3H 배합



(d) B#2 배합

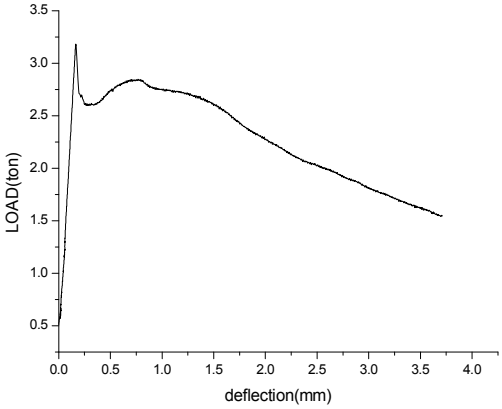


(e) B#1 배합

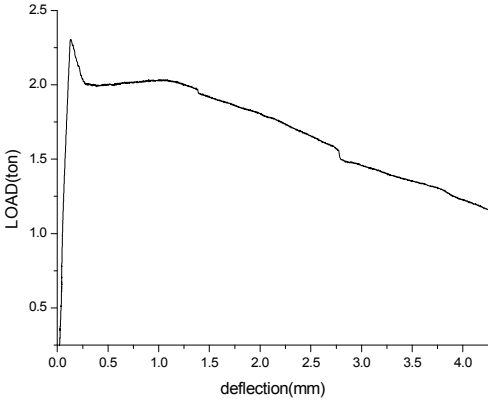


(f) SF 배합

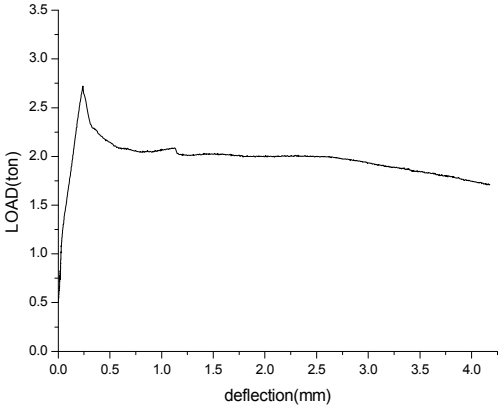
그림 3.6.35 1차 현장타설 실험 배합의 하중-처짐 그래프



(g) F-C1 배합



(h) F-C2 배합



(i) F 배합

그림 3.6.35 1차 현장타설 실험 배합의 하중-처짐 그래프(계속)

나. 2차 현장적용성 실험

(1) 타설실험 개요

1차 현장타설실험에서 고로슬래그의 1일 강도 보상 방법으로 분말도를 다르게 하여 시험타설을 실시하였다. 국내에서 생산중인 고로슬래그 1종 분말도 대략 8000cm^2/g 정도를 사용하였을 경우 혼화재를 혼입하지 않은 Plain 배합과 비슷한 강도발현을 나타내어 레디믹스트 숏크리트에 적용할 수 있는 가능성을 가진다고 판단된다. 하지만 고로슬래그 미분말의 분말도가 높아지면 생산 원가가 상승되고 양생온도가 높아져 현장 숏크리트에 대한 적용성에 문제가 발생한다.

고로슬래그가 물과 접하게 되면 슬래그 입자의 표면에 치밀한 불투수성의 산성피막이 형성되기 때문에 강알칼리나 황산염을 첨가하여 피막을 파괴함으로써 초기 강도를 증가 시킬 수 있다. 따라서 고로슬래그 미분말의 분말도를 높임으로써 발생하는 현장 숏크리트에 대한 적용성의 어려움을 해결 할 수 있는 실용적인 방안으로 알칼리 활성제 혼입을 검토하였다.

2차 현장타설실험에서는 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 초기 강도의 증진을 목적으로, 다양한 알칼리 자극제를 첨가하여 기존의 우수한 특성을 유지하면서 가장 큰 단점인 초기 강도발현 지연을 개선하기 위하여 시험 타설을 실시하였다. 시험에는 3종 고로슬래그를 사용하였고 숏크리트 타설 시험은 1차 타설 시험장소인 분당구 신분당선에 위치한 터널시공 현장에서 수행하였다.

2차 현장타설 실험에서는 실내시험을 바탕으로 알칼리 활성화제 2종류에 따른 초기강도 보상에 중점을 두었으며, 비교군으로 Plain 및 실리카흄 8% 치환 배합, 그리고 현장골재배합을 추가하여 실시하였다.

(2) 사용 재료

(가) 알칼리 활성제

슬래그 미분말의 수화기구 및 알칼리자극제의 작용은 다음과 같다. 고로슬래그미분말의 주성분은 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, MgO로 시멘트의 성분과 거의 비슷하여 시멘

트의 수화반응과 유사한 반응 작용을 한다. 그러나 고로슬래그미분말의 경화반응은 보통 포틀랜드시멘트의 수경성반응과는 다소 차이가 있는 잠재수경성이라는 반응 기구를 지닌다.즉, 수경성은 물 분자와 접하게 되면 성분들의 용출이 시작되면서 수화물을 형성하여 경화하는 성질인 반면, 잠재수경성은 단순히 물과의 접촉만으로는 성분들의 용출되지 않고 자극제의 존재가 반드시 필요하며,이 자극제가 고로슬래그의 반응을 촉진한다. 고로슬래그는 물과 접한 직후 Ca^{2+}가 용출되고 그 표면에 투과성이 나쁜 부정형의 ASH 6의 피막이 형성되며 이 피막으로 인해 고로슬래그 미분말 입자 속으로 물의 침투 및 고로슬래그 미분말 입자로부터의 이온의 용출이 억제되기 때문에 수화반응은 진행되지 않는다. 그러나 알칼리 자극제에 의해 고로슬래그 미분말 입자에 OH^-가 흡착되면 유리구조가 파괴되어, SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, MgO의 용출이 촉진된다. 즉, 고로슬래그 미분말 입자의 유리질을 구성하고 있는 불규칙한 -O-Si-O-A l-O-의 3차원 그물구조의 쇄상결합이 pH=12 이상의 강알칼리에 의해 절단되고, 그 그물구조 속에 있는 Al_2O_3, CaO, MgO 등이 쉽게 용출할 수 있어 반응이 시작하는 것이다.

반응이 시작되면 시멘트 매트릭스는 고로슬래그 미분말에서 용출되는 알칼리성분에 의해 높은 pH 상태가 유지된다. 이후 반응은 고로슬래그 미분말에 함유되어 있는 Ca^{2+}와 SiO_2가 용출하여 지속적인 수화반응을 하며 C-S-H계의 수화물을 형성하게 되는 것이다. 이러한 반응 메커니즘을 그림 3.6.36에 나타내었다. 따라서 이와 같은 수화진행 메커니즘으로 인해 고로슬래그미분말의 잠재수경성은 보통포틀랜드시멘트의 수화반응보다 수화진행속도가 느리고, 고로슬래그 혼합 경화체의 초기 강도 지연을 가져오게 된다.

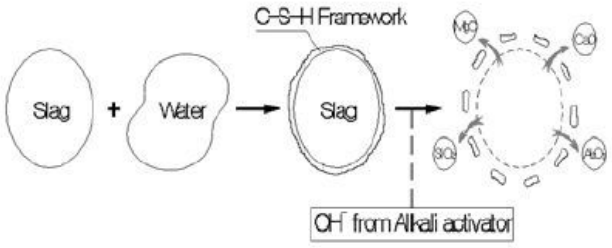


그림 3.6.36 알칼리 자극제에 의한 고로슬래그 미분말 입자의 활성 매커니즘

따라서 알칼리 자극제를 첨가함으로써 고로슬래그미분말의 잠재수경성을 수화 초기에 이끌어 내어 조기강도를 증진시킬 수 있는 것이다. 고로슬래그의 수화특성을

촉진시키기 위해 많은 연구자들이 알칼리 자극제를 사용하였다. 알칼리 자극제로서 사용한 활성제의 종류는 매우 다양하지만 크게 분류하면 다음과 같다.

- caustic alkalies: MOH
- non-silicate weak acid salts: M_2CO_3 , M_2SO_3, M_3PO_4
- silicates: $M_2O \cdot nSiO_2$
- aluminate: $M_2O \cdot nAl_2O_3$
- alumino-silicates: $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot nSiO_2$
- non-silicate strong acid salts: M_2SO_4

이처럼 많은 활성제 중에서 믹서 및 타설 장비의 부식의 우려가 있는 NaCl류와 같은 것은 제외하였고 실내시험을 통하여 가장 성능이 우수한 KOH, Na_2SO_4 2종류를 적용하였다

(3) 타설실험 계획

(가) 숏크리트 재료의 실내 성능 시험

고로슬래그 미분말 3종(분말도 4000cm^2/g)을 사용하여 알칼리 활성제에 의한 초기강도 보상정도를 알아보기 위하여 표 3.6.54와 같이 배합설계를 실시하여 실내 시험을 수행하였다. 시멘트는 국내 H사의 1종 보통 포틀랜트시멘트를 사용하였으며 레디믹스용 숏크리트 골재 및 현장골재는 앞에서 언급한 재료를 사용하였다. 알칼리 활성제는 적정 혼입량인 고로슬래그 중량 대비 2%를 혼입하였다. 그리고 정확한 물성평가를 위하여 급결제의 혼입은 제외하였다.

고로슬래그 배합은 BFS, KOH 알칼리 활성화제를 혼입한 고로슬래그 배합은 BFS KOH, Na_2SO_4 알칼리 활성화제를 혼입한 배합은 BFS Na_2SO_4,로 나타내었고 고로슬래그 숏크리트의 강도 발현 특성을 비교하기 위하여 실리카 흄이 혼입된 레디믹스트 숏크리트 SF 배합을 비교군으로 두었다.

표 3.6.54 알칼리활성제 및 합성섬유 보강 숏크리트 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재 (kg)	혼화재(kg)			
								고로 슬래그 C*30%	실리 카흄 C*8%	보강 섬유	알칼리 활성제
레디믹스트 배합											
1	BFS	8	12	45.6	212	465	1602	-	-	40	
2	BFS KOH					325		140	-	40	2.8
3	BFS Na_2SO_4					325		140	-	40	2.8
4	SF					428			37	40	

압축강도는 1일, 7일, 28일에 실시하였으며 그 결과는 표 3.6.55와 같다. 그림 3.6.37을 통해 알 수 있듯이 활성제를 혼입하지 않은 고로슬래그를 배합 BFS와 비교하여 알칼리 활성제를 혼입한 배합에서는 1일 강도발현이 다소 보상되는 효과를 나타냈다. 재령 28일로 갈수록 Plain 배합과 비슷한 패턴의 강도 증가율을 보였으며 슬래그 대비 알칼리 활성제 2%혼입에 의한 장기강도 저하는 나타나지 않았다. 실리카흄을 사용한 배합이 재령 28일 강도 45.2MPa을 나타내 가장 우수한 성능을 보였으며 KOH를 혼입한 배합이 37.5MPa로 그 다음으로 강도 발현이 우수하게 나타났다. 알칼리 활성제에 의한 1일 강도 보상은 대략 15~28% 정도 증가하여, 알칼리 활성제의 보상 메커니즘을 실내시험을 통해서 확인 할 수 있었다.

표 3.6.55 알칼리 활성제 혼입에 따른 압축강도

배합명	1일	7일	28일
BFS	7.8	28.2	36.5
BFS KOH	9.0	31.2	37.5
BFS Na_2SO_4	10.1	29.2	34.3
SF	11.0	34.5	45.2

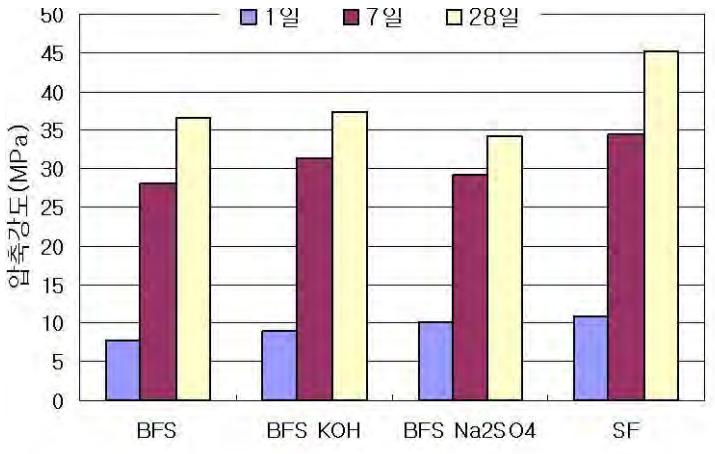


그림 3.6.37 알칼리 활성제 혼입에 따른 압축강도

(나) 실험 계획

고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 개발을 위한 2차 현장타설 시험은 고로슬래그의 적용성 평가에 중점을 두어 실시하였다. 1차 현장타설에서는 고로슬래그의 활성도에 따른 초기보상 정도를 확인하였으나 적용하기에는 다소 미흡한 부분이 있어 2차 현장타설에서는 알칼리 활성제를 혼입하여 추가 보완하기로 하였다.

현장타설 실험은 신분당선 3공구에 위치한 터널 시공현장에서 실시하였으며 현장골재 사용배합은 입도 및 표면수를 고려한 현장 배합표를 적용하였는데, 표 3.6.56은 시험 배합표를 나타낸 것이다. 급결제는 알칼리 프리계만 사용하였으며, 고로슬래그는 분말도 분류로 3종을 사용하였다. 고로슬래그 배합은 알칼리 활성화제를 혼입하지 않은 BFS 배합, 그리고 KOH 및 Na_2SO_4 알칼리 활성화제를 혼입한 BFS-KOH와 BFS-Na_2SO_4, 3배합을 타설하였고 비교 군으로 일반 레디믹스트인 Plain 배합, 실리카 흄 혼입 레디믹스트 숏크리트인 SF 배합, 그리고 현장 골재를 사용한 F 배합과 현장골재에 실리카 흄을 혼입한 F-SF 배합을 타설하였다.

보강섬유로는 모든 배합에 강섬유를 적용하였다.

표 3.6.56 2차 현장타설 실험 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재		보강 섬유	혼화재		혼화제	
										고로 슬래그 C*30%	실리 카흄 C*8%	유동 화제 (kg)	알칼리 활성제
레디믹스트 배합													
1	Plain	8	12	45.6	212	465	1,602		40.5	_	_	4.65	
2	BFS					325			40.5	140.0	_	4.19	
3	BFS-KOH					325			40.5	140.0	_	4.65	2.8
4	BFS-Na_2SO_4					325			40.5	140.0	_	4.19	2.8
5	SF					428			40.5	-	37	5.58	
현장골재 배합							S	G					
6	F	13	12	45.0	161	465	997	654	40.5	-	-	4.5	
7	F-SF				161	428	997	654	40.5		37.0	5.58	

주1) BFS 고로슬래그 3종 SF - 실리카흄

F - 현장골재

W/B:물 바인더(시멘트+혼화재)비, S/a:잔골재율, Gmax:골재최대치수

(4) 타설실험 수행

타설시험은 미리 공장에서 혼입해온 레디믹스트 숏크리트 5배합과 현장골재를 사용한 현장배합 2배합을 실시하였으며, 1차 타설과 동일하게 시험 타설하였다. 급결제는 알칼리 프리계를 사용하였으며 혼입량은 시멘트량 대비 8%(wt)를 사용하였으며 강도측정용 패널을 사용하여 코어채취 후 강도 시험을 실시하였다. 시험 항목으로는 리바운드율, 압축강도, 휨강도, 휨인성 시험을 실시하였다. 압축강도는 재령 1일, 7일, 28일에 실시하였으며, 휨강도 및 휨인성 시험은 재령 28일에 절단된 빔 형 공시체로 시험하였다. 그림 3.6.38은 2차 현장타설실험 모습을 나타낸 것이다.



(a) 레디믹스트 숏크리트 재료 운반



(b) 레디믹스트 숏크리트 재료 보관



(c) 타설용 몰드 거치



(d) 리바운드 측정 준비



(e) 타설 실시



(f) 타설 완료된 몰드

그림 3.6.38 2차 현장타설 실험 모습

(5) 타설실험 결과

(가) 리바운드

레디믹스트 숏크리트 및 현장골재 사용 숏크리트의 리바운드 시험을 실시하기 위하여 숏크리트 타설 기계의 2회 토출량을 반복시험을 통하여 계량하였다. 총 10회

의 스트로크를 측정하여 리바운드된 숏크리트를 수거하여 계량 한 뒤 리바운드율을 각 배합마다 산출 하였다. 표 3.6.57은 각 배합별 리바운드율을 나타낸 것으로서 레디믹스트 재료 배합에서 적은 리바운드량이 발생하였다. 고로슬래그혼입 KOH 배합이 리바운드량이 11.1%로 가장 많았다(그림 3.6.39). 이는 배합상의 문제점은 아닌 것으로 판단되며, 원인은 상대적으로 슬럼프 값이 커서 숏크리트 타설시 빠르게 터널 벽체에 고형화 되지 않아 나타난 현상으로 판단된다. 대체적으로 레디믹스트 골재의 최대치수인 8mm와 현장골재의 13mm의 차이가 리바운드량에 영향을 미치는 것으로 판단되며 확연히 유관으로도 느껴질 만큼 현장배합의 굵은 골재 리바운드 량이 많았다.

고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 경우 일반 레디믹스트 숏크리트 보다 리바운드 량이 컸는데 이는 고로슬래그의 잠재 수경성 때문에 초기 반응이 느려 부착성이 떨어지기 때문인 것으로 생각되며 알칼리 활성화제 인 Na_2SO_4 혼입 시 초기 반응이 활발하게 일어나 더 적은 리바운드 율을 보임을 알 수 있었다. 따라서 3종 고로슬래그를 사용하여도 알칼리 활성화제를 적용 한다면 일반 레디믹스트 숏크리트와 비슷한 정도의 초기 반응성을 확보 할 수 있을 것으로 생각된다.

표 3.6.57 2차 현장타설 실험 배합의 리바운드율 결과

배합명		슬럼프 (cm)	2스트로크 (kg)	10스트로크 (kg)	리바운드량 (kg)	리바운드율 (%)
레디믹스트 재료 사용배합	Plain	9	85	425	33.1	7.8
	BFS	10			37.5	8.5
	BFS KOH	16			47	11.1
	BFS Na_2SO_4	10			25	5.9
	SF	12			20	4.7
현장골재 사용배합	F	12			45	10.6
	F-SF	10			30	7.0

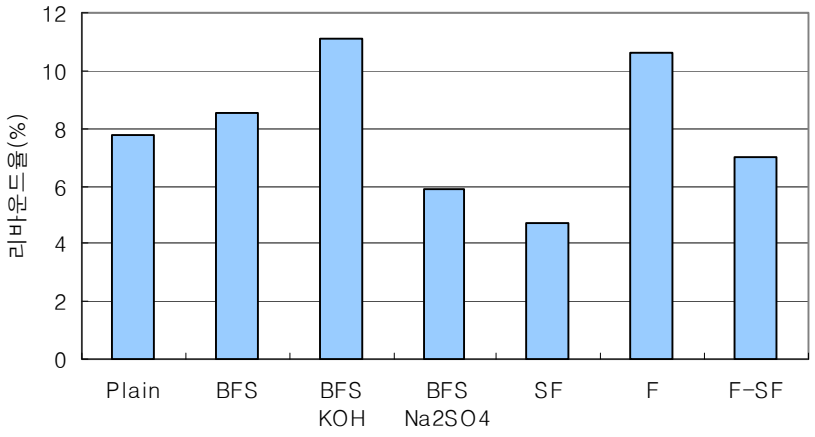


그림 3.6.39 2차 현장타설 실험 배합의 리바운드율 결과

(나) 압축강도

알칼리 활성제를 혼입한 레디믹스트 숏크리트의 압축강도 발현 성상을 파악하기 위하여 재령 1, 7, 28일 마다 각 배합별로 Φ10×20cm 크기의 공시체를 코어채취 하여 측정하였다. 현재 1, 7일 압축강도는 시험은 실시하였으며 28일 압축강도는 재령 경과 후 측정할 계획이다.

각 배합별 압축강도를 나타낸 것이 표 3.6.58이다. 표를 보면 알 수 있듯이 전반적으로 알칼리 활성제를 혼입한 배합이 활성제를 혼입하지 않은 고로슬래그 배합에 비해 초기재령의 강도발현이 우수하게 나타났다. 이는 알칼리 활성화제가 투입 됨으로써 고로슬래그 미분말의 잠재수경성을 수화 초기에 이끌어 내어 조기 강도를 증진 시킬 수 있었기 때문이라고 생각된다.

레디믹스트 숏크리트의 재료로 고로슬래그의 적용성 평가를 위해 실시한 알칼리 활성제 혼입은 대체적으로 양호한 결과를 나타내어 초기 강도에서 품질기준을 만족하고 장기 강도에서는 일반 레디믹스트 숏크리트 보다 우수한 강도를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 고로슬래그는 알칼리 활성화제를 혼입하여 초기강도 보상 문제만 해결된다면 레디믹스트 숏크리트에 적용 가능한 혼화재료이며 안정한 품질을 보장할 수 있을 것이라 판단된다.

표 3.6.58 2차 현장타설 실험 배합의 압축강도

재령 / 배합명	압축강도 (MPa)	
	1일	7일
Plain	11.2	20.5
BFS	7.0	21.5
BFS KOH	10.5	20.5
BFS Na2SO4	9.8	22.2
SF	12.4	28.5
F	8.1	18.5
F-SF	9.9	20.6

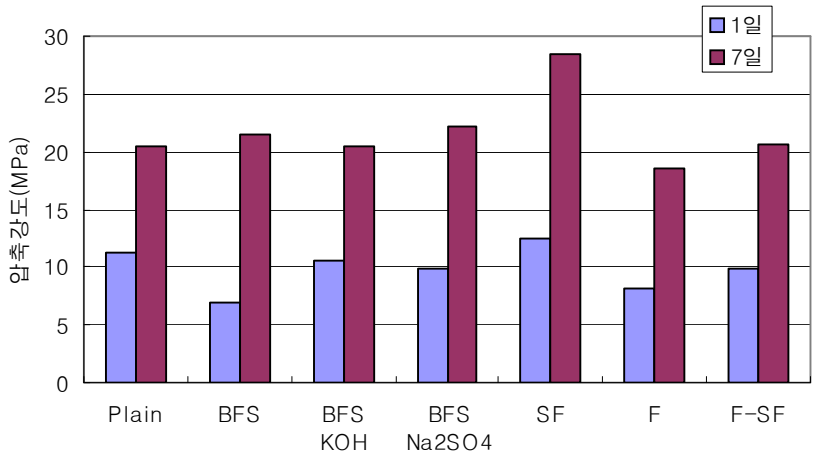


그림 3.6.40 2차 현장타설 실험 배합의 압축강도

(다) 휨강도 및 휨인성

고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 휨강도 및 휨인성 특성 평가를 위한 시험 결과 고로슬래그가 혼입된 배합인 BFS, BFS-KOH, BFS-Na_2SO_4 배합의 경우 일반 레디믹스트 숏크리트와 휨 강도에서 거의 비슷한 결과를 나타냈다. 또한 휨인성 특성도 일반 레디믹스트 숏크리트와 거의 비슷한 정도의 결과를 보였다. 따라서 휨특성에 관해서는 레디믹스트 숏크리트에 미치는 고로슬래그의 영향을 발견 할 수 없었으며 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트도 충분한 휨강도 및 휨인성이 발현되어 레디믹스트 숏크리트 재료로서 적용성이 우수하다고 판단된다.

표 3.6.59 2차 현장타설 실험 배합의 휨강도, 등가휨강도, 휨인성지수

배합명	휨강도 (MPa)	등가휨강도 %	휨인성지수		
			I_5	I_{10}	I_{20}
Plain	4.4	66.9	3.57	9.40	16.78
BFS	4.2	65.2	3.22	7.54	16.99
BFS KOH	4.2	68.5	3.35	6.85	16.54
BFS Na_2SO_4	4.3	64.2	4.02	6.69	17.41
SF	.4.8	68.6	4.85	9.80	19.21
F	4.4	64.2	3.40	7.69	16.54
F-SF	4.7	68.2	4.14	8.50	17.22

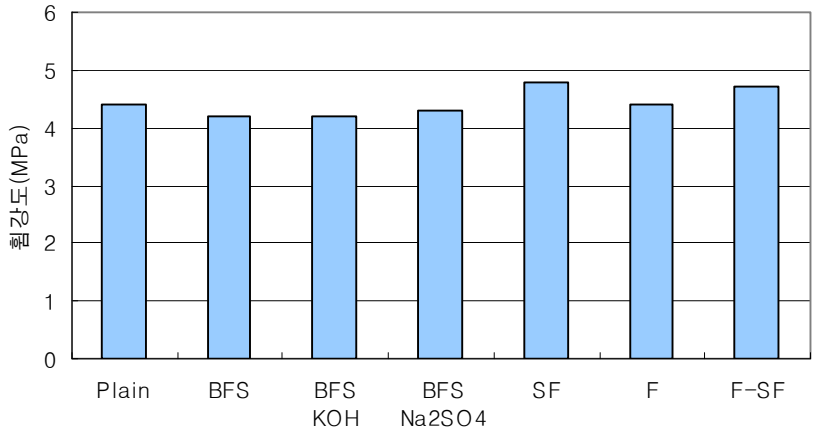


그림 3.6.41 2차 현장타설 실험 배합의 휨강도

다. 3차 현장적용성 평가

(1) 실험 개요

2차 현장타설에서는 레디 믹스트 숏크리트의 초기 강도 증진을 목적으로, 다양한 알칼리 자극제를 첨가하여 기존의 우수한 특성을 유지하면서 가장 큰 단점인 초기 강도발현 지연을 개선하기 위한 시험 타설을 실시하였다. 그 결과 고로슬래그 3종을 사용하고 소량의 알칼리 활성화제를 혼입해 줌으로서 충분한 초기 강도가 발현됨을 알 수 있었고 3종 고로슬래그의 적용성을 확인 할 수 있었다.

3차 현장타설실험에서는 고로슬래그 혼입량을 시멘트의 30%로 유지하며 고로슬래그의 적용성을 확인하는 실험을 진행하였다. 그리고 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트에 플라이 애쉬(Fly ash) 혼화재를 혼입시 강도 발현특성을 평가하여 적용성을 검토하였다. 그리고 강섬유의 대체 재료로서 HP-L 합성섬유의 성능 평가도 수행하였다.

현장타설실험은 강원도 삼척시의 광산 갱도현장에서 실시하였으며 3종 고로슬래그 미분말의 적용성 확인을 위한 RM-BFS2 배합과 고로슬래그 미분말에 플라이 애쉬를 적용한 RM-BFS3 배합을 타설하였다. 그리고 비교 군으로 일반 레디믹스트 숏크리트 배합인 Plain 배합과 현장골재를 적용한 배합으로 광산 현장에 널리 쓰이는 K배합과 터널 현장에 널리 쓰이는 N배합을 타설하였다. 레디믹스트 숏크리트 배합의 합성 섬유는 국내 H사에서 생산되는 L형 합성섬유를 사용하였으며 현장 골재 배합은 강섬유를 혼입하여 시험하였다. 그리고 시험항목으로는 압축강도, 휨강도, 휨인성 시험을 실시하였으며 실험에 사용된 배합은 표 3.6.60과 같다.

표 3.6.60 3차 현장타설 실험 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재		합성 섬유	혼화재		혼화제	
									HP-L 50mm	고로 슬래그 C*30%	F/A	유동화 제 (kg)	AE 감수 제
레디믹스트 배합													
1	RM-P1	8	12	45.6	212	465	1586		5	_	-	1.67	-
2	RM-BFS2				212	325	1576		5	140	-	1.67	
3	RM-BFS3				212	325	1489		5	140	75	1.94	
현장골재 배합							S	G					
4	K	13	15	42.0	146	450	1124	600	40 (강섬유)	-	-	1.67	40
5	N	13	12	34.6	129	489	1047	617	40 (강섬유)	-	-	1.67	-

주1) BFS 고로슬래그 3종
K - 대한 광업진흥공사 현장골재 N - 일반 현장골재

(2) 타설실험 수행

타설시험은 미리 공장에서 혼입해온 레디믹스트 숏크리트 3배합과 현장골재를 사용한 현장배합 2배합을 실시하였으며, 급결제는 알칼리 프리계를 시멘트량 대비 8%(wt) 혼입하였다 그리고. 압축강도 측정용 공시체를 채취하기 위해 공시체 채취용 몰드를 사용하여 원통형 코어를 각 재령 (1, 7, 28일)별로 채취하여 압축강도를 측정하였다. 재령 별로 2개의 코어를 채취하였으며 휨강도용 패널을 사용하여 10×10×40cm 각주형 공시체를 절단 가공하여 휨 인성시험을 실시하였다. 그림 3.6.42는 현장에 숏크리트를 타설하는 모습이다.



(a) 레디믹스트 숏크리트 재료 운반



(b) 슬럼프 측정



(c) 타설용 몰드 거치



(d) 타설 실시



(e) 타설 완료된 몰드



(f) 공시체 채취

그림 3.6.42 3차 현장타설 실험 모습

(3) 타설실험 결과

(가) 압축강도

레디믹스트 숏크리트의 압축강도 발현 성상을 파악하기 위하여 재령 1, 7, 28일마다 각 배합별로 φ10×20cm 크기의 공시체를 코어채취 하여 측정하였다. 표 3.6.61에 각 배합별 압축강도를 나타내었다. 표를 보면 알 수 있듯이 레디믹스트 숏크리트의 압축강도는 숏크리트 재령 1일 품질기준인 9.8MPa을 훨씬 상회하는 결과를 보였다. 하지만 현장배합의 경우 일반적인 터널 현장골재 배합 인 N 배합의 경우 1일 압축강도가 기준에 미치지 못하며 레디믹스트 숏크리트의 50%정도 밖에 발현되지 않았는데 이는 현장골재를 사용한 배합의 문제점을 단적으로 드러내는 결과로 일정한 품질을 가지지 못하고 현장골재의 강도 특성 및 이물질 혼입정도 그리고 화학적 성질에 따라 숏크리트 품질 저하 현상이 나타난 결과라고 생각된다. 장기 재령 강도에서도 레디믹스트 배합에 비해 현장 골재 사용 숏크리트 배합의 강도는 55%~70% 정도 밖에 발현되지 않았다.

고로슬래그 숏크리트의 경우 초기 강도 및 28일 재령 압축강도가 Plain 대비 약간 상회하는 경향을 나타내었으며 플라이 애쉬가 첨가된 고로슬래그 숏크리트도 거의 비슷한 정도의 압축강도를 나타내었다. 이 결과는 알칼리 활성화제를 혼입함으로써 플라이 애쉬의 초기 강도 보상문제도 해결 되었음을 나타내며 플라이 애쉬를 혼입함으로써 일반 레디믹스트 숏크리트에 비해 워커빌리티 및 펌프빌리티가 증가하고 염해 및 알칼리-골재 반응에 저항성을 증진시킬 수 있는 플라이 애쉬 혼입 레디믹스트 숏크리트도 현장에 적용 가능성이 충분할 것이라고 사료된다.

표 3.6.61 3차 현장타설 실험 배합의 압축강도

재령 / 배합명	압축강도 (MPa) 공시체 평균		
	1일	7일	28일
1(RM-P1)	20.03	33.08	42.55
2(RM-BFS2)	21.09	33.43	45.20
3(RM-BFS3)	21.11	33.57	45.00
K	10.81	19.69	28.6
N	7.88	15.54	25.8

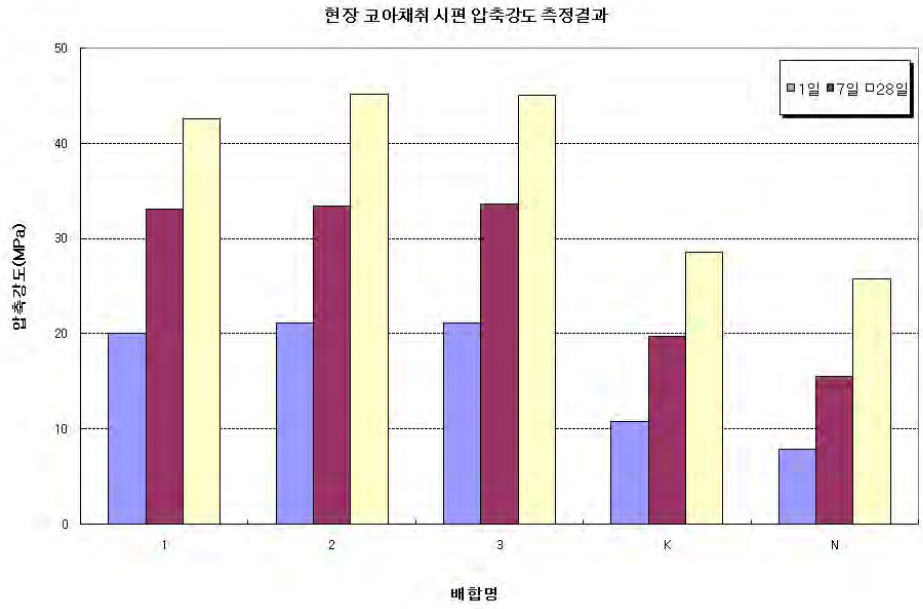


그림 3.6.43 3차 현장타설 실험 배합의 압축강도

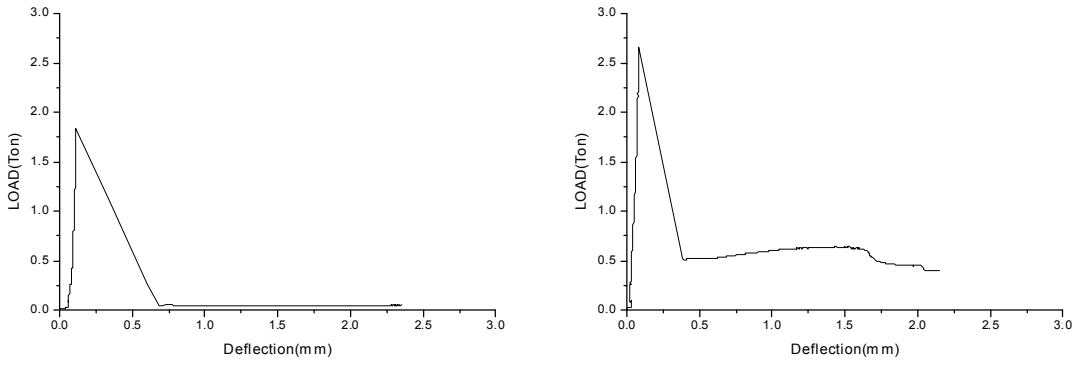
(나) 휨강도 및 휨인성

본 3차 현장타설은 강섬유 대체 합성섬유로 H사의 HP-L 합성섬유의 성능 평가를 위해 실시하였다. 휨강도 및 휨인성의 시험 결과는 표 3.6.62와 그림 3.6.44와 같다.

표 3.6.62을 보면 28일 전배합의 휨강도가 4.5MPa 이상으로 우수한 휨강도 특성을 나타내었다. 하지만 등가휨강도(휨인성계수)의 경우 HP-L 합성섬유를 사용 했을 때 숏크리트 품질기준인 68%에 크게 미치지 못하는 것으로 나타났다. 또한 합성섬유 배합이 강섬유 배합에 비해 인성이 크게 부족한 것을 보였다. 이는 합성섬유 자체의 성능 문제도 있지만 전체적인 혼입량 부족에서 오는 결과라 사료되며 따라서 HP-L 합성섬유를 레디믹스트 숏크리트에 적용하기 위해서는 추후 혼입량을 더 증가시켜 기준 휨특성을 만족 할 수 있는 배합을 도출 시킬 수 있는 연구가 필요하다고 판단된다.

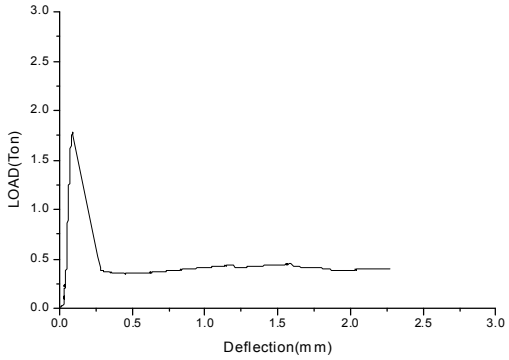
표 3.6.62 3차 현장타설 실험 배합의 휨강도, 등가휨강도, 휨인성지수

재령 / 배합명	휨인성 (MPa) 공시체 평균				
	휨강도 MPa	등가휨강도 %	휨인성지수		
			I_5	I_{10}	I_{20}
1(RM-P1)	5.40	16.83	12.20	18.83	20.21
2(RM-BFS2)	7.83	27.50	5.66	7.88	10.89
3(RM-BFS3)	5.25	26.84	4.64	6.10	9.03
K	6.37	61.06	4.36	8.02	14.00
N	5.96	50.50	2.86	4.72	7.76

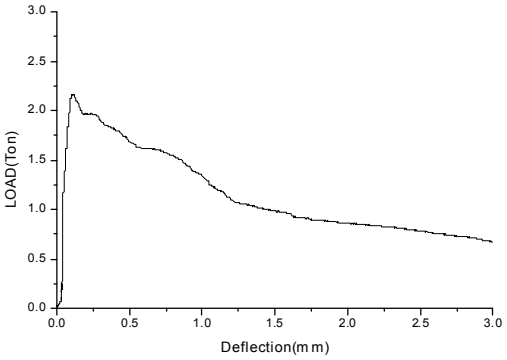


(a) RM-P1 배합 (b) RM-BFS2 배합

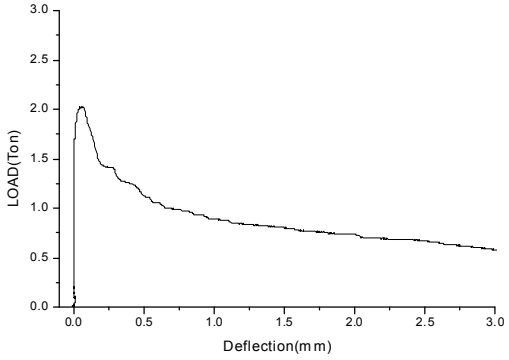
그림 3.6.44 3차 현장타설실험 배합의 하중-처짐 그래프



(c) RM-BFS3 배합



(d) 현장배합-K



(e) 현장배합-N

그림 3.6.44 3차 현장타설실험 배합의 하중-처짐 그래프(계속)

라. 4차 현장적용성 평가

(1) 타설실험 개요

3차 현장타설 실험에서는 강섬유를 대체 할 수 있는 합성섬유로서 HP-L 합성섬유의 적용성 확인을 위한 타설시험이 수행되었다. 그리고 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트에 플라이 애쉬를 혼입했을 시의 강도 성상의 발현을 파악하기 위한 시험이 수행되었다. 그 결과 플라이 애쉬의 적용 가능성은 확인하였지만 HP-L 합성섬유 적용시 휨인성 기준을 만족하지 못하여 섬유 혼입량에 대한 추후 연구가 필요하다고 판단 되었다.

4차 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험은 HP-L 혼입량을 증가 시켜 휨인성 특성을 파악하고 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트에 플라이 애쉬 혼입시 성능평가를 수행하는데 중점을 두었다. 또한 이동식 사일로를 사용하여 현장에 타설하는 배합을 추가로 타설하여 이동식 사일로의 현장 적용성을 평가하고자 하였다.

현재 국내 숏크리트 시공은 레미콘 트럭이 배치 플랜트에서 출하되어 현장에서 타설하게 되는데, 이러한 과정에서 배치플랜트에서 현장에 타설하기까지 운반시간 지연 문제가 발생하여 워커빌리티가 저하되고, 재료의 분리 현상이 발생하여 품질 저하 요인이 추가로 발생하게 된다. 본 실험에서는 현장 배치플랜트 문제를 해결하기 위한 방법으로 이동식 사일로를 이용해 직접 현장에 레디믹스트 숏크리트를 타설하여 이동식 사일로의 현장 적용성을 검토하였다.

본 실험에서는 Plain 레디믹스트 숏크리트를 이동식 사일로를 이용해 현장에 타설하 현장적용성을 검토하고, 플라이 애쉬를 일반 레디믹스트 숏크리트 및 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트에 혼입하여 플라이 애쉬의 적용성을 검토하였다. 그리고 현장골재 적용 배합은 울산 터널 현장과 삼척의 광산 현장에서 사용되는 골재 배합을 사용하였다. 표 3.6.63은 4차 현장타설실험에 사용된 배합을 나타낸 것이다.

표 3.6.63 4차 현장타설 실험 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재		합성 섬유	혼화재		혼화제	
									HP-L 50mm	고로 슬래그 C*30 %	F/A	유동화제 (kg)	AE 감수제
레디믹스트 배합													
1	RM-P1	8	12	45.6	212	465	1586		6	-	-	1.67	-
2	RM-P2				212	465	1497		6	-	75	1.94	-
3	RM-BFS3				212	325	1576		6	140	-	1.67	-
4	RM-BFS4				212	325	1489		6	140	75	1.94	-
현장골재 배합							S	G					
5	울산 터널	13	8	44.8	189	459	1004	646	40 (강섬유)	-	-	2.3	-
6	삼척 광산	13	15	42.0	146	450	1124	600	40 (강섬유)	-	-	-	40
사일로													
7	사일로	8	12	45.6	212	465	1497		6	-	75	1.94	-

*현장골재 사용배합 1. 입도를 고려한 수정
2. 표면수를 고려한 수정

(2) 타설실험 수행

4차 현장 실험은 미리 공장에서 혼입해온 4배합과 현장골재를 사용한 현장배합 2배합, 그리고 이동식 사일로를 사용해 운반한 1배합으로 타설을 수행하였다. 시험항목으로는 압축강도, 휨강도, 휨인성 시험을 실시하였다. 압축강도는 1일, 3일, 7일, 28일에 실시하였으며, 휨강도 및 휨인성 시험은 재령 28일에 절단된 빔 형 공시체로 시험하였다. 그림 3.6.45는 4차 현장타설 실험 모습을 나타낸 것이다.



(a) 이동식사일로



(b) 믹서



(c) 타설 실시

그림 3.6.45 4차 현장타설 실험 모습

(3) 타설실험 결과

(가) 압축강도

레디믹스트 숏크리트 배합의 강도 발현 성상을 검토하기 위해 재령 1, 7, 28일 마다 각 배합별로 Φ10×20cm 크기의 공시체를 코어 채취 하여 압축강도를 측정하였다. 각 배합별 압축강도는 표 3.6.63에 나타내었다.

압축강도 시험 결과 Plain 레디믹스트 숏크리트와 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 모두 숏크리트 품질 기준을 훨씬 상회하는 우수한 압축강도를 보였는데 초기 강도는 RM-P1이 가장 높게 나타나 고로슬래그 및 플라이 애쉬가 혼입된 배합에 비해 초기 강도 발현성이 우수함을 확인 할 수 있었다. 이는 고로슬래그 및 플라이 애쉬의 초기 발현 지연성 때문으로 생각되지만 고로슬래그 및 플라이 애쉬가 혼입된 RM-P2, RM-BFS3, RM-BFS4 배합의 경우에도 우수한 초기 강도 발현이 나타나 적용성에 있어서 문제는 없을 것으로 판단된다. 그리고 28일 재령 강도는 플라이 애쉬가 혼입된 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트인 RM-BFS4 배합에서 가장 높았고 플라이 애쉬가

혼입된 레디믹스트 숏크리트인 RM-P2 역시 40.1MPa 이라는 높은 강도를 보여 플라이 애쉬 혼입시 장기적으로는 일반 레디믹스트 숏크리트에 비해 더욱 안정적이고 경제성 있는 레디믹스트 숏크리트 제품을 만들 수 있을 것으로 판단된다.

이동식 사일로를 이용해 레디믹스트 숏크리트를 운반해 직접 현장타설을 실시한 배합은 현장골재를 사용한 배합 보다도 초기강도, 재령 28일 강도 모두에서 작게 나타났다. 이는 사일로를 이용한 레디믹스트 배합의 운반시 약간의 재료 분리가 발생되어 숏크리트의 강도가 제대로 발현되지 않은 것으로 판단되지만 초기 및 장기 강도 모두 숏크리트 강도 기준 이상으로 측정되어 현장 적용에는 문제가 없을 것으로 생각된다.

표 3.6.64 4차 현장타설 실험 배합의 압축강도

재령 / 배합명	압축강도 (MPa) 공시체 평균			
	1일	3일	7일	28일
1(RM-P1)	19.9	25.7	32.50	42.5
2(RM-P2)	17.9	24.5	33.70	40.1
3(RM-BFS3)	15.9	25.1	30.80	39.6
4(RM-BFS4)	18.2	25.9	33.00	45.2
5(울산터널)	13.0	19.5	24.10	33.6
6(삼척광산)	13.4	18.6	24.70	32.4
7(사일로)	11.3	14.1	19.50	27.9

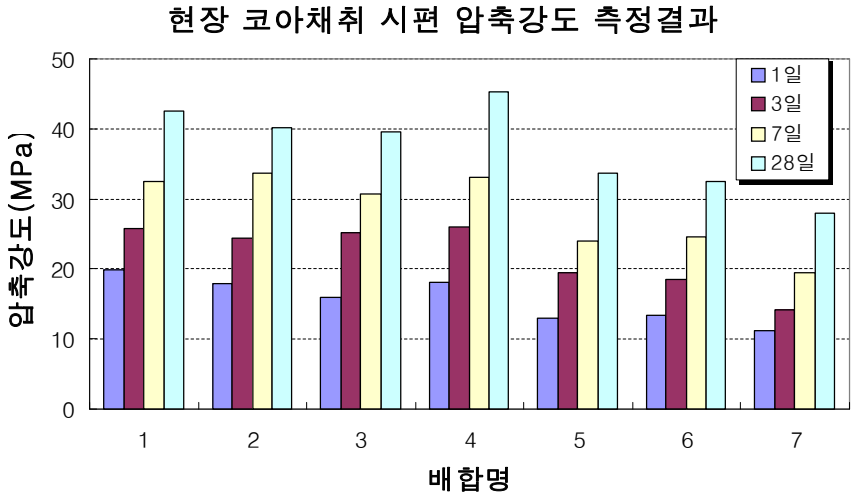


그림 3.6.46 4차 현장타설 실험 배합의 압축강도

(나) 휨강도 및 휨인성

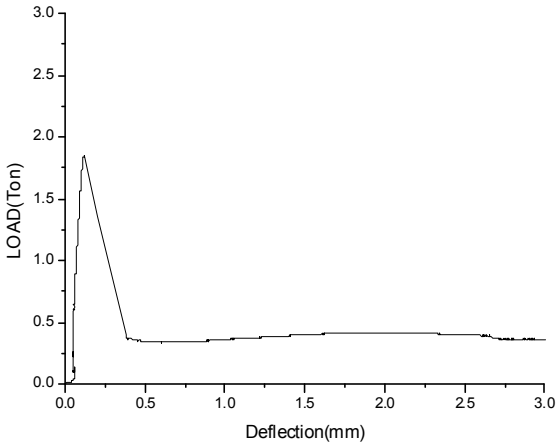
4차 현장타설 실험에서는 HP-L 합성섬유 혼입량을 6kg/m^{3}로 증가시켜 강섬유 대체 합성섬유로서의 적용성 평가를 위해 휨강도 및 휨인성 시험을 수행하였다.

휨 강도 시험 결과 일반 레디믹스트 숏크리트인 RM-P1과 플라이 애쉬 혼입 레디믹스트 숏크리트인 RM-P2, 고로슬래그 혼입 숏크리트인 RM-BFS3 및 RM-BFS4 모두 4.5MPa을 초과하여 품질 기준을 만족하는 것으로 나타났으며 현장 배합 숏크리트 중 울산 터널골재 배합은 휨강도 기준을 만족하였다. 그러나 이동식 사일로를 이용해서 현장타설이 이루어진 Plain 레디 믹스트 숏크리트 배합은 휨강도가 가장 작게 발현되었으며 강도 기준에도 미치지 못하였다. 이는 사일로 이동시 재료 분리에 의한 강도 저하 때문인 것으로 생각된다.

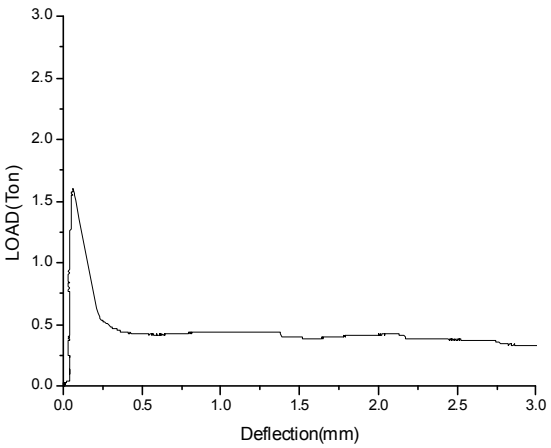
휨인성 시험 결과 강섬유가 혼입된 삼척 광산골재를 사용한 배합이 가장 큰 등가 휨강도를 보였지만 모든 배합이 등가 휨강도 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. HP-L 합성섬유가 혼입된 배합에서의 등가 휨강도는 강섬유 혼입 배합에 비해서도 월등히 낮은 휨인성 특성을 보였으며 이는 합성섬유 자체의 물리적인 원인이라기 보다는 현장 타설시 장비의 문제로 합성섬유의 타설이 제대로 이루어 지지 않기 때문이라과 생각된다. 따라서 강섬유 대체 재료로서 적용성을 위해서는 합성섬유의 혼입량을 더 증가시켜야 할것으로 판단된다.

표 3.6.65 4차 현장타설 실험 배합의 휨강도, 등가 휨강도, 휨인성지수

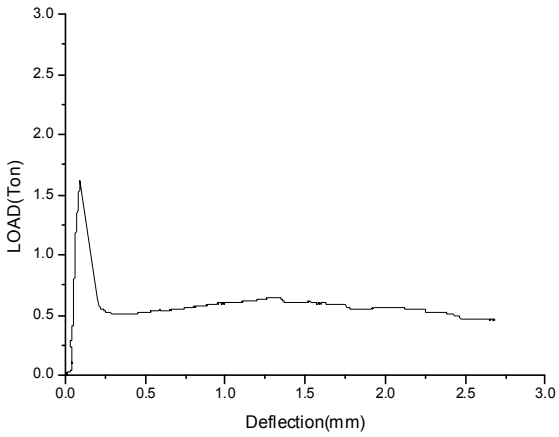
재령 / 배합명	휨인성 (MPa) 공시체 평균				
	휨강도 MPa	등가휨강도 %	휨인성지수		
			I_5	I_{10}	I_{20}
1(RM-P1)	5.45	26.77	4.29	5.37	7.76
2(RM-P2)	4.73	30.10	5.68	8.33	12.37
3(RM-BFS3)	4.76	37.48	3.93	6.03	10.51
4(RM-BFS4)	5.55	33.41	6.66	10.25	14.63
5(울산터널)	4.85	44.86	4.50	7.90	13.28
6(삼척광산)	4.39	60.34	2.43	6.50	13.63
7(사일로)	4.26	46.44	3.67	5.96	10.72



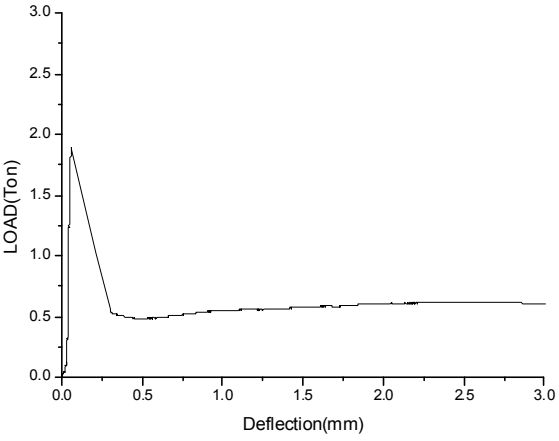
(a) RM-P1 배합



(b) RM-P2 배합

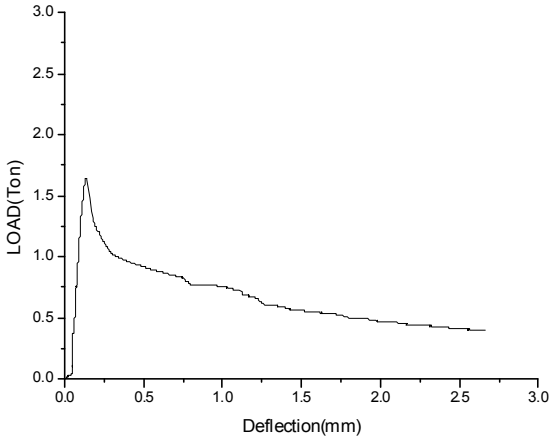


(c) RM-BFS3 배합

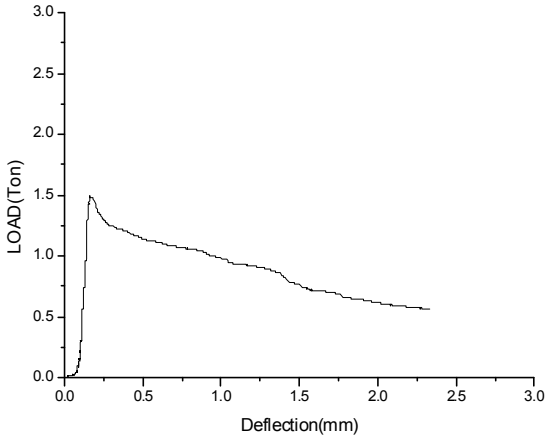


(d) RM-BFS4 배합

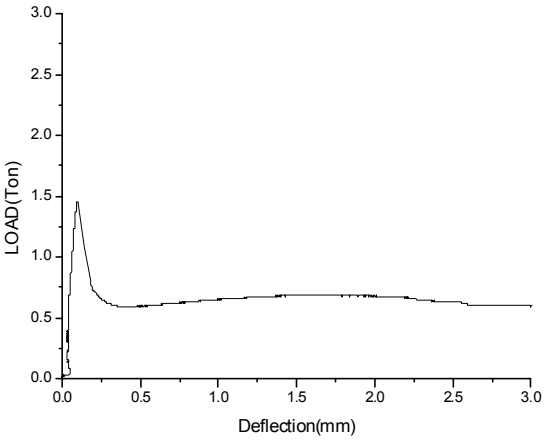
그림 3.6.47 4차 현장타설 실험 배합의 하중-처짐 그래프



(e) 현장배합(울산터널)



(f) 현장배합(삼척광산)



(g) 사일로 배합

그림 3.6.47 4차 현장타설 실험 배합의 하중-처짐 그래프(계속)

7. 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 최적 배합 도출

본 절에서는 산업 부산물로 생성되는 고로슬래그 미분말을 활용한 레디믹스트 숏크리트 개발 연구를 수행하였다. 산업부산물 분말형 레디믹스트 숏크리트에 고로슬래그 미분말을 혼입하는 이유는 산업부산물을 재활용하여 경제성을 향상시키려는 목적과 함께, 숏크리트의 워커빌리티를 개선하고 지하수에 노출되는 숏크리트 재료에 염화물 침투 저항성 및 내화학성 등을 향상시키려는 다양한 목적 때문이다.

본 연구에서는 기존 숏크리트 배합과 비교하여 경제성 및 품질을 모두 만족 할 수 있는 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 최적 표준 배합을 도출하기 위하여 고로슬래그의 물리·화학적 특성을 파악하고 고로슬래그 치환률에 따른 배합의 실내타설 시험 및 현장타설 시험을 수행하였다.

상기와 같은 실내시험 및 현장 적용성 평가를 통해 고로슬래그 치환율은 시멘트 대비 30% 치환이 가장 적당한 것으로 판단되며, 분말도에 의한 초기강도 보상효과는 미비한 것으로 나타났다. 또한 알칼리 활성화제에 의한 초기강도 보상도 효과적이었으나, 레디믹스트 숏크리트 생산 시스템의 개선 및 골재 입도 조정을 통해 초기강도 상승의 효과를 충분히 발휘할 수 있었다. 따라서 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 최적배합은 현장타설의 결과를 바탕으로 아래와 같이 도출하였다.

표 3.6.66 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 최적 배합

Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재 (kg)				고로슬래그 미분말 (kg)	합성섬유 (kg/m3)
					S1	S2	S3	S4		
8	12	45.6	212	325	560	347	332	347	140	12

8. 소결론

본 절에서는 산업 부산물로 생성되는 고로슬래그 미분말을 활용한 레디믹스트 숏크리트 개발 연구를 수행하였다. 먼저 국내·외 고로슬래그의 재활용 상황을 파악하고 성능평가를 실시해 고로슬래그의 치환율을 도출하였고 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 양생특성 파악을 위한 실내실험 및 현장적용성 평가를 실시하여 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 최적배합을 도출하였다. 본 절에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 고로슬래그 미분말은 고로방식의 선철공정에서 선철의 부산물로 생성되는 산업 부산물로서 발생량의 2/3이 시멘트용, 1/5가 도로용으로 사용되고 있다. 2002년의 경우 고로슬래그는 재활용율이 82%에 달하며 국내 고로슬래그의 재활용 기술은 선진국과 큰 차이가 없다. 용광로 대체 기술인 파이넥스 공법으로 인해 고로슬래그의 원재료비 상승 및 시공에 문제가 생길 것이라는 업계의 소수 의견이 제시되었지만 슬래그는 고로슬래그 외에 전기로에서 생산이 되는 제강 슬래그 및 그 외의 슬래그도 사용 되어 질 수 있다고 판단되며, 현재 제강 슬래그의에 대한 활발한 연구가 수행 되고 있어 국내 슬래그 산업 및 건설업계에 미칠 영향은 크지 않을 것으로 생각 된다.

(2) 고로슬래그 분말도에 따른 강도발현 시험결과 고로슬래그 분말도가 커질수록 초기강도의 발현이 우수함을 알 수 있었다. 특히 1종의 고로슬래그를 사용하였을 시 우수한 초기강도 발현 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 경제성의 문제가 있어 알칼리 프리계 급결제를 투입한 3종 고로슬래그 분말을 혼입시 치환율 30%에서 가장 적정한 초기강도 및 장기 강도 특성을 얻을 수 있었다.

(3) 알루미네이트계 급결제를 적용한 저강도의 숏크리트에서는 고로슬래그를 치환한 배합이 실리카 흄을 치환한 배합의 약 74~81% 정도 수준의 강도 발현을 나타냈지만, 알칼리 프리계 급결제를 적용한 고강도의 숏크리트에서는 고로슬래그를 치환한 배합의 강도 발현이 실리카 흄을 치환한 배합과 유사하거나 4% 정도 더 크게 나타났다.

(4) 고로슬래그 시편의 SEM 촬영 결과 경화 초기에는 수화생성물의 크기가 감소하고 고른 분포를 나타내며 경화 후기에는 보다 치밀한 구조를 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 초기 수화생성물의 크기가 작고 균일하여 지속적으로 C-S-H겔이 생성되어 공극을 채우고, 다른 수화상과 결합하며 미반응의 슬래그 골재 등과 강하게 엉겨 붙어 치밀해 지기 때문으로 사료되며 따라서 고로슬래그 혼입 숏크리트의 경우 장기 강도 특성이 일반 숏크리트에 비해 더 우수 할 것으로 판단된다. 또한 고로슬래그 숏크리트의 용출시험 결과 Pb, Cu, Cd 등 전 항목에 대해 유해성분이 검출이 되지 않았다. 따라서 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트는 환경적으로도 안전 할 것으로 판단된다.

(5) 현장타설 실험을 통해 알칼리 활성화제 혼입시 3종 고로슬래그 미분말의 적용성을 확인 할 수 있었고 고로슬래그 미분말 레디믹스트 숏크리트에 플라이 애쉬를 첨가 한 배합의 강도결과 초기 및 장기 재령 강도에서 일반 레디믹스트 숏크리트 보다 우수하고 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트와 거의 비슷한 정도의 강도를 보임을 알 수 있었고 플라이 애쉬 혼입 레디믹스트 숏크리트의 적용성도 확인 할 수 있었다.

(6) 이동식 사일로를 이용해 레디믹스트 숏크리트를 현장에 타설한 결과 현장골재를 사용한 배합 보다도 초기강도, 재령 28일 강도 모두에서 작게 나타났다. 이는 사일로를 이용한 레디믹스트 배합의 운반시 재료 분리가 발생되어 숏크리트의 강도가 제대로 발현되지 않은 것으로 판단된다.

(7) 실내실험 및 현장실험을 통해 본 절에서 도출한 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 최적 표준배합은 다음과 같다.

표 3.6.67 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 최적 배합

Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재 (kg)				고로슬래그 미분말 (kg)	합성섬유 (kg/m3)
					S1	S2	S3	S4		
8	12	45.6	212	325	560	347	332	347	140	12

제 7 절 다기능 레디믹스트 숏크리트 개발

다기능 레디믹스트 숏크리트란 분말형 레디믹스트 숏크리트의 특성화된 제품으로서 현장상황(파쇄대 출현, 지하수 유입량 과다, 보강효과 증진 필요 등)에 따라 효과적인 대응이 가능하도록 사전에 공장배합을 통해 다양한 기능을 가지도록 제품화된 숏크리트를 말한다. 실제 터널 현장에서는 일반적으로 최초 설계된 숏크리트 배합을 공사가 완료될 때까지 일괄적으로 적용하고 있는데, 이러한 경우 설계 단계에서 전혀 예상치 못한 문제들이 발생할 때 능동적으로 대처하지 못하는 상황이 발생된다. 다기능 레디믹스트 숏크리트는 현장에서 발생될 수 있는 다양한 상황에 대한 사전 공장배합으로 고품질 및 소규모로 생산이 가능하기 때문에, 필요한 상황에 맞게 주문하여 사용이 가능하다. 또한, 설계된 숏크리트 배합이 제 기능을 담당하지 못하여 설계 변경으로 인한 공사비 증대, 공사기간 연장 등의 문제가 발생할 경우에도, 공장배합 제품인 다기능 레디믹스트 숏크리트를 이용하게 되면 경제성 절감 및 시공성 향상의 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

본 절에서는 최적화 된 다기능 레디믹스트 숏크리트의 개발을 위한 연구를 수행하였다. 먼저 국내·외 터널 현장의 시공 현황을 파악하고 터널 막장의 붕락 유형을 분석하여 다기능 레디믹스트 숏크리트의 여러 가지 기능성 중에서 고차수성과 고강도를 주요 기능 인자로 채택하여 개발 방향을 결정하였다.

그리고 실내 실험을 통해 다기능 재유화형 분말수지를 혼입한 고차수, 고강도 레디믹스트 숏크리트의 적용성 평가를 수행하였다.

또한 실내 실험 결과를 토대로 다기능 레디믹스트 숏크리트의 배합을 도출하여 3차에 걸쳐 실제 광산 및 터널 현장에 타설 실험을 실시하여 다기능 레디믹스트 숏크리트의 현장 발현 특성을 파악하고 최적화된 다기능 레디믹스트 숏크리트 배합을 도출하기 위한 연구를 수행하였다.

1. 레디믹스트 숏크리트 다기능 인자 부여

가. 국내 터널 현장의 시공 현황 파악

(1) 터널의 설계 및 시공 현황

터널의 설계에는 불확실한 요소가 많이 내재되어 있기 때문에 설계단계에서 많은 가정 사항을 도입하고 있다. 더욱이 터널은 단면에 비해 길이가 매우 긴 기하학적 특성을 갖고 있으며 다양한 지반의 영향을 받기 때문에 터널의 전구간에 걸친 세부적인 조사, 해석, 설계 기술 등에는 많은 제약조건들에 부딪치게 된다. 이러한 이유로 터널 구조물의 설계는 다른 구조물의 설계에 비해 예비설계 개념이 매우 강할 수밖에 없다. 현재 국내의 많은 기술자들도 터널의 설계를 예비설계 개념으로 이해하고 있으며, 설계서 자체도 획일적인 패턴화, 형식화로 되어가고 있는 것이 국내 터널설계의 현실이다.

특히, 터널의 거동을 예측하기 위한 터널의 해석에 있어서는 지반조건을 포함한 해석조건 등의 확실성으로 설계단계 해석과 시공 중의 실제 터널의 거동은 일치하지 않는 것이 대부분이다. 따라서 일반적으로 시공단계에서의 계측이나 시공자료의 분석으로부터 터널의 안정성을 평가하고 있다. 그림 3.7.1은 터널의 설계 및 시공에 관한 일반적인 흐름을 나타내고 있다.

터널설계 단계에서는 사전조사 및 각종 시험결과를 기준으로 지질조건을 파악하고 유사한 지반조건에서 시공사례 및 설계표준안 등을 검토하여 터널의 단면형상, 토피, 지반의 공학적 특성을 토대로 굴착방법, 지보패턴을 설정한다. 그리고 기본단면에 대한 안정성 해석을 통해 시공 중 또는 완성 후 터널과 지반의 안정성을 평가하고, 시공 중의 지보재 응력, 변형 등을 파악하여 예비 시공 관리치를 설정하며 사전설계로서의 표준지보패턴 및 굴착공법에 대한 설계 표준단면을 결정한다.

그러나 설계단계에서의 안정성 해석은 사전조사에서 얻은 지반의 공학적 특성이 대상지역의 지반을 대표할 수 없으므로 지반의 거동 및 지보효과 등을 정확히 파악하는 것은 힘들다. 따라서 설계단계에서는 주로 주변지반의 거동 및 터널의 거동 경향을 파악하는데 불과하므로 시공단계에서 사전설계에 따라 시공을 진행하면서

시공 도중에 직접 지반의 거동, 지보의 보강효과 등을 계측하고 그 결과를 설계치 및 시공 관리치와 비교하여야 한다. 그리고 불안정한 상태로 판단되면 즉시 적절한 보강조치를 시행하는 동시에 추가 지반조사나 설계 계산에 쓰이는 여러 가지 공학적 특성들에 대한 재검토와 현상분석에 따라 사전설계를 변경하여, 지보패턴 및 굴착공법을 수정함으로써 안전하고 경제적인 터널시공을 수행한다.

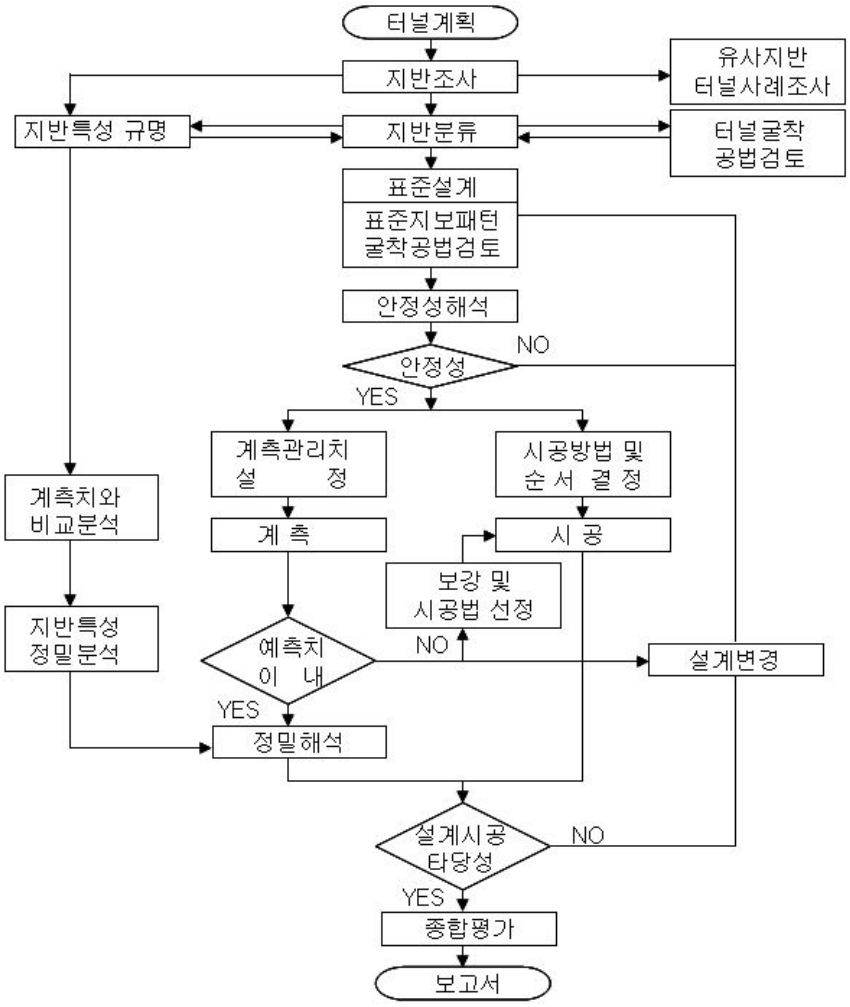


그림 3.7.1 터널 설계 및 시공 흐름도

결과적으로 터널의 설계 및 시공은 예비설계단계에서 표준지보패턴 및 굴착공법에 대한 설계 표준단면을 결정하고, 시공단계에서 피드백(feedback)한 결과를 토대로 계측결과와 수치 해석치 등을 비교 검토하여 실시설계 및 시공의 지침자료로 이용할 수 있는 평가단계를 거치게 된다.

(2) 터널 설계 및 시공의 문제점

국내 터널 설계 및 시공에 있어서 자주 발생되고 있는 문제점들을 조사하기 위해 중앙부처 및 각 지방자치단체 등 공공기관의 건설기술 심의자료, 각계의 터널안전점검 및 안전진단 보고서, 터널관련 시방서 및 지침 등을 기초로 하였다.

(가) 지반조사 및 시험

터널설계를 위한 지반물성치 산정을 위해 많이 실시하는 실내 실험항목으로는 기본물성실험, 일축압축강도실험, 압열인장강도실험, 삼축압축강도실험 등이 있으며, 여기서 삼축압축강도실험은 실험이 어려운 반면 그 자료의 활용도가 미비하고, 또한 대부분의 보고서 상에는 1개의 구속압력(Confining Pressure) 조건에서만 시험을 실시하고 있어 형식적이지만 필수항목 사항으로 인식되고 있다. 또한, 국내 터널설계를 위한 "지반조사 보고서"에 제시된 실내시험 결과를 보면 단지 1개 시험시편에 대한 실내시험을 실시하여 결과에 대한 신뢰도를 저하시키는 경우가 많이 있다.

국외의 경우에는 현장 암반의 특성과 시공구조물의 용도 등을 충분히 고려하여 시험항목을 선별, 수행하고 있으나, 국내에서는 여러 가지 지반조건에서도 일정한 항목을 적용하여 획일적인 시험을 실시하고 있다.

현재 국내 터널굴착을 위한 지반조사 항목은 크게 현지 지표 지질조사 및 물리탐사, 시추조사 등이 있으며, 도심지역에서는 지표 지질조사 그리고 산악지역에서는 시추조사에 한계가 있다. 시추조사의 경우, 지표 노두조사 자료, 수집한 인접구간의 지반조사 자료, 현장지형의 특성, 시공구조물의 용도, 지장물의 종류 및 분포상태 등을 종합적으로 분석하여 시추위치를 선정해야 하고 필요시에는 경사시추와 대심도시추도 수행해야 한다. 하지만 대부분의 국내터널 현장에서는 시추를 개략적인 등간격으로 실시하거나, 산악터널의 갱구부 주변에서는 터널단면의 -2~-5m 이상까지 시추해야 하지만 터널단면 상부의 얕은 심도에 대하여 수직시추만을 실시하고 있는 경우가 많다. 그리고 시추조사 이외의 보완조사, 즉 지표탄성파 탐사, 항공사진촬영, 지오토모그래피 등의 탐사기법의 폭넓은 적용이 필요하지만 국내의 경우 탐사기술 및 장비가 일반화되어 있지 못하여 그 활용도가 낮고, 또한 결과에 대한 신뢰도도 낮은 실정이다.

시추공을 활용한 지하수위 조사는 계절별 변화를 고려한 장기적인 측정이 요구되

지만 국내 지하수위 조사의 경우에는 단기간에 한하여 실시하므로, 배수시설 및 터널 라이닝의 수압을 고려한 유입량 산정에 신뢰도가 저하되고 있다.

지반조사에 소요되는 경비 측면에서는 외국의 경우엔 도로 및 철도터널을 기준으로 할 때 총 공사비의 0.5~2.0%를 지반 조사비로 집행하고 있으나, 국내의 경우는 지반조사의 중요성에 대한 인식 결여로 과소 책정되고 있는 것도 문제이다.

터널설계를 위하여 지표지질 조사, 시추코어 조사 및 실내시험을 실시하고 있으나 터널 지보패턴을 결정하기 위한 RMR 및 Q 값의 산정은 막장면의 지질조사에 의해 분류되므로, 상기 조사 및 시험에 의한 암반분류는 가정치를 사용할 수밖에 없어 신뢰성이 결여된다. 특히, RMR 분류를 제안한 Bieniawski는 입력자료가 충분하지 않을 경우 RMR 분류법을 사용하지 않아야 하고, 현장 적용시 최소한 2개 이상의 암반분류방법을 적용하여 그 결과를 상호 비교·검토하도록 추천하고 있으나 최근까지 국내에서는 단순히 RMR 분류법에만 의존하여 사용하고 있는 것도 문제점이라고 할 수 있다.

터널은 단면에 비해 길이가 매우 긴 구조물로 조사영역이 넓어지며, 지반조사도 지형조건에 따라서 큰 제약을 받게 되므로 시공 전에 지반조사를 완벽하게 수행하는 것이 매우 어렵다. 따라서 시공중 지반조사가 필히 요구되지만 국내에서는 일부 공사구간에 한하여 시공중 지반조사를 실시한 사례가 있을 뿐, 대부분의 현장에서는 시공중 지반조사가 이루어지지 않고 있다. 또한, 국내 대부분의 설계회사에서는 설계와 지반조사가 구분되어 있어 연계성이 부족하며, 조사·시험·계측의 결과에 대한 종합적인 분석능력을 보유한 전문기술인이 부족한 실정이다.

그리고 국내 "터널설계서" 중 많은 경우가 조사 및 시험결과를 단순히 나열하는 것에 불과하며, 실제 해석 및 설계에 적용되는 자료들은 현장조사와 시험결과로부터 얻은 자료가 아닌 국내에서 관행적으로 사용된 일반 물성치를 반영하고 있어 해석과 설계에 대한 신뢰성이 낮은게 현실이다.

(나) 터널 해석

수치해석을 위한 단면위치 선정시 현재 관행으로는 가장 열악한 단면을 기준 단면으로 선정하고 있어, 지반조건이 양호한 구간에 비하여 숏크리트 강도 및 락볼트 축력 등이 허용응력에 크게 미치지 못하므로 안전개념이 아닌 과대설계가 될 수 있다. 또한, 수치해석에 의한 해석영역산정에도 문제점들이 발견되고 있는데, 일반적으로 단일터널 보다는 병렬터널에서, 소단면 보다는 대단면에서 해석영역의 폭을 작게 잡아 해석하는 경향이 있다.

터널 해석시 적용하는 측압계수(ko)는 심도 및 지질구조 등에 의해 큰 차이를 보이므로 이를 결정함에 있어 현장조사 및 문헌조사의 수행이 선행되어야 한다. 국내 현장에서 실측한 사례로는 둔내터널 현장(1.8~2.5), 대구지하철 현장(1.5~2.0 ; 심도 -50m), 도시터널 시공구간(1.2~3.7)으로 지표부근에서 횡방향 압력이 크게 나타났다. 그러나 이와 같이 실측에 의한 적용사례를 제외하고 대부분의 국내 터널해석에 사용되는 측압계수는 일반적인 관행에 따른 값을 사용하고 있어 터널의 해석결과에 대한 신뢰성이 감소되고 있다.

국외의 경우에는 공동해석이나 주요 터널의 해석에 개별요소법(DEM)이 이미 일반화 되어 있으나, 국내에서는 아직까지 유한차분법(FEM)이나 유한요소법(FEM)에 의한 해석이 주로 행해지고 있다. 또한, 터널 및 지하공동에서의 지하수 흐름해석 및 지하수 유입량 해석의 경우, 국내에서는 연구 실적이 미흡하고 현장 적용성이 결여되어 외국기술에의 의존도가 높은 실정이다.

여러 종류의 터널 해석용 S/W가 실무에 활용되고 있지만 이들의 정확성에 대한 검증은 여전히 숙제로 남아있고, 또한 해석자 각각의 주관적인 결과를 유도하므로 해석을 위한 제반 기준의 선정이 요구되는 상황이다. 특히, 터널 수치해석에서 3차원적인 응력분포 가정을 위한 하중분담율이 해석결과에 미치는 영향뉀 영향뉀크지만, 하중분담율에 대한 합리적인 결정이 이루어지지 못하고 있어 해석자널 수치 분담율의 적용편차해석을 위크게 나타나고 있다. 숏크리트해석타설되지 않는 경우, 측벽도갱 선진공법이 적용되는 경우, 크기가 서로 다른 평행한 터널을 굴착할 경우 등에 관한 정립이 역시 부족한 상황이다.

(다) 터널 설계

터널내 확폭 단면, 비상주차대, 피난연결통로 등과 같은 단면 확대 및 터널교차부의 상세단면 설계와 굴착 및 지보방법 등에 관하여 그 중요성이 인식되지 못하여 설계가 누락되는 경우가 많다. 또한 도로터널의 경우, 병설터널 설계시 Pillar의 두께, 보강방법, 1차 굴착터널의 선정기준 등의 상세한 설계가 누락되는 경우가 많다. 그리고 터널의 분기 및 교차부에서의 응력 및 보강 범위에 대한 국내 연구 실적이 미흡하여 일반적으로 적용되고 있는 획일적인 방법을 답습함으로써 비경제적인 설계가 이루어지고 있다.

지반조건이 불량하고 온도변화, 응력집중, 편토압 등이 고려되는 터널 갱구부에 관한 보강법과 도면설계 등이 대부분 누락되어 있으며, 설계를 한 경우에도 보강구간을 짧게 하여 현장에서 라이닝의 균열문제가 대두되는 경우가 많이 발생하고 있다.

국내 TBM 터널설계서에는 TBM의 특성을 고려한 지보설계가 정립되지 못하여 단지 RMR 값을 20% 상향 조정한다고 되어 있어, 터널의 크기, 지반의 상태, 굴진조건 등을 고려한 적정지보 설계가 미비한 상황이다. 그리고 포어폴링 공법, 파이프루프 공법, 강관다단 그라우팅 공법 등 대부분의 보조공법들이 설계과정 없이 터널 시공시에 경험적으로 적용되고 있어 보조공법에 관한 설계방법이 요구된다.

나. 터널 막장의 시공 상황 조사

(1) 터널붕락 유형 분석

종래의 ASSM 터널공법의 지보개념은 발생되는 상재하중에 대해서 이를 지지할 수 있는 강성의 지보를 설계 및 시공하는데 주안점을 두었다. 그러나 지보에 작용하는 상재하중은 지반조건이나 암반의 물성에 의해서 결정될 뿐만 아니라 시공되는 지보재의 물성에 의해서도 변화하는데, 이러한 지보특성은 지보재료의 강성, 강도를 비롯하여 지보의 형상, 설치시기, 암반의 밀착정도 등에도 큰 영향을 받는다. 특히, NATM 개념의 터널공법에 있어서 가장 기본적인 요구사항은 굴착면에서 록볼트나 숏크리트 같은 지보재를 적용하는데 충분한 시간동안 터널을 지탱할 수 있는 지반의 잠재력인데, 굴착으로 인하여 터널 주변 지반의 이완형태 뿐만 아니라 높은 원

지반 응력에 기인한 막장주변에서 일어나는 Spalling과 암반 Popping과 같은 현상이 터널 붕락시 일어난다.

터널 공정과 위치에 따라 붕락형태는 상이하게 일어나는데, 굴착위치 및 굴착단계에 따라 크게 3개소로 나눌 수 있다. 발파직후 무지보 상태에서 터널 막장 붕락, 1차 숏크리트 타설 후 발생하는 붕락, 마지막으로 터널 라이닝 타설 후인 링 폐합 후 발생하는 붕락으로 나눌 수 있다(건기연, 1999).

다기능 레디믹스트 숏크리트의 기능과 관련된 붕락은 무지보 상태에서의 붕락과 1차 숏크리트 타설 후의 붕락이므로, 본 절에서는 발파직후 무지보 상태에서 발생하는 터널붕락형태 및 붕락규모에 대한 이해를 통해 다기능 레디믹스트 숏크리트의 개발 방향을 설정하고자 한다. 따라서, 굴착 후 터널 안정성 향상을 극대화할 수 있는 숏크리트의 다기능 인자를 결정하기 위해 터널붕락 형태 및 원인에 대하여 분석하고 국내외 터널붕락 사례를 수집하여 지반조건에 다른 터널붕락 원인, 형태, 규모 등을 분석하였다.

(가) 발파직후 무지보 터널 막장에서의 붕락

발파직후 무지보 상태에서 일어나는 터널붕락에 대해서 파괴 형태를 위치 및 지반조건별로 구분하여 그 원인에 대해서 다음과 같이 분류하였는데, 그림 3.7.2는 터널붕락 형태별 모식도를 나타낸 것이다.

1) 벤치파괴(Bench failure)

벤치(Bench)부분에서 상반 굴착후 터널 시공중 형상의 구조적인 결함에 의한 파괴형태이다(그림 3.7.2 (a)).

2) 천정부 파괴(Crown failure)

천정부 파괴는 발파 후 진동에 의해 형성된 절리군이나 혹은 자연적으로 존재하는 절리군에 의해 쐐기형으로 붕락이 발생하는 형태이다. 천정부에 인위적으로 형성된 절리군 혹은 자연적으로 존재하던 절리군이 굴착으로 인해 터널주변 응력의 재배치와 중력 하에서 개별암 블록의 미끄럼짐(Slip)과 회전(Rotate)에 의해 천정부에서 일어나는 파괴이다. 암반의 이완으로 인한 지반이완(Loosening instability)현상은 불연속면의 경사가 굴진 방향 후면으로 발달된 경우, 발파 후 빠른 시간내 지보

재경사가(Rotat파괴를 최소화시킬 수 있다. 또한 쐐기형 파괴형태는 측벽 또는 막장 전면에서도 천정부 파괴와 동일한 메커니즘으로 일어나기도 한다(그림 3.7.2 (b)).

3) 전막장 파괴(Full face failure)

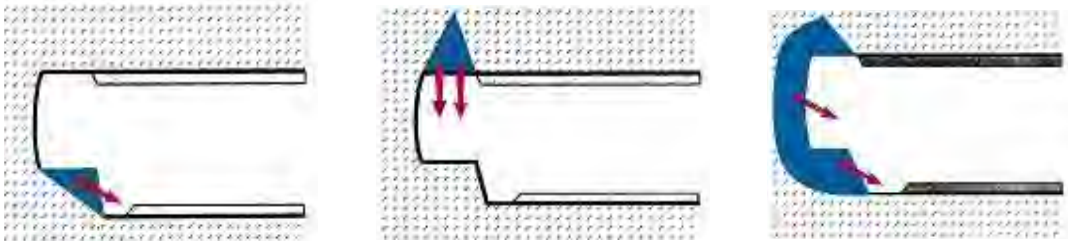
터널 막장 주변 전체 지반조건이 연약지층으로 형성이 되어 있는 경우, 굴착으로 인하여 시간이 지남에 따라 주변지층의 자립력이 파괴강도를 넘어 막장면 전체에서 붕락이 일어나는 진행성 파괴형태가 발생하는데, 특히 지하수가 유출할 경우는 자립력을 약화시켜 가장 일반적이고 많은 터널 붕락사고를 일으킨다. 점토층을 포함한 연약대의 안정성은 자립시간(Stand-up time)으로 안전성이 평가되는데 점토지반에서 균열의 발생은 막장면에서 "Greasy-back" 으로 불리는 커다란 점토괴를 형성하여 붕락을 일으킨다(그림 3.7.2 (c)). 점토괴의 크기는 막장면과 크랙의 방향에 의해서 결정된다. 이러한 자립도를 증가시키기 위해 그라우팅 주입공법, 파이프루프(Pipe Roof)공법, 그라운드 프리징(Ground Freezing)과 같은 지반보강 방법으로 막장면 자립시간을 증가시킬 수 있다.

4) 연약대 파괴(Weakness strata failure)

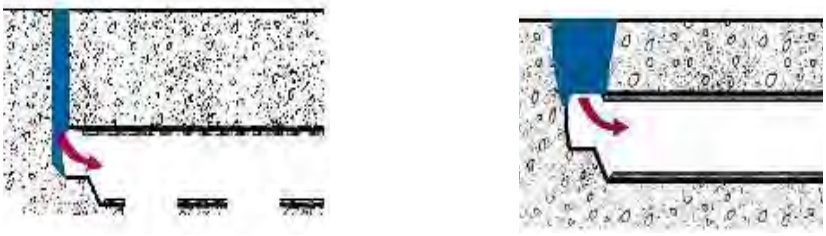
수밀리에서 수미터 두께의 연약대가 막장의 굴진 방향에 대해서 수직 또는 30~40° 이상의 경사로 발달된 지반조건에서는 연약대를 따라 슬라이딩 파괴(Sliding failure)가 발생한다. 국내 지반 특성은 과거 많은 지각변동의 영향을 받아 부분적으로 지층의 교란이 심하여 습곡과 단층이 많이 존재하는데 이러한 구조적 불연속면을 따라 원지반 응력이 불연속면의 전단강도를 벗어나면 파쇄대를 따라 거대한 전단파괴가 일어난다. 이때 충진물질의 물리적 특성과 불연속면과 모암사이의 전단특성에 따라 진행성 파괴(Progressive failure) 또는 일시적 파괴(Abrupt failure)가 일어난다(그림 3.7.2 (d)).

5) 표토층 붕락

터널직경에 비해 표토층이 너무 얇아 발파진동 등에 기인하여 터널 막장 표토층의 함몰이 일어나는 붕락형태로 도심지 지하철 굴착시 가장 일반적인 붕락패턴을 보여준다. 특히, 도심지 굴착시 표토층 붕락으로 인해 지상구조물을 포함한 인접구조물에 막대한 피해를 초래한다(그림 3.7.2 (e)).



(a) 벤치 붕락　　(b) 천정부 붕락　　(c)전막장 붕락



(d) 연약대 파괴　　(e) 표토층 붕락

그림 3.7.2 터널붕락 형태별 모식도

(나) 숏크리트 타설후 붕락

터널 굴착후 무지보 구간에서는 점진적인 지반거동을 막기 위해 봉합효과가 있는 숏크리트를 타설하게 되는데, 이때 강도를 가지기 위해서는 일정한 시간이 필요하다. 굴착후 많은 시간이 지나고 나서 숏크리트를 타설 할 경우에는, 숏크리트가 경화되지 못한 상태에서 주변 지반의 거동으로 1차 주지보재가 한계강도에 도달하여 크리프 파괴(Creep failure)형태로 터널붕락을 발생시킨다. 강지보재를 설치하고 숏크리트 타설 하는 경우에는 전방 굴진 속도 조절로 구간의 안정성을 확보 할 수 있다. 1차 숏크리트 타설 후의 붕락 형태를 분류하면 상반 굴착 후 주변 지반의 지지력 부족에 의한 침하로 상반 인버트 하부의 침하 또는 상반 인버트에서의 전단파괴, 터널 측압으로 인한 바닥면의 부풀림 현상, 터널 측벽부 라이닝에서 측압에 의한 붕락 형태 등으로 나눌 수 있다.

1차 숏크리트 타설 후 발생하는 붕락의 원인은 너무 연약한 상태의 막장 지반을 무지보 상태에서 적절한 보강 시기를 지나쳤거나, 측압이나 국부적인 Overstressing 등을 고려하지 못한 숏크리트 두께 설계 때문에 발생되는데 지하수 유출도 큰 요인으로 뽑을 수 있다. 특히 지반거동과 지하수 흐름이 급격히 변하는 구간에서는 그라우팅 주입 등 지수처리로 숏크리트 강도 저하를 막는 조치를 해야 한다. 그림 3.7.3은 크리프 형태의 터널붕락을 나타낸 것이다.

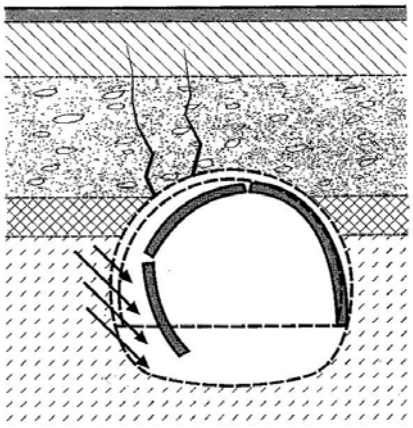


그림 3.7.3 크리프 형태의 터널붕락

(다) 기타 터널붕락 원인

1) 라이닝 폐합구간에서의 붕락

일반적으로 터널붕락이 가장 적게 일어나는 구간으로서 모든 지보재 설치 후 붕락이 발생되는데, 이는 터널 설계 오류 등으로 터널 구조적인 문제로 인해 일어나는 경우와 터널 시공 품질관리 부실과 시공 후 유지관리 소홀로 일어나는 경우로 나눌 수 있다.

2) 불규칙한 지반구조적 원인

대부분의 터널붕락을 일으키는 불규칙한 지반구조는 과거 지반구조의 침식 또는 대규모 지반운동 등 지반구조의 급속한 변화에 기인한 것이다. 터널 시공 전에 면밀한 사전 지반조사와 선진 보링 등으로 정확한 지반구조를 파악한다면 이로 인한 터널붕락은 최소화시킬 수 있다. 하지만 현실적으로 충분한 지반조사비가 책정되어 있지 않을 뿐만 아니라 사전 지반조사에 대한 인식이 부족한 상태도 터널붕락의 한 원인이 되고 있다.

3) 기획과 설계단계에서의 오류

충분치 못한 지반조사에 의한 설계 및 부적절한 시공자재 사용 등으로 터널붕락이 발생될 수 있다. 특히 터널 예정 지역의 지반조건과 주변 조건에 적합한 터널 굴착 및 보강공법 선정 등이 터널 기획 및 설계단계에서 검토되어야 할 가장 중요한 항목 중의 하나이다.

4) 시공 및 관리에서의 오류

경험이 부족한 터널기술자의 현장 감독과 현장에서 수집되는 각종 계측자료의 신뢰성 부족과 시공에 재적용 부족으로 효율적인 정보화 시공이 이루어지지 못하고 있어 터널 붕락의 한 요인으로 작용하고 있다.

(2) 국내외 터널붕락 사례조사 및 분석

(가) 국외터널

본 연구에 사용된 국외터널 붕락 자료는 1960년대 노르웨이, 스웨덴 등 북유럽을 중심으로 조사된 총 연장 67km의 터널내 지반조사 결과를 바탕으로 하였다(Cecil, 1964). 국외터널 붕락 자료는 굴착시 막장면 거동과 주변 지반의 조건 및 지보재 설치 내용을 위주로 조사되었으며, 다기능 레디믹스트 숏크리트의 기능성을 평가하고 터널 안정성에 영향을 미치는 숏크리트의 다기능 인자를 설정하기 위해 붕락 및 과대여굴이 발생된 84개 현장을 중심으로 터널막장 주변의 지반공학적 요소들과 터널 붕락 유형별로 분석하였다. 본 절에서는 주로 터널붕락이 발생한 현장의 지반조건에 대하여 중점적으로 분석하였다.

자료가 수집된 스웨덴, 노르웨이 지반은 선캠브리아기의 발틱순상지가 분포하며 오랜 지질시대를 거치면서 몇 차례 조산운동으로 습곡과 단층이 발달되어 있다. 그리고 순상지를 구성하고 있는 암반들은 편암류 및 편마암류와 변성퇴적암 및 화성암이 주종을 이루고 있다. 국외터널 자료가 수집될 때의 지반조사 분류기준은 현재 사용되고 있는 지반 분류기준과는 많이 상이하며 본 자료에서 적용되었던 지반조사 분류기준은 표 3.7.1에 나타내었다.

표 3.7.1 국외터널 조사 자료에 적용되었던 지반조사 분류(Cecil, 1964)

지반조사 항목	분류기준	지반조사 항목	분류기준
Intact rock strength	sound	Discontinuity tightness	Tight
	altered or weathered		Open
rock mass structure	massive	Average discontinuity spacing	less than 5cm
	one set		
	two set		5cm~30cm
	three set		30cm~1m
	random, crushed, earthlike		1m~3m
			greater than 3m
Joint continuity	continuous	Discontinuity type	joint
	discontinuous		bedding plane
			cleavage
			fault
Discontinuity filling or coating	none	Degree of discontinuity planess	plane
	non-softening clay		
	softening clay		
	other low friction material		curved
	sandy or gravelly material		irregular
	alteration along joint	Degree of discontinuity roughness	slickensided
			smooth
			rough
Dip of discontinuities	0~30°	Strike of discontinuities	0~30°
	30~60°		30~60°
	60~90°		60~90°

(나) 국외터널 붕락현황 분석

그림 3.7.4는 자료가 수집된 터널 종류에 대해 나타낸 것으로써 지하 양수발전소의 도수터널이 2/3이상을 차지하고 있었다. 그리고 그림 3.7.5는 터널이 위치한 지역의 암석 종류 분포를 나타낸 것인데 지역적 특성으로 인하여 심성암류와 변성암류가 대부분을 차지하고 있었다. 터널막장에서의 지하수 상태는 그림 3.7.6과 같이 No water에서 Large water사이의 분류범위에 균등하게 분포해 있었고, 그림 3.7.7의 터널 막장주변의 절리군 분포는 1~2 개의 주절리군과 불규칙절리가 발달하는 것으로 분석되었다.

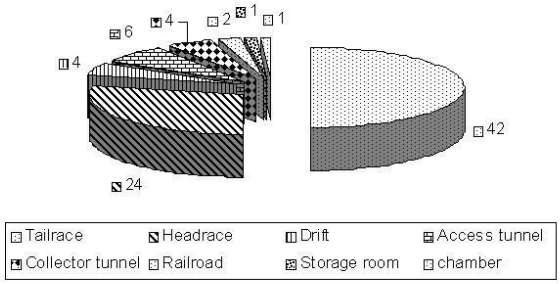


그림 3.7.4 터널종류

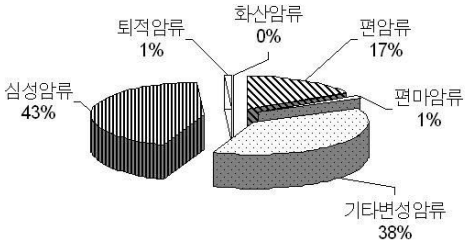


그림 3.7.5 터널지반의 암종 분류

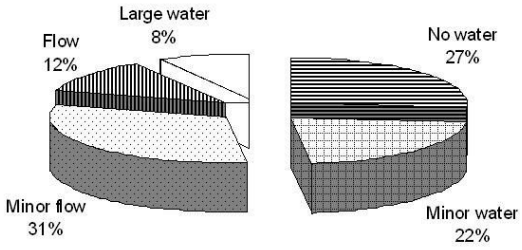


그림 3.7.6 터널막장의 지하수 유출 정도

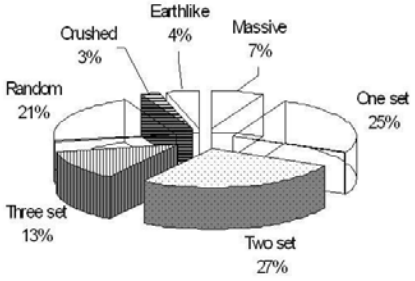


그림 3.7.7 터널막장의 절리군

그림 3.7.8은 인용된 자료의 RQD 값을 나타낸 것인데 50점 이상이 전체의 절반 이상을 차지하고 있으며, 그림 3.7.9는 터널의 심도를 나타낸 그림으로 50m 이상의 심도가 70% 이상을 차지하는데, 2/3이상이 지하양수 발전소 건설에 따른 도수터널이므로 심도가 깊게 분석되었다.

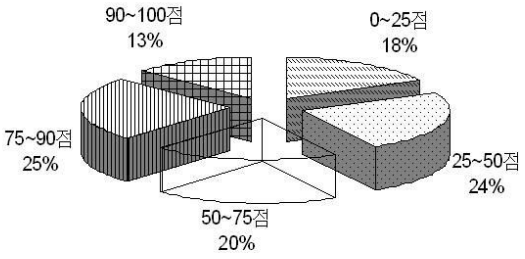


그림 3.7.8 터널막장의 RQD

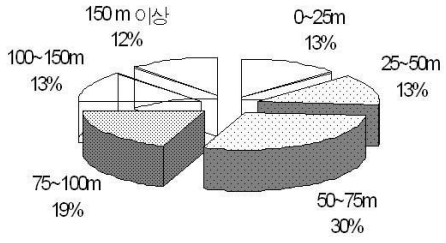


그림 3.7.9 대상터널의 심도

그림 3.7.10은 조사터널의 붕락 형태를 나타낸 것으로 여굴을 포함하여 Block fall 및 Wedge fall 등 다양한 붕락형태를 보이고 있었고, 그림 3.7.11은 지하수와 붕락형태와 붕락현장 수와의 관계를 보여주는 것인데 터널심도가 깊으므로 지하수의 유

출량에 큰 상관없이 붕락이 발생한 것을 알 수 있었다. 또한, RQD 점수가 높게 나타나고 암반의 풍화도가 대부분 “Sound”로 조사된 점으로 보아 대부분의 터널붕락이 불연속면의 구조적인 배열과 불연속면에 의한 국부적인 파쇄대의 강도저하에 의해 발생한 것으로 판단되었다.

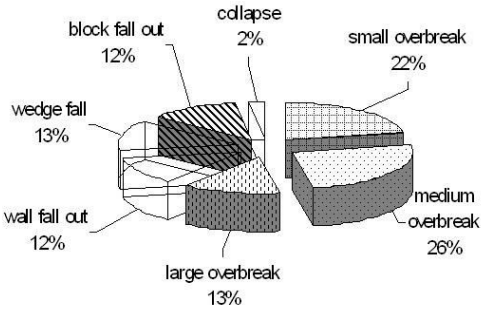


그림 3.7.10 대상터널의 붕락형태

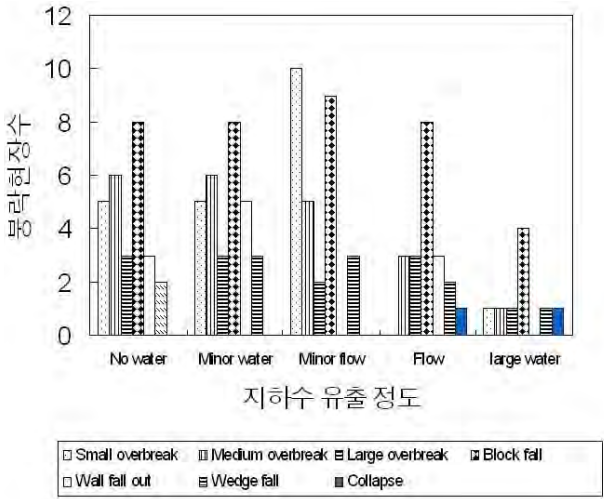


그림 3.7.11 지하수, 붕락형태 및 붕락현장수와의 관계

(다) 국내터널

한반도 지질을 살펴보면 선캠브리아기 편마암류 및 편암류가 전체지질의 절반을 차지하며 비교적 광범위하게 분포하고 터널굴착에 비교적 유리한 지반인 화강암은 전국토의 20% 이상을 차지하고 있다. 또한 한반도에서 발생된 지각운동 중 송림변동과 대보 조산운동은 한반도 전역에 걸친 강력한 조산운동으로 위와 관련된 지역에서는 지질구조가 급격히 변하고 파쇄대 및 연약대가 갑작스럽게 출현하는 특성을 지니고 있다.

국내터널 붕락 자료 수집은 붕락 및 과대여굴이 발생한 현장을 중심으로 지하철, 도로, 철도터널 등 총 52개 현장에 대해 터널붕락 발생시 조사된 지반조사자료 및 지반보강자료를 중심으로 수집하였다. 이중 자료의 정확성이나 충실성 등을 분석하여 20개 현장에 대하여 터널심도, 암석종류, 암석 풍화도 등 터널붕락에 영향을 줄 수 있는 지반요소에 대한 분석을 수행하였다. 분석에 인용된 자료의 대부분이 지하철 터널에 관한 자료여서 비슷한 지반 조건이 많았고, 주로 지반조건과 붕락형태와의 관계에 대해서 비교분석 하였다.

(라) 국외터널 붕락현황 분석

그림 3.7.12는 조사 대상터널의 종류에 대해 나타낸 것인데 대부분이 지하철터널 및 도로터널로 나타났고, 그림 3.7.13은 터널이 위치한 지역의 암석 분포도로 심성암류와 편마암류가 대부분을 차지하고 있는데 이것은 수집 자료가 서울·경기 지역의 지하철 현장자료에 집중되었기 때문으로 분석된다. 그리고 그림 3.7.14는 터널막장에서의 지하수 상태를 RMR 분류법에 의해 분류한 것인데, 대부분 "습윤상태"와 "벽면을 타고 물이 흐르는 상태"로 분류되었다. 그림 3.7.15는 터널막장의 절리군 분포를 나타낸 것인데 대부분 2개 이상의 절리군이 분포한 것으로 나타났다.

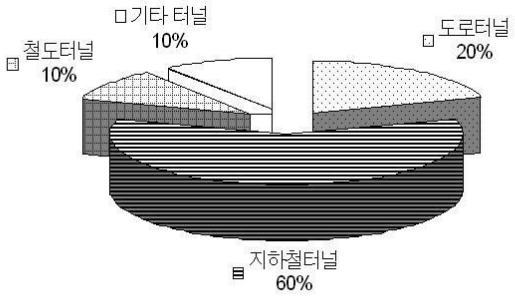


그림 3.7.12 대상터널의 종류

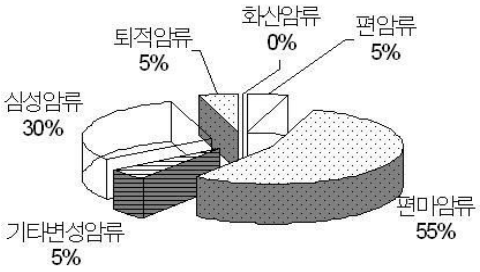


그림 3.7.13 대상터널의 암석 종류

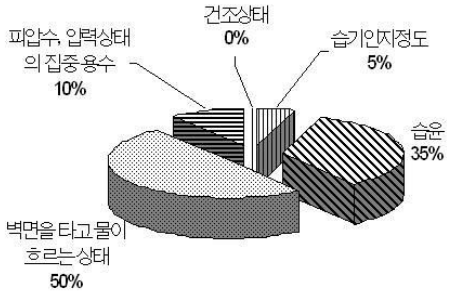


그림 3.7.14 대상터널의 지하수 유출 정도

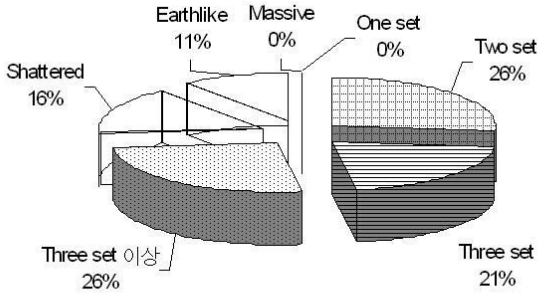


그림 3.7.15 대상터널의 절리군 분포

그림 3.7.16은 조사 대상터널의 RQD를 나타낸 것인데 모두 50점 이하이며, 특히 25점 이하의 상태가 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그림 3.7.17은 조사터널의 심도를 나타낸 것으로 지하철 현장의 자료가 많아 30m 이하의 심도에서 대부분 붕락이 발생된 것을 알 수 있었다. 그림 3.7.18은 터널의 암반 풍화도를 나타낸 것인데 풍화암과 연암이 대부분을 차지하고 있었다. 그리고 그림 3.7.19와 그림 3.7.20은 터널막장의 절리상태와 절리간격을 RMR 분류 기준으로 분석한 것으로써 대부분 4~5등급에 속하고 있는 것으로 나타났다.

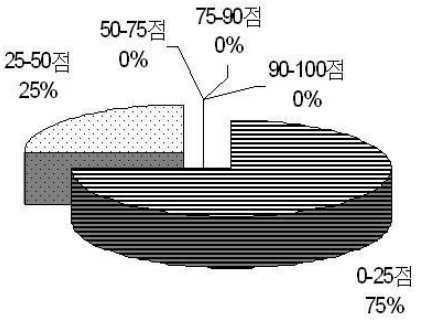


그림 3.7.16 대상터널의 RQD

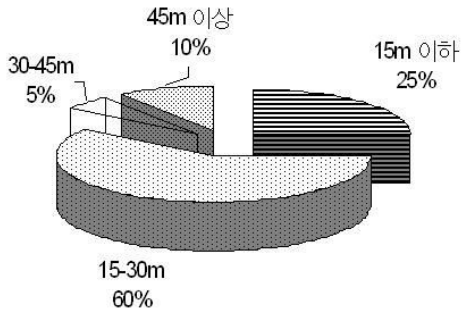


그림 3.7.17 대상터널의 심도

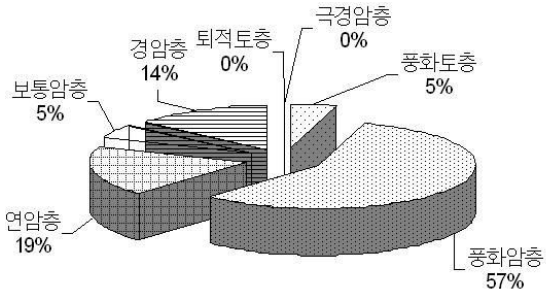


그림 3.7.18 대상터널의 암반 풍화도

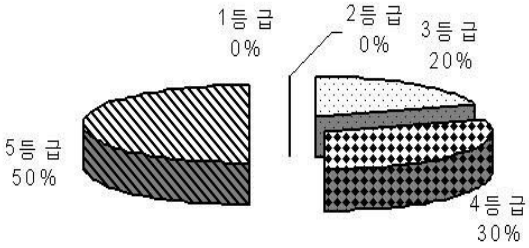


그림 3.7.19 대상터널의 절리상태

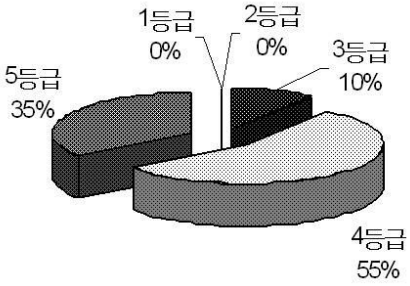


그림 3.7.20 대상터널의 절리간격

(라) 국내터널 붕락현황 분석

1) 붕락의 일반적 현황

국외터널 붕락의 경우에는 지하 양수발전소 건설에 따른 도수터널이 많았고 터널지반의 암석 종류는 심성암류와 변성암류가 많이 분포해 있으며, 지하수 상태는 RMR 분류기준에 골고루 분포하고 있었다. 막장 절리군은 무결암반부터 토사층 암까지 고루 분포하며 RQD는 50점 이상인 현장이 절반을 넘었고, 심도는 50m 이상인 현장이 대부분이었다.

이에 비해 국내터널의 붕락의 경우에는 지하철과 도로터널이 많았고 터널지반의 암석종류는 심성암류와 편마암류가 많았다. 지하수 상태는 “습윤상태”와 “벽면을 타고 물이 흐르는 상태”가 주를 이루고 있었고, 절리군은 두 개 이상이며 조사막장의 RQD는 모두 50점 이하로 암반자체의 암질이 불량하였다. 특히, 25점 이하가 전체의 75%를 차지하였다. 터널심도는 30m 이하의 천심도가 주를 이루었고 암반을 풍화도에 따라 분류하면 풍화암과 연암이 대부분이었다. 그리고 절리상태와 절리간격은 RMR 분류기준에 의해 분류하면 4~5등급의 열악한 상태였다.

2) 붕락형태에 관한 분류

국내터널 붕락 형태는 5가지 형태로 분류하였는데, 분류결과는 그림 3.7.21과 같다. 전막장 붕락(Full face failure)과 연약대 붕락(Waekness strata failure)이 우세하게 나타났으며, 이는 붕락구간에서 굴착에 의한 응력의 재분배로 연약대 또는 연약암반의 한계강도를 넘어 터널붕락이 일어났기 때문이다. 그리고 천정부나 측벽부에서 절리군의 조합에 의한 블록의 형성으로 블록의 미끄러짐이나 회전에 의해 터널막장 일부의 붕락이 발생하였고, 국부적인 풍화대의 발달로 절리군 혹은 지하수와의 결합 등에 의해 붕락이 발생하는 경향이 우세했다.

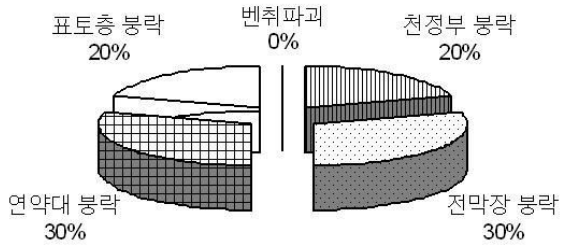


그림 3.7.21 붕락형태 분류

3) 지반 풍화도와 붕락형태

국내터널 붕락자료를 지반의 풍화도와 붕락형태에 관해 살펴보면, 그림 3.7.22와 같이 지반이 풍화암일 때 연약대에 의한 붕락과 절리군에 의한 붕락이 우세하게 발생하는 경향을 보였다.

4) 절리군과 붕락형태

국외터널 붕락자료에서는 막장면 암반상태가 무결암이거나 1개의 절리군이 존재하는 경우에도 붕락이 상당수 발생하였지만, 국내터널 붕락자료에서는 그림 3.7.23과 같이 2개 절리군 이상일 경우 전체적으로 비슷한 빈도로 붕락이 발생하는 것으로 나타났고, 절리군이 없거나 하나의 절리군에 의해서는 붕락된 경우가 없는 것으로 나타났다.

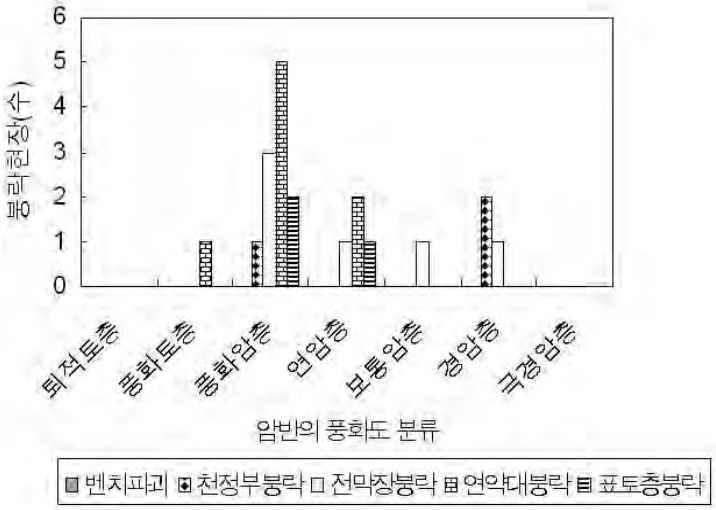


그림 3.7.22 풍화도와 붕락형태

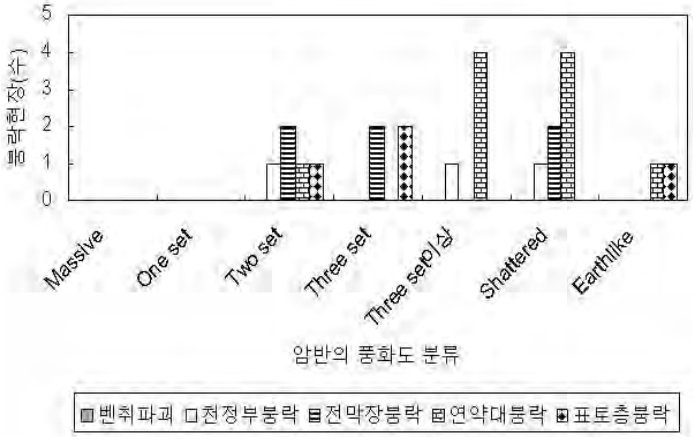


그림 3.7.23 절리군과 붕락형태

5) RQD 점수와 붕락규모

터널막장을 RQD로 평가했을 때 RQD 점수 20점 이하일 때 대부분 붕락이 발생되었는데, 조사된 자료에서 RQD가 50점 이상인 경우는 없었으며 20점 이하일 경우 집중적으로 붕락이 발생하는 경향을 보였다. 국외터널 붕락자료에서 RQD 점수가 대부분 50점 이상인 것과 비교해 보면, 국내터널 시공이 30m 이하 천심도의 풍화암과 연암에서 굴착이 이루어지는데 반해, 국외에서는 터널심도가 깊기 때문에 상대적으로 풍화를 덜 받았고 절리가 밀착되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

암석종류와 RQD 점수를 비교해 보면 암석종류가 심성암일 경우 RQD 점수가 평균 14점이고 편마암류일 경우에는 평균 23점이었다. 이는 심성암의 주 조암광물인 장석류가 풍화에 매우 약하기 때문이며 특히, 수집된 대부분의 터널 자료가 천심도에서 굴착이 되었기 때문에 RQD 점수가 낮게 나타났다. 그림 3.7.24는 터널붕락현장의 암석종류와 RQD 점수를 나타낸 것이다.

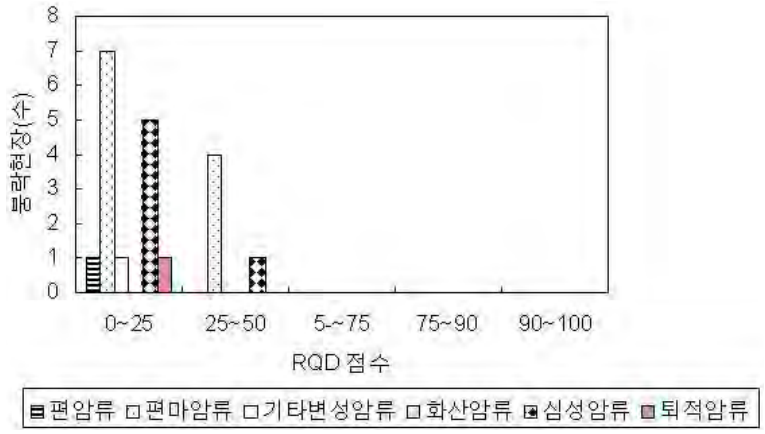


그림 3.7.24 터널붕락현장의 암석종류와 RQD

6) 암석종류와 붕락형태

그림 3.7.25는 암석종류와 붕락형태를 나타낸 것인데 붕락이 발생된 암반의 대부분이 편마암류와 심성암류가 주를 이루고 있었고, 붕락형태는 암석의 종류가 편마암류일 때 천정부 붕락과 연약대 붕락이 우세하게 발생하는 것으로 나타났다.

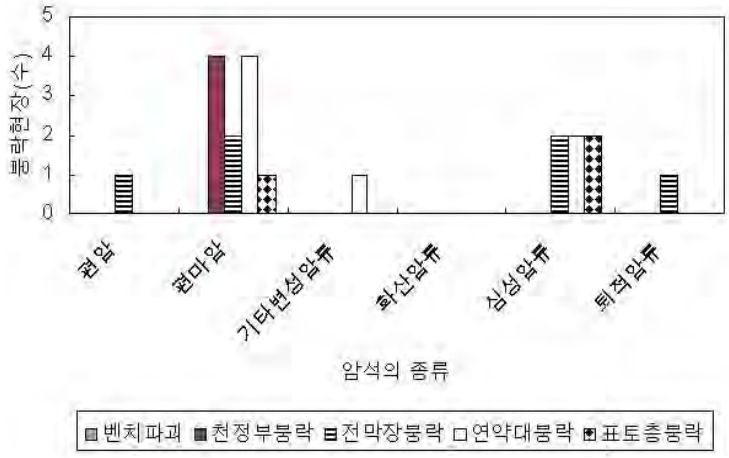


그림 3.7.25 암석종류와 붕락형태

다. 다기능 레디믹스트 숏크리트의 기능 인자

(1) 다기능 레디믹스트 숏크리트의 특성

분말형 레디믹스트 숏크리트의 특성화된 제품으로서 현장상황(파쇄대 출현, 지하수 유입량 과다, 보강효과 증진 필요 등)에 따라 효과적인 대응이 가능하도록 사전에 공장배합을 통해 다양한 기능을 가지도록 제품화된 것이 다기능 레디믹스트 숏크리트이다.

터널 시공과정 중 발생되는 암특성에 따른 숏크리트 설계 강도 변화, 막장 출수량에 따른 설계 변화, 공사비 및 공사기간의 변경으로 인한 숏크리트 설계 변화 등의 상황에 대해 현장에서 직접 대처하기 어려운 경우, 공장배합형 다기능 레디믹스트 숏크리트를 주문하여 사용함으로써 유동적이며 효율적인 숏크리트 시공이 가능하게 된다. 또한, 공장형 배합을 통해 다품종 소량생산 및 최적의 생산시스템 확립을 통해 경제적인 제품생산 및 개발이 가능하게 된다.

공장배합형 다기능 레디믹스트 숏크리트의 적용 가능성과 발전성을 살펴보면 다음과 같다.

① 공장배합을 통해 철저한 재료의 품질 관리를 실시하여 균일한 품질을 확보할 수 있는 시스템은 현장에서 배합되어 사용되는 숏크리트의 재료에 따른 품질변동의 폭을 획기적으로 줄일 수 있다.

② 복합열화 및 열악한 조건에 노출될 우려가 있는 터널 현장에서는 열악한 환경에 맞게 고품질 및 고내구성을 목적으로 생산된 공장배합 숏크리트를 사용함으로써 최적의 성능을 발휘할 수 있다.

③ 국내 지형 특성, 지하수 출수 상황, 파쇄대 및 토사층 분포 현황 등과 같은 현장 상황에 적합하게 맞춤형 레디믹스트 숏크리트 개발이 가능하며, 현장여건에 능동적으로 대체할 수 있는 특수 숏크리트 개발도 가능하다.

레디믹스트 숏크리트 생산 기술의 개발을 통해 사전 공장배합으로 제품화되고, 생산이 가능한 다기능 숏크리트의 기능 인자로는 다음과 같은 것들이 있다.

① 터널 굴착 진행 중 지반조사 단계에서는 예상치 못했던 파쇄대, 풍화대 등의 연약암질이 나타난 경우, 숏크리트 설계강도의 변경이나 배합 및 배치 플랜트의 변경으로 공사비 증가와 공기 증가가 예상될 때, 고강도 레디믹스트 숏크리트 제품을 필요한 용량만 주문하여 연약대 구간에만 타설하는 것이 가능하다.

② 터널 굴착 진행 중 지반조사 단계에서는 예상치 못했던 경암 등의 고품질 암반이 나타난 경우, 숏크리트 공법의 과다설계로 공사비가 낭비될 때 저강도 레디믹스트 숏크리트 제품을 필요한 용량만 주문하여 타설하는 것이 가능하다.

③ 터널 굴착 진행 중 지반조사 단계에서는 예상치 못했던 지하수 유입량이 과다하여 일반 숏크리트로는 시공에 어려움이 있는 경우, 지하수가 과다하게 용출되는 곳에서도 원활하게 타설이 가능하도록 기능화된 레디믹스트 숏크리트를 필요한 용량만 주문하여 타설하는 것이 가능하다.

④ 터널 막장 내에 용출되는 지하수의 량이 많지는 않지만 지하수에 염분 및 화학성분이 과다하게 포함된 경우, 일반 숏크리트로 시공하게 되면 숏크리트의 품질저하와 장기내구성 저하가 유발될 때 내화학성 및 내부식성 기능을 가진 레디믹스트 숏크리트 제품을 필요한 용량만 주문하여 타설하는 것이 가능하다.

⑤ 최초 숏크리트 설계시에 강섬유 보강 숏크리트로 설계되어 시공되고 있지만 특정지점에서는 현장상황으로 인해 강섬유의 부식이 예상되는 경우, 합성섬유 보강으로 설계변경시 소요되는 시간적 낭비를 절감할 수 있는 레디믹스트 합성섬유보강 숏크리트를 필요한 용량만 주문하여 타설하는 것이 가능하다.

(2) 다기능 레디믹스트 숏크리트의 기능 인자 결정

본 연구개발에서는 다기능 레디믹스트 숏크리트의 여러 가지 기능성 중에서 2가지의 기능 인자를 고려하여 개발을 수행하고자 한다. 2가지 기능 인자는 앞절에서 살펴본 국내 터널붕락 자료 분석 내용을 참고하고, 현장설문조사를 통해 얻은 실무 의견들을 수렴하여 결정하였다.

현재 국내 터널 현장에서 가장 많이 요구되고 있으며 또한, 시급히 개발되어야 할 다기능 레디믹스트 숏크리트로 본 연구에서는 고차수성 레디믹스트 숏크리트와 고강도 레디믹스트 숏크리트를 결정하였다.

(가) 고차수성 레디믹스트 숏크리트

제2절에서 살펴본 바와 같이 다기능 숏크리트의 적용성에 대한 현장설문조사 결과 국내 실무기술자들이 가장 필요하다고 생각하는 다기능 숏크리트는 지하수 유입량이 과다하여 일반 숏크리트로 타설하기 어려운 경우에 적용할 수 있는 숏크리트로 나타났다. 실제 현장에서 이러한 상황이 다분히 발생되고 실무 기술자들도 고차수성 숏크리트의 필요성을 깊이 인식하고 있음을 알 수 있다.

또한, 앞에서 살펴본 국내 터널의 붕락 현황에서 보면, 조사 대상터널 막장에서의 지하수 상태를 RMR 분류법에 의해 분류한 결과에서 대부분 50% 정도가 벽면을 타고 물이 흐르는 상태로 나타났고, 35% 정도가 습윤한 상태로 나타났다. 따라서 터널 막장 상황에서 고차수성 레디믹스트 숏크리트가 요구되는 경우가 많을 것으로 예상되며, 터널 안정성 향상을 위해서 필요할 것으로 판단된다.

(나) 고강도 레디믹스트 숏크리트

제2절에서 살펴본 바와 같이 다기능 숏크리트의 적용성에 대한 현장설문조사 결과 국내 실무기술자들이 두 번째로 필요하다고 생각하는 다기능 숏크리트는, 터널 굴착 진행 중에 예상치 못한 파쇄대 등이 출현했을 경우 적용 가능한 고강도 숏크리트로 나타났다. 고차수성 숏크리트 못지 않게 고강도 숏크리트도 현장 상황의 변화에 따라 많이 요구되고 있음을 알 수 있다. 최초 설계된 숏크리트 배합으로는 터널막장의 안정성을 충분히 확보할 수 없는 경우, 설계배합이나 배치 플랜트의 전면적인 변화를 주기보다는 사전에 공장배합으로 제품화 되어 있는 고강도 레디믹스트

숏크리트를 주문하여 적용하는 것이 더 효과적이며, 경제적이라고 판단된다.

또한, 앞에서 살펴본 국내 터널의 붕락 현황에서 보면 조사 대상터널의 57% 이상이 풍화층에서 붕락이 발생했고, 또 붕락 발생 터널막장의 절리군은 두 개 이상이며 RQD는 모두 50점 이하로 암반자체의 암질이 불량한 것으로 조사되었다. 특히, 25점 이하가 전체의 75%를 차지하는 것으로 나타났다. 그리고 절리상태와 절리간격은 RMR 분류기준에 의해 분류하면 4~5등급의 열악한 상태였다.

실제 터널 현장에서 예상치 못하게 상기와 같은 막장 상태가 출현되면 기존에 설계된 일반적인 숏크리트 배합으로는 막장 안정성을 확보하기 어렵다. 이러한 경우에도 사전에 공장배합으로 제품화 되어 있는 고강도 레디믹스트 숏크리트를 필요한 용량만 주문하여 사용하게 되면, 숏크리트 공법의 경제성과 효율성을 충분히 확보할 수 있을 것이다.

2. 다기능 레디믹스트 숏크리트 초기개발

가. 다기능 인자에 따른 초기배합 결정

다기능 레디믹스트 숏크리트란 분말형 레디믹스트 숏크리트의 특성화된 제품으로서 현장상황(파쇄대 출현, 지하수 유입량 과다, 보강효과 증진 필요 등)에 따라 효과적인 대응이 가능하도록 사전에 공장배합을 통해 다양한 기능을 가지도록 제품화된 숏크리트를 말한다. 다기능 레디믹스트 숏크리트는 현장에서 발생될 수 있는 다양한 상황에 대한 사전 공장배합으로 고품질 및 소규모로 생산이 가능하기 때문에, 필요한 상황에 맞게 주문하여 사용이 가능하다. 또한, 설계된 숏크리트 배합이 제 기능을 담당하지 못하여 설계 변경으로 인한 공사비 증대, 공사기간 연장 등의 문제가 발생할 경우에도, 공장배합 제품인 다기능 레디믹스트 숏크리트를 이용하게 되면 경제성 절감 및 시공성 향상의 효과를 얻을 수 있다.

그러나 아직까지 다기능 레디믹스트 숏크리트는 국내외에서 초기 개발단계이고 국내 터널 시공 현장에서 발생 가능한 문제들은 매우 다양하기 때문에, 모든 상황에 대처 가능한 다기능 레디믹스트 숏크리트를 개발하기에는 현실적으로 어려움이 많다. 따라서 본 절에서는 국내 터널 시공 현황 조사를 통해 터널 시공 중 발생되는 문제점들을 이해하고 이 문제점들을 효과적으로 해결할 수 있는 다기능 재유화형 분말수지를 혼입한 고차수, 고강도 레디믹스트 숏크리트를 개발하기 위해 적용성 평가를 실시하였다.

(1) 연구배경

시멘트 복합체의 물리적 성질을 개선하기 위해서는 복합체 자체의 성질을 개질하므로서 그 목적을 달성할 수 있다. 이를 위해서 혼화되는 재료로서 폴리머(Polymer)를 들 수 있다. 무기재료인 시멘트 복합체에 유기재료인 폴리머를 혼화하므로서 이들의 물리적 성질을 개선하기 위한 시도는 시멘트를 사용한 건설재료의 신소재 분야이다. 이러한 폴리머를 사용한 콘크리트 복합체는 압축,인장, 휨강도가 클 뿐 아니라 내마모성, 내충격성, 내약품성, 전기절연성, 방수성, 내동결융해성 등과 같은 물리·화학적

성능이 우수하다. 폴리머 시멘트 모르타르 (Polymer Cement Mortar ; PCM) 는 시멘트 모르타르에 결합재인 시멘트의 일부를 폴리머 라텍스 또는 디스퍼션, 재유화형 분말수지등과 같은 수용성 폴리머로 대체시켜 제조되는 것으로 제조 방법은 일반 시멘트 모르타르와 큰 차이가 없다. 즉, 배합시 폴리머를 혼화제로 첨가하는 것으로서 혼합이나 타설 방법은 시멘트 모르타르와 같으며, 양생시 적당한 온·습도 조건만 유지시켜 주면 된다. 그러나 시공시 시멘트계 분말시료와 액상 폴리머를 현장에서 배합하기 때문에 숙련부족으로 인해 적합한 품질의 모르타르를 얻지 못하고 있다. 따라서 기계의 사용에 의해 현장에서 혼합하던 현장배합의 단점을 개선하고자 선진국에서는 분말로 건조된 폴리머를 시멘트계 분말재료와 미리 혼합한 프리믹스 제품을 개발하여 현장에서는 일정량의 물만 혼합하여 사용하고 있다. 이러한 현대적 시스템에 의한 막대한 생산성의 증가는 고전적인 수작업에 비해 노동력을 크게 절감할 수 있게 하였다. 이러한 특징이 있는 재유화형 분말수지를 레디믹스트 적용시 일체화된 레디믹스트 제품을 생산할 수 있을 뿐만아니라 고차수성의 품질을 확보하는 동시에 고강도 숏크리트의 생산이 가능해 질것으로 판단된다.

(2) 이론적 배경

시멘트는 수화반응을 통화여 시멘트 수화물을 만들고, 시멘트 혼화용 폴리머(Polymer Dispersion)는 시멘트 복합체 내부에서 분산되어 그 자체의 탈수·건조가 되면서 자착성과 접착성을 갖는 폴리머 필름(Polymer film)을 형성하여 시멘트 경화체와 골재를 견고하게 결합하게 한다. 이 때문에 폴리머 시멘트 모르타르는 일반 시멘트 모르타르나 콘크리트에 비하여 매우 우수한 특성을 갖게 된다.

폴리머 디스퍼션은 시멘트 수화물과 폴리머상 형성이 동시에 진행되고, 특히 망상구조를 갖는 일체의 매트릭스상인 Co-Matrix 상을 형성한다. 이러한 Co-Matrix 상은 골재와 시멘트 수화물을 더욱 견고하게 결합시켜서 우수한 성능을 발휘하게 한다. 즉 시멘트 모르타르나 콘크리트에 폴리머 디스퍼션을 혼화하면 폴리머입자가 시멘트 페이스트 중에 균일하게 분산되고, 시멘트의 수화작용에 의해서 시멘트 겔이 다음에 형성된다. 그리고 동시에 시멘트 겔의 미수화된 시멘트 입자 혼합물의 표면에 폴리머 입자가 침착하기 시작한다. 그 다음에 시멘트 겔 구조의 형성에 따르는 물의 소비로 인하여 폴리머 입자가 응집하게 되고, 시멘트 겔의 미수화된 시

멘트 입자 혼합물의 표면에 폴리머 입자의 연속 최밀 충진층이 형성되며, 이것은 골재의 표면에도 잘 접착하게된다.

본 연구에서는 레디믹스트 숏크리트에 폴리머를 혼입하여 사용할 목적으로 동일한 특성을 발휘하는 분말형 재유화형 폴리머를 사용하였다. 기본적인 배합을 각종 문헌 및 기존제품의 분석을 통하여 배합비를 도출한 뒤 물리·역학적 성능을 평가하였다. 폴리머의 혼입량에 의한 영향과 혼화제의 혼입율에 의한 영향을 알아보기 위하여 도출된 기본 배합비에 폴리머 및 혼화제를 여러 단계로 혼입하여 강도시험 및 내구성 시험을 실시하였다. 얻어진 결과를 비교·분석하여 역학적 특성 및 내구성능이 가장 우수한 다기능 레디믹스트 숏크리트의 적용 가능성 검토를 실시하였다.

(가) 시멘트 혼화용 폴리머

폴리머 혼화제는 시멘트 콘크리트 및 모르타르에 그들의 성질의 개선할 목적으로 혼화된 일반적인 시멘트 혼화제인 AE제, 감수제보다는 다량(시멘트에 대한 5~30%의 폴리머 고형분)이 사용되며, 이러한 혼입율에서 폴리머 시멘트 모르타르의 특성이 현저하게 나타나게 된다.

시멘트 혼화제용 폴리머는 그림 3.7.26에서 보는 것처럼 많은 종류가 있지만 크게 분류하면 수성 폴리머 디스퍼션(polymer dispersion), 재유화형 분말수지(redidpersible polymer powder, powdered emulsion). 수용성 폴리머(water soluble polymer) 및 액상 폴리머(liquid polymer)의 4종류로 분류된다. 이 가운데서 가장 많이 사용되는 것은 SBR(Stylene Butadiene Rubber) Latex, EVA(Ethylene Vinyl Acetate) Emulsion, PAE(Poly Acrylic Ester) Emulsion 과 수성 폴리머 디스퍼션류이다. 최근 실용적 평가가 확인되기 시작한 것으로 EVA, VAVeoVa(초산비닐바세테이트)의 재유화형 분말수지와 에폭시수지나 불포화 폴리에스테르 수지와 같은 액상 폴리머가 있다. 특히 재유화형 분말수지는 바탕조정재(속칭 시멘트 필러), 두꺼운 칠 마감재, 얇은 칠 마감재, 타일용 접착재등의 공장포장(prepacked) 형태의 재료로 사용된다. 또한 시판되는 대부분의 폴리머 라텍스에는 과도한 공기연행을 방지하기 위해 제조시에 소포제가 첨가되어 있다.

(나) 재유화형 분말수지

분말 에멀젼 이라고도 부르는 재유화형 분말수지는 합성수지 에멀젼을 분무, 건조한 것으로 물을 가하면 재유화한다. 현재 보급되어 있는 폴리머 혼화제로서의 제품은 EVA와 초산비닐바세테이트(VAVeoVa) 이다. VAVeoVa의 화학구조는 그림 3.7.27과 같다. 최근의 재유화형 분말수지는 그 품질이 향상되어 콘크리트 및 모르타르 속에서도 연속 폴리머 막을 형성하게 되었다.

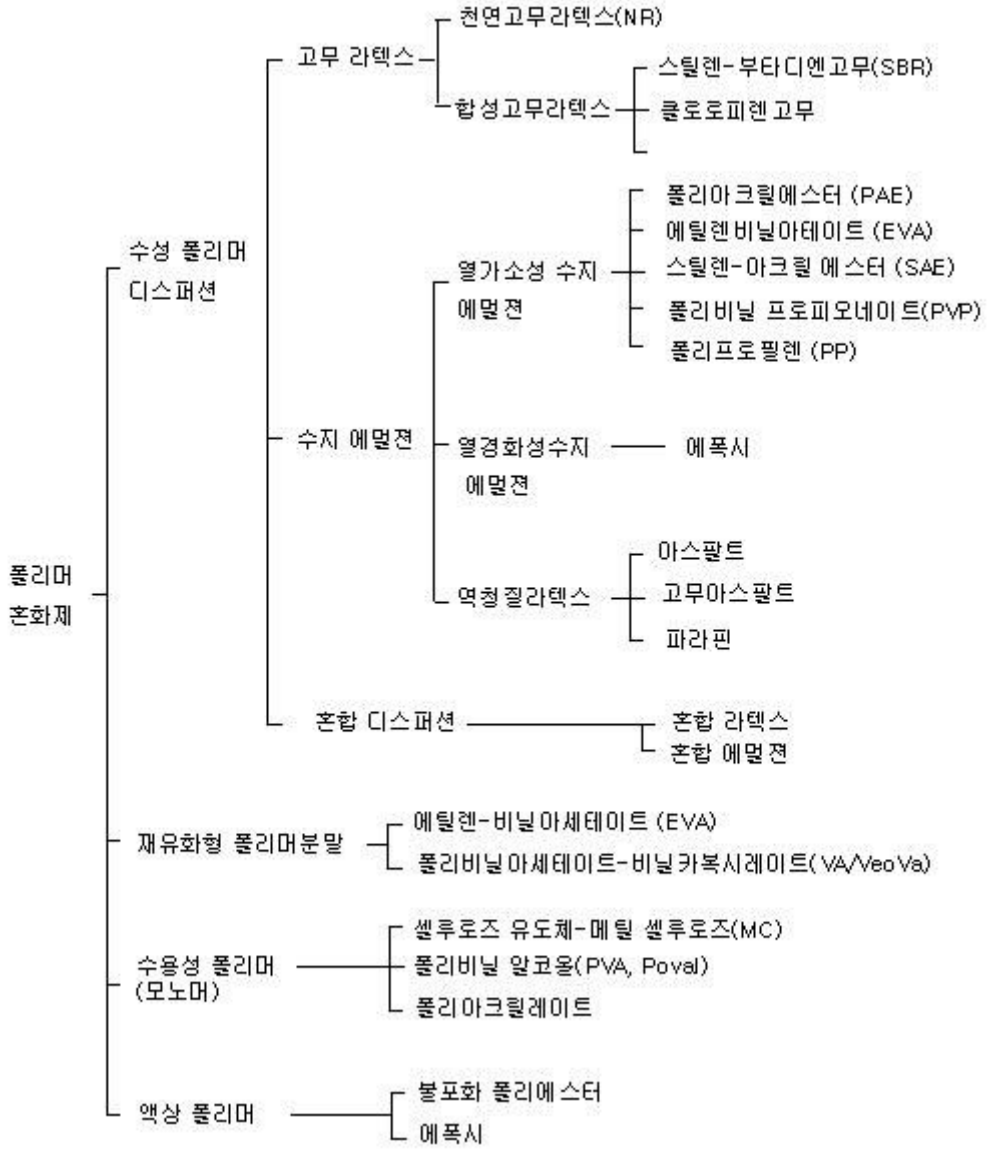


그림 3.7.26 시멘트 혼화용 폴리머의 분류

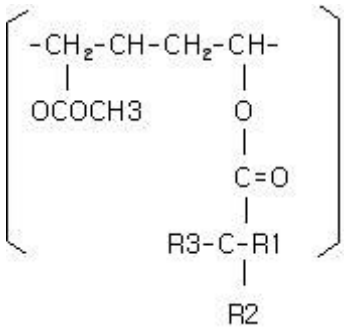


그림 3.7.27 초산비닐 바세테이트(VAVeoVa)의 화학구조

(다) 시멘트 혼화용 폴리머의 조건

시멘트 혼화용 폴리머가 구비해야 할 중요한 성질은 시멘트의 혼합 안정성(기계적, 화학적)이다. 시멘트와 혼합·반죽할 때의 기계적 확산작용이나 시멘트에서 유리된 칼슘이온(Ca^{++}) 에 의해 폴리머 에멀젼이 응고하지 않도록 해야 한다. 시멘트 혼합 안정성이 불량한 폴리머를 사용하는 경우에는 오히려 물성이 저하 할 수도 있다. 이러한 시멘트 혼화용 수용성 폴리머 디스퍼션에 요구되는 성능은 다음과 같다.

① 시멘트로부터 용출되는 Ca^{++} , Al^{++} 등의 다가 양이온 및 비빔시 발생하는 전단력등에 대하여 화학적, 기계적인 안정성을 가져야 한다.

② 폴리머 분산수지에 함유된 유화제, 안정제 등에 의하여 시멘트와 수화작용이 방해받지 않아야 한다.

③ 폴리머 분산수지에 함유되어 있는 계면 활성제로 인하여 과도한 공기연행이 발생하지 않아야 한다.

④ 폴리머의 강도, 내수성, 내알칼리성 및 내후성 등이 우수하여야 한다.

(라) 폴리머의 개질원리

감수제와 AE제 등 콘크리트용의 많은 혼화제는 시멘트-콘크리트(모르타르)가 아직 굳지 않은 상태에서 그 성능을 발휘, 경화후의 콘크리트(모르타르)의 조직구조를 개질하나 경화 후에 혼화제 자체가 어떠한 작용을 발휘하는 것은 아니다. 그러나 그림 3.7.28에서 보는 바와 같이 시멘트 혼화용 폴리머를 사용한 폴리머-시멘트 콘크리트(모르타르)는 결합재가 시멘트 수화물과 폴리머의 두 성분으로 되어 소위 Co-matrix 상을 이루는 것이 큰 특징이다. 폴리머는 통상의 혼화제보다도 상당히 많은 양 (시멘

트에 대하여 대략 5~30wt%)이 혼화되고 시멘트 콘크리트(모르타르)의 굳지 않은 상태 및 경화 후에도 여러 가지 효과를 발휘한다.

폴리머 시멘트 모르타르의 폴리머 막(film)은 시멘트 경화물중의 미세한 공극에 균일하게 충전되어 진다. 시멘트 수화반응의 진행 및 수분증발이나 이동에 따라서 폴리머는 농축되어 필름을 형성하게 되며 이러한 시멘트 수화반응과 폴리머 막(film)의 형성 작용이 거의 동시에 진행하게 된다. 결합성 있는 폴리머 입자는 시멘트, 골재 등에 응집·응착 되어 치밀한 망상구조가 형성되며 이 때문에 수분의 이동이 억제됨으로 시멘트 수화반응을 더욱 원활하게 진행 시킨다. 이러한 폴리머 디스퍼션에 의한 시멘트 복합체의 개선 작용은 폴리머 막의 형성에 의해 지배되나 주재료인 수화반응이 기본적으로 중요하므로 양 과정을 균형있게 진행시키는 것이 무엇보다 중요하다. 시멘트 매트릭스 내에서 반죽직후와 시멘트의 수화 작용시와 경화 후에 폴리머의 역할 및 효과를 나타낸 것이 그림 3.7.28이며, 시멘트 수화물상에 있어서 폴리머-필름 형성 과정을 나타낸 것이 그림 3.7.29이다.



그림 3.7.28 폴리머-시멘트 Comatrix 형성과정

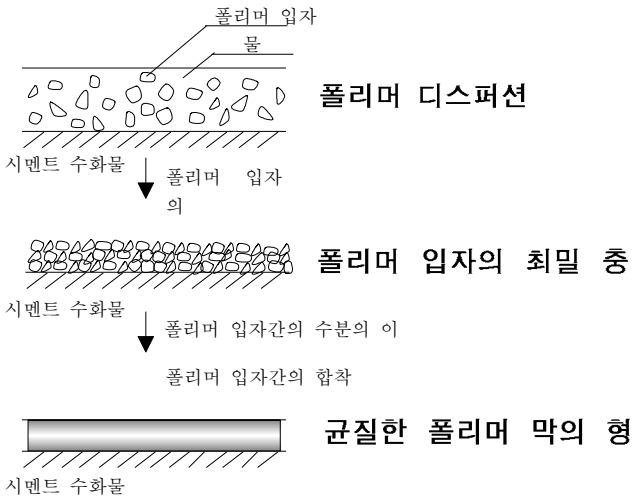


그림 3.7.29 시멘트 수화물상에 있어서 폴리머-필름 형성과정

나. 다기능 인자 성능발휘 실험

(1) 실내실험 개요

(가) 실험계획

레디믹스트 숏크리트에 재유화형 분말수지의 적용 가능성을 평가하기 위하여 제조사별 적정 혼입율을 혼입하여 강도발현특성, 부착성능 및 투수성능의 간접적인 시험방법인 염소이온투과저항성시험을 실시하였다. 시험 배합표는 표 3.7.2과 같다.

표 3.7.2 재유화형 분말수지 혼입 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	레디믹스트 골재	급결제	혼화재	혼화제
									재유화형분말수지	유동화제 (kg)
1	Plin	8	12	45.6	212	465	1,602	×	-	4.19
2	W-EVA	8	12	45.6	212	465		×	20	4.56
3	W-VAV	8	12	45.6	212	465		×	20	4.56

주1) W- 합성수지 제조사 VAV- 초산비닐아세테이트
W/B:물 바인더(시멘트+혼화재)비, S/a:잔골재율, Gmax:골재최대치수

(나) 시험방법

1) 압축강도

압축강도 공시체는 KS F 2403에 준하는 Φ10×20cm의 원통형 공시체를 제작하였다. 초기 탈형 후 기중양생을 실시하였으며 압축강도는 재령 1일, 7일, 28일에 KS F 2405에 준하여 실시하였다.

2) 부착강도

재유화형 분말수지의 특성을 파악하기 위하여 부착강도 시험시 시험오차를 최대한 줄여 굵은 골재의 혼입은 제외하였다. 부착강도 시험은 먼저 KS L5105에 따라 배합한 모르타르 70×70×20mm의 공시체를 만들어 온도 20±3℃, 습도 80% 이상의 상태에서 24시간 양생시키고, 탈형한 후 6일동안 20±2℃의 물속에서 수중양생을 실

시하였다. 그런 후 다시 7일 이상 양생실에서 양생시킨뒤 KS L 6003(연마지)에서 규정하는 150번 연마지를 사용하여 성형할 밑면을 충분히 연마해서 시험용 밑판에 사용하였다. 3종류의 배합재료를 두께 1cm로 도포하여 28일에 40×40mm 크기의 어테치먼트를 부착하여 KS F 4715, KS F 4716에 준하여 부착강도를 측정하였다. 그림 3.7.30은 부착강도 측정 모습 및 시편 모습이다.

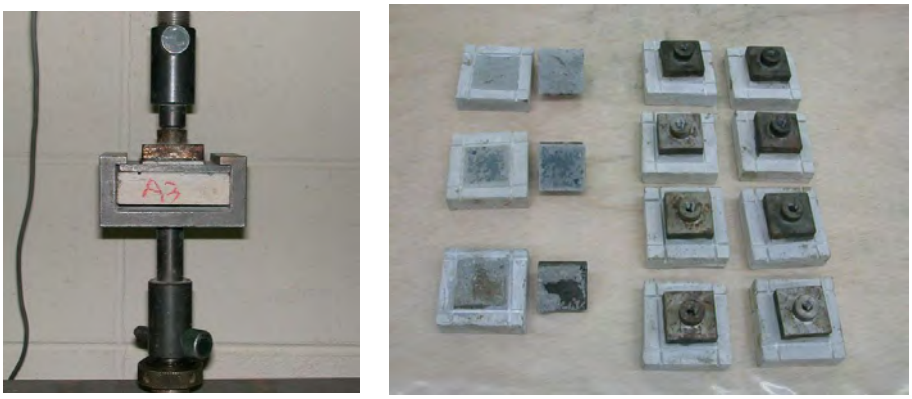


그림 3.7.30 부착강도 시험모습

3) 염소이온 침투저항성 평가방법

모르타르 및 콘크리트의 투수성을 간접적으로 확인할 수 있는 염소이온 침투저항성 시험은 ASTM C 1202에 준하여 실험을 실시하였다. 염소이온 투과시험은 정확한 투구계수 값을 결정하는 것이 아니라 대략적인 콘크리트의 투수성을 측정하는 실험방법이다. 그림 3.7.31은 염소이온 투과시험 모습을 나타낸 것이다.



그림 3.7.31 염소이온투과시험

(2) 실내실험 결과

(가) 압축강도

혼화재료를 혼입하지 않은 Plain 배합과 합성수지 2종을 혼입한 W-EVA, W-VAV 배합의 압축강도 결과를 표 3.7.3에 나타내었다. 초기 1일 강도부터 합성수지를 혼입한 배합이 압축강도 발현이 우수하였으며 장기재령으로 갈수록 더욱 우수하게 나타났다. Plain 배합 대비 재령 28일 기준으로 재유화형 분말수지를 혼입한 배합이 13% 정도의 강도 증진효과를 보였다. 폴리머를 혼입함으로서 숏크리트 재료 내에서 제2의 바인더 역할을 하면서 전체적인 숏크리트 개질에 의해 매트릭스가 치밀해진 결과로 사료된다.

표 3.7.3 재유화형 분말수지 종류별 압축강도(단위 : MPa)

	1일	7일	28일
Plain	11	25.8	35.9
W-EVA	14.4	27.9	39.9
W-VAV	13.2	29.5	40.5

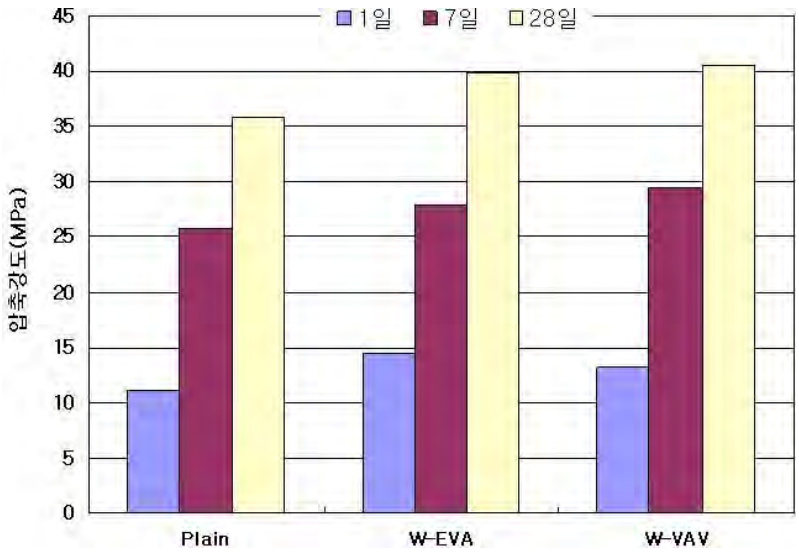


그림 3.7.32 재유화형 분말수지 종류별 압축강도

(나) 부착강도

부착강도 시험은 각 배합별로 총 8개의 시편을 측정하였다. 측정 결과는 표 3.7.4과 같으며 초산비닐아세테이트(VAV)계 재유화형 분말수지가 부착강도 향상에 가장 좋은 결과는 나타내었다. W-VAV 배합의 경우 Palin 배합 대비 22%의 부착강도가 증진 효과를 나타내었으며 W-EVA배합은 15% 정도 부착강도가 증진되었다. 초기 부착성능 또한 우수한 것으로 나타나 레디믹스트 숏크리트에 적용시 리바운드량 절감에 기여할 것으로 판단된다.

표 3.7.4 재유화형 분말수지 종류별 부착강도

	재령 28일 (단위 MPa)				평균
Plain	2.1	2.4	2.8	2.9	2.7
	3.0	-	-	-	
W-EVA	2.9	2.8	3.3	3.2	3.1
	3.3	-	2.9	-	
W-VAV	3.5	3.4	3.2	3.1	3.3
	-	2.9	3.3	3.4	

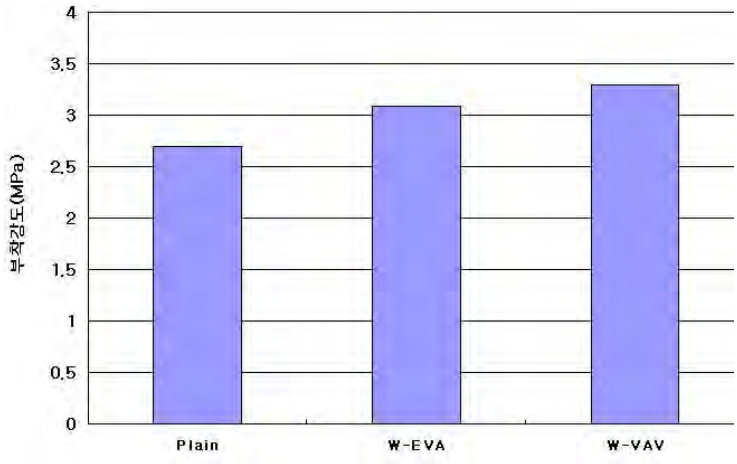


그림 3.7.33 재유화형 분말수지 종류별 부착강도

(다) 염소이온투과저항성

각 배합별 염소이온 침투저항성 결과를 표 3.7.5에 나타내었다. 표 3.7.6는 ASTM에서 제시한 염소이온 투과 평가기준을 나타낸 표이다. Plain 배합의 경우 평균 통과 전하량이 6480~6710 Coulombs로 매우 높은 투수성을 나타내었고 재유화형 분

말수지를 혼입한 배합은 대체적으로 양호한 결과를 나타내었다.

W-VAV(초산비닐아세테이트)계 재유화형 분말수지인 경우 880~970Coulombs을 나타내어 ASTM C 1202 기준으로 Very Low를 기록하여 매우 낮은 투수성을 보였다(그림 3.7.34). 이러한 결과는 폴리머가 숏크리트 매트릭스 내에서 연속적인 폴리머 필름을 형성하여 내구 구조를 매우 치밀하게 만든 결과라 판단되며 장기적인 내구성능 측면에서도 매우 양호한 재료라고 사료된다.

표 3.7.5 재유화형 분말수지 혼입 레디믹스트 숏크리트 통과 전하량

종류	specimen No.			Mean	Evaluation
	1	2	3		
Plain	6530	6480	6710	6573	High
W-EVA	1587	1705	1605	1632	Low
W-VAV	970	946	880	932	Very Low

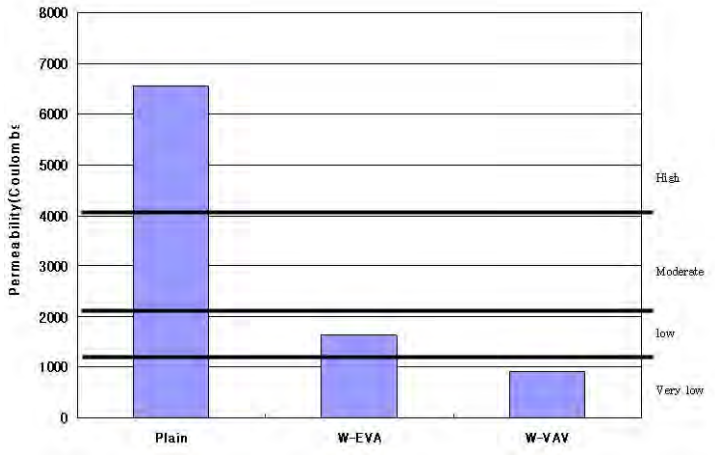


그림 3.7.34 재유화형 분말수지 혼입 레디믹스트 숏크리트 통과 전하량

표 3.7.6 ASTM에서 제시한 염소이온 투과 평가 기준

Coulombs	Chloride ion permeability	Typical of
>4000	High	High W/C-ratio
4000 ~ 2000	Moderate	0.4~0.5 W/C-ratio
2000 ~ 1000	Low	W/C-ratio<0.4
1000 ~ 100	Very low	Latex modif. concrete
<100	Negligible	Polymer concrete

3. 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장적용성 평가

가. 타설실험 개요

본 절에서는 분말형 레디믹스트 숏크리트의 특성화된 제품으로서 현장상황 (파쇄대구간, 지하수 과다 유입구간, 연약암반구간 등)에 따라 효과적인 대응이 가능하도록 사전에 공장배합을 통해 다양한 기능을 가지도록 제품화 한 다기능 레디믹스트 숏크리트를 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 다기능 인자로는 차수와 고강도를 선정하였으며 실내 실험 결과를 바탕으로 다기능 레디믹스트 숏크리트의 배합을 도출하였고 도출된 배합의 현장 적용성 평가를 위해 실제 터널 현장에 타설 실험을 수행하였다.

고강도 다기능 인자의 실험을 위해 실리카 흄을 혼합한 RM-SF 배합을 타설하였고, 고차수성 다기능 인자의 실험을 위해 차수용 혼화제를 혼입한 RM-차수 배합을 타설하였다. 비교군으로는 Plain 레디믹스트 숏크리트 배합인 RM-P1배합과 울산터널현장골재를 적용한 현장 배합, 그리고 울산 터널현장 배합에 실리카 흄을 혼입한 고강도 현장골재 배합을 타설하였다.

본 현장 타설 실험에서는 다기능 레디믹스트 숏크리트의 강도 발현 성상을 파악하기 위해 재령 1일, 7일, 28일에 공시체를 채취하여 압축강도를 측정하였고, 빔 형 공시체를 채취하여 휨강도 및 휨인성 시험을 수행하였으며, 차수성을 파악하고자 수은압입시험을 통해 실험 배합별 공극량을 파악하였다. 실험에 사용된 배합표는 표 3.7.7과 같다.

표 3.7.7 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재		합성섬유	혼화재			혼화제	
									HP-L 50mm	고로슬래그 C*30%	실리카흄 C*8%	F/A	유동화제 (kg)	차수용 혼화제 (kg)
레디믹스트 배합														
1	RM-P1	8	12	45.6	212	465	1586		6	-	-	-	1.67	-
다기능 레디믹스트 배합														
3	RM-SF	8	12	45.6	212	428	1497		6	-	37	75	1.94	-
4	RM-차수				212	465	1497		6	-	-	75	1.94	1.06
현장골재 배합							S	G						
5	울산	13	8	44.8	189	459	1004	646	40 (강섬유)	-	-	-	2.3	-
6	고강도				174	423	1004	646	40 (강섬유)	-	37	-	2.1	-

*현장골재 사용배합 1. 입도를 고려한 수정
2. 표면수를 고려한 수정

나. 타설시험 수행

타설시험은 울산 도로터널 현장에서 이루어졌으며, 압축강도 측정을 위해 공시체 채취용 몰드를 사용하여 Φ10×20cm 원통형 코어를 각 재령 (1, 7, 28일)별로 채취하여 강도를 측정하였으며 휨강도용 패널을 사용하여 10×10×40cm 각주형 공시체를 절단 가공하여 휨 인성시험을 실시하였다. 그림 3.7.35는 현장에 숏크리트를 타설하는 모습이다.



(a) 슬럼프 측정



(b) 타설 실시



(c) 타설 완료된 몰드



(d) 공시체 채취

그림 3.7.35 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 모습

다. 타설실험 결과

(1) 고강도 다기능 평가

(가) 압축강도

압축강도 측정 결과 실리카 흄을 혼입한 고강도 다기능 레디믹스트 숏크리트 배합인 RM-SF 배합의 재령 1일 압축강도가 19.7MPa로 발현 됨을 볼 수 있었으며 재령 28일 압축강도는 45.1MPa로 초기강도 및 장기 강도 모두 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 실리카 흄의 높은 포졸란 반응성에 의해 매우 치밀한 구조가 형성되기 때문으로 파쇄대 및 연약 암반 구간 등의 현장 상황에 적용 할 경우 충분한 안정성을 확보 할 수 있을 것이라고 사료된다. 그리고 차수용 혼화제가 혼입된 RM-차수 배합의 경우에도 초기 강도 및 장기 재령 강도에서 숏크리트 품질 기준 강도를 훨씬 상회하는 우수한 강도 특성을 얻을 수 있었다.

실리카 흄을 혼입한 현장-고강도 배합의 경우 현장-울산 배합보다 우수한 강도 특성을 얻을 수 있었지만 실리카 흄이 혼입 되지 않은 Plain 레디믹스트 숏크리트에 비해서는 낮은 강도 특성을 보였다. 이는 현장골재를 사용시 발생 하는 일정하지 않은 골재 품질 및 관리 부족으로 인한 불순물 혼합 등의 요인으로 인해 발생하는 숏크리트의 품질저하를 뚜렷하게 보여주는 결과라고 할 수 있다.

표 3.7.8 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 압축강도

재령 / 배합명	압축강도 (MPa) 공시체 평균		
	1일	7일	28일
RM-P1	16.9	30.4	41.7
RM-SF	19.7	35.7	45.1
RM-차수	16.0	29.9	40.5
현장-울산	11.6	22.5	31.4
현장-고강도	15.7	30.8	36.8

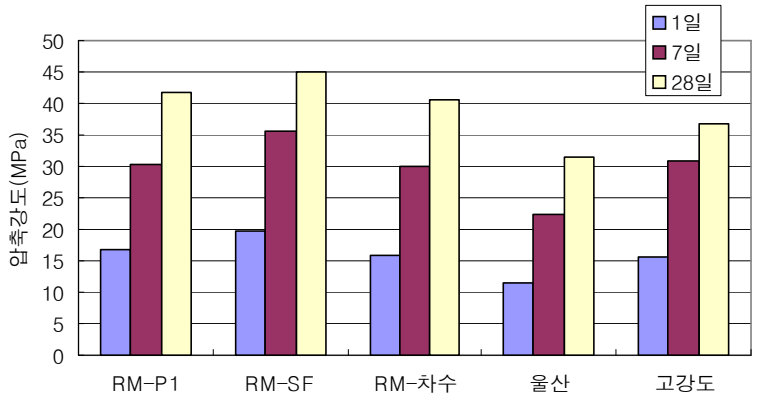


그림 3.7.36 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 압축강도

(나) 휨강도 및 휨인성

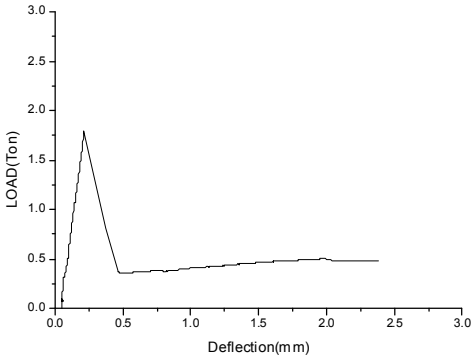
본 1차 현장타설실험에서는 실리카흄과 차수용 혼화재를 혼입하여 다기능 인자를 고려한 숏크리트의 휨강도 및 휨인성 시험을 실시하였다. 그리고 현장골재 배합 숏크리트에도 실리카 흄을 혼입하여 고강도 현장배합 숏크리트에 대한 시험도 수행하였다. 휨강도 및 휨인성 시험 결과는 표 3.7.9 및 그림 3.7.37과 같다.

시험 결과 휨강도는 모든 배합이 4.5MPa 이상으로 우수한 강도 성상이 발현 됨을 볼 수 있었고 특히 실리카흄을 혼합한 고강도 다기능 레디믹스트 숏크리트인 RM-SF 가 가장 높은 휨강도를 보였다. 이는 실리카 흄의 미세한 분말이 콘크리트의 천이 영역을 감소시켜 매우 치밀한 구조를 형성함으로써 골재와의 부착성을 증진 시키기 때문이라고 생각된다. 그러나 현장배합 숏크리트에 실리카흄을 혼입한 고강도 현장배합 숏크리트는 오히려 휨강도에서 실리카 흄이 혼입되지 않은 울산 현장배합 숏크리트 보다 작은 휨강도가 나타났는데 이는 현장골재에서 문제가 되는 이물질 혼입 및 골재 자체의 품질저하 현상 때문으로 생각 되며 레디믹스트 숏크리트 개발의 필요성을 다시 한 번 확인 할 수 있는 결과라고 생각 되었다.

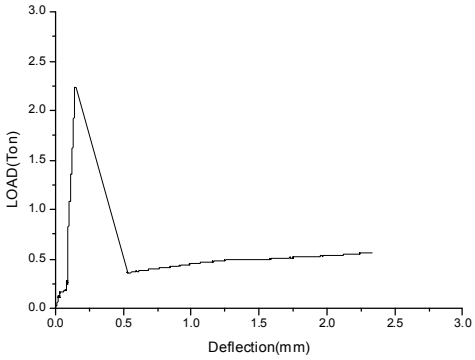
휨인성 시험결과 모든 배합이 숏크리트 품질기준인 등가휨강도 68%에 미치지 못하였고 특히 고강도 다기능 레디믹스트 배합인 RM-SF가 휨인성이 가장 낮은 휨인성 특성을 보였다. 강섬유가 혼입된 현장배합 숏크리트들은 어느 정도 휨인성이 확보되는 것으로 보이지만 HP-L 합성섬유가 혼입된 배합들은 휨인성에서 문제가 드러났다. 이는 합성섬유 자체의 문제라기 보다는 현장실험에 적용시에 여러 현장 여건에 의해 합성섬유의 타설이 제대로 이루어지지 않았기 때문이라고 생각되며, 따라서 강섬유를 대체 하여 합성섬유를 적용하기 위해서는 혼입량 늘려 휨인성을 확보해야 할 것으로 판단된다.

표 3.7.9 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설실험
휨강도, 등가휨강도, 휨인성지수

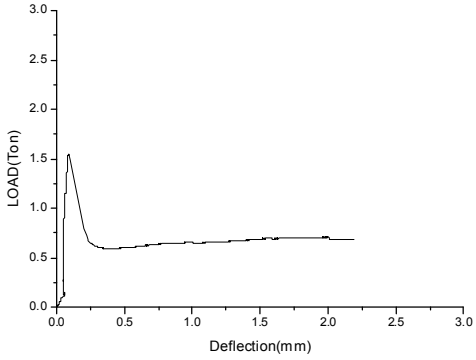
재령 / 배합명	휨인성 (MPa) 공시체 평균				
	휨강도 MPa	등가휨강도 %	휨인성지수		
			I_5	I_{10}	I_{20}
RM-P1	5.29	29.94	3.16	4.57	7.93
RM-SF	6.57	28.76	6.03	7.61	11.32
RM-차수	4.55	44.23	4.67	7.39	13.08
울산	5.63	42.32	4.14	6.96	12.51
고강도	5.25	46.67	3.87	6.57	11.03



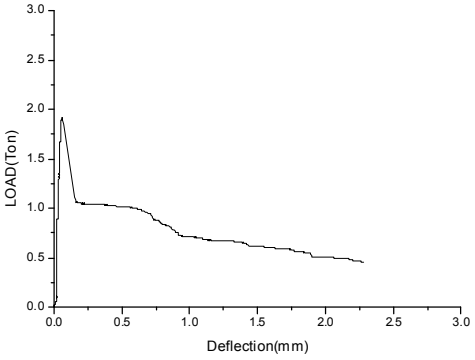
(a) RM-P1 배합



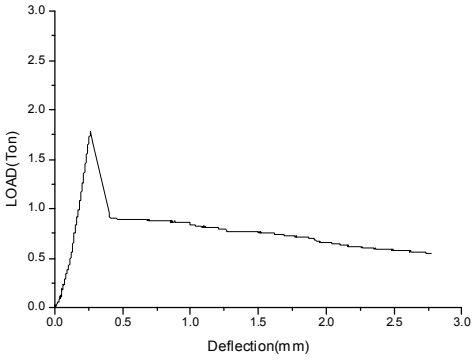
(b) RM-SF 배합



(c) RM-차수 배합



(d) 현장-울산



(e) 현장-고강도

그림 3.7.37 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 하중-처짐 그래프

(2) 차수 다기능 평가

고차수성 다기능 레디믹스트 숏크리트 배합의 차수성 검토를 위해 수은압입 시험을 통한 배합별 공극량 분석을 수행하였다. 수은압입시험 결과 시료 1g 당 총 공극량으로 표 3.7.10과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

실험 결과 고차수성 다기능 레디믹스트 숏크리트 배합인 RM-차수 배합의 1g당 공극량은 0.0515cm^3 로 다른 배합에 비해 가장 작은 값을 나타냈다. 이는 차수용 혼화제가 혼입됨으로써 시멘트 내부의 구조를 치밀하게 만들었기 때문이라고 판단되며 모든 배합 중 차수 성능이 가장 우수 할 것이라고 예상 할 수 있다. 따라서 지하수 유출 구간이나 차수가 필요한 타설 구간에 충분한 적용성을 가지고 있다고 사료된다. 실리카 흄이 혼입된 RM-SF 배합도 Plain 레디믹스트 숏크리트에 비해 작은 공극 량을 나타내어 실리카 흄 혼입에 의한 숏크리트 조직의 천이 영역감소 효과를 확인 할 수 있었다. 현장골재 사용 배합의 경우는 둘 다 레디믹스트 배합에 비해 40%정도 더 많은 양의 공극을 보여 타설 현장에 지하수 유출시 강도 저하 및 부착성 저하, 장기 내구성 저하 등이 발생 될 것으로 예상된다.

표 3.7.10 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 공극량 비교

배합	공극량(cm^3/g)
RM-P1	0.0701
RM-SF	0.0680
RM-차수	0.0515
울산	0.1062
고강도	0.1020

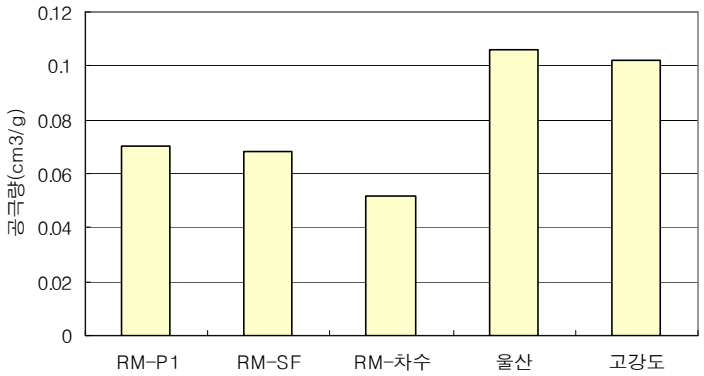


그림 3.7.38 다기능 레디믹스트 숏크리트 현장타설 실험 공극량

4. 다기능 레디믹스트 숏크리트 최적 배합 도출

본 절에서는 다기능 레디믹스트 숏크리트의 최적화된 표준 배합을 도출하기 위한 연구를 수행하였다. 먼저 국내·외 터널 현장의 시공 현황 및 터널 막장 붕락 유형을 분석하여 고강도 및 고차수성의 두가지 다기능 인자를 선정하였다. 그리고 각 인자에 효과적으로 대응이 가능한 다기능 레디믹스트 숏크리트 개발을 위해 기본 레디믹스트 숏크리트 배합에 기능성 혼화재를 혼입량을 다르게 하여 기초물성평가 및 현장 적용성 평가를 수행하였다.

고강도용 기능성 혼화재로는 초기 및 장기 강도 발현성이 검증된 실리카흄을 사용하였으며, 혼입량을 변화시킨 배합의 실내 및 현장 적용성 평가를 통해 시멘트 중량의 5%를 치환 배합으로 도출하였다.

고차수용 기능성 혼화재료는 강도/부착성능이 양호하며, 염소이온 투과성능에서 우수한 기능을 발휘한 EVA계 폴리머를 적용하였으며 혼입량은 총 분체량의 1.5%로 도출하였다.

본 연구개발을 통해 도출된 다기능 레디믹스트 숏크리트 최종 배합은 표 3.7.11과 같다.

표 3.7.11 다기능 레디믹스트 숏크리트 최적 배합

배합명	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재				혼화재	
						S1 (kg)	S2 (kg)	S3 (kg)	S4 (kg)	실리카흄 (kg)	차수용 혼화제 (kg)
RM-고강도	8	12 ±2	45.6	212	442	560	347	332	347	23	-
RM-차수					465					-	30

5. 소결론

본 절에서는 현장상황에 따라 특성화된 기능을 발휘하는 다기능 레디믹스트 숏크리트의 개발에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 국내 터널 현장의 시공 현황을 파악하고 개발이 시급한 다기능 인자를 도출하였다. 그리고 다기능 인자에 따른 초기 배합을 결정하고 성능 발휘 실험을 실시한 뒤 현장에 타설하여 적용성 평가를 수행하였으며 이 결과를 토대로 다기능 레디믹스트 숏크리트의 최적 배합을 도출하였다. 본 절에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 국내 터널붕락 자료의 분석 내용을 참고하고 현장설문조사를 통해 얻은 실무의견들을 수렴하여, 다기능 레디믹스트 숏크리트의 여러 가지 기능성 중에서 고차수성과 고강도를 주요 기능 인자로 채택하고 개발 방향을 결정하였다.

(2) 다기능 레디믹스트 숏크리트 초기개발을 위해 재유화형 분말수지 2종을 선택하여 적용성 평가를 수행한 결과 합성 수지 혼입시 Plain 배합 대비 13%정도의 강도 증진 효과를 보였으며 부착강도에서는 W-VAV 배합과 W-EVA 배합 모두 15~22% 정도의 부착강도 증진 효과를 보였다. 그리고 염소이온투과 시험결과 재유화형 분말수지를 혼입한 배합에서 대체로 양호한 결과를 나타내며 차수 기능이 발휘 됨을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 폴리머가 숏크리트 매트릭스 내에서 연속적인 폴리머 필름을 형성하여 내부 구조를 매우 치밀하게 만든 결과라 판단되며 장기적인 내구 성능 측면에서도 매우 양호한 재료라고 생각된다.

(3) 고강도 다기능 레디믹스트 숏크리트를 위해 실리카 흄을 배합한 경우 시멘트량 대비 5% 및 8% 혼입시에 모두 45 MPa에 가까운 압축강도가 발현됨을 확인 할 수 있었으며 연약 암반 구간 혹인 파쇄대 구간 등 고강도 숏크리트가 필요한 구간에 충분히 적용 할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 고차수성 다기능 레디믹스트 숏크리트 배합의 차수성 검토를 위해 수은압입시험을 실시한 결과 차수용 혼화제를 혼입한 배합의 공극량이 0.0515cm^3 로 현장골재 대비 약 50% 정도로 가장 작게 나타났다. 따라서 지하수 유출 구간이나 차수

가 필요한 현장 타설 구간에 적용시 충분한 차수 효과를 발휘 할 수 있을 것이라고 사료된다.

(5) 본 연구를 진행하며 실내실험 및 현장실험을 통해 도출한 다기능 레디믹스트 숏크리트의 최적 표준배합은 다음과 같다.

표 3.7.12 다기능 레디믹스트 숏크리트 최적 배합

배합명	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재				혼화재	
						S1 (kg)	S2 (kg)	S3 (kg)	S4 (kg)	실리카흄 (kg)	차수용 혼화제 (kg)
RM-고강도	8	12 ±2	45.6	212	442	560	347	332	347	23	-
RM-차수					465					-	30

제 8 절 레디믹스트 숏크리트 장기내구성 평가

1. 숏크리트 장기내구성 고려 인자 파악

가. 성능 저하 유발 열화 인자

(1) 개요

숏크리트를 영구적인 터널 라이닝으로 사용하려는 시도가 늘어나면서 숏크리트의 내구성에 대한 관심이 크게 증대되고 있다. 하지만 아직까지 숏크리트의 내구성에 대한 정확한 실험적, 이론적 규명이 이루어지지 않은 상태여서 그 적용에 있어 문제가 제기되고 있다.

숏크리트는 다양한 혼합물로 구성된 매우 복잡한 재료여서 그 성능과 효과에 영향을 미치는 많은 변수 들을 가지고 있다. 대표적인 것으로 급결제, 혼화제, 혼화재 등의 사용재료와 타설 장비의 종류와 상태, 타설 시 압축공기의 양, 타설 노즐의 효율성, 숏크리트 분사 각도 및 거리, 타설 방법, 타설 후 양생방법등을 들 수 있다. 이 모든 변수들이 숏크리트가 사용된 구조물의 설계년한과 관계를 가지며 또한 내구성에 지대한 영향을 미치게 된다.

한편, 숏크리트 내구성 저항에 따라 나타나는 성능저하의 현상으로는 여러 가지를 들 수 있으나 대표적인 것으로 투수에 의한 성능저하를 들 수 있다..

투수성은 숏크리트 내구성을 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나이지만 이에 대한 연구결과는 거의 전무한 실정이다. 이에 본연구의 성능 저하 유발 열화인자 중 투수에 의한 성능저하에 관한 특성을 검토하고자 한다.

(2) 투수에 의한 성능저하

(가) 수분상태의 개면과 열화인자

콘크리트중의 수분상태를 크게 분류하면 포화대와 불포화대가 있다. 전자는 공극이 물에 의해 채워진 상태이고, 후자는 공기가 혼입되고 있는 상태이다. 수분은 콘

크리트 중에서 유리수, 모세관수, 흡착수, 겔수, 화학적 결합수 등으로 복잡한 형태로 존재하고 있으며, 콘크리트 내부로부터 증발 가능한 수분은 유리수, 모세관수, 흡착수이며 이들을 자유수 혹은 증발성 수분이라고 칭한다. 한편, 겔수(일부는 증발의 가능성 있음)나 화학적 결합수는 결합수 혹은 비증발성 수분이라고 칭한다. 여기서 열화현상의 대상은 자유수인데, 상술한 봐와 같이 존재형태가 차이가 있기 때문에 모세관력의 차이도 커서 증발한 에너지도 차이 있다. 개념적으로는 유리수부터 모세관수, 흡착수의 순으로 공극크기는 작아져 증발에너지는 커진다. 이와 관련하여, 건조수축에서는 모세관수와 겔수를 수축응력 발생의 주요 요인으로 하고, 유리수는 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다. 반대로, 열화인자의 수송에 관한 관점에서 고려하면 유리수와 모세관수가 주요 요인으로 생각된다.

(나) 수분이동과 열화인자

수분의 이동은 기본적으로 표면에서의 증발 및 부착에 따른 모세관내의 유동이다. 콘크리트중의 수분이 감소하는 것은 수분이 액상수에서 수증기로 상변화하여 표면부터 증발하게 된다. 반대로, 수분을 얻게되는 것은 표면에 부착 혹은 침수상태에서 모세관력에 의해 비교적 짧은 시간에서 내부로 침투한다. 일반적으로 침수상태에 있으면 중력 및 압력에 의해 장시간을 걸쳐 침투하고 포화상태로 된다. 단, 균열이나 이음 등 방수결함부가 있을 경우에는 국부적으로 단시간에 중력이나 압력에 의해 침투현상이 발생한다. 콘크리트는 개념적으로 치밀한 조직이므로 물질의 침투에 대한 저항력은 크지만, 내구성과 같이 시간적 스케일에서 고려하며, 포화상태와 불포화상태, 혹은 그들의 반복되는 상태는 물질의 침투에너지에 차수(order)가 크게 차이 있다. 결국, 동일한 콘크리트에 대해서도 그의 수분상태 따라서 전혀 틀린 성질을 나타낼 수 있다.

그림 3.8.1은 수분이동과 열화인자 이동의 개념을 보여준 것이다. 그림 3.8.1의 우측은 증발에 따른 건조과정에서의 열화인자의 침입・농축・확산, 좌측은 수분의 흡수・흡습과정에 대한 인자의 칩입의 개념을 보여주고 있다. 이 과정을 각각 분리하여 보다 상세하게 그 메커니즘을 보여준 것이 그림 3.8.2와 그림 3.8.3이다.

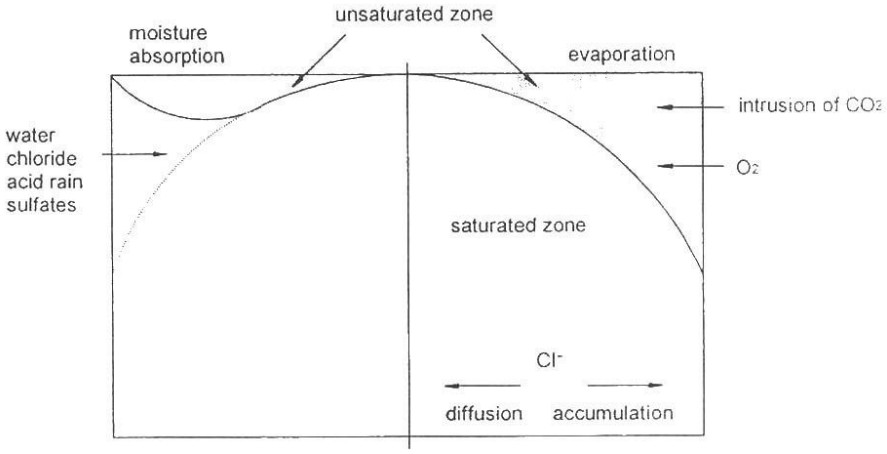


그림 3.8.1 수분이동과 열화인자 이동의 개념

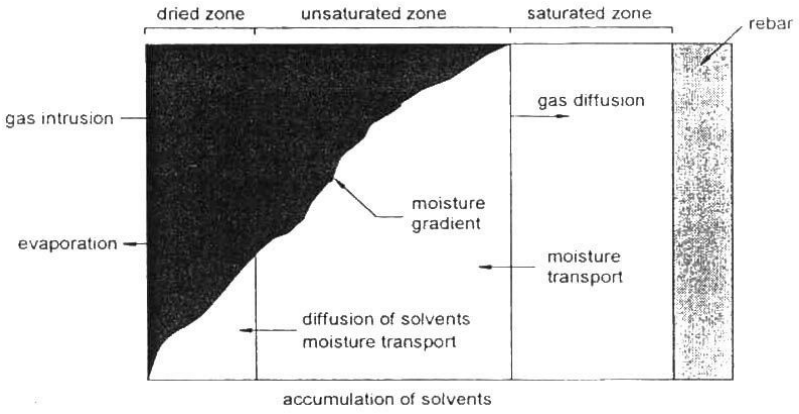


그림 3.8.2 건조과정 중 열화인자의 개념

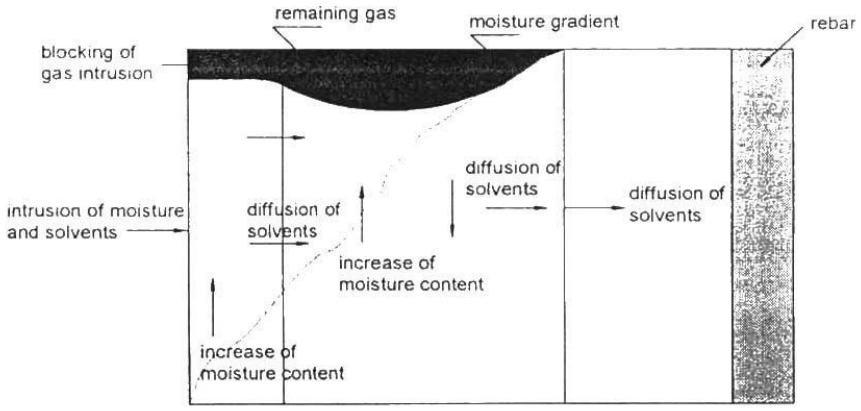


그림 3.8.3 흡수과정동안의 열화인자의 개념

먼저, 열화 인자로서의 물질을 크게 분류하면 이온이 물에 용해된 용질과 가스가 있다. 전자는 물, 염소이온, 황산이온 등이고, 후자는 산소나 이산화탄소이다.

다음, 전자 및 후자의 이동은 일반적으로 확산원리와 연결시킨 확산방정식에 적용시켜 시간경과에 따라 내부로 확산 침투하는 것으로 취급하는 것이 많다. 그러나, 이는 어디까지나 현상을 정량적으로 표현한 것으로서, 실제에는 항상 포화 혹은 불포화상태에서 수분의 함수상태가 안정할 경우에 적용이 가능하다.

한편, 건습을 반복할 경우 이동현상은 상당히 복잡하다. 용질의 경우는 증발과정에서 침입한 것이 역으로 표면부로 이동하여 농축된다. 다음, 습윤 과정에서는 불로화부에서 용질이 모세관유동(흡수과정)에 의해 침입되어, 겉보기 확산계수는 크게된다. 포화부내에서는 표면부터 철근방향으로 분자가 확산된다. 결과적으로 용질이 철근으로 가는 수송력으로서 가장 큰 것은 건조과정부터 습윤 과정으로 전환하는 흡수과정이다. 그러므로, 형성된 불포화대의 두께와 철근위치(피복)의 관계가 중요한 포인트로 된다. 한편, 가스의 경우는 건조과정이 계속되면, 불포화대의 발달이 현저하게 된만큼 연속 공극이 확대되고, 확산침입속도 및 양이 증대한다. 그리고, 급격한 증발이 발생한 경우에서는 대류이동을 발생시킨다.

(다) 열화현상에 있어서 수분이동

상술한 바와 같이 콘크리트중의 수분의 상태가 열화현상에 지배적이라고 말해도 과언이 아닌 정도로 중요한 의미를 갖고 있다. 종래는 이에 관해서 상세한 정보를 바탕으로 한 규명은 없었고, 환경 조건으로서 포괄적으로 다룬 정도이었다. 현재도 상세히 수분상태를 파악하는 것이 어렵고, 단지 각종 열화에 대해 수분의 영향을 고려하는 방법만을 제시하고자 한다.

1) 중성화

중성화의 열화인자는 공기 중의 이산화탄소이다. 이 경우는 모재가 그의 확산경로로서 이산화탄소의 확산 촉진 영부에 영향을 미친다. 기본적으로 가스의 확산은 액상중에서는 작고, 기상 중에서는 크다. 그러므로, 중성화가 촉진되는 것은 모재가 건조환경에 있고, 불포화대가 주도한 상황이라고 생각된다. 단, 일반적으로 옥외에서는 건조환경에 있는 경우는 적다. 건습 반복된 경우에서는 건조시에 증발속도가 빠르면, 즉 짧은 시간에 불포화대가 되면, 건조상태의 유지기간이 길어진다. 모재에서의 증발에

의해 건조대에서 가스의 대류가 생긴다. 이는 통상의 확산레벨보다 매우 크다. 예를 들면, 건물의 남향벽면은 강우에 의해 젖어지고, 바람이나 햇빛에 의해 건조가 빠르다고 사료되어, 이산화탄소의 침입이 촉진될 것으로 생각된다. 이와 같은 상황은 일정 깊이까지는 건조지배상황보다 중성화가 더욱 빠른 상황이라고도 고려된다.

2) 동결융해

동결융해에 있어서 수분은 상술한 기타의 열화이자의 침입·확산경로의 영향과는 다르게, 직접적인 열화인자로 볼 수 있다. 결국, 수분의 동결에 의한 팽창압에 따라 미소파괴가 계속됨으로서 열화가 진행된다. 그림 3.8.4는 동결융해의 수분이동과 동결대의 발전, 발생 응력의 개념을 보여준 것이다.

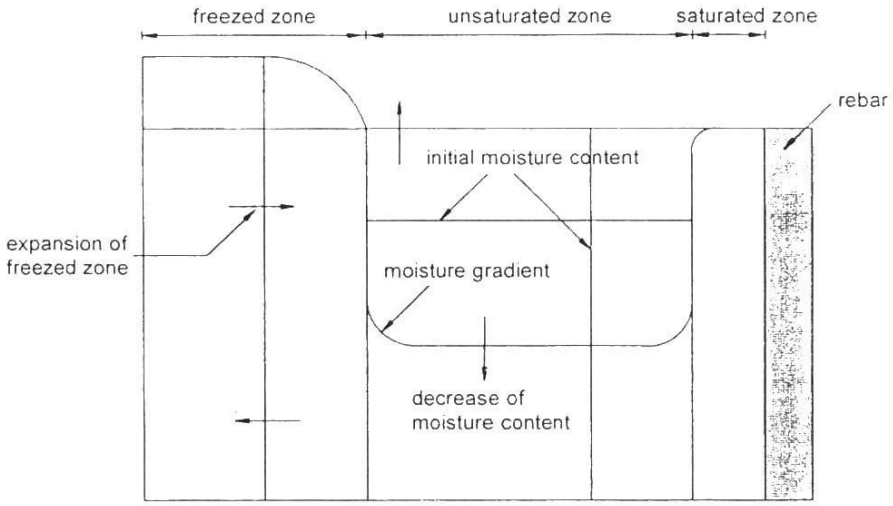


그림 3.8.4 동결과정 중에서의 수분의 이동

동결융해는 먼저 표면에서 생기기 때문에 적어도 표면부는 포수상태에 가까운 것이 조건이다. 그러므로, 대상으로 된 구조물이나 부위에서는 강우 혹은 결로 등 수분공급환경에 있는 것이 필요하다. 수분의 관점에서 볼 때 표면에 동결대가 형성되면 그의 발전에 따라 콘크리트 중의 수분을 흡수하게 된다. 따라서, 동결융해 fornt 부근에서 특히 큰 응력차가 발생한다. 이 수분은 모세관 유동에 의해 이동하여 이에 따른 함수율이 감소된 부위에서는 반대로 수축이 발생한다. 단, 콘크리트가 치밀하면 수분공급이 부족해도 동결대의 발전은 저해된다. 이는 물-시멘트비가 작은 치밀한 콘크리트에서 동결융해가 발생하지 않은 이유중의 하나이다.

3) 알칼리 실리카 반응

알칼리-실리카 반응(ASR)을 발생시키는 조건으로서 수분은 매우 중요하다. 열화 촉진에 필요한 수분량이 충분하지 않은 경우는 콘크리트 중에 존재한 수분보다는 외부로부터 공급받는 것에 의해 열화는 더욱 가속화된다. 명확한 데이터는 없지만, 구조체로 균열 등에 의해 물이 침입된 경우를 제외하면, 그 메커니즘으로서 염해와 같이, 습윤환경과 건습이 반복된 경우 내부로의 흡수는 더욱 효과적으로 진행된다. 단, 건습 사이클과의 관련성은 규명되지 않고 있다.

4) 화학적 침식

화학적 콘크리트의 열화는 조직의 파괴나 팽창, 또는 수화물의 용출에 따른 것이므로, 매체는 용액 혹은 가스가 있다. 이 경우는 조직의 파괴가 표면부터 진행된다. 그러므로, 수분상황은 그 원인(하수, 온천, 공업폐수)에 따라서 크게 영향을 받을 것으로 생각되며, 일반적인 이론에 의하면 열화가 발생한 환경으로서 습윤한 경우가 많다. 이는 가스 발생보다도 용액에 의한 경우가 많은 것을 의미하며, 주로 용액이 콘크리트 중에 정착함에 따라 열화가 발생하는 것으로 사료된다.

(라) 숏크리트 투수성

콘크리트 구조물의 내구성을 결정하는 가장 중요한 인자는 투수성이라 할 수 있다. 낮은 투수성을 갖는 콘크리트일수록 구조물 내부로의 열화요인의 유입을 줄일 수 있으므로 내구적 측면에서 유리하다 할 수 있다. 따라서 숏크리트에 있어서도 낮은 투수성을 확보하는 것이 내구성을 확보하는 가장 확실한 방법이다. 숏크리트에서 저투수성은 다음과 같은 방법으로 확보될 수 있다.

① 적절한 시멘트 함량
② 감수제를 이용한 낮은 물/시멘트비 적용 (약 0.45 이하)
③ 실라카 흄 또는 플라이애쉬 같은 포졸란계 혼화재 사용
④ 강섬유에 의한 균열 제어
⑤ 적절한 알칼리프리계 또는 실리케이트계의 급결제 사용
⑥ 적절한 양생방법 적용

그림 3.8.5는 Concrete Society(UK) Technical Report(1998)에 보고된 숏크리트의 현장 타설에 의한 투수성 실험결과가 나타나 있다. 강섬유가 사용된 콘크리트 라이닝의 경우 산소와 염소의 확산에 대한 규정을 명시하여야 된다. 또한 보강재로서 강섬유만 사용된 콘크리트의 경우 산소와 염소이온에 의한 부식의 영향을 거의 받지 않으므로 수분의 침투에 대해서만 주의하면 된다.

투수성은 숏크리트의 내구성을 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나이지만 이에 대한 연구결과는 거의 전무한 실정이다. 투수성이 낮은 콘크리트가 투수저항성이 높은 것은 분명하지만, 엄밀히 말하자면 투수성이 낮더라도 건조수축작용에 의해 내부 미세균열을 포함한 콘크리트보다는 조금 높은 투수성을 갖더라도 전혀 균열이 없는 콘크리트가 투수저항성이 더 높다고 여겨지고 있다.

현재까지의 연구 결과를 살펴보면 Hills는 표면흡수실험을 통해 건·습식 숏크리트의 투수성능은 건식의 경우 약 0.14~0.35㎖/㎡s, 습식의 경우 0.35~0.41㎖/㎡s으로 습식 숏크리트가 약간 높은 투수성을 보인다고 보고하였다. 또한 Concrete Society에서는 보통의 성능을 갖는 숏크리트의 경우 0.17~0.35㎖/㎡s 정도의 투수성을 갖는다고 발표하였다.

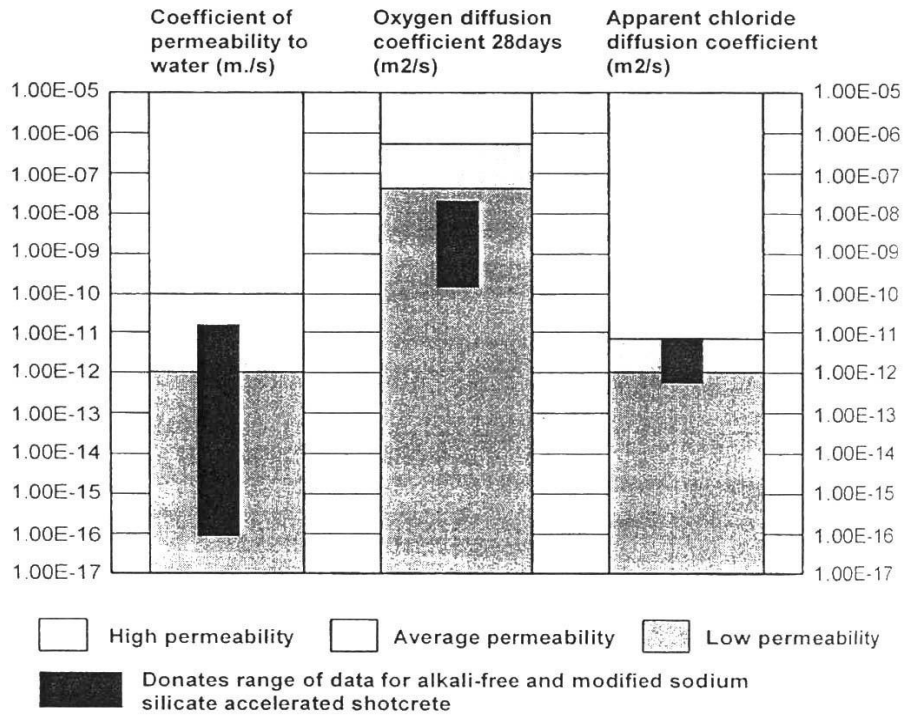


그림 3.8.5 알칼리 프리계 및 변성 실리케이트 급결제를 이용한 숏크리트의 투수 시험 결과(Concrete Society Technical Report, 1998)

Schrader와 Kaden은 건식 숏크리트의 경우 강도에 따라 3×10^{-10}~ 3×10^{-13}m/s의 투수성을 갖는다고 발표하였고, Opsahl과 Buhre는 실리카 흄을 혼입한 습식 숏크리트에서 채취한 코어의 투수성을 발표하였다. 이에 따르면 45MPa 강도의 숏크리트는 2×10^{-14}~1×10^{-13}m/s, 75MPa 강도의 경우 10^{-15} 이하인 것으로 나타났다. 이를 통해서 숏크리트의 투수계수가 10^{-12}m/s 이하이면 투수저항성이 높은 것으로 간주하였다.

Ramakrihnan은 Krantz의 숏크리트 투수성에 관한 연구 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 내렸다. 일반적인 콘크리트에서와 마찬가지로 숏크리트는 강도가 감소할수록 투수성이 증가하는 경향이 있으며, 물/시멘트비가 증가하면 투수성도 같이 높아진다는 것이다.

Opsahl은 도한 숏크리트에 강섬유가 첨가되면 일반적으로 투수성이 감소하나 이것이 숏크리트의 투수저항성을 높이는 방법은 아니라는 것을 확인하였다. 오히려 숏크리트의 양생조건이 다른 조건들보다 더 투수저항성에 영향을 미친다고 주장하였다.

나. 외관 열화 인자

(1) 숏크리트 표면의 백색화

LA(Sodium Aluminate)를 사용하고 현장에서 타설되어진 숏크리트 표면의 일부가 황색 및 백색으로 변색되는 현상이 나타나는 경우가 자주 발생하는데, 이러한 현상이 나타나는 원인 및 LA와의 관련성 여부를 검토하였다. LA를 사용하여 타설되어진 숏크리트 표면의 일부가 백색화되는 현상이 나타나고 있는 현장을 직접 방문하여 숏크리트 표면의 상태를 확인한 결과, 숏크리트 표면의 백색화 현상이 발생하는 영역은 누수가 일어나는 부분에 집중되어 있음을 확인하였다.

(가) 발생원인

숏크리트 표면의 백색화가 나타나고 있는 부분은 대부분 누수가 발생하고 있는 부분이다. 이러한 점을 고려해 볼 때 숏크리트 표면의 백색화는 누수현상으로 인하여 나타나는 백화현상(efflorescence)으로 판단되어진다.

콘크리트 구조체 내부로 물이 지속적으로 스며들게되면, 콘크리트 경화체 내부에서 수산화칼슘($Ca(OH)_2$) 등이 용출되어 진다. 용출되어진 수산화 칼슘이 물을 따라 콘크리트 표면으로 이동한 후 대기중의 CO_2와 반응하게 되며, 물이 증발되어지고 결정화(crystallization)가 일어난다. 이렇게 결정화되어진 $CaCO_3$가 콘크리트 표면에서 백색 부분을 형성한다.

(나) 백색부분의 성분분석 및 LA와의 관련성

숏크리트 표면에서 나타나고 있는 백색부분의 성분 분석 및 LA와의 관련성을 검토하기 위하여, 현장 직원의 입회하에 채취한 샘플에 대한 XRD, DSC, DTA/TG 분석을 수행하였다. 분석은 샘플을 건조시킨 후 잔골재를 제거한 다음 분쇄한 상태로 수행하였다.

그림 3.8.6과 3.8.7은 백색표면의 XRD 및 DSC 분석결과를 나타낸 것인데, 백색표면의 주성분은 $CaCO_3$로 나타났다. LA의 주성분은 Na와 Al로써 시멘트 중에서는 NaOH와 $Al(OH)_3$로 분해된다. 따라서 백색표면이 LA의 사용으로 인하여 발생한다면 백색표면 부분에서 다량의 Na_2CO_3($NaOH$는 공기중의 CO_2와 반응하여 Na_2CO_3로 쉽게 변화됨) 및 $Al(OH)_3$가 나타나야 하나, 기기분석 결과 나타나지 않았다.

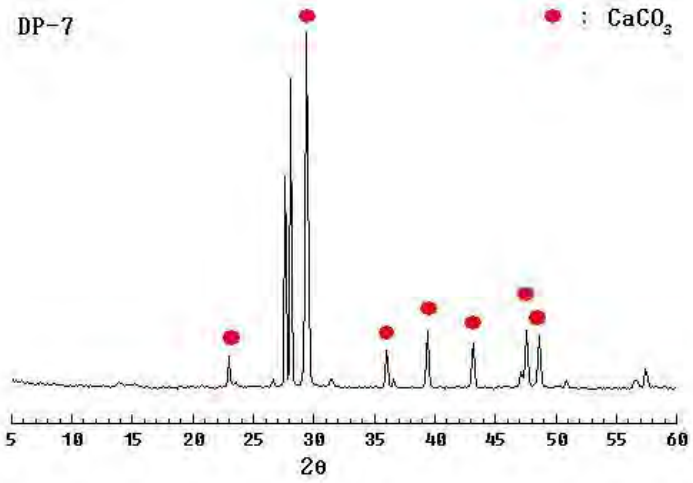


그림 3.8.6 백색표면의 XRD 분석결과

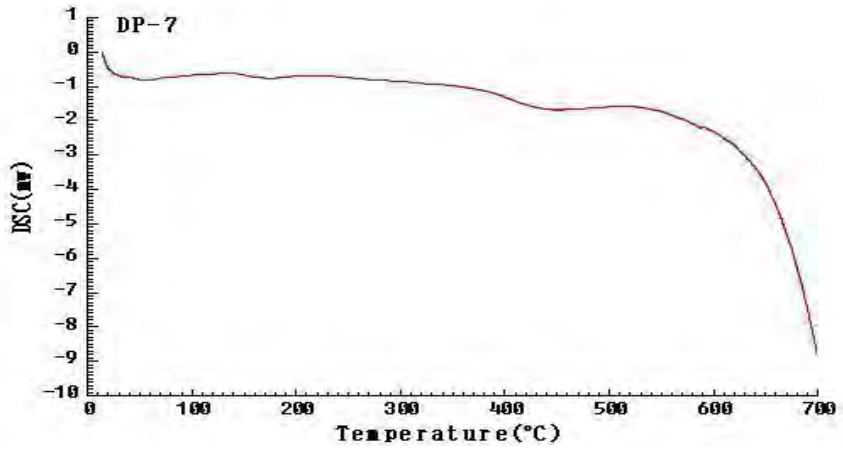


그림 3.8.7 백색표면의 DSC 분석결과

$Al(OH)_3$가 존재할 경우 DSC 곡선과 DTA 곡선에서 이를 확인할 수 있으나(약 260℃ 부근에서 흡열 피크가 나타남) 검출되지 않았다. 또한 DTA/TG 곡선에서는 약 800℃부터 흡열피크 및 중량감소가 나타나고 있는데 이것은 $CaCO_3$의 열분해에 의한 것이다.

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2(gas)\uparrow$$

이상의 기기분석결과 숏크리트 표면의 백색부분은 백화현상에 기인한 것이며 LA로 인하여 발생하는 것이 아님을 확인하였다.

(다) 결론

이상의 분석결과 및 현장 상황을 고려하여 볼 때, 숏크리트 표면에서 나타나고 있는 백색화 현상은 LA의 영향으로 나타나는 현상이 아니라 다량의 누수에 의해서 발생하고 있는 백화현상임을 확인할 수 있었다.

(2) 숏크리트 표면의 황색화

터널 등 급결제를 사용하는 현장에서는 숏크리트 표면의 백색화 현상과 함께 부분적으로 황색을 나타내는 부분이 관찰되어진다. 숏크리트 표면에 황색부분이 나타나는 원인 및 성분분석을 수행하였다.

콘크리트 표면의 변색 원인을 확인하기 위하여 LA 급결제를 사용한 콘크리트와 사용하지 않은 콘크리트를 각 각 3ℓ 믹싱하였으며, 각각의 콘크리트를 2영역으로 나누어 한 영역은 그대로 방치하였으며 다른 영역에는 LA 급결제를 콘크리트에 혼합되지 않은 상태로 과잉 첨가하여 표면의 색상 변화를 관찰하였다.

또한 LA를 5% 첨가하여 준비한 몰탈을 15ø몰드에 넣어 색상 변화를 관찰하였다, 이때 한 시편은 교반을 충분히 시켜주었으며 나머지 몰드는 교반시간을 줄임으로써 급결제가 충분히 혼합되지 않도록 하였다.

위와 같은 실험결과, 급결제가 완전히 혼합되지 않은 시편(콘크리트, 몰탈)에서는 LA 급결제로 인하여 표면에 황색 부분이 나타남을 확인하였다. 황색부분의 색상은 급결제가 혼합되지 않는 정도 및 급결제의 양에 따라 더욱 선명하게 나타났다.

(가) 숏크리트 황색 부분의 성분분석

그림 3.8.8과 그림 3.8.9는 숏크리트 황색부분의 성분분석 결과이다. 황색부분의 성분을 분석하기 위하여 시멘트 페이스트 표면에 과량의 LA 급결제를 투입한 후, 페이스트가 완전히 건조된 상태에서 나타난 황색부분을 채취하여 XRD (X-Rayayiffracter),트 표면(yifferentialㅌScanning Calorimeter),트ff/yay(ahermalㅌ Gravity, Differential Thermal Analysis)를 사용하여 성분을 확인하였다.

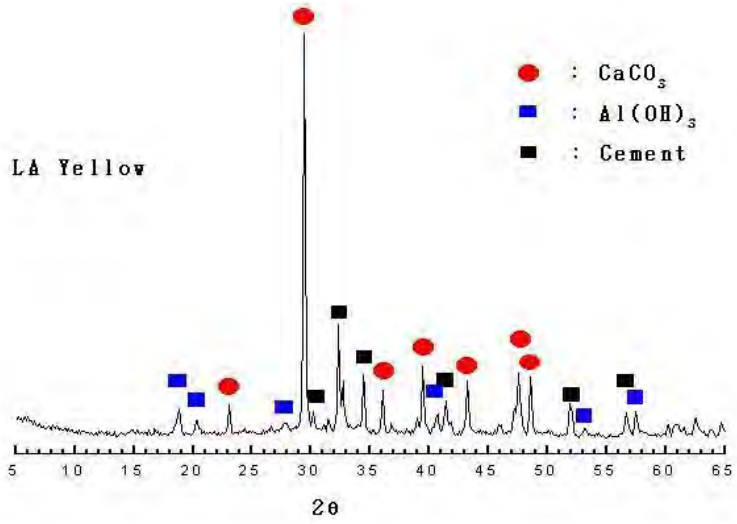


그림 3.8.8 황색표면의 XRD 분석결과

XRD 회절 피크를 분석한 결과 황색부분의 주성분은 $CaCO_3$(탄산칼슘), $Al(OH)_3$(수산화 알루미늄), 시멘트 수화물로 나타났다(XRD 측정결과 참조). 또한 XRD 분석결과를 뒷받침 하기 위하여 DSC, TG/DTA를 측정하였다.

DSC는 700℃ 이하의 저온영역을, TG/DTA는 1100℃까지의 고온영역을 분석하기 위하여 측정하였는데, 53℃에서의 피크는 시편에 포함된 물의 증발에 의해 나타난 피크이며 105℃에서의 피크는 페이스트 표면에서 시편을 채취시에 시멘트 부분이 일부 포함되어 나타난 시멘트 수화물의 피크이다. 243℃에서 나타나는 피크는 $Al(OH)_3$가 열분해 되면서 나타나는 피크이다.

$$2Al(OH)_3 \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2O$$

TG/DTA에서도 DSC와 유사한 피크가 나타났으며 약 820℃에서 나타나는 피크는 중량감소가 크게 나타나고 있으며 XRD 피크와 연관시켜 볼 때 $CaCO_3$가 열분해 되며 나타나는 피크이다.

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

일반적으로 순수한 탄산칼슘은 약 890℃에서 열분해 반응을 일으키나, 시멘트중

에서의 경우 다른 성분들과 고용체를 형성하거나 결정이 완전히 발달하지 못하기 때문에 이보다 낮은 온도에서 열분해 된다.

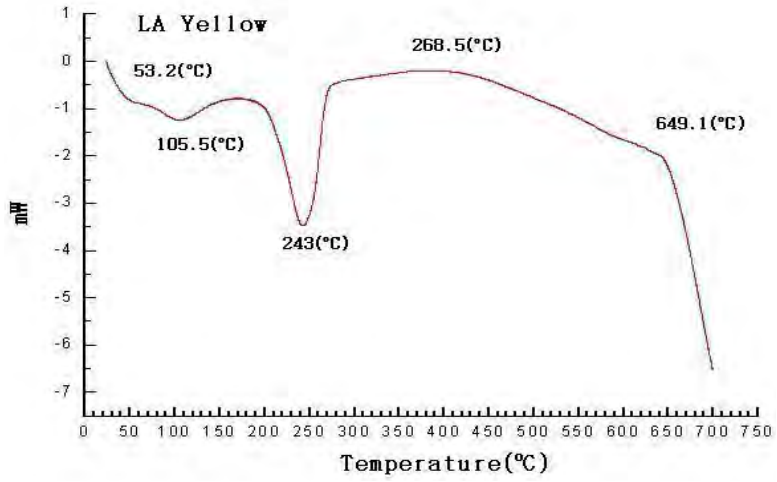


그림 3.8.9 황색표면의 DSC 분석결과

(나) 현장 샘플의 분석

LA를 사용하여 숏크리트를 타설하는 현장에서 발생하는 표면의 황색화 현상이 모의실험과 동일한 원인으로 발생함을 확인하기 위하여, 황색화 현상이 발생한 현장을 직접 방문하여 채취한 시편에 대한 기기분석을 수행하였다.

샘플의 채취는 황색화 현상이 두르러지게 나타난 영역에서 골재가 포함되지 않도록 표면만을 대상으로 하였으며 수분의 제거를 위하여 건조시킨 후 분석을 하였다.

그림 3.8.10과 그림 3.8.11은 현장샘플에 대한 분석결과인데, 그림 3.8.8과 그림 3.8.9와 매우 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있으며, 이러한 결과들은 실험실에서의 모의실험이 신빙성이 있음을 보여주고 있다.

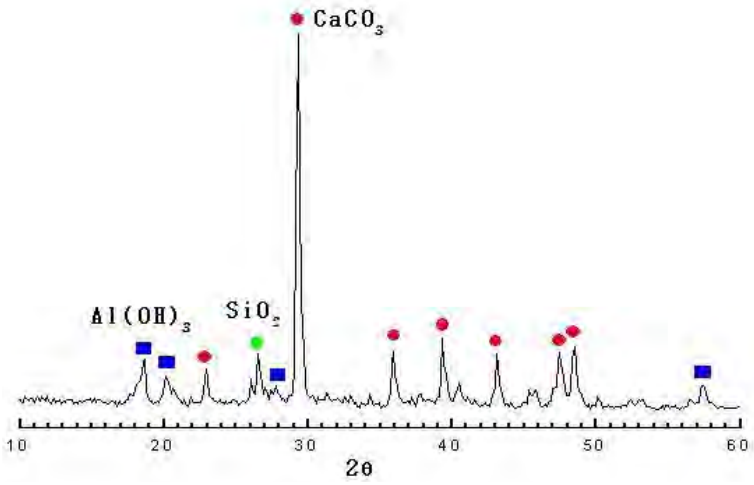


그림 3.8.10 황색표면의 XRD 분석결과(현장샘플)

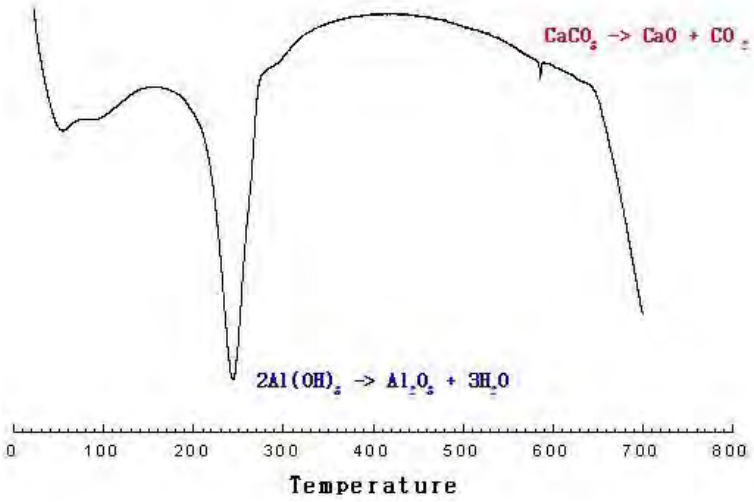


그림 3.8.11 황색표면의 DSC 분석결과(현장샘플)

(다) 결론

이상의 일련의 실험 및 분석결과 현장에서 발생되어지는 콘크리트 표면의 변색은 LA 액상 급결제의 성능문제에 의한것이라기 보다는 급결제가 콘크리트 중에서 충분히 분산되지 못하고 일부 영역에서 집중적으로 분포할 때 발생되는 것이며, 그 성분은 $CaCO_3$, $Al(OH)_3$, 시멘트(수화물) 이다.

급결제를(LA)를 사용하는 현장에서 발생한 shotcrete 표면의 백색화·황색화 현상은 현장에서 사용중인 LA 급결제의 성능에 의한 문제가 아니며, 누수에 의해서 발생하는 백화현상 및 급결제의 집중적 분포에 의한 것으로 나타났다. 이들 두 가

지 현상은 shotcrete의 내구성에 직접적으로 큰 영향을 미치는 것은 아니며 외견적으로 나타나는 현상이다.

다만 백화현상의 경우 백화 그 자체가 큰 문제가 되지는 않는다. 다만 백화현상이 광범위한 영역에서 심하게 발생하였을 경우, 이는 숏크리트 구조체 내부에 누수가 일어날 수 있는 균열이 폭넓게 존재하고 있다는 것을 의미하므로 면밀한 조사와 대처 방안이 필요할 것으로 생각된다.

다. 타설환경에 의한 고려 인자

(1) 개 요

국내 숏크리트 공법은 지하공간의 활용과 SOC 사업의 일환인 도로 및 철도의 건설이 증가하면서 지금까지 많은 발전을 이루어 왔고, 최근 들어서는 반영구적인 지하구조물의 장기적인 사용성 및 안정성의 개념에서 그 역할이 매우 중요하게 부각되고 있다.

국내에 시공된 숏크리트 구조물은 시공 후 지하수의 유입에 의한 건습반복작용, 겨울철 일교차에 의한 동결융해, 터널 내의 대기환경에 의한 중성화 작용 등과 같은 복합적인 열화작용을 받는 것으로 예상된다. 따라서 장기적인 안정성이 고려되어야 할 숏크리트의 내구성 검토를 수행하는 경우에는 복합적 환경조건을 고려하여 열화를 파악할 필요가 있다. 콘크리트의 복합열화에 대한 연구는 현재까지 많이 수행되어 왔으나, 숏크리트의 내구성에 관한 연구는 단일 열화에 국한되어 그 연구가 다수 진행되었을 뿐, 동결융해작용과 중성화와 같은 타설환경을 고려한 복합적인 열화에 대한 검토는 아직까지 충분하게 이루어지고 있지 않다.

이에, 본 연구에서는 건습반복, 동결융해 및 중성화의 복합열화요인이 숏크리트의 내구성에 미치는 영향에 대해 정량적으로 파악함으로써, 향후 숏크리트의 열화 예측에 있어 활용되고자 건습반복을 받은 숏크리트의 동결융해저항특성, 동결융해 반복을 받은 숏크리트의 중성화진행속도 및 중성화된 숏크리트의 동결융해 저항성에 대한 특성을 검토하고자 하였다.

(2) 동결융해에 의한 성능저하

(가) 개요

콘크리트 구조물은 자연적인 혹은 인위적인 온도의 상승, 강하로 인하여 콘크리트 내부의 온도가 간극수의 동결점 아래에서 그 이상으로, 동결점 이상에서 그 이하로 떨어지는 온도변화가 있을 때 구조물 성능저하의 원인이 되는 동결융해(Freezing and thawing) 작용을 받게 된다. 이에 대한 피해 사례는 곳곳에서 발견되는데 구조물의 부분적인 내구성의 저하를 유발하기도 하며 그 정도가 심한 ezi구조물 전체의 사용상에haw타격을 주기도 한다. 숏크리트의 ezi내부 공극률이 일반 콘크리트보다 상당히 높을 뿐 아니라 터널 구조물에 이용된 숏크리트는 지하수의 빈번한 유입에 의해 많은 양의 내부 간극 수를 함유하게 되므로 동결융해 작용에 의한 피해가 발생할 가능성이 매우 높다고 할 수 있다.

(나) 동결융해 발생기구

동결융해 작용에 의한 콘크리트 구조물의 성능저하를 살펴보면 크게 다음 두 가지의 가설로서 그 원인이 설명되고 있다.

① Hydraulic pressure hypothesis
② Frost action hypothesis

이 두 가설을 중심으로 동결융해작용의 발생기구를 살펴보면 다음과 같다. 젖어있는 상태의 경화된 콘크리트가 온도가 낮아지면 시멘트 모르타르의 모세 공극 안에 있는 간극수가 얼게 되는데 이때 약 9.1%정도의 체적이 증가하게 된다. 간극에 따른 간극수의 상이한 빙점에 의해 얼지 않은 부분의 간극수가 동결부분의 수분이 소실되는 것에 대한 저항력으로 간극수압이 발생하고 모세관 작용으로 동결부분의 간극은 점진적 팽창을 한다. 또한 연속적인 간극수의 동결과 융해가 일어나는 경우 체적변화가 심화되고 반복되는 동결융해작용은 누적효과를 나타낸다.

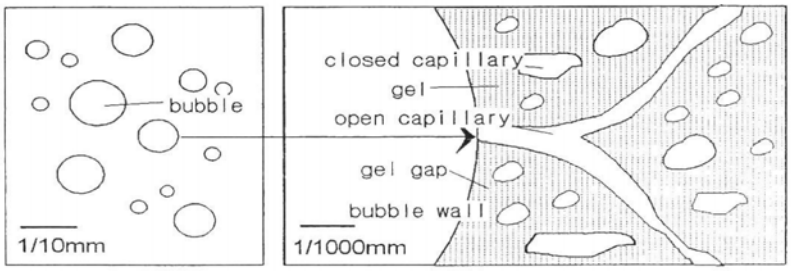


그림 3.8.12 시멘트 겔의 세공구조

이 작용은 주로 시멘트 경화체(cement paste)에서 일어나고 콘크리트 배합시에 간극이 공기로 채워지면 이로 인해 동결융해작용은 점진적으로 진행된다. 이러한 손상의 누적과정은 부분적으로 콘크리트의 열전달율에 기인하고, 또 부분적으로 얼지 않은 간극수에 용해된 알칼리성분의 점차적인 집중에 기인하며, 그리고 부분적으로 간극의 크기에 따른 동결점의 다양함에 기인한다.

공극 안 얼음체의 표면 인장력은 체적이 작을수록 크게 되며, 동결은 큰 공극으로부터 시작하여 작은 공극으로 전개된다. 공극이 매우 작은 경우의 겔 공극(Gel Pores)은 -78℃이상에서는 그 크기가 너무 작아 얼음결정을 이루기가 어렵기 때문에 실제로는 얼음 결정이 형성되지는 않으나 온도가 더 내려감에 따라 겔 상태의 공극수와 얼음체 간의 엔트로피(entropy)차이로 인하여 겔 공극수(gel water)는 얼음이 형성된 공극으로 이동할 수 있는 에너지 장을 받게 된다. 이는 동결된 얼음결정을 크게 하고 체적의 팽창을 발생시킨다.

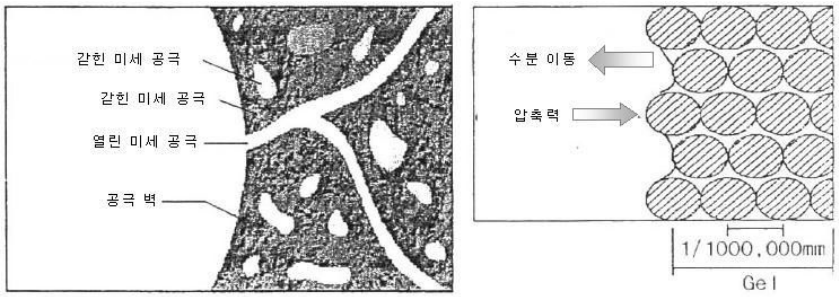


그림 3.8.13 동결에 의한 세공의 팽창

동결융해반응에 대한 초기의 연구는 이와 같은 공극수압가설(hydraulic pressure

hypothesis)이 지배적인 견해였으나 이후 Power, Helmuth 등의 연구에 의해 이 가설이 반드시 시험결과와 일치하지 않음을 발견하였다. 이들 연구에 따르면 시멘트 경화체에서 동결 중 간극수의 이동이 전적으로 동결부분의 외부로 이동하는 것이 아니라 동결부분으로 간극사이의 물이 이동하는 경우도 발생하였으며 또한 체적팽창이 동결속도가 증가함에 따라 감소하는 것도 발견하였다. 따라서 원래 흙의 동상(frost action)을 설명하기 위한 가설인 Collins 이론의 적용 가능성을 검토하였다.

Collins 이론을 적용하면 콘크리트 내부에는 두 가지 요인에 의한 팽창압력이 존재하게 된다. 첫째는 간극수가 동결함으로써 약 9.1%의 체적팽창이 생기며 이로 인한 팽창압력이다. 동결되지 않은 잉여의 수분은 간극 밖으로 밀려나가게 되는데 동결속도는 얼음체의 선단에 의해 밀려 외부로 유출되는 간극수의 속도를 결정한다. 이때 발생되는 간극수압은 이 흐름에 대한 저항, 즉 잉여의 수분을 수용할 수 있는 공기 공극(air void)과 언 공동(freezing cavity) 사이의 투수성과 경로의 길이에 따라 결정된다. 두 번째 힘은 상대적으로 작은 개수의 얼음결정체의 성장에 따른 공극수의 확산에 기인한 것이다.

수많은 연구에 의하면 후자의 동결융해반응 성능저하 기구가 콘크리트의 동결융해 손상에 중요한 요인으로 믿어지고 있다. 이 확산(diffusion)은 삼투압 작용에 의해 발생하는데 이 삼투압 작용은 용액에서 동결되는 순수한 물에 의해 집중되는 용질의 국부적인 상승으로 생긴다. 콘크리트의 온도가 동결온도 이하로 떨어졌을 때 먼저 super-cooling의 초기단계가 일어나고 이후 비교적 큰 모세관에서 얼음결정을 형성하게 된다. 이러한 형성은 결국 얼지 않은 부분의 알칼리 함유비율을 증가시키고, 동결된 공동의 용액으로 주위의 얼지 않은 부분의 물분자를 확산시키게 하는 삼투장(osmotic potential)을 형성한다.

얼음결정체에 인접한 간극수의 묽음(dilution)은 얼음의 크기를 더욱 크게 하고(ice accretion) 반면 얼지 않은 부분으로부터의 간극수의 이동은 이 부분을 수축하게 한다. 이러한 원인에 의해서 콘크리트의 팽창압력이 인장강도를 넘었을 때 콘크리트에 손상이 가해지고 콘크리트 구조물이 성능저하가 발생하게 된다.

(다) 동결융해에 의한 성능저하 형상

콘크리트 구조물의 동결융해 작용을 받아 콘크리트의 팽창압력이 인장강도를 넘었을 때 콘크리트에 손상이 가해지고 콘크리트 구조물의 성능저하가 발생하게 된

다. 손상의 정도는 표면의 층분리로 부터 시작되어 구조물 두께로 진전되는 얼음층에 의하여 콘크리트 구조물에 국부적인 응력 집중을 유발하거나 구조물의 완전한 붕괴까지 다양한 형태의 손상을 유발한다.

(라) 숏크리트의 동결융해

건식 숏크리트나 습식 숏크리트 모두 동결융해에 대해서 매우 높은 저항성을 보인다는 것이 일반적으로 알려져 있다. Litvin과 Shideler는 16가지 건식 숏크리트 배합과 22가지 습식 숏크리트 배합에 대해서 실내 실험을 실시한 결과 대부분의 숏크리트가 적절한 공기 연행만 이루어진다면 매우 높은 동결융해 저항성을 보임을 알아내었다.

낮은 물/시멘트비와 고강도를 만족하는 건식 숏크리트의 경우 사용 중에 발생할 수 있는 동결융해 환경에 매우 잘 저항한다는 것이 일반적인 결론이다. Scharder와 Kaden은 숏크리트의 동결융해 저항성은 일반 콘크리트와 같이 숏크리트 내부의 공기 연행 정도에 의해 크게 좌우 된다는 결론을 내렸다. 이들은 ASTM 급속 동결융해 실험을 통해 70MPa 이상의 고강도 숏크리트의 경우 공기 연행 없이도 상당한 수준의 동결융해 저항성을 보이는 반면에 일반적인 숏크리트의 경우 적절한 공기 연행이 이루어지지 않으면 동해에 대해서 매우 취약한 것을 밝혀냈다.

Johnston도 ASTM 급속 동결융해 실험을 통해 일반 콘크리트와 같이 강섬유 보강 콘크리트에서도 적절한 공기연행이 필요하다고 결론지었다.

건식 공법의 경우 숏크리트 내의 공기연행은 어려울 뿐만 아니라 실제로 그리 필요치 않은 것으로 알려져 있다. 습식 공법에 의해 타설된 숏크리트의 경우 내부에 약 5% 정도의 공극이 존재하며 이 양의 절반 정도만 존재하더라도 동결융해에 대한 저항성을 발휘하는데는 큰 문제가 없는 것으로 알려져 있다. 실제로 Opsahl과 Buhre는 ASTM C 666의 급속동결융해 실험을 통해 실리카 흄을 혼입한 강섬유 보강 습식 숏크리트의 경우 별도의 공기 연행제 첨가 없이 충분한 양의 공극을 확보할 수 있음을 확인하였으며, 강도가 60~70MPa 정도의 숏크리트는 내구성 지수가 60~80 정도의 양호한 수치를 나타내었다.

Morgan은 실리카 흄과 강섬유를 변수로 하여 건식 및 습식 숏크리트의 동결융해 저항성에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에 사용된 숏크리트는 낮은 물-시멘트비를 가진 42~66MPa의 고강도의 숏크리를 기본으로 하여 실험을 진행하였다. 습식

공법의 숏크리트의 경우 분사 타설 전에 약 8%의 연행 공기를 내부에 가지고 있었으나 분사 후에 측정한 공기량은 그의 절반인 4% 정도로 나타났다. 건식 공법 숏크리트의 경우 공기를 연행하지 않았다. 표 3.8.1은 Morgan(1989)의 실험에 사용된 재료를 나타낸 것이며, 표 3.8.2는 실험결과를 나타낸 것이다.

표 3.8.1 동결융해에 따른 숏크리트 내구성(Morgan et al, 1989)

이용 공법	배합량 (kg/m^3)			물/시멘트 비
	시멘트	실리카 흄	강 섬유	
건식 1	413	—	—	0.29
건식 2	361	52	—	0.29
건식 3	361	52	60	0.29
습식 1	465	—	—	0.35
습식 2	404	103	—	0.35
습식 3	404	103	30	0.35

표 3.8.2 동결융해에 따른 숏크리트 내구성 2 (Morgan et al. 1989)

이용 공법	압축강도 (MPa)	공극 상세			내구성 비율
		공기량(%)	공극률 지수 (mm)	비표면적 (mm-1)	
건식 1	50	5.4	0.27	18	우수
건식 2	52	6.0	0.29	17	우수
건식 3	42	6.5	0.31	15	우수
습식 1	56	5.6	0.17	27	우수
습식 2	66	4.5	0.28	18	우수
습식 3	65	5.2	0.27	19	우수

실험결과를 보면 공극률 지수(Spacing factor)와 공기량(content)이 매우 정확한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 또한 공극의 비표면적(specific surface)이 16~32mm 사이에 분포함으로써 Neville에 의해 제안된 콘크리트의 동결융해 저항성 확보를 위한 적정 비표면적량에 적합함을 알 수 있다.

(2) 중성화에 의한 성능저하

(가) 콘크리트 중성화 및 발생기구

콘크리트는 시멘트의 수화(hydration)반응으로 인하여 결합체로서 강도를 발현하게 되는데 이 시멘트의 수화반응에서 시멘트량의 약 1/3이 생성되는 수산화칼슘은 pH 12~13 정도의 강알칼리성을 나타내며 이로 인해 시멘트 수화를 전체의 ph가 결정된다. 수산화칼슘은 대기 중에 포함하고 있는 약 산성의 탄산가스(CO^2)와 접촉하여 다음과 같은 반응에 의하여 탄산칼슘($CaCO^3$)과 물로 변화한다.

(CaO)3(SiO)2(H2O)3 → 3CaCO3 + 2SiO2 + 3H2O

Ca(OH)2 + CO2 → CaCO2 + H2O

2(CaO)3SiO2 + 6H2O → (CaO)3(SiO2)2(H2O)3 + 3Ca(OH)2

2(CaO)3SiO2 + 4H2O → (CaO)3(SiO2)2(H2O)2 + Ca(OH)2

위 반응에서 탄산칼슘으로 변화한 부분의 PH가 8.5~10 정도로 낮아지는 것으로 인하여 중성화(neutralization, 탄화 carbonation)라고 불린다. 중성화는 콘크리트의 표면에서 내부를 향하여 진행하며 콘크리트는 탄산가스와 반응한 중량만큼 무거워지고 치밀해 진다.

중성화를 유발하는 CO2는 공기중의 작은 양에도 반응을 하는데 공기중의 CO2는 전원의 경우 0.03%, 환기되지 않은 실험실의 경우 0.1%, 대도시가 0.3%이고 특별한 경우 1%까지 그 차이가 크다. 위 식에서와 같이 Ca(OH)2는 CaCO3로 탄화되고 그 외의 다른 시멘트 성분은 실리카 수화물(hydrated silica), 알루마인(alumine)으로 분해되고 또 페릭 옥사이드 (ferric oxide) 등을 생성한다. 보통의 낮은 CO2 압력하에서도 칼슘화합물의 분해(decomposition)는 일어나지만 콘크리트의 표면을 관통해서는 매우 천천히 일어난다.

(나) 중성화에 의한 성능저하요인

중성화가 진행함에 따라 콘크리트의 표면에서는 약간의 미세한 균형이 발생하지만 이로 인한 콘크리트의 성능저하는 경미하여 문제가 될 정도는 아니다. 따라서 중성화에 의하여 발생하는 물리적 성능저하는 철근의 부식과 관련되어 있다고 볼 수 있다. 즉, 중성화된 콘크리트는 내부의 철근을 둘러싼 알칼리성 부동태 피막을 불안정하게 하여 부식을 유발하여 구조물의 성능저하를 일으키게 되는 것이다.

또한, 중성화에 의한 영향은 철근의 부식 외에 콘크리트의 공극성(porosity)과 공극의 크기분포(pore size distribution)에 변화를 준다. 즉, 콘크리트 내부의 공기 간극의 체적을 감소시키게 되는데 특히 작은 공극이 생성된 탄산칼슘염으로 채워지게 된다. 이는 다른 손상원인을 가중시키는 결과를 가져온다.

중성화는 건조수축을 동반하게 되는데 콘크리트가 건조하면서 동시에 탄화될 때 그림 3.8.14와 같이 건조에 의한 중량변화가 어느 시설에서 일정하게 평형상태가 되기 때문에 중성화에 의한 중량의 증가를 잘못 판단할 수 있다.

중성화에 의한 수축은 압축 응력하에서 수산화 칼슘 결정의 영해와 응력으로부터 자유로운 공간에 수산화칼슘이 침전되는 원인에 의해 발생한다. 따라서 국부적으로 시멘트 경화제의 압축성이 증가한다. 이러한 반응자체는 용해와 재침전에 관계가 없으므로 겔 속에 있는 수화물의 탄화는 중성화에 의한 수축에 기여하지 않는다.

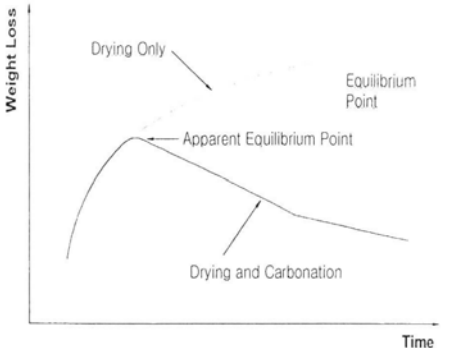


그림 3.8.14 중성화와 건조수축에 의한 질량감소

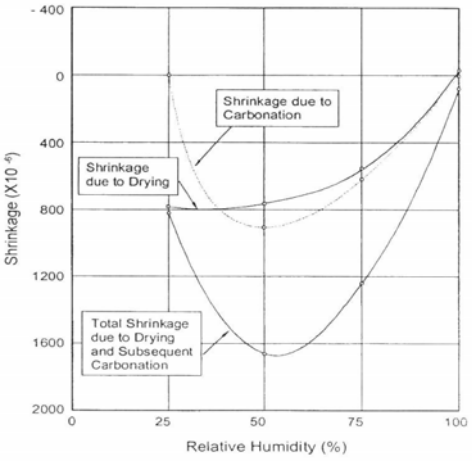


그림 3.8.15 상대습도에 따른 건조수축과 중성화

(다) 숏크리트의 중성화

숏크리트가 주로 사용되는 터널 구조물의 특성상 최근까지 숏크리트의 중성화에 관한 자료는 거의 전무한 실정이다. NATM 공법에 의해 시공된 터널 구조물의 경우 1차 지보재인 숏크리트 위에 2차의 콘크리트 라이닝이 타설되므로 중성화에 의한 숏크리트의 직접적인 피해는 아직까지 보고된 바가 없다. 하지만 터널 구조물의 경우 지하수의 유입 등으로 인해 1차 지보재인 숏크리트는 끊임없이 수분과 접촉하고 있으므로 중성화에 의한 열화 가능성이 충분히 크다고 할 수 있다. 또한 최근들어 우리나라에서도 활용이 검토되고 있는 싱글 쉘 공법을 적용하게 될 경우 숏크리트가 외부에 직접 노출되므로 중성화에 의한 피해 가능성은 그만큼 더 크다고 볼 수 있다.

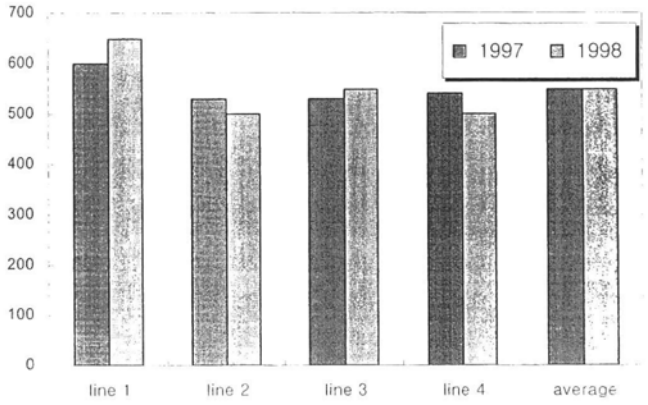


그림 3.8.16 서울 지하철의 CO^2 농도

그림 3.8.16은 서울시 지하철의 1997년 및 1998년도 호선별 이산화탄소 농도를 나타낸 것이다. 1997년 조사에서는 전 구간 평균 542.8 ppm/h, 1998년도 조사에서는 전 구간 평균 542 ppm/h로 나타나 모두 기준치인 1,000 ppm/h의 절반 수준인 것으로 나타났으나 비교적 높은 이산화탄소 농도 수준을 나타내고 있다. 이외에도 미세먼지, 아황산 가스, 포름알데이드, 납 등의 공기 중 함유량도 대략적으로 기준치에 미달하는 것으로 나타났지만 터널 내부에 이와 같은 많은 유해 환경적 요인이 존재하는 것으로 나타났다. 특히 이산화탄소의 경우 콘크리트 구조물의 중성화에 직접적인 영향을 미치는 요소로서 터널과 같은 밀폐된 공간에서는 내부 라이닝의 중성화에 심각한 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다.

표 3.8.3은 서울시 지하철 구조물에 대한 중성화 실태조사결과 중 터널부분의 자

료를 나타낸 것이다. 표에 나타난 결과를 통해 나타난 지하구조물의 중성화 깊이는 측정 부위에 따라 큰 편차를 보이고 있기는 하지만 열화정도가 상당히 심각한 부위도 발견되고 있어 터널 구조물의 사용환경 및 주변환경에 따라 중성화에 의한 피해가 예상되고 있다.

따라서 토목구조물, 특히 지하구조물에 주로 사용되고 있는 숏크리트의 경우 중성화 열화 특성에 대한 연구가 절실하다고 볼 수 있다.

표 3.8.3 지하철 구조물의 중성화 깊이

구분	설계강도 (MPa)	비파괴 강도 (MPa)	코아 강도 (MPa)	중성화깊이 (mm)	재령 (년)
1	21	277 ~ 300	250	70	14
2			330	70	
3			250	30	
4		97 ~ 320	216	2	13
5		188 ~ 346	–	2	
6		189 ~ 337	276	2	
7		180 ~ 286	260	5	
8		223	418	6	5

2. 건조수축 영향평가

가. 실험개요 및 내용

건조수축은 콘크리트 내부의 수분의 이동에 의해 표면에서 내부로 점차 자유 수분이 방출되면서 진행되는 콘크리트의 재료적 특성이다. 이러한 콘크리트의 건조수축특성을 규명하기 위해 종래에는 일반적으로 콘크리트에 대한 건조수축실험은 구속이 없는 상태의 자유건조수축량에 대한 건조수축특성 실험을 수행해 왔다. 그러나 실제의 콘크리트 부재는 그 재료적 특성, 철근이나 섬유와 같은 보강재 및 구조물의 지점조건들로 인하여 콘크리트 부재는 내·외부적으로 구속이 된다. 이와 같이 실제의 콘크리트 부재에서 발생하게 되는 구속조건으로 인한 건조수축특성에 대한 실험적 규명은 특히 섬유가 혼입된 경우 구속조건으로서의 섬유의 역할을 규명하기 위해 더욱 필요하다 할 수 있다.

골재는 콘크리트의 건조수축에 중요한 영향을 미치는 인자중의 하나이며, 일반적으로 큰 건조수축 특성을 갖는 시멘트 페이스트에 대해 내적인 구속조건을 만들어 주는 역할을 수행한다. 따라서 골재의 입도, 입형, 최대 골재치수등이 영향을 주게 되며, 이때 최대 골재치수의 영향은 골재치수 자체보다는 골재치수에 따른 배합수량의 변화, 절대 골재량 등이 영향을 준다.

그림 3.8.17은 콘크리트에서 전체 체적에 대한 골재의 체적이 건조수축에 미치는 영향을 보여주는 그림으로 골재의 체적이 감소함에 따라 건조수축량이 증가함을 알 수 있다. 그리고 그림 3.8.18은 배합수량에 따른 건조수축량의 변화를 보여주는 그림으로 배합수량이 증가함에 따라 건조수축량이 증가함을 알 수 있다. 따라서 배합수량의 많은 증가가 없는 경우에는 골재의 크기변화에 따른 건조수축영향은 많지 않다고 할 수 있다.

건조수축은 주로 배합수량, 바인더량, 절대 골재량에 의해 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 일반 콘크리트에 비해 바인더량이 많은 숏크리트 배합의 경우 건조수축의 정도는 일반 콘크리트 보다 다소 클 것으로 예상되며, 일반 숏크리트와 레디믹스트 숏크리트의 건조수축량 비교를 통하여 안정성 검토를 실시하였다.

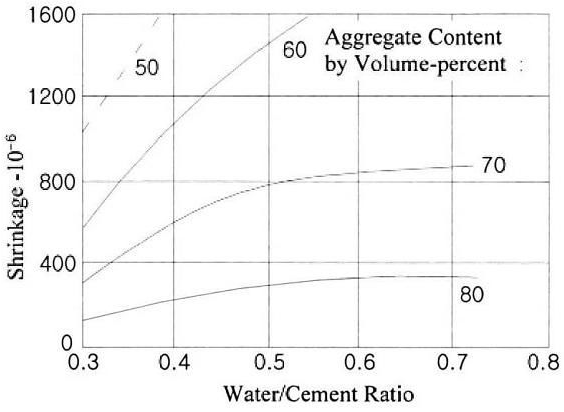


그림 3.8.17 물/시멘트와 골재함량에 따른 건조수축량의 변화

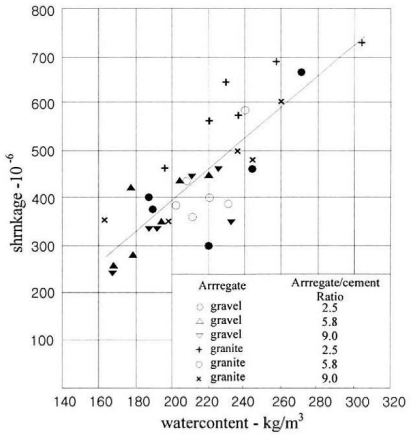


그림 3.8.18 배합수량의 증가에 따른 건조수축량의 변화

본 연구에서는 골재크기(13mm, 8mm), 섬유종류 및 혼입량(강섬유, 합성섬유) 변화에 의한 건조수축량의 시험을 KS F 2424 - 모르타르 및 콘크리트의 길이변화시험방법에 준하여 실시하였다. 건조수축실험을 위해 사용된 시편의 크기는 10×10×40cm의 빔 형태 공시체를 사용하였으며, 변수당 2개의 시편을 제작하여 그 값을 평균한 값을 사용하였다. 그림 3.8.19 는 건조수축량을 측정하는 모습을 나타낸 것이다.

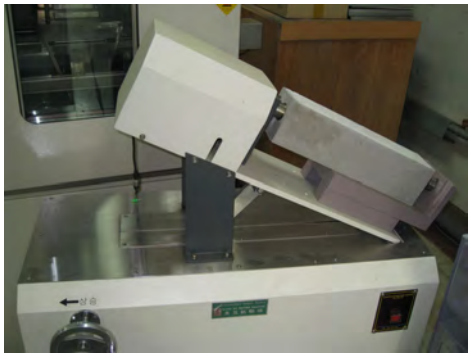


그림 3.8.19 길이변화 시험 모습

나. 실험변수 및 배합설계

본 실험에서는 물-시멘트비를 45.6%로 고정하였고 섬유혼입량을 합성섬유 0, 4, 8, 12kg/m^3, 강섬유 40kg/m^{3}으로 변화시켰다. 굵은골재의 최대치수는 8mm이고, 슬럼프값은

15±2cm, 공기량은 4%를 목표치로 하였다. 타설후 1일 경과후 탈형 후 즉시 제1회째의 측정을 실시하였고, 하여 온도 20±1℃, 상대습도 100%에서 6일동안 수중 양생을 실시하면서 2일에 한번씩 측정하였다. 재령 7일 측정 후 주변의 온도를 20±1℃, 습도를 60±5%로 유지 가능한 항온항습실에서 보존하였으며, 재령 1,4,8주 경과후 건조수축량의 패턴을 분석한 뒤 6개월까지 측정을 실시하고자 한다. 표 3.8.4는 본 건조수축실험에 사용된 배합설계표이며, 그림 3.8.20은 건조수축 배합 재료 및 공시체 모습을 나타낸 것이다.

표 3.8.4. 건조수축실험 배합설계표

No.	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재 (kg)				섬유혼입량 (kg/m^3)	섬유종류
						S1	S2	S3	S4		
F-0	13	12	45.6	212	465	997		654		-	강섬유
F-40										40.5	
RM-0	8	12	45.6	212	465	560	347	332	347	-	합성섬유
RM-4										4	
RM-8										8	
RM-12										12	



그림 3.8.20 건조수축 배합 재료 및 공시체 모습

다. 실험결과

그림 3.8.21은 시간에 따른 건조수축량을 보여주고 있다. 섬유를 혼입하지 않은 경우(F-0,RM-0)의 건조수축량은 4주 재령일때 840~865×10^{-6} 값을 기록하였다. 동일 재령에서의 일반콘크리트 건조수축량은 600×10^{-6} 대 정도의 값을 보이는 것에 비해 숏크리트 배합은 건조수축량이 다소 증가함을 알 수 있었다. 이는 숏크리트 배합특성상 바인더량의 증가에 의한 요인으로 분석된다.

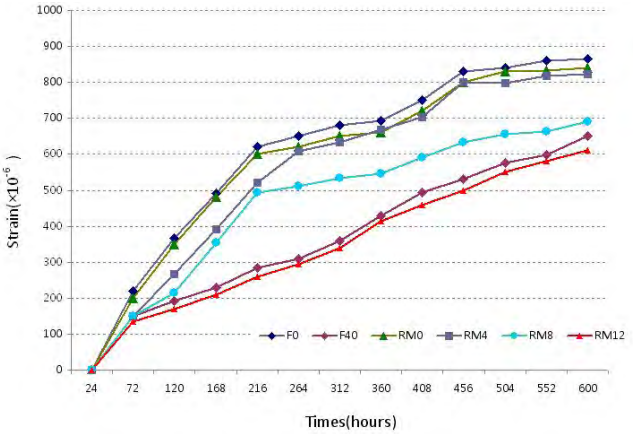


그림 3.8.21 시간에 따른 건조수축량

표 3.8.5 4주 경과시 건조수축량

배합명	섬유종류	배합조건			건조수축량 [με]
		W/C [%]	Gmax [mm]	섬유혼입량 [kg/m^3]	
F-0	-	45.6	13	-	865
F-40	강섬유	45.6	13	40.5	650
RM-0	-	45.6	8	-	840
RM-4	합성섬유	45.6	8	4	824
RM-8		45.6	8	8	690
RM-12		45.6	8	12	610

F-0 배합 및 RM-0 배합은 굵은골재 최대치수가 13mm와 8mm를 사용한 배합으로 건조수축량이 초기부터 4주까지 비슷한 경향을 보였다. 따라서 굵은 골재 최대치수의 차이가 건조수축에 미치는 영향은 많지 않다고 할 수 있다.

섬유를 혼입하지 않은 숏크리트의 경우 일반 콘크리트 보다는 건조수축량이 다소 크게 나타났다. 섬유를 혼입하지 않은 숏크리트와 강섬유/합성섬유가 혼입된 배합의 건조수축 결과, 그림 3.8.17에 나타난 바와 같이 강섬유 및 합성섬유(PP)에 의해 초기 강도 발현 후 건조수축을 제어하는 특성이 있음을 확인 할 수 있었다.

합성섬유의 혼입량이 점차 증가함에 따라 건조수축량이 비례하여 감소하였으며, 특히 합성섬유를 12kg/m^3 혼입한 경우 강섬유를 40kg/m^3 혼입한 경우와 유사한 건조수축량을 보였다. RM-12 배합과 F-40 배합의 4주 재령일 때의 건조수축량은 일반 무근 콘크리트 동일재령의 건조수축량과 비슷한 결과를 나타내었다(표 3.8.5).

시험 결과 합성 섬유의 혼입량 12kg/m^3 의 배합도 매우 안정된 건조수축량을 나타내 건조수축에 의한 균열 및 안정성 문제는 없을 것으로 판단된다.

3. 단일열화인자 평가를 통한 장기내구특성 평가

앞 절에서 숏크리트의 성능 저하를 유발하는 열화인자와 타설환경에 따라 장기내구성에 영향을 미치는 고려 인자에 대하여 기술하였다. 이 내용을 토대로 숏크리트의 장기내구성 평가를 위한 시험인자를 설정하고 촉진 탄산화 시험 및 동결융해 저항성 시험을 수행하였다.

가. 시험 개요

(1) 사용재료

(가) 시멘트

숏크리트에 사용되는 시멘트는 사용목적 때문에 초기강도가 높고 균질한 것이 요구되며 KS L 5021, ASTM C 150, ASTM C 595 기준에 적합한 포틀랜드 시멘트가 많이 사용된다.

본 시험에 사용한 시멘트는 국내산 H사에서 제조된 KS L 5201 규정에 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 시멘트의 물리적, 화학적 성질 및 광물 조성은 표 3.8.6과 3.8.7에 나타내었다.

표 3.8.6 시멘트의 물리적 성질

종류	비중	분말도	응결		안정도 (%)	압축강도(kgf/㎠)		
			초결	종결		3일	7일	28일
I 종	3.15	3,267	4:10	7:40	0.08	219	271	397
KS L 5201	-	2,800	>1hr	>10hr	0.8이하	130이상	200이상	290이상

표 3.8.7 시멘트의 화학적 성분 및 광물 조성

화학조성 (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Ig. loss	Free CaO	Insoluble
	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7	0.8	1.0	0.5
광물조성 (%)	LSF	LCF	HM	SM	IM	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
	90	88.6	2.1	2.6	1.7	48	27	12	8

(나) 레디믹스트 골재

잔골재의 입도는 압축강도 및 리바운드율에 크게 영향을 주는데, 굵은 입자의 함유량이 많으면 압축강도는 높아지는 반면 리바운드가 많아지고 중간입자나 가는 입자의 함유량이 많아지면 리바운드는 적으나 압축강도가 낮아져서 양자를 동시에 만족시키기는 어렵다. 0.2mm 이하의 미분의 첨가는 조건이 나쁜 시공면에서도 잘 부착되도록 하고 리바운드도 적으며 비교적 두꺼운 층의 시공을 가능케 하는 반면 미분의 량이 많아지면 소요수량이 많아져서 건조 수축량을 증대시키고 시공기계 내부 혹은 호스 내부에서 막힘 현상이 발생할 수 있다.

레디믹스트용 골재는 국내 H사의 생산지별 골재를 수집하여 분석한 최적 골재 입도를 표 3.8.8 에 나타내었다.

표 3.8.8 레디믹스트용 골재 혼입량(Kg/㎥)

구분	S1	S2	S3	S4
입도	0~0.8mm	0.8~2.4mm	2.4~5.6mm	6~8mm
배합	557	344	330	345

(다) 혼화재료

1) 고로슬래그 미분말

고로슬래그 미분말은 용광로에서 선철과 동시에 생성되는 용융슬래그를 물로 급냉시켜 얻은 입상의 수쇄슬래그를 건조하여 미분쇄한 것으로서 사용 목적에 따라서 석고를 첨가하는 경우도 있다. 고로슬래그 미분말은 잠재수경성이 있으며 그 자체는 경화하는 성질이 미약하지만 알칼리에 의해서 경화한다. 포틀랜드 시멘트와 혼

합한 경우 수산화칼슘과 황산염의 작용에 의해서 경화가 촉진되어 포틀랜드시멘트만을 단독으로 사용했을 경우에는 얻을 수 없는 아래와 같은 우수한 콘크리트 특성이 얻어진다.

본 시험에서 사용한 고로슬래그 미분말은 광양 제철소에서 선철공정 중 부산물로서 발생된 것으로 부산물 1종, 2종, 3종의 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 고로슬래그 미분말의 물리적 성질을 파악하기 위하여 KS L 5110(시멘트의 비중 시험 방법)에 따라 비중을 측정하였고, 분쇄 후의 실시료에 대하여 KS L 5106(공기 투과 장치에 의한 포틀랜드 시멘트의 분말도 시험 방법)에 의하여 비표면적을 측정하였다. 고로슬래그 미분말의 화학조성은 KS L 5120 (포틀랜드 시멘트의 화학 분석 방법)과 기기 분석 방법을 통하여 분석하였다.

고로슬래그 미분말의 특성은 표 3.8.9와 같다. 고로슬래그 미분말은 CaO 함량이 약 41%로서 KS L 5210에서 규정하는 염기도가 상당히 높게 나타나고 있으며, 급냉으로 인한 슬래그의 유리상 구조로 인하여 잠재수경성을 나타낸다. 그림 3.8.22는 고로슬래그 미분말의 전자현미경사진을 나타낸 것인데, 미분쇄되어 불규칙하고 각진 모양을 나타내고 있는 잠재수경성 물질로 표면에 치밀한 규산염이 풍부한 겔의 박막이 형성되어, 중심부까지의 물의 침입이 방해를 받게 되므로 이 박막을 제거할 수 있도록 자극제의 사용이 필요하다. 입도분석기로 입도 분석한 결과 비표면적은 1.8926m^2/g, 평균 입자는 10.28μm로 나타났다.

표 3.8.10 은 비표면적에 따른 고로슬래그 미분말의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

표 3.8.9 현장타설실험 사용 고로슬래그 미분말의 특성

화 학 성 분(%)							물리적 성질	
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	강열감량	Blain (cm^2/g)	비 중
34.81	16.19	0.47	41.25	8.05	0.16	-0.85	4,000	2.92

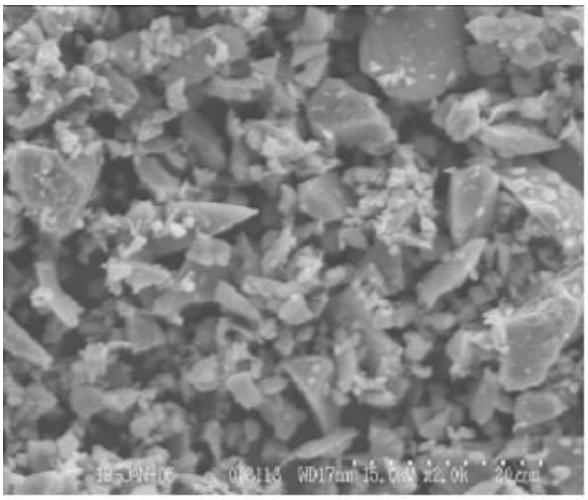


그림 3.8.22 고로슬래그미분말의 미세구조(SEM ×2000)

표 3.8.10 고로슬래그 미분말의 물리적 특성

종류		밀도(g/cm^3)	잔분 (>45㎛,%)	평균입경(㎛)	비표면적 (cm^2/g)	수분(%)
고 로 슬래그 미분말	1종	2.88~2.94	-	2 ~ 4	8,000 ~ 10,000	0.4 이하
	2종		-	7 ~ 9	6,000 ~ 8,000	
	3종		2.0 이하	12 ~ 16	4,000 ~ 6,000	

2) 플라이애쉬

플라이애시는 대부분이 회백색이지만 미연탄소 함량이 증가함에 따라 검은색을 띠며, 탄소, 철, 습분 등의 함유정도에 따라 다양한 색깔을 보여준다. 플라이애시 입자는 모래 형상으로 다공질의 것이 많고 입도가 균질하여 입경 0.1mm 이하의 입자가 90% 정도를 차지한다. 비중은 약 1.9~2.4 정도의 범위로서 대부분 철분의 함량 및 파쇄성 입자의 함량에 의해 좌우된다. 본 실험에서 사용된 플라이애시는 비표면적이 1.029m^2/g, 평균입자의 크기는 37.54㎛ 로서 물리·화학적 특성은 표 3.8.11과 같다.

표 3.8.11 플라이애시의 물리·화학적 특성

물리적특성	비 중	분말도 (cm^2/g)	단위수량비 (%)	압축강도의 비	강열감량 (%)	습 분 (%)
	2.19	3,172	100	94	4.5	0.2

화학적 특성	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	기 타 (%)
	57.7	25.8	3.7	12.8

3) 유동화제

유동화제는 콘크리트의 품질 변화 없이 작업성을 향상시키기 위해 사용되었으며, 이는 고품질 숏크리트 생산에 있어 단위 수량 저감 및 타설성 향상에 매우 중요한 요소이다. 장기내구성 평가를 위한 실내 시험체 제작에서는 배합시 첨가가 용이한 액상형 유동화제(폴리카르본산계(Polycarbonate type) 고성능감수제)가 사용되었다. 사용량은 시멘트 중량의 0.9%~1.1%를 사용하였다. 표 3.8.12는 본 시험에서 사용된 액상형 유동화제의 특성을 나타낸다.

표 3.8.12 나프탈렌계 고성능 유동화제

형태	색상	고형분	비중	pH	사용량 (CXwt%)
액상	암갈색	Min 40%	1.19~1.23	8.0~10.0	0.5~2.5

(2) 콘크리트 배합 계획

숏크리트 공법이 주로 적용되는 터널 현장은 차량으로부터 발생되는 매연 및 지하수의 접촉 등과 같이 매우 극심한 콘크리트 열화 환경에 노출될 수 있는 가능성이 매우 크다. 하지만 숏크리트 시공부가 치밀하지 못하거나 내구성이 약해질 경우 보수보강 비용이 증대될 뿐 아니라 터널에 진입하는 차량도 위험에 처할 수 있다. 본 시험에서는 2차년도에서 파악한 숏크리트 장기내구성 고려 인자를 고려하여 물리·역학적 성능이 우수한 배합을 선정하여 내구 특성을 검토하였다.

바인더로는 보통 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애시를 사용하였고, 혼화제로서 액상형 유동화제를 사용하였다. 바인더 및 혼화재료에 따른 배합표는 표 3.8.13과 같다.

표 3.8.13 콘크리트 배합표 (Kg/㎥)

배합명		굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	W/C (%)	물	시멘트	골재				고로 슬래그 미분말	F/A	실리카 흄	폴리머	액상형 유동화제
							S1	S2	S3	S4					
1	RM-P	8	12	45.6	212	465	557	344	330	345	-	-	-	-	4.65 (C*1.0)
2	RM-FA					390	557	344	330	345	-	75	-	-	4.65 (C*1.0)
3	RM-BFS					325	557	344	330	345	140	-	-	-	4.65 (C*1.0)
4	RM-BF +FA					250	557	344	330	345	140	75	-	-	4.65 (C*1.0)
5	RM-SF					442	557	344	330	345	-	-	23	-	5.12 (C*1.1)
6	RF-PO					465	557	344	330	345	-	-	-	30	4.19 (C*0.9)

(3) 시험체 제작

시험체는 실내 시험용 강제식 믹서를 사용하여 제작하였으며 기본 물성으로 압축강도 시험용 공시체를 각각 KS F 2403(콘크리트의 강도시험용 시험체 제작방법)에 준하여 제작하였다. 동결융해, 장기폭로 시험체 및 촉진열화시험체는 각 배합별로 10×10×40cm 크기로 제작하였다. 혼화재료별 내구성 평가용 공시체 타설 장면은 그림 3.8.23과 같다.



그림 3.8.23 시험체 제작 모습

나. 시험방법

(1) 동결융해저항성 시험

겨울철 동결과 융해가 반복되는 환경에서 제품의 내구성을 알아보기 위하여 KS F 2456(급속동결에 대한 콘크리트의 저항시험방법)에 규정되어 있는 기중동결 수중융해의 B 방법에 따라서 시험하였다. 동결융해저항성을 측정하기 위해서 10×10×40cm의 각주형 공시체를 제작한 뒤 1일 증기 양생 후 13일까지는 기건 양생하고, 동탄성계수 및 길이와 중량을 측정하여 이를 시험의 기준 시점으로 하고 이후 동결융해 30 Cycle마다 동일한 항목을 매회 측정하였다. 이러한 일련의 시험을 수행하여 동결융해 300 싸이클이 되거나 상대동탄성계수가 60% 이하가 되는 경우에는 시험을 종료하였다. 그림 3.8.24는 동결융해시험 모습을 나타낸 것이다.



그림 3.8.24 동결융해 시험 모습

(2) 촉진 탄산화 시험

본 실험에 사용된 시험체의 치수는 10×10×40cm(KS F 2584; 콘크리트의 촉진탄산화 시험방법)이며 제조 및 양생 중의 온도는 23±2℃로 하였고 증기양생 후 13일간 기건 양생을 실시하였다. 그 후 상대습도 60±5%, 온도 23±2℃의 건조실에서 4주간 정치한 후 마지막 주에 시험체 타설면의 양단면 및 밑면을 에폭시수지로 도포하였다. 촉진탄산화 시험을 위한 조건은 온도 23±2℃, 상대습도 60±5%, 탄산가스 농도 5±0.2%의 항온항습조건으로 하였다. 시험체 주변의 환경조건은 균등하게 하고 시험체 개개의 존치조건 또한 균일하게 하기 위하여 각 시험체의 주위는 약 2cm이상 간격을 유지하였다.

시험시약은 1% 페놀프탈레인에탄올 용액을 사용하였으며, 측정방법은 공시체의 측정면의 콘크리트 파편과 먼지를 제거한 후, 시약을 스프레이로 분사하여, 콘크리트 표면에서 착색부분까지의 거리를 버니어캘리퍼스로 1측면에 대하여 6등분한 5개소 계측하였다. 현재 1, 4, 8, 13, 26, 52주 재령에서 실시 중이며 그림 3.8.25는 촉진탄산화 시험 모습을 나타낸 것이다.



그림 3.8.25 촉진 탄산화 시험 모습

다. 시험결과 및 분석

(1) 동결융해저항성 시험 결과

혼화재료에 따른 내구특성 검토의 목적으로 선행 시험에서 우수한 물리적 성질을 나타낸 배합을 선별하여 동결융해 저항성능을 상대동탄성계수를 이용하여 평가하였다. 콘크리트의 동결융해에 대한 저항성은 혼화재료의 종류와는 상관없이 공기 및 공극구조의 적절성, 골재의 안정성, 재령에 따른 수화 정도 등에 따라 영향을 받는다. 따라서 본 시험의 목적은 특히 동결융해저항성이 특히 약한 혼화재를 선별하여 분말형 레디믹스트 숏크리트에 혼입 가능한 혼화재료로서 내동결융해성을 고려하기 위함이다.

표 3.8.14 및 그림 3.8.26은 각 혼화재별 동결융해에 의한 상대동탄성계수의 감소를 나타낸 것인데, 동결융해 횟수가 증가함에 따라서 전체적으로 상태동탄성계수가 저하됨을 알 수 있다. 그러나 각 배합별로 차이는 있으나 모든 배합에서 한계기준인 60%를 상회하는 것으로 나타났다. 그림 3.8.27은 상대동탄성계수 측정 모습을 나타낸 것이다.

표 3.8.14 상대동탄성계수

싸이클	상대동탄성계수(%)					
	RM-P	RM-FA	RM-BFS	RM-BF+SF	RM-SF	RF-PO
0	100	100	100	100	100	100
60	95	96	97	96	99	98
120	91	93	96	94	99	98
180	90	93	95	93	96	96
240	88	90	95	93	96	95
300	82	84	90	88	94	93

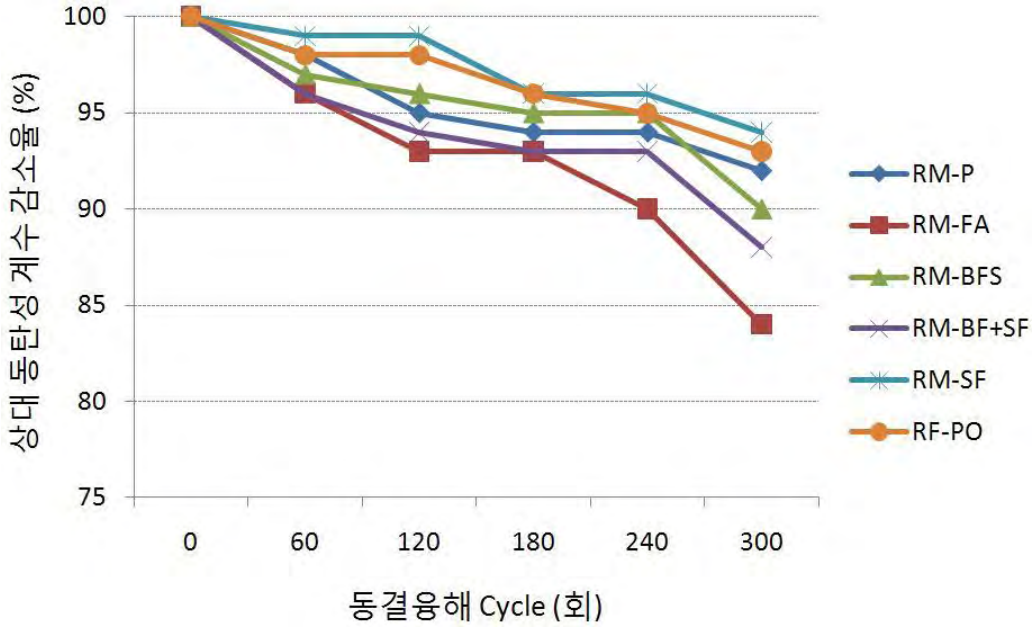


그림 3.8.26 상대 동탄성계수 측정 결과

실험 결과를 살펴보면 전체적으로 동결융해 저항성이 모두 우수하게 나타났다. 그 중 RM-SF 배합이 300싸이클에서 94.2% 이상을 기록해 가장 우수 하였으며 RM-FA 배합이 84.3%로 가장 낮은 수치를 보였다. 이는 부분적으로 플라이애시를 사용한 콘크리트의 표면에서 발생하는 공기량 손실과 표면의 부적합한 마무리나 양생에 의한 것이라 판단된다. 분말형 레디믹스트 숏크리트의 적용에 있어 국내 터널 내부의 환경을 감안하여 볼 때 모든 배합이 동결융해에 의한 내구성 저하는 문제되지 않을 것이라 판단된다.

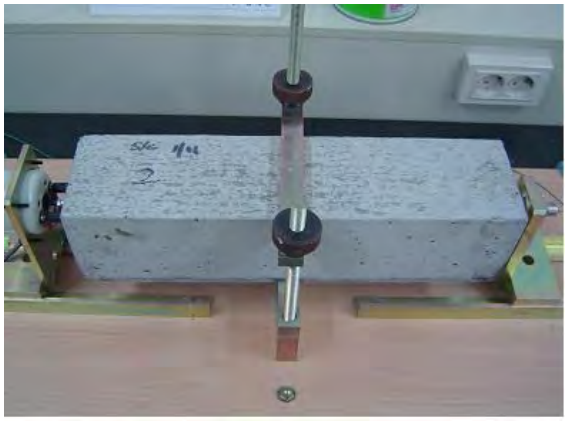


그림 3.8.27 상대 동탄성계수 측정 모습

(2) 촉진 탄산화 시험 결과

KS F 2584 콘크리트의 촉진탄산화 시험방법에 의해 양생한 공시체의 재령별 탄산화 깊이를 측정한 결과는 표 3.8.15 및 그림 3.8.28과 같다. 결과를 살펴보면 촉진탄산화시험 노출 4주까지가 가장 왕성하게 탄산화가 일어났으며, 노출기간 26주의 탄산화 깊이는 RM-SF 배합과 RM-PO 배합이 각각 14.5 , 15.4mm 로 가장 작게 나타났다. RM-PO 배합의 경우 폴리머 성분으로 인해 콘크리트와의 부착성을 증대시키고 팽창성 및 자체 강성이 우수해져 콘크리트 매트릭스가 치밀해진 결과로 판단되며 RM-SF 배합의 경우 실리카흄의 혼입으로 인해 매우 미세한 비정질의 실리카가 수화 초기부터 수산화칼슘과 결합하는 포졸란 반응으로 인한 것으로 판단된다. RM-BFS 배합의 경우 26주 동안 촉진탄산화에 노출한 결과 탄산화 깊이가 23mm로 가장 크게 나타났다. 이는 시멘트 수화시에 발생하는 수산화칼슘과 고로슬래그 미분말이 반응하여 콘크리트의 알칼리성이 약간 저하되었기 때문이라 판단된다. 콘크리트의 탄산화 깊이는 물-시멘트의 변화로 인해 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있어 고로슬래그 혼입시 유동화제 사용량을 면밀히 검토하여 콘크리트 탄산화에 대한 내구성을 확보하여야 한다. 그림 3.8.29는 탄산화 깊이를 측정하는 모습을 나타낸 것이다.

표 3.8.15 탄산화깊이(mm)

노출기간(주)	탄산화깊이(mm)					
	RM-P	RM-FA	RM-BFS	RM-BF+SF	RM-SF	RF-PO
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1.0	1.1	1.4	1.3	1.2	1.2
4	9.3	10.0	11.3	10.8	9.4	9.4
8	9.8	12.5	14.0	13.0	10.0	9.9
13	11.0	14.3	17.4	15.9	10.5	10.8
26	16.1	21.3	23.7	22.4	14.5	15.4

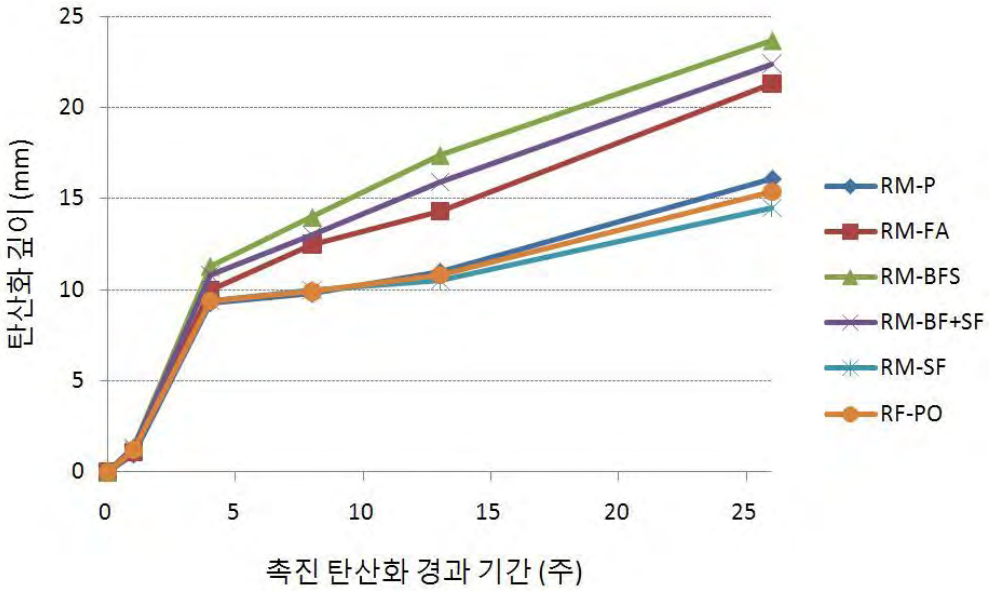


그림 3.8.28 촉진 탄산화 깊이 측정 결과

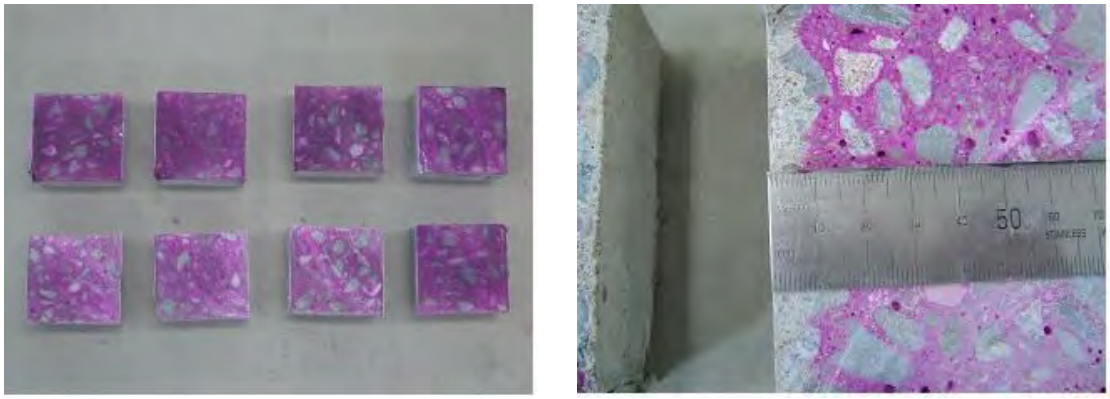


그림 3.8.29 촉진 탄산화 깊이 측정 모습

4. 복합열화시험을 통한 장기내구특성 평가

앞 절에서 숏크리트의 장기내구성 평가를 위한 시험인자를 설정하고 촉진 탄산화 시험 및 동결융해 저항성 시험에 대한 결과를 기술하였다. 이 내용을 토대로 숏크리트의 장기내구성 평가를 위한 장기폭로 시험에 의한 압축강도와 휨강도의 변화를 측정하고, 복합열화 시험을 수행하였다. 복합열화 시험은 동결융해 조건과 CO_2 노출 조건을 동시 적용, 동결융해 300 Cycle 후 CO_2 노출, 내약품 시험 노출 후 동결융해 300 Cycle 적용의 총 3가지 형태로 수행하였다.

가. 시험 개요

(1) 사용재료

본 시험에 사용한 시멘트, 골재 및 혼화재료는 앞 절의 단일열화 시험에서 사용한 재료와 제조사 및 제품명이 동일하다.

(2) 콘크리트 배합 계획

복합열화 시험체의 콘크리트 배합에 있어서 바인더로는 보통 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그, 플라이애시를 사용하였고, 혼화제로서 액상형 유동화제를 사용하였다. 바인더 및 혼화재료에 따른 배합표는 표 3.8.16과 같다.

표 3.8.16 콘크리트 배합표 (Kg/㎥)

배합명		굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	W/C (%)	물	시멘트	골재				고로 슬래그 미분말	F/A	실리카 흄	폴리머	액상형 유동화제
							S1	S2	S3	S4					
1	RM-P	8	12	45.6	212	465	557	344	330	345	-	-	-	-	4.65 (C*1.0)
2	RM-FA					390	557	344	330	345	-	75	-	-	4.65 (C*1.0)
3	RM-BFS					325	557	344	330	345	140	-	-	-	4.65 (C*1.0)
4	RM-BF +FA					250	557	344	330	345	140	75	-	-	4.65 (C*1.0)
5	RM-SF					442	557	344	330	345	-	-	23	-	5.12 (C*1.1)
6	RF-PO					465	557	344	330	345	-	-	-	30	4.19 (C*0.9)

나. 시험방법

(1) 촉진 탄산화 후 동결융해 시험

촉진탄산화 시험 공시체는 Ø100×200mm의 원주형으로 제작하였고, 탄산화 조건은 온도 23±2℃, 상대습도 60±5%, 탄산가스 농도 5±0.2%의 항온항습조건으로 하여 5주, 25주, 50주 동안 촉진탄산화시험기에서 열화 시켰으며 이어서 동결융해 반복을 0, 30, 90, 150, 210, 300cycle 까지 실시하였다.

(2) 동결융해 후 촉진 탄산화 시험

공시체를 Ø100×200mm의 원주형으로 제작하여 30, 90, 150, 210, 300 cycle까지 동결융해 시험을 반복한 후 온도 23±2℃, 상대습도 60±5%, 탄산가스 농도 5±0.2%의 항온항습조건으로 5주, 25주, 50주 동안 촉진탄산화 시험을 실시하였다.

(3) 내약품 시험 노출 후 동결융해 시험

5×5×5cm 입방형 공시체를 제작하여 1일후 탈형하여 2일간 수중 양생한 후, 나머지 재령 28일간 기건 양생을 실시하였다. 그 후 3종류(10% $CaCl_2$, 10% Na_2SO_4 , 5% H_2SO_4)의 약품에 재령 30, 40, 50일간 침지하였다. 약품 침지 시험 후 동결융해 반복을 30, 90, 150, 210, 300 cycle까지 진행한 후 압축강도를 측정하였다.

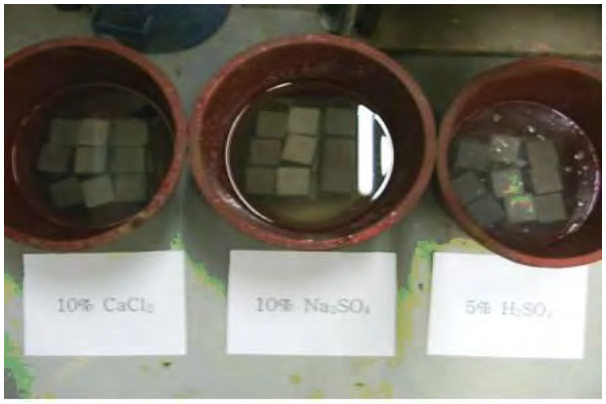


그림 3.8.30 내약품성 시험 모습

(4) 장기폭로에 의한 열화특성 평가 시험

분말형 레디믹스트 숏크리트의 장기 옥외폭로에 의한 압축강도 및 휨강도 감소율을 측정하고자 한국건자재시험연구원 서산옥외폭로시험장에서 장기 옥외폭로를 실시하였다. 옥외폭로 시작 시점부터 자외선, 일사량, 비래염분, 산성우, 풍향, 풍속 등 콘크리트에 직·간접적으로 영향을 미칠 수 있는 환경인자를 분석하여 혼화재료별 시험체 별 상관관계를 분석하였다.



그림 3.8.31 장기폭로 시험 모습

다. 시험결과 및 분석

(1) 촉진 탄산화 후 동결융해 시험 결과

표 3.8.17 및 그림 3.8.32는 탄산화 시험 후 동결융해에 의한 상대동탄성계수의 감소를 나타낸 것인데, 동결융해 단일열화 시험의 경우와 크게 눈에 띄는 차이는 보이지 않았다. 이는 탄산화에 의해 콘크리트 내부조직이 변화하여 동결융해 저항성에 영향을 미치기에 시험 기간이 다소 부족했던 것으로 사료되며, 차후 좀 더 가혹한 환경에서의 복합열화 시험이 필요할 것으로 보인다.

표 3.8.17 상대동탄성계수

싸이클	상대동탄성계수(%)					
	RM-P	RM-FA	RM-BFS	RM-BF+SF	RM-SF	RF-PO
0	100	100	100	100	100	100
60	95	97	98	97	99	99
120	92	93	96	94	99	98
180	90	92	94	93	96	97
240	87	89	92	93	96	95
300	81	85	91	87	95	92

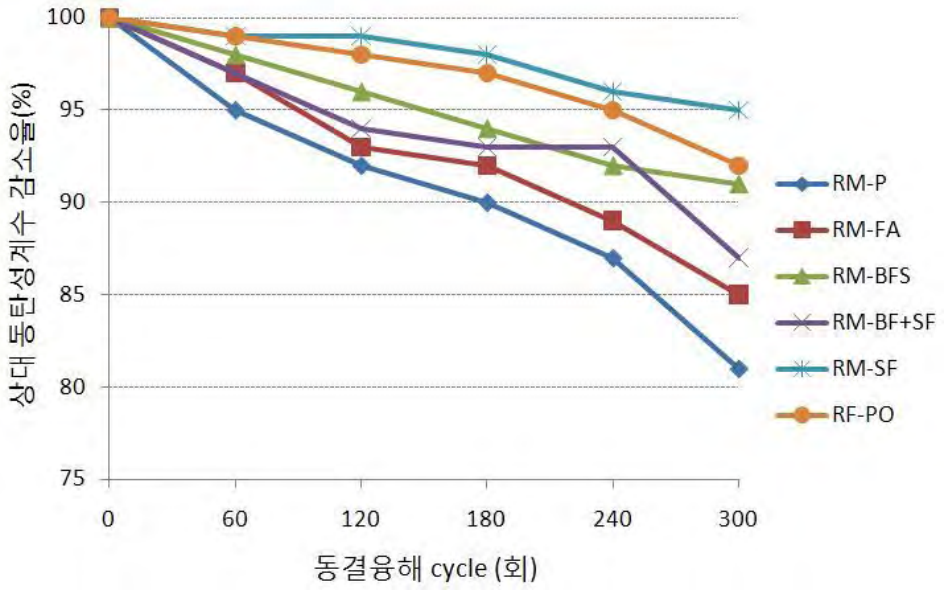


그림 3.8.32 상대 동탄성계수 측정 결과

(2) 동결융해 후 촉진 탄산화 시험 결과

300 cycle의 동결융해 시험을 진행한 후 KS F 2584 콘크리트의 촉진탄산화 시험방법에 의해 탄산화 환경에 노출시킨 공시체의 탄산화 깊이를 측정한 결과는 표 3.8.18 및 그림 3.8.33과 같다. 결과를 살펴보면 촉진 탄산화 단일열화 시험과 마찬가지로 노출 4주까지가 가장 왕성하게 탄산화가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 또한 단일열화 시험 데이터와 비교하여 전체적으로 중성화 깊이가 늘어난 것을 확인 할 수 있는데, 이는 300 cycle의 동결융해 환경 노출에 의하여 콘크리트 내부의 균열 등으로 인하여 내부조직의 열화에 기인한 것으로 사료된다.

표 3.8.18 탄산화깊이 (동결융해 후 탄산화)

노출기간(주)	중성화깊이(mm)					
	RM-P	RM-FA	RM-BFS	RM-BF+SF	RM-SF	RF-PO
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2.5	2.9	3.1	3.0	2.8	2.9
4	13.4	15.4	16.7	15.9	11.4	11.9
8	14.7	17.6	19.8	16.4	14.5	15.2
13	19.5	23.8	25.4	19.8	15.1	16.1
26	25.3	28.4	29.3	24.1	16.3	17.5

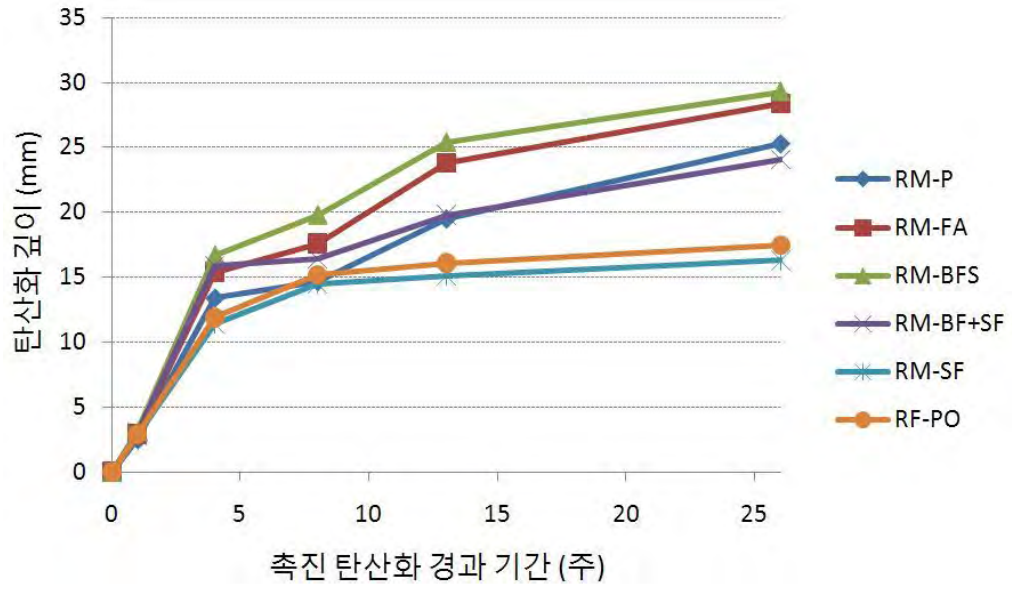


그림 3.8.33 탄산화 침투 깊이 (동결융해 후 탄산화)

(3) 내약품 시험 노출 후 동결융해 시험 결과

10% $CaCl_2$, 10% Na_2SO_4 , 5% H_2SO_4 3가지 용액에 내약품 시험을 실시한 결과, 10% $CaCl_2$ 침지 시험체와 $NaSO_4$ 침지 시험체의 경우 약품 노출 50일 이후 압축강도 측정결과가 예상 압축강도의 약 80%(29~36MPa) 수준으로 저하된 모습을 보였다. 또한 5% H_2SO_4 침지 시험체의 경우에는 약품 노출 50일 이후 압축강도 측정결과가 예상 압축강도의 약 60%(21~31MPa) 수준으로 저하된 모습을 보였다. 내약품

시험 이후 동결융해 시험을 실시한 공시체의 압축강도를 측정한 결과는 표 3.8.19~3.8.21, 그림 3.8.34~3.8.35와 같다. 동결융해 단일압축강도 시험 시 저하되었던 동탄성계수 수치 비율과 비교하면 저하 폭이 3개의 약품의 경우 모두 전반적으로 증가한 것을 확인할 수 있다.

표 3.8.19 압축강도 (10% $CaCl_2$ 용액 침지 후 동결융해 노출)

cycle	압축강도(MPa)					
	RM-P	RM-FA	RM-BFS	RM-BF+SF	RM-SF	RF-PO
0	33	29	35	35	36	33
60	31	28	34	34	35	33
120	30	27	31	31	33	32
180	28	26	30	30	32	31
240	25	22	30	29	31	30
300	23	20	28	27	30	29

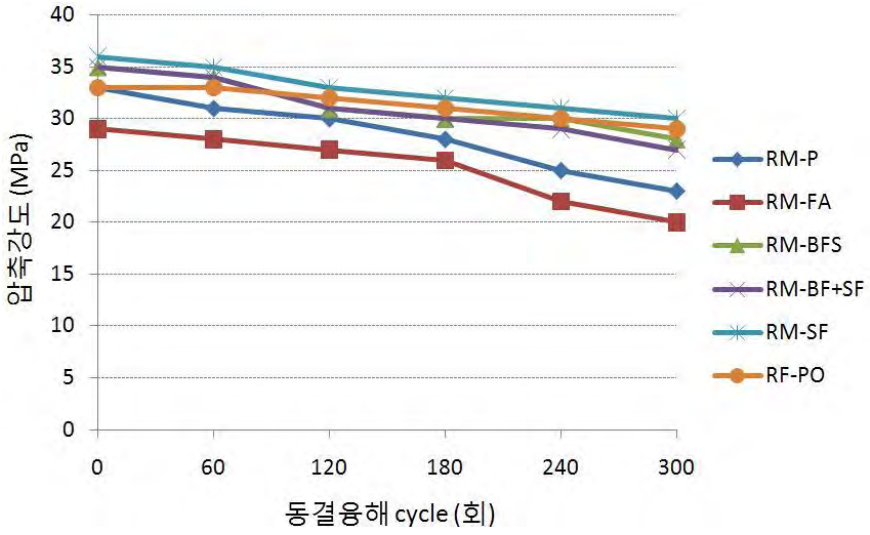


그림 3.8.34 압축강도 (10% $CaCl_2$ 용액 침지 후 동결융해 노출)

표 3.8.20 압축강도 (10% Na_2SO_4 용액 침지후 동결융해 노출)

cycle	압축강도(MPa)					
	RM-P	RM-FA	RM-BFS	RM-BF+SF	RM-SF	RF-PO
0	32	29	34	36	38	34
60	31	28	34	34	36	33
120	28	28	32	32	35	32
180	28	26	30	30	33	31
240	26	23	29	29	32	30
300	23	21	27	26	31	28

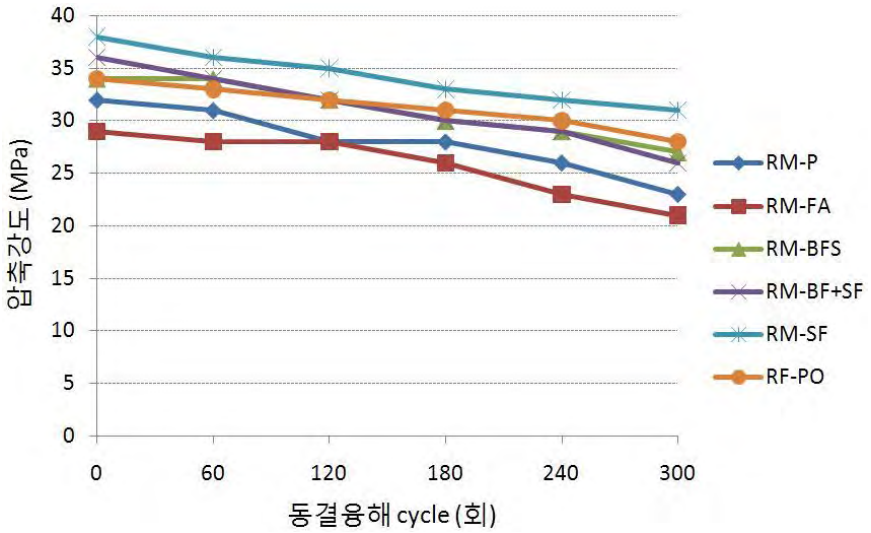


그림 3.8.35 압축강도 (10% Na_2SO_4 용액 침지 후 동결융해 노출)

표 3.8.21 압축강도 (5% H_2SO_4 용액 침지 후 동결융해 노출)

cycle	압축강도(MPa)					
	RM-P	RM-FA	RM-BFS	RM-BF+SF	RM-SF	RF-PO
0	25	21	30	30	31	25
60	25	20	28	30	29	24
120	23	18	26	28	28	22
180	22	17	26	25	26	22
240	21	17	25	25	26	20
300	20	16	23	24	25	19

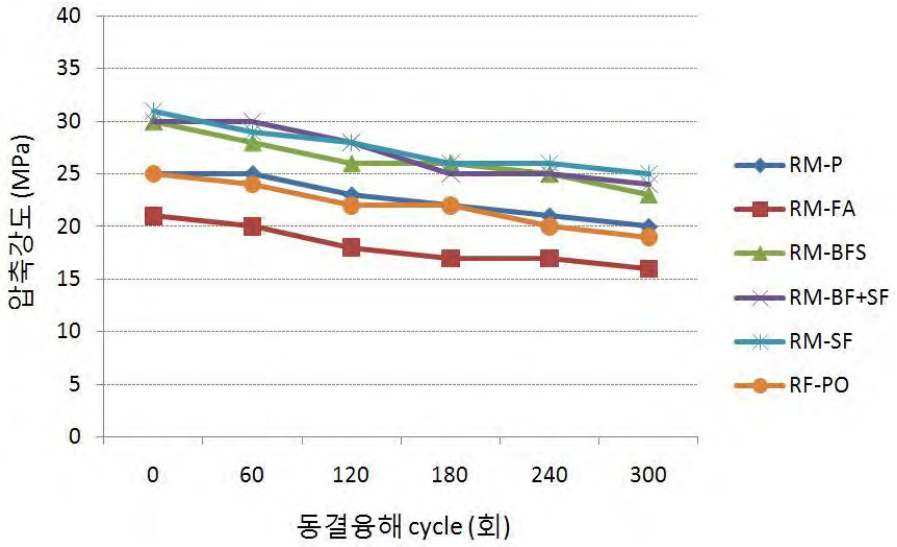


그림 3.8.36 압축강도 (5% H_2SO_4 용액 침지 후 동결융해 노출)

(4) 장기 옥외폭로에 의한 열화특성 평가 시험

(가) 압축강도

선행 연구에서 수행하였던 혼화재별 물성평가에서 우수한 성능을 보인 배합을 선별하여 장기 옥외 폭로시켜 열화된 굳은 콘크리트의 역학적 성능을 측정·분석하였다. 각 혼화재별 재령 1일, 14일, 28일, 90일, 180일, 360일에서의 각 시험체의 압축강도 측정결과는 표 3.8.22와 그림 3.8.37과 같다. 압축강도 발현에 있어서 재령 28일 기준으로 하였을 때, RM-SF 배합이 가장 우수하였으며 RM-BF+SF, RM-P, RM-BFS, RM-PO, RM-FA 순으로 나타났다. 국내 서해안 서산 지역 환경 인자에 360일 동안 옥외폭로 시킨 결과 재령 90일 이후까지 활발히 수화작용이 진행되었으며, 재령 90일 이후부터는 서서히 증가하였다. 약 1년 동안 장기 옥외폭로 시험결과 거의 모든 배합이 초기 양상과 비슷하게 압축강도가 발현하였다. 그러나 RM-BFS 배합의 경우 장기재령으로 갈수록 압축강도이 우수하여 옥외 폭로 360일에서는 실리카흄 배합보다 우수하게 나타났다. 재령 360일 정도 옥외 폭로시킨 공시체의 장기재령 압축강도 분석결과 콘크리트의 열화정도보다 수화반응의 진행정도가 더 커 압축강도가 증가된 것으로 사료되며, 고로슬래그 미분말을 치환한 배합(RM-BFS)의 경우는 특히 장기강도가 우수하였다. 이는 고로슬래그 미분말은 잠재수경성이 있으며 수밀성이 향상된 결과라 판단된다. 그림 3.8.38은 압축강도 측정모습이다.

표 3.8.22 시험체의 압축강도 시험 결과

배합명	압축강도 (MPa)					
	1일	14일	28일	90일	180일	360일
RM-P	28	34	35	36	38	40
RM-FA	21	27	29	31	33	34
RM-BFS	23	32	35	39	42	46
RM-BF+SF	25	33	36	39	41	44
RM-SF	26	36	38	40	42	43
RF-PO	28	33	34	36	38	40

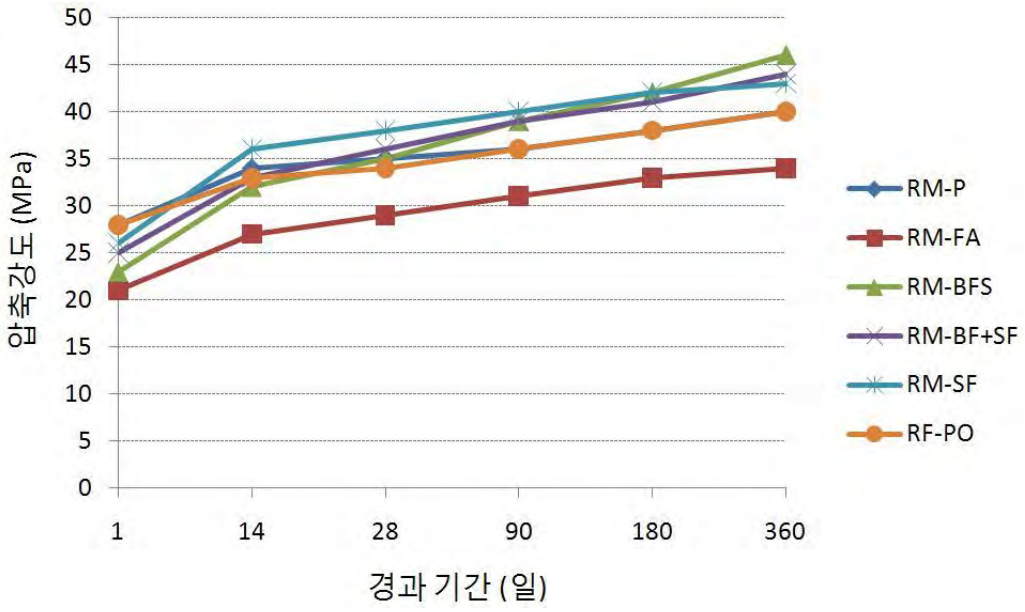


그림 3.8.37 장기 옥외폭로 시험 압축강도 측정 결과

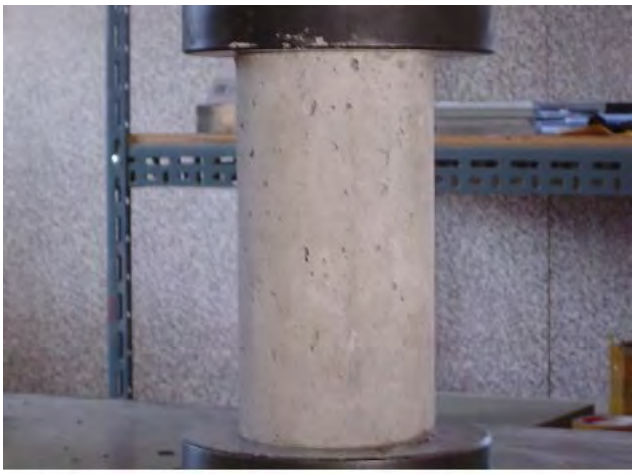


그림 3.8.38 장기 옥외폭로 시험 압축강도 측정 모습

(나) 휨강도

각 혼화재별 장기 옥외 폭로 휨강도 측정결과는 표 3.8.23 및 그림 3.8.39에 나타내었다. 각 혼화재별 휨강도는 압축강도 대비 일정한 경향을 나타내었으며 폭로 기간이 짧아 열화에 의한 휨강도 저하는 나타나지 않았다. 각 혼화재별 배합 중 RM-SF 배합이 초기재령과 장기재령에서 모두 높은 휨강도를 나타내었다. 재령 360일 동안의 옥외 폭로 시킨 공시체의 휨강도는 거의 비슷한 값을 나타내었으며, 수화반응의 진행정도가 어느 정도 수렴하는 것을 확인하였다. 동일 조건의 환경 인자를 적용하여 30개월 이상 장기 폭로시 혼화재료별 휨강도 저하 특성이 나타날 것이라 판단된다. 그림 3.8.40은 시험체의 휨강도 측정 모습을 나타낸 것이다.

표 3.8.23 시험체의 휨강도 시험결과

배합명	휨강도 (MPa)					
	1일	14일	28일	90일	180일	360일
RM-P	3.5	3.9	4.1	4.3	4.5	4.5
RM-FA	3.4	3.8	4.0	4.2	4.3	4.4
RM-BFS	3.3	3.9	4.2	4.5	4.6	4.7
RM-BF+SF	3.5	3.8	4.2	4.5	4.6	4.6
RM-SF	3.7	4.0	4.3	4.5	4.6	4.7
RF-PO	3.5	3.9	4.2	4.4	4.5	4.6

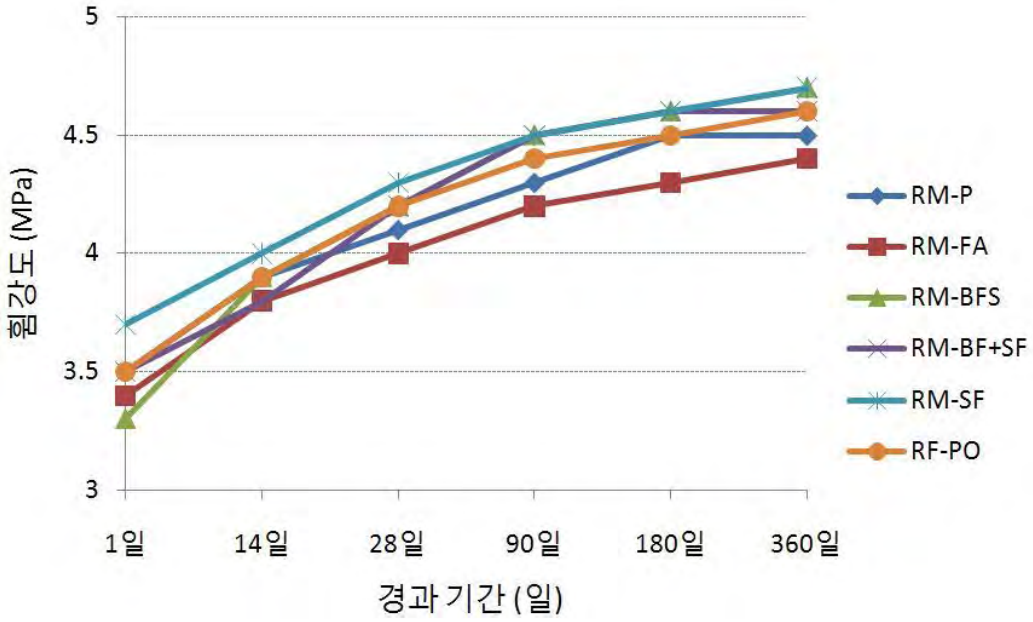


그림 3.8.39 장기 옥외폭로 시험 휨강도 측정 결과

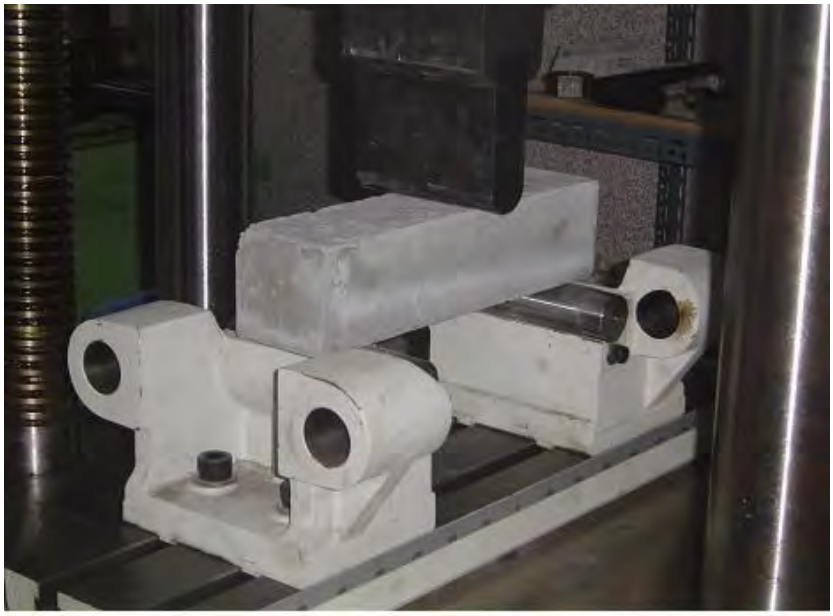


그림 3.8.40 장기 옥외폭로 시험 휨강도 측정 모습

5. 수은압입시험을 통한 장기내구성 평가

가. 수은압입시험

(1) 개요

콘크리트 구조물의 외관에서 발견되는 이상 열화는 구조물의 제조시점에서 여러 가지 열화요인에 의해 발생된다. 이 중 사용재료에 기인하는 열화요인 이외에 과잉의 물이 비정상적인 방법으로 첨가되어 콘크리트 조직이 다공질화 되는 시공관련 열화요인도 주된 요인으로 지적된다. 이러한 경우에는 실제 공용조건하에 콘크리트의 배합 이력이 보존되어 있음에도 불구하고 설계 내구년한보다 조기에 내구성을 상실하는 경우 그 원인의 정확한 규명에 어려움이 따르게 된다.

콘크리트의 공극특성은 콘크리트의 배합조건과 사용재료에 따라 달라질 수 있으며, 중성화 진행속도 및 염화물 이온 침투 등으로 인한 내구성능 저하에 큰 영향을 미칠 수 있다.

시멘트 경화체 또는 콘크리트 중에 존재하는 공극은 콘크리트 믹싱 시 재료에 섞여 들어간 갇힌 공기 및 연행공기에 의한 기포와 배합수에 의한 공극 등으로 분류된다. 여기서 배합수에 의한 공극은 시멘트의 수화가 진행됨에 따라 겔공극과 모세관공극으로 나뉘는데 시멘트의 수화가 진행될수록 겔공극은 증가하고 모세관공극은 감소하지만 총 공극량은 감소한다. (Mindess 등, 1996)

시멘트 경화체의 공극구조는 시멘트 및 혼화재료의 종류, 수화 정도, 콘크리트의 배합 등에 따라 크게 좌우되며, 치밀한 공극구조를 가진 시멘트 경화체의 제조는 콘크리트의 강도뿐만 아니라 내구성 증진에도 크게 기여한다.

본 연구에서는 수은압입시험을 실시하여 숏크리트 배합의 공극 특성을 파악하고 숏크리트의 배합별 공극 특성을 바탕으로 장기 내구성을 평가하였다.

(2) 콘크리트의 공극구조

공극은 시멘트 페이스트의 미세구조를 구성하는 주요 요인이다. 시멘트의 수화과

정에서 모세관공극(capillary porosity)의 감소가 중요한 역할하며 공극 크기의 분포 또한 중요한 역할을 하게 되는데 현재 여러 연구자들에 의하여 이러한 공극의 구조와 크기에 대한 연구가 진행 되어 왔으며 실제로 적용 가능한 공극구조의 평가가 얻어지고 있다.

표 3.8.24 공극 크기와 특성에 관한 요약 (Uchikawa, 1990)

properties	factors
strength	pore size 5nm～2μm increase : getting worse 30μm～1mm increase : getting worse
freezing and thawing resistance	pore size 2nm～6nm increase : getting worse 100nm～1μm increase : getting worse 10μm～90μm increase : getting worse
permeability of gas	pore size several hundreds nm or over increase : getting better volume of paste parts increase : getting worse
permeability of ion	total pore volume increase : getting larger gel pore increase : getting smaller
drying shrinkage and creep	pore size 6nm～60nm increase : getting larger hydrates (C-S-H, C-A-H) increase : getting larger

콘크리트의 공극은 물이 차지하는 공극과 배합시 공기가 연행되어 발생되는 기포로 분류한다. 그 중 물이 차지한 공극은 시멘트 수화물에 의하여 그 크기가 계속 작아져 일반적으로 겔 공극(Gel pore)과 모세관 공극으로 분류된다.

표 3.8.25 수화된 시멘트 페이스트의 공극 크기의 분류 (Mindess 등)

Designation	Diameter	Description
Capillary Pores	10,000 - 50 nm (10 - 0.05 μm)	Large capillaries (macropores)
	50-10 nm	medium capillaries (large mesopores)
Gel Pores	10-2.5 nm	small isolated capillaries (small mesopores)
	2.5-0.5 nm	micropores
	≤0.5 nm	interlayer spaces

표 3.8.26 수화된 페이스트에 대한 공극 크기의 영향 (Mindess 등)

Category	Role of Water	Properties Affected
Macropores	Behaves as bulk water	Permeability; diffusivity
Large Mesopoers	Small surface tension foreces generated	Permeability in the absence of macropores; shrinkage above 80% RH
Small Mesopoers	Large surface tension forces generated	Shrinkage between 80% RH and 50% RH
Micropores	Strongly adsorbed water; no menisci form	Shrinkage at all RH; creep

표 3.8.24는 Uchikawa의 연구를 정리한 것으로 콘크리트 내부의 공극구조는 강도뿐만 아니라 내구성에도 깊은 영향을 미침을 알 수 있다 (Ucikawa, 1990). Daimon은 1.2nm 이하를 층간 공극(intracrystalite pore)이라 하여 시멘트 수화물의 층간 공극에 해당한다고 하였다(Daimon, 1991). Metha는 5nm 이하를 겔 공극, 5~100nm의 공극을 모세관 공극으로 분류하였으며, 모세관 공극을 다시 5~50nm의 마이크로 공극과 50~100nm의 매크로 공극(Macro pore)으로 분류하였는데, 마이크로 공극은 시멘트 경화체의 건조수축 및 크리프에 영향을 크게 미치며, 매크로 공극은 강도와 이온의 침투성에 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였다.(Metha 등, 1993) 마지막으로 Mindess는 콘크리트 수화물의 형성과 관련한 공극평가를 제시하고 있으며(표 3.8.25, 3.8.26), 10nm~10μm를 모세관 공극으로 분류하였다.(Mindess 등, 2003). 이처럼 공극크기의 분류는 연구자에 따라 다르지만 공극의 크기분포는 콘크

리트의 물성에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

이중 모르타르 또는 콘크리트의 내구성능에 영향을 미치는 공극은 10 nm~10 μm의 직경을 가지는 매크로 공극이다. 외부에서 침투한 가스 또는 이온은 매크로 공극 내부의 물을 따라 확산이 이루어지게 되어 콘크리트 내부의 수화생성물 또는 철근과 반응하여 콘크리트의 내구성능을 저하시킨다.

본 연구에서는 수은압입 시험을 통해 콘크리트의 겔공극과 모세관 공극의 변화를 살펴보고 Mindess의 분류기준을 적용하여 3.0nm부터 10nm의 범위를 겔공극, 10nm~10μm를 모세관 공극으로 정의 하여 이들 공극량과 총 공극량을 측정하였다. 그리고 Uchikawa와 Metha가 압축강도에 영향을 미친다고 제시한 5nm~2μm의 공극량, 50~100nm 공극량을 측정하였으며 3nm~30nm의 공극량 및 평균 공극직경을 도출하였다.

(3) 수은압입시험 방법

경화된 시멘트 페이스트의 공극을 측정하는 방법에는 수은압입시험(Mecury Intrusion Porosimetry ; MIP)과 가스 흡착법(Physical Adsorption of Gases) 두 방법이 일반적이다. 수은압입시험은 시멘트 페이스트의 공극구조 속으로 수은을 압입하는 방법으로, 가스흡착법이 겔 공극의 측정에 유리한 반면에 수은압입시험은 모세관 공극(capillary pore)의 측정에 효과적인 것으로 알려지고 있다.

그림 3.8.41은 MIP에서 수은이 압입되는 과정을 간단하게 나타내고 있다. 측정하고자 하는 다공재료의 샘플을 셀에 넣은 후 셀을 진공 배기하고 수은을 채운다. 수은은 표면장력이 크며, 물질을 적시지 않는 성질이 있기 때문에, 압력을 가하지 않은 상태에서는 수은이 샘플의 세공으로 들어가지 않는다. 그러나 압력을 가하면 수은이 세공 속으로 침투하게 되며, 수은에 가해지는 압력을 서서히 늘리게 되면 큰 세공부터 작은 세공까지 세공의 크기 별로 수은이 압입된다.

이렇게 다공재료 샘플의 세공에 높은 압력을 가해 수은을 침투시켜 압입된 수은의 양으로부터 다공재료의 비표면적이나 세공분포를 구하는 방법으로, 가한 압력과 다공재료의 세공크기의 관계는 이론적으로 계산이 가능하다. 따라서, 가한 압력을 연속적으로 증가시키면서, 수은 액면의 표면 변화, 즉 세공으로 들어간 수은의 침입량을 검출하면 샘플 표면의 세공 크기와 그 체적을 측정할 수 있다.

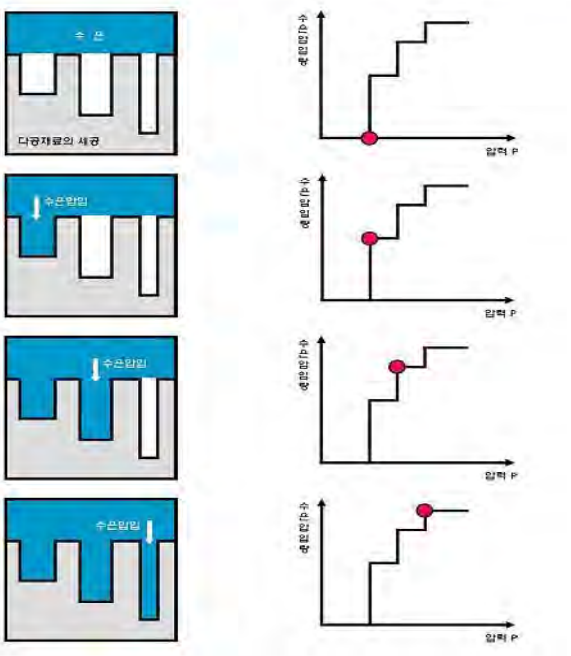


그림 3.8.41 MIP의 기본 원리

수은의 압력과 압입량으로부터 공극을 원통형으로 가정하면 다음 식으로부터 공극의 직경을 산정할 수 있다.

$$d = \frac{-4\gamma\cos\theta}{p} \tag{1}$$

여기서,

d : 공극직경 (m)

p : 공극의 압력(kgf/cm^2)

γ : 표면장력 (485 dyne/cm)

θ : 수은의 접촉각 (140°)

한편 공극이 원통형이라고 가정하면 총 표면적(S_t)과 총 체적(V_t)의 관계로부터 공극의 평균 직경(D_a)의 식은 다음과 같다.

$$D_a = \frac{4\,V_t}{S_t} \tag{2}$$

일반적으로 수은압입시험에 의한 공극분석은 크게 두 가지의 문제를 가지는 것으로 알려져 있다. 첫째는 고체내부에 존재하는 공극을 원통형으로 가정하여 발생하는 오차이며(Cook 등, 1993), 두 번째로는 공극의 출입구 부분이 내부공극에 비해 작거나 또는 막혀 있는 경우, 실제의 공극크기에 비하여 작게 평가하거나 측정이 불가능한 잉크병현상(Ink bottle)으로 발생하는 오차이다(Diamond, 2000). 그러나 수은압입시험은 높은 실험 재현성을 가지며, 직접적인 수치로 공극분포에 대한 정보를 제공하기 때문에 미세구조의 연구 분야에서 보편적으로 이용되고 있다.

수은압입시험을 진행하기위해서는 시료 내부의 물을 탈수 시켜 시멘트 페이스트의 수화진행을 억제하여야 하며 이를 위하여 실험 전처리로 아세톤에 하루 침지 시키게 된다. 다음 그림 3.8.42는 MIP시험 진행을 위한 시료의 전처리 과정이다.

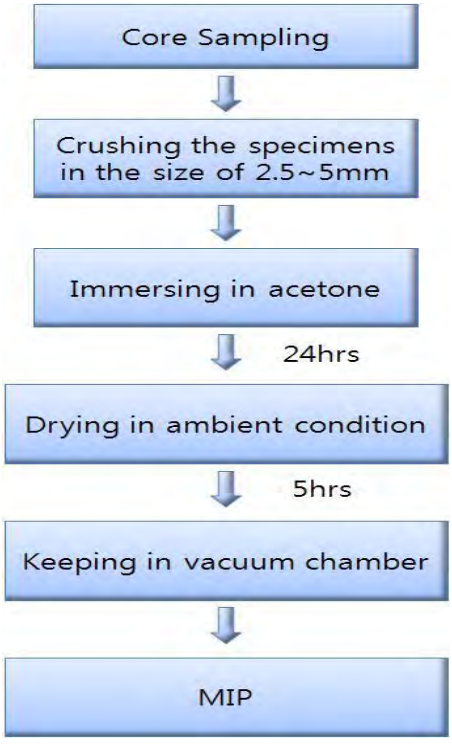


그림 3.8.42 MIP 시험을 위한 시료의 전처리 과정

이 실험은 진공상태에서 60,000 psi의 압력범위에서공극분포를 측정할 수 있는 Q사의 Poremaster GT(그림 3.8.43) 장비를 사용하여 측정하였다. 공극 직경의 측정범위는 950~0.0036 μm이다. 공극의 측정은 진공 상태에서 50 psi까지의 가스압으로 압력가하는 low pressure 실험과 50 psi에서 60,000 psi까지의 압력을 가하는

high pressure 실험으로 나누어 진행하였다.



그림 3.8.43 Poremaster GT

그림 3.8.44는 공극 측정 시험 과정을 나타내었다.

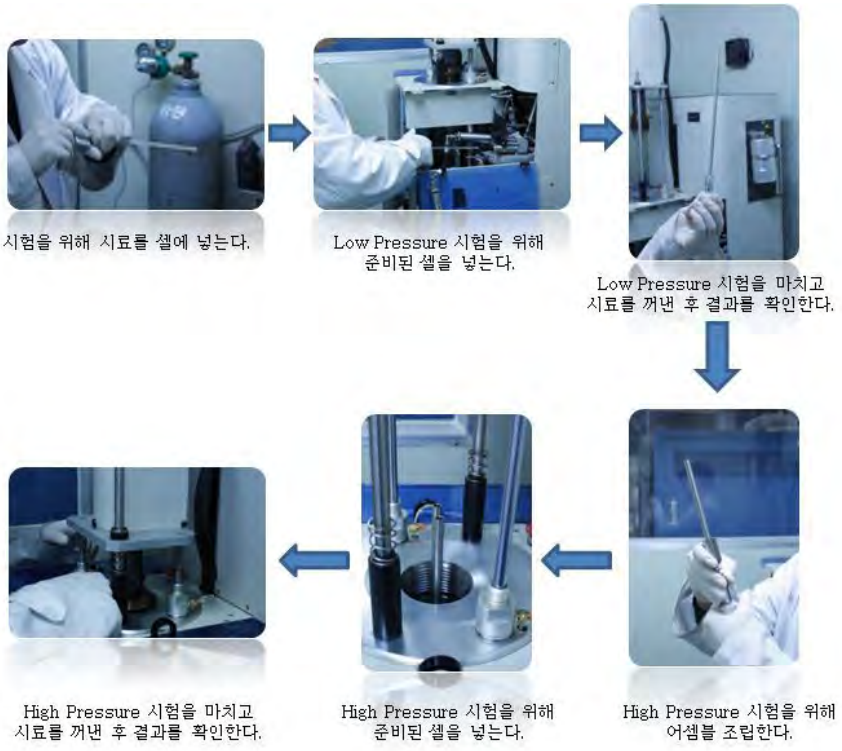


그림 3.8.44 MIP 시험 과정

나. 수은압입시험 결과

(1) 1차 수은압입시험

(가) 시험 배합표

1차 수은압입시험은 실내실험을 통해 도출된 레디믹스트 숏크리트 배합과 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 배합, 그리고 현장골재를 사용한 배합의 장기 내구성 평가를 위해 수행되었다.

레디믹스트 숏크리트 배합으로 RM-P1 배합은 혼화재가 혼입 되지 않은 일반 레디믹스트 숏크리트 배합이며 RM-P2는 일반 레디믹스트 숏크리트에 플라이 애쉬 혼화재를 혼입한 배합이며, RM-BFS 배합은 고로슬래그 미분말과 플라이 애쉬를 동시에 혼입한 레디믹스트 숏크리트 배합으로 수화열을 낮추고 장기 강도를 발현시키며 경제성을 확보하기 위한 레디믹스트 숏크리트의 개발을 위해 장기 내구성 검토를 수행하였다. 그리고 레디믹스트 숏크리트 배합에 대한 비교군으로 광산현장의 골재를 사용한 K 배합과 국내 터널현장의 골재를 사용한 N배합을 타설하여 수은압입 시험을 실시하였다. 표 3.8.27은 1차 수은압입시험에 사용된 배합표이다.

표 3.8.27 1차 수은압입시험 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재		합성섬유	혼화재		혼화제	
									HP-L 50mm	고로슬래그 C*30%	F/A	유동화제 (kg)	AE 감수제
레디믹스트 배합													
1	RM-P1	8	12	45.6	212	465	1586		5	_	-	1.67	-
2	RM-P2				212	465	1497		5	-	75	1.94	
3	RM-BFS				212	325	1489		5	140	75	1.94	
현장골재 배합							S	G					
4	K	13	15	42.0	146	450	1124	600	40 (강섬유)	-	-	1.67	40
5	N	13	12	34.6	129	489	1047	617	40 (강섬유)	-	-	1.67	-

주1) BFS 고로슬래그 3종
K - 광진 현장골재 N - 일반 현장골재

(나) 시험 결과

1) RM-P1 배합

직경에 따른 공극량의 변화는 그림 3.8.45에 나타내었다. 그림 3.8.46은 공극의 직경에 따른 공극량(%)의 누적 변화를 나타내고 있다. 그림 3.8.45 및 3.8.46을 보면 알 수 있듯이 RM-P1배합의 경우 큰 메조 공극이 많은 양을 차지하고 있으며 C-S-H내에 존재하는 작은 메조 공극도 확인할 수가 있다. 또한 콘크리트의 내구성능에 영향을 미칠 수 있는 공극인 메크로 공극의 존재를 확인할 수가 있다. RM-P1의 경우 매크로 공극 이상의 직경을 가지는 공극의 양이 전체 공극의 31.75%로 적은 편이며 어느 정도 우수한 장기 내구성을 지닐 것이라고 예상 할 수 있다.

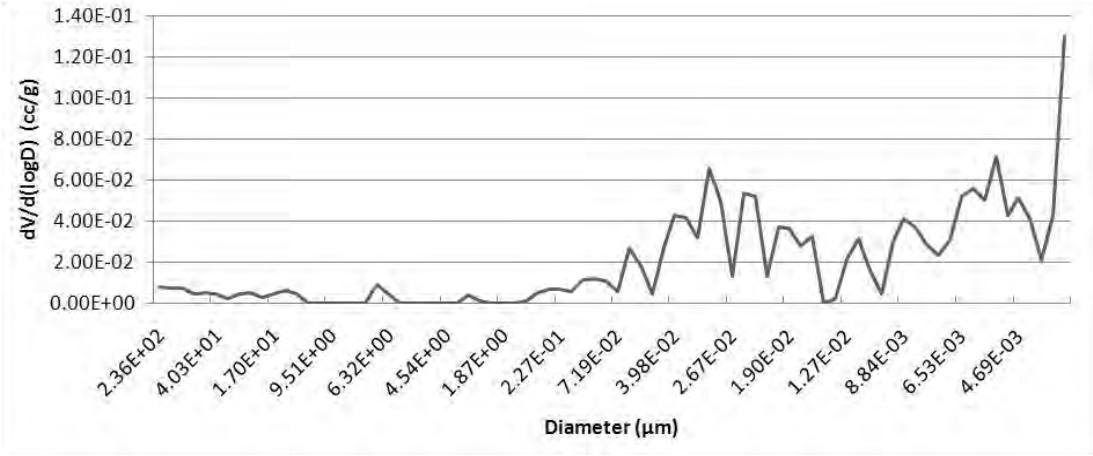


그림 3.8.45 직경에 따른 공극량(배합 RM-P1)

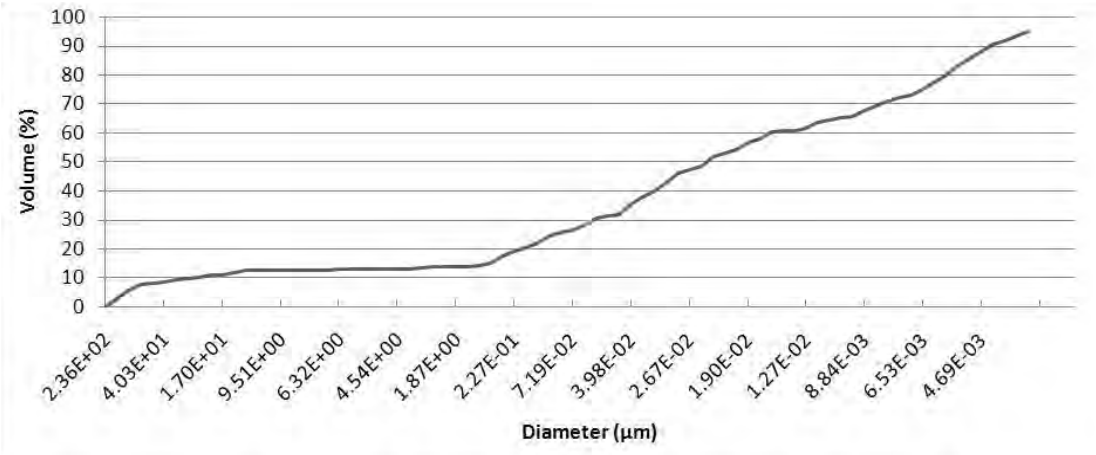


그림 3.8.46 직경에 따른 공극의 누적%(배합 RM-P1)

2) RM-P2 배합

RM-P2 배합의 직경에 따른 공극량의 변화는 그림 3.8.47와 3.8.48에 나타내었다. 그림 3.8.47은 공극의 직경에 공극량을 타나내고 있으며 그림 3.8.48은 직경에 따른 공극량의 누적 분포량을 보여주고 있다. RM-P2배합의 경우 큰 메조 공극이 전체 공극 중 많은 양을 차지하고 있으며 C-S-H내에 존재하는 작은 메조 공극도 많은 양이 있음을 확인할 수가 있다. 또한 콘크리트의 강도 및 동결융해 저항성에 영향을 미치는 매크로 공극 이상의 직경을 가지는 공극의 양도 23.43%에 이르는 것을 확인 할 수 있었다. 마지막으로 콘크리트의 내구성능에 영향을 미칠수 있는 공극인 매크로 공극의 존재를 확인할 수가 있지만 그 양은 1.05%로 매우 적은 것으로 나타나고 있다. 따라서 RM-P2 배합의 경우 장기 내구성은 우수할 것으로 판단 되며 이는 플라이 애쉬가 혼입 됨으로 인해 숏크리트 조직이 더 치밀해 졌기 때문으로 판단 된다.

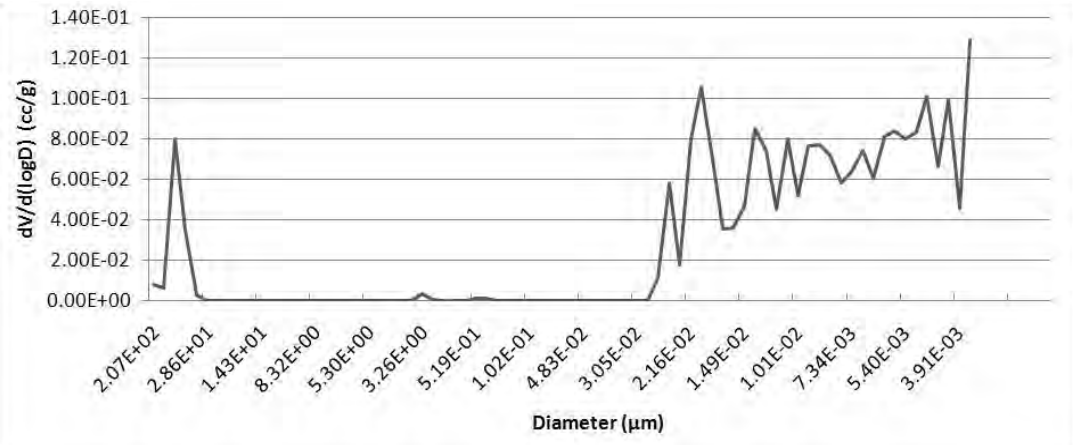


그림 3.8.47 직경에 따른 공극량(배합 RM-P2)

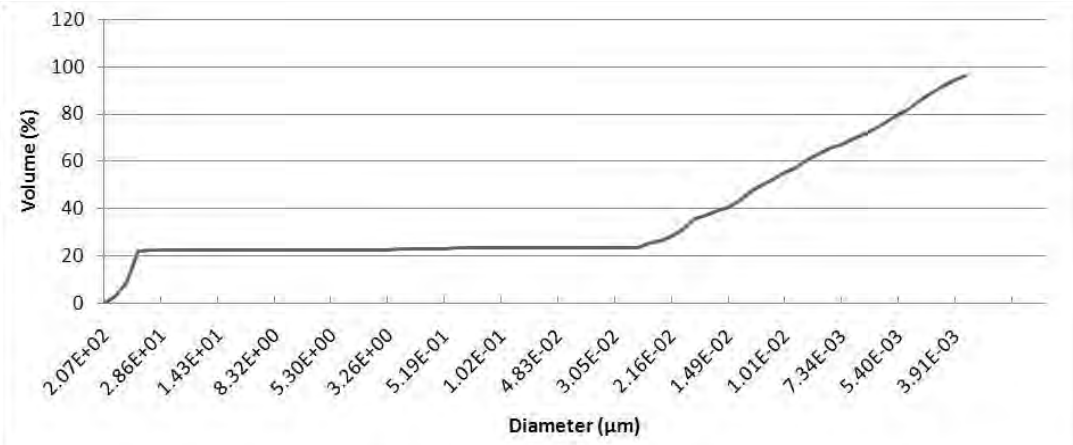


그림 3.8.48 직경에 따른 공극의 누적%(배합 RM-P2)

3) RM-BFS 배합

RM-BFS 배합의 직경에 따른 공극량의 변화는 그림 3.8.49~3.8.50에 나타나 있다. 그림 3.8.49는 직경의 변화에 따른 공극량을 보여주고 있다. RM-BFS는 큰 메조공극이 많은 양을 차지하고 있으며 C-S-H내에 존재하는 작은 메조공극 및 마이크로 공극이 가장 많은 53.18%를 차지하고 있다. 이는 고로슬래그 분말이 수화되면서 큰 공극을 채우고 치밀한 조직을 만들기 때문으로 RM-BFS의 경우 콘크리트의 장기 내구성능에 영향을 미칠수 있는 매크로 공극의 양은 전체 공극의 1%정도만을 차지하고 있어 시험 배합 중 가장 우수한 장기 내구성을 보일 것으로 생각된다.

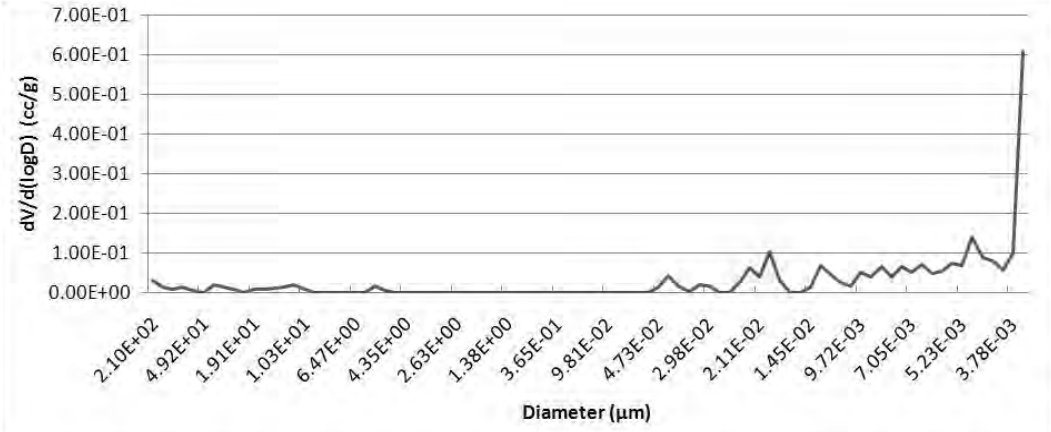


그림 3.8.49 직경에 따른 공극량(배합 RM-BFS)

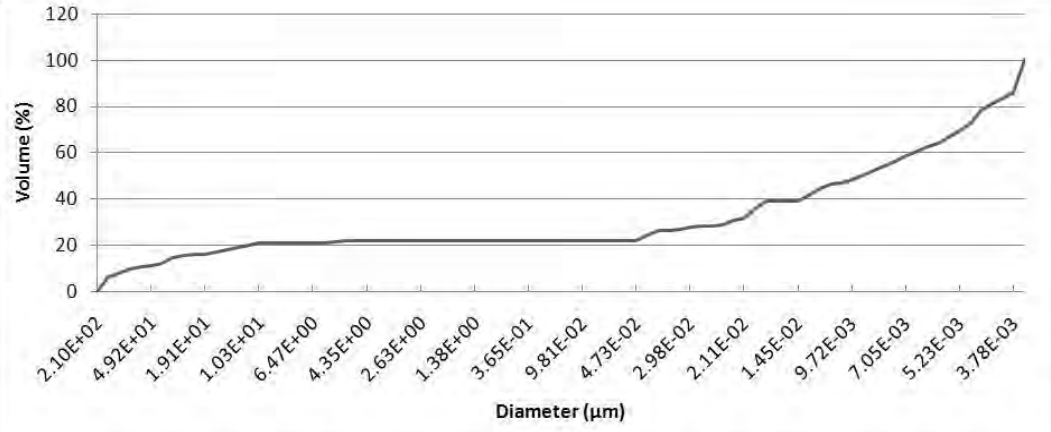


그림 3.8.50 직경에 따른 공극의 누적%(배합 RM-BFS)

4) K 배합

그림 3.8.51~3.8.52은 K 배합의 직경에 따른 공극량의 변화를 보여주고 있다. K 배합의 경우 매크로 공극 양이 25.51%로 현저하게 많음을 알 수 있다. 그리고 큰 메조 공극 및 작은 메조 공극과 마이크로 공극의 양 다른 배합들에 비해 적게 분포함을 확인할 수 있었다.

이 결과를 미루어 K 배합의 경우 매크로 공극을 통한 반응성 이온 및 유해가스의 전달이 활발히 이루어 질 가능성이 크므로 장기 내구성에서 가장 불리한 결과를 보일 것으로 판단된다.

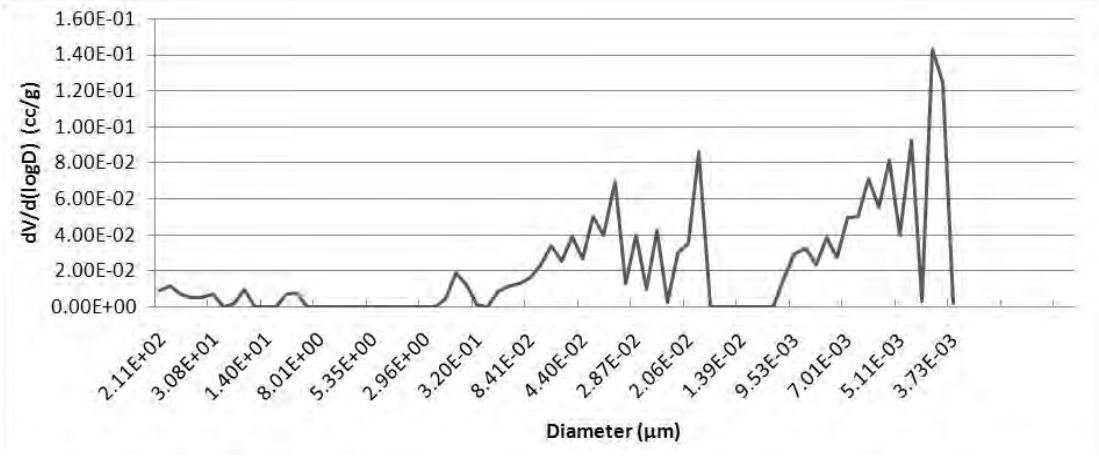


그림 3.8.51 직경에 따른 공극량(배합 K)

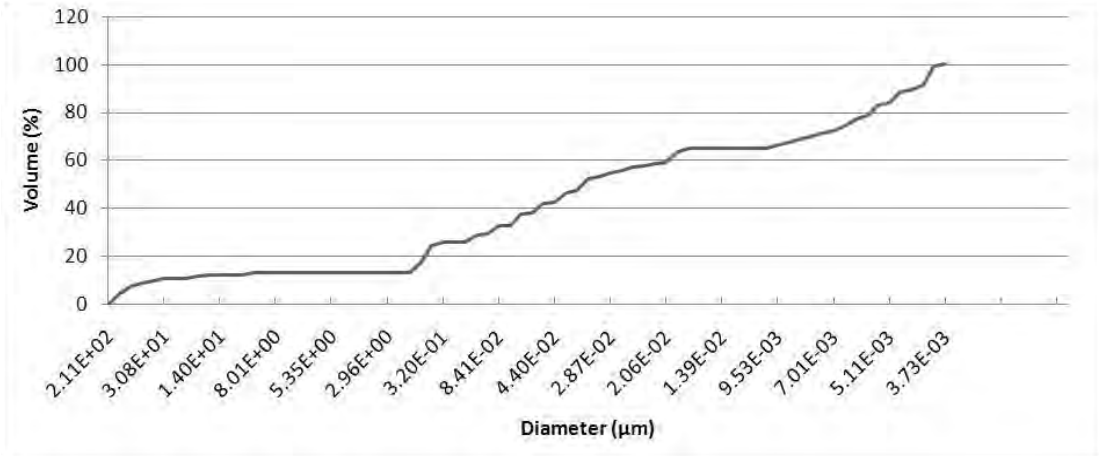


그림 3.8.52 직경에 따른 공극의 누적%(배합 K)

5) N 배합

그림 3.8.53~3.8.54는 현장 배합인 N 배합의 직경에 따른 공극량의 변화를 보여주고 있다. N 배합은 역시 다른 배합들과 마찬가지로 큰 메조 공극이 공극의 많은 양을 차지하고 있으며 C-S-H내에 존재하는 작은 메조 공극 및 마이크로 공극도 확인할 수가 있다. 또한 콘크리트의 강도 및 동결융해 저항성에 영향을 미치는 매크로 공극 이상의 직경을 가지는 공극의 양은 25.15%로 가장 많은 양이 존재함을 확인 할 수 있었으며 콘크리트의 내구성능에 영향을 미칠 수 있는 공극인 매크로 공극의 양은 적게 나타나고 있다. N 배합의 경우 비록 매크로 공극의 양은 적지만 매크로 공극 이상의 크기를 가지는 공극의 양이 많아 장기 내구성은 레디믹스트 숏크리트에 비해 저하 될 것으로 판단된다.

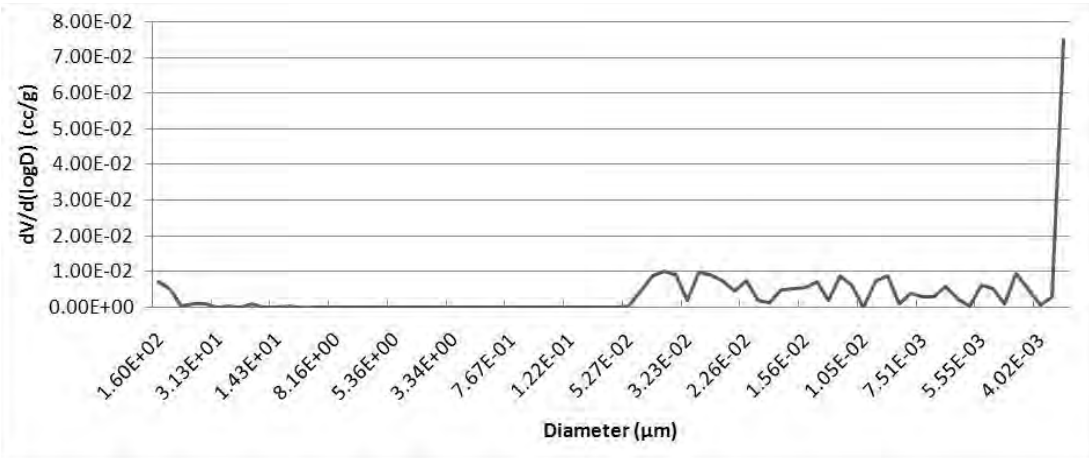


그림 3.8.53 직경에 따른 공극량(배합 N)

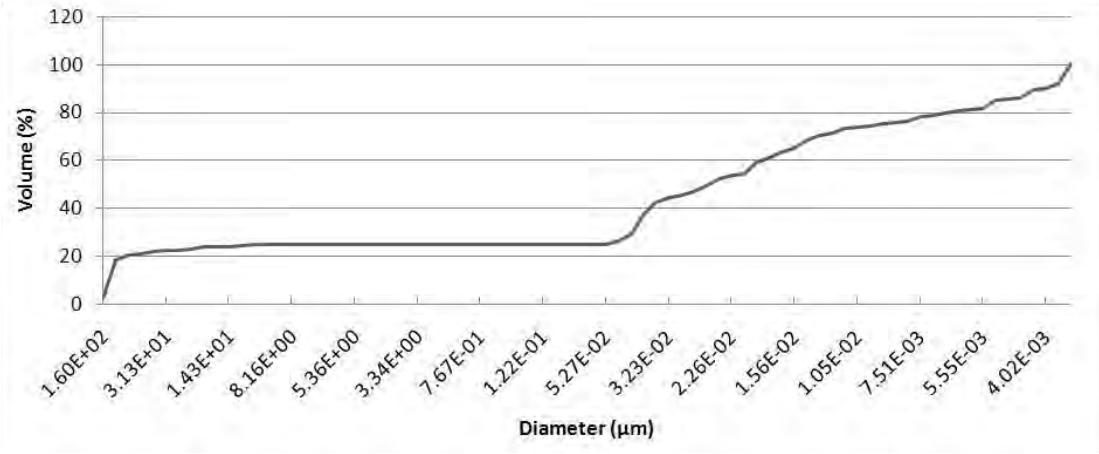


그림 3.8.54 직경에 따른 공극의 누적%(배합 N)

6) 결론

5가지 배합의 MIP 시험을 통한 공극량 실험결과를 분석한 결과는 다음과 같이 정리 할 수 있다.

RM-P1 배합의 경우 매크로 공극 이상의 직경을 가지는 공극의 양이 상대적으로 적으나 RM-P2 배합과 RM-BFS 배합에 비하여 상대적으로 많은 매크로 공극을 가지는 것 알 수 있어 장기 내구성 측면에서 RM-P2 배합과 RM-BFS4 배합에 비하여 불리할 것으로 판단된다. 이는 그림 3.8.55 (a)에서 확인 할 수 있다. RM-P2와 RM-BFS 배합이 RM-P1배합에 비하여 내부 공극 구조가 더욱 조밀 한 것을 알 수 있으며 이는 RM-P2와 RM-BFS 배합에 사용된 플라이애쉬와 고로슬래그의 포졸란 반응으로 인하여 콘크리트 내부 조직구조가 더욱 치밀해진 것에 기인한 것으로 생각된다. 그리고 RM-P2배합에 비해 RM-BFS배합의 공극구조가 더욱 치밀한 결과를 보였는데 이에 따라 장기 내구성능은 RM-BFS 배합이 약간 더 우수할 것으로 판단된다.

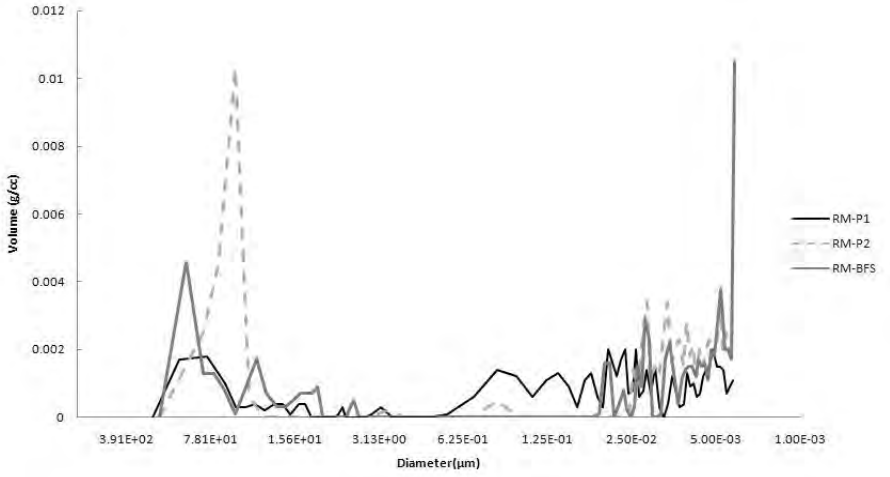
그림 3.8.55 (b)는 RM-BFS 및 N과 K 배합의 공극량을 비교한 그림이다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 N 배합이 RM-BFS에 비하여 매크로 공극의 양은 적으나 강도에 영향을 줄수 있는 공극의 양이 상대적으로 많으며 수축에 영향을 미치는 큰 메조 공극 및 작은 메조 공극의 양이 상대적으로 많아 수축에 따른 균열의 발생이 우려된다. K배합의 경우 콘크리트 내구성능에 영향을 미치는 매크로 공극의 양이 전체 배합중 가장 많은 것으로 나타나 장기 내구성능은 가장 저하 될 것으로 예상된다.

공극구조 비교에 따른 각 배합별 장기 성능은 RM-BFS가 가장 우수한 것으로 판단되며 RM-P2배합과 RM-P1 배합, N 배합순으로 장기 내구 성능이 좋을 것으로 예측된다. 그리고 K 배합의 경우 장기 내구 성능이 가장 낮을 것으로 판단된다.

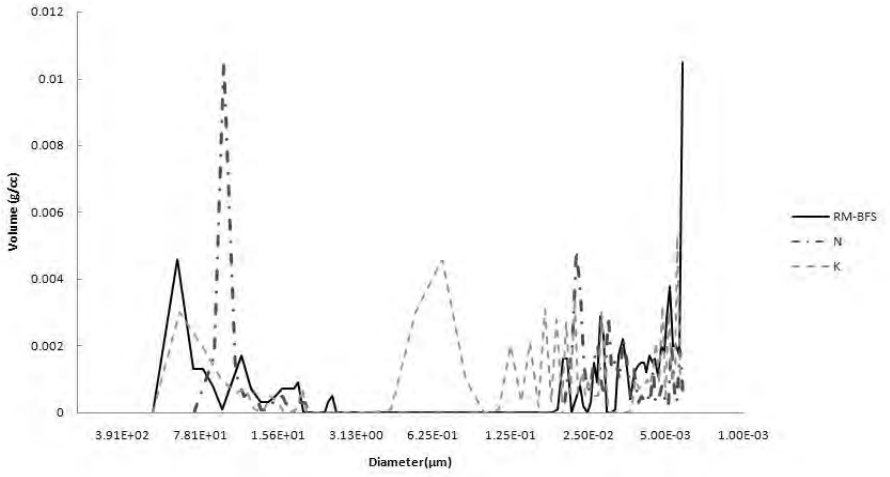
1차 수은압입시험 결과를 종합해 보면 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 경우 조직이 치밀하여 장기 내구성에 가장 유리 할 것으로 예상되며 플라이 애쉬가 섞인 레디믹스트 숏크리트의 경우 장기 내구성에서 일반 레디믹스트 숏크리트 보다 우수한 성능을 발휘 할 수 있을 것이라는 결론을 얻을 수 있었다. 또한 현장 골재를 사용한 배합의 경우는 레디믹스트 숏크리트와 비교하여 분포하고 있는 공극의 크기가 크고 불규칙하여 이온이나 유해 가스에 영향을 받을 가능성이 커 장기 내구성에 불리 할 것이라 사료된다.

표 3.8.28 배합별 공극 분포 비교

배합	공극량(%)			
	> macropore	macropore	large mesopore	≤ small mesopore
RM-P1	12.98	18.77	36.49	31.75
RM-P2	23.43	1.05	32.85	42.67
RM-BFS4	20.97	1.08	24.76	53.18
K	11.95	25.51	27.26	35.28
N	25.15	0.00	48.48	26.37



(a) 레디믹스트 숏크리트의 비교



(b) 현장골재 배합과의 비교

그림 3.8.55 배합에 따른 수은 압입량 비교

(2) 2차 수은압입시험

(가) 시험 배합표

2차 수은압입시험은 강섬유를 대체하는 합성섬유의 혼입률을 변화시켜 장기 내구성에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행되었다. 시험에 사용된 배합은 표 3.8.29와 같다. 본 시험에서는 현장골재 배합에 실리카 흄을 혼입한 배합인 P-SF 배합과 H사의 L형 합성섬유를 12kg/m^3 혼입한 RM-HP1 배합, 그리고 14kg/m^3 혼입한 RM-HP2 배합의 수은 압입시험을 수행 하여 현장골재 배합과 레디믹스트 숏크리트 배합의 장기내구성을 비교하고 레디믹스트 숏크리트의 합성섬유 혼입량 별 장기 내구성을 비교하였다.

표 3.8.29 2차 수은압입시험 배합표

배합명		Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W	C	골재		합성섬유		혼화재	혼화제
									HP-L 50mm	강섬유	실리카 흄 (kg)	액상형 유동화제 (kg)
현장골재 배합							S	G				
1	P-SF	13	12	45.6	214	475	995	660	-	40	23	-
레디믹스트												
2	RM-HP1	8	12	45.6	212	465	1586		12	-	-	5.12 (C*1.1)
3	RM-HP2				212	465	1586		14	-	-	5.58 (C*1.2)

(나) 시험 결과

1) P-SF 배합

P-SF 배합의 MIP 시험 결과는 아래의 그림 3.8.56~3.8.57 에 나타나 있다. P 배합은 아래의 그림에서 알 수 있듯이 매크로 공극 이상의 연행공기가 14.08%, 매크로 공극이 약 48.39%가량을 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 큰 메조공극은 34.63%를 차지하고 있으며 작은 메조공극이 약 2.90%를 차치하고 있는 것으로 나타났다. P-SF배합의 경우 강도 및 내구성에 영향을 미치는 공극이 62.47%로 분포하여 투수성 및 투기성, 그리고 이온의 확산성이 매우 클 것으로 예상되며 레디믹스트 배합에 비해 장기 내구성능이 현저히 작을 것으로 판단된다. P-SF 배합은 실리카 흄이 혼입되었지만 현장 골재를 사용 함으로써 골재의 입도가 좋지 못하고 불순물이 혼합되어 수화반응이 제대로 일어나지 못해 공극의 크기가 크고 분산성이 저하된 것으로 생각된다.

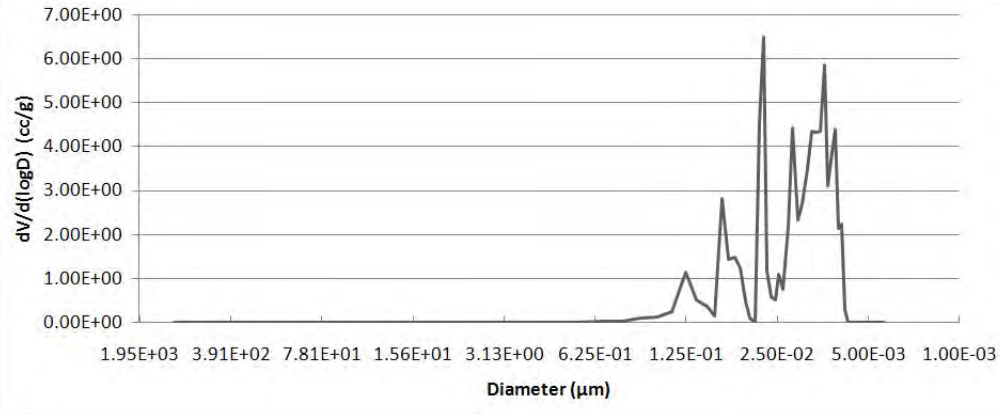


그림 3.8.56 직경에 따른 공극량 (P-SF)

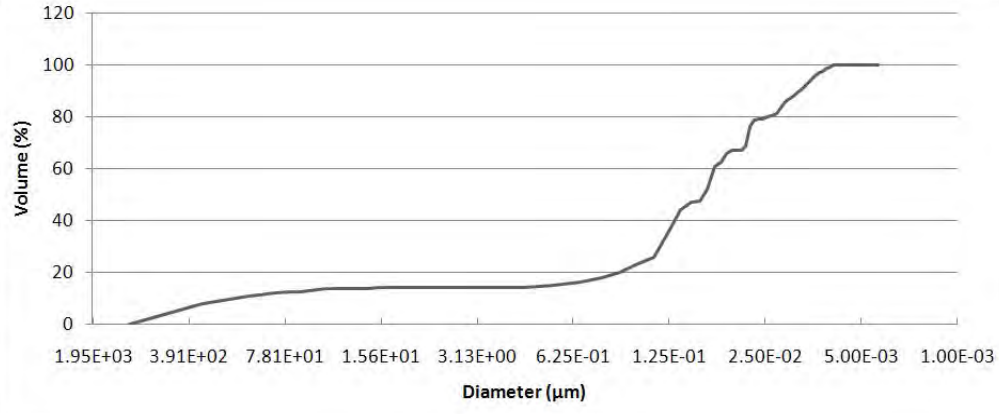


그림 3.8.57 직경에 따른 공극의 누적 % (P-SF)

2) RM-HP1 배합

그림 3.8.58~3.8.59는 RM-HP1 배합의 MIP 시험 결과를 나타내고 있다. 시험 결과 RM-HP1 배합은 약 1.37%의 연행공기를 가지는 것으로 나타났으며 매크로 공극은 전체 공극의 약 0.01%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 큰 메조 공극이 약 97.68%를 차지하고 있는 것으로 나타났으며 작은 메조 공극 이하의 공극이 전체 공극 중 약 0.94%를 차지하고 있는 것으로 나타나 다른 배합에 비하여 매크로 공극이 차지하는 양이 현저히 낮음을 알 수 있었다. 따라서 투수성 및 투기성, 이온의 확산 속도가 가장 낮을 것으로 예상되어 우수한 장기 내구성능을 가질 것으로 판단된다.

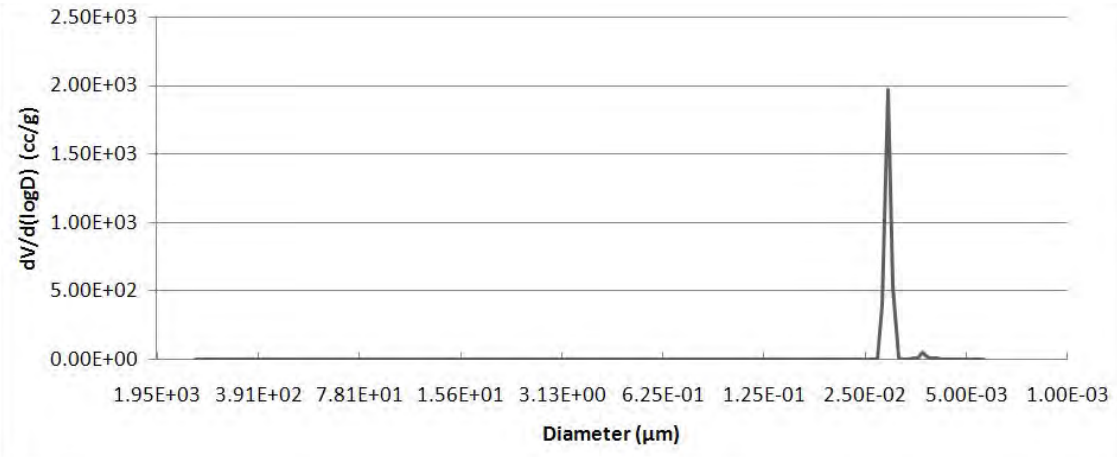


그림 3.8.58 직경에 따른 공극량 (RM-HP1)

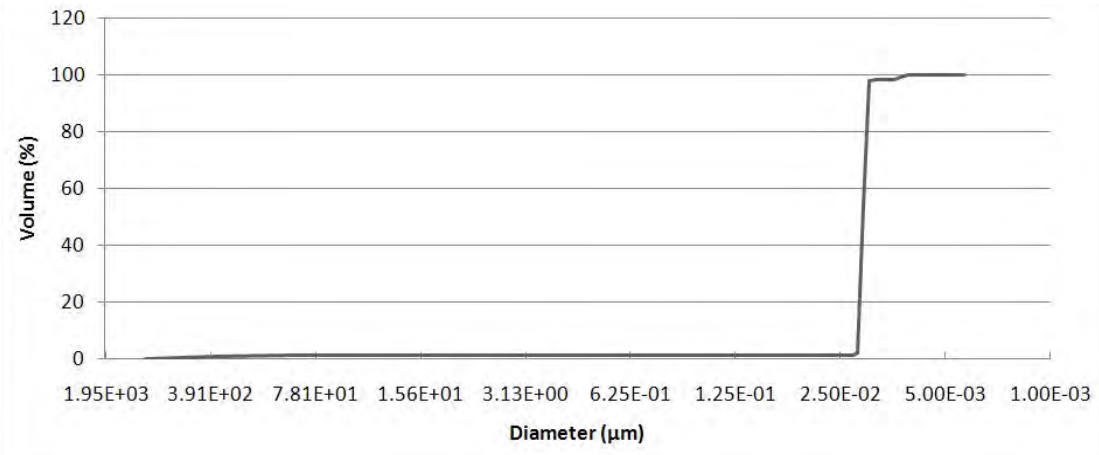


그림 3.8.59 직경에 따른 공극의 누적 % (RM-HP1)

3) RM-HP2

그림 3.8.60~3.8.61은 RM-HP2 배합의 MIP 시험 결과를 나태내고 있다. RM-HP2 배합은 약 6.69%의 연행공기를 가지는 것으로 나타났으며 장기내구성에 영향을 미치는 매크고 공극의 양은 미미한 것으로 나타났다. 그리고 큰 메조 공극이 약 93.31%로 공극의 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타났으며 작은 메조 공극 이하의 공극의 양도 미미한 것으로 나타났다. RM-HP2 배합 역시 RM-HP1 배합과 비슷하게 매크로 공극이 차지하는 양이 현저히 낮아 투수성 및 투기성, 이온의 확산 속도가 가장 낮을 것으로 예상되어 우수한 장기 내구성능을 가질 것으로 판단되지만 합성섬유의 양 증가로 인해 합성섬유와 시멘트 사이에 공극이 발생할 수 있는 여지가 증가하여 RM-HP1 배합에 비해서는 큰 공극들이 다소 증가 한 것으로 생각된다.

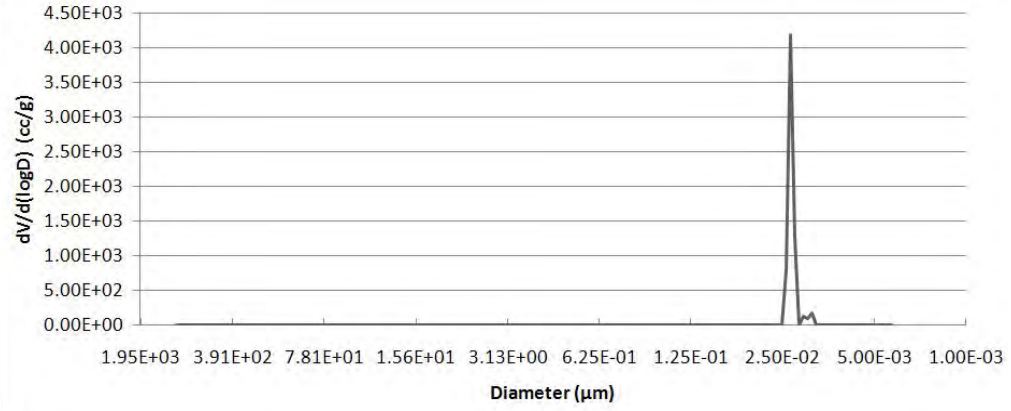


그림 3.8.60 직경에 따른 공극분포 (RM-HP2)

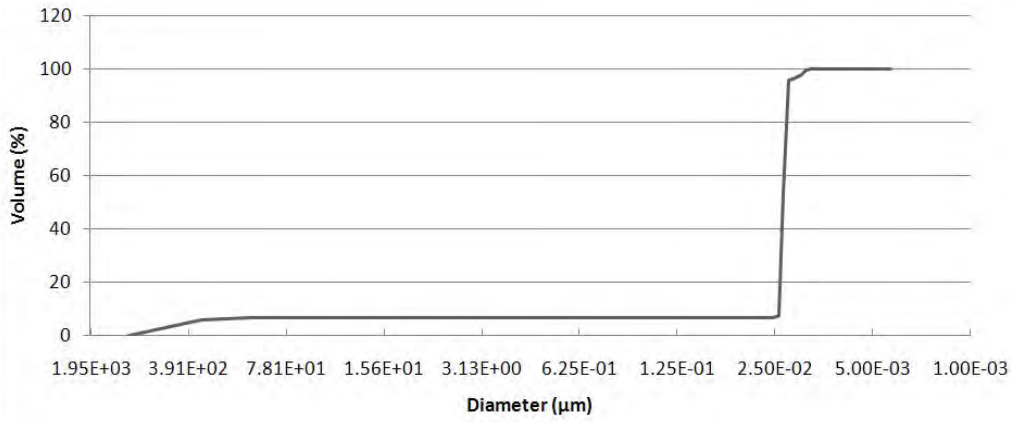


그림 3.8.61 직경에 따른 공극의 누적 % (RM-HP2)

4) 결론

P-SF 배합의 경우 매크로 공극 이상의 직경을 가지는 공극의 양이 전체 공극의 약 62.47%를 차지하고 있어 투수성 및 투기성 그리고 이온 확산성이 클 것으로 판단되며 따라서 장기 내구성에 가장 취약 할 것으로 생각된다. 이는 실리카 흄이 혼입되었지만 현장 골재를 사용 함으로써 골재의 입도가 좋지 못하고 불순물이 혼합되어 수화반응이 제대로 일어나지 못해 공극의 크기가 크고 분산성이 저하된 것으로 생각되며 현장 골재가 가지고 있는 문제로 골재품질 저하 현상을 보여주는 단적인 예라고 할 수 있다.

RM-HP1 배합은 12kg/m^3 의 합성섬유가 혼입된 배합으로 공극의 크기가 작고 고르게 분포되어 투수 및 투기에 저항성이 실험 배합 중 가장 클 것으로 생각된다. 그리고 RM-HP2 배합은 14kg/m^3 의 합성섬유가 혼입된 배합으로 RM-HP1과 마찬가지로 공극의 크기가 작고 고르게 분포 하고 있지만 RM-HP1에 비해 연행공기의 양이 많아 강도는 약간 저하 될 것으로 예상 할 수 있으며 장기 내구성에 있어서도 다소 저하될 우려가 있다고 생각된다. 이는 합성섬유의 혼입량이 증가하며 시멘트 페이스트와 합성섬유 사이에 약간의 공극이 더 생성되었기 때문으로 생각된다. RM-HP1과 RM-HP2 배합 모두 매우 우수한 장기 내구 특성을 보였고 1차 수은압입시험에 이어 2차 수은압입시험에서도 현장 배합에 비해 레디믹스트 숏크리트의 장기 내구성이 훨씬 뛰어남을 확인 할 수 있었다. 시편에서 공극의 종류별에 따른 분포 비율은 표 3.8.30에 요약하였고 공극 분포에 따른 수은 압입량은 그림 3.8.62에 나타내었다.

표 3.8.30 배합별 공극 분포 비교

배합	공극량(%)			
	> macropore	macropore	large mesopore	≤ small mesopore
P-SF1	14.08	48.39	34.63	2.90
RM-HP1	1.37	0.01	97.68	0.94
RM-HP2	6.69	-	93.31	-

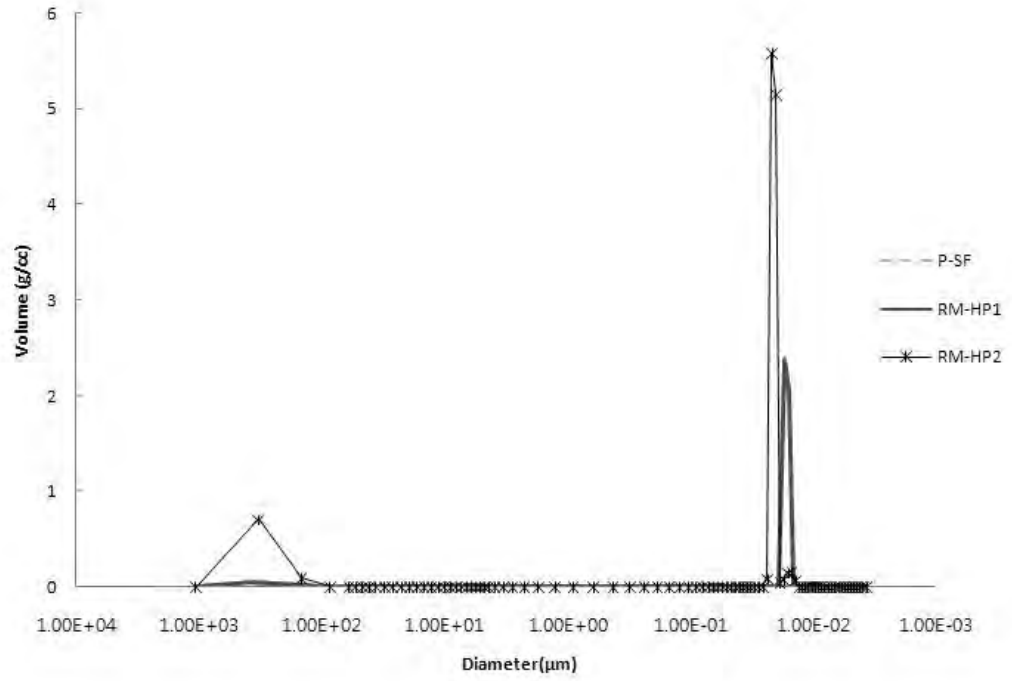


그림 3.8.62 배합에 따른 수은압입량 비교

6. 소결론

본 절에서는 레디믹스트 숏크리트의 건조수축, 단일열화 및 복합열화에 의한 성능저하 요인을 분석하기 위하여 시험을 실시하였다. 단일열화 시험 결과는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 보통강도 콘크리트 보다 고강도 배합이기 때문에 다소 양호한 결과를 나타내었다. 복합열화 시험결과 또한 특수한 상황을 제외 하고는 일반강도 콘크리트 보다는 우수한 결과를 나타냈다. 또한 레디믹스트 숏크리트의 장기내구성 평가를 위해 수은압입 시험을 수행한 결과 현장 골재에 비해 훨씬 우수한 장기내구성능을 확인 할 수 있었다.

(1) 건조수축시험 결과 굵은 골재 최대치수의 차이가 건조수축에 미치는 영향은 많지 않았으며 섬유혼입 시 초기 강도 발현 후 건조수축이 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 섬유 혼입량이 증가함에 따라 건조수축량은 비례하여 감소하였고 본 연구에서 도출된 합성섬유 적정혼입량인 12kg/m^3 배합의 경우 매우 안정된 건조수축량을 나타내 분말형 레디믹스트 배합 적용시 건조수축에 의한 균열 및 안정성 문제는 없을 것으로 판단된다.

(2) 동결융해 저항성 단일 열화 시험결과, 전체적으로 동결융해 저항성이 모두 우수하게 나타났다. 그 중 RM-SF 배합이 300싸이클에서 94.2% 이상을 기록해 가장 우수하였으며 RM-FA 배합이 84.3%로 가장 낮은 수치를 보였다. 이는 부분적으로 플라이애시를 사용한 콘크리트의 표면에서 발생하는 공기량 손실과 표면의 부적합한 마무리나 양생에 의한 것이라 판단된다.

(3) 촉진 탄산화 단일 열화 시험 결과, 노출 4주까지가 가장 왕성하게 탄산화가 일어났으며, 노출기간 26주의 탄산화 깊이는 RM-SF 배합과 RM-PO 배합이 각각 14.5 , 15.4mm 로 가장 작게 나타났다. RM-PO 배합의 경우 폴리머 성분으로 인해 콘크리트와의 부착성을 증대시키고 팽창성 및 자체 강성이 우수해져 콘크리트 매트릭스가 치밀해진 결과로 판단되며 RM-SF 배합의 경우 실리카흄의 혼입으로 인해 매우 미세한 비정질의 실리카가 수화 초기부터 수산화칼슘과 결합하는 포졸란 반응으로 인한 것으로 판단된다.

(4) RM-BFS 배합의 경우 26주 동안 촉진탄산화에 노출한 결과 탄산화 깊이가 23mm로 가장 크게 나타났다. 이는 시멘트 수화시에 발생하는 수산화칼슘과 고로슬래그 미분말이 반응하여 콘크리트의 알칼리성이 약간 저하되었기 때문이라 판단된다.

(5) 촉진 탄산화 후 동결융해 시험 결과는 동결융해 단일열화 시험의 경우와 큰 차이가 없었다. 이는 탄산화에 의해 콘크리트 내부조직이 변화하여 동결융해 저항성에 영향을 미치기에 시험 기간이 다소 부족했던 것으로 사료되며, 차후 좀 더 가혹한 환경에서의 복합열화 시험이 필요할 것으로 보인다.

(6) 동결융해 후 촉진 탄산화 시험 결과를 살펴보면, 촉진 탄산화 단일열화 시험과 마찬가지로 노출 4주까지가 가장 왕성하게 탄산화가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 또한 단일열화 시험 데이터와 비교하여 전체적으로 탄산화 깊이가 늘어난 것을 확인 할 수 있는데, 이는 300 cycle의 동결융해 환경 노출에 의하여 콘크리트 내부의 균열 등으로 인하여 내부조직의 열화에 기인한 것으로 사료된다.

(7) 내약품 시험 노출 후 동결융해 시험 결과 , 10% $CaCl_2$ 침지 시험체와 $NaSO_4$ 침지 시험체의 경우 약품 노출 50일 이후 압축강도 측정결과가 예상 압축강도의 약 80%(29~36MPa) 수준으로 저하된 모습을 보였다.

(8) 또한 5% H_2SO_4 침지 시험체의 경우에는 약품 노출 50일 이후 압축강도 측정결과가 예상 압축강도의 약 60%(21~31MPa) 수준으로 저하된 모습을 보였다. 동결융해 단일압축강도 시험시 저하되었던 동탄성계수 수치 비율과 비교하면 저하 폭이 3개의 약품의 경우 모두 전반적으로 증가한 것을 확인할 수 있다.

(9) 장기 옥외폭로에 의한 열화특성 평가 시험은 압축강도 및 휨강도 특성을 분석하였다. 장기폭로시험은 최소 3년이상 경과된 시편을 가지고 최고 내구성 지수를 도출하게 되는데 본 연구에서는 총 1년 2개월 정도의 폭로시험을 통해 압축강도 및 휨강도 의 결과값으로 다소 양호한 값을 얻을 수 있었다. 추후 폭로 후 3년 경과시 추가적인 시험을 수행하여 레디믹스트 숏크리트의 장기 옥외폭로에 의한 물성 저하정도를 파악하고자 한다.

(10) 레디믹스트 숏크리트의 장기 내구성 평가를 위해 수은압입시험을 실시하여 숏크리트 내부 공극 특성을 평가하였다. 실험결과 고로슬래그 혼입 및 플라이 애쉬 혼입 레디믹스트 숏크리트의 경우 수화물의 크기가 작아 치밀한 숏크리트 조직이 만들어져 강도 및 동결융해에 영향을 주는 매크로 공극의 양이 적어 우수한 장기 내구성이 발현 될 것이라고 예상 된다. 그리고 레디믹스트 숏크리트의 경우 현장 배합에 비해 매크로 공극이 적어 현장 배합 보다는 우수한 장기 내구성을 보일 것으로 예상된다.

(11) 합성섬유 혼입률에 따른 레디믹스트 숏크리트의 장기 내구성은 혼입률이 증가함에 따라 섬유와 시멘트 페이스트 사이 매크로 공극 및 연행 공극의 양이 증가하여 장기 내구성이 미소하게 저하되는 것으로 사료된다.

제 9 절 레디믹스트 숏크리트 공장생산 및 시공 시스템 구축

1. 국내 숏크리트 현장 배치플랜트 조사

가. 현장 배치플랜트 조사 개요

본 연구개발에서는 분말형 레디믹스트 숏크리트의 전문적인 개발에 앞서, 실제 현장에서 적용되고 있는 국내 숏크리트 현장 배치플랜트의 문제점이 무엇인지를 정확히 파악하기 위해 총 14곳 건설현장(16개소)에서 배치플랜트 기사와 품질기사를 대상으로 현장설문조사를 실시하였다. 설문조사에서는 현장 배치플랜트 숏크리트의 골재저장 상태, 현장 배치플랜트 숏크리트의 품질관리 상태, 분말형 레디믹스트 숏크리트 개발에 대한 의견 등을 조사하였다.

국내 숏크리트 현장 배치플랜트 조사 결과가 모든 현장 배치플랜트 생산 숏크리트의 실태와 문제점을 대표하거나 국내 모든 배치플랜트 기사들과 품질 기사들의 수렴된 의견이라고는 할 수 없지만, 현장 배치플랜트 생산 숏크리트의 일반적이며 포괄적인 생산 현황과 문제점들을 충분이 이해할 수는 있다고 판단된다. 또한, 실제 현장에서 배치플랜트 기사들과 품질 기사들의 몸소 체험한 의견들을 수렴한다는 데에 의의가 있다고 생각된다. 현장설문조사 결과 분석을 통해 숏크리트용 골재의 규격화, 현장 배합 숏크리트의 성능 및 품질 개선 방향, 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발 필요성 등을 설정하고자 한다.

나. 현장 배치플랜트 조사 결과

표 3.9.1은 설문조사에 응답한 국내 건설업체에 대해 나타낸 것이다. 총 16개소의 현장 배치플랜트 기사들과 품질기사들이 설문조사에 응해 주어, 연구 자료로서 조사 결과의 대표성을 충분히 확보할 수 있었다고 판단된다. 그림 3.9.1은 설문조사가 실시된 시공현장의 종류에 대해 나타낸 것인데, 철도터널과 도로터널이 대부분을 차지하였다. 그림 3.9.2는 현장 배치플랜트장의 경과기간을 나타낸 것이다. 1년 이상 경과된 현장 배치플랜트 전체의 43%(7개소)를 차지하였고 비교적 경과기간이 짧은

3개월 이하는 13%(2개소)로 적게 나타났다. 그림 3.9.3은 현장 배치플랜트 숏크리트 생산능력으로서 전반적으로 50 m^3/hr이하로 생산하는 경우가 68%로 나타났다. 그림 3.9.4는 배치플랜트 설비 소요기간으로 약 1개월 가량 소요되는 것으로 나타났다.

표 3.9.1 설문조사 응답업체

응답업체	응답수(개소)
A개발	2
B건설	4
C건설	2
D토건	2
E건설	1
F건설	1
G건설	1
H건설	1
합계	14

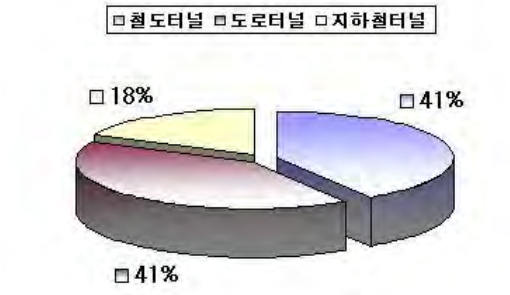


그림 3.9.1 설문 응답 대상현장

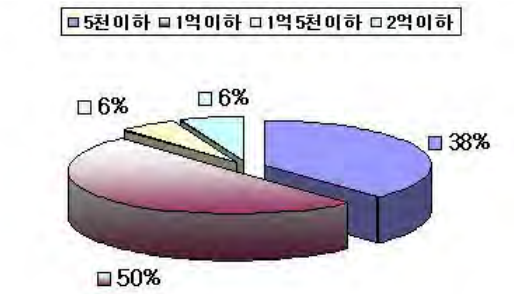


그림 3.9.2 배치플랜트 설치비용

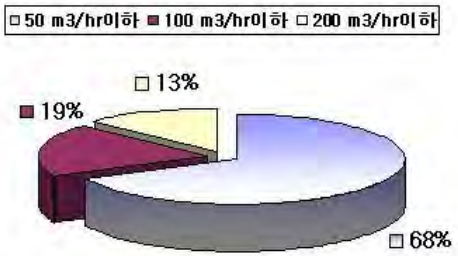


그림 3.9.3 배치플랜트 생산능력

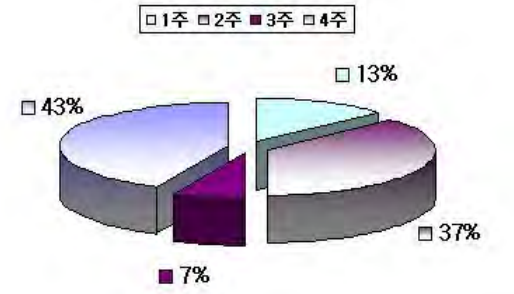


그림 3.9.4 배치플랜트 설치 소요기간



그림 3.9.5 배치플랜트 설치경과기간

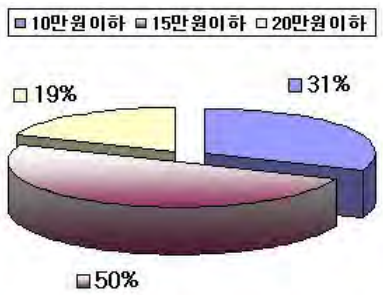


그림 3.9.6 숏크리트 생산비용(원/m^3)

그림 3.9.5는 현장 배치플랜트 설치 경과기간으로서 1년이상 경과된 현장이 43%로 가장 많이 나타났고 3개월 이하 경과된 현장이 13%로 가장 적게 나타났다. 그림 3.9.6은 숏크리트 생산비용(원/m^3) 전반적으로 15만원 이하의 비용이 발생되는 것으로 나타났다.

(1) 현장 배치플랜트 시스템 조사

현장 배치플랜트 시스템에 대한 설문에서 계량장치의 정밀도, 운반 및 배출장치, 시멘트 저장소, 자동작동 및 기록 항목에서 대체적으로 양호하게 운영되고 있다고 응답하였고, 폐콘크리트 저장소 항목에 대해서는 보통의 수준이라고 응답하였다. 이와 관련하여 현장 배치플랜트 시스템에서 가장 문제점이라 생각하는 부분에 대해서는 골재저장소 및 야적장(30.2%)을 첫째로 꼽았고, 품질관리(24.5%)와 믹서배부의 청결상태 및 품질관리 측면(23,2%)이 문제점이라고 응답하였다.

표 3.9.2는 현장 배치플랜트 설문조사 항목을 나타낸 것이며, 총 25개 항목 중 가장 문제점으로 꼽히는 9문항을 선별하여 나타낸 것이다. 표에서 나타나는 바와 같이 9항목에서 대체적으로 불량으로 조사되었으며, 이는 전반적인 국내 현장 배치플랜트의 문제로 판단되며 현장 배치플랜트 생산 숏크리트의 품질을 저하시키는 주된 원인이라 할 수 있다.

표 3.9.2 현장 배치플랜트 조사항목

조사항목 / 업체명	A건설		B건설		C건설		D건설		E건설		F건설		G건설		H건설	
	양호	불량	양호	불량	양호	불량	양호	불량	양호	불량	양호	불량	양호	불량	양호	불량
1. 골재 저장소 바닥의 토사가 골재에 혼입되지 않도록 적절한 조치를 취하였는가?		☑		☑	☑			☑		☑		☑		☑		☑
2. 야적장에는 적당한 배수시설을 하였는가?		☑		☑	☑			☑		☑		☑	☑			☑
3. 골재 저장소는 우수, 빙설에 보호될수 있는가?	☑			☑	☑		☑			☑		☑		☑		☑
4. 골재의 표면수에 관한 재보정 실시여부 및 방법은?	☑			☑		☑		☑		☑	☑		☑			☑
5. 굵은골재 세척시설 및 점토함유량시험은 실시하는가?		☑		☑		☑		☑		☑		☑		☑		☑
6. 골재분리시설이 없어 규격별 혼합의 우려는 없는가?	☑			☑		☑		☑	☑			☑	☑		☑	
7. 혼합수에 대하여 적절한 물 온도조정 실시여부?		☑		☑		☑	☑		☑			☑		☑		☑
8. 각 계량기 내부의 이물질 제거 상태여부?		☑		☑	☑		☑		☑			☑		☑		☑
9. 숏크리트 생산시 플랜트에 품질관리직원을 상주시켜 자재, 품질관리상태 및 계기성능을 점검하고 있는가?		☑		☑		☑		☑	☑		☑			☑		☑

표 3.9.2 현장 배치플랜트 조사항목(계속)

조사항목 / 업체명	I건설		J건설		K건설		L건설		M건설		N건설		O건설		P건설	
	양호	불량	양호	불량	양호	불량	양호	불량	양호	불량	양호	불량	양호	불량	양호	불량
1. 골재 저장소 바닥의 토사가 골재에 혼입되지 않도록 적절한 조치를 취하였는가?	☑			☑	☑			☑		☑		☑		☑		☑
2. 야적장에는 적당한 배수시설을 하였는가?		☑		☑	☑			☑	☑			☑	☑			☑
3. 골재 저장소는 우수, 빙설에 보호될수 있는가?		☑		☑		☑	☑		☑			☑		☑		☑
4. 골재의 표면수에 관한 재보정 실시여부 및 방법은?	☑			☑		☑		☑		☑	☑			☑	☑	
5. 굵은골재 세척시설 및 점토함유량시험은 실시하는가?		☑		☑		☑		☑		☑		☑		☑		☑
6. 골재분리시설이 없어 규격별 혼합의 우려는 없는가?		☑		☑	☑		☑	☑		☑		☑		☑	☑	
7. 혼합수에 대하여 적절한 물온도조정 실시여부?		☑		☑	☑			☑	☑		☑			☑		☑
8. 각 계량기 내부의 이물질 제거 상태여부?	☑		☑			☑	☑			☑		☑		☑	☑	
9. 숏크리트 생산시 플랜트에 품질관리직원을 상주시켜 자재, 품질관리상태 및 계기성능을 점검하고 있는가?		☑		☑		☑	☑			☑		☑		☑		☑

(2) 골재저장소의 배수시설 및 골재혼입 조사

골재저장소의 경우 대부분의 현장에서 바닥의 토사가 골재에 혼입되지 않도록 바닥 콘크리트 작업을 실시하였으나, 대부분이 페이로다나 백호로 골재 운송 작업 시 바닥부터 긁어서 본바닥이 노출되는 경우를 보였다. 이는, 바닥의 토사가 골재에 혼입되어 골재 품질이 저하될 우려가 있다고 판단된다.

배수시설의 경우 전반적으로 설비기능이 전무한 현실이었으며, 또는 설비를 갖추고 있어도 제 기능을 상실한 경우가 다수였다. 그림 3.9.7과 그림 3.9.8은 골재반입 과다로 인해 배수설비 기능이 상실된 경우와 골재저장소가 우수, 빙설에 노출되어 그 기능을 상실된 경우를 나타내고 있다. 현장 배치플랜트의 기사들의 말에 의하면 점검때만 막힌 배수시설을 관리하고, 그 이외에는 관리가 사실상 어렵다고 토로하였다.



그림 3.9.7 빙설에 노출로 인한 상실



그림 3.9.8 골재유입 과다로 인한 상실



그림 3.9.9 골재유입 과다로 인한 혼입



그림 3.9.10 스크린 기능이 상실된 경우

현장 배치플랜트의 전 현장에서 골재저장소에 스크린 설치로 인한 골재혼입 방지를 하였으나, 과다한 골재유입으로 인하여 그 기능을 상실한 경우가 다수였다. 이처럼 골재저장소의 경우 많은 문제점에 노출되어 있었으며, 관리 자체도 불량한 상태여서 심각한 문제에 노출되어 있는 상태이다. 그림 3.9.9 및 그림 3.9.10은 골재유입 과다로 인해 스크린이 그 기능을 상실한 상태이다.

(3) 골재의 표면수 보정 및 외기노출 조사

골재의 표면수 재보정은 규정상 1일 2회로 되어있다. 본 현장 조사를 통해 규정대로 하는 곳은 전무한 상태였으며, 터널공사 특성상 규정을 지키기에 많이 어렵다고 현장 품질기사들은 토로하였다. 그림 3.9.11은 골재잔량과 새로 반입된 골재와의 표면수율 차이를 나타냈고, 그림 3.9.12는 외기로부터 우수에 노출되어 바닥의 토사 혼입 및 골재표면수율에 심각한 문제를 양상시킨 결과이다. 또한, 그림 3.9.11의 골재저장소 안쪽에 보온등 설치로 표면수율 문제를 해결하고자 하였으나 골재저장소 공간크기 문제로 인해 그 영향력은 미비한 것으로 판단된다.



그림 3.9.11 골재 잔량으로 인한 문제



그림 3.9.12 바닥의 토사로 인한 혼입

골재저장소 경우 공간 규모에 따라 우수, 빙설과 같이 외기에 노출되지 않도록 방지하는 사안이 큰 문제로 인지되고 있다. 골재저장소가 외기에 노출될 경우 골재의 표면수율 문제, 골재의 품질 문제 등 복합적인 문제로 연관되어 생산되는 숏크리트 품질저하와 직면하기 때문에 그 심각성이 우려된다. 그림 3.9.13은 골재저장소 외기노출 문제에 관련해 양호한 상태이며, 그림 3.9.14는 골재과다반입을 위해 무리하게 공간 확장을 하여 그 기능을 상실한 경우를 보여주는 결과이다.

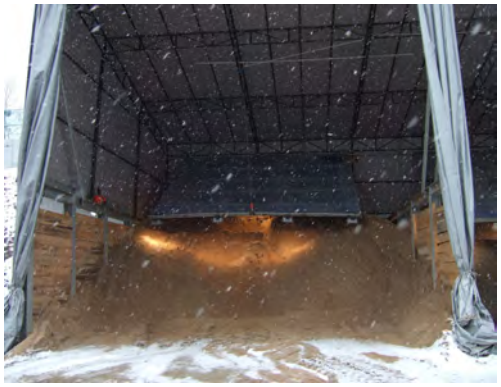


그림 3.9.13 골재저장소 외기노출



그림 3.9.14 골재저장소 공간확장 문제

(4) 품질관리 조사

숏크리트 품질은 생산과정 중 가장 중요한 부분이다. 품질관련 문제는 숏크리트 강도, 부착성, 리바운드량 등 직접적으로 연관되므로 그 중요성은 불가피하다. 현장 설문조사 결과 대체적으로 국외의 기준을 만족시키기에는 많은 부족함을 나타냈으며, 몇몇 현장을 제외한 나머지 현장에서는 규정과 상이한 면이 많아 품질저하 면에서 많은 개선이 있어야 할 것으로 판단된다.



그림 3.9.15 골재 낙반시설 설치



그림 3.9.16 낙반시설 미설치로 인한 손실

그림 3.9.15는 골재의 컨베이어 이동시 낙반 손실을 막기 위해 망을 설치한 모습으로 미설치 된 현장이 대부분이었다. 그림 3.9.16은 골재 낙반시설 미설치로 인한 현장 배치플랜트장 내의 골재 손실율 모습으로 그 필요성을 부각시키고 있다.

그림 3.9.17은 혼합믹서 내부 전경으로서 내부에 잔량 및 청소 불량으로 인해 품

질저하를 초래하는 요인으로 판단되며, 그림 3.9.18은 골재저장소 불량 상태로 많은 이물질에 노출되어 있다.

전반적으로 현장 배치플랜트 설문조사 결과 품질저하를 초래할 수 있는 많은 요인이 있었으며, 대다수의 현장에서 문제를 간과하는 경우가 많았다.

따라서, 국내 숏크리트 품질 향상을 위해서는 숏크리트 재료의 품질 변동 요인의 변수를 줄이고, 엄격한 품질관리 및 규격화를 통해 시공 품질을 향상시키기 위한 노력이 필요할 것으로 사료된다.



그림 3.9.17 혼합믹서 내부 상태불량



그림 3.9.18 골재저장소 상태불량

2. 기존 레디믹스트 생산 시스템 분석

가. 제조설비

(1) 제조 프로세스

레디믹스트 콘크리트의 제조방식은 보통 다음 3가지로 분류된다.

① 센트럴 믹싱(central mixing) : 고정 믹서로 혼합을 완료한 콘크리트를 트럭 에지테이터(truck agitator) 또는 트럭믹서로 교반하면서 운반하는 방식.

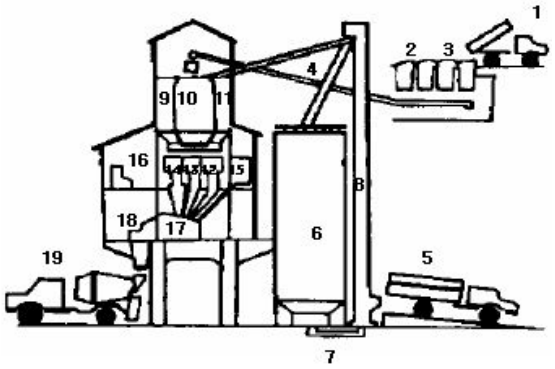
② 쉬링크 믹싱(shrink mixing) : 고정 믹서로 어느 정도 혼합한 후 트럭믹서로 운반하는 과정 중에 혼합을 완료하는 방식.

③ 트랜싯 믹싱(transit mixing) : 플랜트에서 재료만 계량하여 적재한 후 운반 과정 중에 트럭믹서로 완전히 혼합하는 방식.

국외에서는 이러한 3가지 제조방식이 사용되고 있지만, 국내에서는 레디믹스트 콘크리트에 관한 한국공업규격에서 센트럴 믹싱만을 대상으로 규정하고 있어 KS 허가공장으로 지정받기 위해서는 이 방식을 선택해야 하기 때문에 국외와 같은 다양한 방식의 선택은 허용되지 않는 상황이다.

레디믹스트 콘크리트를 생산하는 배치 플랜트는 일반적으로 재료의 저장설비, 계량설비, 혼합설비, 관리장치 및 기타 부대설비로 구성된다. 배치 플랜트의 형식에는 골재의 계량부분과 믹싱부분을 별도로 설치한 횡치형과 양자를 일체화시킨 탑형이 있는데 종전에 많이 세워졌던 탑형 배치 플랜트는 그림 3.9.19와 같다.

탑형 배치 플랜트의 경우 시멘트는 사일로에 저장되었다가 버킷 엘리베이터(bucket elevator)등에 의해 배치 플랜트 상부의 시멘트 저장조로 운송되며, 잔골재와 굵은골재는 각각 분리 야적되었다가 벨트 컨베이어에 의해 각각 배치 플랜트의 잔골재 또는 굵은골재 저장조로 운송된다. 저장조에 있던 골재와 시멘트는 조작반(control panel)의 조작에 의해 계량조에서 소요의 양 만큼 계량되며, 이 때 물과 혼화제도 각각 계량조에서 계량된 후 믹서에 투입된다. 믹서에 의해 혼합된 콘크리트는 호퍼를 통하여 레미콘 운반차에 실어 운반하게 된다.



1) 골재 운반차
2),3) 골재 야적장
4) 벨트 컨베이어
5) 시멘트 수송차
6) 시멘트 사일로
7) 스크류 컨베이어
8) 버킷 엘리베이터
9),11) 골재 저장조
10) 시멘트 저장조
12),14) 골재 저장조
13) 시멘트 계량조
15) 물 계량조
16) control panel
17) 믹서
18) 호퍼
19) 레미콘 운반차

그림 3.9.19 탑형 배치 플랜트의 구성

횡치형의 경우는 배치 플랜트의 조작반을 별도의 건물에 위치시키는 경우가 많으며, 골재는 골재 야적장 밑에 설치된 계량장치로 계량된 후 벨트 컨베이어에 의해 운송, 믹서에 투입된다.

(2) 재료의 저장 및 수송설비

시멘트는 품종 별로 저장해야 하며 풍화를 방지 할 수 있는 구조의 사일로 등에 저장해야 한다. 배치 플랜트에는 주로 300톤 정도의 시멘트 사일로가 이용되고 있으며, 시멘트는 대부분 공기압송차로 수송하면 압송관을 통하여 직접 사일로에 넣어진다. 사일로에서 플랜트 본체에 있는 저장조로의 수송방법은 스크류 컨베이어와 버킷 엘리베이터에 의하는 경우가 많으며, 최근에는 공기압에 의해 수송관을 통하여 압송하는 공기압송방식도 사용되고 있다. 이 방식은 스크루 컨베이어나 버킷 엘리베이터 방식과 비교할 때 구동부가 적고 보수점검이 쉬우며, 종류가 다른 시멘트로의 대체 및 짧은 시간 내의 잔량처리가 가능하여 종류가 다른 시멘트의 혼입을 방지할 수 있는 등의 장점이 있다.

골재의 저장시설은 골재의 종류별로 각각 분리시켜 저장할 수 있으며 서로 섞이지 않는 구조이어야 한다. 바닥은 콘크리트가 좋고 배수시설을 갖추어야 하며 유해한 물질이 혼입되지 않도록 해야 한다. 또한, 레미콘 1일 출하량의 최대치에 상당하는 골재를 저장할 수 있는 용량이어야 한다. 이는 골재의 품질이나 표면수량의 변화에 대하여 미리 적절한 배합조정이 이루어지도록 하기 위함이다.

골재를 야적장 등의 저장시설로부터 배치 플랜트의 본체로 운반할 때는 벨트 컨

베이어를 이용한다. 공해대책상 벨트 컨베이어의 프레임은 밀폐되거나 원통형 파이프의 케이스 안에 컨베이어가 내장된 것이 사용된다. 또 외국에서는 토지의 효과적인 이용을 위해 급경사의 컨베이어나 수직형 컨베이어를 개발하여 사용하는 경우도 있다. 통상적이 컨베이어는 운반물의 미끄러짐 등을 고려하여 경사 각도를 18~19° 정도로 하는 것이 일반적이다.

급경사 컨베이어는 그림 3.9.20과 같이 본체 벨트 및 파잔, 횡잔이라고 불리는 세 부분으로 구성된 특수 벨트를 사용한다. 경사각도는 임의로 결정할 수 있으나 배치 플랜트용으로는 50~75° 정도가 적당하다.

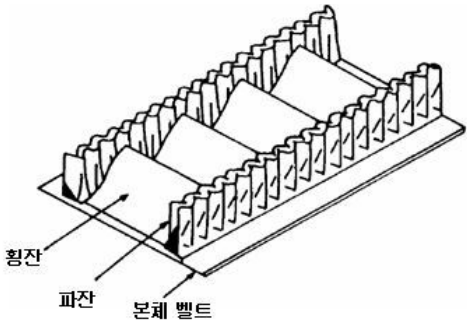


그림 3.9.20 급경사 컨베이어용 벨트

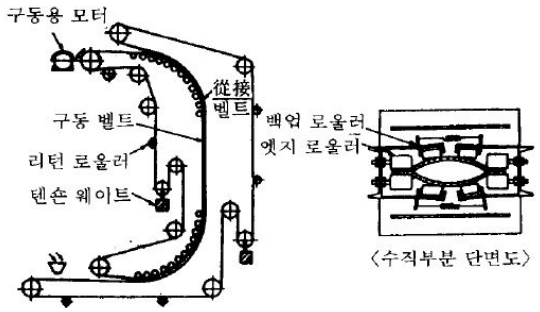


그림 3.9.21 수직 컨베이어 시스템

수직 컨베이어는 그림 3.9.21과 같이 일반적인 평벨트 두 장으로 수송물을 사이에 끼워 이를 수직으로 운송하는 구조인데 전체의 설비가 급경사 컨베이어보다도 더 적은 공간을 차지하도록 설계되어 공간의 극대화를 꾀할 수 있다. 그러나 최근에 개발되었으며 사용실적이 많지 않아 앞으로 개선하여야 할 부분이 상당히 남아있는 상태이다.

(3) 계량설비

계량기의 하중전달 방식은 초기의 빔 스케일 방식에서 풀 와이어 방식을 거쳐 전기 저항선식인 포텐쇼 미터 그리고 로드셀을 사용하는 전기식으로 변화되어 왔다. 1955년경 출현한 풀 와이어 방식은 계량호퍼의 하중변화를 풀 와이어라 불리는 가는 강선에 의해 조작반에 전하고 드럼, 톱니바퀴, 락크에 의한 다이얼 눈금 변화를 나타내는 방식이다. 이러한 방식은 작업원이 계량기 옆에서 작업할 필요를 없게 하

였으며 레미콘 제조의 기계화와 근대화에 크게 공헌하였다.

1960년대에는 전송식 다이얼 계량 조작반이 개발되었다. 이는 계량호퍼의 하중변화를 포텐쇼 미터에 의해 전기신호로 변화시키고 그 신호를 조작반에 전달하여 다이얼로 표시하는 방식이며 배합설정에는 펀치 카드 방식이 채택되었다. 또 현대의 전기식 로드셀 검출방식은 1975년경에 출현하였는데 여기에는 하중변화를 전기변화로 변환하는 로드셀과 마이크로 컴퓨터가 계량 시스템에 채택되어 검출부와 표시부에 기계적인 가동부가 없는 전광디지털 표시 계량조작반이 등장하였다.

계량에 있어서는 정밀도를 높이기 위해 동하중 설정이 매우 중요한데 이것은 미계량과 낙차보정으로 이루어진다. 여기서 미계량이란 처음 대략적인 계량을 하여 계량치가 90% 정도가 되면 계량 낙하량을 줄이는 것이다. 낙차보정은 계량 게이트에서 낙하 중인 재료가 미처 계량호퍼에 이르지 않은 것을 미리 예측하여 100% 계량 완료의 신호를 보내는 것을 말한다. 계량기의 계량오차는 한국공업규격(KF F 4009-1992)에서 시멘트의 경우 1%, 골재 3%, 물 1%, 혼화재 2%, 그리고 혼화제 3% 이내로 규정하고 있다.

(4) 혼합설비

(가) 믹서의 종류

근래에는 혼합용량이 큰 믹서가 많이 사용되고 있는데, 대형믹서는 용량이 $3m^3$ 정도에 이르며 최근에는 용량이 $6m^3$ 정도인 초대형 믹서도 출현되고 있다. 믹서의 종류로는 가경식 믹서, 강제식의 팬형 믹서 및 수평 2축 또는 1축형의 강제식 믹서가 있으며 이들 믹서의 주요 특징을 비교하면 표 3.9.3과 같다.

① 가경식 믹서

가경식 믹서는 중력식 믹서로서 틸팅 믹서로도 불리며 역사적으로 가장 오래되었다. 내부에 고정된 혼합날개(blade)가 있는 드럼 속에 재료를 투입하여 이를 회전시킴으로써 중력낙하와 상승의 반복에 의해 비벼지게 된다.

가경식 믹서는 혼합에 시간이 다소 길어지기는 하나 마모되는 부분이 혼합날개와 드럼내면 뿐이며 주속이 1.1~1.6m/초 정도로 느리기 때문에, 마모가 적어 강제식 믹서에 비하여 보수가 용이하고 수명이 길다. 또한 구조가 단순하여 청소하기가 쉽고 혼합에 필요한 동력소모가 적다는 특징이 있다.

표 3.9.3 믹서 특징 비교

구분	가경식 믹서	팬형 강제식 믹서	2축 강제식 믹서
높이	높다	낮다	가경식과 팬형의 중간
설치면적	2대 설치로 바닥면적이 넓어진다	가경식보다 적으나 2축 믹서보다는 넓다	면적을 크게 차지하지 않는다
주속	1.1~1.6m/초	내측 : 1.2m/초 외측 : 3.5~4.0m/초	1.2~1.8m/초
배출	중력으로 배출 (낙차 : 크다 속도 : 느리다)	저변부에서 날개로 배출 (낙차 : 작다 속도 : 느리다)	저변부에서 중력으로 배출 (낙차 : 작다 속도 : 빠르다)
마모(코스트比)	小(30)	大(100)	中(40)
분진	많다	많다	적다

② 강제식 믹서

강제식 믹서는 혼합날개 등의 회전축이 연직인 팬형(pan type)과 회전축이 수평인 1축 및 2축 믹서가 있다. 팬형 믹서는 가경식 믹서에 비해 혼합시간이 단축되어 생산능력이 증가하며, 높이도 낮기 때문에 플랜트 전체를 소형화 할 수 있는 특징이 있어 배치 플랜트에 널리 사용되고 있다. 그러나 주속이 크기 때문에 가경식 믹서에 비해 3~4배의 동력이 필요하고 마모가 빨리 일어나며 마모되는 부품이 많아 유지비가 높다는 단점이 있다.

수평 1축 및 2축 믹서는 1970년대에 등장한 것으로 믹싱팬 내부에 설치 된 1개 또는 2개의 수평축에 교반 날개가 장착되어 이 축을 회전시킴으로써 혼합하는 방법으로 2축 믹서가 보다 많이 사용되고 있다. 2축 믹서는 다른 형태의 믹서에 비해 혼합성능이 우수하며 팬형 믹서의 결점이었던 부품 마모의 감소 등 유지관리 면에서 개선이 이루어졌다.

(나) 믹서의 성능

믹서의 성능은 소정의 용량을 정한 시간으로 혼합하였을 때 KS F 2455의 “믹서로 비빈 콘크리트 중의 모르타르와 굵은골재량의 변화율(차) 시험방법”으로 시험한 값이 다음에 표시한 값 이하로 되는 믹서는 콘크리트를 균등히 혼합시킬 수 있는 성능을 가졌다고 판단해도 좋다.

- 콘크리트 중의 모르타르의 단위용적중량의 차 : 0.8%

- 콘크리트 중의 단위 굵은골재량의 차 : 5%

콘크리트 표준시방서에서는 콘크리트의 혼합시간을 결정할 때 시험에 의하여 정하는 것을 원칙으로 하고 있으며, 가경식 믹서일 경우에는 1분 30초 이상, 강제식 믹서일 경우는 1분 이상을 표준으로 하고 있다. 믹서의 혼합날개가 마모된 경우는 즉시 교체해야 하며 또 출하량의 증대만을 위하여 소정시간보다 혼합시간을 단축시키는 사례는 없어야 한다. 이것은 혼합이 불충분할 때 콘크리트의 품질변동이 크게 되며 AE콘크리트의 경우 연행공기량이 감소하는 문제점이 발생되기 때문이다.

(다) 믹서의 세척

배치 플랜트에서 믹서의 세척은 믹서 내부가 복잡한 모양을 하고 있기 때문에 부착된 레미콘을 간단히 제거하기 어렵고 귀찮은 작업이다. 현재 사용되고 있는 세척방법은 ① 고압세척펌프를 사용한 수동 세척, ② 고압분사 회전노즐을 사용한 자동세척, ③ 로봇을 사용한 자동세척 등이 있다.

수동세척은 현재 대부분의 공장에서 사용하고 있는 방법으로 구석구석 세척할 수 있어 가장 확실한 방법이다. 회전노즐을 사용한 자동세척은 통상 사용되고 있는 고압세척 분사노즐을 레미콘 배출 후 믹서외부에서 내부로 회전시키면서 삽입하는 방법으로 세척효과가 높고 원격자동세척을 할 수 있는 특징이 있다 그러나 부착정도에 따라 중점적인 세척을 할 수 없기 때문에 다시 수도세척을 하는 경우가 생긴다.

외국에서 시도되고 있는 로봇 세척은 로봇이 프로그램대로 세척하는 방법인데 개선이 필요한 부분이 아직 많이 남아 있다.

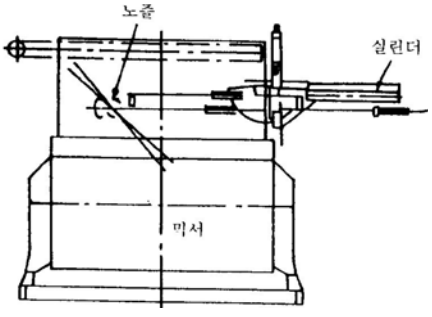


그림 3.9.22 회전 노즐 셔틀 세척

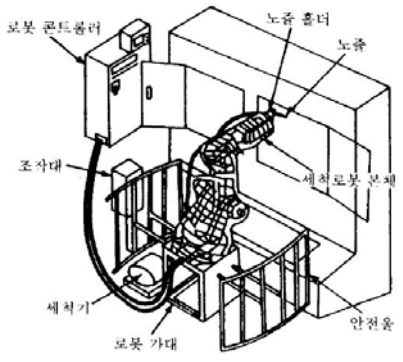


그림 3.9.23 로봇세척

나. 관리설비

레미콘 공장에서는 정확하고 신속한 작업 그리고 자동화 및 작업환경의 개선 등을 목적으로 각종의 관리장치를 도입하여 사용하고 있다. 관리장치의 종류로는 ① 골재 수분계, 콘시스턴시 미터(슬럼프 미터) 등의 공정관리장치, ② 배차, 출하작업의 기계화를 목적으로 한 출하관리장치 ③ 생산공정의 제어, 사무자동화 등을 총괄한 컴퓨터 제어 등이 있다.

(1) 골재 수분계

콘크리트 강도의 변동과 슬럼프에 가장 큰 영향을 미치는 것은 단위수량이라 할 수 있으며 골재의 표면수 관리는 매우 중요한 의미를 가진다. 일반적으로 골재 표면수량의 변동범위가 0.1% 이하일 때는 무시할 수 있으나 0.5% 이상이 되면 슬럼프가 2~5cm 정도 변화하며 강도 또한 5~10% 정도 변화하게 된다.

종전에는 표면수량을 오전과 오후에 각각 1회 정도 측정하고 믹싱 시 오퍼레이터의 육안관찰에 의해 혼합수량을 가감하는 방법으로 슬럼프를 관리해 왔다. 그러나 골재의 표면수량은 수시로 변화하여 측정시점과 실제 혼합시점의 표면수량이 상당한 차이가 있게 되며, 또 오퍼레이터의 숙련도에 따라 개인차가 생기는 문제점이 있어 혼합시의 골재의 실제적인 표현수량을 자동적으로 측정하여 이를 반영할 수 있는 방법에 대한 연구가 꾸준히 계속되어 왔다.

잔골재의 수분계로서 열건조식 수분계, 중성자 수분계, 유전율식 수분계 등이 개발되었으며, 이것들을 사용하여 잔골재의 표면수량을 0.5%의 정밀도로 전 배치를 자동 측정하여 계량수량을 지시하는 기기가 개발되었다. 그런데 문제는 수분계에 의한 표면수량의 측정치가 골재의 입도, 밀도 등의 영향을 받는 경우도 많고, 또 이 영향을 충분히 파악하여 고려하는 기법이 아직 완벽하지 못하다는 것이다. 뿐만 아니라 단위수량 외에도 잔골제의 조립률이나 골재의 입형, 미립분의 양 등이 슬럼프에 영향을 미쳐 슬럼프 관리를 더욱 어렵게 하는 요인이 되고 있다. 따라서 단위수량을 정확하게 유지하는것 만으로는 슬럼프의 안정을 얻을 수 없으므로 수분계의 사용과 함께 아래에 기술하는 슬럼프 미트를 사용하는 방법이 출현하게 되었다.

(2) 슬럼프 미터

슬럼프 관리의 기계화가 시급한 현안으로 대두되면서 이에 대한 다각적인 연구가 진행되었다. 그 결과로 혼합 중의 믹서의 전력부하량과 슬럼프와의 사이에는 높은 상관성이 있다는 것을 알게 되었고, 혼합시의 전력부하량을 검출하여 슬럼프를 추정하는 기법이 고안되고 있다.

그림 3.9.24는 혼합시 전력부하량의 변화를 나타낸 실험예로서 슬럼프가 낮을수록 전류치는 높게 되며 전류가 안정되는 시점은 대체로 45초 정도 혼합했을 때임을 보여주고 있다. 전력부하량과 슬럼프의 관계는 단위 시멘트량과 굵은골재의 크기에 따라서도 차이가 있으며 동일한 반죽질기에서 고배합일수록, 그리고 굵은골재의 크기가 클수록 믹서의 전력부하량은 크게 되는 경향이 있다고 한다.

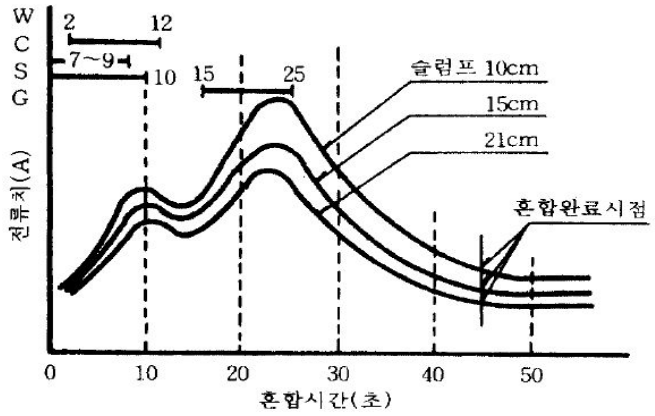


그림 3.9.24 슬럼프와 전동기 부하전류와의 관계

슬럼프 미터는 현재 두 종류가 보급되어 있는데, 하나는 슬럼프의 검량선이 있어 데이터가 축적되어 가면 배합마다 검량선이 완성되어 슬럼프 모니터로서 작동하는 시스템이다. 그러나 이것은 도입세의 등록 작업에 시간이 걸리고 같은 배합의 경우에도 믹서의 혼합날개에 마모가 생긴 경우 등에는 전력부하에 변화가 생겨 재차 데이터의 축적이 필요하게 되어 연속적인 사용이 어려운 결점이 있다.

다른 방식은 슬럼프 미터와 골재 수분계를 일체화 시킨 것인데, 이 방식에서는 검량선이라는 검토방식을 사용하지 않고 믹서 부하력 파형 자체를 기억하여 슬럼프의 판정에 이용하고 있다. 이 파형은 골재 최대치수 및 종류, 배합, 혼합량에 따라

변화하는 것으로 배합과 혼합량마다 파형을 등록할 필요가 있지만, 혼합날개 등이 마모되는 경우는 그 상태에서 등록버튼을 누르기만 하면 되도록 개발되어 있어 현재로서 가장 유용한 방법이라고 할 수 있다.

(3) 기타 관리 장치

관리장치는 수분계와 슬럼프 미터 외에도 계량치의 기록장치, 출하관리 및 차량관리 시스템 등이 있다. 계량치의 기록장치는 각 배치마다 일시, 배합번호, 각 재료의 실제 계량치, 각 재료마다의 합계치 등을 기록한다. 이 기록은 어떤 이유에 의해 계량치의 확인이 필요한 경우에 매우 유용한 자료로 활용되며 재료의 일별, 월별 사용량 파악에도 이용된다.

출하관리 시스템은 납품전표, 출하일보, 사무관리 데이터(강도별 배합별 등)를 기록한다. 그리고 차량관리 시스템은 레미콘 운반차의 가동 운행상황의 정확한 파악 및 효율적인 배차관리를 돕는다.

다. 운반설비

(1) 트럭 에지테이터 현황

레디믹스트 콘크리트의 운반은 재료분리를 일으키지 않고 용이하게 배출할 수 있는 구조를 갖춘 믹서 트럭 또는 트럭 에지테이터에 의하는 것이 원칙이며 포장용 콘크리트에 한하여 덤프 트럭을 사용할 수 있다.

오늘날과 같은 기능을 갖춘 레디믹스트 콘크리트 운반차는 1926년 미국에서 처음으로 개발되었으며, 일본에서는 1952년부터 제작하기 시작하였다. 일본의 경우 초기의 구동장치는 복잡한 기구에 의한 재료의 투입, 교반 및 배출 등이 가능한 기계식이었으며 1955년 후반에 들어 유압식이 개발되었다.

국내의 경우에는 처음에 주로 3.5㎥ 용량의 트럭 에지테이터를 수입하여 사용해 왔으나 1978년부터 대형 트럭 에지테이터의 국산화가 이루어지면서, 수송효율만을 고려하여 7.5㎥ 정도의 레미콘을 적재, 수송한 적이 있었으나 근래에는 도로사정 등을 고려하여 적재량의 한도를 6㎥로 하고 있다. 1965년 대한양회가 서울의 서빙고

에 최초로 레디믹스트 콘크리트 공장을 세웠을 때 배치 1기와 3.5㎥ 용량의 트럭 에지테이터 15대로 시작하였다고 한다. 표 3.9.4는 국내 트럭 에지테이터의 보유현황을 나타낸 것인데, 1986년 말 기준 총보유대수 5,600대로 6㎥ 용량의 대형 운반차가 93%이었으며, 1992년 말 기준으로는 총보유대수 14,000여대 가운데 6㎥ 용량의 대형 운반차가 거의 100%를 차지하는 것으로 나타나, 현재는 대형 운반차만이 운행되고 있음을 알 수 있다.

표 3.9.4 트럭 에지테이터 보유현황

적재량 (㎥)	1986년 12월		1992년 12월	
	보유대수	구성비율(%)	보유대수	구성비율(%)
3.5	283	5	2	0
4.5	50	1	-	-
5.0	59	1	49	0.3
5.5	3	-	-	-
6.0	5,204	93	14,066	99.6
계	5,599	100	14,117	100

(2) 트럭 에지테이터 성능

트럭 에지테이터의 교반 날개은 한장 날개와 두장 날개의 것이 있고 또 저부에 한장, 출구부분에 두장 날개로 하는 것 등이 있는데 한 장 날개의 경우와 두장 날개의 경우의 특징을 비교하면 다음과 같다.

① 투입호퍼로부터 낙하되는 콘크리트의 유입은 한장 날개가 좋다.

② 트럭 믹서로 사용할 경우에는 두장 날개인 것이 혼합이 잘 된다.

③ 드럼 내부의 모르타르 부착은 한장 날개인 것이 적고, 또한 드럼 내부의 청소작업도 한장 날개인 것이 두장 날개인 것보다 쉽다.

트럭 에지테이터의 형상은 제작회사의 독자적인 설계에 의하여 제작되는데 수송 중 레디믹스트 콘크리트가 재료분리를 일으키지 않으며 균질을 유지할 수 있도록 설계, 제작되어야 하는 것이 가장 중요하다. 에지테이터 드럼은 직경과 길이가 1:1에 가까울수록 혼합성능이 우수하다고 하며, 일반적으로 8톤($3.5m^3$)을 적재할 수 있는 트럭 에지테이터가 이러한 조건과 가장 잘 일치한다고 한다. 일반적인 에지테이터 드럼의 구조는 그림 3.9.25와 같다.

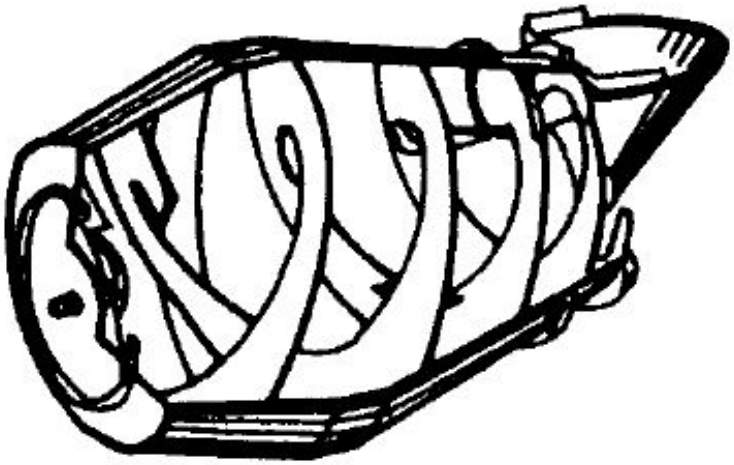


그림 3.9.25 에지테이터 드럼의 구조

3. 레디믹스트 숏크리트 규격화 생산 시스템 설계

본 연구에서는 레디믹스트 숏크리트의 체계적인 공장생산 및 규격화 생산 시스템 확립을 위해 생산 프로세스를 설계하였고, 생산 효율성을 증대시키고 품질 변동을 최소화 할 수 있는 공장 시스템 설계를 실시하였다.

가. 건조 레디믹스트 생산 공정

그림 3.9.26과 그림 3.9.27은 국내 일반적인 건조 레디믹스트 생산 공정을 나타낸 것이다. 원사 골재는 로타리 드라이어를 통해 수분함수율 0.3% 이하로 건조되어 입도 선별기를 통해 골재 입도별 각 사일로에 저장되고, 골재, 시멘트 및 화학첨가제를 혼합하는 믹서를 이용하여 혼합공정을 거치게 된다. 이 후 제품 사일로에 저장된 후 포장공정을 거쳐 포장지대 및 벌크 트레일러(BCT 트럭) 등에 상차되어 출하가 이루어지게 된다. 이러한 건조 레디믹스트 생산 공정은 특수 현장용 제품을 제외한 일반적인 건설 현장에 공급되는 재료에 적용되는 공정라인이며, 레디믹스트 숏크리트 제품의 경우에는 보강섬유, 조골재(6~8mm) 및 기타 혼화제의 추가적인 첨가가 이루어지기 때문에 균일한 혼합성능 및 재료분리 방지를 위한 추가적인 생산 공정이 필요하다고 할 수 있다.

나. 레디믹스트 숏크리트 생산 시스템 설계(안)

그림 3.9.28은 레디믹스트 숏크리트 생산 시스템의 설계(안)을 나타낸 것이다. 기본적으로 골재 원사를 드라이어를 통해 건조하고, 건조된 골재를 입도선별기를 통해 각 사일로에 저장하는 것은 기존 건조 레디믹스트 생산 공정과 동일하다. 하지만 특수 용도의 다양한 제품을 생산하기 위한 선별골재 사일로를 추가하고 시멘트 외 기타 혼화재를 자동으로 계량하여 혼합 생산할 수 있는 공정을 추가하였다.

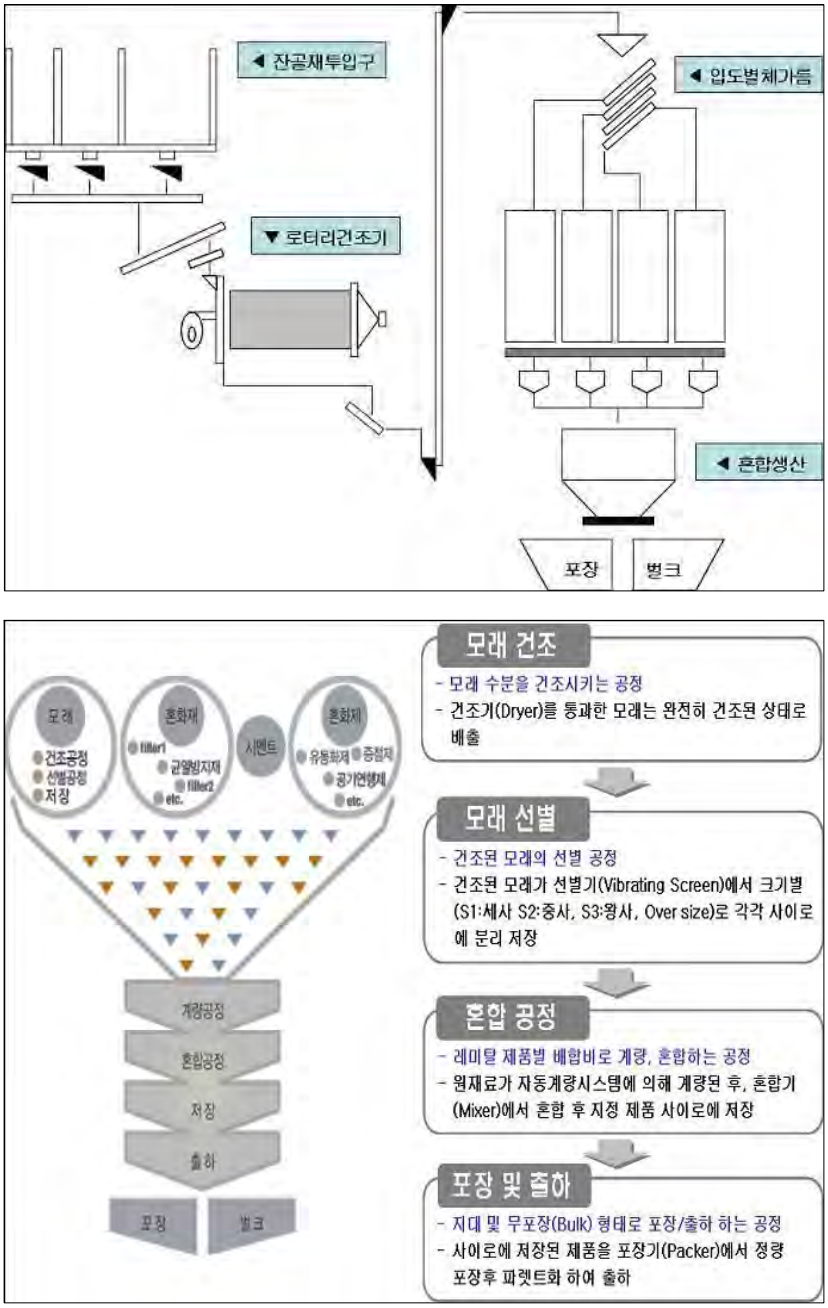


그림 3.9.26 건조 레디믹스트 생산 공정



(a) 저장설비



(b) 건조설비



(c) 선별설비



(d) 계량설비



(e) 혼합설비



(f) 포장설비

그림 3.9.27 건조 레디믹스트 생산 공정 사진

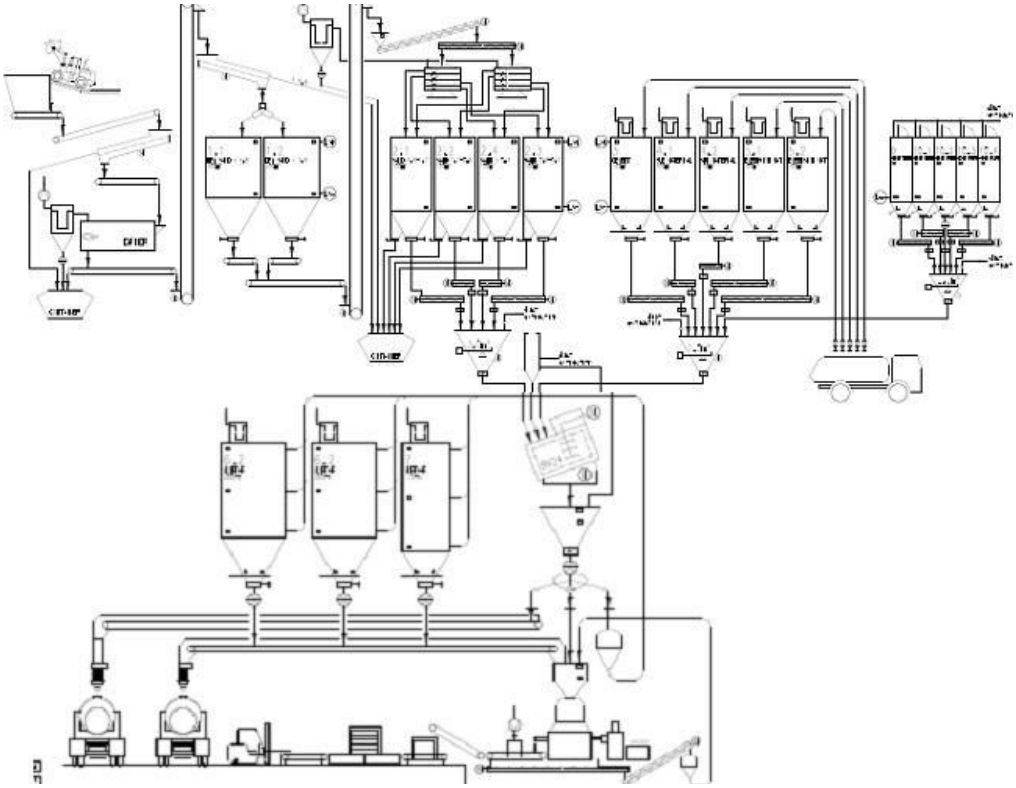


그림 3.9.28 레디믹스트 숏크리트 생산 시스템 설계(안)

다. 레디믹스트 숏크리트 생산 공정 품질관리

(1) 원사 골재 반입저장작업

원재료 골재 반입 및 저장작업에 관한 방법 및 조건은 다음과 같다.

■ 반 입

① 모래 채취장으로부터 덤프트럭으로 반입

② 모래를 샘플링하고, 목시에 의한 외부 관능검사를 실시한다.

- 외형검사로 골재의 검사조건 유지

■ 저 장

① 모래를 입도별로 구분, 치장에 적재(인수검사에 합격된 것)

② 치장 외부에 적재된 모래는 중기로 치장 내부에 이동, 저장

③ 하절기에는 비로 인한 모래의 수분 유입을 방지하기 위하여 치장 내부에 저장하고, 외부 저장시에는 시트를 이용하여 덮도록 한다.

(2) 인수검사

골재 인수검사의 시험방법은 KS 규격(KS F 2501~2504, 2507 외)에 따르며, 품질기준은 표 3.9.5와 같다.

표 3.9.5 골재 인수검사의 품질 기준

구분	항목	품질기준
1	입도(%)	O/S(3.5Mesh 통과) 95.0 이상
2	수분(%)	0.5 이하
3	밀도(g/㎤)	2.5 이상
4	흡수율(%)	3.0 이하
5	점토 덩어리(%)	1.0 이하
6	씻기시험(%)	세사용 5.0 이하 중사용 7.0 이하
7	유기불순물	시험용액이 표준용액보다 연할 것
8	염화물 함유량(%)	0.04 이하
9	단위용적질량(kg/㎥)	1,450 이상
10	안정성(%)	10 이하

(3) 건조, 선별 및 저장 작업

골재 건조, 선별 및 저장에 필요한 작업설비는 표 3.9.6과 같고, 골재 건조시 건조기에서 배출되는 골재온도 공정관리 기준은 표 3.9.7과 같다.

표 3.9.6 골재 건조 선별 및 저장작업 설비

설비명	치수 또는 용량	수 량	비 고
Belt Conveyor	150t/h	4기	
Belt Conveyor	100t/h	8기	
Belt Feeder	150t/h	3기	
Belt Feeder	100t/h	2기	
Bucket Elevator	150t/h	1기	
Bucket Elevator	100t/h	2기	
Sand Dryer	100t/h	1기	
Sand Dryer	120t/h	1기	
원사치장	3,500㎥	1기	
원사치장	1,400㎥	1기	
Sand Silo	4,200ton	1기	
Exhaust Bag Filter	840㎥/min	1기	
Exhaust Bag Filter	1,400㎥/min	1기	

표 3.9.7 골재 건조 공정관리 기준

항목	#1, #2 Sand Dryer		
	기준	주기	방법
건조온도	75℃이상	2회/일	건조기 Outlet의 건조사 온도를 온도계로 체크하여 기록

(4) 레디믹스트 숏크리트 제조 공정검사

레디믹스트 숏크리트 제조 공정검사의 검사항목, 검사방법 및 검사로트의 구성은 표 3.9.8과 같다.

표 3.9.8 레디믹스트 제조공정 검사항목

No.	공정명	검사항목	검사방법	검사 로트 구성
1	골재	① 건조전, 후 수분	샘플링 검사	공정별 일 1회
		② 건조전 입도		
		③ 건조모래 온도		
2	골재 선별	① 입 도		
3	배 합	① 배합시간		
		② 배합비		
4	계 량	① 중량비		
		② 계량정도		
5	혼 합	① 겉모양		
		② 입도		
		③ 혼합량		
		④ 혼합시간		
		⑤ 물성시험		
6	포 장	① 포장상태		
		② 포장질량		

(5) 계량 및 혼합저장작업

레디믹스트 숏크리트 원재료의 계량, 혼합 및 제품 저장 작업설비는 표 3.9.9와 같다.

표 3.9.9 레디믹스트 숏크리트 원재료 계량, 혼합 및 제품 저장 작업설비

설비명	치수 또는 용량	수 량	비 고
Belt Conveyor	100t/h	4기	
Bucket Elevator	100t/h	3기	
Turn Head		2기	
원재료 사이로	80㎥	22기	입도선별 건조사 및 시멘트 외
원재료 사이로	4㎥	11기	혼합재 및 기타 혼화제
Dosing Screw Con'		25기	
Dosing Slide Unit		5기	
Scale	4ton	6기	입도선별 건조사 및 시멘트 외
Scale	1ton	1기	혼합재
Scale	10㎏	3기	혼화제
Mixer	2.2㎥/Batch	3기	
Air Compressor	10.86㎥/min	4기	
Bag Filter		11기	

(6) 레디믹스트 숏크리트 제품검사

레디믹스트 숏크리트 제품검사의 검사항목, 검사방법 및 검사 로트의 구성은 표 3.9.10과 같다.

표 3.9.10 레디믹스트 숏크리트 제품검사

No.	검사항목	검사방법	검사 로트 구성
1	강도(압축, 휨)	샘플링 검사	규격별 1일 생산량
2	모래의 최대 크기		
3	모래의 입도별 함량		
4	잔분량		
5	공기량		

(7) 레디믹스트 숏크리트 제품 포장 및 저장작업

레디믹스트 숏크리트 제품의 포장 및 저장과 관련된 작업설비는 표 3.9.11과 같다.

표 3.9.11 레디믹스트 숏크리트 제품 포장 및 저장 작업설비

설비명	치수 또는 용량	수 량	비 고
Screw Conveyor	100t/h	8기	
Screw Conveyor	15t/h	2기	
Product Silo	50㎥	2기	
Product Silo	30㎥	2기	
Rotary Packer	2,000Bag/h	2기	
Bag Placer	2,400Bag/h	2기	
Check Weigher	50㎏	2기	
Driven Roller Way	2,200Bag/h	5기	
Dedusting Fan		1기	
Belt Conveyor	2,000Bag/h	6기	
Curved Belt Conv'	2,200Bag/h	3기	
Bag Filter	340㎥/min	2기	
Bag Filter	70㎥/min	2기	
Palletizer		2기	지대 포장 라인
Wrapping Machine		2기	지대 포장 라인
Bulk Packer		2기	BCT 및 톤백 포장라인

그림 3.9.29는 전체 제조공정 흐름도를 나타낸 것이고, 표 3.9.12는 레디믹스트 숏크리트 제품 제조공정에서의 품질관리 체계를 나타낸 것이다.

안정된 품질의 규격화된 레디믹스트 숏크리트 제품 제조를 위해서는 건조사 입도 선별 저장, 각 원재료별 자동정량 투입시스템, 균질혼합 가능 믹서, 자동계량 제품 포장 라인 등의 생산 프로세스를 갖추어야 한다. 또한, 원재료의 입고에서부터 각 공정별로 철저한 품질관리를 통하여만 안정된 품질의 규격화 제품 생산이 가능하다.

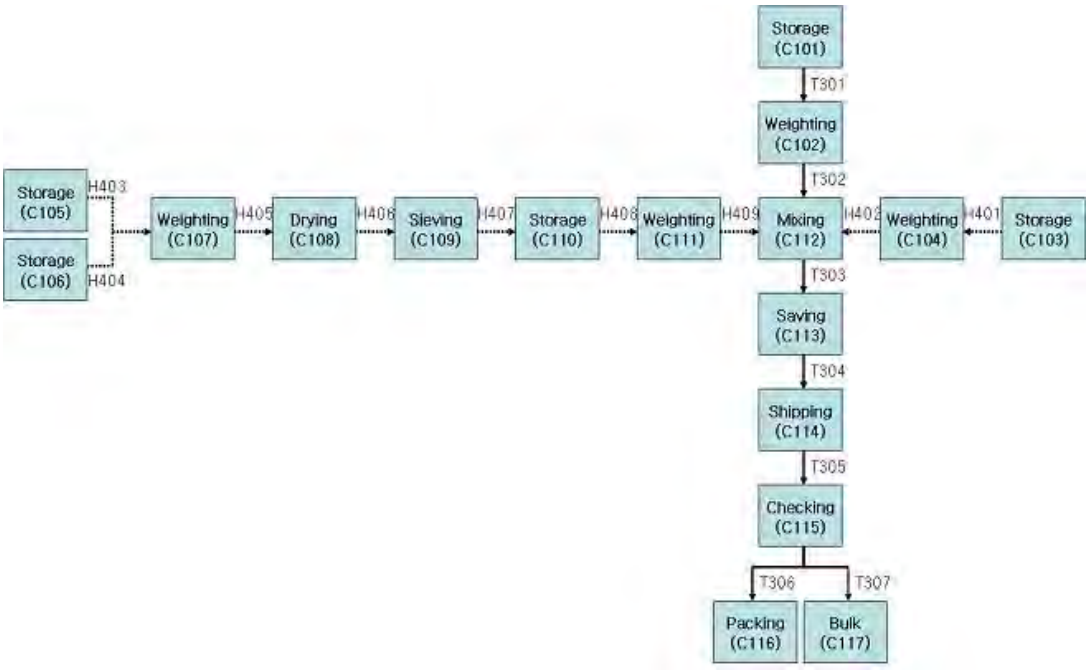


그림 3.9.29 레디믹스트 숏크리트 제조공정 흐름도

표 3.9.12 레디믹스트 숏크리트 제품 제조공정 품질관리 체계도

공정명	사용재료 및 설비	검사		공정관리				관련 표준
		검사항목	검사방법	항목	기준	주기	방법	
원료 입고	-운반차량							원재료반입 저장작업
인수 검사	-각종원재료 -검사설비	해당지침서						인수검사 지침서
원료 저장	-치장, Silo -Level 센서			저장 Level	High Level Low Level	수시	판넬 모니터	원재료반입 저장작업
모래건조 공정	-잔골재 -온도계			건조사 온도	75℃이상	2회/일	온도계 이용	건조작업
	-잔골재 -검사설비	건조후 수분	샘플링 검사 1회/일					공정검사 지침서
모래선별 공정	-잔골재 -검사설비	입도	샘플링 검사 1회/일					공정검사 지침서
건조사 저장	-Silo -Level 센서			저장 Level	High Level Low Level	수시	판넬 모니터	건조작업
재료 계량	-계량기록지 -계산기	배합비	샘플링 검사 1회/일					공정검사 지침서
제품 혼합	-혼합기			배합 시간	설정시간	1회/일	입력내용 확인	계량 및 혼합저장작업
	-중간제품 - ＡｉｒＪｅｔ Seive	혼합상태	샘플링 검사 1회/일					공정검사 지침서
	-중간제품 -시험설비	강도, 공기량, 모래의 함량, 모래의 최대크기	샘플링 검사 1회/일					건조 레디믹스트 제품검사 지침서
제품 저장	-벌크제품 -Silo			저장 Level	High Level Low Level	수시	판넬 모니터	계량 및 혼합저장 작업
제품포장 및 저장	-최종제품 -검사설비	강도, 공기량, 모래의 함량, 모래의 최대크기, 포장중량	샘플링 검사 1회/일					공정검사 지침서, 건조 레디믹스트 제품검사 지침서
	-포장제품 -제품창고							제품포장 및 저장작업

4. 공장생산 과정의 재료분리 가능성 평가

가. 제품 생산라인에서의 재료분리 고찰

믹서에서 균질한 혼합이 이루어진 제품이 생산된다 할지라도, 제조공정의 각 제품 이송 라인에서 재료분리가 발생하게 되면 품질 편차가 발생할 수 있기 때문에, 각 제조 공정라인에서의 재료분리를 최소화 할 수 있는 방안이 또한 요구된다.

본 연구개발에서 제안된 레디믹스트 숏크리트 생산 시스템 설계(안)에서는 골재 최적입도조정, 원재료 투입방법, 투입순서, 믹싱혼합시간, 믹서회전속도 및 제품 이송속도 조정을 통해 제조상의 재료분리를 최소화 시킬 수 있다.

제조공정상 제품 이송시에 각 공정라인 즉, 믹서제품배출-이송라인(에어벨트 및 바켓 엘리베이터)-제품 저장 사일로 라인 혹은 BCT 직상차 라인-포장 라인 등에서는 각 라인별 높이차에 의해 낙차 구간이 발생하게 된다. 특히, 레디믹스트 숏크리트 제품과 같이 조골재(6~8mm)를 사용하는 경우에 있어서는 각 라인 이송시 재료분리 발생 가능성이 더욱 높을 수 있기 때문에 이에 대한 대책 방안이 필요하다.

일반적으로 건조 레디믹스트 제품은 사용골재의 입도 크기에 따라 적용 용도를 달리하고 있으며, 벽체 및 천정용 건조모르타르는 잔골재(최대 골재크기 2.6mm)가 사용 되고, 바닥용 건조모르타르의 경우는 이보다 다소 큰 골재(최대 골재크기 5.6mm)가 사용되어 제품화 된다.

현재 국내에서는 레디믹스트 숏크리트 제품과 같이 6~8mm 정도의 굵은골재를 건조 레디믹스트화하여 제품화 한 사례가 지금까지 없으며, 이는 조골재의 현장배합에 따른 경제성의 이유도 있겠지만 제품 제조 공정상의 재료분리에 의해 품질 편차가 발생될 소지가 크기 때문이다. 현재 국내 콘크리트 배합은 13mm, 25mm 골재 혼입의 경우 레미콘 배치플랜트에서 습식 믹싱을 하거나 현장 배합을 통해 시공되고 있으며, 건조 레디믹스트 제품에 조골재를 혼입하는 것은 현 제조설비상 품질관리의 한계를 나타낼 수 있다. 반면, 유럽 등의 국외 레디믹스트 제조 공장에서는 드라이 콘크리트라 하여 그림 3.9.30과 같이 4~8mm 정도의 굵은골재를 혼합하여 제품화 할 수 있도록 제조 운영 및 공정 설비라인을 갖추고 있다.



그림 3.9.30 유럽의 건조 레디믹스트 제조 공장라인 및 적용골재 모습

나. 제품 생산라인에서의 재료분리 최소화

그림 3.9.31은 제품 제조공정 이송간에서 재료분리가 발생할 수 있는 구간을 나타낸 것이다. 믹싱작업 후 믹서하부의 서브 호퍼로의 배출라인(2~3m낙차), 제품 저장사일로 충전라인(20~30m낙차), 제품 포장라인으로의 이송(3~5m낙차) 등에서 레디믹스트 숏크리트 조골재의 재료분리 가능성이 발생될 수 있다.

본 연구개발에서는 6~8mm의 굵은골재를 사용하는 레디믹스트 숏크리트 제조시 제조공정에서 굵은골재의 재료분리를 최소화 할 수 있도록 그림 3.9.28과 같이 공정라인을 효과적으로 개선하였다. 이러한 시도는 국내 건조 레디믹스트 제조공정에서 이루지 못한 국내 최초로 안정화된 품질의 드라이 콘크리트를 제품화 할 수 있는 시도라고 판단된다.

(1) 서브호퍼 충전 유지

믹서하부 제품 서브호퍼로의 배출라인의 경우 배치당 제품을 믹싱한 후 바로 A/B 라인에 이송시키지 않고, 제품 서브호퍼에 약 70% 이상 제품 충전을 유지시킨 상태에서 A/B 라인으로 연속적 배출시키게 된다. 이런 방법은 믹서와 제품 서브호

퍼간의 배출 낙차를 최소화 할 수 있으며, 각 배치 간의 제품이 연속적으로 서브호퍼에서 혼합되는 효과가 있기 때문에 재료분리를 효과적으로 제어 할 수 있다.

(2) 사일로 로우 레벨(Silo low level) 관리

제품 저장 사일로 충진의 경우에 있어서도 최초 비어있는 사일로에 초기 제품을 충전할 때에는 약 20~30m 낙차로 인해 재료분리 가능성이 크기 때문에, 제품 사일로에 2/3 이상 충전 후 사일로 하부 콘 부위를 바이 패스(By pass)시키게 된다. 제품 출하 거출시에는 사일로 로우 레벨 관리(1/2 이상 충전 유지)를 통해 제품 충전시의 낙차를 최소화시킴으로써 재료분리를 방지할 수 있다.

(3) 사일로 만실운영

지대 및 톤백 포장을 할 경우 포장라인 이송구간에서의 낙차로 인해 재료분리가 발생할 가능성 있다. 포장 패커 상부에 위치한 제품 서브호퍼로의 제품 충전을 만실 운영함으로써 낙차를 최소화하여 재료분리를 방지할 수 있다.

기존 건조 레디믹스트 제품 출하시에도 상기와 같은 제품 사일로 만실운영을 통해 재료분리를 최소화 하고 있으며, 레디믹스트 숏크리트 제품에 있어서 재료분리 최소화 운영방안으로는, 저장 사일로 이송보다는 BCT 직상차 라인을 이용하여 공정 이송라인을 단순화하는 방법이 제품 이송간의 재료분리를 최소화 할 수 있는 가장 적절한 방법이라 할 수 있다.

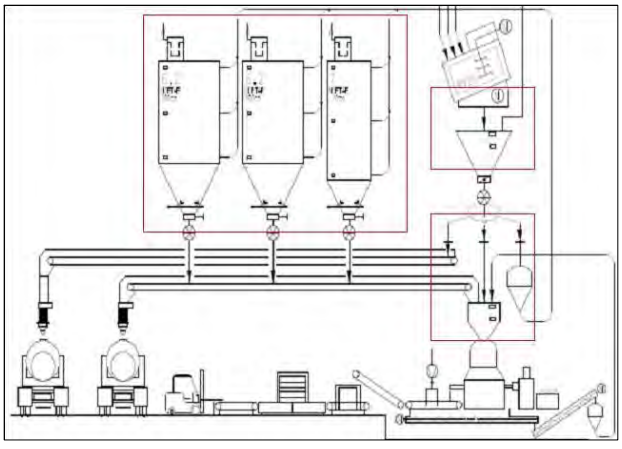


그림 3.9.31 제품 제조공정에서의 재료분리 발생 가능 구간

5. 레디믹스트 숏크리트 시제품 제작

본 연구개발에서는 제안한 레디믹스트 숏크리트 규격화 생산 시스템을 통해 규격별 레디믹스트 숏크리트를 제조공정에 의거하여 총 19종류의 시제품을 생산하였으며, 이에 대한 규격별 제조생산 배합표는 표 3.9.13과 같다.

시제품 생산을 위해 배합비, 원재료 투입순서, 믹서 회전속도, 믹싱시간, 제품 이송라인 등 제품 제조에 필요한 제조공정 조건사항을 공장 컨트롤 판넬실의 컴퓨터에 입력시키게 되면, 각 원재료별 계량 스케일을 통한 자동 정량계량이 되며 입력된 투입순서에 따라 계량된 원재료들은 믹서에 투입되어 균질하게 혼합되게 된다. 혼합된 제품은 입력된 이송라인을 통해, 그림 3.9.32와 같이 톤백 포장 또는 벌크용 BCT 차량에 상차되어 출하되게 된다.

표 3.9.13 레디믹스트 숏크리트 시제품 생산 배합비

규격별 시제품명			Binder	Sand				혼화재		보강섬유		혼화제			계
			OPC	S1 (0.8mm 이하)	S2 (0.8~2.4mm)	S3 (2.4~5.6mm)	S4 (5.6~8mm)	F/A	실리카흄	하이코플라 (50mm)	콘텍 에스엔씨 (40mm)	120P (분말 유동화제)	5012T (분말수기)	ATEX	
고강도용	1	RM-SF1	648	787	476	454	474	109.6	33.7		14.7	3.000			3,000
	2	RM-SF2	627	787	476	454	474	109.8	54.2		14.7	3,270			3,000
일반용	3	RM-HP1	454	524	317	303	317	73.4		9.8		1,815			2,000
	4	RM-HP2	454	524	317	303	317	71.2		11.8		1,998			2,000
	5	RM-HP3	454	524	317	303	317	69.1		13.7		2,178			2,000
	6	RM-CP1	454	524	317	303	317	73.4			9.8	1,815			2,000
	7	RM-CP2	454	524	317	303	317	71.2			11.8	1,998			2,000
	8	RM-CP3	454	524	317	303	317	69.1			13.7	2,178			2,000
	9	RM-P	454	524	317	303	317	73.4			9.8	1,815			2,000
고차수용	10	AT-1	454	524	317	303	317	73.4			9.8	1,815		0.82	2,000
	11	AT-2	454	524	317	303	317	73.4			9.8	1,815		1.03	2,000
	12	AT-2'	454	524	317	303	317	73.4			9.8	1,815		1.03	2,000
	13	AT-3	454	524	317	303	317	73.4			9.8	1,815		1.23	2,000
	14	AT-3'	454	524	317	303	317	73.4			9.8	1,815		1.23	2,000
고강도& 고차수용	15	PO-1	454	524	317	303	317	53.8			9.8	1,815	19.6		2,000
	16	PO-2	454	524	317	303	317	44.2			9.8	1,635	29.4		2,000
	17	PO-2'	454	524	317	303	317	44.2			9.8	1,635	29.4		2,000
	18	PO-3	454	524	317	303	317	34.4			9.8	1,635	39.2		2,000
	19	PO-3'	454	524	317	303	317	34.4			9.8	1,635	39.2		2,000



(a) 제조공정 컨트롤 판넬실



(b) 믹 서



(c) 톤백 포장라인



(d) 톤백 포장 시제품



(e) 벌크 포장라인



(f) 벌크 시제품 BCT차량 상차

그림 3.9.32 레디믹스트 숏크리트 시제품 출시 모습

6. 레디믹스트 숏크리트 현장 시공시스템 도출

가. 현장 시공시스템 도출

현장 배치플랜트에서 생산되는 숏크리트의 경우 많은 품질저하 문제에 직면해 있고, 현장 골재 수급 및 품질 문제, 현장 배치플랜트 공간확보 제약에 따르는 문제, 건설비, 운영비, 레미콘 트럭 운영비 등 많은 제약이 있다. 또한, 해결책을 강구하기에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다.

본 연구개발에서는 개발된 레디믹스트 숏크리트 재료를 가장 효과적으로 현장에 적용시킬 수 있는 시공 시스템을 도출하고자 하였다. 현장 배치플랜트를 통하지 않고 공장생산된 숏크리트 재료를 믹싱과 함께 타설 장비에 공급하여, 개발된 재료의 품질을 가장 효과적으로 발휘할 수 있는 시공시스템을 도출하였다.

그림 3.9.33은 본 연구개발에서 도출한 레디믹스트 숏크리트의 현장 시공시스템의 도식도를 나타낸 것이다. 공장에서 생산된 재료를 현장으로 운반하여 사일로를 거쳐하거나, 사일로 후미에 믹싱장치를 설치하여 재료 반출과 동시에 믹싱이 이루어져 숏크리트 타설머신의 호퍼로 재료가 공급되는 흐름을 보여주고 있다.



그림 3.9.33 레디믹스트 숏크리트의 현장 시공시스템(안)

표 3.9.14는 숏크리트 믹싱 시스템의 개선안을 나타낸 것이다. 현재 숏크리트 시공시스템은 현장 배치플랜트 내에서 생산된 숏크리트를 레미콘 트럭을 이용하여 터널 내로 운반하여 숏크리트 타설머신 호퍼에 공급하여 타설하는 방법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 이를 개선하고 개발된 레디믹스트 숏크리트의 가장 효과적인 시공방법으로 2가지 개선을 제안하였다.

1안은 현장 배치플랜트의 사용 비중을 단순히 숏크리트 재료를 믹싱하는 범위에서 줄이고, 공장에서 생산된 레미믹스트 숏크리트를 현장 배치플랜트의 믹서에서 단순히 물과 배합하는 과정만을 거치게 된단. 그 이후 과정은 기존 현장 시스템과 동일하게 레미콘 트럭을 이용하여 숏크리트 타설머신에 공급하게 되는데, 현장에서의 배합 과정을 간략화하고, 레디믹스트 숏크리트 재료의 품질이 유지될 수 있도록 하는데 중점을 둔다.

2안은 현장 배치플랜트 자체를 철거하고 공장에서 생산된 레디믹스트 숏크리트를 일체형 사일로 믹서로 명명한 특수한 장비를 이용하여 터널 내의 숏크리트 타설머신까지 재료를 공급하는 방법이다. 현장 배치플랜트의 철거로 현장공간 활용을 극대화하고 공사비 절감이 가능하며, 현장 믹서로 믹싱할 때 발생 가능한 재료 품질의 변화를 최소화할 수 있는 장점 있다.

일체형 사일로 믹서는 기존 현장에서 사용되고 있는 사일로와 달리 숏크리트 재료에 대한 각각의 사일로가 필요하지 않고, 공장에서 생산된 레디믹스트 재료를 저장할 수 있는 하나의 사일로만 필요하다. 또한, 현장 상황에 따라 변화된 숏크리트 배합을 즉각적으로 공장에서 생산하여 현장에 적용시킬 수 있으며, 시공사에서 숏크리트 재료 품질에 대한 관리 부담이 줄어들 수 있게 된다.

표 3.9.14 숏크리트 시공 시스템 개선안

구 분		숏크리트 믹싱 시스템	비 고
현 재		현장배치플랜트 -시멘트 사일로 -골재 치장 -믹서 -출하설비 등 레미콘 트럭 (터널내 운반) 숏크리트 타설장비 타설	- 현장 골재 수급 및 품질문제 - 배치플랜트 공간확보 제약 - 건설비, 운영비 - 레미콘 트럭 운영비
개선안	1안	벌크 트럭(공장) -레디믹스트 재료 운반 현장배치플랜트 -믹서 및 출하설비 레미콘 트럭 (터널내 운반) 숏크리트 타설장비 타설	- 현장 배치플랜트에서의 계량 및 배합 과정 간략화 - 각종 터널 배관길이에 따른 펌프 용량 선정 - 펌프 트러블 발생시 배관내 잔유 재료의 제거 - 현장 배치플랜트 골재저장공간 불필요 - 재료 물성에 따른 믹서 설계선정 필요
	2안	사일로 트럭(공장) -레디믹스트 재료 운반 사일로 트럭 믹싱 사일로 트럭 (터널내 운반) 숏크리트 타설장비 타설	- 신규 Silo & Mixer 제작비용 절감 - 현장공간 최소화 - Silo Low level 관리에 의한 재료분리 최소화 - 터널 내 배수라인 구성 - 재료 물성에 따른 믹서 설계 선정 필요 - 사각 Silo&Mixer의 tunnel 내 이동은 내부 구동부 이용

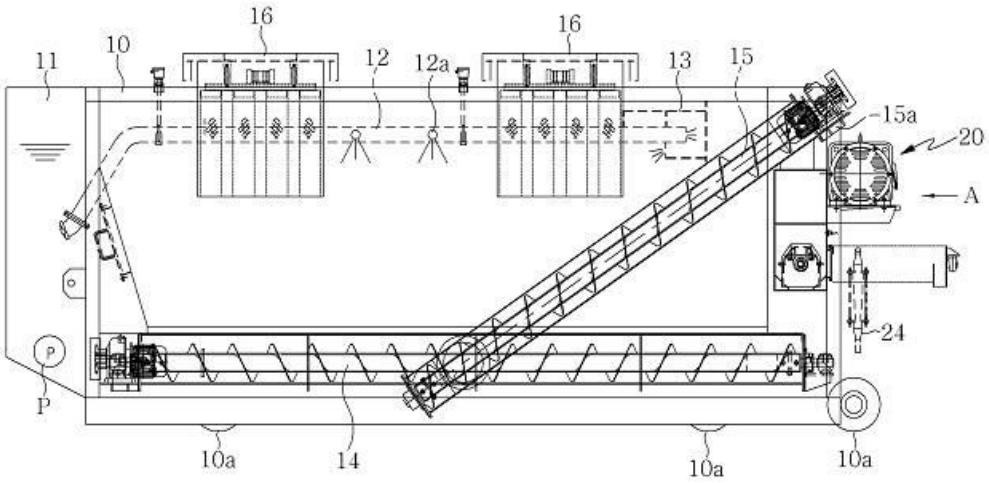
나. 일체형 사일로 믹서

그림 3.9.34는 본 연구를 통해 개념이 확립되고 설계가 완료된 일체형 사일로 믹서 장비를 나타낸 것이다. 본 장비는 이동식 수평 사일로 믹서 시스템으로 터널과 같은 갱내로 이동하면서 직접 현장에서 숏크리트와 같은 콘크리트 타설 작업을 할 수 있도록 한 현장 공급장치이다.

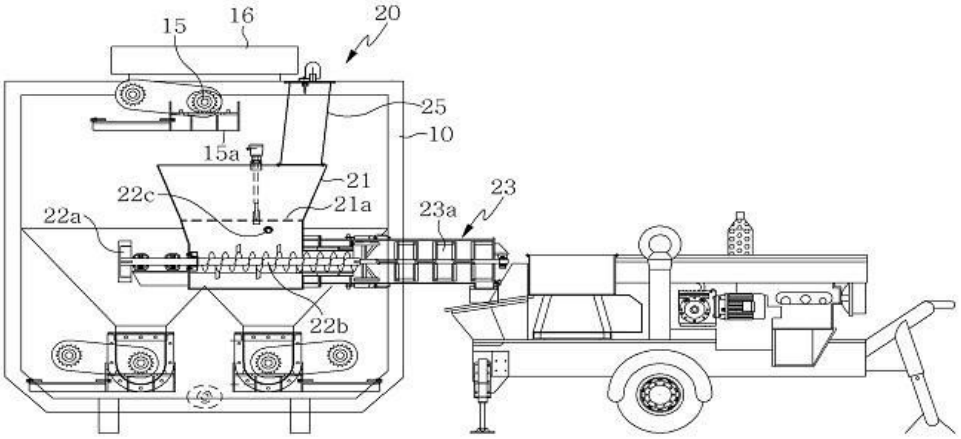
일체형 사일로 믹서는 하단에 설치된 이동식 바퀴(10a)에 의해 이동이 가능하며, 사각 박스 형상의 사일로 하우징(10)의 길이 방향 전면에 일체로 구획이 형성된다. 펌프(P)가 내부에 설치된 물탱크(11)와 사일로 하우징(10)의 길이 방향 후면에 설치되고, 사일로 하우징(10) 내부에서 후면 상부측으로 공급되는 레디믹스트 숏크리트를 물과 혼합하는 재료 혼합장치(20)가 설치된다.

사일로 하우징(10)의 하단에 이동바퀴(10a)가 설치되어 터널과 같은 갱내로 수평 이동이 가능하고, 견인차량에 의해 이동하기 쉽게 되어 있어 현장에서 직접 숏크리트 작업을 할 수 있으다. 사일로 하우징 내에 수평 및 상부 이송 스크류(14, 15)에 의해 레디믹스트 숏크리트 제품이 재료 분리없이 사일로 하우징의 후면 상부로 이송하여, 상부 물비빔 혼합장치(20)에서 물과 함께 연속적으로 믹싱할 수 있다.

또한, 유입관(12)을 통해 레디믹스트 숏크리트가 사일로 하우징(10) 내에 충전될 때 공기압에 의해 비산되는 분진을 막기 위한 백필터 집진장치(16)를 사일로 하우징(10)의 내의 천정부에 설치되고, 사일로 하우징(10)의 높이를 최소화하여 낮은 갱내 이동도 가능하다. 특히, 사일로 하우징(10)의 전방 측면부에 물탱크(11)와 펌프(P)가 일체로 형성되어 있어 레디믹스트 숏크리트와 물을 혼합시 별도의 물공급 설비를 구비할 필요가 없다.



(a) 전면부



(b) 측면부

그림 3.9.34 일체형 사일로 믹서

7. 소결론

본 절에서는 레디믹스트 숏크리트의 공장 규격화 생산 시스템을 구축하고 현장에서 가장 효과적으로 시공이 가능한 현장 시공시스템을 제안하기 위해 국내 현장 배치플랜트 실태 조사를 실시하였다. 그리고 기존 레디믹스트 생산 시스템 분석을 통해 개발 재료의 규격화된 생산 시스템을 구축하였고, 실제 제조공정 적용을 통해 각 규격별 레디믹스트 숏크리트 시제품을 생산하였다. 또한, 현장 배치플랜트 설비를 대처할 시공시스템을 도출함으로써, 재료 개발과 동시에 실제적인 현장적용이 가능한 연구개발이 되고자 하였다. 본 절에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 현장 배치플랜트 시스템에 대한 설문조사 결과 계량장치의 정밀도, 운반 및 배출장치, 시멘트 저장소, 자동작동 및 기록 항목에서 대체적으로 양호하게 운영되고 있었고, 반면, 현장 배치플랜트 시스템에서의 문제점은 골재저장소 및 야적장(30.2%)이 가장 높았고, 품질관리(24.5%)와 믹서배부의 청결상태 및 품질관리 측면(23,2%)이 그 뒤를 이었다. 이는, 전반적인 국내 현장 배치플랜트의 문제로 판단되며 현장 배치플랜트 생산 숏크리트의 품질을 저하시키는 주된 원인이라 사료된다.

(2) 본 연구에서는 레디믹스트 숏크리트의 체계적인 공장생산 및 규격화 생산 시스템 확립을 위해 생산 프로세스를 설계하였고, 생산 효율성을 증대시키고 품질 변동을 최소화 할 수 있는 공장 시스템 설계를 실시하였다. 그리고 제안된 레디믹스트 숏크리트 생산 시스템 설계(안)에서는 골재 최적입도조정, 원재료 투입방법, 투입순서, 믹싱혼합시간, 믹서회전속도 및 제품 이송속도 조정을 통해 제조상의 재료분리를 최소화 시킬 수 있게 하였다.

(3) 공장생산 과정에서의 재료분리 가능성이 있는 생산라인을 분석 검토하였으며, 이를 제어할 수 있는 공장 생산시스템 및 제조운영 방식을 제시함으로써 제조공정상 품질변동을 최소화 할 수 있었다. 서브호퍼 충전 유지, 사일로 로우 레벨(Silo low level) 관리, 사일로 만실운영 등의 방법을 통해 규격별 레디믹스트 숏크리트를 제조공정에 의거하여 총 19종류의 시제품을 생산하였다. 또한, 안정된 품질의 규격화된 분말형 레디믹스트 숏크리트 제조를 위해, 제조공정상 각 공정라인에서의 품질관리 및 제조공정 검사기준을 마련하였다.

(4) 개발된 레디믹스트 숏크리트 재료를 가장 효과적으로 현장에 적용시킬 수 있는 시공 시스템을 도출하였는데, 현장 배치플랜트를 통하지 않고 공장생산된 숏크리트 재료를 믹싱과 함께 타설 장비에 공급하여, 개발된 재료의 품질을 가장 효과적으로 발휘할 수 있는 시공시스템을 제안하였다. 이는 기존 현장 배치플랜트에서 생산되는 숏크리트의 경우, 현장 골재수급 및 품질문제, 현장 배치플랜트 공간확보, 배치플랜트 운영비 및 레미콘 트럭 운영비 등 기존의 많은 제약을 해결할 수 있는 현장 시공시스템으로 기대된다.

제 10 절 레디믹스트 숏크리트 시공성 및 경제성 평가

1. 설계단가 비교를 통한 경제성 평가

가. 개요

본 연구에서는 분말형 레디믹스트 숏크리트의 경제성에 대해 설계단가를 통한 정량적인 평가를 수행하기 위해 국내 지반 상황에 가장 보편적으로 적용되는 가상 터널을 고려하기로 한다. 이에, 현장 배치플랜트 생산 숏크리트와 분말형 레디믹스트 숏크리트의 원/m^3를 산정하였으며, 이 가상터널의 설계단가를 통하여 경제성을 분석하였다. 표 3.10.1은 숏크리트 설계단가 경제성 평가를 위해 고려한 가상터널에 대한 산출조건을 나타낸 것이다.

표 3.10.1 숏크리트 설계단가 산출조건

항 목	분말형 레디믹스트	현장 배치플랜트
터널연장	상하행분리로 1400m	상하행분리로 1400m
터널굴착	10개월 (180M/월_일방향)	10개월 (180M/월_일방향)
터널굴착단면	A≒76~78 m^2	A≒76~78 m^2
노 임	2008년 상반기	2008년 상반기
터널할증 (노임적용단가 할증)	R=1.292	R=1.292
1발파당 숏크리트량	Q=5.34m^2	Q=5.34m^2
숏크리트 cycle time	Cm= 117분 (숏팅준비작업시간 + 숏팅시간)	Cm=117분 (숏팅준비작업시간+숏팅시간)
	t4= 44분 (순수 숏크리트 숏팅시간)	t4= 44분 (순수 숏크리트 숏팅시간)
기계사용료	고정값적용	고정값적용
숏크리트 노무비	상 동	상 동
물탱크사용료	상 동	상 동
분사로보트	상 동	상 동
믹 싱	이동식사일로&믹서	현장 배치플랜트

나. 현장배합용 숏크리트 설계단가 산정

표 3.10.1의 조건하에 현장배합용 숏크리트의 설계단가를 산정하였으며, 표 3.10.2는 산출근거를 명시하고 각 세부단계별 단가 및 산출근거를 나타낸 것이다.

표 3.10.2 현장배합용 숏크리트 설계단가 (금액단위 : 원)

산 출 근 거	재료비	노무비	경 비	합 계
※ CYCLE TIME 산출참조 : 장비조합 C군				
- 1발파당 숏크리트량				
Q = 5.34㎥				
- 숏크리트 CYCLE TIME				
Cm = 117 Min				
t4 = 44 Min				
- 소요 작업조				
P = 1 조				
- 터널할증				
R = 1.292				
- 갱내 노임 적용 비율 (숏크리트 CYCLE TIME / 총시간)				
CT = 117 / 495 = 0.24				
1. 숏크리트 생산 및 운반				
경 비 : 1.02M3 * 15,155= 15,458			15,458	15,458
노무비 : 1.02M3 * 5,525= 5,636		5,636		5,636
재료비 : 1.02M3 * 118,828= 121,205	121,205			121,205
소 계	121,205	5,636	15,458	142,299
2. 기계 사용료				
가. 분사로보트 (13M3/HR) : 터널공 BASIC(XB61700000)참조				
경 비 : 99,534 * (117+10)/60/5.34= 39,453			39,453	39,453
재료비 : 26,421 * 117/60/5.34 * 44= 3,628	3,628			3,628
나. AIR COMPRESSOR (600 C.F.M)				
경 비 : 99,534 * (117+10)/60/5.34= 1,845			1,845	1,845
재료비 : 26,421 * 117/60/5.34 * 44= 4,511	4,511			4,511
소 계	8,139		41,298	49,437
3. 숏크리트 노무비				
작 업 반 장 : 1인*80,830*1*1.292*0.24/5.34= 4,593		4,693		4,693
증기운전사 : 5인*86,771*1*1.292*0.24/5.34= 25,192		25,192		25,192
갱 내 인 부 : 7인*60,547*1*1.292*0.24/5.34= 24,610		24,610		24,610
화 약 공 : 1인*88,932*1*1.292*0.24/5.34= 5,164		5,164		5,164
소 계		59,659		59,659
합 계	129,344	65,295	56,756	251,395

(계속) (금액단위 : 원)

산 출 근 거	재료비	노무비	경 비	합 계
A. 숏크리트 생산				
※ 숏크리트 배합비 : 터널조건식 참조				
1. 신규 뱃쳐 플랜트 설비비				
감가상각/년=200,000,000원/5년 = 40,000,000원/년				
일 설비비용=40,000,000원/240일 = 166,667원/일			11,111	11,111
m^3당비용=166,667원/15m^3=11,111원/m^3				
2. 숏크리트용 BATCH PLANT 사용료 (45 M3/HR)				
(1.0 M3 급 플랜트 60 TON)				
가) 기계사용료				
qb = 1.0 M3, Eb = 0.65(보통), Cmb = 1.5 Min				
QP = 60 * 1.0 * 0.65 / 1.5 = 26 M3/HR				
노무비 : 35,963 / 26 = 1,383		1,383		1,383
경 비 : 22,959 / 26 = 883			883	883
나) 동력비 : 발전기(96Kw)				
재료비 : 0 / QP = 0				
노무비 : 35,171 / QP = 1,352		1,352		1,352
경 비 : 31,596 / QP = 1,215			1,215	1,215
다) BATCH PLANT 가동시 보조인원				
(배합기록장치 운영요원 1인 포함)				
보통인부 : 2인 * 60,547 / 26 / 8 (HR/일) = 582		582		582
소 계		3,317	2,098	5,415
3. 시멘트				
465kg/m^3 * 54원/kg = 25,110원/m^3	25,110			25,110
4. 세골재 및 조골재				
1,602kg/m^3 * 13원/kg = 20,826원/m^3	20,826			20,826
5. 물 사용료				
Q = 0.212 TON				
재료비 : 1,764 * 0.212 = 374	374			374
노무비 : 2,288 * 0.212 = 485		485		485
경 비 : 1,210 * 0.212 = 257			257	257
6. 혼화제 사용				
급 결 재 : 24.48kg * 1,000 = 24,480				
유 동 화 재 : 4.90kg * 1,200 = 5,880	24,480			24,480
강섬유보강재 : 40.50kg * 1,000 = 40,500		5,880		5,880
			40,500	40,500

(계속) (금액단위 : 원)

산 출 근 거	재료비	노무비	경 비	합 계
7. 골재투입				
(타이어 페이로다 1.72 M3) : [E0003020172]				
- 모 래 :				
CM = 1.8 * 8 + 6 + 14 = 34.40 SEC				
QS = 3600 *1.72 *1.2 *1.0 *0.75 / CM = 162.00 M3				
- 자 갈 :				
CM = 1.8 * 8 + 10 + 14 = 38.40 SEC				
QA = 3600 *1.72 *1.0 *1.0 *0.60 / CM = 96.75 M3				
- 조,세골재 배합비율 참조				
- 작업량 Q = QS * 0.6635 + QA * 0.3365 = 140.04				
- 실투입량 A = 0.9703 * 45.00 M3 = 43.66 M3				
재료비 : 17,004.96 / 45.00 * (A / Q) = 117	117			117
노무비 : 21,654 / 45.00 = 481		481		481
경 비 : 22,468 / 45.00 = 499			499	499
소 계 : 단위보정[1.02]	119	490	508	1,117
8. 운 반				
(콘크리트 믹서 트럭 6.0 M3) : [E0043040060]				
Q1 = 6.0 M3, E = 0.95				
T1 = 6.0 / 45.0 * 60.0 = 8.00 MIN				
T2 = 4.89 MIN				
T3 = 2.5 MIN, T4 = 7.5 MIN				
CM = T1 + T2 + T3 + T4 = 22.89 MIN				
Q = 60 * Q1 * E / CM = 14.94 M3/HR				
재료비 : 22,557.6 / Q = 1,509	1,509			1,509
노무비 : 18,077 / Q = 1,209		1,209		1,209
경 비 : 17,304 / Q = 1,158			1,158	1,158
소 계 : 단위보정[1.02]	1,539	1,233	1,181	3,953
합 계	118,828	5,525	15,155	139,508

(계속) (금액단위 : 원)

산 출 근 거	재료비	노무비	경 비	합 계
1. 물탱크 (5,500 L)				
E = 0.9, L = 1.0 km V = 20.0 km/hr 흡입준비 : 5.0 흡 입 : 10.0 살수대기 : 5.0 살 수 : 20.0 T2 = (L / V) * 2 * 60 = 6.00 Cm = 5.0 + 10.0 + 5.0 + 20.0 + 6 = 46.00 Q = 60 * 5.5 * 0.9 / 46 = 6.46 TON/HR To = 10 + 20 + T2 = 36.00				
재료비 : 14,568.45 / 6.46 * 36 / 46 = 1,764	1,764			1,764
노무비 : 14,781 / 6.46 = 2,288		2,288		2,288
경 비 : 7,823 / 6.46 = 1,210			1,210	1,210
소 계	1,764	2,288	1,210	5,262
합 계	1,764	2,288	1,210	5,262

(계속) (금액단위 : 원)

산 출 근 거	재료비	노무비	경 비	합 계
1. 분사로보트 (RS-045)				
경 비 : 254,370,000 * 10^(-7) * 3913 = 99,534			99,534	99,534
노무비 : 일괄처리				
재료비 : 18 L * 1.39 * 1,056 = 26,421	26,421			26,421
소 계	26,421		99,534	125,955
합 계	26,421		99,534	125,955

다. 레디믹스트 숏크리트 설계단가 산정

표 3.10.1의 조건하에 분말형 레디믹스트 숏크리트의 설계단가를 산정하였으며, 표 3.10.3 은 산출근거를 명시하고 각 세부단계별 단가 및 산출근거를 나타낸 것이다.

표 3.10.3 분말형 레디믹스트 숏크리트 설계단가 (금액단위 : 원)

산 출 근 거	재료비	노무비	경 비	합 계
※ CYCLE TIME 산출참조 : 장비조합 C군				
- 1발파당 숏크리트량				
Q = 5.34㎥				
- 숏크리트 CYCLE TIME				
Cm = 117 Min				
t4 = 44 Min				
- 소요 작업조				
P = 1 조				
- 터널할증				
R = 1.292				
- 갱내 노임 적용 비율 (숏크리트 CYCLE TIME / 총시간)				
CT = 117 / 495 = 0.24				
1. 분말형 레디믹스트 숏크리트 생산/운반/Mixing				
경 비 : 1.02 M3 * 43,993 = 44,873			44,873	44,873
노무비 : 1.02 M3 * 1,837 = 1,874		1,874		1,874
재료비 : 1.02 M3 * 121,933 = 124,372	124,372			124,372
소 계	124,372	1,874	44,873	171,119
2. 기계사용료				
가. 분사로보트 (13M3/HR) : 터널공 BASIC(XB61700000)참조				
경 비 : 99,534*(117 + 10) / 60 / 5.34 = 39,453			39,453	39,453
재료비 : 26,421*117 / 60 / 5.34*44 / 117 = 3,628	3,628			3,628
나. AIR COMPRESSOR (600 C.F.M)				
경 비 : 4,656*(117 + 10) / 60 / 5.34 = 1,845			1,845	1,845
재료비 : 32,848.3*117 / 60 / 5.34*44 / 117 = 4,511	4,511			4,511
소 계	8,139		41,298	49,437
3. 숏크리트 노무비				
작 업 반 장 : 1인*80,830*1*1.292*0.24 / 5.34 = 4,693		4,693		4,693
중기운전사 : 5인*86,771*1*1.292*0.24 / 5.34 = 25,192		25,192		25,192
갱 내 인 부 : 7인*60,547*1*1.292*0.24 / 5.34 = 24,610		24,610		24,610
화 약 공 : 1인*88,932*1*1.292*0.24 / 5.34 = 5,164		5,164		5,164
소 계		59,659		59,659
합 계	132,511	61,533	86,171	280,215

(계속) (금액단위 : 원)

산 출 근 거	재료비	노무비	경 비	합 계
A. 분말형 레디믹스트 숏크리트 생산 / 운반 / 믹싱				
※ 분말형 레디믹스트 숏크리트 Plain 배합비				
1. 원재료비				
가) 시멘트				
465kg/m^3 * 54원/kg = 25,110원/m^3	25,110			25,110
나) 건조사(잔골재)				
1,250kg/m^3 * 10.44원/kg = 13,050원/m^3	13,050			13,050
다) 8mm골재				
352kg/m^3 * 40원/kg = 14,080원/m^3	14,080			14,080
라) 강섬유				
40.5kg/m^3 * 1,000원/kg = 40,500원/m^3	40,500			40,500
마) 유동화제				
1.92kg/m^3 * 2,260원/kg = 4,339원/m^3	4,339			4,339
소 계	97,079			97,079
2. 변동비				
9,000원/톤 * 2.152톤/m^3 = 19,368원/m^3			19,368	19,368
3. 운반비(BCT 도급 운반)				
8,900원/톤(150km기준) * 2.152톤/m^3 = 19,153원/m^3			19,153	19,153
4. 현장 Silo & Mixer 임대				
1,800,000원(30일)/30일/15m^3/일 = 4,000원/m^3			4,000	4,000
5. 동력비 : 발전기(96Kw)				
재료비 : 0 / QP = 0				
노무비 : 35,171 / QP = 1,352		1,352		1,352
경 비 : 31,596 / QP = 1,215			1,215	1,215
소 계		1,352	1,215	2,567
6. 물 사용료				
Q = 0.212 TON				
재료비 : 1,764 * 0.212 = 374	374			374
노무비 : 2,288 * 0.212 = 485		485		485
경 비 : 1,210 * 0.212 = 257			257	257
소 계	374	485	257	1,116
7. 혼화제 사용				
급 결 재 : 24.48kg * 1,000 = 24,480	24,480			24,480
합 계	121,933	1,837	43,993	167,763

(계속) (금액단위 : 원)

산 출 근 거	재료비	노무비	경 비	합계
1. 물탱크 (5,500 L)				
E = 0.9, L = 1.0 km V = 20.0 km/hr 흡입준비 : 5.0 흡 입 : 10.0 살수대기 : 5.0 살 수 : 20.0				
T2 = (L / V) * 2 * 60 = 6.00 Cm = 5.0 + 10.0 + 5.0 + 20.0 + 6 = 46.00 Q = 60 * 5.5 * 0.9 / 46 = 6.46 TON/HR To = 10 + 20 + T2 = 36.00				
재료비 : 14,568.45 / 6.46 * 36 / 46 = 1,764	1,764			1,764
노무비 : 14,781 / 6.46 = 2,288		2,288		2,288
경 비 : 7,823 / 6.46 = 1,210			1,210	1,210
소 계	1,764	2,288	1,210	5,262
합 계	1,764	2,288	1,210	5,262

(계속) (금액단위 : 원)

산 출 근 거	재료비	노무비	경 비	합 계
1. 분사로보트 (RS-045)				
경 비 : 254,370,000 *10^(-7) *3913 = 99,534			99,534	99,534
노무비 : 일괄처리				
재료비 : 18 L * 1.39 * 1,056 = 26,421	26,421			26,421
소 계	26,421		99,534	125,955
합 계	26,421		99,534	125,955

라. 설계단가 비교

동일한 시공 조건에 대해 현장배합용 숏크리트의 설계단가를 산출한 결과 251,395원/㎥으로 나타났고, 분말형 레디믹스트 숏크리트는 280,215원/㎥로 나타나, 분말형 레디믹스트 숏크리트의 설계단가가 28,820원/㎥ 정도 높은 것으로 나타났다.

표 3.10.4는 세부 공정에 대해 분말형 레디믹스트 숏크리트의 설계단가의 증감사유에 대해 나타낸 것이다.

표 3.10.4 분말형 레디믹스트 숏크리트의 설계단가 증감사유

산출명	공사비		증감(원)	증감사유
	현장타설(원)	분말형(원)		
숏크리트 생산 및 운반	142,299	171,119	28,820	모래/운반비
경 비	15,458	44,873	29,415	모래 건조 입도선별비 및 운반비
노무비	5,636	1,874	-3,762	자동화 시스템에 따른 현장 배치플랜트 보조인원 및 믹서트럭 운반 노무비 절감
재료비	121,205	124,372	3,167	8mm 입도선별된 균질한 건조규사 골재 매입
기계사용료	49,437	49,437	0	동 일
숏크리트 노무비	59,659	59,659	0	동 일

(1) 숏크리트 생산 및 운반(경비 및 노무비)

분말형 레디믹스트 숏크리트는 제품제조 특성상 모든 구성재료가 완전 건조된 상태로 균질하게 혼합 되어야 한다. 특히 구성재료중 약 70%를 차지하는 골재(잔골재 및 굵은골재)의 건조과정 및 균질한 품질유지관리를 위해서는 골재의 입도선별 과정을 반드시 거쳐야 하기 때문에 이들로 인한 공장생산 자동화 시스템에서의 변동비(약 19000원/M^3)가 필수적으로 발생하게 되며, 각 터널현장까지의 중·장거리 제품 운송에 대한 운반비용(약 19000천원/M^3) 및 갱내에서의 연속식 숏크리트 생산이 가능하도록 할 수 있는 이동식사일로&믹서 사용료(약 4000원/M^3)등이 발생된다. 한

편, 현장 배치 플랜트의 경우에 있어서는 각 구성재료의 수동적 장비계량으로 인한 장비/설비 사용료(약 13000원/M^3) 및 운전노무비(약 3000원/M^3)/콘크리트 믹서트럭 운반비(약 4000원/M^3)등의 비용이 발생된다

즉, 분말형 레디믹스트 숏크리트로 생산 및 운반시 현장 배치플랜트 생산 보다는 직접 경비 및 운반비에 소요되는 비용이 약 29000원/M^3 더 비용이 발생되기는 하나, 분말형 레디믹스트 숏크리트의 공장 자동생산 공급시스템을 통해 현장 배치 플랜트에서의 운전 노무비 절감(약 -4000/M^3)이 가능하며, 부가적으로 현장 배치플랜트 시설의 축소 및 초기 설치비 절감(약2~3억원) 등을 가능하게 할 수 있으므로, 건설업체 입장에서는 현장 시설 소모를 줄이고, 고품질의 공장생산 제품을 직접 사용가능하게 되어 최종적으로는 경제적인 시공이 가능할 것이다.

(2) 숏크리트 생산 및 운반(재료비)

분말형 레디믹스트 숏크리트의 경우, 현장 배치 플랜트와는 달리 고품질의 균질한 입도의 굵은골재(8mm 규사)가 사용되기 때문에, 이로 인한 원재료 단가상승이 유발되고 있으나 현 레미탈 공장에서는 대량 자동화 시스템 구축으로 숏크리트의 약 60%정도를 차지하고 있는 잔골재의 대량 확보가 가능하기 때문에 현장 배치플랜트와 같은 골재수급의 어려움을 해결할 수 있으며, 또한, 대량 수급에 의한 보다 낮은 단가로 잔골재를 적용할 수 있기 때문에 생산 및 재료단가에 있어서도 약 3000원/M^3 정도의 단가상승분만을 가져오게 되며, 추가적으로 고기능성을 위한 경제적 산업부산물(고로슬래그 30%치환) 적용시 거의 동등한 재료단가가 가능해 질 수 있다.

(3) 분말형 레디믹스트 숏크리트의 품질

국내 터널현장에서 일반적으로 시공되고 있는 현장배합 숏크리트는 골재 수급부족에 따른 골재품질 저하 및 현장 골재품질관리 부재로 인해 숏크리트 시공상 문제점이 발생하여 경제적 손실이 부가되고 있으며, 이와 함께 품질적으로도 숏크리트의 기본적 물성과 내구성이 저하되는 문제점을 안고 있다. 또한, 현장 배치 플랜트에서의 품질관리 부족으로 최초 설계시의 고강도 숏크리트가 실제 현장에서는 실현

되고 있지 못하는 실정이다.

반면, 분말형 레디믹스트 숏크리트는 재료수급 안정화로 원활한 시공성 확보 및 고품질 숏크리트의 시공을 통한 시공원가 절감을 유도할 수 있으며(약 100억원/년 이상), 공장형 배합의 최적 입도선별 골재관리 및 자동화 혼합시스템에 의한 균질한 최적 제품혼합 등으로 인해, 현장에서 재료 계량, 재료 야적 및 재료 품질관리 등이 필요없이 공장에서 자동생산되어, 운반된 제품을 연속식 믹싱시스템 통해 믹싱만 해서 사용하면 되므로 숏크리트 시공 품질을 월등하게 향상 시킬 수 있다. 또한 터널 암반특성에 따른 맞춤형 고품질 숏크리트 제품생산이 가능하기 때문에 이로 인한, 터널의 안정성 확보 및 장기내구성등의 증가로 인해 유지보수비용의 절감(약 1,000억원/년 이상)등을 기대할 수 있다.

(4) 현장 상황에 따른 시공단가 적용

설계단가 산출시에는 분말형 레디믹스트 숏크리트가 현장배합 숏크리트에 비해 약 12% 정도 가격이 증가하였으나, 실제 현장에 적용되는 시공단가 산출시에는 현장 상황에 맞는 효과적인 시공계획을 토대로 거의 동등한 시공단가를 산출할 수 있을 것으로 판단된다. 최종연도 연구개발에서는 실제적인 시공단가 산출을 통해 분말형 레디믹스트 숏크리트의 최종 경제성 분석을 수행할 계획이다.

2. 현장 시공프로세스 분석 및 최종 경제성 평가

본 연구개발에서는 기존 현장배합 숏크리트 타설 공법의 문제점을 해결하기 위해, 실무에 적용 가능한 레디믹스트 재료 개발과 타설 장비에 대한 연구를 수행하였으며, 이를 바탕으로 일체형 사일로 타설 시스템을 개발하였고, 설계단가에 대한 경제성 평가를 수행하였다. 본 절에서는 현장시공 프로세스 및 최종 경제성 평가를 위해 레디믹스트 숏크리트 적용 현장을 공사 유형별로 구분 및 분석하여, 적용성에 대한 객관적인 근거를 제시하고자 한다.

현장시공 프로세스 분석에서는 터널 전체의 시공프로세스 분석을 통해 숏크리트 타설 사이클과 투입장비간의 간섭, 현장여건 등을 고려한 체계적인 시공프로세스 분석이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 터널 전체 공종 사이클과 개별 공종 사이클간의 시공프로세스 연계분석을 통해 레디믹스트 숏크리트 공법의 시공성 평가에 대한 신뢰성을 확보하고자 하였다. 또한, 최종 경제성 분석의 신뢰성 확보를 위해서는 골재의 수급단가 및 공장생산 재료의 운반거리, 변동비 등 주요 공사비 증액사유에 대한 분석을 통해 숏크리트 재료비, 장비사용료 및 운반비 증가요인에 대한 검증이 필요하다. 특히, 숏크리트 생산에 필요한 주요자재의 수급여건 개선 및 품질확보에 따른 경제성 확보 방안을 객관적으로 검증할 필요가 있다. 본 연구에서는 공사 유형별(도로, 철도, 지하철) 원가분석을 실시하였고, 공사비 측면 외에 생애주기 측면의 경제성 검증(VE 및 LCC 분석)을 통해 경제성 분석결과의 신뢰성과 객관성을 확보하고자 하였다.

가. 시공프로세스 분석 개요

레디믹스트 숏크리트의 재료 개발과 단위 공종별 시험시공 결과를 토대로 연구개발 성과에 대한 현장 시공성 및 경제성 분석을 수행하였는데, 터널 전체 시공프로세스 분석을 수행하여, 공정·재료 공급·현장부지 활용 등 시공관리 측면의 장·단점과 숏크리트 개선으로 인한 인접 공정의 영향분석 등 상세분석을 실시하였다.

레디믹스트 숏크리는 기존 현장배합 숏크리트와 달리 공장에서 생산된 제품화된 재료공급을 통해 터널 내에서 숏크리트 타설장비에 의해 직접 배합되어 시공되는데, 그림 3.10.1은 공장제작 및 현장 내 배치플랜트 배제 등 현장타설과의 차별화된

핵심요인을 중심으로 레디믹스트 숏크리트의 시공특성을 분석한 것이다. 시공특성 분석을 통해 공장생산 과정의 품질확보 방안, 터널 사이클 타임 개선방안, 자재공급 최적화방안 및 현장내 장비개선 등 기존 현장배합 숏크리트 공법과 대비하여 변화된 시공여건을 합리적으로 적용할 수 있는 시공프로세스를 정립하고자 하였다. 그리고 공사 유형별(도로, 철도, 지하철)로 다양한 조건의 설계유형과 지형, 기후, 작업 위치 등 현장조건을 고려하여 레디믹스트 숏크리트의 실무 적용성을 사전 검토하고 터널 전체 시공프로세스 및 연계공정에 미치는 전반적인 연관성을 분석하고자 하였다.

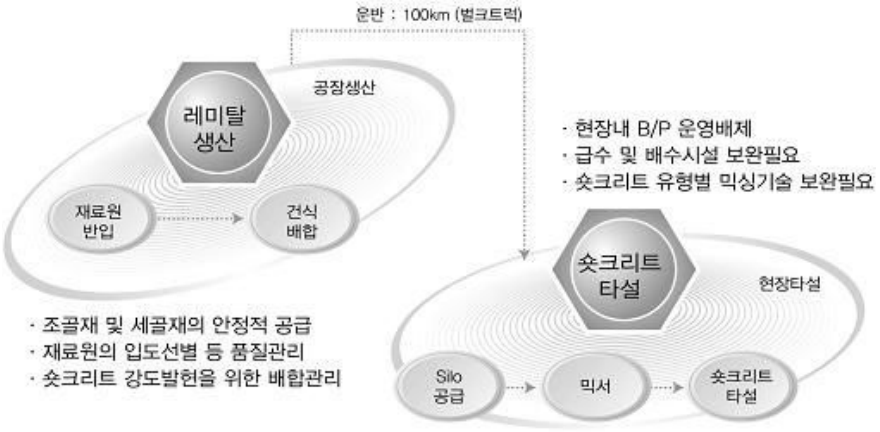


그림 3.10.1 레디믹스트 숏크리트 단계별 시공개요

표 3.10.5 현장타설 숏크리트와의 시공프로세스 비교·분석

구분	현장배합 숏크리트	레디믹스트 숏크리트	주요 착안사항
숏크리트 생산	•현장내 BP 설치	•기존공장 배합시스템 운영	•현장내 부지확보 용이 •조골재(8mm) 및 세골재의 안정적 공급 가능
	•주요 재료원 현장 공급	•재료원 공장운반 및 건식배합	•현장인근 골재 적치장 불필요 •세골재 및 조골재의 입도선별과 건조 등 재료원 품질관리 필요
	•현장배합 후 레미콘 트럭 공급	•생산된 재료의 현장운반	•현장 배합시 숏크리트 재료분리 방지 등 품질확보 가능
숏크리트 시공	•숏크리트 펌프카 공급	•현장내 재료 공급	•터널내 분진발생에 따른 대책 필요 •장비의 지속적 유지관리 필요
	•숏크리트 타설	•숏크리트 타설	•재료 물성에 따른 적정 배합 필요 •일체형 사일로 믹서 장비의 이동공간 확보 필요
	• 현장정리	• 현장정리	-

또한, 세부공정계획 수립을 통해 투입자원의 원활한 공급 및 효율적인 이동방법 등을 제시하여, 기존 공법 대비 공기 단축효과 등 시공관리 측면의 우수성을 검증하고자 하였다. 표 3.10.5는 현장배합 숏크리트 공법과의 시공프로세스를 비교·분석한 것이다.

나. 터널공사 시공프로세스 분석

레디믹스트 숏크리트 공법의 시공프로세스 분석을 위해서는 터널 전체 시공 프로세스 분석을 통해 숏크리트 공종의 사이클 타임 및 연계 공종과의 영향분석 등 터널시공 절차에 대한 분석이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 일반적인 NATM 터널의 시공프로세스 분석을 수행한 후, 숏크리트 공종의 세부프로세스 분석을 통해 레디믹스트 숏크리트 공법의 현장 적용성을 검증하고자 한다. 그리고 숏크리트 세부공종별 프로세스 분석을 통해 공법 시공성 향상을 위해 요구되는 항목들을 정의하고자 한다.

터널 전체 시공프로세스는 숏크리트 타설시 와이어 매시를 설치하는 방식과 섬유보강 숏크리트를 사용하는 2가지 방식으로 구분되는데, 레디믹스트 숏크리트는 합성섬유 보강 숏크리트 방식으로 분류된다. 그림 3.10.2와 표 3.10.6은 레디믹스트 숏크리트의 시공 특성을 고려하여 NATM 도로터널에 대한 전체 시공프로세스를 분석한 것이다. 철도 및 지하철 터널공사의 경우 도심지 시공으로 인한 작업구(수직구) 설치 등 도로 터널 공사에 비해 다소 복잡한 공정을 포함할 수 있으나, 전체적인 시공프로세스는 도로터널과 유사하다. 따라서, 도로터널의 시공프로세스를 통해 철도 및 지하철 터널의 시공프로세스 분석도 가능하다.

터널 전체 시공프로세스 분석을 통해 실제적으로 숏크리트 공종이 전체 시공프로세스에서 차지하는 비중은 상대적으로 크지 않음을 확인할 수 있다. 현장배합 숏크리트와 비교하여 레디믹스트 숏크리트가 일정부분 공기단축이 가능하고 시공프로세스가 단순화되기는 하지만, 주공정(Critical Path)이 아니기 때문에 전체 공종에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다.



그림 3.10.2 NATM 터널 시공프로세스

표 3.10.6 NATM 터널 주요 공종별 작업 분석

구분	세부공종	주요 작업분석
1단계 시공준비	1) 착공준비	·진입도로 개설 및 토공사 등 기반공사 수행
	2) 시·종점부 갱구부 시공	·갱구부 절토, 법면보강, 방음문 공사 등
	3) 막장 암질조사	·본선 굴착 전 막장 암질조사 및 판정
	4) 측량 및 굴착준비	·측량성과표 검토, 측량계획고 확인 등
2단계 본선굴착	5) 천공작업	·발파패턴별 장약량 및 천공위치 결정
	6) 장약 및 발파	·장약량 검사 및 발파안전사항 준수 후 발파
	7) 환기 및 버력처리	·유해가스 배출, 버력처리 및 반출
	8) 터널계측 및 부석제거	·천단침하, 내공변위 등 내공단변 측량 및 부석제거
3단계 지보공사	**9) 1차 숏크리트 타설**	**·강섬유(SFRS) 보강 숏크리트 최초 타설**
	10) 강지보 설치	·강지보재 설치, 필요시 와이어매시 설치
	11) 2차 숏크리트 타설	**·강지보 설치 완료 후 즉시 타설**
	12) 록볼트 설치	·지보패턴별 설치개소 확인, 2차 타설 후 즉시 설치
	13) 3차 숏크리트 타설	**·강지보, 록볼트 완료 후 최종 숏크리트 타설**
4단계 공동구 및 라이닝공사	14) 방수 및 공동구 설치	·방수막 및 부직포 설치, 여굴채움, 공동구 타설
	15) 라이닝 콘크리트 타설	·라이닝 폼 제작·설치 및 라이닝 콘크리트 타설
5단계 마무리공사	16) 시·종점부 갱문시공	·시점 및 종점부 갱문시공
	17) 부대시설 공사	·터널내 설비 등 부대시설 설치공사
	18) 마무리 공사	·공사용 도로 원상복구 및 기타 마무리 공사

다. 레디믹스트 숏크리트 시공프로세스 분석

(1) 현장 배치플랜트 활용시 시공프로세스 분석

레미믹스트 숏크리트 시공성 향상을 위해서는 전용장비인 일체형 사일로 믹서 장비의 사용이 요구되지만, 현장여건에 따라 기존 현장배합 숏크리트 방식과 유사하게 배치플랜트를 이용한 믹서방식의 시공도 가능하다.

그림 3.10.3은 현장 배치플랜트를 활용할 경우 레디믹스트 숏크리트의 시공프로세스를 분석한 것이다. 현장 배치플랜트를 활용할 경우 레디믹스트 숏크리트가 가지는 현장부지 활용과 시공성 향상 측면의 장점은 상당부분 감소되는 현실이다. 그러나 숏크리트의 품질관리 효율성 향상과 리바운드량 감소(4%) 등 시공관리 및 유지관리 측면에서 볼 때 현장타설 숏크리트 공법에 비해서는 우수하게 나타났다.

(2) 전용장비(일체형 사일로 믹서) 활용시 시공프로세스 분석

공장에서 생산된 원재료는 공사일정 및 여건에 따라 BCT상차 또는 톤백 포장의 형태로 현장에 공급되거나, 공장생산에서부터 현장까지 레디믹스트 숏크리트 전용장비인 일체형 사일로 믹서를 활용하여 모든 프로세스가 수행된다.

그림 3.10.4는 전용장비(일체형 사일로 믹서)를 활용한 경우 레디믹스트 숏크리트의 시공프로세스를 분석한 것이다. 터널 내 작업차량의 교행가능 여부(Trafficality)에 따라 시공절차가 달라지며 이에 따른 시공프로세스의 차이가 발생되었다. 그러나 차량교행 여부와 관계없이 현장배합 숏크리트 타설공법에 비해 현장배합 단계가 생략되어 시공프로세스 단순화를 통해 시공성 향상이 가능한 것으로 나타났다.

표 3.10.7은 현장배합 숏크리트의 시공프로세스와 비교·분석한 레디믹스트 숏크리트의 시공프로세스 특징을 정리한 것이다.

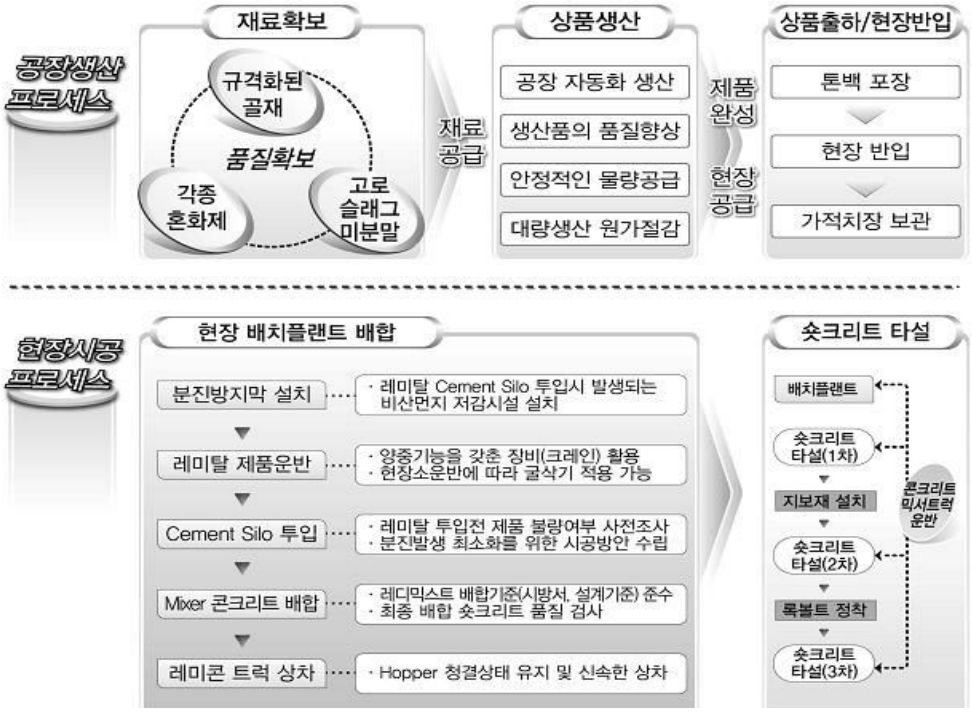


그림 3.10.3 현장 배치플랜트 활용시 시공프로세스

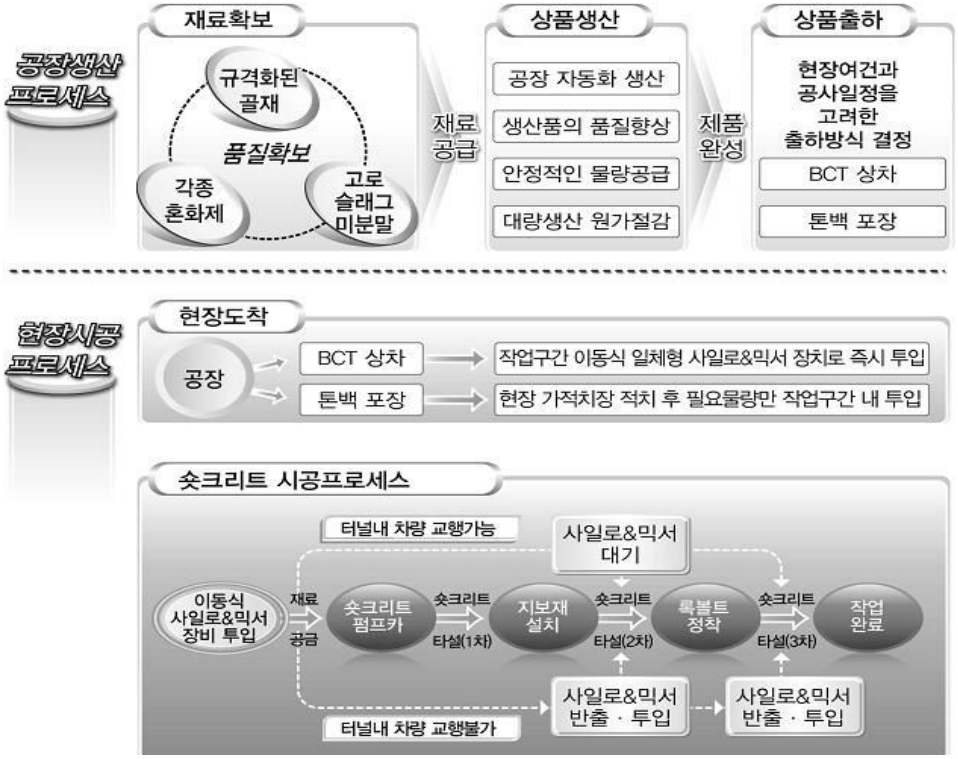


그림 3.10.4 전용장비(일체형 사일로 믹서) 활용시 시공프로세스 분석

표 3.10.7은 현장배합 숏크리트의 시공프로세스와 비교·분석한 레디믹스트 숏크리트의 시공프로세스 특징을 정리한 것이다.

표 3.10.7 레디믹스트 숏크리트 시공프로세스 특징

구분	현장배합 숏크리트	레디믹스트 숏크리트	특징
재료 반입	·재료(골재, 시멘트 등)별 별도의 현장 반입 및 보관	·공장생산 재료 현장 반입 및 보관	·골재야적장 불필요 (인력, 장비 절감) ·완성품 반입을 통한 관리효율 향상
작업 순서	① 현장배합(배치플랜트) ② 믹서트럭 운반 ③ 숏크리트 공급(펌프카) ④ 숏크리트 타설	① 공장생산 재료 갱내 운반 ② 이동식 사일로 믹서 배합 ③ 숏크리트 공급(펌프카) ④ 숏크리트 타설	·배치플랜트 설치 불필요 (현장여건상 B/P사용 가능) ·타설지점 직접 이동을 통한 시공성 향상(공장생산 재료 터널 내 직접 투입)
작업 특징	·골재수급 및 B/P 등 연계공정 관리 필요	·전용장비 운영으로 작업 공종 단순화	·공종간 간섭최소화를 통한 공사관리 효율성 향상 (B/P 및 믹서트럭 불필요)
품질 관리	·별도의 골재관리 필요 ·고품질 골재수급 어려움	·별도의 골재관리 불필요 ·제품 투입계획 수립 용이	·공장생산을 통한 고품질 재료 확보 ·리바운드량 감소를 통한 시공성 향상

(3) 공정 분석

(가) 분석대상 터널 현황

레디믹스트 숏크리트 공법의 현장적용을 위해 도로터널(병렬, L=4.000km)을 대상으로 전체공정과 숏크리트 공종에 대한 공정분석을 수행하였다. 한국도로공사의 2차선 표준단면을 적용하였고 시·종점부 개착구간을 포함한 전체 연장 4,060m 중 NATM 구간이 4,000m이며, 지보패턴별 분포는 암질이 양호한(Type 1, 2) 구간이 전체의 65%인 국내지형에서 일반적인 형태의 터널을 선정하였다. 표 3.10.8과 표 3.10.9는 분석터널 전체 현황과 구간 설계 패턴을 나타낸 것이다.

표 3.10.8 분석터널 전체현황(단위 : m)

구분	굴착	개착			전체
	NATM	시점	종점	계	
연장	4,000	30	30	60	4,060

표 3.10.9 NATM 구간 설계패턴(단위 : m)

구분	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6	계
상행선	600	700	360	200	80	60	2,000
하행선	600	700	360	200	80	60	2,000
연장	1,200	1,400	720	400	160	120	4,000
비율	30.0%	35.0%	18.0%	10.0%	4.0%	3.0%	100.0%
총연장	NATM TUNNEL L= 4,000m						

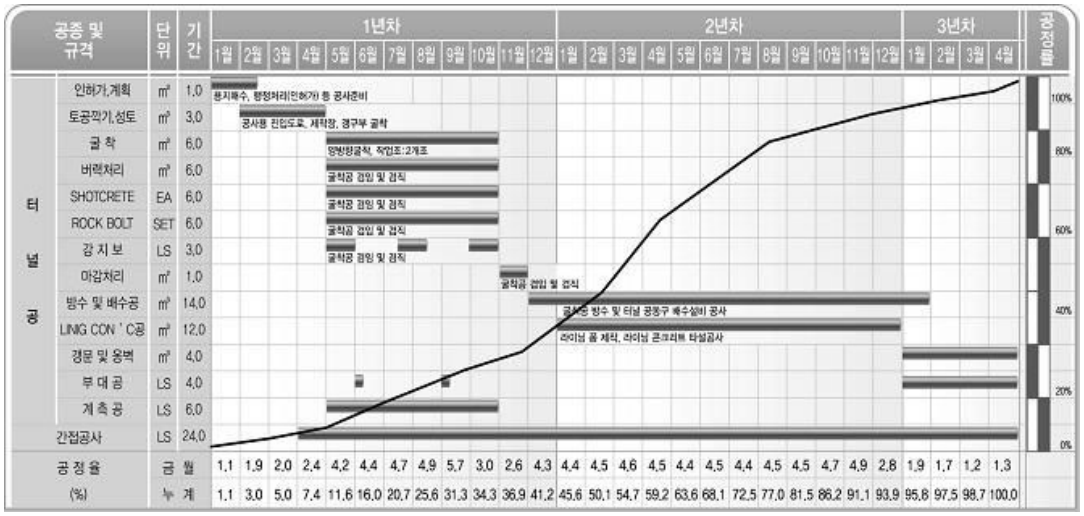
(나) 터널 전체공정 분석

시공성 분석에 적용된 터널은 연장이 4,000m 이상인 장대터널로서 공사기간은 27개월인 장기공사로 고려하였고, 숏크리트용 배치플랜트는 패턴별 숏크리트 최대 투입량을 기준으로 60㎥/hr 규격의 설비 시스템을 적용하였다. 레디믹스트 숏크리트 공법은 현장 배치플랜트를 이용한 기존 방식과 이동식 일체형 사일로 믹서 장비를 이용하는 2가지 안으로 제시하였다.

그림 3.10.5는 터널 전체 예정 공정표를 나타낸 것인데, 현장 배치플랜트 적용(안)과 이동식 일체형 사일로 믹서 적용(안)은 공통적으로 설치 및 해체가 단순하고, 소요기간이 짧아 전체 공기에 미치는 영향이 거의 없기 때문에 전체 공정계획에서는 제외하였다.

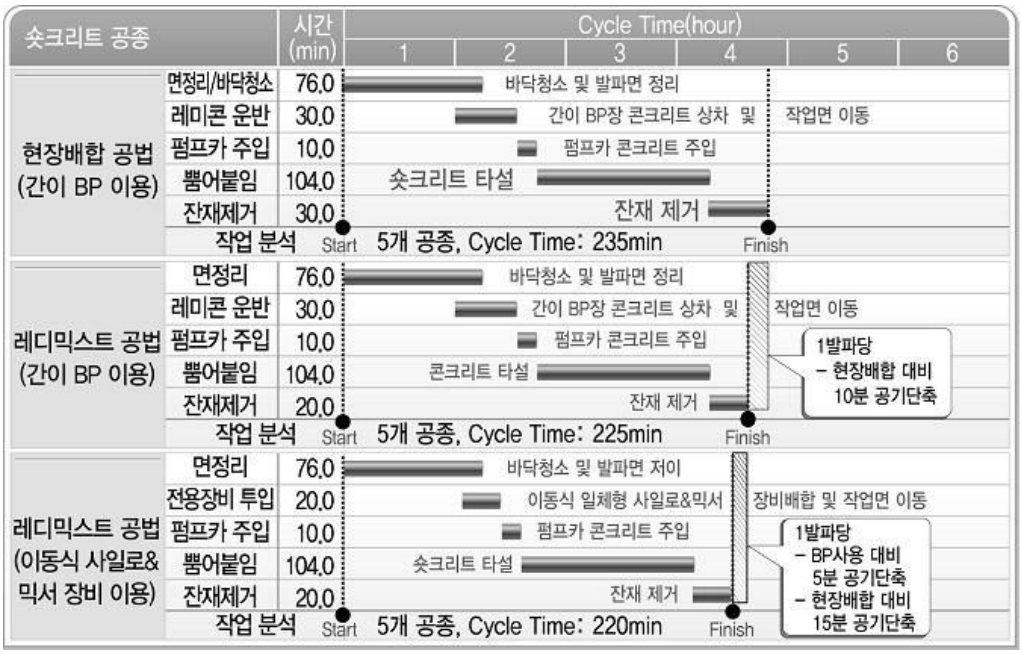
(다) 숏크리트 공사 세부공정계획

현장 배치플랜트 방식과 전용장비(일체형 사일로 믹서) 방식의 2가지 적용(안)에 따른 별도분석 수행결과는 그림 3.10.6과 같다.



산 출 기 준	·굴진(굴착, 버력처리, 숏크리트, 락볼트, 강지보): 양방향 2막장, 3교대 기준(8hr/일) ·라이닝 콘크리트: 병렬터널 각각 2조 운영, 강재거푸집 4set, 1타설당 3일(9m당)

그림 3.10.5 터널전체 예정(개략)공정표



지보패턴	·Type-1 (경암)	적용연장	·1,200m(병렬)
굴 진 장	·3.5m, 전단면 굴착	숏크리트량	·2.423㎥(단위 m당)
분석결과	·현장배합 공법 대비 1발파당 Cycle time 최대 15분 단축 -배치플랜트 사용시, 현장배합 대비 10분 단축(리바운드량 감소) -전용장비 사용시, 현장배합 대비 15분 단축(장비가동시간+리바운드량 감소)		

그림 3.10.6 숏크리트 타설공사 세부공정계획

(4) 자원 및 부지활용 예시

레디믹스트 숏크리트의 2가지 시공(안) 중에서 일체형 사일로 믹서를 이용하여 시공할 경우에는 배치플랜트 운영에 따른 불필요한 인력 및 자원투입의 배제로 경제적인 시공이 가능하다. 그리고 현장 배치플랜트를 활용할 경우에는 인·허가, 부지조정, 설치 및 해체에 따른 자원투입은 동일하나, 숏크리트 품질확보에 따른 리바운드량 감소 등 시공성 측면에서는 역시 기존 공법에 비해 우수하다.

(가) 자원투입 예시

표 3.10.10은 현장 배치플랜트와 골재적치장 운영시 주요공종과 투입되는 인적 및 물적 자원을 나타낸 것이다. 굴착공종 초기에 투입되는 이들 공종의 자원을 연계공종에 우선 투입함으로써, 공기단축 및 시공효율이 향상되고 불필요한 공사비의 발생을 억제할 수 있어 경제성 확보가 가능하다.

표 3.10.10 현장 배치플랜트 설치에 따른 자원 소요량

구분	규격 및 제원	자원투입 공종	투입자원
배치플랜트 (부대공 포함)	·생산능력:60㎥/hr ·부지면적:420㎡	·부지정지 ·플랜트 설치·해체	·인력: 기계공, 비계공, 플랜트전공, 보통인부 등 ·장비: 백호, 롤러, 그레이다, 트럭 크레인 등
골재적치장	·적재능력: 260㎥ ·부지면적: 130㎡	·부지정지 ·야적장 건설·철거	·인력: 형틀목공, 보통 인부 등 ·장비: 백호, 덤프, 로더 등

(나) 부지활용 예시

공사 초기 배치플랜트와 골재 적치장을 설치하게 되며 이는 대부분 갱문 인근에 설치되는 것이 일반적이다. 굴착공정이 갱문설치 후 바로 후속되는 공정이기 때문에 사업초기 공종들 간의 간섭 발생으로 시공 능률을 저하시키는 요인이 될 수도 있다. 하지만, 일체형 사일로 믹서 장비를 이용하여 시공함으로써 공사초기 선·후행 또는 개별 공종들 간의 간섭을 최소화 할 수 있으며, 배치플랜트와 골재적치장 운영비 등 비용절감을 통한 경제성과 시공성을 동시에 확보할 수 있게 된다.

그림 3.10.7과 그림 3.10.8은 본 대상터널에서 적용된 배치플랜트와 골재적치장 계획을 나타낸 것이고, 표 3.10.11은 이들 부지의 활용방안을 나타낸 것이다.

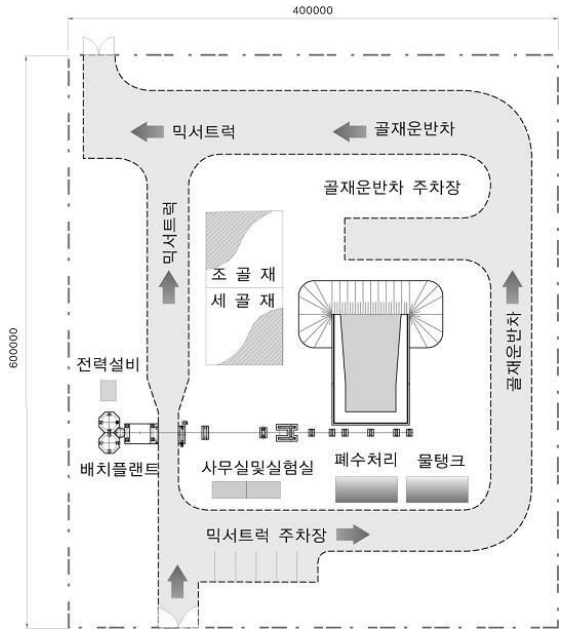


그림 3.10.7 배치플랜트 평면계획(예)

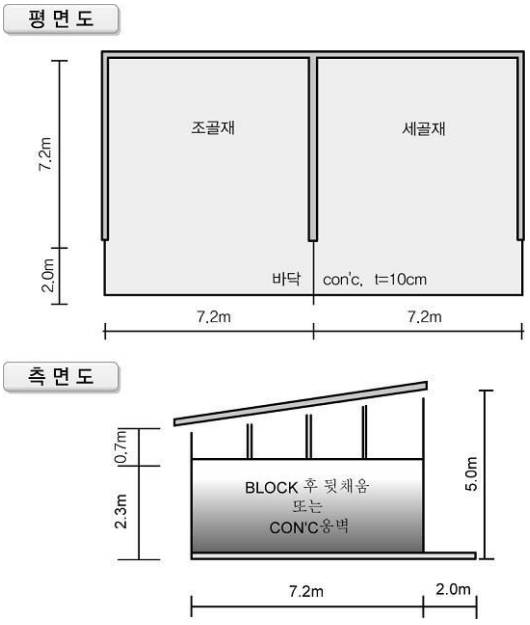


그림 3.10.8 골재적치장 배치계획(예)

표 3.10.11 현장부지 활용예시

구분	부지면적 구성		활용방안
배치플랜트 (전체 구조물 포함)	전체 면적	·총면적 : 2400㎡ (40m×60m)	·현장근로자 휴게시설 및 안전시설로 활용 ·갱구부 시공 중, 임시사토장 부지로 활용 ·공사초기, 가시설 임시야적장 부지로 활용 ·강지보재, 록볼트 등 주요 자재야적장으로 활용 ·터널굴착에 따른 임시버력 집하시설로 활용 ·기타 시공 중 한시적 설치시설로 활용
	세부 면적	·믹서시설 : 650㎡ ·골재적치장 : 130㎡ ·부대시설 : 500㎡ ·기타시설(도로포함) : 1120㎡	

라. 경제성 분석 개요

레디믹스트 숏크리트 특성을 고려하여 단일공종의 경제성 뿐만 아니라 터널 품질 및 운영상의 전반적인 성능개선을 중심으로 VE 분석을 수행하였다. 레디믹스트 숏크리트는 기존 현장배합 숏크리트와 재료성격 및 시공프로세스가 상당한 차이를 보이고 있기 때문에 VE 분석을 통한 성능평가가 필요하다고 판단된다. 따라서, 터널 유형별(도로, 철도, 지하철) 사례적용을 통해 레디믹스트 숏크리트 적용으로 인한 경제적 효과를 명확하게 제시하여 실용화가 가능한 터널 유형과 연장을 제시하고자 하였다.

본 연구에서는 경제성 분석을 크게 2가지 유형으로 구분하여 수행하였는데, 먼저 기존 현장배합 숏크리트와의 단위 공사비 검토 및 공사비 영향분석을 수행하였고, 다음으로 터널 유형 및 연장에 따른 공사비를 산출하고 경제적 임계점을 분석하였다. 그림 3.10.9는 경제성 분석 프로세스를 나타낸 것인데, 단계별 경제성 분석 프로세스를 수립하여 체계적이고 객관적인 절차를 통해 분석 결과의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

특히, 현장배합 숏크리트 타설 공사비의 현실화와 레디믹스트 숏크리트의 세부 단계별 기준 단가 산출을 통해 기존 공법과의 항목별 비용 분석을 수행하였는데, 공사 유형별(도로, 철도, 지하철 터널) 단위(m)당 공사비를 구성하여 연장별, 여건별 비용분석으로 공사비의 경제성 분석을 시도하였다. 또한, 레디믹스트 숏크리트의 품질이 전체 터널 구조물의 시공품질에 미치는 영향을 고려하여, 전체 생애주기 비용분석(LCC)과 품질 등 제반 기능의 향상 효과를 고려한 가치분석(VE)으로 포괄적인 최종 경제성 검토를 시도하였다.

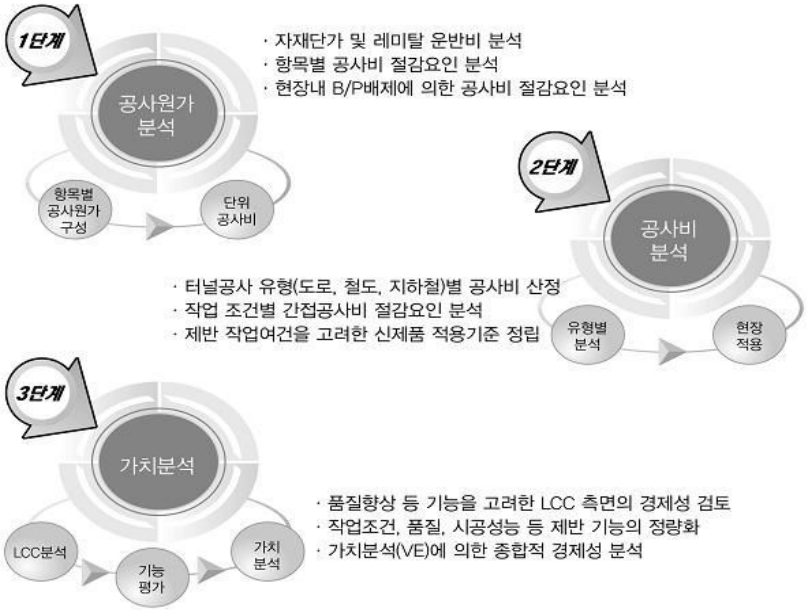


그림 3.10.9 경제성 분석 프로세스

마. 레디믹스트 숏크리트 최종 경제성 분석

(1) 숏크리트 생산 및 운반 단위공사비 분석

레디믹스트 숏크리트 적용시 기존 공법과의 차이점은 숏크리트용 골재 최대치수 변경(10mm→8mm)으로 인한 리바운드량 저감(평균 4%)과 공장생산 레미탈의 운반비로 구분할 수 있다. 표 3.10.12는 리바운드량 저감에 따른 숏크리트 버럭 처리량을 비교한 공사 유형별로 비교한 것이고, 표 3.10.13은 레디믹스트 숏크리트 생산단가를 나타낸 것인데, 적용단가는 연구참여기업인 한일시멘트의 생산공장과 각 지역 거점의 평균 운반거리를 적용하였다.

표 3.10.12 숏크리트 버력처리량 변경(리바운드량 평균 4%)(단위: 천원)

구분	현장배합 숏크리트		레디믹스트 숏크리트		차이		비고
	수량(㎥)	금액	수량(㎥)	금액	수량(㎥)	금액	
일반도로	3,864	10,591	3,709	10,166	-155	-425	L=2,000m
철 도	2,457	9,344	2,358	8,967	-99	-377	L=3,210m
지 하 철	2,235	17,880	2,145	17,160	-90	-720	L=2,681m

표 3.10.13 레디믹스트 숏크리트 생산단가 변경(평균 운반거리 적용)(단위:㎥,원)

구 분	적용단가	비 고
조골재구입(D8mm)	40,000	한일시멘트 적용 견적가
변동비	4,500	입도선별 및 건조비
재료 운반비(150km)	5,933	100km적용(지역공장 거점 활용)
일체형 사일로 믹서 임대비	1,000,000	평균 월임대 금액(1일 13㎥ 생산기준)

표 3.10.14~3.10.16은 도로, 철도 및 지하철 터널에서 적용된 사례의 단위공사비는 나타낸 것인데, 기존 현장배합 숏크리트의 경우에는 표 3.10.17의 현장 배치플랜트의 설치 및 철거비용을 추가로 계상 하였다. 사례 현장의 특성을 반영하여 재료비 및 생산비용은 각 사례별로 차이가 나타나고 있으나, 이를 동일화 하지 않고 현장 특성을 반영하기 위해 직접 비교하였다. 그리고 단위공사비는 사례현장에서 제시하고 있는 자재 단가를 적용하였으며, 노임 및 제경비의 경우 2009년 상반기 비용을 기준으로 산정하였다. 특히, 레디믹스트 숏크리트가 아직까지 국내현장에 공식적으로 시공된 사례가 없기 때문에 공식적으로 판단할 수 없는 단위공사비는 참여기업에서 제시한 기준을 토대로 국내 실적을 고려하여 적용하였다.

표 3.10.14 도로 터널 숏크리트 단위공사비(단위 : 원/㎥)

구 분	현장배합 숏크리트(A)	레디믹스트 숏크리트(B)	차이(B-A)	비 고
시멘트구입 및 운반	36,681	36,681	-	
혼화재	29,968	29,968	-	
섬유보강재	95,013	47,507	-47,506	합성섬유 사용
세골재 구입	17,187	25,780	8,593	
조골재 구입	4,692	8,531	3,839	
배치플랜트 사용료	2,975		-2,975	
동력비	1,535	1,535	-	
골재투입비	1,353		-1,353	
물사용료	1,236	1,236	-	
레미콘 트럭 사용	5,160		-5,160	
재료 공장생산비		18,684	18,684	
재료 운반비(100km)		15,768	15,768	
일체형 사일로 믹서 임대비		2,222	2,222	
계	195,800	185,690	**-7,888**	4.0%↓

표 3.10.15 철도 터널 숏크리트 단위 공사비(단위 : 원/㎥)

구 분	현장배합 숏크리트(A)	레디믹스트 숏크리트(B)	차이(B-A)	비 고
시멘트구입 및 운반	33,475	33,475	-	
혼화제	26,654	26,654	-	
섬유보강재	69,767	47,507	-22,290	합성섬유 사용
세골재구입(도착도)	27,599	31,499	3,900	
조골재구입(도착도)	15,187	22,040	6,853	
배치플랜트사용료	4,453		-4,453	
플랜트보조인원	1,241		-1,241	
골재투입비	8,874		-8,874	
물사용료	218	218	-	
레미콘 트럭 사용	17,438		-17,438	
재료 공장생산비		18,684	18,684	
재료 운반비(100km)		15,768	15,768	
일체형 사일로 믹서 임대비		2,222	2,222	
합계	204,906	198,067	-6,869	3.35%↓

표 3.10.16 지하철 터널 숏크리트 단위 공사비(단위 : 원/㎥)

구 분	현장배합 숏크리트(A)	레디믹스트 숏크리트(B)	차이(B-A)	비 고
시멘트구입 및 운반	38,628	38,628	-	
혼화제	12,607	12,607	-	
섬유보강재	95,013	47,507	-47,506	합성섬유 사용
세골재구입(도착도)	20,161	27,780	7619	
조골재구입(도착도)	7,581	18,952	11,371	
배치플랜트사용료	4,453		-4,453	
골재투입비	3,152		-3,152	
물사용료	295	295	-	
레미콘 트럭 사용	6,250		-6,250	
재료 공장생산비		18,684	18,684	
재료 운반비(100km)		15,768	15,768	
일체형 사일로 믹서 임대비		2,222	2,222	
합 계	188,140	182,443	-5,697	3.0%↓

표 3.10.17 현장 배치플랜트 설치 및 철거(단위 : 원)

간이 배치플랜트 설치·철거	단위	비용(원)	비고
부지정지비	1 개소	652,786	사례 사업에 적용한 비용임
싸이로 설치(60ton급)	1 개소	160,984	
콘크리트 타설	1 개소	748,856	
부지임대비	1 개소	1,134,000	
철거비	1 개소	1,093,838	
합 계		3,790,464	

공사 유형별로 숏크리트 1㎥당 단가를 비교하였을 경우 현장배합 방식에 비해 레디믹스트 방식이 공사 유형별로 편차는 있지만, 3%~4% 정도 공사비 단가가 절감되는 것으로 나타났다. 도로, 철도, 지하철에서 숏크리트 구성요소인 시멘트 등의 재료비가 지역별로 편차가 있고, 골재투입 여건의 차이 등이 현장별로 차이가 있음에 따라 발생되는 비용의 차이로 실질적인 비용 증가 또는 절감을 확정적으로 볼 수는 없을 것으로 판단된다. 그러나, 도로와 같이 현장 시공여건과 재료 수급여건이 양호한 현장보다는 지하철 및 철도와 같이 작업구 개설여건이 어려운 현장에서 간접비의 절감 효과가 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 특히, 도심지 지하철 공사의 경우 작업구 개설범위가 한정적이고 자재 야적장 등 부지활용이 제한적이기 때문에, 공장생산에 의한 레디믹스트 숏크리트의 적용은 실질적인 공간 활용성과 간접비 절감 효과가 더욱 크게 나타날 것으로 판단된다.

그림 3.10.10과 3.10.11은 운반거리와 조골재 단가 변동에 따른 공사비의 변화를 나타낸 것인데, 운반거리 100km 및 조골재 자재단가를 현행 공장투입 가격으로 산정한 것으로 현장에 따라 비용절감 및 증가 요인이 산재하고 있음을 알 수 있다. 그리고 현장 여건이 복잡하여 배치플랜트 설치 개수가 증가하고, 부지임대가 용이하지 않은 철도 및 지하철 터널의 경우에는 직접공사비가 더욱 절감될 것으로 판단된다.

향후 본 제품이 시장에서 활성화 될 경우 숏크리트 재료비 및 변동비가 인하될 것으로 판단되고, 공장 거점의 증대로 레디믹스트 숏크리트의 운반거리를 감소시킬 경우 공사원가의 절감이 더욱 클 것으로 판단된다. 또한, 전용 장비(일체형 사일로 믹서)의 개발과 실용화가 이루어 질 경우 인력투입 및 작업시간의 감소로 인한 간

접비의 추가적인 절감이 가능할 것으로 판단된다.

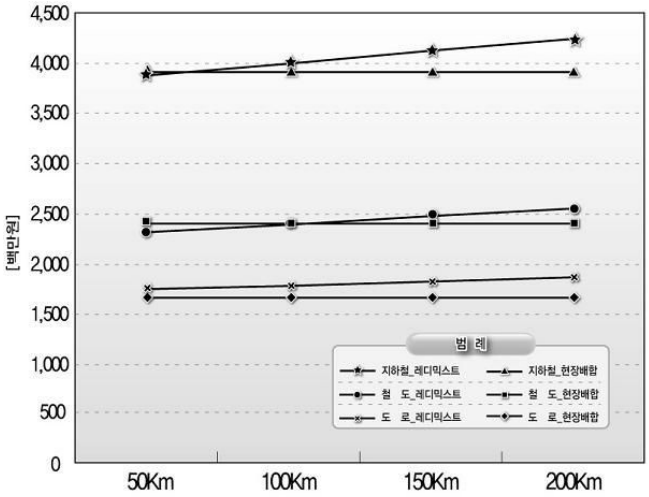


그림 3.10.10 운반거리변화에 따른 공사비 변화

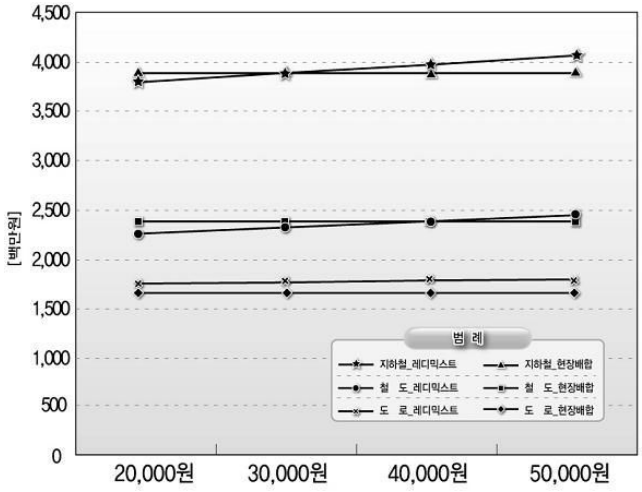


그림 3.10.11 조골재 단가변동에 따른 공사비 변화

(2) 터널 연장 및 유형별 공사비 분석

(가) 도로 터널 공사비 분석

사례로 분석한 터널은 2차선 고속도로이며 총 연장은 2,000m의 병렬터널로서 표 3.10.18은 항목별 공사비를 비교한 것이다. 현장 노무인력 및 공사기간 단축으로 간접비의 경우 현장타설 숏크리트에 비해 약 2.4% 감소하고 있으며, 전체공사비의 경

우 약 0.42% 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 본 사례 현장은 영동권에 위치한 지역적 특성으로 인해 시멘트, 조골재 등 기존 자재 단가가 일반 철도 및 지하철 터널에 비해 약 30~50% 이상 낮게 책정되어, 향후 현장배합 숏크리트의 자재단가 및 운반비가 조정될 경우 공사비가 더 낮아질 가능성이 있다.

표 3.10.18 도로 터널 사례 현장의 항목별 공사비 비교표(단위: 백만원)

구 분	현장배합 숏크리트(A)	레디믹스트 숏크리트(B)	차이(B-A)	비 고
직접공사비	1,662	1,624	-38	-2.3%
간접공사비	127	124	-3	-2.4%
일반관리비	89	95	6	6.7%
이 윤	60	72	12	20.0%
부가가치세	194	208	14	7.2%
계	2,132	2,123	-9	-0.42%

(나) 철도터널 공사비 분석

사례로 분석한 터널은 철도 장대터널이며 총 연장은 3,210m의 단선터널로서, 표 3.10.19는 항목별 공사비를 비교한 것이다. 현장 노무인력 및 공사기간 단축으로 간접비의 경우 현장타설 숏크리트에 비해 약 23% 정도 감소하고 있으며, 전체공사비의 경우 약 3% 감소하는 것으로 나타났다. 조골재(8mm), 변동비(건조) 등 비용증가 요인이 있으나 리바운드량 감소에 의한 수량감소, 간이 배치플랜트(3개소) 미설치 등 직접공사비의 절감과 간접비 감소로 공사비가 절감 되었으며, 향후 현장타설 숏크리트의 자재단가 및 운반비가 조정될 경우 공사비가 추가적으로 조정될 가능성이 있을 것으로 판단된다.

(다) 지하철 터널 공사비 분석

사례로 분석한 터널은 복선 지하철 터널이며 총 연장은 2,681m의 단선터널로서, 표 3.10.20은 항목별 공사비를 비교한 것이다. 현장 노무인력 및 공사기간 단축으로 간접비의 경우 현장타설 숏크리트에 비해 약 24% 정도 감소하고 있으며, 전체공사비의 경우 약 2.6% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 직접공사비의 경우 현장 작업

특성으로 인해 시멘트, 조골재 등 주요자재 단가가 현장배합 숏크리트의 조골재 단가에 비해 약 50% 이상 증가하는데 주원인이 발생하고 있어, 향후 현장타설 숏크리트의 자재단가 및 운반비가 조정될 경우 공사비가 낮아질 가능성이 있을 것으로 판단된다.

표 3.10.19 철도 터널 사례 현장의 항목별 공사비 비교표(단위: 백만원)

구 분	현장배합 숏크리트(A)	레디믹스트 숏크리트(B)	차이(B-A)	비 고
직접공사비	2,395	2,394	-0.9	0.0%
간접공사비	300	229	-70.5	-23.5%
일반관리비	135	131	-3.6	-2.7%
이 윤	110	96	-14.3	-13.0%
부가가치세	294	285	-8.9	-3.0%
계	3,233	3,135	-98	-3.0%

표 3.10.20 지하철 터널 사례 현장의 항목별 공사비 비교표(단위: 백만원)

구 분	현장배합 숏크리트(A)	레디믹스트 숏크리트(B)	차이(B-A)	비 고
직접공사비	3,910	3,876	-34	-0.9%
간접공사비	397	300	-97	-24.4%
일반관리비	215	215	0	0%
이 윤	159	155	-4	-2.5%
부가가치세	502	501	-1	-0.2%
계	5,183	5,047	-136	-2.6%

(3) VE에 의한 가치평가

VE(Value Engineering)는 실질적으로 연구 계획단계 또는 초기단계에서 최적의 결과를 도출하기 위해 수행하는 가치분석 기법으로서, 본 연구과제에서는 개발된 제품의 성능을 상대적으로 분석하기 위해 기존의 아이디어 도출 및 기능계통도 작

성은 제외한 성능분석과 LCC에 의한 비용 분석만을 수행하여 결론을 분석하였다.

(가) 성능분석

VE의 성능분석을 위해 터널 설계 및 시공과 관련된 전문가를 대상으로 의견조사를 수행하였으며, 집단 미팅을 통해 각각의 성능을 객관적으로 평가할 수 있도록 AHP 분석을 수행하였다. 그림 3.10.12는 성능평가 수행절차를 나타낸 것이고, 그림 3.10.13은 평가항목 결정을 위한 계층구조를 나타낸 것이다.

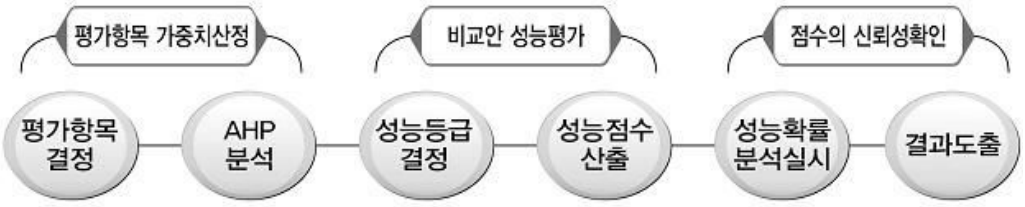


그림 3.10.12 성능평가 수행절차



그림 3.10.13 평가항목 결정을 위한 계층구조

표 3.10.21은 도출된 평가항목을 기준으로 AHP 분석 결과 매트릭스를 나타낸 것인데, 숏크리트 성능 개선에 필요한 항목 중 내구성이 24.2%로 가장 높은 가중치를 보였으며, 구조안정성, 경제성, 시공성의 순으로 높은 가중치를 보이고 있는 것으로 나타났다. 세부평가기준 분석결과 시공성의 부지활용 및 장비 진출입 용이성, 내구성의 입도 균질성이 각각 7% 이상의 가중치를 보여 가장 높은 세부평가 기준으로 판단되었다.

표 3.10.21 AHP 분석 결과 매트릭스

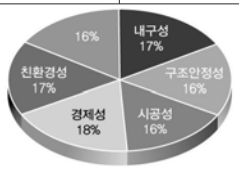
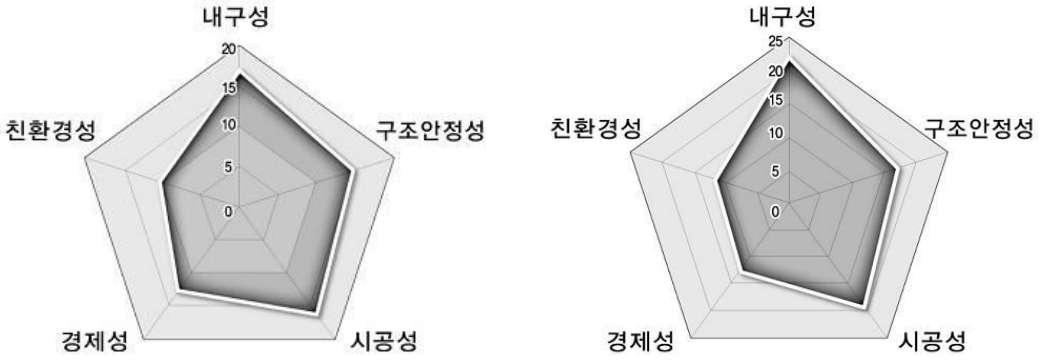
평가항목		내구성	구조안정성	시공성	경제성	친환경성	가중치
1	내구성	1.00	1.00	1.52	1.32	1.43	24.2
2	구조안정성		1.00	0.66	1.52	1.52	21.3
3	시공성			1.00	1.52	1.52	23.2
4	경제성				1.00	1.32	16.6
5	친환경성					1.00	14.6
λmax = 5.08, CR = 0.018							100.0

표 3.10.22와 그림 3.10.14는 성능분석 결과를 나타낸 것으로 레디믹스트 숏크리트가 기존 현장타설 숏크리트에 비해 전 항목에 걸쳐 우수한 것으로 나타났으며, 특히 내구성과 시공성 측면의 개선이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 골재 품질 향상을 통한 숏크리트 재료 자체의 품질개선과 현장 배치플랜트 설치 배제로 인한 시공 프로세스 감소가 가장 높은 기여를 하고 있는 것으로 판단된다.

표 3.10.22 성능분석 결과

Criteria	Weight(%)	Concept		Performance Rating										Total Performance
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
내구성	24%	i	현장타설	1	1	1	1	1	1	1	1			1.936
		ii	레디믹스	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.42
구조안정성	21%	i	현장타설	1	1	1	1	1	1	1	1			1.704
		ii	레디믹스	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1.917
시공성	23%	i	현장타설	1	1	1	1	1	1	1	1			1.856
		ii	레디믹스	1	1	1	1	1	1	1	1	1		2.088
경제성	17%	i	현장타설	1	1	1	1	1	1	1	1			1.328
		ii	레디믹스	1	1	1	1	1	1	1	1			1.328
친환경성	15%	i	현장타설	1	1	1	1	1	1	1	1			1.168
		ii	레디믹스	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1.314



(a) 현장배합 숏크리트 (b) 레디믹스트 숏크리트

그림 3.10.14 성능분석 결과

(나) 비용분석

VE 분석을 위한 비용분석은 원칙적으로 생애주기비용(LCC)를 기준으로 판단해야 하나, 숏크리트 공종의 개선으로 인한 전체 터널의 내구성 증진을 정량적으로 고려하는 것은 배제하고 공사비의 증감에 의한 비용으로 비용분석을 대체하였다.

그림 3.10.15는 비용분석 결과를 나타낸 것인데, 도로, 철도 및 지하철 터널의 공사비 분석결과와 유사하게 나타났다. 성능평가 결과는 각각의 터널 유형별로 동일한 것으로 가정하였고, 각각의 상대 LCC 결과를 비용분석 결과로 적용하였다. 그리고 공장생산 숏크리트 재료 및 시공개선으로 인한 품질향상 효과로 인해 실질적인 터널 내구수명 증가가 발생할 수 있으나, 이에 대한 고려는 성능분석에서 이미 고려된 것으로 판단된다.

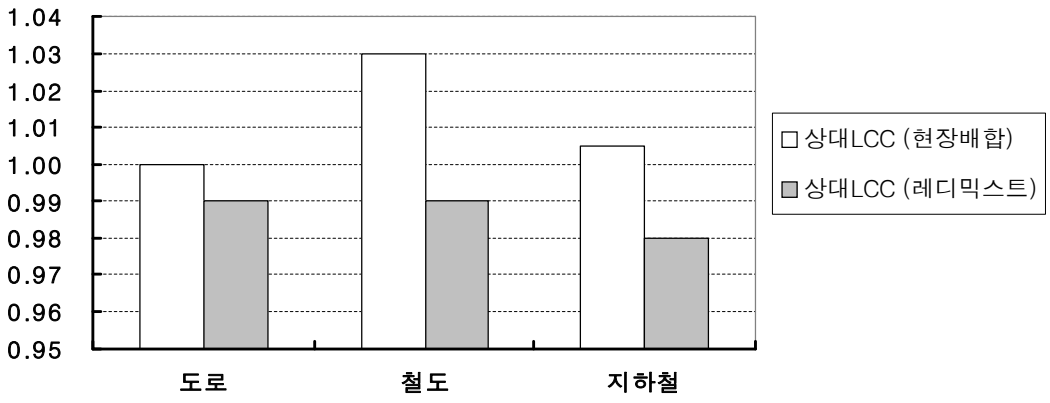


그림 3.10.15 비용분석 결과

(다) 가치분석

그림 3.10.16은 성능과 비용분석을 종합한 가치분석 결과를 나타낸 것인데, 레디믹스트 숏크리트가 현장배합 숏크리트에 비해 8~16% 정도의 가치향상을 보이는 것으로 나타났다.

레디믹스트 숏크리트는 기존 현장배합 숏크리트와 비용측면에서는 거의 동등하나 성능개선 효과가 우수한 성능강조형으로 판단된다. 공사비 분석에서 나타났듯이 현장 여건이 복잡한 철도, 지하철 터널에서는 비용 절감효과가 같이 나타나 가치혁신적인 측면도 보이고 있으며, 재료수급 여건이 개선되면 경제성의 개선효과가 커질 것으로 판단된다.

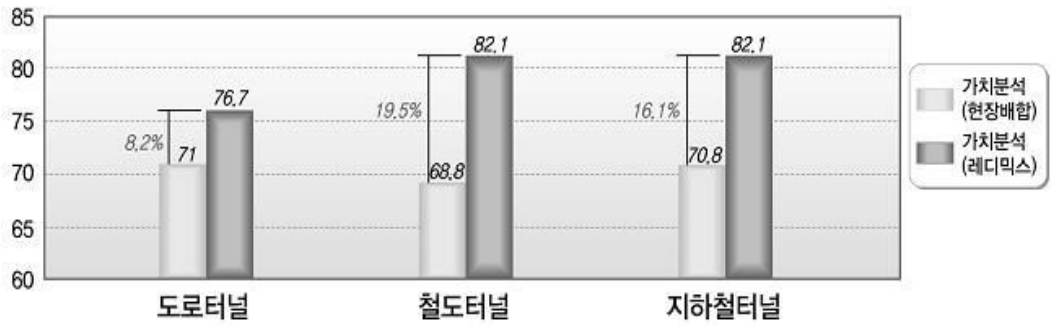


그림 3.10.16 가치분석 결과

3. 소결론

본 절에서는 레디믹스트 숏크리트의 시공성 및 경제성 평가를 위해 설계단가 비료를 통해 초기 경세성 평가를 실시하였다. 그리고 현장 배치플랜트 활용시와 일체형 사일로 믹서 활용시의 시공프로세스 분석을 실시하여 공정, 자원 및 부지활용에 대한 분석을 실시하였다. 또한, 최종 경제성 평가를 위해 터널 공사 유형에 따른 생산 및 운반 단위 공사비 분석을 실시하였고, 성능 및 비용을 통해 VE에 의한 가치평가를 실시하였다. 본 절에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 분말형 레디믹스트 숏크리트와 현장 배치플랜트 설계단가를 근거로 경제성 평가를 한 결과 본 연구개발중인 분말형 레디믹스트 숏크리트가 약 3만원/M^3정도 높게 산출되었다. 하지만, 현장타설 숏크리트는 골재 수급부족에 따른 골재품질저하(편장석률 증가, 토분함량증가 등) 및 현장 골재품질관리 부재로 인해 숏크리트의 주요 시공상 문제점이 지적되고 있다. 반면, 분말형 레디믹스트 숏크리트는 재료수급 안정화로 원활한 시공성 확보 및 고품질 숏크리트의 시공을 통한 시공원가 절감을 유도할 수 있으며(약 100억원/년 이상), 공장형 배합의 최적 입도선별 골재관리 및 자동화 혼합시스템에 의한 균질한 최적 제품혼합을 통해 최적의 품질을 확보할 수 있다고 판단된다.

(2) 레디믹스트 숏크리트는 재료가 공장생산을 통해 현장에 반입되기 때문에 현장 배치플랜트를 이용한 기존의 현장배합 숏크리트 타설공법에 비해 시공 프로세스의 단순화가 가능한 것으로 나타났고, 현장배합 단계가 생략되어 시공 단순화를 통한 시공성 향상이 가능한 것으로 나타났다. 그리고 공정관리 측면에서는 현장 배치플랜트 활용시 기존 대비 1 발파당 사이클 타임이 10분 단축이 가능하고, 일체형 사일로 믹서 활용시 장비 가동시간과 리바운드량 감소로 인해 기존 대비 최대 15분 단축이 가능한 것으로 나타났다. 또한, 일체형 사일로 믹서 장비를 활용할 경우 배치플랜트 운영에 따른 불필요한 인력 및 자원투입의 배제로 경제적인 시공이 가능한 것으로 나타났다.

(3) 공사 유형별로 숏크리트 1㎥당 단가를 비교하였을 경우 현장배합 방식에 비해 레디믹스트 방식이 공사 유형별로 편차는 있지만 3%~4% 정도 공사비 단가가 절감되는 것으로 나타났는데, 도로와 같이 현장 시공여건과 재료 수급여건이 양호한 현장보다는 지하철 및 철도와 같이 작업구 개설여건이 어려운 현장에서 간접비의 절감 효과가 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 특히, 도심지 지하철 공사의 경우 작업구 개설범위가 한정적이고 자재 야적장 등 부지활용이 제한적이기 때문에, 공장생산에 의한 레디믹스트 숏크리트의 적용은 실질적인 공간 활용성과 간접비 절감 효과가 더욱 크게 나타날 것으로 판단된다.

(4) 향후 본 제품이 시장에서 활성화 될 경우 숏크리트 재료비 및 변동비가 인하될 것으로 판단되고, 공장 거점의 증대로 레디믹스트 숏크리트의 운반거리를 감소시킬 경우 공사원가의 절감이 더욱 클 것으로 판단된다. 또한, 전용 장비(일체형 사일로 믹서)의 개발과 실용화가 이루어 질 경우 인력투입 및 작업시간의 감소로 인한 간접비의 추가적인 절감이 가능할 것으로 판단된다.

(5) 도로, 철도 및 지하철 터널의 공사비를 사례를 통해 분석한 결과 현장 노무인력 및 공사기간 단축으로 간접비의 경우 도로 터널에서는 약 2.4%, 철도 터널에서는 약 23%, 지하철 터널에서는 약 24% 정도 감소하는 것으로 나타났고, 전체공사비의 경우에는 도로 터널에서는 약 0.42%, 철도 터널에서는 약 3%, 지하철 터널에서는 약 2.6% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 조골재(8mm), 변동비(건조) 등 비용증가 요인이 있으나 리바운드량 감소에 의한 수량감소, 간이 배치플랜트(다수 개소) 미설치 등 직접공사비의 절감과 간접비의 감소로 전체공사비가 감소한 것으로 판단된다.

(6) 성능분석 결과 숏크리트 성능 개선에 필요한 항목 중 내구성이 24.2%로 가장 높은 가중치를 보였으며, 구조안정성, 경제성, 시공성의 순으로 높은 가중치를 보이고 있는 것으로 나타났다. 또한, 레디믹스트 숏크리트가 기존 현장타설 숏크리트에 비해 전 항목에 걸쳐 우수한 것으로 나타났는데, 내구성과 시공성 측면의 개선이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 골재 품질 향상을 통한 숏크리트 재료 자체의 품질개선과 현장 배치플랜트 설치 배제로 인한 시공 프로세스 감소가 가장 높은 기여를 하고 있는 것으로 판단된다.

(7) 성능 및 비용분석을 종합한 가치분석 결과 레디믹스트 숏크리트가 현장배합 숏크리트에 비해 8~16% 정도의 가치향상을 보이는 것으로 나타났다. 레디믹스트 숏크리트는 기존 현장배합 숏크리트와 비용측면에서는 거의 동등하나 성능개선 효과가 우수한 성능강조형으로 판단된다. 또한, 공사비 분석에서 나타났듯이 현장 여건이 복잡한 철도, 지하철 터널에서는 비용 절감효과가 같이 나타나 가치혁신적인 측면도 보이고 있으며, 재료수급 여건이 개선되면 경제성의 개선효과가 커질 것으로 판단된다.

제 11 절 숏크리트 타설시험기 개발

1. 숏크리트 타설시험기 개발

가. 타설시험기 개발 착안점

본 연구의 1차년도 연구개발에서는 차후년도 연구수행에 있어 연속적이고 효과적인 연구개발이 될 수 있도록 장기적인 관점의 연구내용을 결정하였다.

먼저 현장에서 이루어지는 숏크리트 타설 실험의 한계를 극복하고 보다 정량적이고 체계적인 데이터 축적을 위해 실내 숏크리트 타설시험기를 개발하고자 하였다. 일반적으로 숏크리트 현장타설 실험은 장소 섭외, 타설용 몰드 설치 및 철수, 공시체의 코어 채취, 현장 타설장비의 임차, 타설용 몰드의 운반 등 실험 수행에 있어 해결해야할 제한 조건이 많이 있다. 따라서 현장 타설실험을 한번 수행하기 위해서는 적지 않은 연구비의 지출뿐만 아니라 실험 수행, 데이터의 획득, 현장 지원 등의 해결을 위해 많은 시간이 소요되고, 실험 결과에 있어서도 정확한 결과를 얻기가 매우 힘들다. 특히, 숏크리트 타설실험은 수행해 본 연구자들이 모두 입을 모아 말하듯이 변수가 매우 많고, 결과에 미치는 여러 가지 요인들 때문에 같은 실험을 실시하여도 동일한 결과를 얻는 것조차 힘들다.

실내에서 이루어지는 숏크리트 관련 실험들은 기본적인 물성에 관련된 것들이 대부분인데, 실내에서는 숏크리트의 고유 특성이라고 할 수 있는 뿜어 붙이기 작업을 현실적으로 실시할 수 없기 때문에 숏크리트 재료의 특성을 대표한 결과라고 말하기가 어렵다. 비록 급결제를 혼합하여 숏크리트의 급결성이나 초기 재령에서의 강도 특성들을 측정하지만, 현장에서 뿜어 붙이는 결과와 실내에서 단순히 비빔을 통해 몰드에 타설하는 것과는 엄연한 차이가 있게 된다.

본 연구에서는 현장 타설실험의 한계와 제약 조건들을 효과적으로 개선하고, 실내 실험에서도 현장과 같은 실제적인 타설 공정을 표현할 수 있는 숏크리트 타설시험기를 개발하고자 한다. 먼저 1차년도 연구에서는 국내외에서 운용되고 있는 숏크리트 장비에 대한 조사를 실시하여 타설시험기 제작에 있어 착안점을 찾고자 하였고, 숏크리트 타설시험기의 기본적인 설계 및 도면 작성을 수행하였다.

(1) 숏크리트 타설시험기 제작 검토사항

(가) 제작의 필요성 및 목적

○ 현장타설 실험시 현장여건 및 공정에 맞추어 적절한 시점에 실험을 실시해야 되므로 비용과 시간의 문제가 발생

○ 주로 현장 배치 플랜트 및 현장타설 숏크리트 장비를 이용해야 하며, 일정한 조건이 아닌 현장여건에 따라 변화하는 상태에서 실험이 진행되므로, 시험결과의 일관성이 없고 상호비교가 어려움

○ 숏크리트의 물성 및 성능을 올바로 평가하기 위해서는 균일한 재료에 따른 신뢰성 있는 실험이 필요하며, 현재와 같은 현장의 기후상황, 일정하지 않은 골재종류의 사용, 숏크리트 타설기사의 숙련도 등에 따라 실험결과가 달라지는 문제 발생

○ 따라서, 간편하면서도 작업효율 및 신뢰성을 높일 수 있는 시험용 숏크리트 타설장비의 제작을 통해 숏크리트 품질평가의 올바른 방향을 제시하고, 변화되는 재료의 신속한 적용을 통해 현장의 문제점을 해결하고자 함

(나) 제작시 착안점

① 급결제 관련

표 3.11.1 급결제 착안점

항 목	검 토 내 용
주 입 량	-급결제의 주입량이 단위 시멘트당 얼마인지를 계량 할 수 있어야 함 -급결제의 주입량이 조절 가능해야 함
시험종류	-급결제의 종류는 4종류(실리케이트계, 알루미네이트계, 알카리프리계, 기타)이상의 것을 투입하기 위해, 보관용기는 최소 4개 이상이어야 함
주입방식	-실험시 급결제의 종류 변경은 각 용기에서 공급될 수 있도록 각각의 밸브를 사용해야 함 -용기는 밀폐가 잘 되어 있어야 함
기 타	-실험 후 청소가 용이하도록 설계되어야 함

② 숏크리트 건(GUN) 및 장비

표 3.11.2 숏크리트 건 및 장비 착안점

항 목	검 토 내 용
타설용 건	-타설압력이 현장여건과 동일해야 함 -상하 및 좌우조절 가능 및 타설각도 조절이 가능해야 함 -가능한한 일정한 압력과 표준적인 방법을 통해 몰드 제작시 신뢰성을 높여야 함 -토출압과 토출양이 현장여건과 동일해야 함
이 송 관	-실험 중 이송관이 막혔을 때 내용물을 빼낼 수 있도록 중간부분의 관 분리영역 설치 -강섬유 및 굵은 골재로 인한 손상을 최소화하기 위해 이송관의 재질에 대한 내구성 검토 -청소가 용이해야 함
기 타	-실험 후 청소가 용이하도록 설계되어야 함 -제반여건은 현장 타설기와 동일 -숏크리트 타설시험기 전용 몰드 제작

③ 시험용 숏크리트 타설 장비의 활용방안 및 기대효과

○ 현장 여건에 상관없이 실험실 내에서 실험 가능

○ 시멘트, 골재, 급결제, 혼화재 등에 대한 다양한 실험 가능

○ 각종 투입되는 재료에 대한 물성변화에 대한 고신뢰성 평가 가능

○ 각종 혼화재의 투입을 통한 숏크리트의 물성변화 평가 가능

나. 국내외 숏크리트 타설장비 현황 조사

국내에서는 아직까지 실내에서 현장과 같은 조건의 타설실험이 가능한 시험기는 없는 것으로 조사되었는데, 새로운 타설시험기를 제작하기 위해서는 기존에 운용되고 있는 숏크리트 타설장비의 특성을 파악하고 활용 가능한 부분에 대해 조사할 필요가 있다고 판단되었다. 다음은 국내에서 운용되고 있는 숏크리트 타설장비에 대한 조사한 내용이다.

(1) ARM AMV 7450

○ 특징 : 붐은 회전 베어링이 달린 회전 프레임에 고정되어 있고 유압 모터에 의해 회전 되며 285도 회전이 가능하다. 메인 붐은 2미터까지 확장 되는 텔레스코프식 이며, 조종실은 285도 회전이 가능하고 회전 베어링이 달린 메인 붐의 박스 안에 탑재 되어 있다. 조종실은 조종실 지붕에 고정 된 실린더로 기울임이 가능하고, 공기 정화 및 냉난방 장치가 설치되어 있다. 높은 숏크리트 타설 능력을 가지고 있으며, 낮은 리바운율, 뛰어난 기동성을 가지고 있으며, 17m까지 분사가 가능하고 양 옆으로 13m 까지 닿을 수 있다.

○ 콘크리트 펌프 : AMV / PM 702 , 최대출력 20㎥/h, 50 bar

○ 유압 시스템 : 기본 유압 시스템은 두 개의 전기식 파워 팩과 한 개의 p.t.o.식 펌프, 오일탱크, 오일쿨러, 모든 필요한 필터, 표시 및 경보 장치로 구성 되어 있다.

○ 압축장치 : Kaeser CS 121 660V / 50Hz

○ 가속장치 추가 시스템 : AMV AUTO-ADD 시스템은 정확한 가속장치 추가와 소모량 기록을 위해 컴퓨터로 제어되며, 가속장치 탱크의 용량은 1300L이다

○ 전기 시스템 : 유압식 케이블 릴과 트레일링 케이블. 공급 전압 400v에서 1000v까지 선택 가능

○ 선택 품목 : 분사식 Cure와 프로텍티브 오일 시스템, 무선 조종 원격 제어 시스템, 로봇의 외부 동력 공급과 별도의작동을 가능토록 하는 P.T.O.식 발전기



그림 3.11.1 ARM AMV 7450 모습

(2) JSP 840 [Putzmeister]

○ 특징 : 디젤엔진을 사용하고 전유압식 4륜구동이며 16도의 등판각도를 가진다.

○ 콘크리트 펌프 : 토출량 : 18㎥/h, 토출압력 : 75Bar, 호퍼 용량 : 0.3㎥

○ 스프레이 암(SA8) : 11.5m 수직높이의 2단 암으로 1단 암은 유압으로 구동되는 스윙랙 장치에 의해 270도 회전이 가능하다. 상승 및 하강은 +78°/-55° 작동되며 내부유압 실린더에 의해 3,100mm까지 텔레스코픽의 작동이 가능하다.

○ 급결제 펌프 : 급결제와 시멘트간의 비율 설정 후 콘크리트 토출량의 변동량과 무관하게 일정하게 유지되므로 균질한 숏크리트 작업이 가능하다.

○ 적용 현황 : 영동선 철도현장 2공구



그림 3.11.2 JSP 840

(3) SPRAYMEC 9140 [Normet]

○ 스프레이붐 : 379도 회전 바스켓과 텔레스코픽 스프레이 붐이 설치되어 있다.

○ 콘크리트 펌프 : 토출량은 4~33㎥/h이며, 지름 180mm의 펌핑 실린더와 대형 흡입구로 흡입이 용이하다. 토출압력은 최저 65 bar(낮은 슬럼프와 16mm 골재의 콘크리트 타설가능)이다.

○ 급결제 펌프 : 콘크리트 펌프 토출량에 따라 급결제양이 시간당 0~600ℓ로 일정하게 유지된다.



그림 3.11.3 SPRAYMEC 9140

(4) SSM20PLUS

○ 특징 : 국내 최초 PLC 제어장치를 적용하였고, 국내 최대 용량의 펌핑 능력을 가지고 있으며 최단시간 분사기능의 스피드 붐 타입 적용하였다. 터널 내 우수한 작업 능력을 가지고 있다.

○ 제원 : 타설량 29 ㎥/h, 붐 길이 14.5m, 무게 13.5ton, 전장 8.3m





그림 3.11.4 SSM20PLUS의 액상타입 및 분말타입

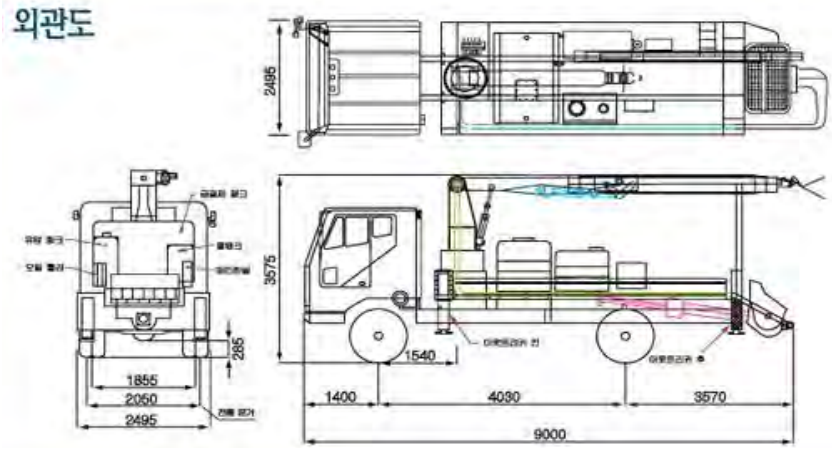


그림 3.11.5 SSM20PLUS 외관도

(5) AL 500 [ALIVA]

○ 콘크리트 스프레이 펌프 : 토출량 4~23㎥/h, 토출압력 70bar

○ Telescope spraying arm : 4.5~17.5m의 수직높이이며 상단암은 240도 회전



그림 3.11.6 AL 500

(6) PAS 307 D/E6

○ 최대토출량 30cum/h, 최대압력 65.57 bar

○ 펌핑 실린더 지름 176mm, 펌핑 실린더 스트로크 1,000mm

○ 싸이클 최대수치 21/27, 호퍼 용량 300ℓ, 화학첨가제 탱크용량 1,100ℓ

○ 물탱크 용량 450ℓ, 동력 52kW



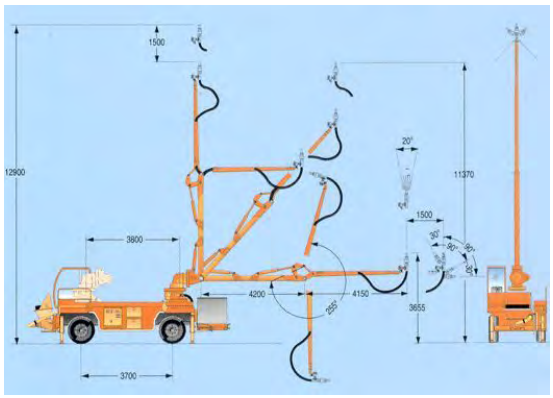


그림 3.11.7 PAS 307 D/E6 모습과 작업반경도

다. 숏크리트 타설시험기 기본설계

1차년도 연구에서는 타설시험기의 기본설계를 실시하였고 2차년도 연구에서 제작을 완료 하였다. 설계 완료된 타설시험기의 세부 장치와 제작 계획 내용은 다음과 같다.

(1) 콘크리트 펌프 성능 설계

콘크리트의 토출량과 압력은 드라이브 실린더의 호스 배관에 의해 사용목적에 따라 두 가지로 나눌 수 있는데, 메인 펌프로부터 토출된 유압호스를 롯드 측에 연결하는 방법과 피스톤 헤드측에 연결하는 방법이다. 일반적으로 작업조건에 따라 선택을 하게 되나 본 연구개발에서는 롯드측 연결방법을 채택하였다.

(가) 유량메인 펌프 토출량 설계

$$V_{\min} = W_{rev} \times N$$
$$= 119cc/rev \times 2,700rev/\min \times 2EA$$
$$= 642,600cc/\min$$

여기서, V_{rev}(펌프 1회전 토출량): 119 cc/rev

N (펌프회전수) : 2,700 rev/min

(나) 스트록크당 콘크리트 토출량 설계

$$Vdel = \frac{\pi}{4} D_2^2 \times L$$

$$= \frac{\pi}{4}(0.23)^2 \times 2.1$$

$$= 0.0872 m^3/st$$

여기서, D_2 (콘크리트 실린더 직경) : 230mm

L (행정거리) : 2100 mm

(다) 콘크리트 토출량 및 압력 설계

○ 유압실린더 체적

$$Vdri = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - d_1^2) \times L_1$$

$$= \frac{\pi}{4}(14^2 - 8^2) \times 210$$

$$= 21760.2cc$$

여기서, D_1(유압실린더 직경) : $140mm$

d_1(롯드직경) : $80mm$

L_1(행정거리) : $2,100mm$

○ 스트록크 수 (분당)

$$Smin = Vmin \div Vdri$$

$$= 642,600cc \div 21,760cc$$

$$= 29.5(회)$$

○ 시간당 토출량

$$Vhr = Vdel \times Smin \times 60\,\mathrm{min}/hr \times \eta \qquad \eta(\text{효율}) : 0.85$$

$$= 0.087 m^3/stx 29.5 st/\,\mathrm{min} \times 60\,\mathrm{min}/hr \times 0.85$$

$$= 154.3(\text{이론치}) \times 0.85 = 131.2 = 130 m^3/hr$$

○ 토출압력

$$Pc = \frac{F}{4}\eta$$

$$= \frac{\frac{\pi}{4}(D_1^2 - d_1^2) \times Pmax}{\frac{\pi}{4} D_2^2} \cdot \eta$$

$$= \frac{\frac{\pi}{4}(14^2 - 8^2) \times 320}{\frac{\pi}{4}(23)^2} \cdot 0.85$$

$$= 79.8 kg/cm^2(\text{이론치}) \times 0.85 = 68 kg/cm^2$$

여기서, Pmax (펌프최대 압력) : 320 kg/cm^2

(2) 세부 장치 설계

(가) 동력인출 및 유체발생장치

○ 제원

NO	품 명	제 원
1	P.T.O	최대 토오크 기어비 : 1 : 1.49
2	MAIN PUMP	Q : 119 cc/rev P : 400 bar
3	보조펌프	Q : 13 cc/rev P : 250 bar
4	기어펌프	Q : 45 cc/rev P : 320 bar

○ 형상

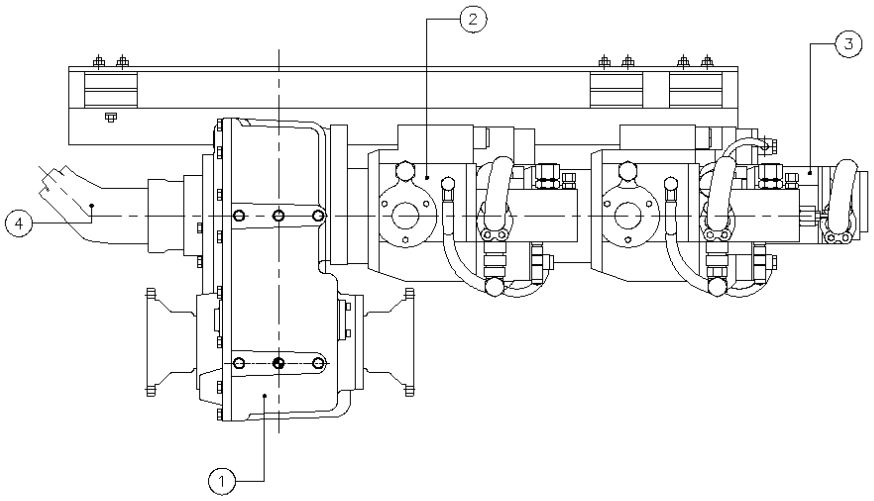


그림 3.11.8 동력인출 및 유체발생장치 설계도면

(나) 콘크리트 펌프장치

○ 제원

NO	품 명	제 원
1	콘크리트 실린더	∅230 × 2100
2	워터박스	381 × 600 × 300

○ 형상

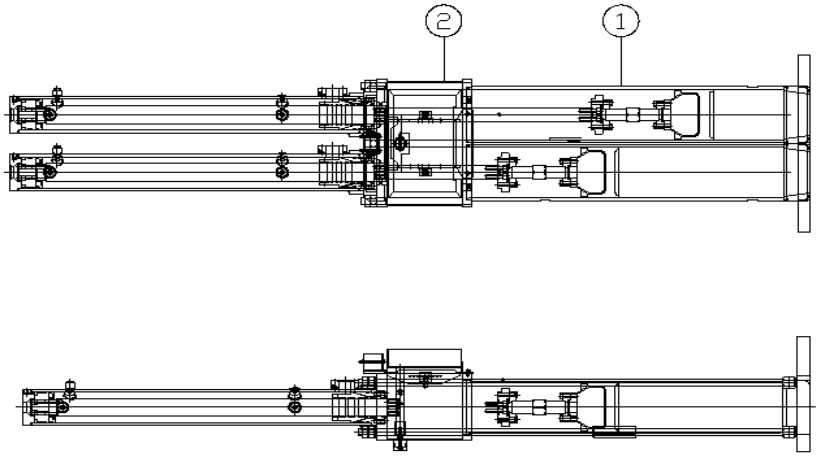


그림 3.11.9 콘크리트 펌프장치 설계도면

(다) 호퍼 및 에스밸브 절환장치

○ 제원

NO	품 명	제 원
1	호퍼	720 × 1280 × 600L
2	절환실린더	∅ 80 × 160

○ 형상

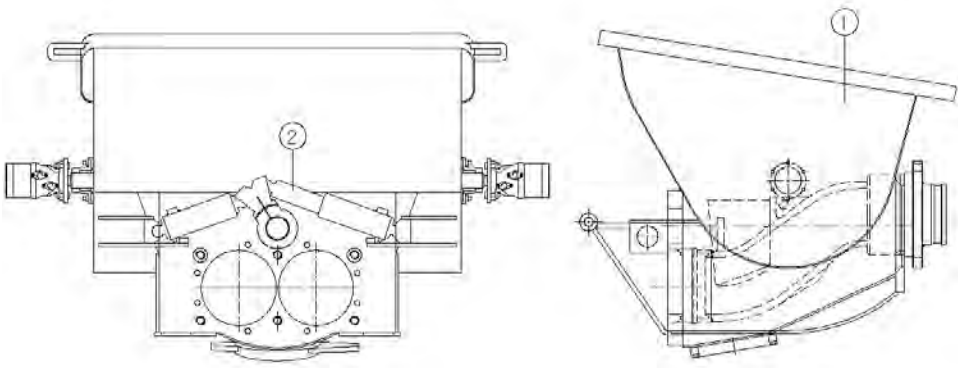


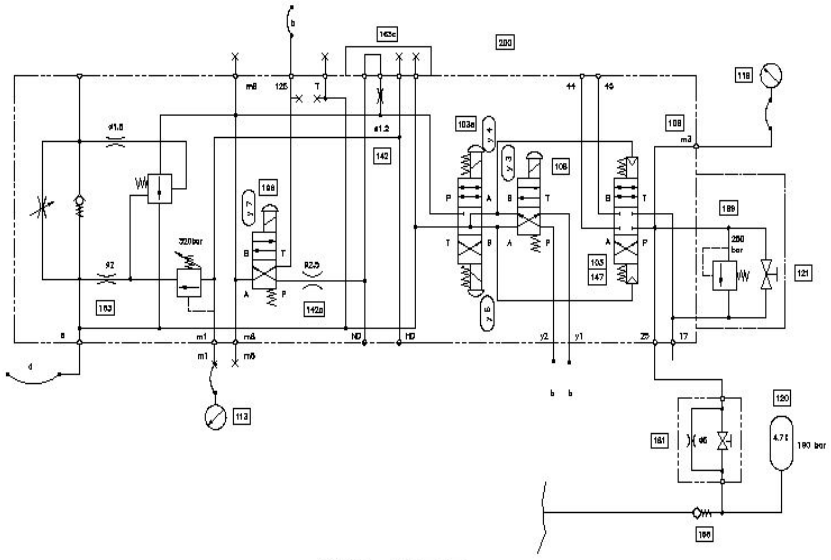
그림 3.11.10 호퍼 및 에스밸브 절환장치 설계도면

(라) 유압 컨트롤 블록

○ 제원

NO	제 원
1	3/4 웨이밸브 NG 10
2	2/4 웨이밸브 NG 6
3	2/4 웨이밸브 NG 6
4	애머젠시 밸브

○ 형상



유압 회로도

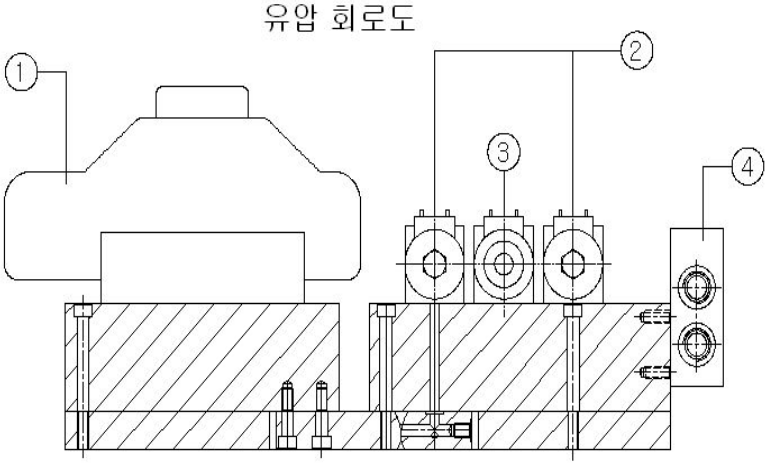


그림 3.11.11 유압 컨트롤 블록 설계도면

표 3.11.3 숏크리트 타설시험기 세부장치에 대한 설계 내용

순 서	항 목		제 원
동력인출	기 어 물 림		상시 물림식
	기 어 비		1 : 1.5
	절 환		에어실린더 호크 허브 절환
	주 펌 프	형 식	피스톤 가변식
		용 량	119cc / rev × 2
		최대 발생 압력	420kg/㎠
		안전 밸브 형식	400kg/㎠
		피드 펌프	25cc/rev
		제작 회사	사우어 덴포스 다이킨 (독)
	보조펌프1	형 식	피스톤 가변식
		용 량	13cc/rev
		상용 압력	190kg/㎠
		최대 발생 압력	250kg/㎠
		제작 회사	보쉬 렉스로스 (독)
	보조펌프2	형 식	피스톤 가변식
		용 량	45cc/rev
		최대 발생 압력	320kg/㎠
		제작 회사	가와사키 (일)
펌핑장치	회 로	기 본	폐쇄회로
		적 용	분리회로
	유체실린더	형 식	피스톤식 병렬
		실린더 직경	∅140×2100
		실린더 수	2
		스트록크 조정	체크 병렬
	콘크리트	형 식	피스톤식 병렬
		실린더 직경	∅230mm
		실린더 행정	2100mm
		피스톤	NBR RUBBER
	실린더	윤활	자동 오일 주입

표 3.11.3 숏크리트 타설시험기 세부장치에 대한 설계 내용(계속)

순 서	항 목		제 원
펌핑장치	S-밸브 실린더	형 식	단동식
		실린더 × 행정	∅80× 160mm
		실린더 수	2
		피스톤 링	부직포4겹
	오일탱크	용량	500L
		휠터	130 L/MIN×3EA
		포아사이즈	10μ
		오일규격	ISO VG 46
	방향전환 밸브	“주” 유체실린더	4 / 3 WAY VALVE
		“S" 밸브실린더	4 / 3 WAY VALVE
		주 펌프콘트롤	4 / 2 WAY VALVE
		백 펌프콘트롤	4 / 2 WAY VALVE
	안전 밸브	아지테이터	4 / 3 WAY VALVE
		물펌프 모터 콘트롤	4 / 3 WAY VALVE
		주펌프	400kg/㎠
		주밸브	24kg/㎠, 350kg/㎠
	안전 밸브	피이드펌프	30kg/㎠
		어큐뮬레이터	1차:190kg/㎠, 2차250kg/㎠
		아지테이터	180kg/㎠
		콤프레셔모터	180kg/㎠
	아지테이터	아웃트리거	180kg/㎠
		감속기형식	유량비례식
		감속비	29 : 7 : 1
		구동식	유체모터
	어큐뮬 레이터	브레이드	오거
		매 체	질소
		압 력	90kg/㎠
		용 량	4L
		형 식	브레더식
	기 타	적용 수송 관경	125 MM
		최대 골재 크기	31.5 MM
		수송 가능 슬럼프	80~250 MM

2. 숏크리트 타설시험기 제작

일반적으로 국내에서 수행되고 있는 숏크리트 현장타설실험은 기본적으로 해결해야할 제한 조건이 다양하다.

첫째, 현장타설실험시 현장 여건 및 공정에 맞추어 적절한 시점에 실험을 실시해야 되므로 비용과 시간의 문제가 발생하고, 주로 현장 배치플랜트 및 현장타설 숏크리트 장비를 이용해야 하며, 일정한 조건이 아닌 현장여건에 따라 변화하는 상태에서 실험이 진행되므로, 시험결과의 일관성이 없고 상호비교 자체가 어려운 실정이다.

둘째, 숏크리트의 물성 및 성능을 올바로 평가하기 위해서는 균일한 재료에 따른 신뢰성 있는 실험이 필요하며, 현재와 같은 현장의 기후상황, 일정하지 않은 골재종류의 사용, 숏크리트 타설기사의 숙련도 등에 따라 실험결과가 달라지는 변수가 많아져 신뢰도 높은 결과값을 도출하기에 무리가 있다.

이와 같은 제한 조건 및 현장타설실험의 한계를 효과적으로 개선하고, 간편하면서도 작업효율 및 신뢰성을 높일 수 있는 대안으로 본 연구개발에서는 숏크리트 타설시험기 제작을 통해 숏크리트 품질평가의 올바른 방향을 제시하고, 변화되는 재료의 신속한 적용을 통해 현장의 문제점을 해결하고자 하였다. 1차년도 연구개발에서 최종 설계 도면을 완성하였고 2차년도 연구개발에서는 숏크리트 타설시험기의 시제품 제작을 실시하고 기본적인 성능 시험을 실시하였다.

가. 숏크리트 타설시험기 NCPT-10

본 연구개발에서 제작한 숏크리트 타설시험기 NCPT-10의 세부 장치 및 특성은 다음과 같다.

(1) 숏크리트 타설시험기 NCPT-10 제원

그림 3.11.12는 숏크리트 타설시험기 NCPT-10의 제작 도면을 나타낸 것이고, 표 3.11.4는 타설시험기의 기존 제원을 나타낸 것이다. 다양한 건설 토목 터널 공사에서 마감제 또는 모르타르, 숏크리트, 콘크리트 등의 타설 작업용으로서 다양한 작업

환경에서 작업이 용이하고, 유압 피스톤 방식으로 고압 이송 가능 및 다양한 입자 크기의 타설이 가능하도록 제작하였다.

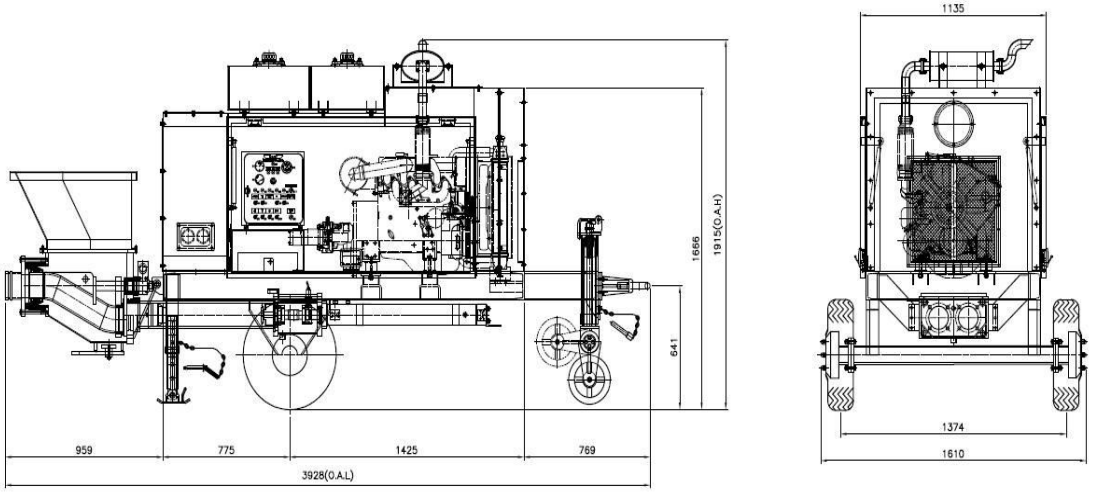


그림 3.11.12 숏크리트 타설시험기 NCPT-10의 제작 도면

표 3.11.4 숏크리트 타설시험기 NCPT-10의 기본 제원

NO	항목	내용	단위	규격	비고
1	MAIN PUMP	PUMP 용량	cc/rev	28	
		PUMP 최대압력	kg/cm²	290	
2	DRIVE CYLINDER	DRIVE CYL.내경	mm	ø80	
		DRIVE CYL.ROD경	mm	ø50	
		DRIVE CYL.길이	mm	700	
3	콘크리트 실린더	CYL. 내경	mm	120	
4	ROD SIDE	STROKE수	회/min	18	
		최대콘크리트 압력	kg/cm²	45	
		이론 토출량	㎥/hr	9	
5	PISTON SIDE	STROKE수	회/min	11	
		최대 콘크리트 압력	kg/cm²	75	
		이론 토출량	m3/hr	5	
6	압송거리 (ROD,SIDE)	수평 압송거리	m	250	
		수직 압송거리	m	90	
7	압송거리 (PISTON SIDE)	수평압송거리	m	480	
		수직 압송거리	m	150	
8	ENGINE	엔진 마력	PS	45	D4BB 현대
		엔진 회전수	R.P.M	1800	

(2) 유압조정시스템(OPEN SYSTEM)

숏크리트 장비에 적합한 Open Hydraulic system을 적용하였고, 토출량 조절용 Proportional v/v를 적용하여 펌핑시 속도를 제어할 수 있다. 유압을 이용한 Piston pump 방식과 S-v/v를 적용하여 끊김이 없는 연속 동작이 가능하며, 작동유의 온도 상승이 낮으며, 소모량이 적은게 특징이다.

(3) 콘크리트 실린더 및 유압실린더

콘크리트 실린더는 행정 700mm, 직경120mm 로 제작되어 숏크리트 장비에 적합하게 설계 하였으며,실린더 내부는 정밀 가공 후 크롬 도금하여 기능 및 내구성이 우수하도록 제작하였다.

(4) 변환밸브

밸브는 S밸브 형식이며, 흡입구(ø 120)에서 배출구(ø 120/5)로 직경감소율이 적고 완만한 굴곡을 유지하였기 때문에 압력손실이 적고 골재가커도 비교적 펌핑이 원활하도록 제작하였다. 또한, 밸브내의 콘크리트 편심 잔량이 적어 밸브의 전환이 빠르며 콘크리트의 파동이 적고 왕복운동이 정확하게 유지되어 콘크리트의 배출이 일정하고 작업성이 우수하도록 제작하였다.

S밸브 내의 전체 길이에서 일정하게 관 직경이 감소되므로 밸브 내 전 접촉 부위에서 골고루 마모되며, 내마모성 특수 주강으로 제작되어 내구성이 우수하며, S밸브와 마모 판 사이에 의해 생기는 간격을 자동으로 막아 주어 압송효율을 높여주는 오토매틱 링이 설치되어 있다. 그림 3.11.13은 NCPT-10의 장치 구성도를 나타낸 것이다.

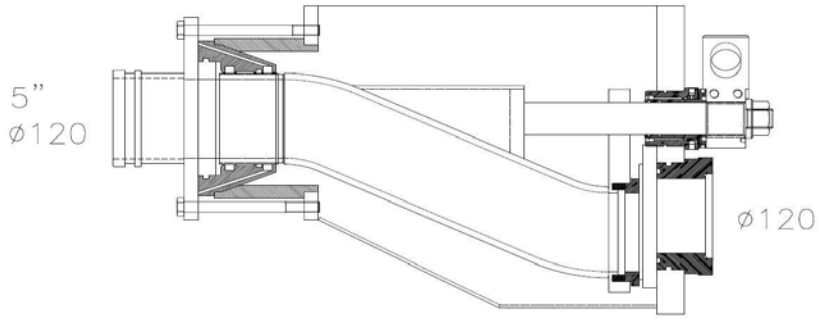


그림 3.11.13 NCPT-10 장치구성도

(5) 펌프 시스템 원리

장비 펌프는 엔진에 의해서 구동되며 중앙제어 장치인 CONTROL PANEL에서 작동시킬 수 있으며 출력은 요구 되는대로 임의 조정이 가능하도록 제작하였다.

그림 3.11.14는 NCPT-10의 펌프시스템을 나타낸 것이다. 피스톤(7)이 화살표 방향으로 진행하면서 호퍼(1)에 담겨진 콘크리트를 딜리버리 실린더에 있는 콘크리트를 S-밸브(2)를 통하여 압송관으로 밀어낸다. 피스톤(7)이 실린더 끝 지점에 이르면 자동적으로 움직이는 방향이 바뀌고(화살표 반대방향) S-밸브(2)도 피스톤(7)쪽으로 움직여 피스톤(7)이 밀어내는 콘크리트가 압송관으로 들어가게 된다. 이렇게 두 개의 실린더가 밀고 당기는 작동을 반복하면 호퍼(1)에 있는 콘크리트를 펌핑하게 되며, 앞에 설명된 피스톤 (7)이 진행 방향을 바꾸어 주면 압송관 내에 있는 콘크리트가 호퍼(1)로 되돌려지는데 이것을 역펌핑이라 한다. 역펌핑은 압송관을 세척할 때 또는 막힘 현상이 발생했을 때 작동시키도록 제작하였다.

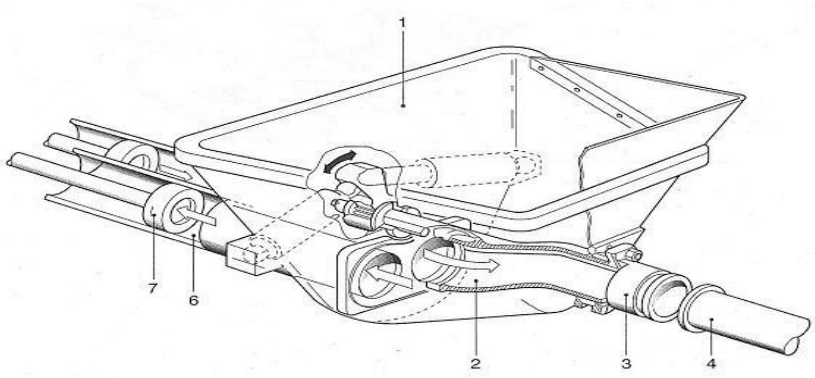


그림 3.11.14 NCPT-10 펌프시스템

나. 숏크리트 타설시험기 NCPT-10의 장비 구성

숏크리트 타설시험기 NCPT-10은 크게 12가지의 장비로 구성되며, 기능 및 설명은 다음과 같다.

(1) 호퍼

그림 3.11.15는 숏크리트 타설시험기 NCPT-10 호퍼 모습인데, 제조된 모르타르 또는 숏크리트를 저장 및 토출하기 위한 저장소이다. 용량은 약 0.3m³ 이며 고압토출을 위한 특수강판으로 이루어져 있다. 또한, 형상을 완만한 라운드 형상으로 개선하여 흡입율을 높여주고 작업 후 잔류량 제거가 쉽도록 제작하였다.

(2) 교반장치

그림 3.11.16은 숏크리트 타설시험기 NCPT-10의 교반장치 모습이다. 교반장치는 두개의 교반형 날개를 장착하여 흡입 효율을 높여주는 구조로 되어있으며, 우측에 독립된 유압모터로 구동시키기 때문에 강력한 교반작업을 가능하도록 제작하였다.



그림 3.11.15 호퍼



그림 3.11.16 교반장치

(3) 펌프 시스템 및 동력 엔진

그림 3.11.17은 NCPT-10의 펌프시스템의 모습이다. Rexroth社의 고압력 고효율 펌프인 Piston pump 적용으로 작업 효율을 극대화하였다. 그림 3.11.18은 NCPT-10의의 동력부분인데 현장 접근성을 용이하게 하기 위하여 디젤 엔진을 적용하였으며 45ps/1800RPM의 강력한 출력으로 작업 효율을 극대화시켰다.



그림 3.11.17 펌프 시스템



그림 3.11.18 동력 엔진

(4) 워터 펌프 및 급결제 펌프

그림 3.11.19는 워터 펌프의 모습인데 작업 종료 후 잔여 숏크리트의 제거 및 장비 청소를 위해 고압의 물 펌프를 장착하였으며, 그림 3.11.20은 급결제 펌프로서 알칼리성 뿐만 아니라 강산성의 급결제 종류도 사용 가능하도록 스테인레스 스틸을 적용하여 부식저항에 우수하도록 제작하였다. 그리고 급결제의 정량 공급 조절이 가능하도록 모노 펌프를 장착하였다.



그림 3.11.19 워터 펌프



그림 3.11.20 급결제 펌프

(5) 플로우 메터 및 분사장치

그림 3.11.21은 플로우 메터의 모습인데 급결제 펌프를 통해서 나가는 급결제의 정확한 측정을 위해 설치하였으며, 그림 3.11.22는 분사장치로서 2.5″의 고압 호스에 연결된 분사 장치는 충분한 크기로 인해 굵은 입자의 분사가 가능하며, 거치대에 거치하여 사용하므로 작업 효율을 극대화 하고 작업자의 안전사고를 방지할 수 있게 하였다.



그림 3.11.21 플로우 메터



그림 3.11.22 분사장치(노즐)

(6) 물 탱크 및 급결제 탱크

그림 3.11.23은 물 탱크의 모습인데 부식 방지를 위해 스테인레스 스틸 구조로 제작되었고, 청소 작업에 충분한 용량(120L)으로 제작하였다. 그림 3.11.24는 급결제 탱크로서 다양한 종류의 급결제를 테스트하기 위해 부식에 강한 스테인레스 스틸구조로 35L 용량의 탱크를 3개 설치하였다.



그림 3.11.23 물 탱크



그림 3.11.24 급결제 탱크

(7) 구동형식 및 아웃 트리거

그림 3.11.25는 구동형식으로서 현장 접근성을 용이 하도록 트레일러 타입으로 제작 하였으며, 그림 3.11.26은 아웃 트리거 적용으로 작업시 장비의 진동 및 흔들림을 최소화 하도록 제작하였다.



그림 3.11.25 구동형식



그림 3.11.26 아웃 트리거

그림 3.11.27은 본 연구를 통해 최종 개발 및 제작한 숏크리트 타설시험기 NCPT-10의 본체 모습을 나타낸 것이다.



그림 3.11.27 숏크리트 타설시험기 NCPT-10 본체 모습

다. 숏크리트 타설시험기 시험 운전

개발 및 제작된 숏크리트 타설시험기의 시험 운전을 위해 레디믹스트 숏크리트 재료의 타설시운전을 실시하였다. 시험 운전을 통해 문제점을 보완 및 개선하고 차후년도 연구개발에서 레디믹스트 재료의 현장 적용성 평가를 본 타설시험기를 이용해 실시하고자 하였다.

(1) 레디믹스트 숏크리트 재료 준비

그림 3.11.28은 타설시운전에 사용된 레디믹스트 재료를 나타낸 것인데, 시운전 장소에 비치된 믹서 용량의 한계로 인해 전체 재료를 동일량으로 나누어 믹서에 투입 및 믹싱을 실시하였다. 그림 3.11.29는 레디믹스트 재료의 믹싱 및 타설시험기 호퍼에 투입된 모습을 나타낸 것이다.



그림 3.11.28 타설시운전 위한 레디믹스트 재료 준비(골재 및 유동화재)




그림 3.11.29 재료 믹싱 및 타설시험기의 호퍼 투입

(2) 타설시험기 시운전 실시

모르타르의 타설시운전에 앞서 장비의 원할한 작동과 재료 공급 호스면의 마찰력을 줄이기 위해 물 분사를 먼저 실시하였다. 그림 3.11.30는 숏크리트 타설 전 물을 분사하는 모습을 나타낸 것이다. 재료 공급 호스면을 물로서 충분히 마찰력을 감소시킨 후 본격적으로 레디믹스트 숏크리트 재료를 공급하여 타설시운전을 실시하였다. 그림 3.11.31은 타설시험기를 이용한 숏크리트 타설시운전 모습을 나타낸 것인데, 분사건을 통해 원할한 타설작업이 이루어졌다.




그림 3.11.30 숏크리트 타설전 물 분사




그림 3.11.31 재료 믹싱 및 타설시험기의 호퍼 투입

(3) 타설시험기 개선 및 보완

타설시운전을 통해 숏크리트 타설시험기의 문제점을 파악하고 이에 대한 개선 및 보완을 실시하였다. 다음은 타설시운전을 통해 개선 및 보완된 사항을 나타낸 것이다.

① 타설시험기 펌프 압력의 부족으로 호퍼에 투입된 재료를 분사건까지 이송하지 못하는 문제를 펌프 압력 및 펌프 용량 증대를 통해 개선

② 타설시험기 호퍼 내의 S자 밸브 형상에 대한 보완 실시

③ 분사건의 복잡한 형상으로 인한 부하방지를 위해 분사건 형상, 작동방법, 상하좌우 구동 방법 등의 문제점 보완

④ AC 아지테이터의 전원 공급 문제를 해결하기 위해 타설시험기 자체에 소용량의 발전기를 부착하는 방법을 보완

⑤ 호퍼 내의 아지테이터 날개와 호퍼 내면과의 간격이 협소하여 골재가 끼이는 현상이 발생하여 아지테이터 날개를 1cm 정도 짧게 수정하여 굵은 골재가 끼이는 현상을 보완

2차년도 연구개발에서 최종 개발된 숏크리트 타설시험기를 이용하여 3차년도 연구 개발에서는 레디믹스트 숏크리트 및 현장배합 숏크리트 재료를 적용하여 실제적인 숏크리트 품질 성능 평가를 실시 하였다. 또한, 타설시험기의 표준 사용 매뉴얼을 작성하였으며 앞으로 국내 숏크리트 재료의 성능 시험 업무에 활용하고자 한다.

아직까지 표준화된 숏크리트 타설시험 장비가 전무한 국내 상황에서 본 연구에서 개발된 숏크리트 타설시험기는 현장타설실험의 한계 및 제약 조건을 극복 가능하고, 숏크리트 재료의 표준화 및 규격화 시험에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 숏크리트 타설 시험기 적용성 평가

가. 적용성 평가 수행

(1) 개요 및 배합설계

표준화된 숏크리트 타설 시험기의 개발은 숏크리트 구성재료의 품질 성능평가에 작용하는 여러 장애요인들을 해결함으로서 정량적인 비교 분석이 가능해진다. 이로서 숏크리트용 혼화재료의 성능 평가 및 최적 섬유 혼입량 결정에 있어서 매우 신뢰성 있는 데이터의 확보가 용이하다. 또한 표준화된 장비, 타설 각도, 타설 거리의 기준을 정립함으로서 리바운드 시험의 정량적인 평가도 가능해 진다.

이러한 이유로 숏크리트 타설 시험기의 성능 평가는 매우 중요한 사항으로서 현장 숏크리트 타설 장비와의 동일한 성능 및 효과를 발휘하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 숏크리트 타설 시험기의 적용성 평가를 위하여 레디믹스트 숏크리트 최적 표준 배합을 사용하여 타설시험을 수행하였다.

레디믹스트 숏크리트 최적 표준배합은 현장 타설시에 가장 많이 수행한 배합으로 정확한 품질 데이터가 확보되어 있는 상태이므로 본 연구에서 개발한 숏크리트 타설 시험기에 동일 배합으로 타설함으로서, 현장에서 사용되는 숏크리트 장비와의 성능 비교가 가능해 진다.

배합비는 레디믹스트 숏크리트 최적 표준배합을 사용하였으며, 재료 및 혼합방법은 현장과 동일하게 수행하여 최대한의 시공오차를 제거하였다. 숏크리트 타설 시험기에 사용된 배합비는 표 3.11.5와 같으며 측정항목으로는 현장에서의 타설성 평가 , 압축강도 및 휨인성 평가를 수행하였다.

표 3.11.5 숏크리트 타설 시험기 적용 배합표

Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재 (kg)				합성섬유 (kg/m3)
					S1	S2	S3	S4	
8	12	45.6	212	465	560	347	332	347	12

(2) 타설시험 수행 과정



① 재료 운송



② 숏크리트 타설 시험기 세팅



③ 숏크리트 패널 및 기준 거리 확보



④ 이동식 믹서 설치



⑤ 재료 혼합 및 운송



⑥ 숏크리트 타설

그림 3.11.32 레디믹스트 숏크리트 타설 모습



⑦ 숏크리트 타설 완료

그림 3.11.32 레디믹스트 숏크리트 타설 모습(계속)

나. 실험 결과

숏크리트 타설 시험기를 사용하여 패널에 타설한 숏크리트를 해당 재령에 코어채취 및 절단가공 작업을 통하여 공시체를 수거하였다. 재령 1, 7, 28일에 압축강도 측정을 실시하였으며, 휨강도 및 휨인성 측정은 현장 타설시와 동일하게 재령 28일에 측정 하였다.

기존 현장타설의 압축강도 측정 결과 및 본 연구에서 개발한 숏크리트 타설시험기로 타설된 공시체의 압축강도 시험 결과를 비교하여 표 3.11.6에 나타내었다.

표 3.11.6 압축강도 시험결과 비교표

배합명 \ 재령		압축강도 (MPa) 공시체 평균			
		1일	7일	28일	슬럼프 (cm)
1	현장타설시험기	15.6	29.1	38.5	9.2
2	개발된 숏크리트 타설시험기	14.2	28.5	39.5	10.5

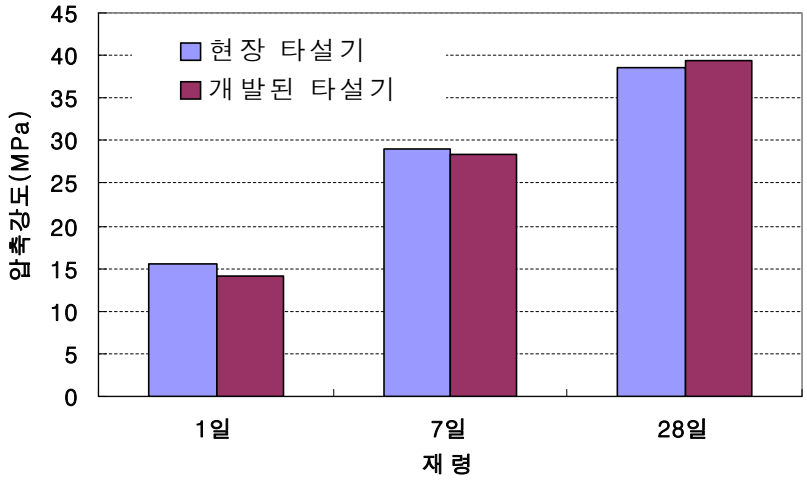


그림 3.11.33 압축강도 시험결과 비교

레디믹스트 숏크리트 배합특성상 구성 재료 변화에 의한 품질 성능 저하는 없고, 품질 성능 저하가 있다면 타설 장비 및 타설환경에 의한 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 숏크리트 타설 시험기로 수행한 압축강도 시험결과와 기존 현장타설 시험기로 타설한 시험결과를 비교해 본 결과 매우 유사한 결과를 나타내어 현장 타설 시험기와 거의 흡사한 타설 성능을 보이는 것으로 판단된다.

휨인성 평가는 재령 28일에 절단 가공된 공시체를 가지고 실시하였으며 기존 현장타설 장비에 의한 측정 값 및 본 타설 시험기로 수행한 측정값을 표 3.11.7에 나타내었다. 휨강도 특성은 5.30~5.41MPa로 매우 유사한 특성을 나타내었고, 휨인성 또한 70%이상을 상회하는 값으로 동일하게 나타났으며, 휨인성지수도 비슷한 경향을 보였다. 또한, 숏크리트 매트릭스 분사 성능 및 섬유 분산능력은 동일한 것으로 판단할 수 있으며, 압축강도 시험결과와 더불어 현장 타설 장비와의 타설 효율 유사성을 확인할 수 있었다.

표 3.11.7 휨인성 시험결과 비교표

재령 / 배합명	휨인성 (MPa) 공시체 평균					
	최대하중 ton	휨강도 MPa	등가휨강도 %	휨인성지수		
				I5	I10	I20
현장타설시험기	1.802	5.30	72.32	4.01	8.26	15.72
개발된 타설시험기	1.840	5.41	71.42	4.24	8.10	17.02

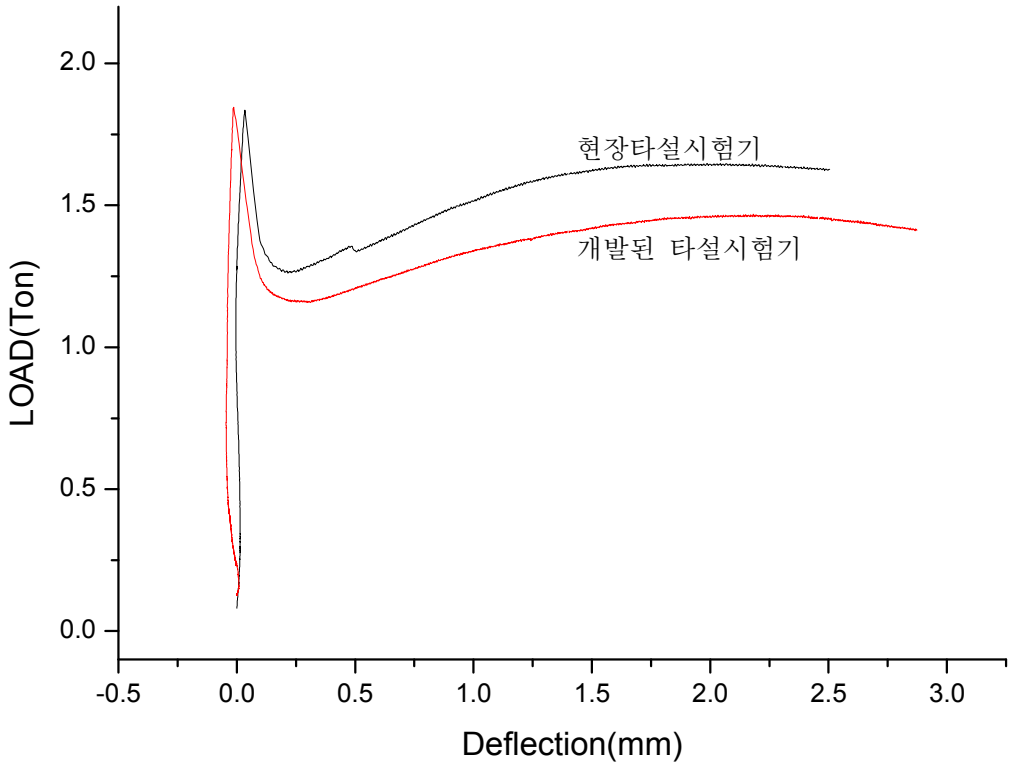


그림 3.11.34 휨인성 시험결과 비교

4. 소결론

본 절에서는 현장과 같은 조건에서 타설실험이 가능한 타설 시험기 제작을 위한 연구를 수행하였다. 기존에 운용되고 있는 숏크리트 타설장비의 특성을 파악하고 시험기를 제작하여 성능 평가를 수행하였고 그 결과는 다음과 같다.

(1) 1차년도 연구개발에서 완료된 숏크리트 타설 시험기 설계도면을 이용하여 2차년도에 현장타설 시험의 한계 및 제약조건을 개선하고, 숏크리트 재료의 표준적인 품질성능 시험이 가능한 숏크리트 타설시험기를 개발 완료하였다.

(2) 3차년도에서는 최종 도출된 레디믹스트 숏크리트 표준 배합비를 사용하여 동일한 조건으로 개발된 장비로 타설 성능평가를 수행하였다. 시험결과 현장타설 장비와 매우 유사한 성능을 발휘하는 것으로 나타났으며 추가적인 반복시험을 통해 시공 오차에 의한 품질저하성능정도를 데이터 베이스화 한다면 표준화된 숏크리트 타설시험 장비로서 완전한 요소를 갖출 수 있다.

(3) 터널에서 사용되는 숏크리트는 일반 콘크리트와는 달리 숏크리트 타설장비에 의해 정해진 압력이상의 토출압과 토출량 그리고 급결제에 의해 현장에서 수분내에 경화되는 특성을 가지고 있으며, 장비의 종류, 현장 노즐맨의 경험, 현장의 온도변화 등에 따라서 그 품질 특성이 달라지고 있으므로, 터널현장이 아닌 실험실에서 시멘트, 혼화재, 급결제 및 경화된 숏크리트 등 숏크리트관련 재료의 성능평가를 실시하기에 많은 어려움이 있어, 향후 이와 같은 표준화된 숏크리트 타설시험장비를 활용하여 재료별 또는 조건별 성능대한 비교평가를 실시할 경우, 강도특성, 급결특성, 리바운드량에 이르기까지 시험결과의 신뢰성을 높일 수 있으리라 판단된다.

제 12 절 공정관리 및 시공·품질관리 편람(안) 제안

본 연구개발에서는 레디믹스트 숏크리트의 실제적인 현장 적용을 확대하고, 생산공장 및 건설 현장에 종사하는 실무기술자들이 재료 생산, 공정 관리, 시공 관리 및 품질 관리 등에서 어려움 없이 개발 재료를 활용할 수 있게 레디믹스트 숏크리트 공정관리 및 시공·품질관리 편람(안)을 제안하였다.

레디믹스트 숏크리트 공정관리 및 시공·품질관리 편람(안)에서는 공장에서의 재료 생산단계에서부터 현장 시공 및 품질 관리, 적용된 재료의 품질시험 단계까지 사용자가 효과적으로 본 재료를 활용할 수 있도록 기본적인 지침을 제시하였다.

1. 재료생산 및 공정관리 편람(안)

가. 총칙

(1) 목적

분말형 레디믹스트 숏크리트란 기존 현장배합 숏크리트를 대체하는 공법으로서 터널시공 특성, 현장조건 및 사용용도에 맞게 생산할 수 있으며, 시공성 및 고품질 숏크리트를 확보할 수 있는 공법이다. 즉, 기존에 현장에서 배합되던 숏크리트의 고질적인 문제점들을 효과적으로 개선하기 위해 숏크리트 재료의 배합 및 제조를 레미탈 제조 전문업체에서 사전에 미리 실시하여 골재의 철저한 토립분 관리, 확실한 입도관리, 전문배합 장치를 이용한 엄격한 품질관리 및 재료의 규격화 등을 거쳐 시공 품질을 극대화 시킬 수 있게 제조되는 숏크리트 공법이다. 본 매뉴얼은 분말형 레디믹스트 숏크리트를 제조함에 있어 작업표준을 제시함과 동시에 품질기준을 규정하여 명확히 하고 실시 예로 기준하여 명확히 함으로써 본 공법 보급에 기여하는 것을 목적으로 한다.

(2) 적용범위

본 품질기준 및 시공 편람(안)은 분말형 레디믹스트 숏크리트를 제조, 시공하기 위해서 사용원료, 작업설비, 방법, 조건 및 공정검사 및 관리 등에 대하여 규정하였다. 따라서 본 품질기준(안)에 포함되지 않은 일반적인 재료·시공에 관한 사항에 대해서는 국내에서 일반적으로 통용되고 있는 레미탈 운영 매뉴얼 및 숏크리트 품질기준과 더불어 경험있는 책임기술자의 판단 및 실험에 의해 확인된 방법을 참고하여 사용한다. (KS F 2781(강섬유보강 습식 숏크리트)품질기준 참고)

(3) 용어정리

① 분말형 레디믹스트 숏크리트(Powdered Ready-mixed Shotcrete)

정비된 레미탈 제조 설비를 갖춘 공장에서 미리 제조하여 사용하는 분말형태의 숏크리트.

② 터 널(Tunnel)

지표 하에 축조되는 도로나 공간으로 이용하는 지하구조물로 단면적이 2m2이상의 것을 말하며, 이보다 작은 직경은 제외됨. 터널은 위치에 따라 산악, 지하, 해저, 하저 터널로 분류되고 용도에 따라 교통용, 수송용, 지하실 터널로 분류됨.(토목용어사전, 대한토목학회, 1996)

③ 숏크리트(Shotcret)

굳지 않은 콘코리트를 가압시켜 노즐로부터 뿜어 내어 소정의 위치에 부착시켜 시공하는 콘크리트.(터널설계기준, 2007)

④ 급결제(Quick Setting Admixture)

터널 등의 숏크리트에 첨가하여 뿜어 붙인 콘크리트의 응결 및 조기의 강도를 증진시키기 위해 사용되는 혼화제.(콘크리트 표준시방서, 2003)

⑤ 섬유보강 숏크리트(Fiber Reinforced Shotcrete)

숏크리트의 역학적인 특성을 보완하기 위하여 강 또는 기타 재질의 섬유를 혼합하여 타설하는 숏크리트.(터널설계기준, 2007)

⑥ 고로슬래그(Blast Furnance Slag)

고로 중에서 철과 동시에 용융상태로서 생성되는 칼슘, 기타 기재의 규산염과 알루미나규산염을 주성분으로 하는 비금속부산물을 모은 것.(토목용어사전, 대한토목학회, 1996)

⑦ 실리카 흄(Silica Fume)

극소철과 실리콘메탈의 생산 과정에서 생산되는 가스를 수집•여과하여 포집되는 마이크로 실리카 입자로 주로 숏크리트 및 콘크리트의 장기강도 및 내구성 개선을 위해 혼입.

⑧ 배치플랜트(Batch Plant)

콘크리트 재료의 계량, 또는 계량비비기를 하는 설비로서 각각 배처 또는 배처와 믹서를 가지고 있음.(토목용어사전,1996)

⑨ 골재크기에 의한 구분

S1	S2	S3	S4
0~0.8mm	0.8~2.4mm	2.4~5.6mm	5.6~8mm

나. 공정관리

(1) 원재료 반입·저장 공정관리 및 작업표준

본 작업의 목표품질은 좋은 제품을 생산하기 위한 양질의 원재료를 반입하고, 원재료별 사일로(Silo)에 정확히 투입하여 저장한다. 사용원료는 시멘트, 잔골재(S1, S2, S3), 굵은골재(S4), 합성섬유, 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 실리카 흄, 분말

형 유동화제, 증점제 외 첨가재 및 혼화제 등이 있다.

작업시에는 품질관리팀의 인수검사에서 합격된 원재료만 입고시킨고, 입고되는 모든 원재료는 원칙적으로 트럭스케일(Truck Scale)로 계량하여 기록되어야 한다(단, 사정상 그렇지 못할 경우에는 샘플링하여 실시한다). 그리고) 원재료별 사일로 투입이 매우 중요하므로 투입구에는 시건장치를 하고 제조팀 운전실에 열쇠를 비치하여 운전원의 확인을 받도록 한다. 또한, 투입구에 정확히 고정시켜 외부로 분진이 비산되지 않도록 한다.

작업설비, 작업명, 작업방법 및 작업조건, 공정 검사 및 관리 등은 정해진 편람을 준수한다.

표 3.12.1 원재료 작업설비

구 분	설 비 명	비 고
일반용 플랜트	원재료 저장 사일로(Silo)	원재료 반입· 저장설비는 국내에서 일반적으로 사용되는 표준화된 장비를 갖추어야 하며, 치수· 용량 및 수량은 생산 규모에 따라 별도로 결정한다.
	야적치장	
	버킷 엘리베이터(Bucket Elevator)	
	스크류 컨베이어(Screw Conveyor)	
	루츠 송풍기(Roots Blower)	
	백필터(Bag Filter)	
특수용 플랜트	원재료 저장 사일로(Silo)	
	백필터(Bag Filter)	

표 3.12.2 원재료 작업명, 작업방법 및 작업조건

작업순서	작업방법 및 작업조건	유의 및 관리사항
1. 시멘트		
(1) 운 반	1) 트럭으로 운송	
(2) 저 장	1) 벌크트럭의 적재량 계량 - 시멘트 저장조의 재고량 확인 - 저장조 투입이 매우 중요하므로 투입구에는 시건장치를 하여 제조팀 운전실에 열쇠를 비치하여 운전원의 확인을 받도록 함. 2) 벌크트럭을 시멘트 저장조 밑에 정차 후 수송관과 벌크트럭의 출구를 연결 3) 벌크트럭에 설치된 판넬상 원격조정으로 수용 컴프레서를 운전, 시멘트를 저장조에 투입 4) 벌크트럭 판넬상의 시멘트 수송 압력게이지가 “0”로 되었을 때 수송이 완료된 것으로 함.	1) 저장조 내 시멘트 재고량 확인 (1) 인수검사 (2) 적재량 확인 1) 벌크트럭 판넬상의 수송압력 게이지 “0” 확인 2) 벌크트럭 적재조 내부 확인
2. 골 재		
(1) 반 입	1) 골재 채취장으로부터 덤프트럭 또는 입도별 정선된 골재를 벌크트럭 또는 톤백으로 반입 2) 품질관리팀에서 골재를 샘플링하고, 육안검사에 의한 외부 관능검사 실시. - 외형검사로 골재의 검사조건 유지 3) 영업팀, 경비실에서 모래반입량 검사	1) 모래 입도별 구분 (1) 인수검사
(2) 저 장	1) 골재를 입도별로 구분, 치장에 적재 - 인수검사에 합격된 것 2) 치장 외부에 적재된 골재는 중기로 치장 내부에 이동, 저장 3) 하절기에는 비로 인한 골재의 수분 유입을 방지하기 위하여 치장 내부에 저장하고, 외부 저장시에는 시트를 이용하여 덮도록 함.	

표 3.12.2 원재료 작업명, 작업방법 및 작업조건(계속)

작업순서	작업방법 및 작업조건	유의 및 관리사항
3. 첨가재		
(1) 운 반	1) 벌크트럭 및 파레트 지대포장의 적재량 계량 - 첨가재 저장조의 재고량 확인 - 저장조 투입이 매우 중요하므로 투입구에는 시건장치를 하여 제조팀 운전실에 열쇠를 비 치하여 운전원의 확인을 받도록 함. 2) 벌크트럭을 첨가재 저장조 밑에 정차 후 수송관과 벌크트럭 출구를 연결 - 저장조 재고량 확인 3) 벌크트럭에 설치된 판넬상 원격조정으로 수송용 콤푸레사를 운전, 첨가재를 저장조에 투입 4) 벌크트럭 판넬상의 첨가재 수송압력 게이지가 “0” 으로 되었을 때 수송이 완료된 것으로 함. 5) 파레트 지대포장용 첨가재는 화물용 엘리베이터를 이용하여 사이로 저장위치에 운반 후 수작업으로 투입하며, 저장시 집진시설을 가동함.	1) 저장조 내 재고량 확인 (1) 인수검사 (2) 적재량 확인 1) 벌크트럭 판넬상의 수송압력 게이지 “0” 확인 2) 벌크트럭 적재조의 내부 확인
(2) 저 장	1) 인수검사 후 납품된 혼화제를 종류별로 창고에 보관 2) 혼화제를 종류별로 지정된 저장조로 운반, 저장 3) 저장시 집진시설 가동	1)저장조 투입시 마스크 착용 및 보호구 착용 (1) 인수검사

표 3.12.3 원재료 공정 검사 및 관리

공 정	항 목	기 준	주 기	방 법	관리결과 해석	관리데이터 활용 방법	담 당
인수검사	원재료 인수검사	해당 인수검사 지침서	=	=	시험일지 및 인수검사 성적서	합격/불합격 판정	시험원
원료저장	저장 LEVEL	High Level Low Level	수시	판넬 모니터	원재료 재고일지	원재료 재고 관리	운전원

(2) 모래건조·선별·저장 공정관리 및 작업표준

본 작업의 목표품질은 건조 후 수분함유율이 기준에 맞게 나타나야 하고 입경별 모래(골재)로 선별되어 적정하게 저장되어야 한다. 작업시에는 건조기 스크린 체망

의 터짐이나 파손상태를 확인해야 하며, 선별기 체망 상태를 품질관리팀과 협의하여 눈막힘 및 파손관리를 철저히 하여야 한다.

표 3.12.4 선별 작업설비

설 비 명	비 고
벨트 컨베이어(Belt Conveyor)	재료건조· 선별· 저장설비는 국내에서 일반적으로 사용되는 표준화된 장비를 갖추어야 하며, 치수· 용량 및 수량은 생산 규모에 따라 별도로 결정한다.
바이브레이션 피더(Vibration Feeder)	
바이브레이션 스크린(Vibration Screen)	
버킷 엘리베이터(Bucket Elevator)	
골재 건조기(Sand Dryer)	
원사치장	
골재 사일로(Sand Silo)	
배출 백필터(Exhaust Bag Filter)	

표 3.12.5 선별 작업명, 작업방법 및 작업조건

작 업 명	작업방법 및 작업조건	유의 및 관리사항
1.준비작업	1) 에어 공급라인의 압력을 0.5MPa 이상으로 유지한다. 2) 각 기계의 이상 유무를 점검한다. 3) 경유의 재고량을 확인한다. 4) 잔골재 투입을 위한 중기의 상태를 점검한다. - 연료상태, 운행통로 등	
2.설비운전	1) 골재 건조기(Sand Dryer) 공정화면을 선택한다. 2) 공정화면에서 시작을 클릭하여 Start-On 한다. 3) 버너가동 후 건조기 입구 벨트 컨베이어가 가동되면 투입잔골재(세사, 중사)를 선택한다. 4) 건조기의 경우 투입량은 자동으로 투입량을 조절하여야 한다.(건조온도 50℃ 이상) 5) 실제로 잔골재가 투입되는지 벨트스케일 및 CCTV 모니터를 확인한다. 6) 기타 세부사항은 운전매뉴얼에 따른다.	
3.작업완료	1) 공정화면에서 정지를 클릭하여 Slow-Down 한다. 2) 기계는 공정의 순서대로 정지된다. 3) 건조기 운전일지를 작성한다.	

표 3.12.6 선별 공정관리

공정	항 목	기 준	주 기	방 법	관리결과 해 석	관리데이터 활용 방법	담 당
골재 건조	건조 온도	60℃ 이상	1회/일	건조기를 통과한 건조모래의 온도 측정	시험일지	건조기 설정온도 조정	운전원
	건조후 수분	0.3% 이하	1회/일	단순 랜덤샘플링 검사 (n=1, c=0)	시험일지	골재투입량 조정	시험원
골재 선별	선별 입도	공정관리 지침서 참조	1회/일	단순 랜덤샘플링 검사 (n=1, c=0)	시험일지	골재투입량 조정	시험원
골재 저장	저장 LEVEL	High Level Low Level	수시	판넬 모니터	원재료 재고일지	건조기 가동 여부 판단	운전원

*주) n : 시료의 크기, c : 불합격 판정개수

(3) 배합(계량 및 혼합)공정관리 및 작업 표준

본 작업의 목표품질은 기준에 맞는 정확한 원재료 계량과 균일한 제품이 제조되어야 한다. 작업시에는 믹서의 운전시 암페어("A")를 확인하여 믹서 내부의 회전날개 마모, 게이트 실링(Gate Sealing) 상태를 인지하여야 하며, 계량 기록지가 제대로 출력 되는지 수시로 프린터를 확인하여야 한다.

표 3.12.7 배합 작업설비

설 비 명	비 고
스크류 컨베이어(Screw Conveyor)	계량 및 혼합 설비는 국내에서 일반적으로 사용되는 표준화된 장비를 갖추어야 하며, 치수· 용량 및 수량은 생산 규모에 따라 별도로 결정한다.
버킷 엘리베이터(Bucket Elevator)	
턴 헤드(Turn Head)	
원재료 사일로(Silo)	
도싱 스크류 컨베이어(Dosing Screw Conveyor)	
스케일(Scale)	
믹서(Mixer)	
에어컴프레서 (Air Compressor)	
백필터(Bag Filter)	

표 3.12.8 배합 작업명, 작업방법 및 작업조건

<table>
<tr><th>작업순서</th><th>작업방법 및 작업조건</th><th>유의 및 관리사항</th></tr>
<tr><td>1. 준비작업</td><td>1) 공기 압축기를 가동하여 에어 공급라인의 압력을 확인한다.
- 공기압 0.5MPa 이상
2) 각 기계의 이상 유무를 점검한다.
3) 저장조의 원재료 재고량 확인</td><td></td></tr>
<tr><td>2. 계량작업</td><td>1) 혼합기 공정화면을 선택하고, 시작을 클릭하여 Start-On 한다.
2) 배합비 화면에서 생산하고자 하는 양 및 배합비를 선정·입력하고 제품 사일로를 선택 입력한다.
- 저장조의 제품 종류 확인
3) 배합비 화면에서 자동계량을 선택할 경우 입력 완료 후 연속계량을 선택한다.
4) 계량오차는 아래와 같이 관리하여야 한다.
1회 계량 분량의 계량오차(%)
시멘트 : ± 1 골 재 : ± 3 혼화재 : ± 2
혼화제 : ± 3 합성섬유 : ± 3
5) 계량 및 혼합이 연속 공정이므로 계량이 완료되면 자동으로 배출, 혼합공정으로 진행된다.</td><td>※ 고로슬래그 미분말의 계량오차는 1회 계량분량에 대하여 ± 1%로 한다.</td></tr>
<tr><td>3. 혼합작업</td><td>1) 계량 완료후 자동으로 진행된다.
2) 일반용 플랜트의 경우
- 1번 계량기에서는 S1, S2, S3가 계량완료후 방출 된다
- 2번 계량기에서는 섬유, 실리카 흄 등의 혼화재가 계량 완료 후 방출된다.
- 3번 계량기에서는 시멘트, 고로슬래그 미분말, 굵은골재(S4)가 계량 완료후 계량기로 방출 된다</td><td>1)계량기 청소 및 점검
2)로드셀이상유무
3)계량기 안정</td></tr>
<tr><td>4. 배출 및 저장작업</td><td>
<table>
<tr><th>생산 Batch</th><th>혼합 시간(초)</th><th>믹서 Rotor Speed</th><th>A/B Speed</th><th>원재료 투입 방법 및 순서</th></tr>
<tr><td>3ton/ batch</td><td>150</td><td>투입 전 35%
투입 후 80%
거출 시 35%</td><td>35%</td><td>① S1, S2, S3(투입)
② 섬유, 실리카 흄 (투입)
③ 시멘트, 슬래그, S4 (투입)</td></tr>
</table>
1) 믹싱시간에 의한 혼합 완료후 자동으로 배출된다.
2) 믹싱된 제품은 믹서게이트 Open에 의해 배출된다.
3) 믹서내부 Coating 제거를 위해 30초 경과후 2초동안 Motor 가동 후 다시 30초후 게이트를 3회 Open 및 Close한 후 게이트를 닫는다.
4) 배출된 제품을 벨트컨베이어, 버킷 엘리베이터로 이송하여 제품 저장조에 저장하며, 저장조의 상부에 설치된 레벨의 작동에 의해 혼합이 중지된다.</td><td>1)믹서구동부, 회전부위 이상유무 점검
2)믹서내부 마모상태</td></tr>
</table>

표 3.12.9 배합 공정 검사 및 관리

공정	항목	기 준	주 기	방 법	관리결과 해 석	관리데이터 활용 방법	담 당
배합 공정	배합비	**1회 계량 분량의 계량오차(%)** 시멘트 : ± 1 골 재 : ± 3 혼화재 : ± 2 혼화제 : ± 3 합성섬유 : ± 3	1회/일	단순 랜덤 샘플링 (n=1,c=0)	시험일지	계량기 낙차 및 기차 보정	시험원
	배합 시간	레디믹스트 숏크리트용 (3ton/batch) 150초	1회/주	입력내용 확인	설정치 확인	배합시간 재설정	시험원
	혼합 상태	배합비 기준± 3%	1회/일	단순 랜덤 샘플링 (n=1,c=0)	시험일지	믹서설비 점검 및 배합시간 재설정	시험원
	중간 검사	해당 제품 규격별 품질 기준	1회/일 보수성은 1회/월	단순 랜덤 샘플링 (n=1,c=0)	시험일지	제품 배합조정	시험원
	저장 LEVEL	High Level Low Level	수 시	판넬 모니터	혼합기 운전일지	제품 적정 재고유지	운전원

*주) n : 시료의 크기, c : 불합격 판정개수

(4) 포장·야적 공정관리 및 작업 표준

본 작업의 목표품질은 기준에 적합한 물량 및 품질로 레디믹스트 숏크리트가 제조 되어 저장되어야 한다. 작업시에는 포장기 가동전에 팰릿(Palletizer)은 미리 가동시켜야 하며, 포장제품에 생산일자가 프린트될 수 있도록 수시 점검하여야 한다.

표 3.12.10 포장 작업설비

설 비 명	비 고
스크류 컨베이어(Screw Conveyor)	포장 및 야적 설비는 국내에서 일반적으로 사용되는 표준화된 장비를 갖추어야하며, 치수· 용량 및 수량은 생산 규모에 따라 별도로 결정한다.
턴헤드(Turn Head)	
제품사일로(Product Silo)	
자동포장기(Rotary Packer)	
중량선별기(Check weigher)	
드리븐 롤러웨이(Driven Roller Way)	
벨트 컨베이어(Belt Conveyor)	
백필터(Bag Filter)	
포장기계(Wrapping Machine)	

표 3.12.11 포장 작업명, 작업방법 및 작업조건

작 업 명	작업방법 및 작업조건	유의 및 관리사항
1) 준비작업	1) 공기 공급라인의 에어 압력을 확인한다. - 공기압: 0.5MPa 이상 2) 각 기계의 이상유무를 점검한다. 3) 제품 사일로의 재고량 확인 4) 포장, 출하할 제품의 종류 확인	
2) 포장작업	1) 빈백을 포장기 전면에 묶음 단위로 올려 놓는다. 2) 포장기 측면 판넬의 집진기 S/W ON한 후 포장기 S/W ON 한다. 3) 포장기를 가동시킨다. 4) 자동작업으로 포장기 스파우트에 지대를 투입하여 제품을 포장한다. ◦ 포장중량 가. 일반용 제품 - 시료의 개별무게치 : 규격무게 이내 - 시료의 평균무게치 : 규격무게 이상 나. 특수용 제품 - 시료의 개별무게치 : 규격무게 이내 - 시료의 평균무게치 : 규격무게 이상 5) 포장된 제품은 설정된 중량에 도달하면 이송 컨베이어로 배출된다. 6) 기타 세부사항은 운전매뉴얼에 따른다.	
3) 야적작업	1) 파레트 시설의 각 기계를 점검한다. 2) 포장이송 벨트 컨베이어를 가동한다. 3) 포장이송 컨베이어의 수직 롤러 컨베이어를 파레트 위치로 변환한다. - 야적제품 종류 확인 4) 파레트 시설의 각 기계를 가동한다. 5) 파레트에 적재된 제품을 출하장에 야적한다. 6) 기타 세부사항은 운전매뉴얼에 따른다.	- 안전장치의 이상유무를 확인한다. - 가동중인 시설에 관계자외 접근 금지 - 제품 야적을 위한 운행시 안전사고에 주의한다.

표 3.12.12 포장 공정 검사 및 관리

공 정	항 목	기 준	주 기	방 법	관리결과 해 석	관리데이터 활용 방법	담 당
제품 포장 및 저장	제품 검사	해당 제품 규격별 품질기준	해당 제품 주기 적용	단순 랜덤 샘플링 (n=1,c=0)	시험일지	제품 출하 적/부 판정 및 배합조정	시험원
	포장 중량	- 시료개의 개별 무게치 : 규격무게 이내 - 시료개의 평균 무게치 : 규격무게 이상	1회/월	체크검사 (n=1,c=0)	포장질량 검량일지	포장기 설정무게 보정	시험원

*주) n : 시료의 크기, c : 불합격 판정개수

다. 품질 기준

(1) 시멘트

시멘트는 KS L 5201에 적합한 보통 포틀랜드시멘트를 사용하는 것을 원칙으로 하는데, 이외의 시멘트에 대해서는 소요의 품질을 얻기 위해 적합하다는 것을 확인(도로공사 표준시방서;2009 15-1절)한 후 사용하여야 한다.

(2) 골재

입고된 골재를 수분함량 0.3% 이하로 건조시켜야 한다. 건조된 골재를 S1, S2, S3, S4의 선별작업을 실시하여야 한다. 단, 골재최대치수 10mm 이하의 경우 표 1을 기준으로 하며, 골재최대치수 8mm 이하 골재를 사용하는 경우, 표 3.12.13의 S1은 0.8mm이하, S2는 0.8~2.4mm, S3은 2.4~5.6mm, S4는 5.6~8mm의 입도선별 과정을 거치는 것을 원칙으로 한다. 그리고 선별된 골재는 규정입도 사일로에 저장되어야 하며, 자동화에 의해 입도별로 투입 및 혼합이 이루어져야 한다.

명시된 골재최대치수별 표준입도의 범위내에 설계요구입도가 속하여야 하며, 책임 감독자의 요구에 의해 표준입도 범위 내에서 조정할 수 있다. 그리고 상기 명시된 품질 기준외 잔골재 및 굵은 골재의 품질기준은 상위기준 『도로공사 표준시방서:2009』 및 『고속도로공사 전문시방서:2009』에 따른다.

표 3.12.13 골재최대치수 10mm에 사용되는 추천 입도분포(도로공사 표준시방서)

표 준 체	체를 통과한 중량 백분율(%)		
13mm	100		
10mm	90	~	100
5mm	65	~	85
2.5mm	50	~	70
1.2mm	35	~	55
0.6mm	20	~	35
0.3mm	8	~	20
0.15mm	2	~	10

표 3.12.14 골재최대치수 8mm에 사용되는 추천 입도분포(EFNARC 참고)

표 준 체	체를 통과한 중량 백분율(%)		
16mm	100		
8mm	90	~	100
5mm	73	~	100
2.5mm	55	~	90
1.2mm	37	~	72
0.6mm	22	~	50
0.3mm	11	~	26
0.15mm	4	~	12

(3) 혼화재료

(가) 급결제

① 급결제는 액상형 알칼리 프리계나 시멘트 광물계 등의 가급적 환경피해와 인체 영향이 적은 재료를 사용하는 것을 원칙으로 하고 지반조건, 현장 상황, 시공 상황 등에 따라 책임기술원의 승인을 얻어 이와 동등하거나 유사한 성능의 다른 급결제 종류를 사용할 수 있다.

② 사용량은 5~10%를 표준으로 하며 책임기술원의 승인을 얻어 현장 상황에 따라 적절하게 조정하여 사용할 수 있다. 급결제의 사용량은 숏크리트의 장기강도에 영향을 미치므로 필히 과다한 양이 사용되지 않도록 사용량과 장기강도에 대한 영향을 검토하여야 한다.

③ 급결제는 초기강도 발현 및 장기강도에 악영향을 미치지 않아야 하며 리바운드 량을 최소화할 수 있어야 한다. 또한, 강재를 부식시키지 않아야 하며 습기에 강하고 보존성이 좋아야 하고 인체에 유해한 영향을 미치지 않아야 한다.

④ 급결제는 0℃이하에서 성능이 저하 될 수 있으므로 보관 및 사용시 주의하여야 한다.

⑤ 숏크리트 용 급결제의 성능시험은 KS F 2436, KS F 2560 , ASTM C-494에 의거 시험해야 한다.

⑥ 급결제는 KS F 2782(숏크리트용 급결제)에 적합한 것이어야 한다.(2007년 제정)

(나) 고유동화제

① 고유동화제는 사용목적에 적합하고 숏크리트 또는 급결제 등에 악영향을 미치지 않아야 한다. 또한, 사용하고자 하는 혼화제는 시험성적서를 제출하고 현장시험을 통하여 혼화제의 효과와 적정사용량을 확인한 후, 사용여부에 대하여 감독원의 승인을 득하여야 한다.

② 혼화제는 동결의 영향이 없는 방습창고 또는 사일로 등에 저장하고 입하순으로 사용한다.

③ 유동화제의 성능시험은 『고속도로 공사 전문시방서:2009 13-6절』 의거해 시험을 실시하여야 한다.

④ 유동화제는 콘크리트 학회 기준 KCI-AD 101에 적합한 것이어야 한다(콘크리트 표준시방서, 2003 참조).

(다) AE 감수제

① 숏크리트의 워커빌리티를 개선하기 위하여 AE제, AE감수제 등과 같은 혼화제를 사용할 수 있으며, 공사착수 전에 품질확인 후 감독원의 승인을 받고 사용하여야 한다.

② AE 감수제는 KS F 2560에 적합하고, 또한 유동화제와 병용한 경우에도 숏크리트에 나쁜 영향을 미치지 않아야 한다(2003 콘크리트 표준시방서 참조).

(라) 혼화재

① 분말형 레디믹스트 숏크리트의 성질 개선, 리바운드 감소, 초기강도 및 장기강도 발현 및 열화에 대한 장기내구성 향상 등의 목적으로 혼화재를 사용할 경우에는 실리카 흄, 고로슬래그 미분말 및 플라이 애시 등과 같은 혼화재를 사용 할 수 있다.

② 지반조건, 현장 상황, 시공 상황 등에 따라 책임기술원의 승인을 받아 실리카 흄과 동등하거나 혹은 유사한 성능의 혼화재 종류와 적절한 사용량을 결정할 수 있다. 단, 고로슬래그 미분말의 혼입량을 산정할 경우 책임감독자의 요구에 따라 30% 이내에서 그 혼입량을 결정할 수 있다.

③ 혼화재를 사용하기 위해서는 사전 혼화재의 품질, 배합비 및 배합에 따른 혼합물의 강도 영향 등을 충분히 고려한 시험을 실시하고 감독원의 승인을 획득하여야 한다.

④ 혼화재는 동결의 영향이 없는 방습창고 또는 사일로 등에 저장하고 입하순으로 사용한다.

(마) 보강섬유(강섬유와 합성섬유)

① 합성섬유 또는 기타섬유의 적용이 필요한 경우는 국내외 연구 성과 및 현장 적용 사례를 충분히 검토하여 적용여부를 결정하고, 감독원의 승인을 받아야 한다.

② 보강섬유는 분산성이 좋아 콘크리트 내에 분산이 잘 되어야 하고, 정착성이 우수하여 콘크리트 내에서 빠지지 않고 견뎌야 한다. 또한, 높은 인장강도를 가지고 있어 외부응력에 강력히 대응을 해야 한다.

③ 보강섬유 혼입량은 투입재료에 따라 혼입량이 결정되어야 하며, 터널설계 기준(2007) 및 고속도로 전문시방서(2009)에 휨인성을 나타내는 등가휨강도 기준값을 만족하는 범위 내에서 혼입량을 조정할 수 있다.

④ 보강섬유 혼입량 시험은 굳지 않은 숏크리트와 현장에 타설된 숏크리트에 대해 모두 실시하여야 하며, 혼입량 품질기준은 10개 이상의 견본을 무작위로 채취하여 90% 이상이 합격한 섬유의 사용을 원칙으로 한다.

⑤ 보강섬유 사용시에는 합성섬유의 뭉침현상(Fiber balling)과 노즐의 막힘현상(Plugging)에 특히 주의하여 시공하여야 한다.

⑥ 강섬유는 인장강도 700MPa 이상, 형상비 60이상이어야 하며 길이는 30~40mm를 표준으로 한다 (2007 터널설계기준 참조)

2. 시공 및 품질관리 편람(안)

가. 시공

(1) 시공일반

(가) 재료 준비 및 비비기

① 사전에 공장에서 건비빔으로 운반된 벌크(톤백과 BCT) 숏크리트용 재료를 최대한 재료분리가 발생하지 않게 하여 현장의 이동식 및 고정식 사일로에 적재시킨다.

② 건비빔 되어 있는 재료를 혼합할 수 있는 믹서에 투입 후 계량된 혼합수와 믹싱을 실시하여야 한다.

③ 현장비비기는 재료가 균등하게 섞어지도록 충분히 비벼야 하며, 또 비벼진 재료는 될 수 있는 대로 빨리 타설하여야 한다.

(나) 타설 면의 사전 처리

① 작업 중 낙하 위험이 있는 돌, 풀, 나무 등은 주의해서 제거하여야 하며,타설면에 용수가 있을 경우에는 배수파이프나 배수필터를 설치하는 등 적절한 배수처리를 하여야 한다.

② 비탈면이 동결되었거나 빙설이 있는 경우에는 녹여서 표면의 물을 없앤 다음 타설하여야 한다.

(2) 배합

분말형 레디믹스트 섬유보강 숏크리트는 섬유의 분산효과를 높이기 위하여 섬유분산장치를 반드시 사용하여야 하며 다음과 같은 순서로 혼합한다.

① 이동식 및 고정식 사일로에 적재되어 있는 재료를 믹서에 투입한다
(투입시간 : 1~2분).

② 현장에서 유용가능한 용수로 배합표에 표기된 단위수량 만큼의 물을 가수한다. 이때 혼합수는 KS F 4009 부속서 2의 기준에 적합한 것을 표준으로 한다(2003 콘크리트 표준시방서 참조).

③ 혼합시간은 시험에 의해 정하는 것을 원칙으로 하되 완전히 혼합될 때까지 1분간 혹은 그 이상을 혼합한다.

레디믹스트 숏크리트 표준배합은 휨강도 4.5MPa 을 기본으로 하며, 혼입되는 혼화재료에 따라 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 및 다기능(고강도, 고차수) 레디믹스트 숏크리트로 구분한다.

표 3.12.15 분말형 레디믹스트 숏크리트 구분

배합 구분	호칭 강도 (MPa)	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (mm)	압축강도 (MPa)		휨강도 (MPa)	휨인성 (MPa)	함성섬유 혼입량
				1일	28일			
표준	4.5 (휨강도)	8~13	10~12	10 이상	21 이상	4.5이상	등가휨강도 3.0 이상	투입기준량의 90%이상
고로슬래그				10 이상	21 이상			
다기능 고강도				10 이상	35 이상			
다기능 고차수				10 이상	21 이상			

※ 터널표준시방서 2009, 터널설계기준 2007 참고

표 3.12.16 배합별 분말형 레디믹스트 숏크리트 배합비(예시)

배합 구분	호칭 강도 (MPa)	굵은 골재 최대 치수 (mm)	슬럼프 범위 (mm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재(kg)				혼화재(kg)			분말형 유동화제 (kg)	합성 섬유 (kg)
							S1	S2	S3	S4	고로 슬래그	실리카흄	재유화형 분말수지		
표준	4.5 (휨강도)	8~13	10~12	49.5	230	465	560	347	332	347	-	-	-	2.05	12~14
고로슬래그						325	560	347	332	347	140	-	-	2.05	
다기능 고강도						465	560	347	332	347	-	23	-	2.23	
다기능 고차수						465	560	347	332	347	-	-	30	2.05	

[골재크기에 의한 구분]

S1	S2	S3	S4
0~0.8mm	0.8~2.4mm	2.4~5.6mm	5.6~8mm

(3) 장비

분말형 레디믹스트 섬유보강 숏크리트 시공에 사용되는 타설 장비는 숏크리트 시공에 적합한 것이어야 하며, 현장 투입 전 책임기술원 감독 하에 검사 및 시험을 실시하여야 한다. 타설 장비의 노즐 직경은 40mm 이하를 원칙으로 하고 재질은 우레탄 재질을 사용하여야 하며, 지반조건, 현장상황, 시공상황 등에 따라 책임기술원의 승인을 받아 조정이 가능하다.

표 3.12.17 타설 장비의 검사항목 및 검사내용

검사항목	검사기준	검사내용
장비 일반	불법개조 여부 확인	• 타설 작업 투입 전 공인인증기관에 의해 검사를 필함
노즐 직경	40mm 이하	• 섬유 혼입량에 따라 45mm까지 허용 • 변형 및 손상 여부, 노즐 파이프와의 체결 여부, 분사각도 및 토출량 검사
노즐 재질	우레탄 계열	
배송 파이프 직경	60mm 이하	• 섬유 혼입량에 따라 65mm까지 허용 • 변형 및 손상 여부 확인
급결제 및 공기 호스	작동 여부	• 급결제 및 공기의 주입이 원활하게 이루어지는 지를 확인

(4) 시공

분말형 레디믹스트 섬유보강 숏크리트의 1회 타설 두께는 50mm 이내로 하여야 하며, 소정의 두께가 될 때까지 반복해서 타설해야 하며, 노즐은 항상 타설 면에 직각이 되도록 유지하고, 적절한 타설 거리 및 압력을 유지하여야 한다.

숏크리트 타설 작업시 리바운드량이 최소가 되도록 해야 하고 리바운드 된 재료가 다시 혼입되지 않도록 해야 하며, 숏크리트 표면은 특별히 필요한 경우를 제외하고는 숏크리트 만으로 마무리 하는 것을 원칙으로 한다. 기타 시공사항은 습식 숏크리트 시공에 준한다.

(5) 안전 및 위생관리

분말형 레디믹스트 섬유보강 숏크리트 시공시 동반되는 리바운드 및 발생하는 분진에 대하여 보안경 등 적절한 보호구를 통해 작업자의 안전과 건강을 보호하여야 하며, 동시에 발생하는 분진의 처리 등 적절한 안전대책을 강구하여야 한다. 그리고 저온, 건조 및 급격한 온도변화 등에 의해 유해한 영향을 받지 않도록 충분히 양생하여야 한다.

(6) 유의사항

여굴된 부분의 숏크리트는 1회에 전량 시공하지 말고 적정 횟수로 나누어 시공하여야 하고, 숏크리트 타설 후 숏크리트면 밖으로 돌출된 철선은 방수 쉬트 설치 전 제거하여야 한다.

강제식 믹서로 혼합할 경우 1회 비비기 양을 믹서용량의 100%로 하여도 비비기는 가능하지만, 전력부하가 과다하여 장비 손상이 우려되므로 1회 혼합량을 적정 수준으로 조정하여야 한다.

압축강도 시험을 위한 공시체는 숏크리트 유출량이 일정하게 될 때 제작하여 균질한 공시체를 제작하여야 하며, 리바운드량의 조정을 급결제의 양으로 조정하여서는 안된다.

나. 품질 시험 및 평가

(1) 분말형 레디믹스트 숏크리트 품질기준

분말형 레디믹스트 섬유보강 숏크리트는 소요의 강도, 내구성, 수밀성과 함께 강재를 보호하는 성질을 가지고 품질의 변동이 적은 것이어야 한다. 그리고 강도는 터널 표준시방서(2009) 및 터널설계기준(2007)에 의거하여 재령 1일 강도가 10MPa 이상, 재령 28일 강도가 21MPa 이상의 압축강도를 기준으로 한다.

압축강도의 평가는 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 의해 실시하며, 시험에 사용하는 공시체는 별도로 정하는 규정 KCI-SC101(숏크리트의 압축강도 시

험용 공시체의 제작방법)에 따라 제작한다. 그리고 휨강도의 평가는 KS F 2781(강섬유 보강 습식 숏크리트)에 의해 실시하며, 시험에 사용하는 공시체를 제작한다.

표 3.12.18 일반 분말형 레디믹스트 숏크리트 품질기준

구 분		품질기준	비 고
압축강도		1일 : 10MPa 이상 28일 : 21MPa 이상	일반숏크리트
휨강도		1일 : 2.1MPa이상 28일 : 4.5MPa 이상	섬유보강숏크리트
휨인성		등가휨강도 3.0MPa	터널설계기준(2007) 도로공사 표준시방서(2009)
합성섬유 혼입량	배합시	등가휨강도 기준 이상량	
	타설벽면	혼입량 대비 90%이상	

표 3.12.19 요구강도별 분말형 레디믹스트 숏크리트(KS F 2781 및 터널설계기준)

구 분		굵은골재 최대치수 (mm)	호칭강도(1) (MPa)						
			C21(2)	C24	C27	C30	C35	C40	C45
코어압축강도		8	18	20.5	23	25.5	30	34	38
휨강도			4.5						
휨인성			등가휨강도 3.0MPa 이상						
합성섬유 혼입량	배합시		등가휨강도 기준 이상량						
	타설벽면		혼입량 대비 90%이상						

주 (1) 호칭 강도의 기반은 설계기준 압축강도이며 호칭 강도와 코어 압축강도와의 차이는 현장 코어링의 영향을 고려한 것이다.
(2) 압축강도 21MPa을 의미한다.

표 3.12.20 한국도로공사 숏크리트 관련 품질기준(2002)

구 분		내 용
배합비	기준	지반 특성, 강섬유 혼입 등을 고려하여 구분 적용
압축강도 일반 숏크리트	기준	재령 28일 강도=19.6MPa, 재령 1일 강도=9.8MPa ⇒ 패널코어강도 85%, 최소 72% 이상
	빈도	1회/200㎡ 이상 또는 1일 1회 이상
휨강도	기준	재령 28일 f_{28bk}=4.5MPa , 재령 1일 f_{1bk}=2.05MPa
	빈도	B/P 당 1회/200㎡ 또는 1회/일 이상
휨인성	기준	**등가휨강도 3.0MPa이상 (2009 개정)** (몰드규격: 500×500×125mm, 150×150×550mm 병용 가능)
	빈도	휨 몰드 사용시 1회/1,000㎡ 및 휨 인성패널 1회/3000㎡이상
강섬유 혼입량 시험	기준	투입 기준량의 90%이상
	빈도	1회/1000/㎡ 이상(굳지 않은 콘크리트) 구간내 임의위치 1회(6공)이상/ 50m (숏크리트 타설 면에서 코어 채취)
두께측정	기준	평균: 설계 이상, 최소: 설계 75% 이상
	빈도	검사공:1회(7공)/20m 이상 및 강섬유혼입량 코어시료 등
코어압축 강도(28일)	기준	재령 28일 f_{28}=16.7MPa (일반 숏크리트) 재령 28일 f_{28}=19.6MPa (강섬유 숏크리트)
	빈도	구간내 임의 위치 3공/20m

표 3.12.21 급결제를 혼입한 시험 모르타르의 압축강도 품질기준(KS F 2782)

재령 압축강도	1일 (MPa)	28일 강도비(%)
압축강도	9.0	75이상

표 3.12.22 급결제 혼입 페이스트의 응결시간 품질기준(KS F 2782)

구분 항목	초결	종결
응결시간	5분 이내	15분 이내

표 3.12.23 국내외 숏크리트용 급결제의 품질기준(압축강도)

규 격 명	압축강도 규정	비 고
KCI SC 102 JSCE 1986	12시간 : 0.98MPa 이상 24시간 : 8.82MPa 이상 28일 : 플레인 대비 75% 이상	모르타르 (50×50×50mm)
대한터널협회(KTA)	1일 : 9.8MPa 이상 28일 : 17.6MPa 이상	실린더 공시체 강도
한국도로공사 전문시방서	1일 : 9.8MPa 이상 28일 : 19.6MPa 이상	일반 숏크리트 (공시체 강도)
EFNARC	28일 : 플레인 대비 75% 이상 90일 : 플레인 28일 강도 이상	숏크리트 코어강도

표 3.12.24 숏크리트용 급결제의 품질기준(응결시간)

규격		W/C	S/C	응결시간		시험방법
				0초결	0종결	
Mortar	KCI SC 102 JSCE 1986	50	3	5	15	관입저항시험
	ITA	-	-	3~10	9~30	관입저항시험
Paste	KTA	-	-	1~5	12~20	Gillmore시험
	ASTM C 1141	24~30	-	1~3	12	Gillmore시험
	EFNARC	35	-	10	60	Vicat시험

기타 품질은 터널 설계기준(2007) 및 터널표준시방서(2009)에 규정된 습식 숏크리트 품질기준 이상을 만족하여야 하며, 강섬유 이외의 기타 섬유를 적용할 경우에는 터널설계 기준(2007) 및 고속도로 전문시방서(2009)에 휨인성을 나타내는 등가휨강도 성능기준 이상을 발현 할 수 있도록 설계하여야 한다.

(2) 품질시험방법(안)

(가) 재료 샘플링 시험방법

이 시험방법은 숏크리트용 재료의 시료 채취 방법에 대하여 규정하는 것으로 포장 또는 비포장 상태로 배달된 재료나 야적장, 트럭 믹서 등에서 시료를 채취하는

것을 포함한다. 그리고 숏크리트에 이용되는 재료 중 품질검사의 적합 여부를 판정하는 시험에 이용할 대표적인 시료를 채취하는 것에 이용된다.

(나) 시험방법

① 이미 건식 또는 습식으로 혼합된 재료의 시료채취는 공사시방 등에 믹서의 효율성과 작업성의 균일성과 같은 특별한 시험방법이 규정되어 있지 않는 한 이 시험방법에 따른다. 특별시험을 위한 시료채취는 이 시험방법에서 제외하고 일반적인 재료의 품질기준을 파악하기 위해 이용되는 시료채취방법에 이용한다.

② 시료채취 시 혼합되지 않은 개별재료일 경우는 최소 12kg 이상, 혼합재료일 경우 최소 35kg 이상 채취한다. 혼합재료는 계획된 시험에 필요한 충분한 양을 채취한다.

③ 시료채취는 숏크리트 재료가 숏크리트 타설기계에 이송되는 시점에 행한다. 시료채취 방법은 아래와 같이 시험대상 재료의 대표성을 지닐 수 있는 시료가 얻어질 수 있도록 주의하여야 한다.

④ 건식 숏크리트 재료의 시료채취 방법

어느 배치의 중간부분에서 일정 간격으로 2군데 이상에서 채취하거나, 재료의 연속적 믹서의 하역 중에 무작위로 두 군데 이상에서 복합 시료를 채취한다. 시험시에는 이를 한 개의 군으로 합한다. 재료의 투입 시작과 끝나는 시점의 15% 이내에서는 시료를 채취하지 않는다.

⑤ 습식 숏크리트 재료의 시료 채취방법

혼합시료의 채취 시간은 재료의 응결시간에 영향을 미치지 않도록 15분 이내로 가능한 짧게 하며, 시료 채취를 완료한 후 5분 이내에 슬럼프와 공기량 시험을 시작한다.

트럭 믹서와 믹서에서의 채취할 경우 믹서를 멈추고 드럼 입구와 맨 뒤쪽에서의 거리가 같은 지점, 즉 거의 중앙 지점에서 다른 적당한 방법을 이용하여 시료를 채취한다. 시험을 위하여 다시 한번 잘 혼합하며, 무작위로 한 개의 포장, 또는 계획실험을 수행하는데 적지 않은 충분한 양을 채취한다. 일반적으로 한 펠릿의 양은 900~1,300kg 정도이다.

컨테이너 또는 운송 장비의 하역 중에 일정 간격으로 3곳 이상에서 숏크리트 타설기계에 도달하는 때에 시료채취를 한다. 운송단위의 처음, 중간 그리고 마지막 세

부분에서 채취한다. 이동시의 처음과 끝의 15%이내에서는 시료를 채취하지 않는다. 시험시에는 이를 하나로 합한다.

(다) 시험용 패널에 의한 공시체 채취방법

이 규격은 건식 또는 습식 숏크리트의 시험용 패널을 제작하는 방법과 패널로 부터 공시체를 절취하는 방법에 대하여 규정하며, 다음에 제시하는 규격은 이 규격에 인용되는 것에 따라 이 규격 규정의 일부를 구성한다. 이들 인용규격은 최신판을 적용한다.

KS F 2403 콘크리트 강도 시험용 공시체 제작방법

KS F 2406 콘크리트 양생용 재료의 보수능력 시험방법

KS F 2408 콘크리트의 휨강도 시험방법

KS F 2409 굳지 않은 콘크리트의 단위용적 질량 및 공기량 시험방법

KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법

KS F 2422 콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도 시험방법

ASTM C 457 경화된 콘크리트의 기공 측정을 위한 미세측정방법

ASTM C 511 수경성 시멘트 및 콘크리트에 이용되는 습윤 양생기, 양생실 및 수조 규격

ASTM C 513 콘크리트를 포함한 압축강도용 공시체의 채취 방법

ASTM C 642 경화된 콘크리트의 밀도, 흡수율 그리고 공극 측정방법

(라) 시험용 패널

숏크리트를 타설하기 위한 폼은 진동 또는 변형을 통해 숏크리트의 누출을 방지하기에 충분한 나무 또는 철 구조를 사용할 수 있다. 폼은 정사각형의 밑면과 밑면으로부터 45° 기울어진 옆면을 가진 모양으로, 크기는 가로 및 세로가 최소 500mm 이상, 깊이가 250mm 이상이어야 하며, 노즐맨, 장비 또는 배합 설계의 적합성 파악을 위해서는 보다 큰 패널이 권장된다.

목재 폼은 최소 19mm 이상의 두께를 지닌 합판으로 만들어진 밑면을 지녀야 하고, 옆면 부분은 최소 38mm 이상의 두께를 지닌 목재로 만들어져야 한다. 강철 폼은 최소 5mm 이상의 두께를 지닌 재료를 이용하여 만들어져야 한다.

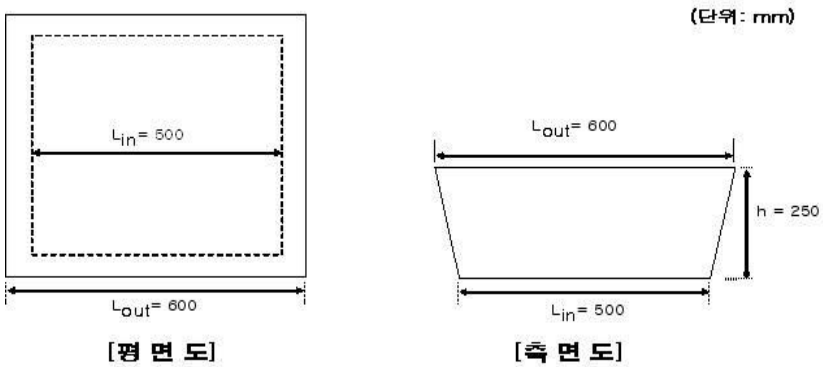


그림 3.12.1 시험용 패널 규격

(마) 재료

건식공법에서는 혼합물은 구조물에 사용되거나 사용되어질 동일 배합과 재료로 만들어져야 한다.

습식공법에서는 시험혼합물은 규정된 슬럼프를 지녀야 하고 규정된 공기량과 단위질량을 가져야 하며, 또는 섬유를 사용할 때는 사용 중이거나 사용 예정중인 혼합물에 대해 규정된 가사시간, 공기량 및 단위질량을 지녀야 한다. 시험방법 KS F 2421에 따라 공기량을, 시험방법 KS F 2409에 따라 단위질량을, 시험방법 KS F 2402에 따라 슬럼프를 측정한다.

(바) 시험방법

패널 수는 혼화재의 형태와 투입량, 섬유의 종류와 첨가량을 대표할 만한 혼합물과 구조물의 예상 타설 위치(즉, 슬래브, 비탈면, 벽면, 천장)에 따라 결정한다. 단일종류만 사용한다면 혼합물은 구조물의 사용 시기 등에 따라 동일방법과 투입량으로 더해질 수 있다. 그리고 노즐공, 장비 및 기술의 적합성용이거나 함침 철근의 연구용으로 사용되는 공시체에는 보강용 철근이 사용될 수 있다.

시험을 수행하는 노즐공은(노즐맨, 숏팅 건 운전자)은 지하구조물에 익숙한 사람으로서 최소 1년 이상의 경험이 있어야 하며, 감리자의 요청이 있는 경우 숏크리트를 적절히 칠 수 있는 능력을 시범해야 한다. 또한, 목재 폼은 뿜어붙이기 바로 직전에 물에 적시도록 한다.

(사) 양생

패널은 타설이 끝난 후 수분 증발 및 충격 방지를 위해 KS F 2406의 조건에 만족하는 시트 재료를 이용하여 곧바로 안전한 방법으로 싸여져야 한다. 그리고 KS F 2403을 만족하는 습윤실에서 양생되어야 한다. 현장 양생된 시편은 시험 전에 시험실로 옮겨져야 하며, 라텍스 혼입 숏크리트 패널은 양생 사이클의 균형을 위해 기건 양생 전에 24시간 습윤 양생되어야 한다.

(아) 공시체 절취 및 시험

공시체는 시험방법 KS F 2402에 준하여 코어링에 의한 원주형 형태 및 절단에 의한 빔 시편 형태, 또는 시험방법 ASTM C 513에 준한 절단에 의한 입방체 형태로 패널로부터 채취되어야 한다. 코어와 빔은 균일치 못한 절단 또는 코어링에 의하여 영향을 받아서는 안되며, 평면 절단시에는 평행성과 면의 균일성에 대한 주의가 필요하다. 코어는 패널 표면에 수직으로 절취되고 압축강도용으로 이용되는데, 입방체와 빔은 패널의 표면에 평행 또는 수직으로 시험된다. 시험방향은 결과에 영향을 줄 수 있기 때문에 미리 결정되어야 한다. 경화과정 동안 진동, 충격 및 지나친 기온에 의한 손상을 방지할 수 있도록 적절한 관리가 필요하다.

시편은 패널로부터 채취되어 예정된 재령에 따라 시험되어야 하며 만약 습도 조건이 규정되어 있지 않을 경우 시험 전 2시간 이내에 패널로부터 채취되어야 한다.

만약 구매자의 요구가 있으면 경화된 숏크리트의 공기량은 시험방법 ASTM C 457에 준하여 측정할 수 있다.

(자) 계산 및 결과보고

시험방법 KS F 2422에 근거한 지름에 대한 길이의 보정은 압축강도 측정에 적용되어야 한다. 절단된 입방체에서 압축강도는 코어 공시체의 압축강도에 해당하는 보정계수 0.85를 고려해야 한다.

시험 결과를 보고할 경우에는 다음의 항목을 포함해야 한다.

① 시멘트와 혼화재, 골재최대크기 및 입도를 포함한 굵은골재와 잔골재의 종류, 배합비, 습식 숏크리트인 경우에는 잉여수 함유량, 온도

② 사용 섬유의 종류 및 비율

③ 뿜어붙일 때의 패널 위치

④ 숏크리트의 종류(습식 또는 건식)

⑤ 노즐맨 및 운전자의 이름

⑥ 시편 크기 및 습도 조건

⑦ 패널 표면에 대한 시험의 방향

⑧ 단위질량, 공기량, 흡수율, 공극, 슬럼프, 가능하다면 가사시간

⑨ 평가된 강도, 다른 기계적 특성, 사용된 시험방법, 적용된 보정 계수

(3) 압축강도 평가 방법

시험용 패널로부터 채취 된 코어 공시체는 항온 항습실(20±2℃)에 보관하여야 하며, 압축강도 측정 당일 일정한 크기로 절단 한 후 연마작업을 실시한다. 연마작업은 연마기를 사용하는 것을 원칙으로 하되, 현장 여건상 연마기 사용이 불가피한 경우에는 컴파운드 및 유황 캐핑도 가능하다.

절단 및 연마 작업 후 압축강도 측정을 바로 실시하여야 하나, 절단 및 연마작업을 완료한 후에 일정 재령동안 항온 항습실(20±2℃)에 보관 후 측정 재령 당일 압축강도를 측정하는 것도 가능하다.

압축강도 시험은 KS F 2405(콘크리트 압축강도 시험 방법)에 따라 실시하며, 숏크리트 시험체 상하면에 대하여 1/100㎜의 정확도를 가진 버니어 캘리퍼스를 이용하여 지름과 높이를 3번 측정 후 단면적 및 길이를 계산한다. 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 시험체를 가압할 때 시험체가 시험기 가압판의 중앙에 위치 하도록 한다. 하중은 매초 0.6±0.4N/mm^2의 일정한 속도로 시험체가 파괴될 때까지 가압하며, 공시체는 1개조 3개씩으로 하여 각 시험체마다 시험체가 받는 최대 하중을 단면적으로 나누어 그 평균값을 측정하여 구한다.

(4) 휨인성 평가 방법

숏크리트 타설 후 시험용 패널로부터 7일 재령일 때 탈형을 하여야 하며, 탈형후 바로 절단 가공작업을 실시한다. 절단 된 공시체의 평편도의 정도는 양단에서 2mm 이내이어야 한다. 절단 가공된 공시체는 일정 재령동안 항온 항습실(20±2℃)에 보관 후 측정 재령 당일 KS F 2566 강섬유 보강 콘크리트의 휨인성 시험방법에 준하여

휨인성 측정을 실시한다.

변위 측정시에는 시험편의 하중-처짐 곡선을 구하는 경우에는 시험편 중앙에서의 순수 처짐을 측정해야 하고, 처짐 측정의 정밀도를 높이기 위해 전기적인 변위계(LVDT)를 사용한다.

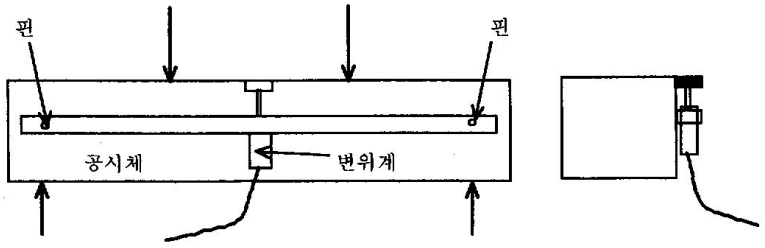


그림 3.12.2 휨인성 시험시 중앙점 순수 처짐 측정장치

등가휨강도는 삼등분점 재하(third point loading)시험에서 얻은 최대하중으로부터 다음 식에 의해 계산된다.

$$\sigma_t = \frac{P_u \cdot l}{b \cdot h^2}$$

여기서, Pu : 최대하중

ℓ : 시험편의 지간길이(300mm 또는 450mm)

b, h : 시편의 폭, 높이(100mm 또는 150mm)

등가휨강도(휨인성계수)는 삼등분점 재하시험에서 얻은 하중-처짐 곡선으로부터 규정 처짐 δ_{tb} = ℓ/150까지의 인성(toughness)을 기초로 하여 다음 식에 의해 계산된다.

$$f_e = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bh^2}$$

여기서, T_b : 기준 처짐까지의 휨인성(flexural toughness)

δ : 기준 처짐(ℓ/150) (지간이 300mm인 경우 2mm, 45cm인 경우 3mm)

ℓ : 시험편의 지간 길이

b, h : 시험편의 폭, 높이

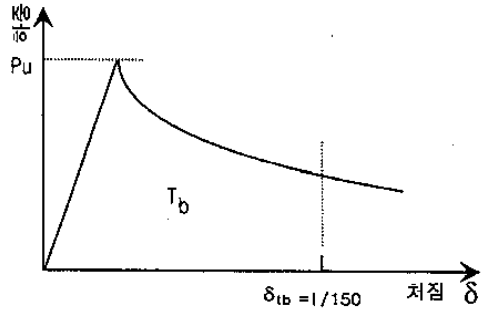


그림 3.12.3 휨인성을 구하기 위한 기준 처짐 지점

(5) 중금속 용출 시험 방법 및 규정

폐기물 공정 시험법 제 2장 제 5항에 따라 타설된 레디믹스트 숏크리트 시료 10g을 정확히 계량하여, 정제수에 HCl을 가하여 pH 5.8~6.3으로 한 용매 100ml를 500ml 삼각플라스크에 넣어 상온, 상압 하에서 진탕 회수가 매분당 200회, 진폭이 40~50mm인 진탕기를 사용하여 6시간 연속 진탕한다. 진탕한 용액을 1.0㎛의 유리섬유여지로 여과한 후 검액으로 사용한다. 용출시험 기준은 폐기물 관리법 시행규칙[별표 1]을 따르며 기준은 다음 표 3.12.25와 같다.

표 3.12.25 유해중금속 용출 기준(폐기물관리법 시행규칙[별표1])

유 해 물 질	기 준
Pb	≤3 mg/L
Cu	≤3 mg/L
As	≤1.5 mg/L
Hg	≤0.005 mg/L
CN^-	≤1.0 mg/L
Cr(VI)	≤1.5 mg/L
Cd	≤0.3 mg/L
유기인	≤1.0 mg/L
테트라클로로에틸렌	≤0.3 mg/L
트리클로로에틸렌	≤0.1 mg/L
기름성분	≤5 %

제 13 절 결론

본 장에서는 국내외 레디믹스트 기술의 현황 조사를 위해 레디믹스트 관련 국내 품질 규정을 조사하였고, 국내외 기술 수준 및 산업동향과 레디믹스트 제품의 생산량 등을 조사하였다. 또한 현장배합 숏크리트의 국내 시공실태 파악을 위해 숏크리트의 국내·외 품질규정을 고찰하였고, 문제점 파악을 위해 실시한 현장설문조사 결과를 분석하였다. 그리고 실무의견 수렴을 통한 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발방향을 모색하였으며 국내 숏크리트 골재 생산 시스템에 대해 조사하였고, 숏크리트 재료의 성능 실험과 현장 배합용 숏크리트 골재의 품질관리 실태 파악을 통해 레디믹스트 숏크리트 재료의 품질 선진화를 위한 방안을 모색하였다.

본 장에서는 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발에 대한 연구를 수행하였다. 레디믹스트 숏크리트의 품질 개선과 재료 분리 방지를 위해 최대골재치수를 8mm로 결정하여 압축강도 및 리바운드율 시험을 통해 적용성을 검토하였고 레디믹스트 숏크리트의 재료 분리를 최소화 할 수 있는 최적 믹싱 시간 및 혼합 회전속도를 도출하였다. 그리고 실내시험을 통해 합성섬유 및 혼화재의 최적 배합량을 산정하고 현장에 적용성 평가를 실시하였다.

그리고 산업 부산물로 생성되는 고로슬래그 미분말을 활용한 레디믹스트 숏크리트 개발 연구를 수행하였다. 먼저 국내·외 고로슬래그의 재활용 상황을 파악하고 성능평가를 실시해 고로슬래그의 치환율을 도출하였고 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 양생특성 파악을 위한 실내실험 및 현장적용성 평가를 실시하여 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 최적배합을 도출하였다.

또한 본 장에서는 현장상황에 따라 특성화된 기능을 발휘하는 다기능 레디믹스트 숏크리트의 개발에 관한 연구를 수행하였다. 우선 국내 터널 현장의 시공 현황을 파악하고 개발이 시급한 다기능 인자를 도출하였다. 그리고 다기능 인자에 따른 초기 배합을 결정하고 성능 발휘 실험을 실시한 뒤 현장에 타설하여 적용성 평가를 수행하였으며 이 결과를 토대로 다기능 레디믹스트 숏크리트의 최적 배합을 도출하였다.

본 장에서는 레디믹스트 숏크리트의 단일열화 및 복합열화에 의한 성능저하 요인을 분석하기 위하여 시험을 실시하였다. 단일열화 시험 결과는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 보통강도 콘크리트 보다 고강도 배합이기 때문에 다소 양호한 결과를

나타내었다. 복합열화 시험결과 또한 특수한 상황을 제외 하고는 일반강도 콘크리트 보다는 우수한 결과를 나타냈다. 또한 레디믹스트 숏크리트의 장기내구성 평가를 위해 수은압입 시험을 수행한 결과 현장 골재에 비해 훨씬 우수한 장기내구성능을 확인 할 수 있었다.

그리고 본 장에서는 레디믹스트 숏크리트의 공장 규격화 생산 시스템을 구축하고 현장에서 가장 효과적으로 시공이 가능한 현장 시공시스템을 제안하기 위해 국내 현장 배치플랜트 실태 조사를 실시하였다. 또한 기존 레디믹스트 생산 시스템 분석을 통해 개발 재료의 규격화된 생산 시스템을 구축하였고, 실제 제조공정 적용을 통해 각 규격별 레디믹스트 숏크리트 시제품을 생산하였다. 그리고 현장 배치플랜트 설비를 대처할 시공시스템을 도출함으로써, 재료 개발과 동시에 실제적인 현장 적용이 가능한 연구개발이 되고자 하였다.

본 장에서는 레디믹스트 숏크리트의 시공성 및 경제성 평가를 위해 설계단가 비교를 통해 초기 경제성 평가를 실시하였다. 그리고 현장 배치플랜트 활용시와 일체형 사일로 믹서 활용시의 시공프로세스 분석을 실시하여 공정, 자원 및 부지활용에 대한 분석을 실시하였다. 또한, 최종 경제성 평가를 위해 터널 공사 유형에 따른 생산 및 운반 단위 공사비 분석을 실시하였고, 성능 및 비용을 통해 VE에 의한 가치평가를 실시하였다.

본 장에서는 현장과 같은 조건에서 타설실험이 가능한 타설 시험기 제작을 위한 연구를 수행하였다. 기존에 운용되고 있는 숏크리트 타설장비의 특성을 파악하고 시험기를 제작하여 성능 평가를 수행하였다.

1. 레디믹스트 관련 기술현황조사

(1) 레디믹스트 재료는 재래식 현장배합 방식과 비교하여 품질의 균질성, 공기의 단축, 현장 준비 작업의 간단함 등의 장점을 가지고 있어 계속적으로 발전하고 있으며, 국내 기술 수준도 레디믹스트 재료의 혼합, 이송 및 시공과 관련하여 기계화 및 기술력의 발전으로 완전 자동화 단계로 전환되고 있는 추세인 것으로 조사되었다.

(2) 국내 산업동향을 조사한 결과 일반적인 시멘트 업계는 계속되는 건설경기 침체로 고전하고 있지만, 특성화된 레디믹스트 제품의 매출은 해를 거듭할수록 늘어나고 있는 것으로 조사되어 본 연구에서 개발하고자 하는 분말형 레디믹스트 숏크리트도 건설 현장에서 충분히 적용 가능성을 가질 것으로 판단된다.

(3) 국외 레디믹스트 관련 기술의 발전 동향을 조사한 결과 레미콘 및 레디믹스트 건설재료의 기술력 확보와 시공 선진화를 주도하는 국가들은 유럽지역으로 조사되었고, 우리나라는 개발 단계로 나타나 새로운 레디믹스트 제품 개발에 대한 연구가 계속적으로 필요한 것으로 나타났다. 또한, 레디믹스트 제품의 해외시장 성장추이는 매년 15% 이상의 성장을 보이고 있는 것으로 조사되었는데, 본 연구에서 개발하고자 하는 분말형 레디믹스트 숏크리트는 국외에서도 시도되지 않은 재료 개발로서 국외 시장 진출에 대해 충분한 가능성이 있는 것으로 판단된다.

2. 현장배합 숏크리트의 국내 시공실태 파악

(1) 현장설문조사 결과 국내 실무기술자들이 가장 중요하게 생각하고 있는 것은 골재 품질 및 입도와 신뢰성 있는 장기내구성인 것으로 나타나, 새로운 숏크리트 재료 개발을 위해서는 철저한 골재 품질 관리를 통해 장기내구성을 높일 수 있는 방안을 모색해야 함을 알 수 있었다.

(2) 숏크리트 리바운드량에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 숏팅 거리 및 각도, 골재최대치수 및 품질상태와 함께 숏크리트 배합의 적정성인 것으로 조사되었는데, 혼화재나 급결제의 성능보다는 골재 최대치수나 품질이 리바운드량에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타나 숏크리트 원재료의 품질관리가 매우 중요함을 보여주었다.

(3) 현장에서 사용되고 있는 골재 품질에 대한 설문조사 결과 가장 많이 사용되고 있는 골재최대치수는 13mm로 나타났는데, 국외 품질 규준과 비교하여 적정하지 않는 것으로 판단되었다. 또한, 골재최대치수의 과다로 인해 노즐 막힘, 작업지연 및 중단 사례가 발생하고 있고, 숏크리트 리바운드량을 크게 해서 시공성 뿐만 아니라 경제성 면에서도 문제점을 가지고 있는 것으로 나타났다.

(4) 숏크리트 타설 현장에서 골재가 반입된 후 세척작업을 실시하거나 사용 전 세척작업을 하는 경우는 조사대상의 54.1%로 나타났고, 세척작업을 전혀 실시하지 않는 경우는 39.7%로 나타났다. 또한, 석분 및 미분말이 골재에 섞여 있으며 이로 인해 숏크리트 품질에 영향이 있을 것이라고 의견이 전체의 32.2%로 나타나, 현장 반입 골재의 품질관리에 문제가 있는 것으로 나타났다.

(5) 분말형 레디믹스트 숏크리트의 필요성에 대해서 응답자의 70% 이상이 개발이 필요하다는 의견을 나타내었고, 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발 및 활용을 통해 현장배합 숏크리트의 문제점들이 개선되고 숏크리트의 품질향상이 가능하다는 의견도 70% 이상으로 나타났다. 개선 가능한 사항으로는 숏크리트 골재의 효과적인 품질관리가 가능할 것이라는 의견이 31.0%로 가장 많았고, 골재 품질관리 개선으로 인해 숏크리트의 고강도화가 가능하다는 의견이 16.2%로 나타났다.

(6) 현재 국내 터널 현장 상황에서 필요한 다기능 숏크리트의 특성으로는 지하수 유입량이 과다하여 일반 숏크리트로 타설하기 어려운 경우 적용 가능한 숏크리트 특성(42.1%)과 예상치 못한 파쇄대 등이 출현했을 경우 적용 가능한 고강도 숏크리트 특성(31.4%)인 것으로 나타났다.

(7) 본 연구에서는 숏크리트 품질 향상, 운반 중 재료 분리 방지, 골재 품질 규격화 등을 위해 분말형 레디믹스트 숏크리트의 골재최대치수를 8mm로 선정하여 개발하였으며, 골재의 공장생산 시스템 구축 가능성 평가, 경제성 평가, 재료분리 가능성 평가, 포장화 가능성 평가 및 석산 공급 가능성 평가 등을 통해 연구개발을 수행하였다.

(8) 본 연구개발에서는 숏크리트 적용대상, 현장여건, 설계조건 등에 맞추어서 변화되는 설계기준강도를 가지는 분말형 레디믹스트 숏크리트를 개발하였다. 포장된 제품형태로 출시될 때 구매자의 요구에 따라 필요한 설계기준강도를 부여할 수 있고, 연약한 암반대 출현시 적용 가능한 고강도용 및 과도한 출수 지역 출현시 적용 가능한 차수용 등 다기능 인자를 고려한 레디믹스트 숏크리트를 개발하였다.

(9) 본 연구에서는 숏크리트의 품질적인 측면과 경제적인 측면을 모두 고려할 수 있는 고로슬래그 미분말의 적정 치환율을 찾았으며, 재료 실험 및 현장타설 실험을 통해 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트를 개발하였다.

3. 레디믹스트 숏크리트 재료 고품질화

(1) 현장에서 적용되고 있는 숏크리트용 골재의 최대치수는 13mm를 포함한 이상의 것을 사용하는 경우가 80%가 넘는 것으로 조사되어, 시공성 및 경제성 저하와 함께 숏크리트 품질 저하를 유발하는 것으로 나타났다. 따라서 골재최대치수에 대한 개선이 필요할 것으로 판단된다.

(2) 국내 숏크리트 배합설계의 개선을 위해서는 골재최대치수를 가능한 한 범위내로 낮추어 골재 입도 개선을 통한 숏크리트 품질 향상을 모색하고, 강섬유 혼입량 품질기준을 80~90%로 개선하고 합리적인 혼입량 결정을 통해 숏크리트의 시공성, 휨 인성 및 에너지 흡수 능력을 향상시켜야 한다.

(3) 굳지 않은 콘크리트의 물리 특성을 분석할 결과 굵은 골재 크기가 커질수록 슬럼프가 증가하는 경향을 보였고, 동일 단위수량 및 단위 시멘트량의 경우 골재의 크기가 작을수록 컨시스턴시는 불리해짐을 알 수 있었다. 그러나 연행공기는 굵은 골재의 크기가 커질수록 감소하는 경향을 나타내어 골재 크기가 커질수록 공기연행제의 함량이 증가되어야 하고, 골재 크기가 작아질수록 유동화제의 첨가량이 증가되어야 할 것으로 판단된다.

(4) 경화된 콘크리트의 압축강도 및 동탄성계수를 분석한 결과 굵은 골재의 크기가 커질수록 압축강도가 감소하는 경향을 보였고, 재령 7, 28일에서 골재 크기가 커질수록 동탄성 계수가 감소하는 경향을 보여 내구성적인 측면에서는 불리한 결과를 나타내었다.

(5) 굵은 골재 최대치수가 작아질수록 굳지 않은 콘크리트에서는 유동성 측면에서 점성이 증가하여 좋지 않은 결과를 보였으나, 골재 입자의 충전 효과로 인해 연

행 공기량은 높게 나타났다. 또한, 경화된 콘크리트에서는 골재 치수가 작을수록 강도 증진 및 동탄성계수 증가가 나타났으며 내구성적인 측면에서 우수할 것으로 판단된다.

(6) 혼화재 종류 및 치환량에 따른 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프를 분석한 결과 고로슬래그의 경우 치환량 증가에 따라 수화 반응이 지연되고 슬래그의 유리질 표면에 의한 윤활 작용으로 슬럼프 수치는 증가하는 경향을 보였다. 반면, 실리카 흄을 적용한 경우에는 콘크리트의 점성 증가로 인해 유동성이 크게 상실되는 경향을 보였다.

(7) 혼화재 종류 및 치환량에 따른 굳은 콘크리트의 압축강도와 동탄성계수를 분석한 결과 실리카 흄을 혼입한 경우에는 측정값이 Plain과 대비하여 크게 증가되는 경향을 나타내었는데, 실리카 흄의 미세한 입자에 의한 미세 충전 효과와 높은 비표면적에 의한 것으로 판단되었다. 고로슬래그를 혼입한 경우에는 실리카 흄의 경우보다는 압축강도 및 동탄성계수가 크게 증가되지는 않았으나, 동일 슬럼프를 기준으로 할 때 단위 수량이 대폭 감소될 수 있는 경향이 크기 때문에 실리카 흄에 필적할만한 강도와 내구 특성을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

(8) 실리카 흄을 사용할 경우보다 고로슬래그를 숏크리트 및 콘크리트 배합에 적용할 경우에 단위 수량이 감소되고 슬럼프 증가에 의해 강도증진 및 내구성 개선 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대되고, 경제성 측면에서도 고로슬래그의 가격이 실리카 흄 가격의 약 5% 수준으로 더 저렴하기 때문에 고성능 숏크리트나 고성능 콘크리트의 혼화재로 사용하는 것이 보다 유리하다고 판단된다.

(9) 급결제의 종류에 따른 재령별 압축강도 변화 살펴본 결과 알루미네이트계 급결제를 사용한 시편의 최종 압축강도는 급결제를 사용하지 않은 Plain 또는 알카리 프리계 급결제를 사용한 시편에 비해 약 20~30% 정도 낮은 압축강도를 나타내었다.

(10) 국내 터널 현장에서 실제 사용되고 있는 숏크리트용 골재의 표면수와 표층 및 심층부의 함수율 차이를 비교한 결과, 표면수는 기준에 만족하고 있으나 표면과 내부의 함수율 차이가 많게는 4% 이상 차이가 발생하였다. 그리고 표층부의 경우 약 30%, 내부에서는 약 50% 정도로 요구되는 표면수 요건을 만족시키지 못하고 있

는 것으로 나타났다. 따라서, 터널 현장에서는 골재 관리시 직사광선 및 강우 등으로부터 골재를 보호할 수 있는 가설장소를 설치할 필요가 있으며, 표면수 측정시 표면과 내부 간의 편차를 가능한 줄일 수 있는 방안을 강구해야 할 것으로 판단된다.

(11) 골재 채취 현장별 굵은 골재의 입도분포를 살펴본 결과 조사된 굵은 골재의 입도 분포는 KS 기준에 비해 크기가 큰 쪽으로 상당히 치우쳐 있는 것으로 나타났는데, 이와 같은 결과는 숏크리트용 골재가 다른 콘크리트용 골재와 같이 별도로 관리되고 있는 것이 아니라, 콘크리트용 골재를 부순 다음 생산되기 때문에 현실적으로 입도 조정이 시행되고 있지 않기 때문인 것으로 판단된다.

(12) 국내에서 생산되는 숏크리트용 굵은 골재의 경우 밀도, 흡수율, 0.08㎜체 통과율, 및 점토 덩어리 등의 기준을 대부분 만족하고 있으나, 쇄석에 의한 편장석 함유량이 높고 미립석 분량이 기준치보다 상당히 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 문제로 인해 콘크리트 유동성을 포함하는 물성이 저하되고 결합재(주로 시멘트)와의 부착력이 약화되는 등 많은 문제를 발생시킬 수 있는 개연성에 노출되어 있는 것으로 나타났다.

(13) 골재 생산업체에서 출하되는 골재는 별도의 생산 관리 시스템이 마련되어 있지 않아 석분토 및 이물질의 완벽한 세척이 어렵고, 골재 입도도 불완전한 상태로 이와 같은 현재의 골재 생산 및 공급 시스템이 현장타설 콘크리트나 숏크리트의 품질 저하 요인의 상당한 부분을 차지하고 있는 것으로 판단된다.

(14) 본 연구에서는 고로슬래그 분말을 10~50% 수준으로 시멘트를 치환해 시험을 진행하였으며, 고로슬래그를 사용하였을 경우 초기 수경반응 지연현상과 슬래그 유리질 표면의 전단 미끄럼 현상에 의한 유동성 개선 효과로 인해 단위 수량을 3~17% 수준으로 감소시킬 수 있었고, 압축 강도를 Plain 대비 최대 70% 이상을 증진시킬 수 있었다. 또한 고로슬래그의 잠재 수경반응에 의해 장기 내구성 역시 증진되는 것을 확인할 수 있었기 때문에 숏크리트 재료로서 고로슬래그의 활용이 충분히 가능함을 알 수 있었다. 그러나 30%를 넘는 배합 조건에서는 초기응결 지연 및 경화불량이 발생될 수 있기 때문에 그 이하로 사용되는 것이 타당하다고 판단된다.

4. 레디믹스트 숏크리트 개발

(1) 골재최대치수를 8mm, 10mm, 13mm로 변화시켜 현장에 타설하여 압축강도, 슬럼프 및 리바운드율 실험을 실시한 결과 압축강도 차이는 8mm 골재에 의한 숏크리트의 강도차이가 10mm나 13mm 골재에 비해 큰 차이를 보이지 않았으며 리바운드 저감효과는 다른 골재 치수에 비해 우수하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 슬럼프 실험 결과 8mm 골재의 경우 가장 큰 값을 보임으로써 유동성 및 작업성이 가장 우수할 것이라고 판단되었다. 그리고 고로슬래그 및 실리카 흄 등의 혼화재를 혼입한 배합에 골재최대치수 8mm를 적용하였을 경우에도 우수한 강도, 리바운드율, 슬럼프 특성을 보여 레디믹스트 숏크리트 배합에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

(2) 현재 골재 생산과정에서의 문제점을 파악하고 숏크리트용 골재최대치수 개선에 대한 의견을 검토하기 위해 실무기술자들을 대상으로 현장설문조사를 실시한결과 대부분의 기술자들이 골재최대치수 8mm수준의 숏크리트용 골재 필요성에 대해 공감하였고 이에 대한 필요사항으로 생산설비 확충을 최우선으로 꼽았다. 따라서 크러싱 장비와 스크린 등의 확충을 통해 최대치수 8mm 숏크리트용 골재 생산을 가능케 하여 생산원가를 절충한다면 숏크리트의 품질 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

(3) 레디믹스트 숏크리트 생산공정 시 재료분리를 확인하기 위해 믹서, 믹서 하부, BCT 상차 및 이동후, 사일로 제품 거출 시의 골재 샘플을 채취하여 입도분포 및 분산상태를 살표본 결과 믹서 및 믹서 하부에서 전반적으로 양호한 입도 분포 및 분산성을 확인 할 수 있었다. 또한 BCT 차량에 직상차 시 분말형 레디믹스트 숏크리트의 조골재 흐름성 저하에 따라 BCT 맨홀 하부의 잔분량이 다소 늘어남을 알 수 있었는데 이는 BCT 상차시 상부 맨홀(앞단, 중간단, 끝단)의 위치를 바꿔가며 상차할 경우에 해결 할 수 있는 문제로 보인다. 그리고 이동 진동에 의한 재료의 분리 현상은 나타나지않았으며, 이는 재료의 넓은 입도분포의 최밀충전에 의한 결과라고 생각된다. 마지막으로 사일로에서 제품 거출시 제품의 Low level 충전/거출 방식의 관리를 통해 재료 분리를 최소화 할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

(4) 재료분리를 최소화 할 수 있는 믹싱시간 및 혼합속도 도출 결과 투입순서를 ① 잔골재 투입(S1,S2,S3)→② 강섬유 및 경량혼합재 (Silica fume)→③ 시멘트, 슬래그분말, S5(조골재) 순으로 투입함으로써 균질한 혼합 분산성을 얻을 수 있었고 ① 최초 믹싱 개시전 믹서 속도 35%→② 믹싱 개시중 속도 80%→③ 믹싱 마무리 속도 35%로 가변하면서 120~180초 동안 믹싱할 경우 재료 분리 현상이 거의 발생하지 않음을 확인 할 수 있었다,

(5) 1,2차 합성섬유 혼입량 시험 결과 PP계열과 PVA계열의 경우 혼입량이 증가할수록 슬럼프가 저하되는 경향을 보였으며 특히 PVA 계열에서는 슬럼프 감소가 크게 나타나 레디믹스트 숏크리트에 PVA 섬유 사용시 유동화제 혼입량 산정에 각별한 주의가 필요할 것으로 생각된다. 그리고 압축강도 실험 결과 PVA계열은 혼입량 증가에 따라 압축강도가 다소 증진되는 경향을 보였지만 PP 계열에서는 혼입량 및 길이 변화에 의한 압축강도 변화 현상이 발견되지 않았다. 그리고 C사의 PP계열 제품인 CP-C,D 제품은 기존 제품보다 동일 혼입량 대비 우수한 휨인성 시험 결과를 보여 레디믹스트 숏크리트 최종배하에 적용시 경제적이며 우수한 품질을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

(6) 현장타설 실험 결과 레디믹스트 골재 사용 배합의 28일 재령 강도가 현장골재 배합에 비해 약 15~25% 정도 증진되는 것을 알 수 있었으며 숏크리트 품질 기준인 21MPa보다도 훨씬 우수한 강도 특성을 보임을 알 수 있었다. 또한 휨강도 역시 숏크리트 품질기준을 훨씬 상회하는 결과를 보였다. 그리고 강섬유 대체 합성섬유로 CP-C 합성섬유 적용시 12kg/m^3 이상 혼입한 경우 강섬유와 비슷한 정도의 휨특성을 보였다.

(7) 실내실험과 현장실험을 통해 다음과 같은 분말형 레디믹스트 숏크리트 최적 표준배합을 도출 하였다.

분말형 레디믹스트 숏크리트 최적 표준 배합

Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재 (kg)				합성섬유 (kg/m^3)
					S1	S2	S3	S4	
8	12	45.6	212	465	560	347	332	347	12

5. 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 개발

(1) 고로슬래그 미분말은 고로방식의 선철공정에서 선철의 부산물로 생성되는 산업 부산물로서 발생량의 2/3이 시멘트용, 1/5가 도로용으로 사용되고 있다. 2002년의 경우 고로슬래그는 재활용율이 82%에 달하며 국내 고로슬래그의 재활용 기술은 선진국과 큰 차이가 없다. 용광로 대체 기술인 파이넥스 공법으로 인해 고로슬래그의 원재료비 상승 및 시공에 문제가 생길 것이라는 업계의 소수 의견이 제시되었지만 슬래그는 고로슬래그 외에 전기로에서 생산이 되는 제강 슬래그 및 그 외의 슬래그도 사용 되어 질 수 있다고 판단되며, 현재 제강 슬래그의에 대한 활발한 연구가 수행 되고 있어 국내 슬래그 산업 및 건설업계에 미칠 영향은 크지 않을 것으로 생각 된다.

(2) 고로슬래그 분말도에 따른 강도발현 시험결과 고로슬래그 분말도가 커질수록 초기강도의 발현이 우수함을 알 수 있었다. 특히 1종의 고로슬래그를 사용하였을 시 우수한 초기강도 발현 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 경제성의 문제가 있어 알칼리 프리계 급결제를 투입한 3종 고로슬래그 분말을 혼입시 치환율 30%에서 가장 적정한 초기강도 및 장기 강도 특성을 얻을 수 있었다.

(3) 알루미네이트계 급결제를 적용한 저강도의 숏크리트에서는 고로슬래그를 치환한 배합이 실리카 흄을 치환한 배합의 약 74~81% 정도 수준의 강도 발현을 나타냈지만, 알칼리 프리계 급결제를 적용한 고강도의 숏크리트에서는 고로슬래그를 치환한 배합의 강도 발현이 실리카 흄을 치환한 배합과 유사하거나 4% 정도 더 크게 나타났다.

(4) 고로슬래그 시편의 SEM 촬영 결과 경화 초기에는 수화생성물의 크기가 감소하고 고른 분포를 나타내며 경화 후기에는 보다 치밀한 구조를 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 초기 수화생성물의 크기가 작고 균일하여 지속적으로 C-S-H겔이 생성되어 공극을 채우고, 다른 수화상과 결합하며 미반응의 슬래그 골재 등과 강하게 엉겨 붙어 치밀해 지기 때문으로 사료되며 따라서 고로슬래그 혼입 숏크리트의 경우 장기 강도 특성이 일반 숏크리트에 비해 더 우수 할 것으로 판단된다. 또한 고로슬래그 숏크리트의 용출시험 결과 Pb, Cu, Cd 등 전 항목에 대해 유해성분이 검출이 되지 않았다. 따라서 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트는 환경적으로도 안전 할 것으로 판단된다.

(5) 현장타설 실험을 통해 알칼리 활성화제 혼입시 3종 고로슬래그 미분말의 적용성을 확인 할 수 있었고 고로슬래그 미분말 레디믹스트 숏크리트에 플라이 애쉬를 첨가 한 배합의 강도결과 초기 및 장기 재령 강도에서 일반 레디믹스트 숏크리트 보다 우수하고 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트와 거의 비슷한 정도의 강도를 보임을 알 수 있었고 플라이 애쉬 혼입 레디믹스트 숏크리트의 적용성도 확인 할 수 있었다.

(6) 이동식 사일로를 이용해 레디믹스트 숏크리트를 현장에 타설한 결과 현장골재를 사용한 배합 보다도 초기강도, 재령 28일 강도 모두에서 작게 나타났다. 이는 사일로를 이용한 레디믹스트 배합의 운반시 재료 분리가 발생되어 숏크리트의 강도가 제대로 발현되지 않은 것으로 판단된다.

(7) 실내실험 및 현장실험을 통해 본 절에서 도출한 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 최적 표준배합은 다음과 같다.

고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 최적 표준 배합

Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재 (kg)				고로슬래그 (kg)	합성섬유 (kg/m3)
					S1	S2	S3	S4		
8	12	45.6	212	325	560	347	332	347	140	12

6. 다기능 레디믹스트 숏크리트 개발

(1) 국내 터널붕락 자료의 분석 내용을 참고하고 현장설문조사를 통해 얻은 실무 의견들을 수렴하여, 다기능 레디믹스트 숏크리트의 여러 가지 기능성 중에서 고차수성과 고강도를 주요 기능 인자로 채택하고 개발 방향을 결정하였다.

(2) 다기능 레디믹스트 숏크리트 초기개발을 위해 재유화형 분말수지 2종을 선택하여 적용성 평가를 수행한 결과 합성 수지 혼입시 Plain 배합 대비 13%정도의 강도 증진 효과를 보였으며 부착강도에서는 W-VAV 배합과 W-EVA 배합 모두 15~22% 정도의 부착강도 증진 효과를 보였다. 그리고 염소이온투과 시험결과 재유화형 분말수지를 혼입한 배합에서 대체로 양호한 결과를 나타내며 차수 기능이 발휘 됨을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 폴리머가 숏크리트 매트릭스 내에서 연속적인 폴리머 필름을 형성하여 내부 구조를 매우 치밀하게 만든 결과라 판단되며 장기적인 내구 성능 측면에서도 매우 양호한 재료라고 생각된다.

(3) 고강도 다기능 레디믹스트 숏크리트를 위해 실리카 흄을 배합한 경우 시멘트량 대비 5% 및 8% 혼입시에 모두 45 MPa에 가까운 압축강도가 발현됨을 확인 할 수 있었으며 연약 암반 구간 혹인 파쇄대 구간 등 고강도 숏크리트가 필요한 구간에 충분히 적용 할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 고차수성 다기능 레디믹스트 숏크리트 배합의 차수성 검토를 위해 수은압입 시험을 실시한 결과 차수용 혼화제를 혼입한 배합의 공극량이 0.0515cm^3 로 현장 골재 대비 약 50% 정도로 가장 작게 나타났다. 따라서 지하수 유출 구간이나 차수가 필요한 현장 타설 구간에 적용시 충분한 차수 효과를 발휘 할 수 있을 것이라고 사료된다.

(5) 본 연구를 진행하며 실내실험 및 현장실험을 통해 도출한 다기능 레디믹스트 숏크리트의 최적 표준배합은 다음과 같다.

표 3.7.12 다기능 레디믹스트 숏크리트 최적 표준 배합

배합명	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재				혼화재	
						S1 (kg)	S2 (kg)	S3 (kg)	S4 (kg)	실리카흄 (kg)	차수용 혼화제 (kg)
RM-고강도	8	12 ±2	45.6	212	442	560	347	332	347	23	-
RM-차수					465					-	30

7. 레디믹스트 숏크리트 장기내구성 평가

(1) 건조수축시험 결과 굵은 골재 최대치수의 차이가 건조수축에 미치는 영향은 많지 않았으며 섬유혼입 시 초기 강도 발현 후 건조수축이 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 섬유 혼입량이 증가함에 따라 건조수축량은 비례하여 감소하였고 본 연구에서 도출된 합성섬유 적정혼입량인 12kg/m^3 배합의 경우 매우 안정된 건조수축량을 나타내 분말형 레디믹스트 배합 적용시 건조수축에 의한 균열 및 안정성 문제는 없을 것으로 판단된다.

(2) 동결융해 저항성 단일 열화 시험결과, 전체적으로 동결융해 저항성이 모두 우수하게 나타났다. 그 중 RM-SF 배합이 300싸이클에서 94.2% 이상을 기록해 가장 우수하였으며 RM-FA 배합이 84.3%로 가장 낮은 수치를 보였다. 이는 부분적으로 플라이애시를 사용한 콘크리트의 표면에서 발생하는 공기량 손실과 표면의 부적합한 마무리나 양생에 의한 것이라 판단된다.

(3) 촉진 탄산화 단일 열화 시험 결과, 노출 4주까지가 가장 왕성하게 탄산화가 일어났으며, 노출기간 26주의 탄산화 깊이는 RM-SF 배합과 RM-PO 배합이 각각 14.5 , 15.4mm 로 가장 작게 나타났다. RM-PO 배합의 경우 폴리머 성분으로 인해 콘크리트와의 부착성을 증대시키고 팽창성 및 자체 강성이 우수해져 콘크리트 매트릭스가 치밀해진 결과로 판단되며 RM-SF 배합의 경우 실리카흄의 혼입으로 인해 매우 미세한 비정질의 실리카가 수화 초기부터 수산화칼슘과 결합하는 포졸란 반응으로 인한 것으로 판단된다.

(4) RM-BFS 배합의 경우 26주 동안 촉진탄산화에 노출한 결과 탄산화 깊이가 23mm로 가장 크게 나타났다. 이는 시멘트 수화시에 발생하는 수산화칼슘과 고로슬래그 미분말이 반응하여 콘크리트의 알칼리성이 약간 저하되었기 때문이라 판단된다.

(5) 촉진 탄산화 후 동결융해 시험 결과는 동결융해 단일열화 시험의 경우와 큰 차이가 없었다. 이는 탄산화에 의해 콘크리트 내부조직이 변화하여 동결융해 저항성에 영향을 미치기에 시험 기간이 다소 부족했던 것으로 사료되며, 차후 좀 더 가혹한 환경에서의 복합열화 시험이 필요할 것으로 보인다.

(6) 동결융해 후 촉진 탄산화 시험 결과를 살펴보면, 촉진 탄산화 단일열화 시험과 마찬가지로 노출 4주까지가 가장 왕성하게 탄산화가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 또한 단일열화 시험 데이터와 비교하여 전체적으로 탄산화 깊이가 늘어난 것을 확인 할 수 있는데, 이는 300 cycle의 동결융해 환경 노출에 의하여 콘크리트 내부의 균열 등으로 인하여 내부조직의 열화에 기인한 것으로 사료된다.

(7) 내약품 시험 노출 후 동결융해 시험 결과 , 10% $CaCl_2$ 침지 시험체와 $NaSO_4$ 침지 시험체의 경우 약품 노출 50일 이후 압축강도 측정결과가 예상 압축강도의 약 80%(29~36MPa) 수준으로 저하된 모습을 보였다.

(8) 또한 5% H_2SO_4 침지 시험체의 경우에는 약품 노출 50일 이후 압축강도 측정결과가 예상 압축강도의 약 60%(21~31MPa) 수준으로 저하된 모습을 보였다. 동결융해 단일압축강도 시험시 저하되었던 동탄성계수 수치 비율과 비교하면 저하 폭이 3개의 약품의 경우 모두 전반적으로 증가한 것을 확인할 수 있다.

(9) 장기 옥외폭로에 의한 열화특성 평가 시험은 압축강도 및 휨강도 특성을 분석하였다. 장기폭로시험은 최소 3년이상 경과된 시편을 가지고 최고 내구성 지수를 도출하게 되는데 본 연구에서는 총 1년 2개월 정도의 폭로시험을 통해 압축강도 및 휨강도 의 결과값으로 다소 양호한 값을 얻을 수 있었다. 추후 폭로 후 3년 경과시 추가적인 시험을 수행하여 레디믹스트 숏크리트의 장기 옥외폭로에 의한 물성 저하정도를 파악하고자 한다.

(10) 레디믹스트 숏크리트의 장기 내구성 평가를 위해 수은압입시험을 실시하여 숏크리트 내부 공극 특성을 평가하였다. 실험결과 고로슬래그 혼입 및 플라이 애쉬 혼입 레디믹스트 숏크리트의 경우 수화물의 크기가 작아 치밀한 숏크리트 조직이 만들어져 강도 및 동결융해에 영향을 주는 매크로 공극의 양이 적어 우수한 장기 내구성이 발현 될 것이라고 예상 된다. 그리고 레디믹스트 숏크리트의 경우 현장 배합에 비해 매크로 공극이 적어 현장 배합 보다는 우수한 장기 내구성을 보일 것으로 예상된다.

(11) 합성섬유 혼입률에 따른 레디믹스트 숏크리트의 장기 내구성은 혼입률이 증가함에 따라 섬유와 시멘트 페이스트 사이 매크로 공극 및 연행 공극의 양이 증가하여 장기 내구성이 미소하게 저하되는 것으로 사료된다.

8. 레디믹스트 숏크리트 공장생산 및 시공 시스템 구축

(1) 현장 배치플랜트 시스템에 대한 설문조사 결과 계량장치의 정밀도, 운반 및 배출장치, 시멘트 저장소, 자동작동 및 기록 항목에서 대체적으로 양호하게 운영되고 있었고, 반면, 현장 배치플랜트 시스템에서의 문제점은 골재저장소 및 야적장(30.2%)이 가장 높았고, 품질관리(24.5%)와 믹서배부의 청결상태 및 품질관리 측면(23,2%)이 그 뒤를 이었다. 이는, 전반적인 국내 현장 배치플랜트의 문제로 판단되며 현장 배치플랜트 생산 숏크리트의 품질을 저하시키는 주된 원인이라 사료된다.

(2) 본 연구에서는 레디믹스트 숏크리트의 체계적인 공장생산 및 규격화 생산 시스템 확립을 위해 생산 프로세스를 설계하였고, 생산 효율성을 증대시키고 품질 변동을 최소화 할 수 있는 공장 시스템 설계를 실시하였다. 그리고 제안된 레디믹스트 숏크리트 생산 시스템 설계(안)에서는 골재 최적입도조정, 원재료 투입방법, 투입순서, 믹싱혼합시간, 믹서회전속도 및 제품 이송속도 조정을 통해 제조상의 재료분리를 최소화 시킬 수 있게 하였다.

(3) 공장생산 과정에서의 재료분리 가능성이 있는 생산라인을 분석 검토하였으며, 이를 제어할 수 있는 공장 생산시스템 및 제조운영 방식을 제시함으로써 제조공정상 품질변동

을 최소화 할 수 있었다. 서브호퍼 충전 유지, 사일로 로우 레벨(Silo low level) 관리, 사일로 만실운영 등의 방법을 통해 규격별 레디믹스트 숏크리트를 제조공정에 의거하여 총 19종류의 시제품을 생산하였다. 또한, 안정된 품질의 규격화된 분말형 레디믹스트 숏크리트 제조를 위해, 제조공정상 각 공정라인에서의 품질관리 및 제조공정 검사기준을 마련하였다.

(4) 개발된 레디믹스트 숏크리트 재료를 가장 효과적으로 현장에 적용시킬 수 있는 시공 시스템을 도출하였는데, 현장 배치플랜트를 통하지 않고 공장생산된 숏크리트 재료를 믹싱과 함께 타설 장비에 공급하여, 개발된 재료의 품질을 가장 효과적으로 발휘할 수 있는 시공시스템을 제안하였다. 이는 기존 현장 배치플랜트에서 생산되는 숏크리트의 경우, 현장 골재수급 및 품질문제, 현장 배치플랜트 공간확보, 배치플랜트 운영비 및 레미콘 트럭 운영비 등 기존의 많은 제약을 해결할 수 있는 현장 시공시스템으로 기대된다

9. 레디믹스트 숏크리트 시공성 및 경제성 평가

(1) 분말형 레디믹스트 숏크리트와 현장 배치플랜트 설계단가를 근거로 경제성 평가를 한 결과 본 연구개발중인 분말형 레디믹스트 숏크리트가 약 3만원/M^3정도 높게 산출되었다. 하지만, 현장타설 숏크리트는 골재 수급부족에 따른 골재품질저하 (편장석률 증가, 토분함량증가 등) 및 현장 골재품질관리 부재로 인해 숏크리트의 주요 시공상 문제점이 지적되고 있다. 반면, 분말형 레디믹스트 숏크리트는 재료수급 안정화로 원활한 시공성 확보 및 고품질 숏크리트의 시공을 통한 시공원가 절감을 유도할 수 있으며(약 100억원/년 이상), 공장형 배합의 최적 입도선별 골재관리 및 자동화 혼합시스템에 의한 균질한 최적 제품혼합을 통해 최적의 품질을 확보할 수 있다고 판단된다.

(2) 레디믹스트 숏크리트는 재료가 공장생산을 통해 현장에 반입되기 때문에 현장 배치플랜트를 이용한 기존의 현장배합 숏크리트 타설공법에 비해 시공 프로세스의 단순화가 가능한 것으로 나타났고, 현장배합 단계가 생략되어 시공 단순화를 통한 시공성 향상이 가능한 것으로 나타났다. 그리고 공정관리 측면에서는 현장 배치플랜트 활용시 기존 대비 1 발파당 사이클 타임이 10분 단축이 가능하고, 일체형 사일로 믹서 활용시 장비 가동시간과 리바운드량 감소로 인해 기존 대비 최대 15분 단축이 가능한

것으로 나타났다. 또한, 일체형 사일로 믹서 장비를 활용할 경우 배치플랜트 운영에 따른 불필요한 인력 및 자원투입의 배제로 경제적인 시공이 가능한 것으로 나타났다.

(3) 공사 유형별로 숏크리트 1㎥당 단가를 비교하였을 경우 현장배합 방식에 비해 레디믹스트 방식이 공사 유형별로 편차는 있지만 3%~4% 정도 공사비 단가가 절감되는 것으로 나타났는데, 도로와 같이 현장 시공여건과 재료 수급여건이 양호한 현장보다는 지하철 및 철도와 같이 작업구 개설여건이 어려운 현장에서 간접비의 절감 효과가 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 특히, 도심지 지하철 공사의 경우 작업구 개설범위가 한정적이고 자재 야적장 등 부지활용이 제한적이기 때문에, 공장생산에 의한 레디믹스트 숏크리트의 적용은 실질적인 공간 활용성과 간접비 절감 효과가 더욱 크게 나타날 것으로 판단된다.

(4) 향후 본 제품이 시장에서 활성화 될 경우 숏크리트 재료비 및 변동비가 인하될 것으로 판단되고, 공장 거점의 증대로 레디믹스트 숏크리트의 운반거리를 감소시킬 경우 공사원가의 절감이 더욱 클 것으로 판단된다. 또한, 전용 장비(일체형 사일로 믹서)의 개발과 실용화가 이루어 질 경우 인력투입 및 작업시간의 감소로 인한 간접비의 추가적인 절감이 가능할 것으로 판단된다.

(5) 도로, 철도 및 지하철 터널의 공사비를 사례를 통해 분석한 결과 현장 노무인력 및 공사기간 단축으로 간접비의 경우 도로 터널에서는 약 2.4%, 철도 터널에서는 약 23%, 지하철 터널에서는 약 24% 정도 감소하는 것으로 나타났고, 전체공사비의 경우에는 도로 터널에서는 약 0.42%, 철도 터널에서는 약 3%, 지하철 터널에서는 약 2.6% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 조골재(8mm), 변동비(건조) 등 비용증가 요인이 있으나 리바운드량 감소에 의한 수량감소, 간이 배치플랜트(다수 개소) 미설치 등 직접공사비의 절감과 간접비의 감소로 전체공사비가 감소한 것으로 판단된다.

(6) 성능분석 결과 숏크리트 성능 개선에 필요한 항목 중 내구성이 24.2%로 가장 높은 가중치를 보였으며, 구조안정성, 경제성, 시공성의 순으로 높은 가중치를 보이고 있는 것으로 나타났다. 또한, 레디믹스트 숏크리트가 기존 현장타설 숏크리트에 비해 전 항목에 걸쳐 우수한 것으로 나타났는데, 내구성과 시공성 측면의 개선이 크게 향상되는 것으로

나타났다. 골재 품질 향상을 통한 숏크리트 재료 자체의 품질개선과 현장 배치플랜트 설치 배제로 인한 시공 프로세스 감소가 가장 높은 기여를 하고 있는 것으로 판단된다.

(7) 성능 및 비용분석을 종합한 가치분석 결과 레디믹스트 숏크리트가 현장배합 숏크리트에 비해 8~16% 정도의 가치향상을 보이는 것으로 나타났다. 레디믹스트 숏크리트는 기존 현장배합 숏크리트와 비용측면에서는 거의 동등하나 성능개선 효과가 우수한 성능강조형으로 판단된다. 또한, 공사비 분석에서 나타났듯이 현장 여건이 복잡한 철도, 지하철 터널에서는 비용 절감효과가 같이 나타나 가치혁신적인 측면도 보이고 있으며, 재료수급 여건이 개선되면 경제성의 개선효과가 커질 것으로 판단된다.

10. 숏크리트 타설시험기 개발.

(1) 1차년도 연구개발에서 완료된 숏크리트 타설 시험기 설계도면을 이용하여 2차년도에 현장타설 시험의 한계 및 제약조건을 개선하고, 숏크리트 재료의 표준적인 품질성능 시험이 가능한 숏크리트 타설시험기를 개발 완료하였다.

(2) 3차년도에서는 최종 도출된 레디믹스트 숏크리트 표준 배합비를 사용하여 동일한 조건으로 개발된 장비로 타설 성능평가를 수행하였다. 시험결과 현장타설 장비와 매우 유사한 성능을 발휘하는 것으로 나타났으며 추가적인 반복시험을 통해 시공 오차에 의한 품질저하성능정도를 데이터 베이스화 한다면 표준화된 숏크리트 타설시험 장비로서 완전한 요소를 갖출 수 있다.

(3) 터널에서 사용되는 숏크리트는 일반 콘크리트와는 달리 숏크리트 타설장비에 의해 정해진 압력이상의 토출압과 토출량 그리고 급결제에 의해 현장에서 수분내에 경화되는 특성을 가지고 있으며, 장비의 종류, 현장 노즐맨의 경험, 현장의 온도변화 등에 따라서 그 품질 특성이 달라지고 있으므로, 터널현장이 아닌 실험실에서 시멘트, 혼화재, 급결제 및 경화된 숏크리트 등 숏크리트관련 재료의 성능평가를 실시하기에 많은 어려움이 있어, 향후 이와 같은 표준화된 숏크리트 타설시험장비를 활용하여 재료별 또는 조건별 성능대한 비교평가를 실시할 경우, 강도특성, 급결특성, 리바운드량에 이르기까지 시험결과의 신뢰성을 높일 수 있으리라 판단된다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

본 연구개발의 최종목표는 현장타설 숏크리트가 가지는 불확실한 시공 품질, 강도 및 내구성 등의 품질저하에 대한 고질적인 문제를 해결하고, 산업부산물인 고로슬래그를 재활용하여 숏크리트 품질향상과 산업부산물의 경제적 재활용을 통해 국가자원을 확보하고 시공 품질을 향상시킬 수 있는 새로운 숏크리트 재료를 개발하고자 하는 것이다.

본 연구개발에서는 다음 표와 같은 연구내용을 계획하였고, 연구개발을 수행하였다.

표 4.1.1 연구개발목표별 계획대비 달성도

연구개발목표	연구개발 내용	계획대비 달성도(%)
· 국내외 레디믹스트 기술의 현황 조사	· 자료, 문헌 조사를 통한 국내외 레디믹스트 기술관련 품질규정 조사 · 국내 민간기업이 보유 레디믹스트 기술 수준 분석 및 국내외 레디믹스트 관련 제품 현황 파악 · 국내 레디믹스트 생산 시스템 분석	100
· 현장배합 숏크리트의 국내 시공실태 파악 및 레디믹스트 숏크리트의 개발 방향 모색	· 현장배합 숏크리트의 국내외 품질규정 조사 · 현장 실무기술자들을 대상으로 한 숏크리트 현장설문조사 수행 및 결과분석을 통한 시공 실태 및 문제점 파악 · 실무 의견 수렴을 통한 분말형 레디믹스트 숏크리트의 개발 방향 결정	100
· 분말형 레디믹스트 숏크리트 개발을 위한 숏크리트 재료의 고품질화 방안 제시	· 국내에서 생산되는 숏크리트 재료의 품질평가 · 국내 민간업체의 골재 생산시스템 분석 · 국내 터널 현장에서 적용되는 숏크리트용 골재의 품질성능 평가 · 분말형 레디믹스트 숏크리트의 품질 선진화를 위한 재료 규격화 방안 제시	100
· 다기능 레디믹스트 숏크리트 개발을 위한 국내 터널 현장의 시공특성 파악	· 국내 터널 현장의 시공 특성 조사 · 시공 특성에 따른 터널 현장의 분류법 제시 및 조사된 터널 현장 분류 · 분말형 레디믹스트 숏크리트의 다기능 부여를 위한 기능 인자 설정	100
· 숏크리트 굵은골재 최대치수에 따른 숏크리트의 성능평가	· 숏크리트 타설시험용 몰드제작 · 국내외 숏크리트 굵은골재 최대치수에 따른 물리성능 평가자료 조사 · 숏크리트 굵은골재 최대치수(8,10,13mm)에 따른 현장타설시험 수행	100
· 숏크리트 타설실험의 효율성 증대를 위한 숏크리트 타설시험기 설계	· 국내외 숏크리트 타설장비 현황 조사 · 타설시험기 설계를 위한 고려 인자 결정 · 숏크리트 타설시험기의 설계도면 작성	98

표 4.1.1 연구개발목표별 계획대비 달성도(계속)

연구개발목표	연구개발 내용	계획대비 달성도(%)
▪ 국내 고로슬래그의 현황 및 물리·화학적 특성 파악	▪ 고로슬래그의 국내 발생 현황, 생산능력(파이넥스 공법) 및 발생 메커니즘 조사 ▪ 국내외 고로슬래그의 경제적 재활용 사례 조사 ▪ 고로슬래그 미분말의 화학조성 분석 ▪ 고로슬래그 미분말의 물성 및 재료특성 파악	100
▪ 숏크리트 장기내구성 평가를 위한 고려 인자 파악	▪ 숏크리트의 성능저하에 영향을 미치는 열화인자 고찰 ▪ 숏크리트 타설 환경에 따른 장기내구성 평가 인자 설정	100
▪ 현장 적용성 평가를 통한 분말형 레디믹스트 숏크리트의 초기개발 및 재료분리 최소화 방안 연구	▪ 분말형 레디믹스트 숏크리트의 초기배합 결정 ▪ 현장타설실험을 통한 초기배합의 품질 평가 -압축강도 및 휨강도 평가, 리바운드 및 보강섬유 뭉침현상 평가, 숏크리트 구성재료에 따른 성능평가 ▪ 골재 입도 조정을 통한 재료분리 최소화 방안 검토 ▪ 재료분리를 최소화하기 위한 최적 믹싱 시간 도출 ▪ 동일배합의 현장 숏크리트와의 품질 비교	100
▪ 초기개발된 분말형 레디믹스트 숏크리트의 현장 시공성 및 경제성 평가	▪ 현장 숏크리트 교반장비 실태 조사 ▪ 분말형 레디믹스트 숏크리트의 효율적인 운송방법 및 현장 믹싱 시스템 분석 ▪ 현장배합 숏크리트와의 시공 단가 비교를 통한 초기개발 제품의 경제성 평가	100
▪ 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 초기배합 설계	▪ 고로슬래그 미분말의 숏크리트에 대한 적용성 평가 ▪ 현장타설실험을 통한 초기배합의 품질 평가 -압축강도 및 휨강도 평가, 리바운드 및 보강섬유 뭉침현상 평가 ▪ 고로슬래그 치환율에 따른 레디믹스트 숏크리트의 강도특성 분석	100
▪ 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 양생 특성 및 환경영향 평가	▪ 숏크리트 공시체의 SEM 촬영을 통한 양생특성 및 메트릭스의 변화특성 파악 ▪ 숏크리트 공시체의 용출시험을 통한 산업부산물의 환경영향 평가 수행	100
▪ 다기능 레디믹스트 숏크리트의 초기배합 설계	▪ 설정된 다기능 인자에 따른 분말형 레디믹스트 숏크리트의 초기배합 설계 실시 ▪ 각종 혼화재 특성에 따른 다기능 인자의 성능발휘 시험 수행 ▪ 성능발휘 시험 평가를 통한 다기능 레디믹스트 숏크리트의 초기 배합비 결정	98
▪ 숏크리트 타설실험의 효율성 증대를 위한 숏크리트 타설시험기 제작	▪ 국내 실험실의 타설시험기 현황 조사 ▪ 타설 시공성을 고려한 타설시험기의 적정 용량 산출 ▪ 숏크리트 타설시험기의 시제품 제작	100

표 4.1.1 연구개발목표별 계획대비 달성도(계속)

연구개발목표	연구개발 내용	계획대비 달성도(%)
▪ 분말형 레디믹스트 숏크리트의 최종 배합비 결정	▪ 초기배합 개선을 통한 최종배합비 결정 ▪ 현장 적용성 평가를 통한 품질평가 수행 ▪ 현장배합 숏크리트와의 비교실험을 통한 품질 우수성 평가 수행 ▪ 합성섬유 최적 혼입량 도출 및 레디믹스트 숏크리트 적용성 평가 수행	100
▪ 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 최종 배합설계	▪ 경제성 및 품질을 고려한 고로슬래그 레디믹스트 최종배합비 도출 ▪ 현장 적용성 평가를 통한 품질평가 수행 ▪ 일반 레디믹스트 숏크리트와의 비교 평가를 통한 강도특성 및 품질평가 수행	100
▪ 고로슬래그 숏크리트의 재료 품질 평가	▪ 수은압입시험을 통한 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 공극분포특성 평가	100
▪ 적용인자에 따른 다기능 레디믹스트 숏크리트의 최종 배합설계	▪ 적용인자별 다기능 레디믹스트 숏크리트의 최종 배합비 결정 ▪ 실내실험을 통한 다기능 레디믹스트 숏크리트의 적용인자에 따른 품질성능 평가 ▪ 현장 적용성 평가를 통한 품질평가 수행	100
▪ 단일 열화인자 평가를 통한 분말형 레디믹스트 숏크리트 내구성 평가	▪ 레디믹스트 숏크리트의 실내촉진시험을 통한 단일열화인자 평가 수행	100
▪ 복합열화시험을 통한 분말형 레디믹스트 숏크리트의 장기 내구특성 평가	▪ 레디믹스트 숏크리트의 복합열화시험 및 옥외폭로시험 수행 ▪ 복합열화특성 파악을 통한 장기내구성 평가	100
▪ 대량 생산 및 규격화 생산을 위한 레디믹스트 숏크리트의 자동 생산 시스템 확보	▪ 기존 레디믹스트 콘크리트 생산 시스템 분석 ▪ 레디믹스트 숏크리트 규격화 생산 시스템 설계(안) 및 생산 공정 품질관리법 제안 ▪ 굵은골재 최대치수 적용에 대한 국내업계 및 사업화 관련 설문조사 수행 ▪ 재료생산시 믹싱, 재료거출, 운반 과정의 재료분리 가능성 평가 ▪ 레디믹스트 숏크리트 시제품 제작 및 생산	100
▪ 분말형 레디믹스트 숏크리트의 현장시공 프로세스 분석을 통한 시공 우수성 평가	▪ 기존 숏크리트의 현장시공 시스템 분석 ▪ 설계된 자동생산 시스템의 시공프로세스 분석 ▪ 현장 배치플랜트 및 전용장비 활용시의 시공프로세스 분석 ▪ 현장배합 및 공장배합 숏크리트의 시공프로세스 비교 및 평가	100
▪ 레디믹스트 숏크리트의 운송시간 경과에 따른 품질 변화 양상 평가	▪ 레디믹스트 숏크리트의 운송시간 경과에 따른 슬럼프 및 공기량 변화 측정 ▪ 운송시간에 따른 레디믹스트 숏크리트의 품질 유지 방안 고려	98

표 4.1.1 연구개발목표별 계획대비 달성도(계속)

연구개발목표	연구개발 내용	계획대비 달성도(%)
▪ 레디믹스트 숏크리트의 최종 경제성 평가	▪ 고로슬래그 치환율 변화에 따른 경제성 분석 ▪ 레디믹스트 숏크리트의 재료비 상승단가 검토 ▪ 현장배합과 레디믹스트 숏크리트의 품질 대비 경제성 비교 ▪ 시공시스템 간소화로 인한 간접비 감소율 파악(현장 배치플랜트 및 전용장비 활용시의 시공 프로세스 비교 분석) ▪ 레디믹스트 숏크리트의 국내수요 및 시장성 조사를 통한 최종경제성 평가 ▪ 공사 유형별 숏크리트 생산 및 운반 단위 공사비 분석(터널 연장 및 유형별 공사비 분석) ▪ 성능 및 비용분석을 종합한 가치분석 평가	100
▪ 레디믹스트 숏크리트의 시방지침(안) 및 재료의 품질관리 규정(안) 제안	▪ 레디믹스트 숏크리트용 재료의 재료생산 및 공정관리 편람(안) 제안 ▪ 분말형 및 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트의 시공·품질관리 편람(안) 제안	100
▪ 개발된 숏크리트 타설시험기를 이용한 레디믹스트 숏크리트의 품질 평가 수행	▪ 개발된 타설시험기의 성능 평가를 위한 현장 적용성 실험 수행 ▪ 현장 적용성 실험을 통한 타설시험기의 문제점 분석 및 보완 ▪ 숏크리트 타설시험기의 사용 매뉴얼 작성	100

제 2 절 대외 기여도

본 연구개발에서는 숏크리트의 품질 개선 및 성능 향상을 위한 대안으로 혼화재 및 급결제에만 국한되어 있던 연구를 탈피하고 숏크리트용 원재료에 대한 품질 개선을 통해 강도 및 내구성을 효과적으로 개선할 수 있는 새로운 숏크리트 재료를 개발하며, 또한 산업부산물의 경제적 재활용을 위해 고로슬래그 미분말을 혼합한 재료를 개발하고자 하였다.

본 연구를 통해 개발되는 "분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트"는 숏크리트 재료의 배합 및 제조를 건조 모르타르 전문 제조업체에서 사전에 미리 실시하여, 골재의 철저한 토립분 관리, 확실한 입도관리, 전문배합 장치를 이용한 엄격한 품질관리 및 재료의 규격화 등을 거쳐 시공 품질을 극대화 시키고 현장에서의 시공성과 품질을 개선할 수 있게 제조되는 숏크리트 재료이다. 이와 더불어 산업부산물인 고로슬래그 적용 기술을 개발하여 본 연구개발의 최종목표인 "산업부산물을 재활용한 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 개발"을 이룩하고 이로 인해 국가 자원의 절감 및 경제적인 자원 재활용으로 국가 정책에 기여할 수 있을 것이다.

○ 연구개발과제 본연의 연구 수행에 기여

재료 차체의 품질 개선을 통해 레디믹스트 숏크리트, 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 및 다기능 레디믹스트 숏크리트의 최종배합비를 도출하였고, 현장배합 숏크리트보다 우수한 품질을 실내실험, 현장 적용성 평가, 합성섬유 최적 혼입량 검토, 공극분포특성, 단일 및 복합열화시험을 통한 장기내구성 평가 등 다양한 방법을 통해 검증하였다.

○ 개발 재료의 산업적 활용 단계 도입에 기여

개발된 재료의 규격화 공장생산을 위해 생산 시스템을 구축하였고, 생산 공정 품질관리 제안, 제품 생산 라인에서의 재료분리 최소화 방안 제시 등을 통해 제품 출시가 가능한 단계를 이루었다. 특히, 다양한 종류의 레디믹스트 숏크리트 시제품을 실제 생산하여 현장 적용성 평가에 활용하였다.

○ 개발 재료의 시공성 및 경제성 검증에 기여

기존 현장배합 숏크리트와의 시공프로세스 비교 분석을 실시하여 현장 배치플랜트 활용시 및 현장 배치플랜트를 제거한 전용장비(일체형 사일로 믹서) 활용시의 시공프로세스를 평가하였고, 공사 유형별 숏크리트 생산 및 운반 단위 공사비 분석, 터널 연장 및 유형별 공사비 분석을 실시하여 가장 실제적인 시공성 및 경제성 검증을 실시하였다. 특히, 성능 및 비용 분석을 통한 가치분석을 실시하여 개발된 레디믹스트 숏크리트가 기존 현장배합 숏크리트에 비해 8~16%의 가치향상이 가능함을 확인하였고, 성능개선 효과가 우수한 성능강조 및 기치혁신면을 검증하였다.

○ 개발 재료 활용을 위한 규격화 제안에 기여

연구개발성과로서 "분말형 레디믹스트 숏크리트 공정관리 및 시공·품질관리 편람(안)"을 제안하여 개발 재료의 실제적인 활용에 있어 공장에서의 재료 생산단계에서부터 현장 시공 및 품질 관리, 적용된 재료의 품질시험 단계까지 사용자가 효과적으로 본 재료를 활용할 수 있도록 기본적인 지침을 제시하였다. 본 편람(안) 국내 민관의 전문가들을 대상으로 수차례에 걸친 자문회의를 실시하고 다양한 의견을 수렴하여 제안되었다.

○ 재료 실험을 위해 실험장비 구축에 기여

지금까지 숏크리트 관련 실험분야에서 실외 타설실험을 위해서는 고가의 국외 장비를 수입하여 사용하거나, 숏크리트 타설머신을 보유하고 있는 몇몇 기관 및 연구소에만 의지하여 연구가 이루어져왔다. 이로 인해 다양한 변수와 아이디어를 반영하여 실험을 수행하는데 많은 제약이 있었으며, 소규만 실험을 위해서도 대형의 현장 타설머신을 활용할 수 밖에 없는 현실이었다. 본 연구개발에서 제작된 숏크리트 타설시험기는 국내 기술력으로 최초로 제작된 숏크리트 및 모르타르 재료의 타설시험기로서, 다양한 변수를 고려한 실외 타설실험 뿐만 아니라 소규모 재료에 대한 타설실험을 손쉽게 수행할 수 있어 숏크리트 재료 실험 분야에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구개발을 통해 얻은 결과와 이를 통해 개발된 기술들은 다음과 같은 측면에서 활용 가능할 것으로 판단된다.

○ 시공성을 갖춘 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 개발을 통한 숏크리트 건설기술의 확보

- 연구를 통해 개발되는 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 공법은 공장형 배합의 최적 골재관리, 각기 다른 입도 및 비중을 갖는 재료들의 최적혼합 등을 꾀할 수 있으며, 현장에서 재료 계량, 재료 야적 및 재료 품질관리 등이 필요없이 공장에서 생산되어 포장된 재료를 믹싱만 해서 사용하면 되므로 숏크리트 시공 품질을 월등하게 향상시킬 수 있음.
- NATM 개념에 의한 터널 굴착시 노출되는 암반의 특성에 따라 공장 주문형 다기능 숏크리트를 시공할 수 있는 기술개발이 가능함.
- 터널 시공과정 중 발생되는 암특성에 따른 숏크리트 설계 강도 변화, 누수량에 따른 설계 변화, 공사비 및 공사기간의 변경으로 인한 숏크리트 설계 변화 등의 상황일 때 공장 주문형 다기능 숏크리트 기술을 통해 유동적이며 효율적인 숏크리트 시공이 가능하며, 공장형 배합을 통해 다품종 소량생산 및 최적의 생산시스템 확립을 통해 경제적인 제품생산으로 활용이 가능함.
- 기능성 혼화재의 혼입을 통해 터널 굴착 후 노출된 암반의 특성에 따라 주문형 레디믹스트(ready-mixed) 숏크리트의 생산 및 시공이 가능해져, 터널 지보재로서의 장기내구성 확보뿐만 아니라 고부가 가치의 토목 건절재료의 생산이 가능함.
- 분말형 레디믹스트(ready-mixed) 숏크리트 개발로부터 얻어지는 신기술을 국내 및 해외에 특허 출원하여 산업재산권화 함으로써 건설기술 관련 국내산업을 보호하고, 각종 국·내외 학술지에 발표하여 국내 관련 산업의 선진화를 이루는 초석으로 활용 가능함.
- 숏크리트 공법에 대한 고로슬래그 재활용이 가능해져, 국가 자원을 절감하고

경제적인 자원 재활용으로 국가 정책에 기여할 수 있음.

- 숏크리트 재료를 생산하고 있는 국내 민간기업이 본 연구개발에 직접적으로 참여함으로서 기술 경쟁력을 향상시킬 수 있으며, 체계적인 공장 생산 시스템의 설치 및 개발을 통해 민간기업의 국가 산업 기여도 향상, 인적 자원의 고용증대, 신제품 개발을 통해 국내 시장 확산 등의 효과를 거둘 수 있음.

- 각종 기능성 혼화재와의 혼입을 통하여 방수용, 고강도용, 고인성용, 저리바운드용 등 터널 시공시 발생할 수 있는 모든 상황에 대한 맞춤형 숏크리트 생산이 가능하고 기존의 일률적인 숏크리트 시공을 떠나 각 현장별 차별화된 시공이 가능해짐.

○ 경제적인 분말형 레디믹스트(Ready-mixed)공법 적용으로 인한 국가 예산 절감

- 숏크리트 관련 제품의 기술개발을 촉진하여 관련 제품의 가격인하 및 수입대체 효과가 있음.

- 고내구성 숏크리트의 개발 및 시공으로 인한 유지·보수 비용 절감에 따른 경제적 이익효과가 발생하며, 관련 분야 시공기술 개발을 촉진하여 소요 자금 및 인력의 절감효과가 발생.

- 국내 지반환경에 적합한 가장 경제적이고 우수한 내구성을 가지는 숏크리트의 제조·배합기법의 도출 기대

- 공장 생산 시스템의 개발로 현장 배치 플랜트 시설의 축소 및 설치비 절감이 가능하여 건설업체 입장에서는 현장 시설 소모를 줄이고 고품질의 공장 생산 제품을 직접 사용가능하게 되어 경제적인 시공이 가능하게 됨.

- 공장에서부터 관리되는 골재품질, 정확한 배합 계량 및 산업부산물을 재활용한 경제적 생산 등의 이점을 보유하고 있어, 현장에서 고품질 시공이 가능하고 특별한 시설 투자가 필요 없으며 터널 시공 상황에 따라 공장 주문형 다기능 숏크리트 생산도 가능하므로 건설재료 시장의 점유율이 높음.

- 성능 및 비용분석을 종합한 가치분석 결과 현장배합 숏크리트에 비해 8~16% 정도의 가치향상을 보이며, 비용측면에서는 성능개선 효과가 우수한 성능강조형으로 성장 가능. 또한, 현장 여건이 복잡한 철도, 지하철 터널에서는 비용 절감효과가 같이 나타나 가치혁신적인 측면을 나타내어 경제성의 개선효과의 극대화가 가능함.

○ 일체형 사일로 믹서 제작 및 테스트베드 평가를 위한 추가 연구 필요성

- 개발된 레디믹스트 숏크리트 재료를 가장 효과적으로 현장에 적용시킬 수 있는 시공 시스템 도출.
- 현장 배치플랜트를 통하지 않고 공장생산된 숏크리트 재료를 믹싱과 함께 타설 장비에 공급하여, 개발된 재료의 품질을 가장 효과적으로 발휘할 수 있는 일체형 사일로 믹서 장비 설계.
- 설계된 일체형 사일로 믹서에 대한 테스트베드 평가를 통해 최종적인 레디믹스트 숏크리트의 현장 적용성 평가가 요구되며, 이를 위해서는 후속적인 연구개발이 필요함.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 국외 분상형 숏크리트 관련 기술 파악

1. 라이닝 및 숏크리트용 분상형 모르타르 제조업체 EZXix사 방문 및 기술협의

가. EZMix 사

- ○ LA에서 동부쪽으로 약 100km 떨어진 블루밍턴에 위치한 Ready-mix 건조몰탈 배합전문 업체로 캘리포니아주에서는 규모면에서 가장 큰 업체임.
- ○ 미국 등에서는 현장에서 배합하여 몰탈을 사용하기 보다는 공장에서 배합하는 Ready-mix 타입의 건조몰탈을 대부분 사용, 따라서 본 Ready-mix 건조몰탈 시장은 큰 것으로 판단.
- ○ 현지의 골재는 인공골재와 천연골재를 일정 배합비에 따라 혼입하여 사용하며 골재의 상태는 석분 또는 토립분이 거의 없으며 특히, 굵은 골재의 형상은 원형에 가까운 형상으로 편장석 비율이 높은 국내 골재와는 많은 차이를 보이고 있음.
- ○ 골재는 골재공장에서 세척과 분급처리를 하고있음.
- ○ 본 공장에서는 습윤상태의 골재를 건조시켜 다시한번 스크린 작업을 통해 Ready-mix 건조몰탈을 위한 배합을 실시함.
- ○ 모든 공정은 자동화 공정으로 처리되는 중앙관리시스템을 적용하고 있음.
- ○ 숏크리트용 굵은골재의 최대입경은 10mm를 사용하고 있으며, 숏크리트의 배합비는 발주 현장에서 요구하는 배합비에 따라 배합을 실시하며 생산하는등 현재 국내 현장에서 생산되는 배합과는 상당한 차이를 보이고 있음.
- ○ 미국에서는 골재수급이 원활할 뿐만 아니라 잘 갖추어진 도로망을 이용을 통해 물류비 자체도 국내에서보다 저렴한 것으로 판단됨. 그리고 모든 물류 운송

자체가 Cap이 있는 Cargo 차량만 운송이 가능하므로 국내와 같이 페이로다나 굴삭기를 이용하여 골재를 직접 Cargo에 실을 수 없음.

- ㅇ 콘크리트 자재 운송 시 공장에서 콘크리트를 건조분말 상태로 배합하여 현장에서는 물만 혼입해 타설함. 콘크리트와 같이 숏크리트도 같은 개념으로 접근하여 공장형 건조몰탈로 생산하고 있음.
- ㅇ 방문현장에서는 방문 당일 숏크리트 건조몰탈 제조를 실시하지 않아 제조공정별 견학은 이루어지지 않았음.
- ㅇ 본 공장 담당자는 공장생산형 건조몰탈이 현장에서 배합하여 생산하는 숏크리트보다 경제성이 뛰어날 뿐만 아니라 품질면에서도 비교할 수 없다고 설명하였음.
- ㅇ 경제성은 미국 현지 특성상 물류비가 저렴하여 골재의 수급이 원활할 뿐만 아니라 인공골재를 생산하는 석산에서의 골재품질이 뛰어나 경제성이 우수한 것으로 판단됨.
- ㅇ 본 EZMix사 방문한 결과와 본 연구원에서 수행중인 Ready-mix 숏크리트 연구과제 성과품인 Ready-mix 숏크리트 재료의 특성을 분석한 결과 유사성을 다수 확인하였으며, 국내 시장에서 Ready-mix 숏크리트 재료에 대한 경제성을 확인하였음.

- 공장전경 및 시설





















- 스크린 작업 후 골재

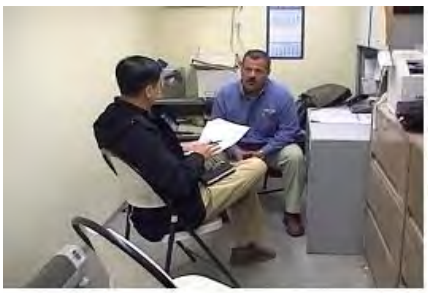



- BCT차량에서 공기압을 통한 재료 공급





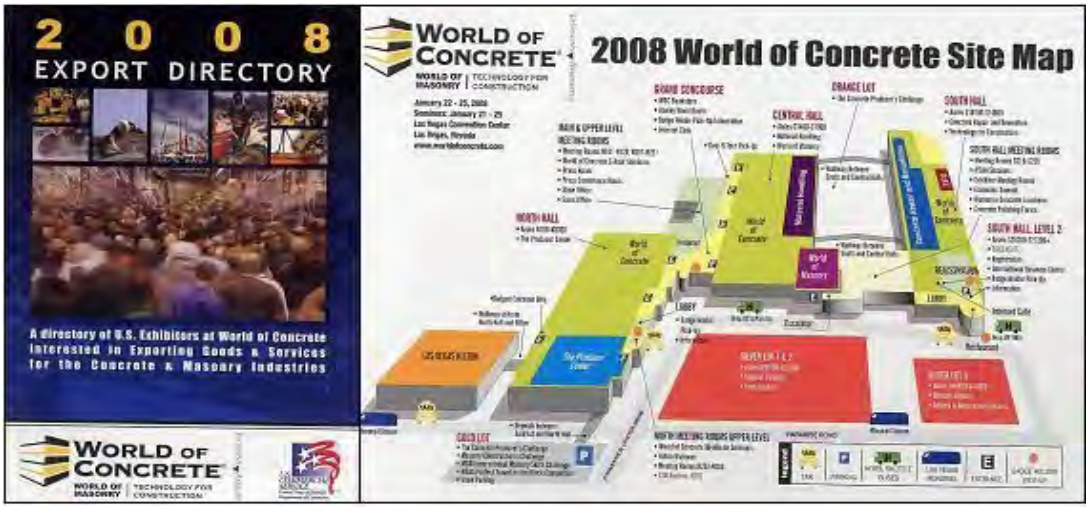

- EZMix사 직원과 시설견학 및 기술회의






2. WORLD OF CONCRETE 2008

◦ 전시장 구성



◦ WORLD OF CONCRETE 2008

○ 2008년 1월 21일부터 25일까지 5일동안 미국 네바다주의 라스베가스 컨벤션센터에서 World of Concrete 2008(이하 WOC 2008이라함)이 개최되었다. 이 WOC는 매해 미국에서 개최되는 세계 최대 규모의 콘크리트 관련 기술 박람회로서 콘크리트에 관한 기술세미나를 포함하여 재료, 장비 및 보수 등에 대한 여러 분야의 옥내 및 옥외 전시회로 진행되었다. 금년도에는 약 1,800여개의 콘크리트 관련업체가 전시회에 참가하였으며, 참관인 또한 약 90,000여명에 육박하는 실로 세계 최대 규모를 자랑하고 있었다. 한편, WOC 박람회는 ACI, PCI, PCA 및 ACPC 등 20개 이상의 콘크리트 관련학회 및 단체들이 후원함으로서 그 규모와 인지도를 더하고 있었다.

전시회는 1월 22일부터 25일까지 4일동안 관람이 가능하였으며, 세미나는 전시회 기간 내내 시간을 구분하여 진행되었다. 또한 옥외 전시회에서는 공개시연을 통해 기술에 대한 이해를 좀 더 높일 수 있었다.









○ 섬유제조업체인 PROPEX사

- 일반적으로 숏크리트의 성능을 증대시키기 위한 방법 중 섬유는 중요한 요소로서, 현재까지 국내 숏크리트 현장에서 제기되고 있는 강섬유의 뭉침현상 및 재료분리에 대한 문제점에 대하여, 이를 해결하기 위한 다수의 연구가 국내에서도 수행 중에 있다.
- PROPEX사에서 제조하는 섬유 중 ENDURO 600제품은 다음 그림과 같이 재료분리 및 뭉침현상이 육안으로 식별하였을 때는 적게 나타났다. 또한 수경성제품으로 믹싱 시에 물에 분해되어 섬유의 적용반경이 커짐을 알 수 있었다.
- 따라서, 향후 국내 시공현장에서의 충분한 적용가능성을 확인하였다.
- 그 외에도 한국의 여러업체와 거래를 하고있는 pgifiber사, FORTA사 등을 방문하여 샘플 및 제조품의 설명을 들었다.







○ 지수재 제조업체 COSELLA & DORKEN사

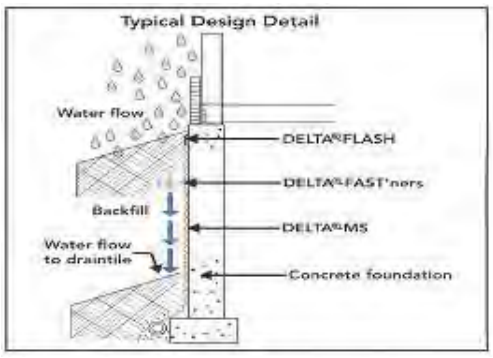
- 현재 수행중인 연구과제를 살펴보면, 숏크리트와 PC세그먼트 사이에 유입되는 지하수를 효과적으로 배수시키는 것이 중요하다. 그리하여 숏크리트와 PC세그먼트 사이에 경량기포모르타르를 이용한 배면충진 공법의 적용이 완성단계에 있다. 하지만 내구연한을 가지는 장수명화개념의 터널 시공을 위해서는 2차나 3차 누수에 대한 대비도 이루어 져야 한다고 판단된다.
- COSELLA & DORKEN사에서 개발한 제품은 시공성이나 재료적 측면에서 상당히 바람직한 방식이라 생각된다. 그러나 경제성 측면 등의 여러 가지 현실적인 연구가 수반되어야 하며, 이와 더불어 충분한 검토를 통하여 국내 실정에 맞도록 하여 국내도입이 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- 따라서, 여러 가지 수반된 문제점을 보완한다면, 향후 본 제품을 국내 방배수 시스템에 충분히 적용될 수 있다고 사료된다.
- 다음그림은 본 공법의 시공프로세스 및 이론적 배경을 설명하고 있다.

① 적용사례



② 이론적 배경





③ 시공 프로세스





④ 전시 현장 모습






○ Henry사

- COSELLA & DORKEN사와 유사한 제품을 가진 회사이다.
- 본 제품은 다음 그림과 같이 구조물 배면에서의 원활한 배수를 시킬 수 있는 시스템이다.








○ 액체질소를 공기로 주입하여 콘크리트의 수화열을 저감시키는 기술을 보유한 AIR LIQUIDE사

- 본 제품은 CRYOCRETE™이라 불리우며, 현존하는 수화열 저감 방법 중 하나로 여겨지며 특히, 온도가 아주 높게 지속되는 지역에서 그 성능을 발휘한다.
- 주로 메스콘크리트에 적용되며, CAP, 기둥, 교량상판 등 아주 폭넓은 토목공사에 쓰여진다.
- 이 기술은 슬럼프나 공기량, 응결시간, 밀도 등에 변화를 주지 않는다.
- 온도변화에 따라 플렉시블하게 대처할 수 있다.
- 국내 숏크리트 현장에서 수화열 저감으로 인해 소성·수축균열을 작게 할 수 있는 방안으로 판단된다.





- 밑의 사진들은 현재 미국 네바다주 후버댐을 통과하는 "HOOVER DAM BYPASS PROJECT"에 적용되는 AIR LIQUIDE사의 CRYOCRETE™ 시공모습 및 후버댐주변 공사지역의 실제 방문사진이다.









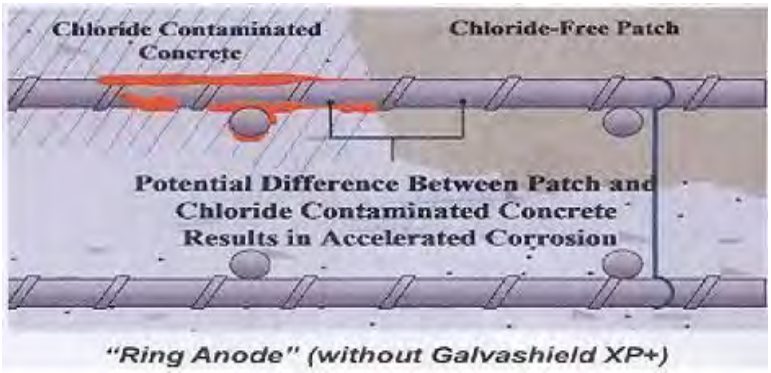



○ 철근의 부식을 방지하는 "GALVANIC SYSTEM"을 보유한 VECTOR CORROSION TECHNOLOGIES사

- 기존의 Galvashield XP보다 60%이상의 높은 성능을 가지고 있다.
- 또한, 양질의 결과물, 경제성, 유지보수의 용이성 등 여러 가지 장점을 가지고 있다.
- 다음 그림은 본 시스템의 구성원리와 전시회 방문사진을 나타내고 있다.
- 본 시스템의 메카니즘을 바탕으로 하여 숏크리트와 연계하여 연구를 한다면, 국내 강섬유가 포함된 숏크리트의 적용 가능성도 있을 것으로 판단된다.


GALVANIC SYSTEMS
Active Cementitious Matrix
Sacrificial Zinc Anode Core
Tie Wires
Cut-away of Galvashield XP+


Chloride Contaminated Concrete
Chloride-Free Patch
Anode Galvanically Protects Surrounding Rebar
Galvashield XP+ prevents "Ring Anode" Corrosion


Chloride Contaminated Concrete
Chloride-Free Patch
Potential Difference Between Patch and Chloride Contaminated Concrete Results in Accelerated Corrosion
"Ring Anode" (without Galvashield XP+)



◦ 급결제 및 혼화제 투입장치



◦ 그 외의 방문업체













제 2 절 국외 숏크리트 기술개발 현황 조사

Introduction of Recent Technologies in Shotcrete

By Arduino Pedro*

(*Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, WA)

1. Penetron Admix Enhanced shotcrete (PAES)

Tunnel waterproofing is often done by using shotcrete structures that lead the water from the rock into a subsurface draining system. The main problem with this solution is making the shotcrete waterproof. Water leakage is normally caused by cracks in the shotcrete, bad workmanship and porous shotcrete. We traditionally recommended to spray Penetron onto the shotcrete surface. While this is very efficient, it is also labor intensive and hence expensive. In recent years, a better solution was found; using Penetron Admix enhanced shotcrete.

Penetron Admix enhanced shotcrete (PAES) has been extensively tested by accredited concrete laboratories. The test results show that PAES reached the maximum result in the freeze/thaw test SS EN-137244 and reduced the depth of penetration of water under pressure Norm SS EN-12390-8 from 21mm for the control concrete to 7mm for PAES. The adhesion values of this shotcrete increases as well.

Two steel drums, with numerous drill holes to allow the water pressure to build up, were primed with a cement mortar for increased adhesion. PAES was applied to one drum and a control shotcrete without Penetron Admix to the other one. The two drums where then cured for 5 days, sealed and filled with water, after which a water pressure of 2 bar was applied. A visual evaluation showed that the PAES coated drum was around 70% dry, whereas the control shotcrete was completely soaked with water.



(a) Shoot the shotcrete (b) PAES (c) Control

Fig. 1. Two steel drums were primed with a cement mortar



(a) PAES (b) Control

Fig. 2. 5 days later, after a water pressure of 2bar was applied

2. A novel double anchored steel fiber for shotcrete

Given the high deformability requirements of shotcrete in repair, rehabilitation, slope stabilization, ground support, and other applications, the use of fibers in shotcrete is growing. Growing also are challenges surrounding the use of fibers in shotcrete not the least of which are a high fiber rebound in the dry process, lack of standardized test techniques, and a poor understanding of reinforcement mechanisms. In the context of rebound, unfortunately, the requirements for a low rebound often clash with the requirements for a high material toughness. This paper describes a new fiber. The new fiber is based on a double anchoring principle and is optimized for both reduced rebound and a high toughness in hardened shotcrete.

Shotcrete, when used as ground covering or support, is subjected to both quasi-static ground movements and dynamic ground deformations often of large magnitudes. Not surprisingly, the requirements of material deformability, toughness, and energy absorption are often greater in fiber reinforced Shotcrete than in conventional fiber reinforced concrete. One primary concern with the dry-processshotcrete is the high rebound; nearly 20 - 40% of material and up to 75% of fiber may be lost through rebound (Armelin et al. 1997; Wolsiefer and Morgan 1993; Warner 1995). During rebound, high proportions of the fibers fail

to become embedded in the resultant concrete and thus are wasted. A loss of fiber through rebound translates into a major loss of fracture toughness, deformability, and the post-crack load-carrying capacity in shotcrete.

While the issue of high rebound in dry-process shotcrete is well recognized, our understanding of the factors related to mix design (cement and silica fume contents, aggregate/cement ratio, etc.) and (or) placement variables (air pressure and volume, type of nozzle, distance and orientation of nozzle, etc.) that control rebound is far from adequate. Attempts have been made in the past to understand the kinematics of fast moving aggregate particles using high-speed photography and to model the process of rebound (Armelin et al.1999; Armelin and Banthia 1998*a*). In the case of fibers, although fiber rebound has always been suspected to be related closely to fiber geometry, the exact influence of fiber geometry on fiber rebound is not well understood. In a previous study (Banthia et al. 1992), fiber rebound was shown to be proportional to its specific projected area defined as the fiber projected area for a unit mass. In a later, more comprehensive study (Armelin and Banthia 1998*b*), a specific fiber parameter called the modified aspect ratio ($l/\sqrt{d}$) was shown to be linearly related to fiber rebound. The results of this latter study (Armelin and Banthia 1998*c*) became the basis for designing the novel fiber described here.

On the toughness side, pullout of fibers across a matrix crack is recognized as the main mechanism that allows steel fiber reinforced shotcrete (SFRS) to be more ductile than unreinforced shotcrete. Thus, all commercial reinforcing fibers presently available in the market are deformed at the ends or along their length, to enhance the anchorage of the fiber with the cementitious matrix and generate a greater pullout resistance and energy (Naaman 1998). Unfortunately, the fiber geometrical equirements for a higher toughness (i.e., a high aspect ratio) are in direct conflict with those required for a reduced rebound (i.e., a low aspect ratio). Thus an optimized fiber geometry for cast concrete is not necessarily optimal for shotcrete.

Fiber rebound and its reduction

It is clear that the amount of fiber rebound seriously affects the toughness of the resulting in situ fiber reinforced shotcrete and rebound reduction is key to obtaining a highly toughened shotcrete. For a rational design of a shotcrete fiber from the objective of a reduced rebound, the results obtained by Armelin and Banthia (1998*c*) were considered. They conducted a series of experiments using circular cross section steel fibers having diameters of 0.5, 0.61, 0.65, 0.76, and 1 mm and lengths of 3, 12.5, 19, 24.5, and 40 mm. Fibers of each diameter were made to each length. Shotcrete was producedusing the dry mix technique and the fiber rebound was evaluated for the above combinations of length and diameter. Their results are plotted in Fig. 3, where it can be seen that there is a substantially linear relationship between fiber rebound R_f and a modified aspect ratio given by fiber length divided by the square root of fiber diameter, i.e.,

[1] $$R_f = {}'l_f/D^{1/2}$$

where R_f is the fiber rebound, l_f is the fiber length, and D is the fiber diameter.

It is apparent that a reduction in rebound R_f significantly increases the amount of fiber retained in the in-place shotcrete. For example, if the fiber rebound is reduced from the 75% figure that characterizes the fibers presently in the market to 50%, the in situ fiber content is doubled for the final shotcrete produced. Further, to reduce the fiber rebound to below about 70%, which is less than that of conventional fibers, the ratio of fiber length over the square root of fiber diameter ought to be below 30 $mm^{1/2}$.

Fiber anchorage mechanisms

The state-of-the-art in fiber design may be divided into two large groups with respect to their anchorage mechanisms, namely fibers that rely on a "dead anchor"and those that rely on a "drag anchor". Dead anchors generally are produced by deforming the fiber with a hook or cone adjacent

to each of its ends. Under stress, in an aligned fiber (i.e., under axial tension) the anchor is generally designed to fail (e.g., pullout) at a maximum resistance below the strength of the steel. However, these dead anchors, after failure, have a significantly reduced capacity to resist pullout displacement.

Drag anchors, on the other hand, generally are formed by enlarging the fiber adjacent to its end in such a way that during pullout, the enlargement generates friction with the matrix as the fiber is dragged out of the concrete. This type of fiber generally develops a lower maximum pullout resistance

as compared to the dead anchor, but its effect tends to last for a greater pullout displacement and therefore greater pullout energy is consumed by the end of the pullout process.

The double anchorage fiber

In the new fiber developed at The University of British Columbia, the requirements for a lower rebound as discussed above were combined with the requirement for an optimal anchorage. The novel fiber, called the double anchorage fiber (or DD fiber – the two Ds representing a "drag" anchor and a "dead"anchor), is different from the other commercial fibers in that a low $l_f/D^{1/2}$ ratio is maintained and the two anchoring mechanisms (dead and drag) are rationally combined in the same fiber. For a reduced rebound, the ratio of fiber length to the square root of fiber diameter is kept less than 30 $mm^{1/2}$ (Fig. 3). The fiber thus may possess a length between 20 and 35 mm and a diameter of between 0.6 and 1 mm.

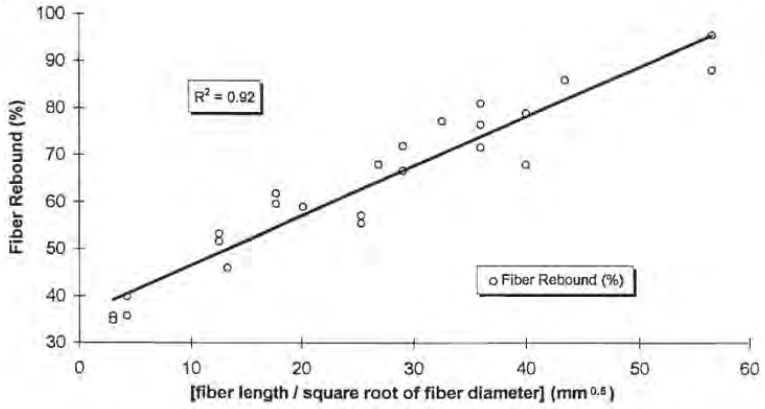


Fig. 3. Fiber rebound vs. modified aspect ratio

One half of the double anchorage (DD) fiber is shown in Figs. 4 and 5. The other half is essentially the same, as each fiber is symmetrical on opposite sides of its mid length. The fiber comprises both a dead anchor, 18, and a drag anchor, 12, placed at the end of the fiber and separated by a zone of stress concentration weak link, 16 (Fig. 4). The weak link, 16, is expected to fail under load. Failure of the weak link releases the dead anchor and activates the drag anchor. By properly proportioning the fiber, the weak link is constructed to fail at a load lower than the maximum load-carrying capability of the fiber.

The drag anchor is formed by a pair of laterally projecting side flanges in the same plane but on opposite sides of the longitudinal axis of the fiber. The laterally extending side flanges are formed by reducing the fiber thickness from d to t_d without producing areas of significant stress concentrations that would otherwise reduce the axial tensile strength of the fiber. The dead anchor is formed by a second pair of laterally projecting side flanges produced once again by reducing the thickness from d to t such that $t < t_d$ and the dead anchor is wider than the drag anchor, i.e., $w > w_d$

The drag anchor functions in essentially the same way as a conventional drag anchor in conventional reinforcing fibers. However, the maximum drag force or axial force applied to the fiber in order to permit the drag anchor to be dragged through the concrete is less than the maximum force necessary to break the dead anchor. The incremental added forces that are carried by the dead anchor under peak conditions cause the stress in the weak link to exceed the allowable such that either the weak link breaks off or the dead anchor gets deformed or folded resulting in its release. Thus the dead anchor functions to reinforce the concrete until its failure occurs either by breakage at the weak link or by its own folding or deformation.In either case, as will be seen later, the energy that can be absorbed by the fiber is substantially greater than can be absorbed by conventional anchor structures. The combined anchor system permits the application of a higher total pullout load without the risk of fiber breakage as the dead anchor releases before the stress in the remainder of the fiber including the drag anchor exceeds its capacity. The drag anchor is designed to

carry at least 80% of the peak load and preferably 90% or higher, so that the incremental load carried by the dead anchor is small and the load-carrying capacity of the fiber is not reduced dramatically when the dead anchor is released.

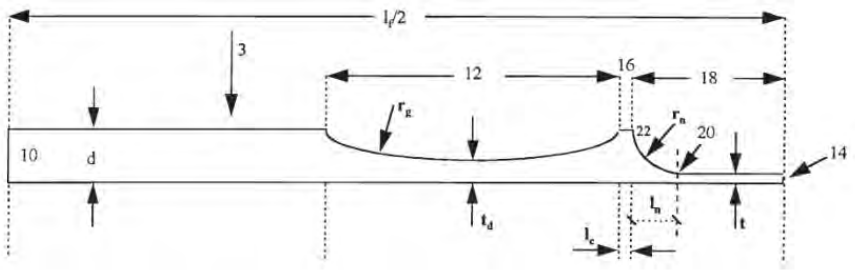


Fig. 4. A side view of the DD fiber

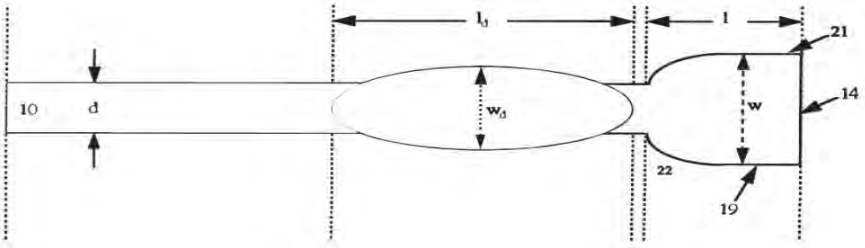


Fig. 5. Plan view looking at the direction of the arros 3 in Fig. 4

Fig. 6 shows the pullout test data and demonstrates the effectiveness of combining the two anchors as done in the DD fiber in terms of an improved energy absorption capacity. The commercial fiber having only a drag anchor (curve 1 in Fig. 6 for the "flattened-end" (FE) fiber) provides a relatively gradual increase in stress as the displacement (pullout)is increased to about 1.5 mm. On the other hand, for a fiber with a dead anchor (curve 2 in Fig. 6 for the "hooked-end" fiber), the peak or maximum stress that can be applied is significantly higher, approximately 900 MPa (tensile strength of the steel used in all cases is 1100 MPa), but the displacement that can be tolerated is less than approximately 0.5 mm. In both cases, the nominal fiber stress quickly diminishes (more so for the dead anchor than the drag anchor) as displacement is increased beyond the point of peak stress. For the fiber having a combination of the dead and drag anchors (curve 3, Fig. 6), a very significant increase in stress that can be tolerated is noticed, i.e., the nominal stress for the fiber reaches above 1000 MPa while accommodating a displacement of about 2½ mm. After this, the fiber stress drops off but does not reduce to that of the commercial drag anchor per se until a very substantial amount of pullout has taken place, i.e., of the order of about 7 mm. At the peak values of applied load, either the weak link fractures or the dead anchor is deformed and released, and this is expected to occur prior to the fiber reaching its tensile capacity or a general failure. It is apparent that significant improvements in the amount of pullout energy that can be absorbed is obtainable using the combination anchors as done in the DD

fiber.

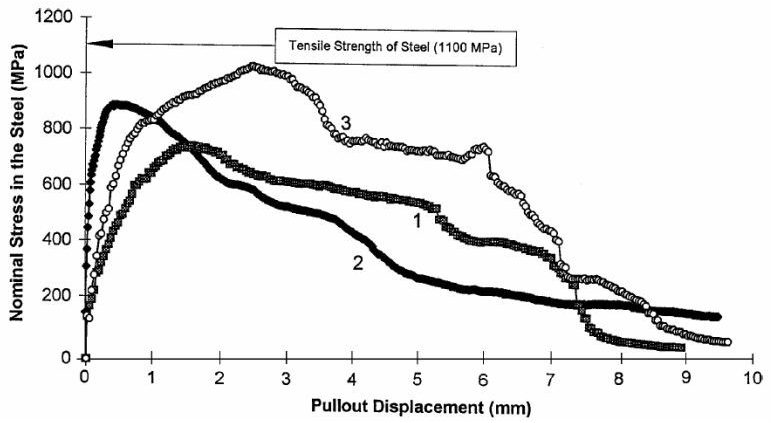


Fig. 6. Pullout displacement vs. nominal stress plots when only the "drag" anchor is present(curve 1), when only the "dead" anchor is present(curve 2), and when both anchors are combined as in a DD fiber(curve 3) (fc' = 40 MPa).

Further optimization

As noted before, the requirements for a reduced rebound conflict with those for a high toughness. To find the optimal balance, an experimental route was taken. Fibers were made from a fixed diameter wire with a 0.89 mm diameter formed with lengths of 12.5, 19, 25.4, and 40 mm, and all were tested at the rate of 60 kg/m^3 in dry-process shotcrete to determine their accumulated fracture energy under flexural loading of a standard ASTM C1018 test on 100 × 100 × 350 mm beam specimens (area under the flexural load versus displacement curve to a displacement of 2 mm). The results obtained are plotted in Fig. 7 where it is apparent that a fiber length of somewhere between 20 and 40 mm, preferably about 25 mm, was found to be optimum. Next, after selecting an optimum length of 25.4 mm, fibers of diameters of 0.61, 0.76, and 0.89 mm were tested. The results of these tests are shown in Fig. 8, where it is clearly indicated that a fiber diameter of about 0.75 mm (0.74 to 0.8 mm) was optimum. Based on these results, a length l_f = 25.4 mm and a diameter d = 0.76 mm were adopted, and the other fiber dimensions shown in Figs. 4 and 5 were calculated. In this arrangement, the diameter r_g of the indentation forming the drag section 12 was 10.7 mm, the thickness t_d was about 0.46 times diameter d, and the width w_d was 1.45 times the diameter d. Based on the dimensions r_g and t_d, the length l_d was derived. The length l of the dead hook section was set at 1.4 times the diameter d of the fiber, and the thickness t was 0.23 times the diameter d, which produce a width w of 2.36 times the diameter. The dimension l_c was 0.2 mm, and l_n and radius r_n for this example were equal and less than 0.5 mm, respectively. Other details of the fiber may be found elsewhere (Banthia and Armelin 1999).

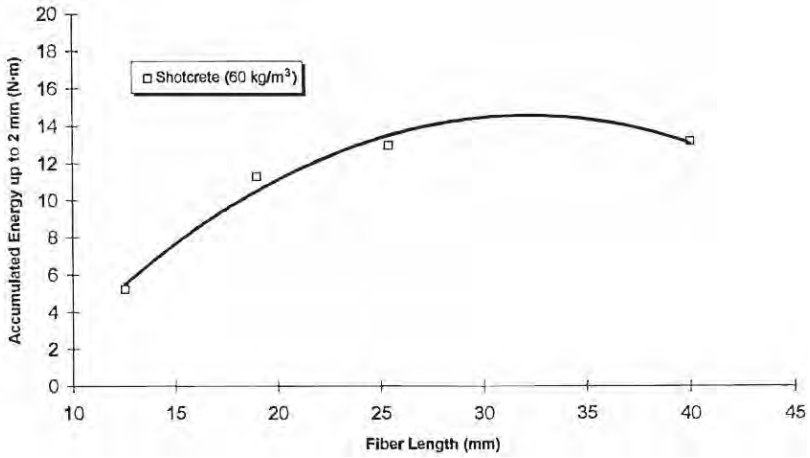


Fig. 7. Fiber length vs. shotcrete fracture energy for four differrent lengths of the DD fiber

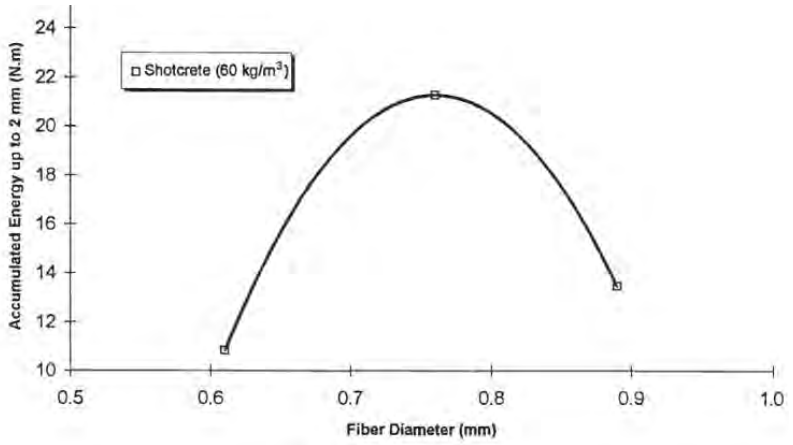


Fig. 8 Fiber diameter vs. shotcrete fracture energy for three different diameter DD fibers

3. Underground Shotrcrete Quality Assessment

During the 1990s, the use of dry-mix shotcrete as a tool for ground support became much moreprevalent in Canadian hardrock mines. With this increase in dry-mix shotcrete use came the needto develop a practical and accurate method for determining the quality of the in-place shotcrete.

The first step in the study was to review several test methods, all of which could potentially be used for the underground determination of shotcrete compressive strength. These tests—the Schmidt Hammer (SH) and the Windsor Probe (WP)—were evaluated along with the point load index (PLI) test, that had already been used underground in several mines.

An evaluation of the precision of these three tests was undertaken in the

laboratory and showed that the SH was more suitable than the WP and PLI methods to evaluate the compressive strength of drymix shotcrete. Some SH testing was then carried out in a mine to evaluate the suitability of this method for use in the underground environment. A procedure was then proposed for continuous routine checking of underground shotcrete quality. This procedure involved extensive use of the SH to rapidly identify any potential poor quality shotcrete.

Test Method Selection

Several criteria were evaluated to determine which testing procedure was most appropriate for the determination of shotcrete compressive strength in an underground environment. These criteria were separated into three categories: precision (including repeatability and meaningfulness), ease of execution, and cost.

According to these considerations, the ideal test should provide a numerical value that needs no further treatment produce easily reproducible results with little statistical variation (in-test precision); lead to accurate comparisons (good correlation) with the measured property; not be too sensitive (that is, a small change in measure does not lead to a large change in estimating the property); minimize sampling operation and sample preparation; be quick and easy to realize; and minimize cost.

According to ACI 214-77 (Reapproved 1997) "Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete," the in-test variation can be evaluated by the coefficient of variation (COV). The coefficient of variation is defined as the standard deviation divided by the average of all tests performed on the same concrete, expressed as a percentage.

Because the main goal of this study was to design an effective, routine testing procedure that would be suitable for the underground environment (difficult access and limited facilities), the last three considerations listed above were weighted the most important.

Schmidt Hammer

The Schmidt Hammer (SH) measures the rebound of a hardened steel hammer that is impacted on the surface of the concrete with constant energy. The amount of rebound is proportional to the hardness of the impacted material. Although there is no theoretical relationship between the surface hardness and the compressive strength of the concrete, there is a strong experimental relationship. Because of its nondestructive characteristics, this test is an ideal method to determine the in-place quality of concrete or shotcrete.

The use of the SH is fast and inexpensive. Results from SH testing can, however, be affected by several factors, including the testing position (angle of the hammer with respect to vertical), type and amount of coarse aggregates, moisture content of the concrete, and surface condition of the tested area.

Usually, the precision of the results varies between 15 to 25%. SH testing should always be correlated with compressive strength of cylinders by using appropriate trial mixtures(cast with similar aggregate type and dosage) to obtain meaningful results. Refer to ASTM C 805 "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete" for a full description of the testing procedure.

The Type N Schmidt Hammer presented in Fig. 9is the standard hammer for testing normal concrete structures. It was determined to be the most suitable for testing the compressive strength of shotcrete.

Some pretesting was conducted on large concrete panels about 28 x 28 x 4 in. (700 x 700 x 100mm) and other tests were conducted on cast cylinders 4 x 8 in. (100 x 200 mm). Table 1 presents some average test results obtained with the Type N hammer on panels in vertical (downward) and horizontal positions, respectively. These results (100 from tests in both positions) showed that, as expected, the readings are higher in the horizontal position. The horizontal position was adopted for the rest of the study to represent the testing that would most likely to be done in the mine (most tests would be done horizontally against vertical walls).



Fig. 9. Type N Schmidt

Table 1. Schmidt hammer test results on panels

Panel Position	N-Hammer Reading		
	Mean	Standard deviation	COV,%
Vertical	25.6	2.97	11.6
Horizontal	28.5	3.19	11.2

Precision of Testing

To evaluate the precision of Type N Schmidt Hammer tests, several concrete mixtures of different strengths were cast in the laboratory. Concretes with compressive strengths ranging from 2470 to 14,070 psi (17 to 97 MPa) were used to evaluate the precision of the testing procedure. Thirty-six strength levels were obtained by changing the water cement ratio (the slump values were adjusted by adding more or less water-reducer or super plasticizer), and by changing the age at testing.

The compressive strengths were measured on 4 x 8 in. (100 x 200 mm) cylinders. For each mixture, five cylinders were tested according to ASTM C 39

"Standard Test Method to Determine Compressive Strength." The results are presented in the first four columns of Table 2: the first column is the mixture identification, the second column is the average compressive strength measured on five cylinders, the third column gives the standard deviation, while the fourth column is the coefficient of variation. The last line of Table 2 also gives the average coefficient of variation for all compression tests (average COV = 2.36%). According to ACI 214, this indicates a very good control of the within-test variation.

Correlation of Schmidt Hammer

The last three columns of Table 2. present the results obtained with the Schmidt Hammer. Each result in Column 5 is the average of 100 tests performed on the cylinders used for the determination of the compressive strength (20 SH tests per cylinder). To represent the walls of the mine, these tests were performed horizontally (against a vertical surface). The average coefficient of variation (last line) is 8.86%. Because the COV is somewhat high, it takes several readings to get a good average measurement; a group of 20 readings can be considered as a good number for underground measurement.

Figure 10. presents the relationship between the average compressive strength (average of five cylinders) and the average measurement from the Schmidt Hammer (average of 100 readings). The coefficient of correlation between the Schmidt Hammer and the compressive strength is 0.963 for a linear relationship and 0.964 for a second-order relationship. Any relationship with a coefficient of correlation over 0.95 is usually acceptable. This means that the Schmidt Hammer provides a good indication of the shotcrete compressive strength. One must remember that because the testing position and condition of the surface are important factors, the relationship shown in Fig. 10 is, of course, only valid when the testing is performed in a horizontal position and on a smooth surface (ground or trowelled surface).

The low COV of the in-test variation (8.86% compared to the usual 10 to 20% in other studies) and the very good correlation obtained for the Schmidt Hammer readings in this study can most probably be explained by the low coarse aggregate content of the shotcrete and the good control achievable in a laboratory environment. It is important to remember that the type and content of coarse aggregate is one of the most important factors affecting Schmidt Hammer readings. Because of the low coarse aggregate content, these results are most probably applicable to any other shotcrete with similar low coarse aggregate content while tested horizontally on a smooth surface.

Underground Evaluation

The second part of the study was conducted to evaluate the ease of execution and accuracy of Schmidt Hammer testing in an underground environment (Fig. 11). Three weeks were spent underground to evaluate the method. Some organizational problems showed the importance, especially in an underground

environment, of keeping all operations as simple as possible.

Table 2. Results of compression (5) and Schmidt hammer (100) tests on cylinders

Mixture Identification	Compressive strength (average of five tests)			Schmidt hammer reading (average of 100 tests)		
	Mean, MPa	Std. dev MPa	COV %	Mean, MPa	Std. dev MPa	COV %
23-7d	17.2	0.88	5.12	15	1.55	10.3
6-22-7d	18.5	0.194	1.05	15.2	1.39	9.1
6-21-7d	25.8	0.218	0.85	15.9	1.44	9.07
6-30A-7d	29.3	0.307	1.05	17.8	2.1	11.8
6-8-7d	29.4	0.466	1.58	18.4	1.29	7.04
6-23-28d	30.3	0.463	1.53	20	1.8	9.02
5-17A-7d	30.6	1.15	3.74	20	1.34	6.7
6-22-28d	32.7	0.889	2.72	20.7	2.05	9.89
6-30B-7d	35.4	0.582	1.65	19.9	2.27	11.4
6-21-28d	36.3	1.64	4.52	20.6	1.98	9.61
6-7-7d	38.4	0.686	1.79	22.2	2.25	10.2
5-17B-7d	39.3	0.236	0.6	26.1	2	7.64
6-8-28d	41.5	0.879	2.12	23.2	1.75	7.56
6-30A-28d	44.5	0.54	1.21	23.2	2.19	9.43
5-17A-28d	46	0.511	1.11	24.1	2.02	8.36
5-17D-7d	46.9	1.07	2.28	25.8	2.24	8.68
5-17C-7d	48	0.671	1.4	27.4	2.09	7.61
6-6-7d	50.2	0.13	0.26	26.7	2.37	8.87
5-30B-28d	51.7	2.34	4.52	24.3	2.39	9.84
5-26-7d	52.2	2.19	4.19	29.1	2.55	8.76
5-31-7d	52.4	0.458	0.87	29.3	2.29	7.81
5-17B-28d	53.4	2.54	4.76	29.5	2.6	8.82
6-7-28d	53.7	0.818	1.53	27.2	2.34	8.63
5-17F-7d	54.2	3.08	5.68	35.3	2.54	7.2
5-17E-7d	56.1	1.59	2.83	33.5	5.31	15.9
5-17C-28d	62	3.43	5.53	33.3	2.94	8.82
5-17D-28d	64.2	2.41	3.75	32	2.39	7.47
6-6-28d	64.8	0.463	0.71	31.7	2.96	9.33
5-13-5d	68.7	1.11	1.62	34.7	3.65	10.5
5-31-28d	70.4	0.834	1.19	34.5	3.39	9.82
5-26-28d	71.8	2.76	3.84	36	3.21	8.92
5-17C-28d	62	3.43	5.53	33.3	2.94	8.82
5-17F-8d	73.3	1.45	1.97	39.5	2.48	6.28
5-17E-28d	78.9	0.683	0.87	39.3	2.36	6
5-13-28d	90.7	2.17	2.4	38.6	2.81	7.28
5-13-75d	96.7	1.38	1.43	43.3	2.46	5.68
	Average 2.35			Average 8.86		

Because this test must be carried out on a smooth surface, the wall of the mine was ground (or trowelled at time of application) to achieve a smooth surface area of approximately 3 in. (75 mm) in diameter in Schmidt Hammer

test locations.

Testing was very easy to carry out: it takes only a few minutes to check a small area and to record the results. A 115 ft (35 m) long section of wall was tested at seven different spots in 20 min. The results in Table 3. show that the coefficient of variation is even lower than that obtained previously. One must conclude that the shotcrete tested on that section of wall is of excellent quality except for one small debonded area detected while performing this test. A debonded area can be detected by a hollow sound produced by the impacting hammer.

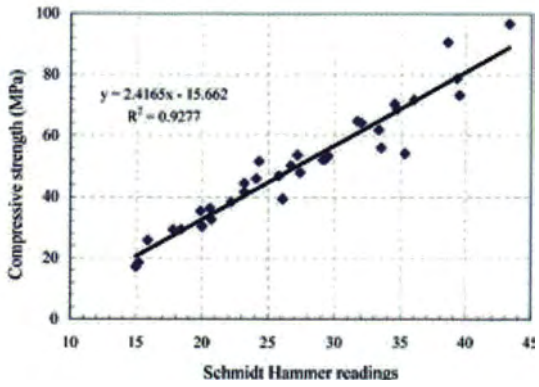


Fig. 10. Relationship between Schmidt Hammer reading and compressive strength



Fig. 11. Underground Schmidt Hammer Testing

For the Schmidt Hammer, the average COV = 9.71% of all series (27 series) of tests performed on shotcrete in the mine is relatively close to the average COV = 8.86% obtained on cast concrete. The lowest average result obtained on 1-day-old shotcrete was 18.1 (reading on the SH for N = 14 tests, σ= 1.43, CV = 10.3%), which corresponds to about 4350 psi (30 MPa). The highest average result obtained on very old shotcrete was 37.1 (reading on the SH for N = 19 tests, σ= 3.18 and COV = 8.54%), which corresponds to a compressive strength

value of about 10,580 psi (73 MPa).

Table 3. Results of underground shotcrete evaluation

Location	Schmidt Hammer reading			
	Number	Mean, MPa	Sd, MPa	COV %
1	7	28.3	1.80	6.40
2	10	30.6	2.11	6.92
3	9	31.3	2.74	8.74
4	11	30.4	1.21	3.97
5	13	34.2	4.74	13.4
6	18	32.9	0.70	2.15
7	14	30.4	1.15	3.74
Average	-	31.2	-	6.47

제 7 장 참고문헌

건설교통부(1999), 터널설계기준, pp.31-33

건설교통부(1999), 터널표준시방서, pp.41-47

김용태, 안태호, 강범구, 이정율, 김병기(2001), 콘크리트 혼화재료로서의 메타카올린의 기초적인 특성 연구, 2001년 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, pp.281-286

류종현, 안태송, 이상돈, 한승환(2005), 강섬유보강 숏크리트의 품질기준 검토, 한국터널공학회 학술발표회 논문집, pp.142-174

마상준, 최재석, 김동민, 김재신(2005), 고성능 숏크리트 적용 가능성 파악을 위한 숏크리트 품질특성 검토, 한국터널공학회 학술발표회 논문집, pp.131-133

박승범, 정상진(1996), 혼화재의 사용현황 및 전망, 한국콘크리트학회지, 제8권 제2호, pp.5-12

박해균, 이명섭, 김재권, 정명근(2001), 고품질 숏크리트 개발을 위한 새로운 급결제의 적용, 한국터널공학회논문집, 제4권 제1호, pp.44-55

박해균, 조남섭, 원종필, 이명섭, 심재권(2005), 시멘트 광물계 급결제를 사용한 고성능 습식 숏크리트 공법, 터널기술, 제16권 제2호, pp.38-50

SK건설(2001), 습식 숏크리트 공법 고성능화 연구, 1999년 산학연공동연구개발사업 최종보고서, 건설교통부

SK건설(2003), 터널 지보특성 개선을 위한 보강합성섬유 습식 숏크리트 공법 개발,

2001년 산학연공동연구개발사업 최종보고서, 건설교통부

오병환, 박칠림, 백신원, 장성욱(1994), 터널의 숏크리트 최적배합에 관한 실내 및 현장 모형 실험연구, 한국콘크리트학회논문집, 제6권 제4호, pp.131-140

원종필, 권연성, 이존자(2002), 고반응성 메타카올린을 사용한 고성능 콘크리트의 특성, 한국콘크리트학회논문집, 제14권 제3호, pp.349-356

이상필, 이상돈, 김동현, 한승환, 김진철(2004), 배합개선을 통한 영구지보 개념의 고성능 숏크리트 개발, 대한토목학회 정기학술발표회 논문집, pp.201-216

장동일, 손영현(1998), 강섬유와 실리카 흄이 숏크리트의 리바운드율에 미치는 영향, 한국콘크리트학회지, 제10권 제4호, pp.125-133

정민철(1996), Meta Kaolin 및 Silica Fume을 이용한 고성능 고강도 시멘트 모르타르 특성에 관한 연구, 한국요업학회지, 제33권 제5호, pp.519-523

정상국, 이창학, 심태섭(2000), 실리카 흄 첨가량에 따른 SFRS의 강도특성에 관한 실험적 연구, 2000년도 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.549-552

최재진(1993), 레미콘의 제조설비와 운반설비, 콘크리트 학회지 제5권 제3호

한국건설기술연구원(1999), 고속전철 교량/터널 구조 및 유지관리 시스템 개발(터널부문), pp.47-72

한국도로공사(1995), 고속도로 터널설계 실무자료집

한국도로공사 도로연구소(2001), 강섬유보강 숏크리트의 성능향상 및 품질기준 정립(Ⅱ), 도로연 01-37.

한국도로공사 도로교통기술원(2003), 터널 숏크리트 품질기준 검토서

ACI(1996), Committee Report on Fiber Reinforced Shotcrete, Reported by ACI Committee 506, American concrete institute

AFETS Working Group(1996), AFTES Recommendations on Fiber-Reinforced Sprayed Concrete Technology and Practice, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 2, pp.205-214.

American Concrete Institute(1986), Guide to Shotcrete, Reported by ACI Committee 506, ACI 506R-85, Detroit

American Concrete Institute(1989), State of the Art report on Fiber Reinforced Shotcrete, Reported by ACI Committee 506, ACI 506.1R-84, Detroit

American Concrete Institute(1990), Specifications for Material Proportion and Application of Shotcrete, Reported by ACI Committee 506, ACI 506.2R-77, Detroit

American Concrete Institute(1991), Guide to Certification of Shotcrete Nozzleman, Reported by ACI Committee 506, ACI 506.3R-91, Detroit

ASTM C 803-82(1982), Standard test method for penetration resistance of hardened concrete

ASTM C 900-82(1982), Standard test method for pull-out strength of hardened concrete.

ASTM(1986), Standard test method for Flexural toughness First-crack strength of Fiber-Reinforced Concrete(Using Beam with Third-point Loading), Annual Book of ASTM Standards, ASTM-C1018-94b

Austrian Concrete Society(1990), Guideline on shotcrete

Bindiganavile, V. & Banthia, N.(2001), Fiber reinforced dry-mix shotcrete with metakaolin, Cement & Concrete Composites, Vol. 23, pp.503-514

Clements(2002), The Future of fiber reinforced sprayed concrete, Proc. of the 4th Int. Symp. on Sprayed Concrete, pp.73-81

Dimmock, R.H(1999), Permanent Sprayed Concrete for UK Tunnels, Prof. of the 3rd Int. Symp. on Sprayer Concrete-Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, pp.186-195

EFNARC(1996), European Specifiation for Sprayed Concrete

EFNARC(1996), European Specifiation for Sprayed Concrete-Guidelines for Specifiers and Contractors

EFNARC(2002), Draft EN 14488 : Part 7 Testing Sprayed pART 7 : Fiber content of reinforced concrete

Franzen, T., Grrshol, K.F. & Tomisawa, N.(2001), Sprayed Concrete for final lining, ITA working group report, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 16, pp.295-309

Geol(1995), The state of art of shotcrete in Italy, shotcrete for undergound support Ⅶ, American Society of Civil Engineers, new york, pp.227-234

Heinz Wind(1995), New Technologies for the Application of Shotcrete : Rolling and Gliding Formwork, shotcrete for undergound support Ⅶ, American Society of Civil Engineers, new york, pp.259-270

Ishida, A., Teramura, S., Hirano, K. & Nakagawa, K.(1999), Calcium sulfo-aluminate based accelerator for high-strength shotcrete in Japan, Proc. of Int. Conf. on Shotcrete for Underground Support Ⅷ, ASCE, pp.202-215

ITA Working Group on Shotcrete Use in Tunneling(1996), Health and Safety in Shotcreting, Tunneling and Underground Space Technology, Vol 11, No 4, pp.391-409

Japan Society of Civil Engineers(1999), Test method for early strength of sprayed concrete by pull-out method, JSCE-G561-1999

JCI(1991), キャッピングを必要としない壓縮強度試驗用供試件の作り方及び試驗方法, JCI- SE5

JSCE(1990), Method of tests for Flexural strength and Flexural toughness of steel fiber reinforced concrete, JSCE-SF4

Melbye(2000), Sprayed Concrete for Rock Support, MBT International Underground Construction Group

Morgan D. R. & Mowat D. N.(1982), A Comparative Evaluation of Plain, Mesh and Steel Fiber Reinforced Shotcrete, Hardy Associates, International Symposium on Fiber Reinforced Concrete-Detroit

Norwegian Tunneling Society & Norwegian Rock Mechanics Group(1999), Sprayed Concrete for Rock Support-Technical Specification, Guideline and Test methods

Ono, Koichi(1996), Health and Safety in Shotcrete : ITA working group report, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 4, pp.391-409

Oreste, P.P.(2003), A Procedure for Determining the Reaction Curve of Shotcrete Lining Considering Transient Conditions, Rock Mech. Rock Engng., Vol. 36, No, 3, pp.209-236

Owen Sinclair Cecil(1964), Correlations of Rock Bolt-Shotcrete Support and Rock Quality Parameters in Scandinavian Tunnel, PhD Thesis, Univ. Illinois

Suzuki, H., Moriyasu, H., Tazawa, Y., Hamada, T., Kadokura, S. & Ono, K.(2002), Airless shotcrete system, Proc. of Int. Conf. on Shotcrete for Underground Support IX, Kyoto University, pp.227-237

부 록

1. 숏크리트 타설시험기 사용 매뉴얼
2. 레디믹스트 숏크리트 공정관리 및 시공·품질관리 편람(안)

숏크리트 타설시험기 사용 매뉴얼

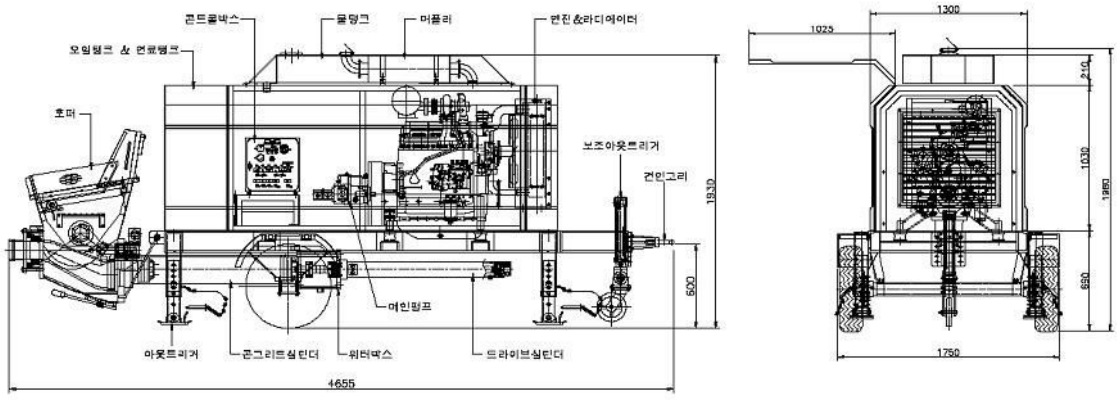
2009. 12.

주관연구기관	(주)태영건설
협동연구기관	한국건설기술연구원
	한일시멘트(주)
	(주)삼보기술단
	(주)동성엔지니어링
	한국건자재시험연구원
참 여 기 업	한국건설관리공사

1. 장비 제원 및 개요

1.1 장비 제원

1.1.1 NCPT-30



NO	항목	내용	단위	규격	비고
1	MAIN PUMP	PUMP 용량	cc/rev	145	
		PUMP 최대압력	kg/cm²	350	
2	DRIVE CYLINDER	DRIVE CYD.내경	mm	ø110	
		DRIVE CYD.ROD경	mm	ø63	
		DRIVE CYD.길이	mm	1000	
3	콘크리트 실린더	CONCRETE CYL.내경	mm	180	
4	ROD SIDE	STROKE수	Stroke/min	37	
		최대콘크리트 압력	bar	87	
		이론 토출량	m^3/h	56	
5	PISTON SIDE	STROKE수	Stroke/min	25	
		최대 콘크리트 압력	bar	130	
		이론 토출량	m^3/h	36	
6	압송거리 (ROD,SIDE)	수평 압송거리	m	347	
		수직 압송거리	m	158	
7	압송거리 (PISTON SIDE)	수평압송거리	m	675	
		수직 압송거리	m	264	
8	ENGINE	엔진 마력	ps	105	TD226B-4D
		엔진 회전수	rpm	1800	

1.2 특성

1.2.1 개요

1) 다양한 건설 토목 터널 공사에서 마감제 또는 몰탈, 숏크리트, 콘크리트 등의 타설 작업용을 다양한 작업 환경에서 작업이 용이합니다.

2) 유압 피스톤 방식으로 고압 이송이 가능하며 타설물의 종류 또한 입자가 굵은 것까지 다양하게 적용할 수 있습니다.

1.2.2 유압조정시스템(OPEN SYSTEM)

1) 숏크리트 장비에 적합한 Open Hydraulic system을 적용하였습니다.

2) 토출량 조절용 Proportional v/v를 적용하여 펌핑시 속도를 제어할 수 있습니다.

3) 유압을 이용한 Piston pump 방식과 S-v/v를 적용하여 끊김이 없는 연속 동작이 가능합니다.

4) 장치가 단순하며 서비스가 용이합니다.

5) 작동유의 온도상승이 낮으며 소모량이 적습니다.

1.2.3 콘크리트 실린더 및 유압실린더

1) 콘크리트 실린더는 행정 1000mm, 직경180mm 로 제작되어 숏크리트 장비에 적합하게 설계 되었습니다.

2) 실린더 내부는 정밀 가공 후 크롬 도금하여 기능 및 내구성이 좋습니다.

1.2.4 변환밸브

1) S밸브 형식

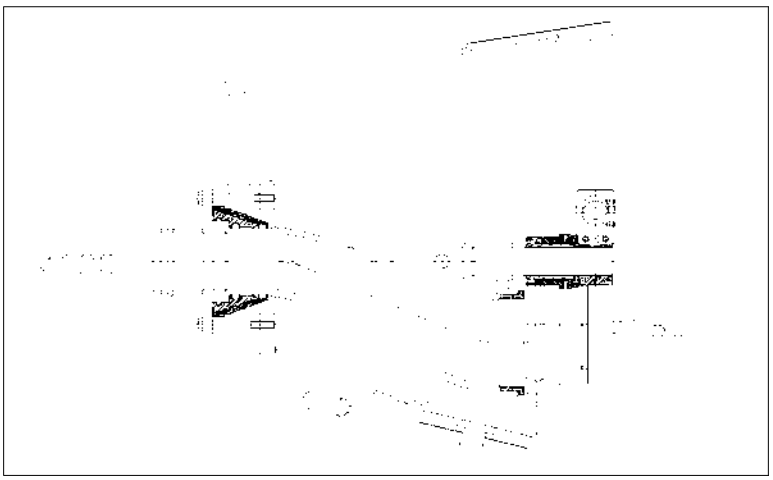
2) 흡입구 (ø 180)에서 배출구 (ø 120/5) 로 직경감소율이 적고 완만한 굴곡을 유지하였기 때문에 압력손실이 적고 골재가 커도 비교적 펌핑이 원활하다.

3) 밸브내의 콘크리트 편심 잔량이 적어 밸브의 전환이 빠르며 콘크리트의 파동이 적고 왕복운동이 정확하게 유지되어 콘크리트의 배출이 일정하고 작업성이 우수합니다.

4) S밸브내의 전체 길이에서 일정하게 관 직경이 감소되므로 밸브 내 전 접촉 부위에서 골고루 마모되며,내마모성 특수 주강으로 제작되어 내구성이 뛰어납니다.

5) S밸브와 마모 판 사이에 의해 생기는 간격을 자동으로 막아주어 압송 효율을 높여주는 오토매틱 링이 설치되어 있습니다.

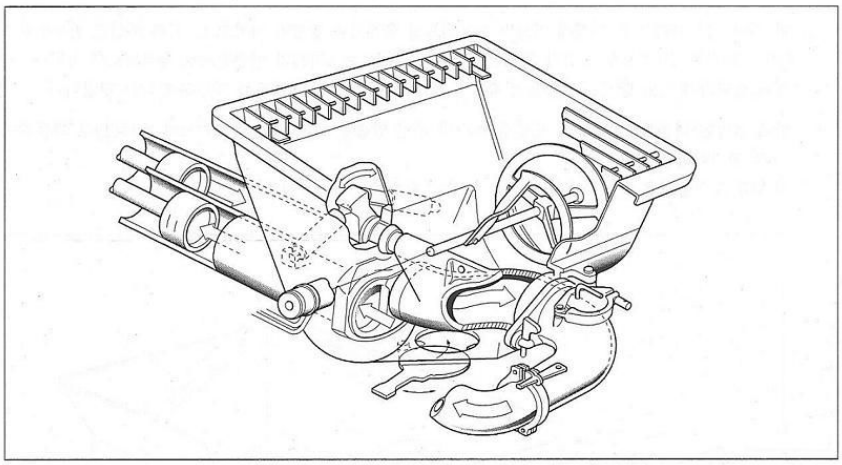
6) 세척 및 밸브 교환이 간단합니다.



1.2.5 호퍼 및 교반장치

1) 호퍼는 0.4 루베 의 대용량이며 형상을 완만한 라운드형상으로 개선하여 흡입율을 높여주고 작업 후 잔유량 제거가 쉽습니다.

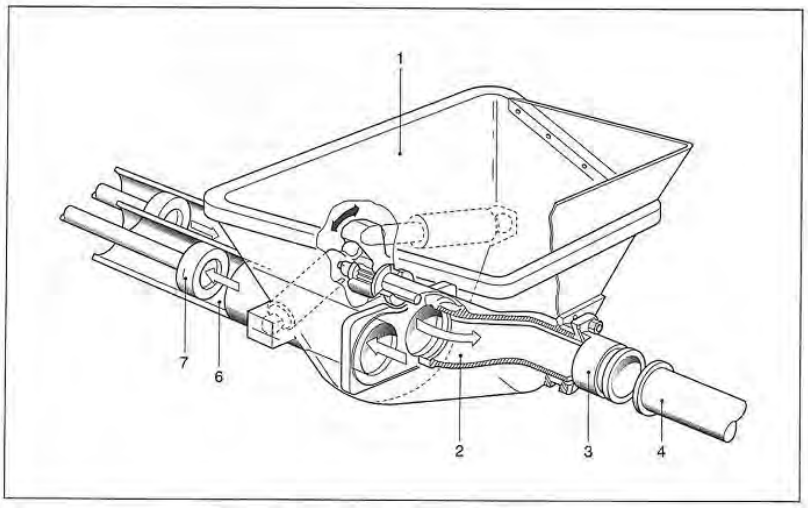
2) 교반 장치는 두개의 교반형 날개를 장착하여 흡입효율을 높여주는 구조로 되어있으며, 좌.우에 독립된 유압모터로 구동시키기 때문에 강력한 교반 작업을 할 수 있습니다.



1.3 펌프시스템

장비의 펌프는 엔진에 의해서 구동되며 중앙제어 장치인 CONTROL PANEL 에서 작동시킬 수 있습니다. 출력은 요구 되는대로 임의 조정이 가능합니다. 아래 그림을 보면 피스톤(7)이 화살표 방향으로 진행하면서 호퍼(1)에 담겨진 콘크리트를 딜리버리 실린더에 있는 콘크리트를 S-밸브(2)를 통하여 압송관으로 밀어냅니다.

피스톤(7)이 실린더 끝 지점에 이르면 자동적으로 움직이는 방향이 바뀌고 (그림의 화살표 반대방향) S-밸브(2)도 피스톤(7)쪽으로 움직여 피스톤(7)이 밀어내는 콘크리트가 압송관으로 들어가도록 합니다. 이렇게 두 개의 실린더가 밀고 당기는 작동을 반복하면 호퍼(1)에 있는 콘크리트를 펌핑하게 되는 것입니다. 앞에 설명된 피스톤 (7)이 진행 방향을 바꾸어 주면 압송관 내에 있는 콘크리트가 호퍼(1)로 되돌려지는 이것을 역펌핑 이라 합니다.
역 펌핑은 압송관을 세척할 때 또는 막힘 현상이 발생했을 때 작동시킵니다.



1.4 장비의 구성

1) HOPPER

- 제조된 몰탈 또는 숏크리트를 저장 및 토출하기 위한 저장소로 약 0.3m³ 의 용량을 갖으며 고압 토출을 위한 특수 강판으로 이루어져 있다 또한 형상을 완만한 라운드 형상으로 개선하여 흡입율을 높여주고 작업후 잔류량 제거가 쉽습니다.



2) 교반장치

- 교반장치는 두개의 교반형 날개를 장착하여 흡입 효율을 높여주는 구조로 되어있으며 우측에 독립된 유압모터로 구동시키기 때문에 강력한 교반작업을 할 수 있습니다.



3) PUMP SYSTEM

- Rexroth사의 고압력 고효율 펌프인 Piston pump 적용으로 작업 효율을 극대화 하였습니다.



4) POWER(동력)

- 현장 접근성을 용이하게 하기 위하여 디젤 엔진을 적용하였으며 45ps/1800RPM 의 강력한 출력으로 작업 효율을 극대 화 하였습니다.



5) WATER PUMP

- 작업 종료 후 잔여 숏크리트의 제거 및 장비 청소를 위한 고압의 물 펌프가 장착되었습니다.



6) 급결제 펌프

- 강한 산성의 급결제를 분사 장치에 공급하는 것으로 정량 공급 조절 가능한 모노 펌프가 장착 되었으며 스테인레스 스틸을 적용하여 부식 방지에 탁월하다.



7) 자동 구리스 펌프

- 각 구동부의 효율적인 윤활작업을 위하여 자동 구리스펌프를 적용하여 각 부품의 수명 연장 및 부품의 트러블을 최소화 하였습니다.



8) 분사장치(노즐)

- 2.5″의 고압 Hose에 연결된 분사 장치는 충분한 크기로 인해 굵은 입자의 분사가 가능하며 거치대에 거치하여 사용하므로 작업 효율을 극대화 하고 작업자의 안전사고를 방지할 수 있게 하였습니다.



9) WATER TANK

- 부식 방지를 위한 스테인레스 스틸 구조로 청소 작업에 충분한 용량(120L)의 탱크를 설치하였습니다.



10) 급결제 탱크

- 다양한 종류의 급결제를 테스트 하기 위하여 부식에 강한 스테인레스 스틸구조로 각 35L 용량의 탱크가 3개씩 설치되어 있습니다.



11) 구동형식

- 현장 접근성을 용이하게 하기 위한 트레일러 타입으로 제작 되었습니다.



12) 아웃트리거

-아웃트리거 적용으로 작업시 장비의 진동 및 흔들림을 최소화 하였습니다.



13) 메인 컨트롤 블록

- OPEN TYPE 의 메인컨트롤 블록 적용으로 트러블이 적고 정비성이 용이한 구조로 되어 있습니다.



14) 오일쿨러

- 분당 200리터의 쿨링 효과를 가진 대용량 쿨러를 적용하여 각 유압부품의 온도상승을 방지하고 작업의 효율성을 극대화 하였습니다.



15) 드라이브 실린더

- ∅110*∅63 의 강력한 POWER의 메인실린더 적용으로 골재의 막힘없이 토출이 가능하고 내구성이 좋습니다.



16) 교반기 모터

- 500cc/rev 의 대용량 유압모터를 적용하여 어떠한 골재라도 교반기의 걸림이 없이 돌아갈수 있도록 하였습니다 .



1.5 기능배치 및 조정장치

1.5.1 Lamp

-H1(그린): 준비상태 POWER ON시 점등.

-H2(적색): 밧데리 상태 KEY RUN시 점등 시동 후 점멸.

-H3(적색): 엔진 냉각수 온도 상승시 점등.

-H4(적색): 엔진오일 압력 상태 KEY RUN시 점등 시동.

-H5(그린): 행정 전환시 점등.

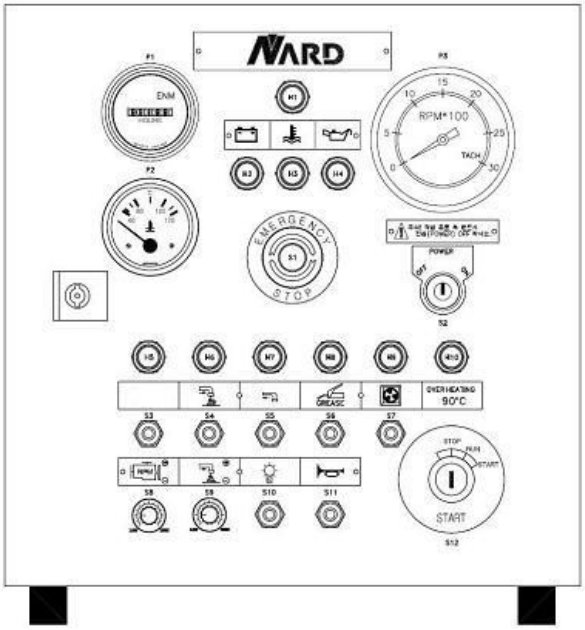
-H6(그린): 펌핑 ON시 점등.

-H7(그린): 백 펌핑시 점등.

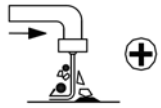
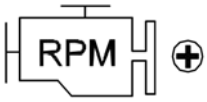
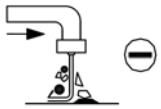
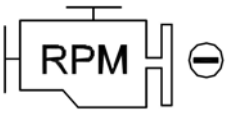
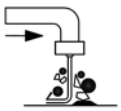
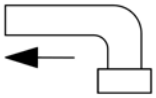
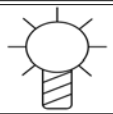
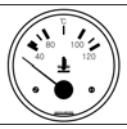
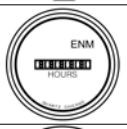
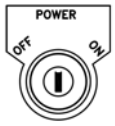
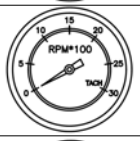
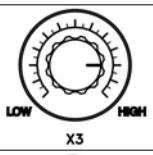
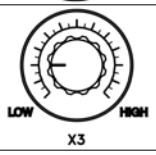
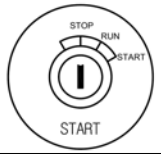
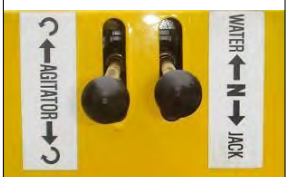
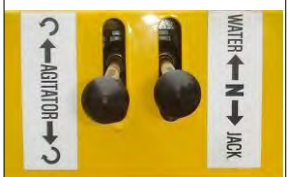
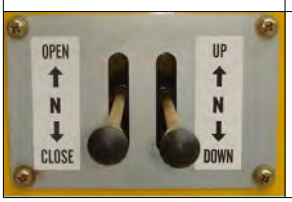
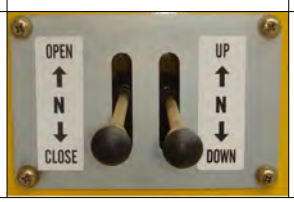
-H9(그린): 쿨러 작동시 점등.

-H10(황색): 유압유 오일 온도 상승시 점등.

※ 온도가 90°를 넘게 되면 펌프 스위치가 꺼집니다.



1.5.2 계기판 및 조절장치

	PUMPING RATE ⊕ 토출량 ⊕		엔진 RPM ⊕
	PUMPING RATE ⊖ 토출량		엔진 RPM ⊖
	PUMP ON/OFF		RETURN CONTROL 역펌핑
	CHANGE OVER CONTROL 행정전환		COOLER ON
	HORN		LIGHT
	오일 온도 계기		작업시간 계기
	POWER ON/OFF		엔진 RPM
	급결제 ⊕		급결제 ⊖
	KEY BOX		비상 STOP
	교반기		워터펌프
	보조아웃트리거		급결재

2. 운전 요령

2.1 장비의 시운전

2.1.1 시운전

1) 시운전은 펌프를 시작하기 전에 실시되어야 합니다.
2) 작업을 시작하기 전에 파이프라인, 커플링 그리고 호스의 연결들이 안전하게 되었는지 점검하시오.
3) 장비는 항상 수평을 유지하여야 하며 작업 전에 아웃트리거를 펴 장비를 고정하여야 합니다.
4) 시운전을 하기 전에 모든 냉각수, 작동유 및 연료를 점검하시고 필요시 보충하십시오.(이 경우 평지에서 시행하여야 합니다.)
5) 시동을 걸때 혹은 엔진이나 모터를 시동할 때 콘크리트 펌프는 꺼 있어야 하고 모든 스위치와 작동밸브의 레버는 중립위치에 놓여있어야 합니다.
6) 엔진과 유압유가 따뜻해질 때까지 800~1000rpm으로 운행하십시오.
7) 엔진과 유압유가 따뜻해지고 올바르게 돌아가고 있을때 콘크리트 펌프와 교반기의 스위치를 올리시고, 그리드는 닫혀 있어야 합니다.
8) R.P.M 조정 스위치를 작동하여 적당한 엔진 R.P.M으로 조정한 후 DRIVE 실린더를 가동시키시오.
   - 유압부품이 손으로 만졌을 때 차갑게 느껴지면 작동속도를 늦추시오.

2.1.2 작동기능 점검

1) 드라이브 실린더의 타격 한계점에서 S-밸브 실린더(Tilting cylinder)가 정확한 속도와 위치로 작동되는지 점검하시오.
2) 드라이브 실린더의 상사점에서 Tilt 실린더 중 1개가 정확하게 토출구에 맞춰지는지 점검되어야 합니다.
3) 콘크리트 펌프의 스위치를 누르면 드라이브 실린더와 Tilt 실린더는 자동적으로 전환되며 피스톤 로드는 마지막 위치에서부터 움직입니다.
4) 엔진을 최대 RPM 으로 올리고 스트로크 밸브를 조정해 스트로크에 대한 시간을 측정하시오.
5) ON/OFF 전기장치 기능을 점검하시오.
6) 기계위에 있는 보조부품들의 기능을 점검하고 장비 청소를 위해 유수 펌프를 점검하시오.
7) 피스톤 속도가 남은 상태에서 역펌핑 스위치를 누르면 바로 피스톤이 행정을 바꾸게 됩니다.
8) 시운전후 어큐뮬레이터를 최초 1주일동안 최소 1번 정도 점검하여 질소가스의 손실이

없는지 확인하십시오.

- 만약 가스 손실이 없으면 약 3개월 경과후 재점검 하십시오.
- 만일 양호한 경우 1년 1회 점검으로 충분합니다. (출고시 충전압력 100bar)

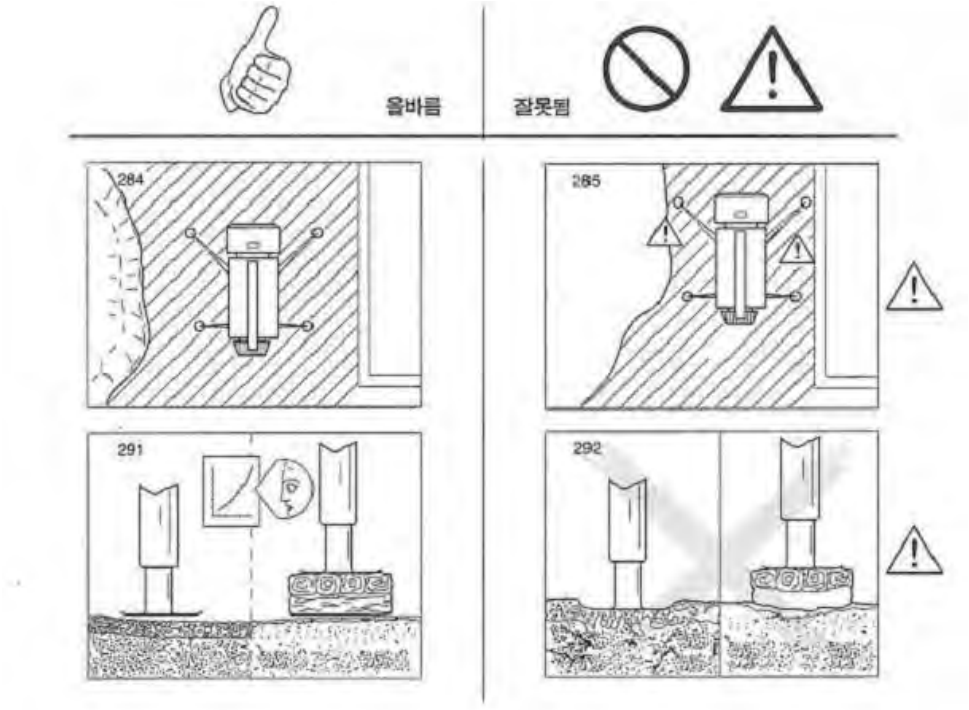
9) 어큐뮬레이터는 압력게이지가 예비 충전 압력보다 10~20% 높게 지시한때까지 보조 펌프에 의해 작동유가 충전됩니다.

2.2 펌핑 작업을 위한 장비의 설치

2.2.1 아웃트리거 설치시 유의사항

1) 반드시 장비가 제대로 위치했는지 확인하십시요.
2) 지반이 충분히 견고한지 확인되어야 합니다.
3) 반드시 고임목을 사용하십시요.
4) 장비와 도랑, 웅덩이등의 거리는 안전 거리를 반드시 확보하십시요.
   - 참고로 바깥쪽의 레그에서 웅덩이까지 거리는 웅덩이 깊이 이상으로 유지하면 좋습니다.
5) 웅덩이 위에는 받침대 등으로 받쳐도 위험합니다.

2.3 펌프 과정



- 펌프작업을 하기 이전에 모든 회전부에 구리스를 주입하여 윤활을 하시오.

2.3.1 펌프의 시작

1) 펌프작업을 하기 이전에 파이프라인의 구멍에 막힘이 없는지 확인하시오.

교반기를 돌리면서 약 40kg의 시멘트와 물 슬러리(Slurry)를 투입구 안에 넣으시오.

펌프를 시작하고 잘 섞은 콘크리트를 투입구 안으로 넣고 콘크리트의 모든 흐름이 호스에서 나올 때까지 서서히 펌프를 하시오.

2) 새롭고 긴 수송라인은 상당한 저항을 주기 때문에 충분한 슬러리 작업을 한 후에 펌프를 시작하시오.

3) 최초의 콘크리트 펌핑은 매우 조심하여야 합니다. 라인 내에 저항이 느껴지면 무리하게 펌프하지 말고 흡입/펌프를 되풀이하시오.

4) 트럭믹서 안에서 가능한 최대의 속도로 콘크리트를 섞으시오. 그리고 콘크리트 배합이 일정한지 확인하시오.

5) 콘크리트를 교반기 투입구 안으로 붓고 콘크리트 펌프를 통해 계속 펌프 하시오.

- 만일 수송라인이 녹슬어 있어 높은 저항이 생긴다면 최초에는 콘크리트 타설량이 줄어들 수 있으나 몇 차례 펌핑후에는 정상적인 타설량으로 증가하게 됩니다.

6) 만일 골재 가림 현상이 발생하면 콘크리트를 즉시 투입구 안으로 되받아 들이도록 하고 다시 섞으시오. 전달 실린더와 S 튜브 밸브가 자동적으로 올바른 방식으로 전환될 때까지는 토출 방향으로 전환하지 말고 조심스럽게 다시 펌프 하시오.

7) 골재 가림의 원인

- 슬러리가 너무 빈약하였을 때
- 충분한 슬러리가 사용되지 않았을 때
- S 튜브 밸브와 웨어링 플레이트가 닳아서 틈새가 생긴 경우
- 파이프라인이 새는 경우
- S 밸브와 파이프 안에 콘크리트가 굳어서 남아 있을 경우
- 믹스 배율이 적절하지 않을 경우
- 골재 규격이 맞지 않고 모래가 적거나 믹서에서 약간씩 굳은 경우

2.3.2 펌프에 관한 지시사항

1) 타설작업이 시작된 후에는 교반기가 항상 회전하고 있어야 합니다. 모래가 작고 자갈이 많은 콘크리트는 자갈과 모래의 비중 차에 의하여 골재의 분리현상이 생기게 되며 이것은 많은 자갈이 호퍼의 바닥으로 가라앉게 된다는 것을 의미합니다.

이 경우 바닥에 쌓인 자갈은 에스 튜브의 진행을 방해할 뿐만 아니라 흡입시 수분과 모르타르만 흡입하게 되고 또한 공기가 함께 빨려지게 되므로 결국에는 라인 내에서 골재의 블로킹이 생기게 됩니다. 부적절한 배합비의 콘크리트 타설시 매우 주의하시오. 골재 블로킹이 생기지 않도록 주의 하시오!

2) 작업을 잠시 중단하는 동안에는 짧게 거꾸로 펌프를 해줌으로써 전달라인의 압력을 내리도록 하시오. (2~3회 흡입하시오) 자주 앞뒤로 펌프를 하시오. 라인이 압력을 받는 것을 방치하지 마시오.

3) 만일 결합력이 고르지 않은 묽은 콘크리트를 쓸 경우에는 골재분리 현상이 생기기 때문에 작업을 잠시 중단할 경우에는 가능한 투입구 콘크리트의 수위를 낮추시오.

4) 작업을 잠시 중단하는 시간이 길어지면 투입구 쪽으로 콘크리트를 펌프하고 다시 콘크리트를 섞은 뒤에 펌프 하시오.

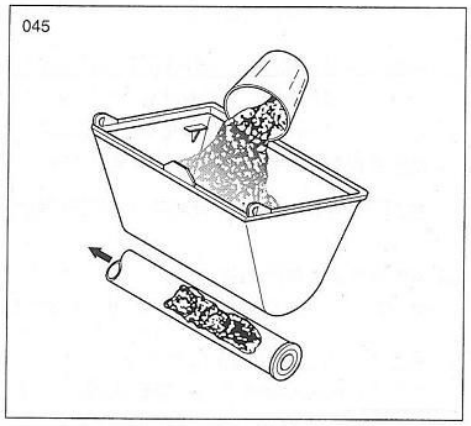
5) 장시간 작업중지시 골재의 분리 현상과 응고현상을 방지하기 위하여 주기적으로 앞뒤로 펌프를 하면서 약 10~15분 사이 한차례씩 콘크리트를 순환시키시오.

분리되어 나갔거나 덩어리로 뭉쳐지기 시작하는 콘크리트는 절대로 무리한 힘을 가하면서 라인 안으로 펌프하지 마시오.

6) 펌핑작업이 다시 시작될 때는 S 밸브가 완전하게 토출구의 양쪽 끝지점에 닿을 때까지 펌프를 후진시키시오. 그 지점의 끝에서 펌핑 스위치를 작동하여 전진시키시오.

2.3.3 펌핑 운전 개시

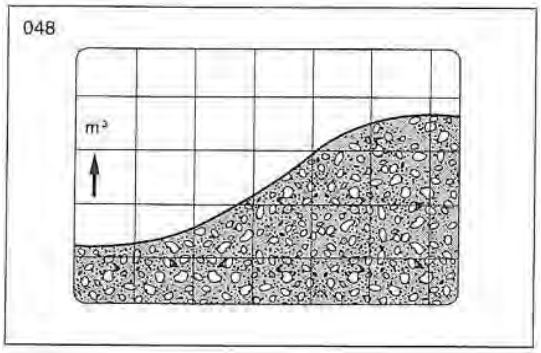
1) 펌핑을 시작하기 전에 슬러리(시멘트와 물의 혼합물)가 파이프 라인 내부에 잘 도포 되도록 스폰지볼 2개를 파이프라인 안으로 집어 넣으십시오. (그림 045) 교반기를 작동시키고 호퍼내에 슬러리를 3-4버켓을 넣으십시오. 펌프를 호퍼에 붓고, 콘크리트가 엔드 호스로 빠져 나올 때까지 아주 천천히 가동시키십시오. 스포티 볼을 회수 하십시오. (그림 045)



■ [주의] 주어진 최대 압송보다 높게 작동하지 마십시오.

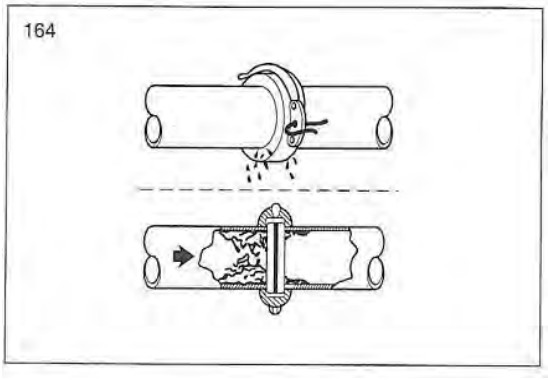
2) 새 파이프 및 긴 파이프 라인은 상당한 저항을 가지고 있으므로 충분히 파이프라인 내측을 윤활시킨 후 펌핑을 시작하여야 합니다.
3) 수삼회 펑핑행정을 한 뒤 아지테이터 스위치를 넣으십시오.
4) 믹서트럭에서 드럼을 빨리 회전시켜 충분히 콘크리트를 혼합하십시오.
5) 콘크리트를 호퍼내에 붓고 계속 펌핑하십시오.

만약 딜리버리 라인의 안쪽에 녹이 슬어 있는 경우 몇 m3 타설후에는 출력이 점점 증가할 수 있습니다. (그림 048)

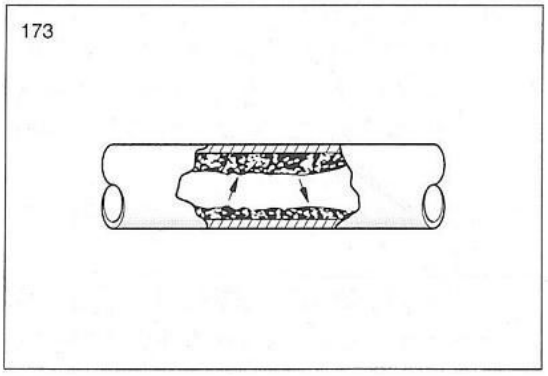


6) 만약 막힘현상이 발생할 경우 콘크리트를 재빨리 호퍼내로 되돌려 재 혼합하십시오. 딜리버리 실린더와 트렁크가 정확하게 자동적으로 변환될 때까지 펑핑위치로 전환시키지 마십시오. 그뒤 조심스레 펌핑을 하십시오.
7) 막힘현상의 추정원인

- 슬러리(윤활막)이 너무 엷은 경우
- 충분한 윤활제를 사용하지 않은 경우
- 압송관에서 콘크리트가 새는 경우
- 변환밸브의 누출 (그림 164)



• 변환밸브 및 압송관내에서 콘크리트가 굳은 경우 (그림 173)
• 부적절한 콘크리트의 배합



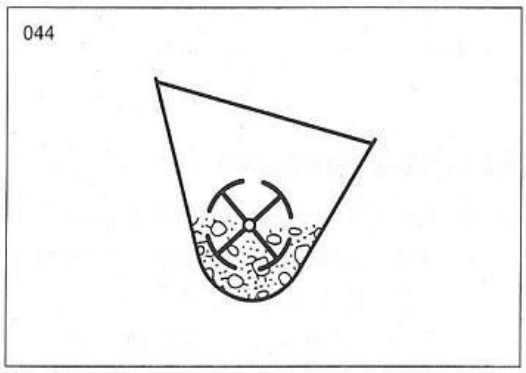
2.3.4 펌핑 준수사항 (펌핑)

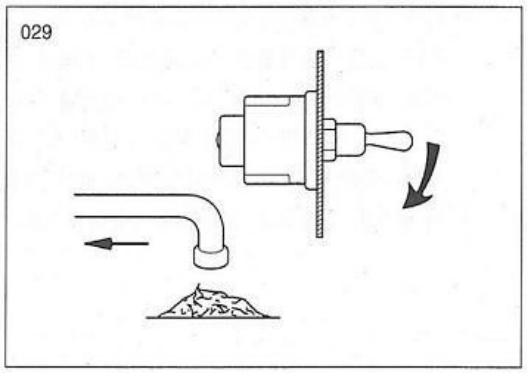
■ [주의] 된 혼합 및 저급의 모래자갈 (쇄석, 과다한 모래)은 압송 실린더의 흡입 효육을 떨어뜨리고 결과적으로 펌핑량이 줄어듭니다. 이런 경우 압송 스피드를 낮추면 흡입효율이 증가합니다.

1) 펌핑성능에 나쁜 영향을 미치는 콘크리트가 호퍼에 담겨져 있는 경우 아지테이터 샤프트는 항상 보이게 될 것입니다. 좋지 않은 콘크리트(예:극도로 굳거나, 배합이 나쁘거나 저질의 경량 시멘트 등)는 만약 아지테이터 샤프트의 밑 가장자리에만 채워진 경우에는 쉽게 송출될 수 있습니다. (그림 044)

이런 방법은 콘크리트와 더불어 공기가 딜리버리 실린더에 흡입되고 콘크리트는 공기마개 역할을 하여 송출되게 됩니다. 위와 같은 경우에 막힘현상의 위험요소가 됩니다.

2) 작업을 잠시동안 중지한 경우 딜리버리 라인내에 2-3행정정도 백-펌핑을 하여 압력을 거하십시오.송출관에는 잔압이 없도록 하십시오.(그림 029)





3) 매우 묽은 콘크리트의 경우에는 골재분리가 쉽게 일어나므로 작업중단시에는 가능한한 호퍼내의 수준을 낮게 하십시오.

4) 장시간 작업을 중단시 호퍼로 콘크리트를 백펌핑시키고 재혼합 후 타설하십시오.

5) 장시간 작업을 중단시 콘크리트 분리의 원인이 되는 진동을 방지하기 위해 엔진 및 시동장치를 끄십시오.

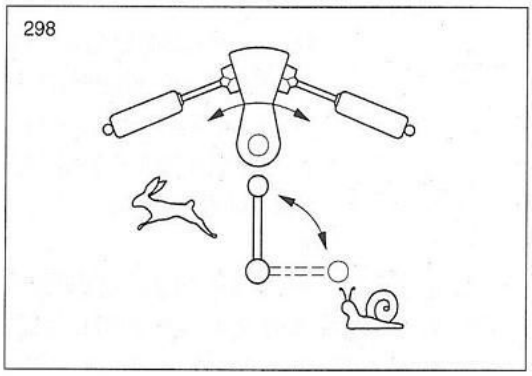
약 10-15분 간격으로 콘크리트를 펌핑 후 백펌핑하여 콘크리트를 순환시키십시오.

6) 고층건물의 타설시 낮은 수분 흡수력을 가진 콘크리트를 사용할 경우 펌핑이 중단되지 않도록 하십시오. 휴식후 다시 타설할 때 변환 튜브(예:“S"튜브)가 양쪽 끝점에 완전히 변환될 때까지 백펌핑하십시오.

7) 압송 라인내의 에어 포켓(공기 혼입)은 압송 라인끝에서 압축된 공기가 갑자기 방출되며 콘크리트를 터트리듯이 쏟아내어 위험합니다. 에어포켓은 호퍼에 콘크리트가 충분하지 않을 때 공기가 혼입되어 발생합니다.

8) 낮은 점도의 콘크리트를 펌핑중에는 댐핑 밸브가 닫혀져야하며 (달팽이표시) 그렇지 않으면 변환 튜브가 갑작스럽게 동작합니다. 높은 점도의 콘크리트나 변환 튜브가 끝지점에 도달하지 않은 경우 댐핑 밸브를 열려져야 합니다. (토끼 표시)(그림 298)

이 안내대로 하지 않으면 수명이 단축됩니다.

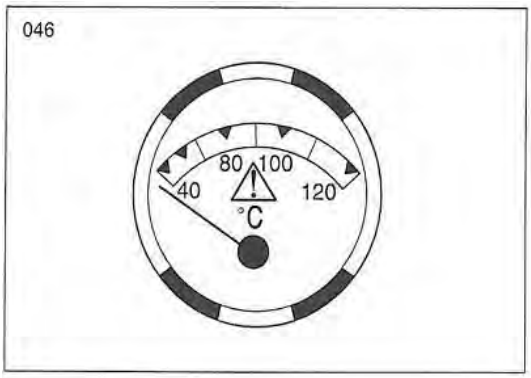


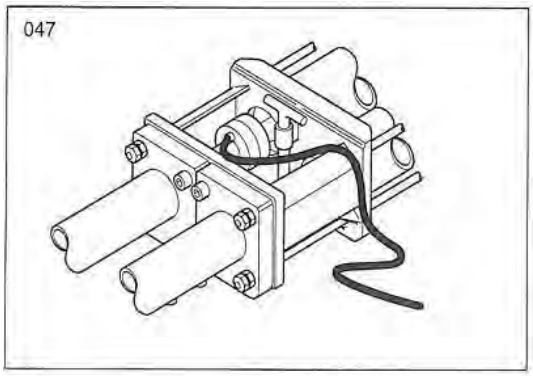
2.3.5 펌핑시 준수사항(장비)

1) 규정 회전수 이상으로 엔진을 작동시키지 마십시오. 그렇지 않으면 유압펌프의 과회전 현상이 발생할 수 잇습니다.

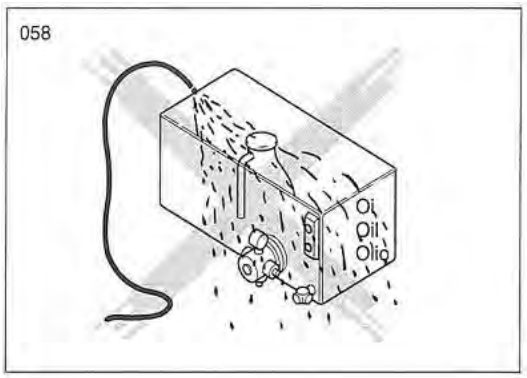
2) 올바른 스트로크를 유지하십시오.

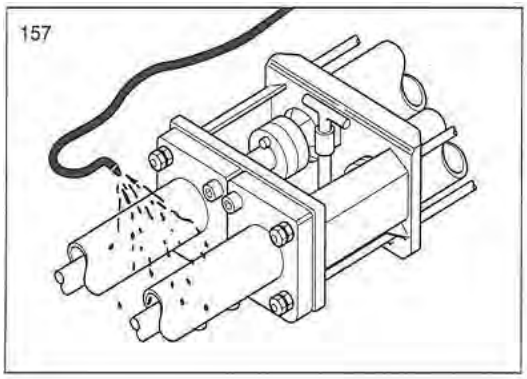
3) 어쩔수 없는 상황에서 과도한 펌핑을 계속하여 작동유의 온도가 80℃를 넘은 경우 물탱크에 있는 냉각수를 찬물로 교환하십시오.(그림046,047) 냉각수를 교환했어도 온도가 상승하면 계속적으로 냉각수를 자주 반복하여 교체하십시오. 그리고 과열의 원인을 찾아 조치하십시오. 또한 85℃가 초과해도 냉각 휀이 작동하지 않으면 수동으로 조작하여 사용하십시오.





4) 작동유 탱크에는 어떠한 일이 있어도 물을 뿌리지 마십시오. 이것은 오일 탱크안에서 공기가 응축하여 물이 생성되는 원인이 되어 펌프의 기능 손상이 될 수 있습니다. (그림 058) 편법으로 꼭 냉각이 더 필요시는 드라이브 실린더에 물을 추가로 뿌리면 냉각효율을 높일 수 있습니다. (그림 157)





■ [주의] 절대 바닷물이나 염분이 들어 있는 물로 냉각시키지 마십시오. 염분은 압송 실린더의 크롬피막을 파괴시키고 유압시스템에 나쁜 영향을 줍니다.

5) 작동유가 90℃를 초과하고 스위치 박스 위에 있는 적색 경고등이 켜지면 펌프는 자동적으로 꺼지도록 설계되어 있습니다.

만약 과열이 발생되면

• 펌프 스위치를 끄십시오. (녹색등이 꺼짐)

• 엔진은 끄지 마시고 오일냉각기가 계속 작동하도록 하십시오.

• 냉각수를 교환하십시오.

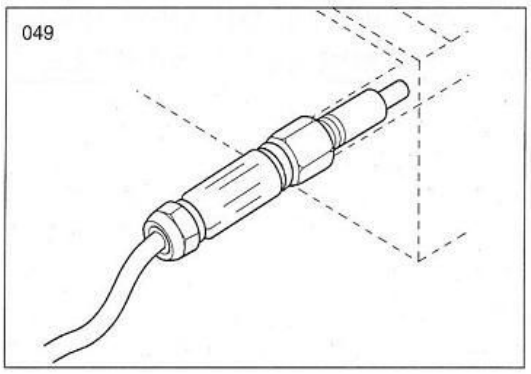
• 적색 경고등이 꺼지면 펌프스위치를 작동시켜 출력을 줄인 상태에서 천천히 펌핑하십시오.

• 펌핑작업을 완료후 오일의 과열원인을 조사하여 조치하십시오.

• 온도 센서는 콘트롤 블록에 있습니다. (그림 049)

6) 펌핑 작업 후에는 기계작동을 멈추기 전에 약 1,000rrpm 정도로 엔진을 회전시키십시오.

7) 항상 엔진 속도로 “레틀링 스피드(900rpm)"이상으로 조정하십시오.



과열시 조치사항 :

- 펌프를 작동 모드의 “OFF"에 놓으시오.
- 엔진을 끄지 마시오. 오일 냉각기는 계속 작동되어야 합니다.
- 워터 박스의 물을 교환하고 가득 채우시오.
- 적색 경고 등이 꺼지면 펌프를 켜시오. 출력을 감소시키고 펌프를 계속 하시오.
- 펌프작업이 끝났을 때 오일의 과열 원인을 조사하시오.
- 열 전기 차단장치의 온도센서는 메인 펌프에 있습니다.

8) 만일 엔진이 과부하 상태에서 작업되고 있으면 엔진을 멈추기 이전에 약 1000RPM의 공회전 속도로 식히시오. 이것은 터보 엔진이 장착된 경우에 특히 중요합니다.

9) 오일 쿨러에 부착된 온도 센서는 오일 온도가 55°C(LH)/70°C(RH)에 도달하면 메인 콘트롤 판넬 내부의 릴레이를 작동시켜 쿨러모터를 작동시킵니다. (유압 및 전기 회로도참조)

10) 엔진 rpm이 800rpm 이하로 돌아가는 이른바 “래틀링 스피트(ratting speed:덜거덕거리

는 속도)"라고 불리는 속도보다 높게 조절하시오.

2.4 세척

여기서는 작업 후에 콘크리트 펌프, 호퍼 및 압송 라인의 세척요령을 설명합니다.
아래 내용을 잘 숙지하십시오.

• 장비 구입후 처음 한달동안은 모든 페인트 부위를 물 또는 최대 수압이 5bar인 물로 세척하십시오.
절대 강한 세척제를 첨가 사용하지 마십시오.

• 이 시간이 지나면 페인트가 완전히 굳어지며 그 다음부터 스티 제트 또는 다른 기구를 사용할 수 있습니다.

• 절대 바닷물 또는 염분이 포함된 물이 장비에 묻은 경우 즉시 깨끗한 물로 닦아 내십시오.

2.4.1 흡입 세척

1) 압송 실린더의 윗부분까지 비워지도록 펌핑한 후 펌프를 끄십시오.
2) 선단호스에 물을 적신 세척용 스폰지볼을 집어 넣으십시오.
3) 백펌핑을 하여 스포지볼을 호퍼내로 되돌리십시오.
4) 변환튜브에 있는 세척구 뚜껑을 여십시오.
- 그리고 세척구 뚜껑을 뒤집어 손잡이가 안쪽으로 가게 하여 다시 끼우고 백펌핑을 천천히 하십시오.
5) 잔존 콘크리트를 백펌핑 후 펌프를 끄고 세척구 뚜껑을 열고 스폰지볼을 빼내십시오.
6) 그리드에 안전 장치가 있는 경우 그리드를 열자마자 교반기와 변환 튜브를 멈춥니다. 그러므로 세척중에 잠깐 그리드를 닫고 변환 튜브를 작동시켜주고 그리드를 다시 열어 세척하십시오. 그리드는 세척중에 고정된 볼트로 체결되어 있어야 합니다.
7) 호퍼 바닥에 있는 플랩을 열고 남아 있는 콘크리트를 빼내십시오.
- 변환튜브, 호퍼, 딜리버리 실린더 및 물탱크와 물펌프를 작동시켜 조심스레 세척하십시오.
- 장비를 완저닣 세척후 오일과 가솔린 혼합물로 호퍼등에 얇게 뿌려 주십시오.
8) 만약 얼게 되는 위험이 있다면 물탱크 및 물펌프등을 완전히 비우십시오.
- 물탱크를 펌프를 사용하지 않을 때(예:주말,휴일등) 비워두는 것이 정상입니다.

2.4.2 물세척

1) 역펌핑하기 전에 펌핑을 하여 가능한한 호퍼를 비우십시오. 그 다음 역펌핑을 1-2회 실시하여 압송 라인내의 압력을 제거하고 펌프를 끄십시오.
2) 호퍼 바닥을 열어 잔류 콘크리트를 배출시키고 변환 튜브 또는 플랩 엘보우가 있는 세척구를 여십시오.

3) 스위치를 “역펌핑”에 위치하도록 하여 펌프를 가동시키고, 스프레이 노즐을 끼운 물호스를 세척구에 다래쪽으로 향하게 집어넣어 조심스럽게 물을 뿌리십시오.

- 변환 튜브가 변환될 때 물 호스가 흐를 때까지 물을 계속 뿌린 후 펌프를 끄십시오.

스프레이 호스로 교반기 호퍼 및 콘크리트가 닿는 모든 부위를 세척하십시오.

4) 2-3개 정도의 물에 적신 스폰지볼을 세척구에 집어 넣고 꼭 닫으십시오.

- 호퍼 바닥을 막고 호퍼내에 물을 가득 채우십시오.

5) 펌핑 스위치를 넣어 펌핑시키십시오.

- 스폰지 볼이 엔드 호스로 나올 때까지 펌핑하십시오.

6) 그리드에 안전 장치가 있는 경우 그리드를 열자마자 교반기와 변환 튜브가 멈춥니다. 그러므로 세척중에 잠깐 그리드를 닫고 변환 튜브를 작동시켜주고 그리드를 다시 열어 세척하십시오. 그리드는 세척중에 고정된 볼트로 체결되어 있어야 합니다.

7) 호퍼 바닥에 있는 플랩을 열고 남아 있는 물을 빼내십시오.

- 변환튜브, 호퍼, 딜리버리 실린더를 고압의 물로 세척하십시오.

- 완전히 세척을 하고 오일과 가솔린을 섞은 것 또한 포장유를 장비에 뿌려 주십시오.

8) 동결의 위험이 있다면 물박스, 물탱크, 물펌프 내를 완전히 비우십시오.

- 장비를 장시간(익일 작업예정 또는 주말의 경우)사용치 않을 경우에 물박스는 비워 두는게 정상입니다.

9) 세척할 때 교반기의 실링 러버가 손상되지 않도록 하십시오.

3. 장비보수 유지 규칙

3.1 일상적 점검

1) 오일, 연료와 물의 수위를 점검하고 필요하면 가득 채우시오. 이렇게 하기 위해서는 기계는 평평하게 세워져 있어야 합니다. 아침에 작업을 하기 전에 오일 탱크의 드레인 꼭지를 열어서 유압 오일 탱크의 바닥으로부터 응축된 물질(물이나 먼지 찌꺼기등)을 모두 빼내시오.
2) 콘크리트와 접촉하는 모든 부분을 점검하시오. 마모된 모든 부품을 교체하시오.
3) 투입구 안에 있는 믹서 샤프트 베어링에 그리스(윤활유)를 치시오. (지속적인 작업을 할 때는 하루에 몇 번씩 윤활유를 쳐야 합니다.) 이것은 중앙윤활시스템이 있는 장비에는 필요치 않습니다.
4) 펌프를 사용하고 세척한 후에 S-밸브튜브의 링과 마모판 (wear plate) 사이의 틈새가 있는지 확인하시오. 틈새가 있으면 즉시 교환하시오.
※ 링과 마모판의 마모 한계는 합계 최대 5mm 이상 마모시 즉시 교환하시오.
5) 압력 파이프 베어링에 윤활유를 치시오.
6) 유압라인과 부속품에서 틈새가 있어 새는지의 여부를 눈으로 확인하시오.
7) 오일 냉각기를 조심스럽게 청소하시오.
※ 오물질은 과열을 초래할수 있습니다.
8) 일주일에 한번씩 전기 장치의 볼트들을 조여주시오.
9) 세척 후에 조립 할 때 압력 파이프와 전달라인 사이에 위치한 회전 이음새의 연결부와 봉인(seal)에 윤활유를 치시오.
10) 기계 위의 지시 판에 따라 지속적인 작업을 하는 동안 Tilt 실린더 (Change over cylinder)에 있는 모든 윤활지점에 윤활유를 주입하시오.

3.2 정기점검 요령

각 부품별 정기점검 요약										
100시간 작동후 첫 번째 서비스(서),최소10시간작동후:매주(주),일년에 한번(년),필요한 경우(필)			서	일	주	년	필	작동시간	
부품		점검 항목						500	1000
일반		콘크리트 펌프의 전문가 진단				X		X	
		스크류 연결부의 토오크 점검	O						
		비상기능 점검			X				
		스위칭 포오크의 러버 플러그 점검			X				
오일탱크		작동유 레벨 점검		X					
		응축된 물 배출		X					
		오일 교환						X	
		물받이 청소						X	
휠터		흡입휠터 교환	X				X		
		스크린 및 걸림망 청소	X				X	X	
		플로우 휠터 청소(있는 경우만)						X	
물 펌프		흡입 휠터 청소						X	
		플라스틱 롤러 교환							
변환 튜브		마모 상태 점검		X			X	X	
		구동 영역 그리이스 주입		X					
		스위블 레버 및 볼트의 토오크 점검	X				X	X	
확관 휘팅		육간검사(누유)	X						
코어 펌프		스페이서 플랜지의 볼트점검,필요시 재조임	X				X		
		냉각수 배출							
콘크리트와 접촉되는 부품		마모상태 점검		X			X		
		교환					X		
호 퍼		믹서 샤프트 베어링 그리이스 주입		X					
		교반기 스위치 기능 점검		X					
교반기		볼트 조임			X				
냉각기		세척		X				X	
압송라인		마모상태 점검		X			X		
		파이프 커플링 점검		X			X		

3.3 점검 주기

3.3.1. 개 요

정지 점검 주기를 참조하십시오.

1) 관련된 제작자의 점검 안내에 따라 점검해야 합니다.

2) 수리 또는 점검한 후 항상 명시된 안전 규칙에 따르십시오.

3) 여기에 주어진 점검 주기는 정상 작업 상태 및 마모에 따른 것입니다. 펌핑시 작업 조건이 나쁘면 점검 회수를 더 늘려야 합니다.

4) 콘크리트 펌프 및 압송 라인은 500시간 작업 후 또는 최소 1년에 1번은 전문가에 의뢰하여 작동 안전성을 검사 받아야 합니다.

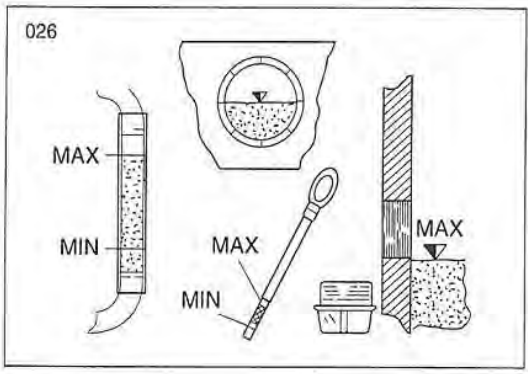
3.3.2. 매일 점검 사항

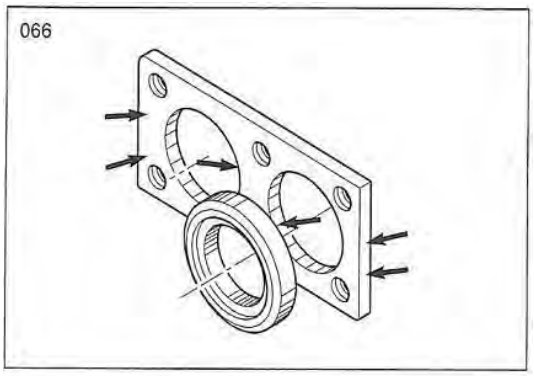
1) 작동유, 연료 및 수위를 점검하여 필요시 가득 채우십시오. 이때 장비는 수평 상태에서(주행상태) 시행하십시오. 작업을 시작하기 전 작동유 탱크 아래에 있는 드레인 콕크를 열어 오염물을 배출하십시오. 오일이 보이면 드레인 콕크를 잠그십시오.

2) 콘크리트와 접촉되는 부분의 부품 및 파이프를 점검하고 마모된 부품은 교환하여야 합니다.

3) 콘크리트 송출관의 마모한계 두께는 망치로 두드려 점검하거나 두께 측정 공구를 사용하여 측정후 마모된 부분을 교환 하십시오.

4) 호퍼내에 있는 양쪽 믹서 샤프트의 베어링 등에 그리이스를 주입하십시오.(이곳은 매일 작업이 정지된 휴식시간을 이용하여 여러번 그리이스를 주입하여야 함. 단, 중앙 윤활공급식에서는 불필요한 작업으로 그리이스 주입 작업을 하지 않아도 됩니다.)





5) 세척을 한 후, 플랩 엘보우를 열고 S-파이프 내부의 마모를 육안 점검하십시오. 토치를 이용하여 내부를 비추면 육안으로 마모상태를 점검할 수 있습니다. 또한 마모판도 마모 상태를 점검하십시오.

6) 펌핑 및 세척 후에 변환 튜브와 마모판간의 간극을 점검하십시오. 간극이 3mm 이상이

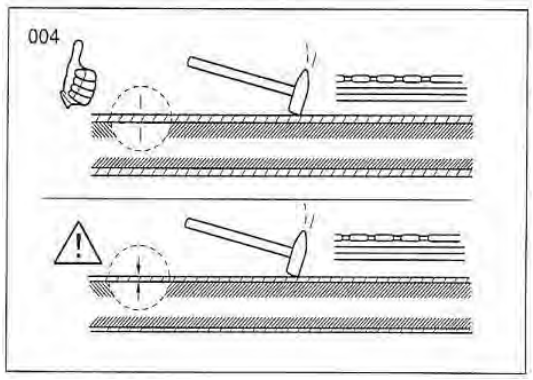
면 “변환튜브의 조정”에 따라 재조정 하십시오.

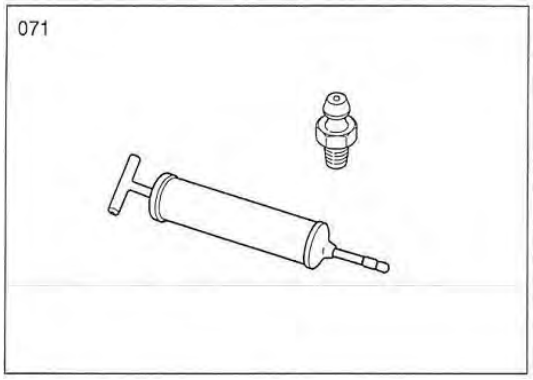
7) 파이프 베어링류에 그리이스를 도포하십시오.

8) 유압 라인 및 스크류 휘팅등의 누유를 검사하십시오.

9) 작동유 냉각기를 조심스럽게 세척하십시오.

■[주의] 냉각기에 오염물질이 묻으면 과열이 발생할 수 있습니다.



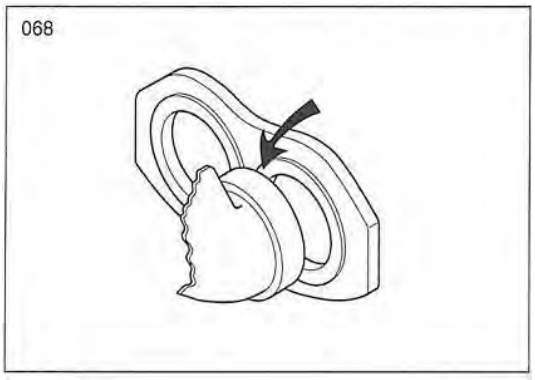


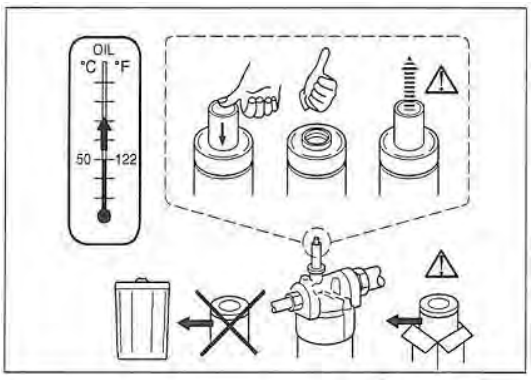
10) 교반기 안전 스위치를 점검하십시오.(있는 경우)

<순 서>

- 장비를 가동시키고 작동 온도가 50℃이상 될 때까지 작동시키십시오.
- 엔진 속도를 최대로 하십시오.
- 빨간 버튼을 누르십시오.
  - 만일 빨간 버튼이 그대로 있으면 휠터는 정상입니다.
  - 만일 빨간 버튼이 튀어나오면 휠터 카트리지를 교환해야 합니다.

■[주의]휠터는 오염되면 반드시 교환하십시오. 휠터 카트리지를 씻어서 재사용하지 마십시오.





11) 세척 후 압력관과 압송관 사이의 로터리 연결부의 시일과 커플리에 그리이스를 도포하십시오.
12)(장비에 붙어 있는 안내 표지판에 따라) 행정변환 실린더의 윤활 지점을 윤활시키십시오.

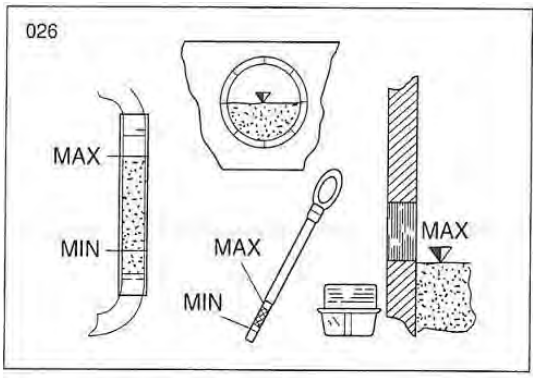
3.3.3. 초기 100시간 작동 후

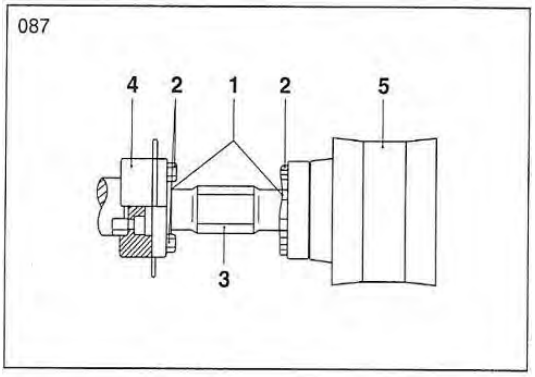
1) 전술된 매일 점검사항을 시행하십시오.
2) 엔진이 충분히 워밍업된 상태에서 모든 트랜스밋션, 압축기 등의 오일을 교환하십시오.
3) 유압 회로내에 있는 모든 휠터, 스크린, 걸림망 등을 세척하십시오. 자석 막대를 세척하고 휠터 카트리지는 교환하십시오.
4) “토오크 테이블”에 따라 모든 나사 연결부를 점검하십시오.
5) 모든 윤활 부위에 그리이스를 도포하십시오.
   - 이것은 초기 서비스뿐만 아니라 매주 필요합니다.
6) 록킹 와이어가 손상됐을 경우, 압송 피스톤과 로드 훌랜지 사이의 스페이서 훌랜지에 있는 볼트를 재조립하십시오.
7) 최대 펌프 속도에서 콘크리트 없이 행정 시간을 점검하십시오. 제원표에 있는 행정 시간은 최대 토출량시의 것입니다.
8) 스윙 레버에 있는 스크류의 조임 토오크를 점검하십시오. 조임 토오크는 21kg・m입니다.
9) 흡입 휠터 카트리지 교환 및 자석막대 세척요령

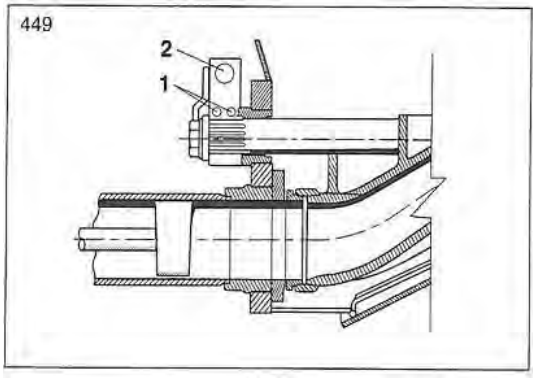
■[주의]자석 막대는 순정부품을 사용하여 주십시오.

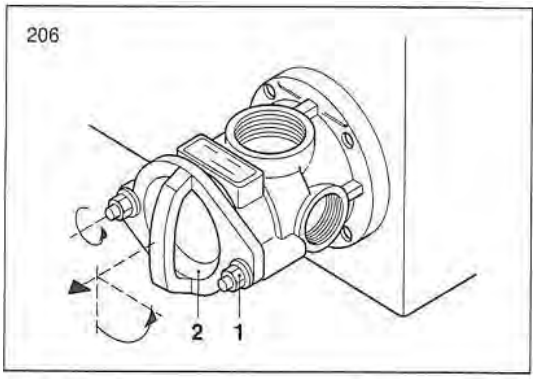
<흡입 휠터 카트리지 교환 요령>

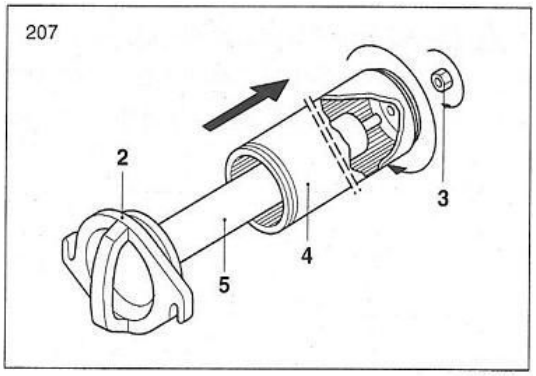
• 휠터 헤드로부터 오일을 담을 수 있는 용기를 휠터 헤드 밑에 두십시오.
• 육각 너트(1)를 헐겁게 푼 다음, 뚜껑(2)을 왼쪽으로 돌려 풀고 카트리지 전체를 잡아 빼내십시오.(그림 026) 휠터에 있는 멈춤 밸브가 자동적으로 오일이 흘러내리는 것을 방지해 줍니다.
• 육각 너트(3)를 분리하고, 휠터 카트리지(4)를 왼쪽으로 돌려 뚜껑(2) 및 자석 막대(5)로부터 분리 시키십시오.(그림 207)
• 천으로 자석막대(5)를 닦으십시오. (그림 207)
• 카트리지(4)를 교체하십시오.
• 휠터 인서트 페이퍼를 교체하십시오.
• O-ring을 점검하여 손상된 것을 즉시 바꾸어 주십시오.
• 역순으로 재조립하십시오.











3.3.4. 매 100시간 작동 후

1) 3장에 언급된 모든 점검 사항을 시행하십시오.

2) 제작자의 전문가에게 모든 기계 및 유압 부품 상태를 점검하십시오.

3) 모든 안전장치가 정상 작동하는지 점검하십시오.

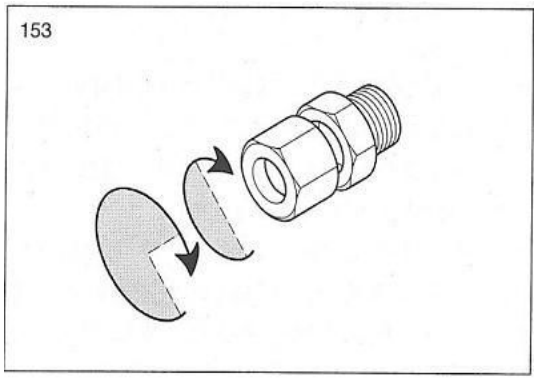
3.3.5. 나사 휘팅류의 점검 요령

1) 작동중 누유가 발생 될 때 1/2~3/4바퀴 정도까지만 재조임 하십시오.(그림 153)

2) 만약 누유현상이 재발생시에는 유압 파이프 중간 연결부 및 휘팅등을 전부 교체 하십시오. 만약 고압 호스 파이프를 교환할때는 휘팅이 간섭을 받거나 이물질(흙, 오일찌꺼기)등이 유입되지 않게 하고 자연스럽게 조이도록 하십시오.

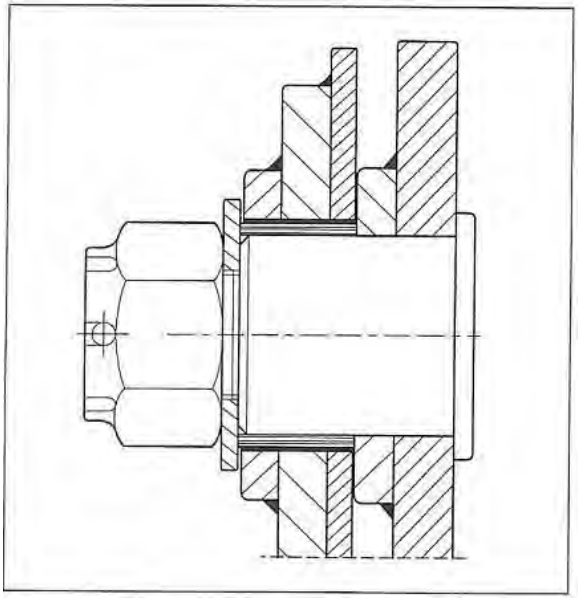
3) 벌크헤드휘팅의 경우 로크와셔를 반드시 끼우시고 확실하게 조이십시오.

4) 호스를 연결할 때에는 O-ring 및 호스의 휘팅안에 있는 시일의 이상 유무를 점검하시고 만약 시일 또는 O-ring이 손상되었을 경우에는 호스를 효관하십시오. (필요에 따라)



3.3.6. 핀 서포트 점검 요령

암 조립체의 조인트부에 있는 핀 서포트의 육간 캐슬 너트는 시운전후 50시간이 되면 규정된 토오크로 조이십시오. 그런다음, 붐 검사시마다 또는 최소 6개월마다 볼트의 시트를 점검해야 하며, 육각 캐슬 너트는 필요한 경우 재조임하십시오.



3.4 추천 오일 및 그리이스

* 서로 다른 규격의 오일 또는 동일회사 제품이라도 규격이 다른 오일은 어느 경우에도 보충하거나 혼합하여 사용할 수 없습니다.

3.5 급유 용량

급유위치		규격	ESSO	SHELL	MOBIL	GULF	TOTAL
중간기어 박스, 아지 테이터 기어박스	여름	SAE 90	GP-D90	SPIRAX 0 EP 9	MOBILUBE GX85W-90A HD85W-90A	-	-
	겨울	SAE 80	GP-D80	SPIRAX SPIRAX MA80W	MOBILUBE GX80W-A HD80W-A	-	-
작 동 유		HLP 46	NUTO H46	TELLUS 46	DTE 25 AW 46	HARMONY ZS 46	AZOLLA ZS 46
그리이스		-	ESSON 다목적 그리이스	RETINAX A	MOBIL-GREASE MP MOBILUX EP2	-	-

1) 교반기 기어박스 : 0.5ℓ

2) 작동유 탱크 : 모델에 따라 다르므로 제원표를 참조하십시오.

3) 시스템 내부 : 콘크리트 펌프 유압 시스템(작동유 탱크 제외)

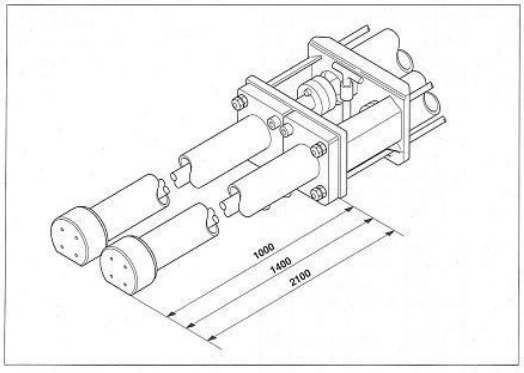
1000mm 행정 : 35ℓ

1400mm 행정 : 60ℓ

2100mm 행정 : 95ℓ

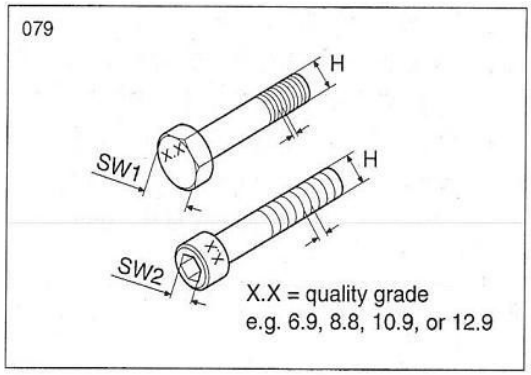
4) 중간 기어박스 : 약 3.5ℓ

5) 압송관 직경 125mm : dir 12ℓ



3.6 토오크 테이블

조임 토오크는 항상 나사 마찰과 나사의 종류에 따라 결정 되어지며 그 치수는 볼트머리의 매끈한 면에 표시되어 있습니다. (그림 079)



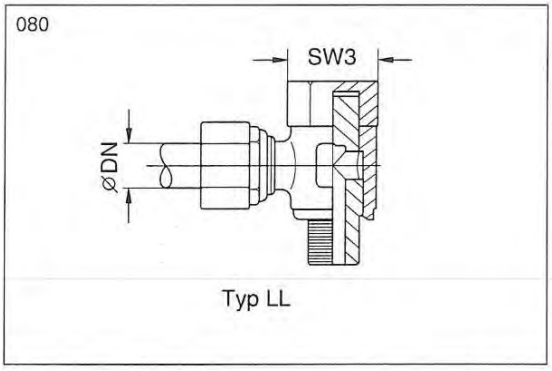
1) 미터 나사의 규정 토오크

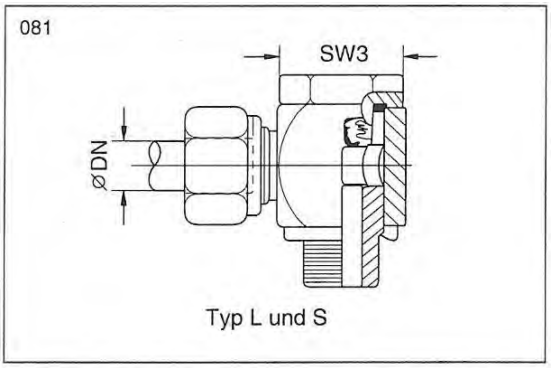
사이즈				품질 등급			
M	H	SW1	SW2	6.9	8.8	10.9	12.9
M 4	0.7	7	3	2.4	7.9	4.1	4.9
M 5	0.8	8	4	5.0	6.0	8.5	10
M 6	1.0	10	5	8.5	10	14	41
M 8	1.25	13	6	21	25	35	41
M 10	1.5	17	8	41	49	69	83
M 12	1.75	19	10	72	86	120	145
M 14	2.0	22	12	115	135	190	230
M 16	2.0	24	14	180	210	795	355
M 18	2.5	27	14	245	290	405	485
M 20	2.5	30	17	345	410	580	690
M 22	2.5	32	17	465	550	780	930
M 24	3.0	36	19	600	710	1000	1200
M 27	3.0	41	19	890	1050	1500	1800
M 30	3.5	46	22	1200	1450	2000	2400
M 8×1	1.0	13	6	23	27	38	45
M 10×1	1.0	17	8	44	52	73	88
M 12×1	1.0	19	10	76	90	125	150
M 14×1.5	22	12	125	150	21	250	
M 16×1.5	24	14	190	225	315	380	
M 24×2	2.0	36	19	650	780	1100	1300
M 20×2	2.0	46	22	1350	1600	2250	2700

2) 자동 조심 회전고리 나사형 휘팅(그림 080,081)

(이 경우 손으로 1차 조임 후 아래표와 같이 조인후 1/4바퀴 더 조임)

사이즈		모 델	Fig.	토오크
Dia	SW3		No.	Nm(=0.1kg•m)
8	14	8LLM	080	20
8	19	8LR		50
12	22	12LM		90
12	22	12LR		90
15	24	15LM		90
15	27	15LR	081	110
15	27	15L/M		110
18	27	18LM		110
25	41	25SM		200
25	41	25SR		200
30	50	30SM		300

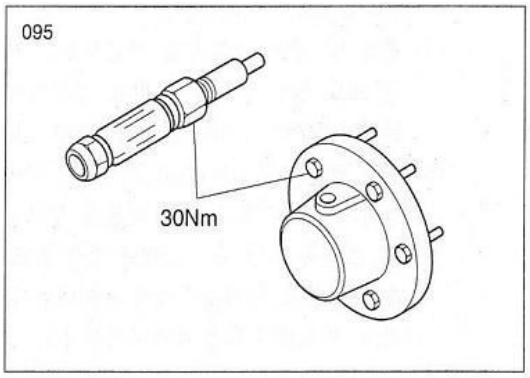


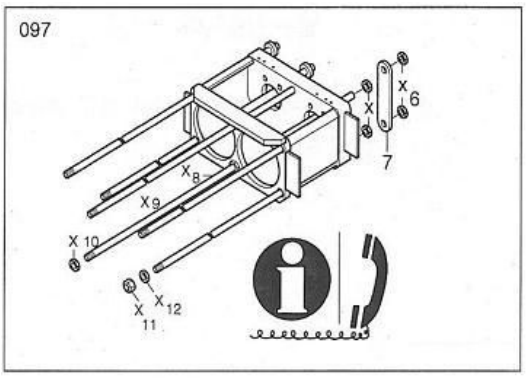


3) 기타 주요 조임 토오크 (상기 토오크표와는 상관없음)

- 믹서 샤프트의 베어링 홀랜지 및 온도센서

: 3Kg・m 그림 097의 크로스 멤버는 부품 목록을 참조하거나 당사 서비스 센터에 문의하여 주십시오.





3.7. 소모부품 교환 및 조정

3.7.1. 압송 피스톤의 교환

1) 2번 압송 피스톤의 탈거

(1) 스페이서 홀랜지(3)가 완전히 보이도록 피스톤 로드를 작동시키십시오. (그림085)

(2) 냉각수를 배출시키고, 펌프 및 넨진을 끄고 비상 정지 스위치를 작동시킨 후 내각수

박스 커버를 떠에내십시오.

(3) 록크와이어(1)를 빼내고 볼트(2)(그림 087)또는 클램프 링(2)(그림 088)을 풀고 스페이서 홀랜지(3)를 떼어내십시오.

(4) 엔진을 시동시키고 펌프 스위치를 켠 후 로드 홀랜지(4)를 압송 실린더(5)쪽으로 천천히 움직이십시오.(그림 089)

(5) 펌프 및 넨진을 끄고 비상 정지 버튼을 누르십시오.

(6) 볼트(2)를 로드 홀랜지(4)의 구멍을 통하여 압송 피스톤(5)에 끼워 손으로 조이십시오.(그림 089)

(7) 엔진 및 펌프 스위치를 켜십시오. “역펌핑”으로 압송 피스톤을 압송 실린더에서 완전히 끝까지 뽑아내십시오. (그림 090)

(8) 먼저 펌프 스위치를 끄고 엔진을 정지시키십시오. 다음 비상 정지 버튼을 누르십시오. 스크류 휘팅 또는 클램프 링을 풀고 압송 피스톤을 냉각수통에서 들어내십시오.

만약, 필요하면 물을 배출시키십시오.

■[주의] 압송 피스톤의 직경이 230mm인 경우 냉각수통에서 90℃ 돌려야 빼낼수 있습니다.

(9) 로드 홀랜지의 앞쪽에 남아 있는 콘크리트 등을 제거하십시오.

2) 2번 압송 피스톤의 조립

(1) 압송 실린더의 끝에 묻어있는 이물질을 제거하십시오. 이때 크롬층에 손상이 가지 않도록 주의하십시오.

(2) 새 압송 피스톤(5)을 볼트(2)(그림 089)또는 크램프링(2)(그림 088)으로 로드 홀랜지(4)와 연결시키십시오.

(4) 엔진을 시동시키고 펌프 스위치를 켜십시오. 조인트 또는 클램프 링을 탈거할 수 있도록 압송 피스톤(5)을 최대한 압송 실린더(6) 안으로 밀어넣으십시오.(그림 089)

(5) 먼저 펌프 스위치를 끄고 엔진을 멈춘 후 비상정지 버튼을 작동시키십시오. 조인트(2)(그림 089) 또는 클램프 링(2)(그림 088)을 분해하십시오.

(6) 엔진을 시동시키고 펌프 스위치를 역펌핑 위치로 하십시오. 그리고 로드 홀랜지를 뒤로 빼십시오.

(7) 먼저 펌프 스위치를 끄고 엔진을 멈춘 후 비상 정지 버튼을 누르십시오. 스페이스 홀랜지(3)를 로드 홀랜지(4)에 연결 시키십시오.

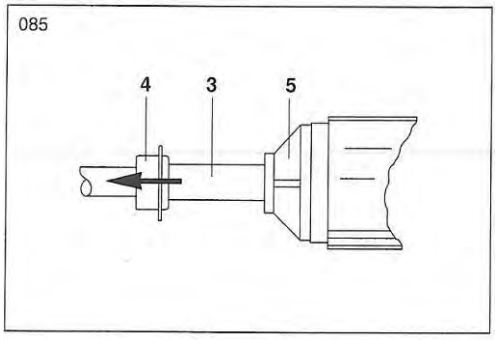
(8) 엔진을 시동시키고 펌프 스위치를 켜십시오. 로드 홀랜지(4)를 압송 피스톤(5) 근처로 이송시키십시오.(그림 091)

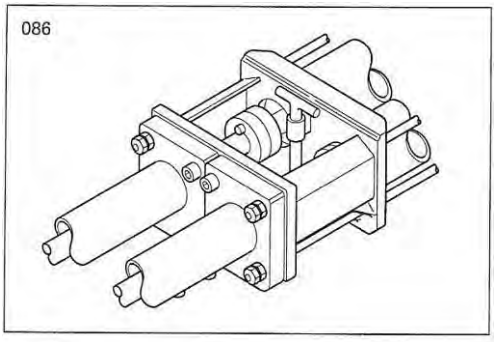
(9) 먼저 펌프 스위치를 끄고 엔진을 멈춘 후 비상 저잊 버튼을 누르십시오. 필요하면 스페이스 홀랜지(3)를 재정렬시키고 압송 피스톤(5)에 연결시키십시오. 볼트 형식의 조인트의 경우 토오크 테이블에 따라 볼트를 조이고 록킹 와이어로 풀리지 않게 하십시오.

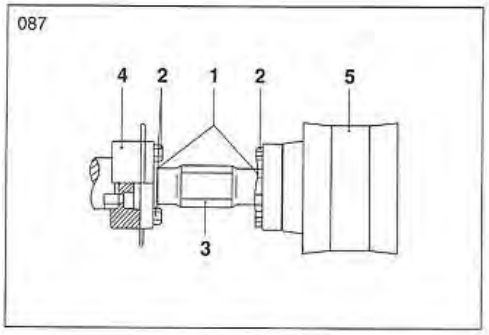
3) 1번 압송 피스톤의 분해와 조립

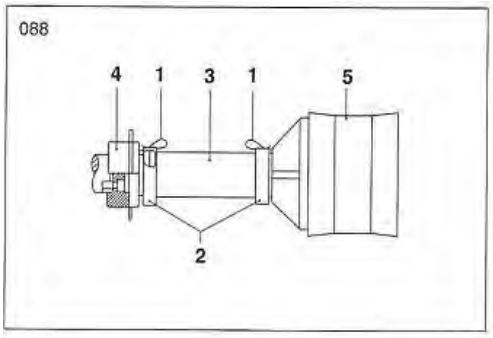
1번 압송 피스톤의 교환은 2번 압송 피스톤과 같습니다. 그러나 피스톤 로드는 끝지점으로 가게 하려면 피드라인(6)과 첵크 밸브(7)를 제거해야 합니다. 보어 구멍(9)은 열려 잇어야 합니다.

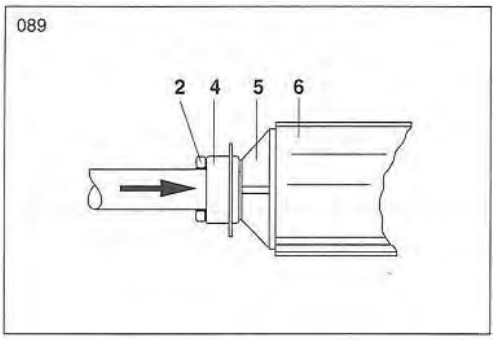
(그림 092) (단지 Φ230mm 압송 피스톤인 경우만 필요) 압송 피스톤을 교환한 후 피드라인(6)과 첵크밸브(7)을 재조립하십시오.

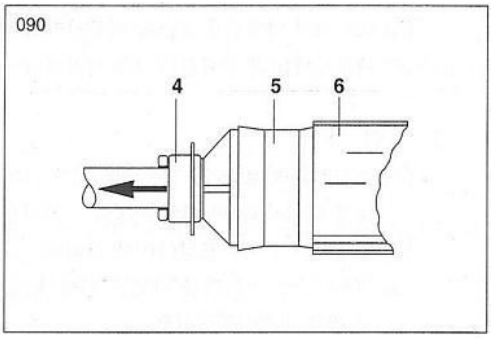


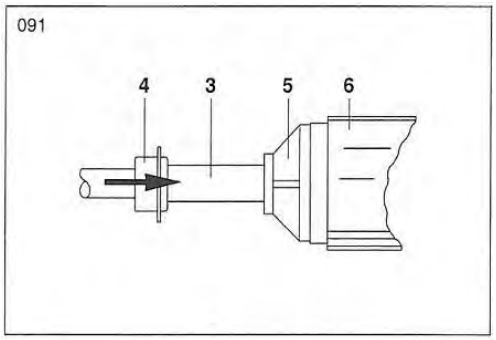


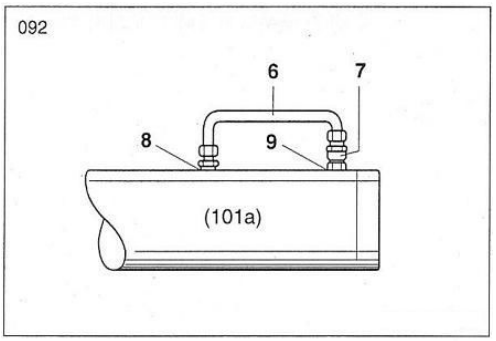












3.7.2. 마모 부품의 교환 (S-파이프)

엔진을 정지시키고 축압기가 있는 경우 축압기의 압력을 완전히 제거하고 셧오프 콕크(Shut-Off Cock)를 잠그십시오.

스텍터클 마모판, 마모 링 및 압력 링의 교환

1) 분해

(1) 마운팅 플레이트(1)를 탈거하고 변환 레버(2)의 볼 소켓(4) 바깥으로 변환실린더의 홀랜지를 잡아 빼십시오.

(2) 교반기 그리드를 분리하십시오.

(3) 클램프 볼트(3)를 이완시키고 조정 볼트(5)와 같이 반시계 방향으로 몇 바퀴 돌리십시오.

(4) S-파이프(9)를 압력링(12)쪽으로 미십시오.

(5) 스텍터클 마모판용 볼트를 이완시켜 제거한 뒤에 약간 돌려서 스텍터클 플레이트(7)를 들어 내십시오.

(6) 마모링(10)과 압력링(11)을 탈거하십시오.

2) 조립

(1) 스텍터클 마모판(7) 접촉면에 있는 그리이스를 제거하고 오래되어 변질된 것이 아닌 시일링 콤파운드를 도포 하십시오. 이 작업 이전에 스텍터클 마모판(7)용 O-ring (20)을 장착하십시오.

(2) 압력링(11)과 마모링(10)에 그리이스를 도포하고 S-파이프(9)와 같이 조립하십시오.

(3) 그리이스를 스텍터클 마모판(7)에 평평하도록 5번 조정볼트를 조이되 11번 압력링이 비틀리지 않도록 하십시오.

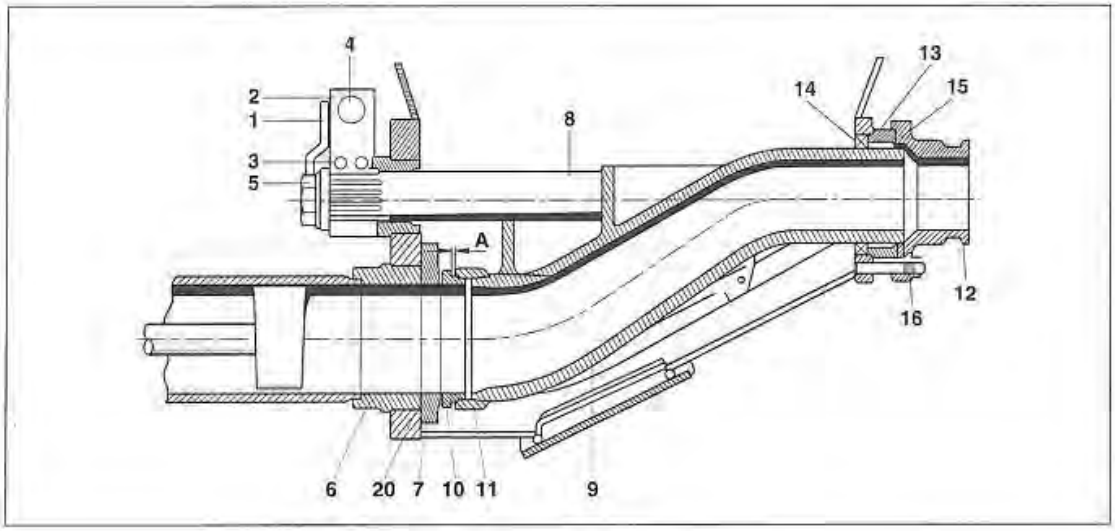
(5) 마모링(10)과 S-파이프(9) 사이의 틈새 “A"를 측정하십시오. 그 거리는 3~5mm 이어야만 합니다.만약 측정값이 그렇지 않을 경우 압력링(11)의 폭이 변경되어야 합니다.

(6) S-파이프(9)가 더 이상 움직이지 않을 때까지 조정볼트(5)를 조이십시오. (변환 튜브를 돌리는데 약 25kg・m가 필요하며 약 300mm 쇠막대를 사용하면 됩니다.)

■[주의]생산공차 및 11번 압력링의 상태에 따라 “S"파이프가 올바르게 조정되었을 때 거리 ”A"는 약 1~3mm입니다.

(7) 클램프 볼트(3)을 21kg・m로 조이고 변환 실린더의 플런저 스위치 변환 레버(2)의 볼 소켓(4) 안쪽으로 끼우십시오.

(8) 마운팅 플레이트(1)을 볼트에 끼우십시오.(조정 볼트는 수평이어야 합니다.) 마운팅 플레이트에 있는 록킹 핀은 구부러지거나 마모되지 않아야 합니다. 그렇지 dskg으면 볼이 소켓에서 미끄러져 나올것입니다.



3.7.3. 변환 튜브(S-파이프)의 조정

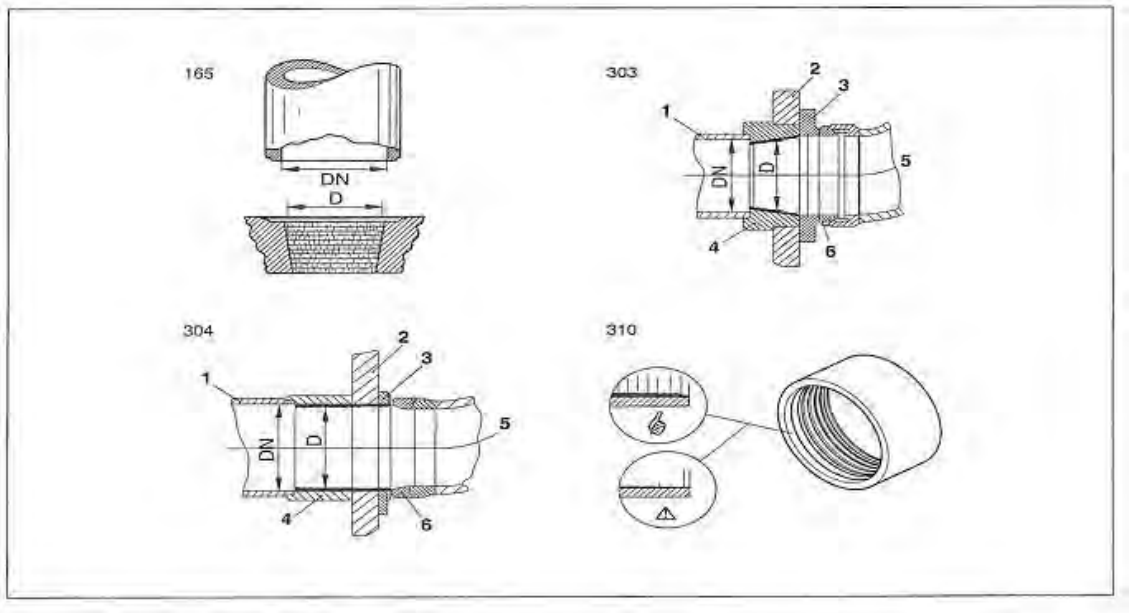
엔진을 정지시키고 축압기(어큐물레이터)가 있으면 압력을 완전히 제거하고 셧 오프 콕크(Shut-Off Cock)를 잠그십시오.

클램프 볼트(3)를 느슨하게 풀고 3.7.2항에 따라 시행하십시오.

· 중간링에 재생 및 교환

그림 165에서 직경 D가 압송 실린더의 공칭 직경 DN보다 2mm 이하로 작은 경우 중간 링을 재생하거나 교환하십시오.

실린더 직경(mm) : ND 공칭 치수	중간링 직경(mm) : D 최대 마모한계	추천직경(mm) : D 표면 용접후
230	228	220
150	148	140
120	118	110
100	38	90



1. 딜리버리 실린더
2. 호 퍼
3. 마모판
4. 스러스트 링
5. “S" 파이프
6. 마모링

3.7.4. 윤활 요령

1) 변환 튜브의 올바른 조정과 마찬가지로 추천 윤활유(작동유 및 그리이스)의 사용은 베러이의 수명을 연장시켜 줍니다.

2) 그리이스 도포 지점은 3.1항 “점점 주기”에 따라 주십시오.

3) 베어링과 시일부는 5000m3 또는 100시간 작업후 점검해야 하며, 그 이전이라도 베어링으로부터 시멘트색의 오일-그리이스 혼합물 또는 슬러리(콘크리트 혼합물)가 누출되면 교환하십시오.

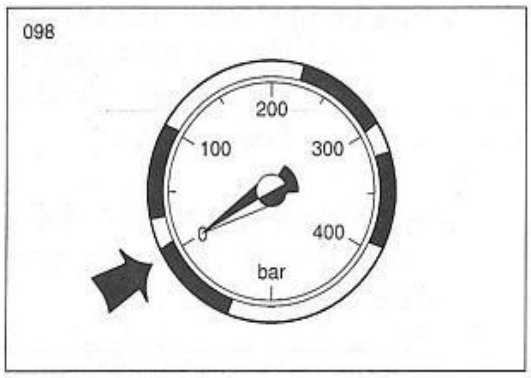
4) 점검후 베어링 부시는 고압이 작용할 때 부시의 축방향 움직임을 방지하기 위하여 록타이트(Loctite)를 바르십시오.

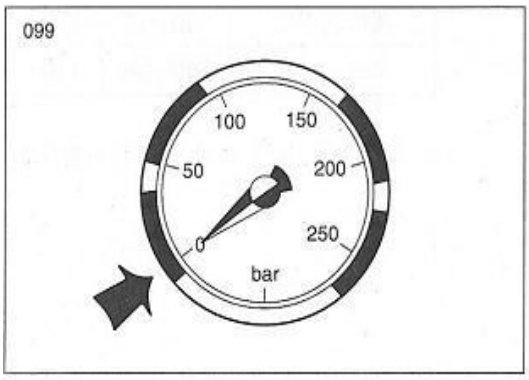
3.7.5. 유압 호스 라인의 교환

1) 유압 호스의 수명은 태양, 열, 고압 및 부하 변화에 따라 좌우됩니다.

2) 만일 유압 호스가 바싹하거나 균열 또는 누유가 발생하면 즉시 교환하여 주십시오.

■안전사고 주의 : 호스 교환시는 유압을 제거하야여만 합니다.

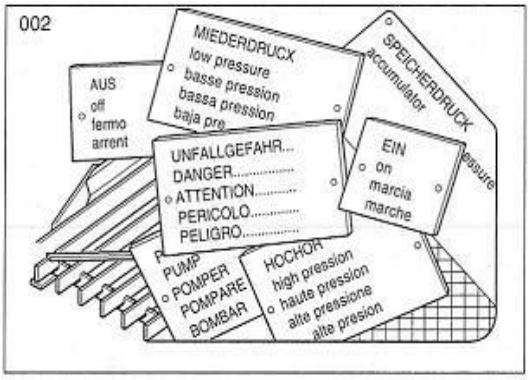




3.7.6. 가장 중요한 안전 규칙 요약

1) 안전 및 사고 예방을 위하여 인식표, 보호커버(그리드등) 및 경고 표시판 등의 모든 장치를 제거하거나 개조하지 마십시오. (그림 002)

2) 개인 보호장구(헬멧, 안경, 마스크, 장갑)은 항상 모든 작업장에서 착용하여야만 합니다. (그림 014)

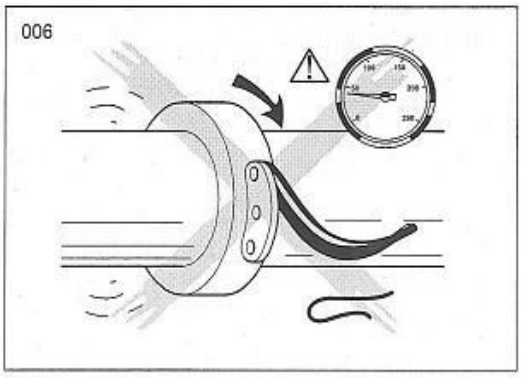




3) 호퍼 그리드 없이는 작업을 하지 말고 호퍼내의 작업을 하여야만 할 경웨는 엔진을 정지시키고 시동키를 빼어 두십시오. 또한 압송 실린더의 내부에 손을 넣지 마십시오.(그림 003)

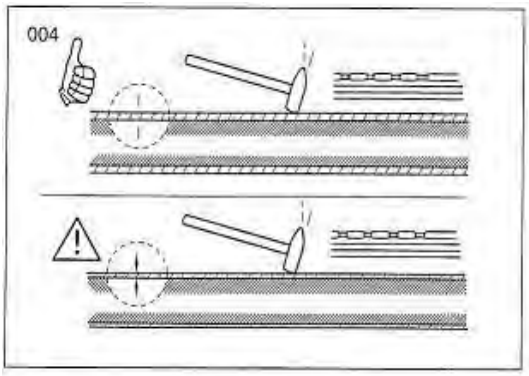
4) 딜리버리 라인(압송관)을 열 때나 두드릴 때는 반드시 개인보호 장구를 착용하시고 압력이 제거되었는지 살펴 보십시오. (그림 006) 항상 1~2회 백-펌핑을 하십시오. 압송관을 열 rudd 파이프의 측면에서 시행하십시오. 또한, 관계자외에는 장비를 근접하지 못하도록 하십시오.

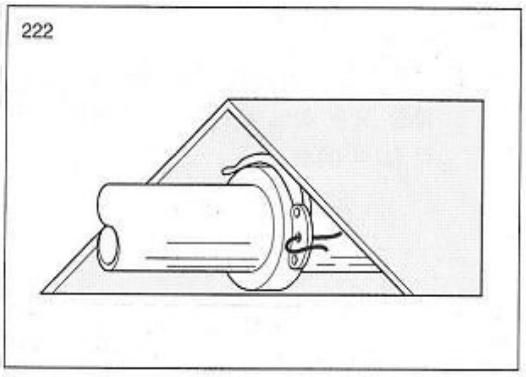




5) 매일 딜리버리 라인을 두르리거나 두께 측정기기를 사용하여 마모량을 측정하여 필요시 마모 부위를 교환하십시오. (그림 004)

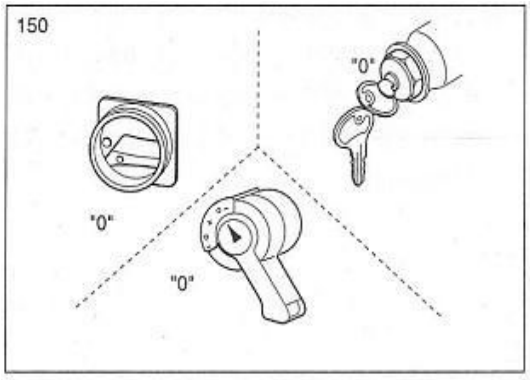
6) 작동자로부터 3m 이내에 압송관은 나무나 금속 보호망을 치십시오. (그림 222) 주기적으로 최대 압력으로 수압 테스트를 하십시오.

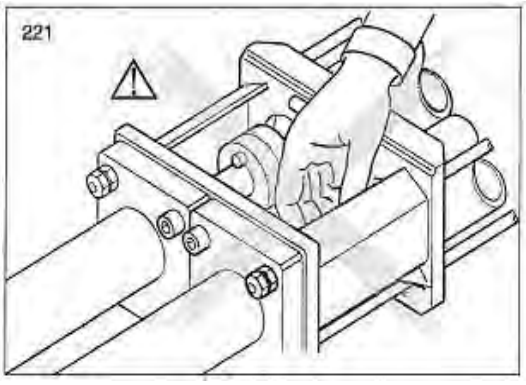




7) 전기 콘트롤 박스를 열기 전에 전기 메인 스위치를 반드시 끄십시오. (그림 150) 고전압 통전부위를 수리시는 전문 서비스 센타에 의뢰 하십시오.

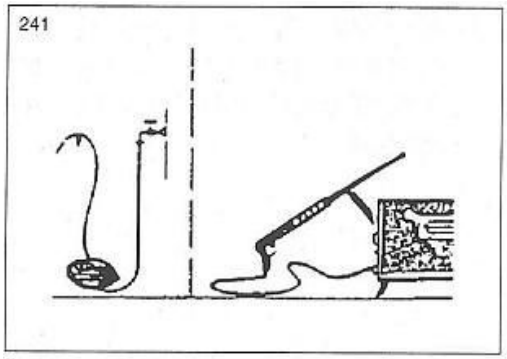
8) 작동중 물탱크(냉각수)내에서 손을 넣으면 안되며, 안전망을 체결해 놓으십시오. 점검시에는 항상 엔진을 끄고 어큐물레이터의 압력을 제거하십시오. (그림 221)

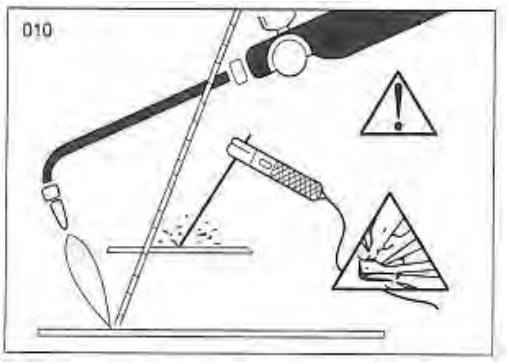




9) 장비는 깨끗해야하며 오일이 묻지 않도록 주의 하십시오. 미끄럼으로 인한 사고의 원인이 될 수 있습니다. (그림 241)

10) 지지 멤버등을 용접시는 전문 서비스센터에 의뢰하시고 페디스탈(작동유 저장탱크)등의 용접시는 특히 주의 하십시오. (폭발의 위험이 있습니다.)(그림 010)





3.7.7. 피스톤의 점검

☞ 본 내용은 스틱 안전 장치가 있는 모든 피스톤에 유효합니다. 수리 작업에는 피스톤의 분해가 필요하며 접착제도 새것으로 교환해야 합니다. 가이드 부시에 있는 시일도 교환해야 합니다.

1) 분해

(1) 피스톤(1)을 분해하기 전에 모든 시일을 벗겨내십시오.

(2) 그런 다음 피스톤을 풀어낼 수 있을 때까지 열을 가한후 풀어내십시오. 피스톤이 다시 식으면 조심스럽게 닦아 낸 후 다시 사용할 수 있습니다.

■[주의]피스톤이 200℃이상 가열되면 절대 안됩니다. 처음 가열해서 풀리지 않으면 식힌 다음 다시 하십시오.

2) 조립

(1) 피스톤을 조립하기 전에 피스톤 로드(2)와 피스톤(1)의 나사부의 오일, 먼지 등을 적당한 클리너를 사용하여 깨끗이 청소하십시오. 클리너로 아세톤이나 이와 비슷한 것을 사용하면 되며, 절대 석유나 알칼리 용해제를 사용하면 안됩니다.

(2) 그다음 피스톤 로드와 피스톤의 나사부에 접착제를 바르십시오.

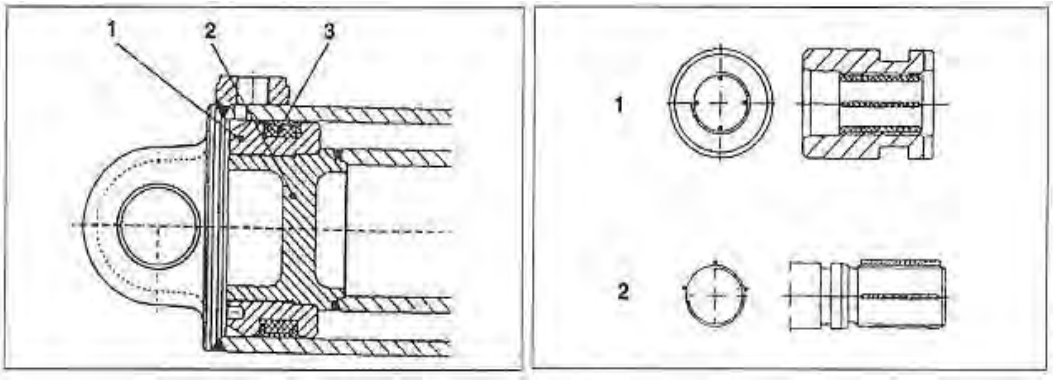
- 피스톤(1)의 안쪽 나사부에 90℃ 간격으로 접착제를 4방울 정도 바르십시오.
- 피스톤 로드(2)의 바깥 나사부에 90℃간격으로 접착제를 3방울 정도 바르십시오.

(3) 피스톤 로드에 피스톤을 규정된 토오크(왼쪽 테이블)로 천천히 돌려 끼우십시오. 만일 접착제가 너무 많으면 피스톤 뒤쪽으로 새어나옵니다. 새어나온 접착제는 깨끗한 천으로 제거하십시오.

(4) 새로운 시일(3)을 끼우십시오.

■[주의]접착제는 최소한 3시간 이상 지나야 응고되므로 실린더 작동은 그 이후에 하십시오.

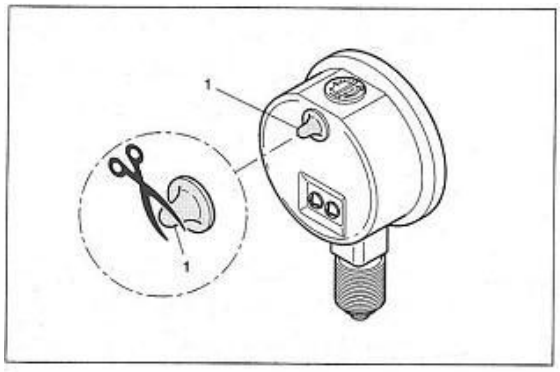
접착제 : RED 100H



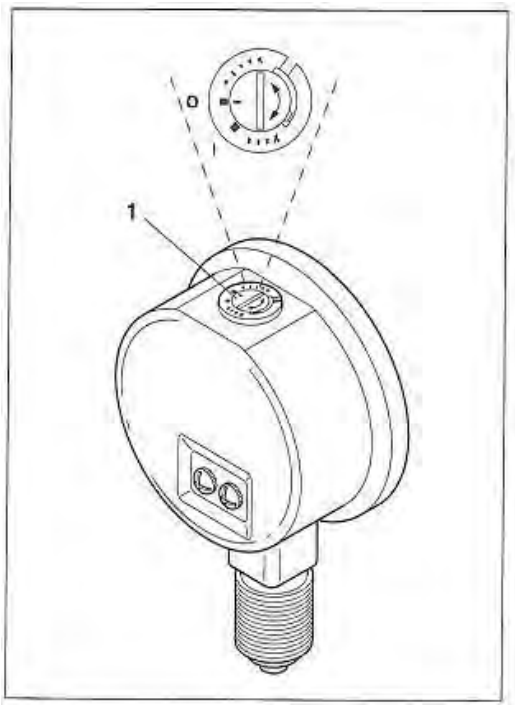
피스톤 조임 모먼트	
ø 피스톤 로드(mm)	모먼트 조임(Nm)
30	120
40	150
50	200
60	200

3.7.8. 진공게이지

1) 장착 후 안전장치(1) 끝단부를 절단하십시오.



2) 장착후 레버를 돌려 열고, 안전장치(1)를 제거하십시오.



록타이트 규격

접착부품	록타이트 규격
웨어부시(후)+에스밸브	DIN 640
웨어부시(전)+에스밸브 샤프트	DIN 640
에스밸브+슬라이드 링	DIN 640
슬라이드 링+텐션링	DIN 405

4. 고장진단

4.1 고장발생시 진단 및 수리요령

4.1.1 수리시 주의사항

1) 전기 모터의 고압부분과 유압장치 부분의 작업은 전문가에 의해 수행되어야 합니다.

2) 예비 부속품의 묶음은 각각의 조절상자에 넣어 있으며 가장 자주 쓰이는 전기 예비 부속품을 포함하고 있습니다.

3) 만일 고장발생시 운전자 스스로 해결책을 찾아내지 못한다면 저의 서비스 센타로 문의해 주십시오.

4) 귀하 펌프 모델에 부착된 각각의 유압, 전기 회로도를 참조하시오.

5) 언급한 부품의 번호들은 도면과 그림에 적혀 있습니다.

4.1.2 전달피스톤이 작동하지 않을 경우

가 능 원 인	치 료
1. 펌프의 스위치가 켜있지 않다	▷ 스위치 박스의 펌프 스위치를 켜시오. ▷ 오일을 채우시오.
2. 오일이 부족하다	▷ 압력차트에 준하여 압력을 조정하시오.
3. 메일 릴리프 압력이 낮다	▷ 필터 교환하는 방법에 나와 있는 지시에 따라필터 카트리지를 청소하거나 교환 하시오.
4. 필터가 더러워졌다	▷ 오일이 따뜻해질 때까지 저속으로 기계를 운전하시오.
5. 오일이 너무 차다.	▷ 패널이나 리모트 콘트롤에 있는 스트로크 조정
6. 메인 유압 펌프 (main hydraulic pump)	▷ 버튼을 눌러 토출유량을 최대로 하시오.
7. 오일을 토출하지 않는다	▷ 흡입/흡입 스위치를 작동하시오.
8. 피스톤이 끝 위치에 몰려 있다.	

4.1.3 펌프의 작동이 만족스럽지 않을 경우

가 능 원 인	치 료
1. 메인 릴리프 밸브가 제대로 맞춰져 있지 않다.	▷ 실린더를 끝위치에 놓은 다음 압력 차트에 나와있는 규정압력으로 재조정하시오.(전문가에게 맡겨야 합니다) 밸브를 점검하시오(전문가에게 맡겨야 합니다) 밸브자리를 점검하시오(전문가에게 맡겨야 합니다.
2. 메인유압탱크의 필터가 막혔거나 탱크 내 물이 과다 함유되어 있다.	▷ 메인 유압필터를 청소하고 필요하면 교체 하시오 드레인 밸브를 열어 물을 빼내시오
3. 흡입라인(Suction line)이 새며 오일에 공기가 있다.	▷ 새는 것을 수리하고 펌프와 시스템에 충분한 펌프를 하시오
4. 드라이브 실린더의 피스톤 링에 결함이 있거나 마모되었다.	▷ 교환하시오
5. 스트로크 전환시 필요이상 부하를 받는다.	▷ Tilting 실린더의 속도를 조정한다.

4.1.4 펌프가 자동적으로 전환되지 않을 경우

가 능 원 인	치 료
1. 오일이 충분치 않다	▷ 오일을 MAX 표시가 있는 곳까지 채우시오
2. 휴즈가 타버렸다	▷ 휴즈 교환
3. Sensor의 감지거리가 감지 면으로 멀리 설치되었다.	▷ 조정 Sensor의 감지거리를 적정하게 유지한다 (약 5~6mm)
4. Main Control Panel 내부에 있는 릴레이 결함	▷ 릴레이의 동작 및 정점상태를 확인하고 불량하면 교환하시오
5. 메인 펌프의 콘크롤 유니트 작동 불안정	▷ 콘트롤 유니트 교환
6. 위에서 언급한 지시에도 불구하고 기계가 작동하지 않으면 Main Control Panel 로 들어가는 동력공급선이나 스위치 박스에서 나와 기계로 들어가는 동력공급선에 결합이 있는 것입니다.	▷ 옴메타기(Ohmmeter)로 선을 점검하시오

4.1.5 교반기가 작동하지 않을 경우

가 능 원 인	치 료
1. 압력이 너무 낮거나 밸브가 더러워 졌다	▷ 교반깅 목재를 낀다음 압력을 점검하시오 올바른 압력에 맞추고 필요하면 청소하시오
2. 교반기 모터의 씰이 마모되었다.	▷ 모터를 점검하고 필요시 수리 또는 교체하시오 보조펌프의 유량을 점검하고 필요하면 교체하시오

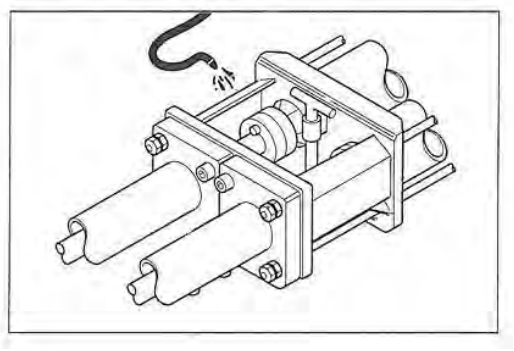
4.1.6 튜브 밸브가 작동이 안될 경우

가 능 원 인	치 료
1. S-밸브 실린더에 결함이 있다	▷ 교체하시오
2. Tilting 실린더의 속도가 너무 느리게 조정되었다	▷ 정확한 속도로 조정하시오(전문가가 하여야 합니다)

4.1.7 오일이 너무 뜨거워지는 경우

가 능 원 인	치 료
1. 워터박스 내의 물이 충분치 않거나 뜨거워졌다.	▷ 물을 가득 채우시오 찬물로 교체하시오 (그림참조)
2. 콘크리트 펌프가 부적절한 배합비와 빠른 전달속도로 인해 최대의 압력 범위내에 작동한다	▷ 콘크리트의 토출량을 줄이고 필요하면 재료의 혼합을 바꾸시오 (물이나 기타 비슷한 물질로 액화시키시오)
3. 골재 가림에 의해서 압력이 높아 있다	▷ 막힌 골재를 청소하시오(펌프를 역방향으로 몇 회 가동하시오)
4. 냉각기가 더러워졌거나 냉각기의 팬이 작동하지 않는다	▷ 청소하시오 전압과 열탐침의 어스접촉(earth-contact)을 점검하시오
5. 메인 릴리프 밸브가 너무 낮게 맞춰져 있다.	▷ <4.1.3 펌프의 작동이 만족스럽지 않을 경우> 지시된 대로 실린더를 끝위치에 놓고 압력을 조정하시오 (전문가가 해야합니다)
6. 유압필터가 더러워졌다	▷ 필터를 교체하시오

※ 마모된 미세한 분자들이 메인 유압필터에서 발견되면 펌프는 혹은 실린더는 마모되었거나 결함이 생긴 것입니다.



분말형 레디믹스트 숏크리트

공정관리 및 시공·품질관리 편람(안)

2009. 12.

주관연구기관	(주)태영건설
협동연구기관	한국건설기술연구원
	한일시멘트(주)
	(주)삼보기술단
	(주)동성엔지니어링
	한국건자재시험연구원
참 여 기 업	한국건설관리공사

제 1 편 재료생산 및 공정관리

제 1 장 총 칙

1.1 목적

분말형 레디믹스트 숏크리트의 균일한 품질확보를 위해 재료의 반입· 저장, 건조, 계량, 포장· 야적 등의 공정관리 및 작업표준을 제시하여 고품질 레디믹스트 숏크리트를 확보하고, 품질기준 및 시공방법을 규정하여 분말형 레디믹스트 숏크리트의 보급·발전을 목적으로 한다.

【해 설】

분말형 레디믹스트 숏크리트란 기존 현장배합 숏크리트를 대체하는 공법으로서 터널시공 특성, 현장조건 및 사용용도에 맞게 생산할 수 있으며, 시공성 및 고품질 숏크리트를 확보할 수 있는 공법이다. 즉, 기존에 현장에서 배합되던 숏크리트의 고질적인 문제점들을 효과적으로 개선하기 위해 숏크리트 재료의 배합 및 제조를 레미탈 제조 전문업체에서 사전에 미리 실시하여 골재의 철저한 토립분 관리, 확실한 입도관리, 전문배합 장치를 이용한 엄격한 품질관리 및 재료의 규격화 등을 거쳐 시공 품질을 극대화 시킬 수 있게 제조되는 숏크리트 공법이다. 본 매뉴얼은 분말형 레디믹스트 숏크리트를 제조함에 있어 작업표준을 제시함과 동시에 품질기준을 규정하여 명확히 하고 실시 예로 기준하여 명확히 함으로써 본 공법 보급에 기여하는 것을 목적으로 한다.

1.2 적용범위

본 품질기준(안)은 분말형 레디믹스트 숏크리트 제조 공정 중 모든 원재료의 반입· 저장, 건조, 계량, 포장· 야적 등의 작업에 대하여 규정하고 분말형 레디믹스트 숏크리트의 적용 및 시공에 필요한 사항에 대하여 일반적인 표준을 규정한다.

【해 설】

본 품질기준 및 시공 편람(안)은 분말형 레디믹스트 숏크리트를 제조, 시공하기 위해서 사용원료, 작업설비, 방법, 조건 및 공정검사 및 관리 등에 대하여 규정하였다. 따라서 본 품질기준(안)에 포함되지 않은 일반적인 재료·시공에 관한 사항에 대해서는 국내에서 일반적으로 통용되고 있는 레미탈 운영 매뉴얼 및 숏크리트 품질기준과 더불어 경험있는 책임기술자의 판단 및 실험에 의해 확인된

방법을 참고하여 사용한다. (KS F 2781(강섬유보강 습식 숏크리트)품질기준 참고)

1.3 용어정리

1. 분말형 레디믹스트 숏크리트(Powdered Ready-mixed Shotcrete)
정비된 레미탈 제조 설비를 갖춘 공장에서 미리 제조하여 사용하는 분말형태의 숏크리트.

2. 터 널(Tunnel)
지표하에 축조되는 도로나 공간으로 이용하는 지하구조물로 단면적이 2m^2이상의 것을 말하며, 이보다 작은 직경은 제외됨. 터널은 위치에 따라 산악, 지하, 해저, 하저 터널로 분류되고 용도에 따라 교통용, 수송용, 지하실 터널로 분류됨.(토목용어사전, 대한토목학회, 1996)

3. 숏크리트(Shotcret)
굳지 않은 콘코리트를 가압시켜 노즐로부터 뿜어 내어 소정의 위치에 부착시켜 시공하는 콘크리트.(터널설계기준, 2007)

4. 급결제(Quick Setting Admixture)
터널 등의 숏크리트에 첨가하여 뿜어 붙인 콘크리트의 응결 및 조기의 강도를 증진시키기 위해 사용되는 혼화제.(콘크리트 표준시방서, 2003)

5. 섬유보강 숏크리트(Fiber Reinforced Shotcrete)
숏크리트의 역학적인 특성을 보완하기 위하여 강 또는 기타 재질의 섬유를 혼합하여 타설하는 숏크리트.(터널설계기준, 2007)

6. 고로슬래그(Blast Furnance Slag)
고로 중에서 철과 동시에 용융상태로서 생성되는 칼슘, 기타 기재의 규산염과 알루미나규산염을 주성분으로 하는 비금속부산물을 모은 것.(토목용어사전, 대한토목학회, 1996)

7. 실리카 흄(Silica Fume)
극소철과 실리콘메탈의 생산 과정에서 생산되는 가스를 수집•여과하여 포집되는 마이크로 실리카 입자로 주로 숏크리트 및 콘크리트의 장기강도 및 내구성 개선을위해 혼입.

8. 배치플랜트(Batch Plant)
콘크리트 재료의 계량, 또는 계량비비기를 하는 설비로서 각각 배처 또는 배처와 믹서를 가지고 있음.(토목용어사전,1996)

9. 골재크기에 의한 구분

S1	S2	S3	S4
0~0.8mm	0.8~2.4mm	2.4~5.6mm	5.6~8mm

제 2 장 공정관리

2.1 원재료 반입·저장 공정관리 및 작업표준

2.1.1 적용 범위

본 품질기준(안)은 분말형 레디믹스트 숏크리트 제조공정 중 모든 원재료 반입 및 저장작업에 대하여 규정한다.

2.1.2 목표품질

본 작업의 목표품질은 좋은 제품을 생산하기 위한 양질의 원재료를 반입하고, 원재료별 사일로(Silo)에 정확히 투입하여 저장한다.

2.1.3 작업설비

구 분	설 비 명	비 고
일반용 플랜트	원재료 저장 사일로(Silo)	원재료 반입· 저장설비는 국내에서 일반적으로 사용되는 표준화된 장비를 갖추어야 하며, 치수·용량 및 수량은 생산 규모에 따라 별도로 결정한다.
	야적치장	
	버킷 엘리베이터(Bucket Elevator)	
	스크류 컨베이어(Screw Conveyor)	
	루츠 송풍기(Roots Blower)	
	백필터(Bag Filter)	
특수용 플랜트	원재료 저장 사일로(Silo)	
	백필터(Bag Filter)	

2.1.4 사용원료

시멘트, 잔골재(S1,S2,S3), 굵은골재(S4), 합성섬유, 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 실리카 흄, 분말형 유동화제, 증점제 외 첨가재 및 혼화제

2.1.5 작업명, 작업방법 및 작업조건

작업순서	작업방법 및 작업조건	유의 및 관리사항
1. 시멘트		
(1) 운 반	1) 트럭으로 운송	
(2) 저 장	1) 벌크트럭의 적재량 계량 - 시멘트 저장조의 재고량 확인 - 저장조 투입이 매우 중요하므로 투입구에는 시건장치를 하여 제조팀 운전실에 열쇠를 비치하여 운전원의 확인을 받도록 함. 2) 벌크트럭을 시멘트 저장조 밑에 정차 후 수송관과 벌크트럭의 출구를 연결 3) 벌크트럭에 설치된 판넬상 원격조정으로 수용 컴프레서를 운전, 시멘트를 저장조에 투입 4) 벌크트럭 판넬상의 시멘트 수송 압력게이지가 “0”로 되었을 때 수송이 완료된 것으로 함.	1) 저장조 내 시멘트 재고량 확인 (1) 인수검사 (2) 적재량 확인 1) 벌크트럭 판넬상의 수송압력 게이지 “0” 확인 2) 벌크트럭 적재조 내부 확인
2. 골 재		
(1) 반 입	1) 골재 채취장으로부터 덤프트럭 또는 입도별 정선된 골재를 벌크트럭 또는 톤백으로 반입 2) 품질관리팀에서 골재를 샘플링하고, 육안검사에 의한 외부 관능검사 실시. - 외형검사로 골재의 검사조건 유지 3) 영업팀, 경비실에서 모래반입량 검사	1) 모래 입도별 구분 (1) 인수검사
(2) 저 장	1) 골재를 입도별로 구분, 치장에 적재 - 인수검사에 합격된 것 2) 치장 외부에 적재된 골재는 중기로 치장 내부에 이동, 저장 3) 하절기에는 비로 인한 골재의 수분 유입을 방지하기 위하여 치장 내부에 저장하고, 외부 저장시에는 시트를 이용하여 덮도록 함.	

작업순서	작업방법 및 작업조건	유의 및 관리사항
3. 첨가재 (1) 운 반	1) 벌크트럭 및 파레트 지대포장의 적재량 계량 - 첨가재 저장조의 재고량 확인 - 저장조 투입이 매우 중요하므로 투입구에는 시건장치를 하여 제조팀 운전실에 열쇠를 비치하여 운전원의 확인을 받도록 함. 2) 벌크트럭을 첨가재 저장조 밑에 정차 후 수송관과 벌크트럭 출구를 연결 - 저장조 재고량 확인 3) 벌크트럭에 설치된 판넬상 원격조정으로 수송용 콤푸레사를 운전, 첨가재를 저장조에 투입 4) 벌크트럭 판넬상의 첨가재 수송압력 게이지가 “0”으로 되었을 때 수송이 완료된 것으로 함. 5) 파레트 지대포장용 첨가재는 화물용 엘리베이터를 이용하여 사이로 저장위치에 운반 후 수작업으로 투입하며, 저장시 집진시설을 가동 함.	1) 저장조 내 재고량 확인 (1) 인수검사 (2) 적재량 확인 1) 벌크트럭 판넬상의 수송압력 게이지 “0” 확인 2) 벌크트럭 적재조의 내부 확인
(2) 저 장	1) 인수검사 후 납품된 혼화제를 종류별로 창고에 보관 2) 혼화제를 종류별로 지정된 저장조로 운반, 저장 3) 저장시 집진시설 가동	1)저장조 투입시 마스크 착용 및 보호구 착용 (1) 인수검사

2.1.6 작업시 주의사항

1) 품질관리팀의 인수검사에서 합격된 원재료만 입고시킨다.

2) 입고되는 모든 원재료는 원칙적으로 트럭스케일(Truck Scale)로 계량하여 기록되어야 한다.(단, 사정상 그렇지 못할 경우에는 샘플링하여 실시한다)

3) 원재료별 사일로 투입이 매우 중요하므로 투입구에는 시건장치를 하고 제조팀 운전실에 열쇠를 비치하여 운전원의 확인을 받도록 한다.

4) 투입구에 정확히 고정시켜 외부로 분진이 비산되지 않도록 한다.

2.1.7 공정 검사 및 관리

공 정	항 목	기 준	주 기	방 법	관리결과 해석	관리데이터 활용 방법	담 당
인수 검사	원재료 인수검사	해당 인수검사 지침서	=	=	시험일지 및 인수검사 성적서	합격/불합격 판정	시험원
원료 저장	저장 LEVEL	High Level Low Level	수시	판넬 모니터	원재료 재고일지	원재료 재고 관리	운전원

2.2 모래건조·선별·저장 공정관리 및 작업표준

2.2.1 적용범위

본 품질기준(안)은 분말형 레디믹스트 숏크리트 제조공정 중 골재의 건조, 선별 및 저장작업에 대하여 규정한다.

2.2.2 목표품질

본 작업의 목표품질은 건조 후 수분함유율이 기준에 맞게 나타나야 하고 입경별 모래(골재)로 선별되어 적정하게 저장되어야 한다.

2.2.3 작업설비

설 비 명	비 고
벨트 컨베이어(Belt Conveyor)	재료건조· 선별· 저장설비는 국내에서 일반적으로 사용되는 표준화된 장비를 갖추어야 하며, 치수· 용량 및 수량은 생산 규모에 따라 별도로 결정한다.
바이브레이션 피더(Vibration Feeder)	
바이브레이션 스크린(Vibration Screen)	
버킷 엘리베이터(Bucket Elevator)	
골재 건조기(Sand Dryer)	
원사치장	
골재 사일로(Sand Silo)	
배출 백필터(Exhaust Bag Filter)	

2.2.4 사용원료

잔골재(S1,S2,S3), 굵은골재(S4),규사 외

2.2.5 작업명, 작업방법 및 작업조건

작 업 명	작업방법 및 작업조건	유의 및 관리사항
1.준비작업	1) 에어 공급라인의 압력을 0.5MPa 이상으로 유지한다. 2) 각 기계의 이상 유무를 점검한다. 3) 경유의 재고량을 확인한다. 4) 잔골재 투입을 위한 중기의 상태를 점검한다. - 연료상태, 운행통로 등	
2.설비운전	1) 골재 건조기(Sand Dryer) 공정화면을 선택한다. 2) 공정화면에서 시작을 클릭하여 Start-On 한다. 3) 버너가동 후 건조기 입구 벨트 컨베이어가 가동되면 투입잔골재(세사, 중사)를 선택한다. 4) 건조기의 경우 투입량은 자동으로 투입량을 조절하여야 한다.(건조온도 50℃ 이상) 5) 실제로 잔골재가 투입되는지 벨트스케일 및 CCTV 모니터를 확인한다. 6) 기타 세부사항은 운전매뉴얼에 따른다.	
3.작업완료	1) 공정화면에서 정지를 클릭하여 Slow-Down 한다. 2) 기계는 공정의 순서대로 정지된다. 3) 건조기 운전일지를 작성한다.	

2.2.6 작업시 주의사항

1) 건조기 Outlet Vibrating Screen 체망의 터짐과 파손상태를 확인한다.

2) 선별기 체망 상태를 품질관리팀과 협의하여 눈막힘 및 파손관리를 철저히 하여야 한다.

2.2.7 공정관리

공정	항 목	기 준	주 기	방 법	관리결과 해 석	관리데이터 활용 방법	담 당
골재 건조	건조 온도	60℃ 이상	1회/일	건조기를 통과한 건조모래의 온도 측정	시험일지	건조기 설정온도 조정	운전원
	건조후 수분	0.3% 이하	1회/일	단순 랜덤샘플링 검사 (n=1, c=0)	시험일지	골재투입량 조정	시험원
골재 선별	선별 입도	공정관리 지침서 참조	1회/일	단순 랜덤샘플링 검사 (n=1, c=0)	시험일지	골재투입량 조정	시험원
골재 저장	저장 LEVEL	High Level Low Level	수시	판넬 모니터	원재료 재고일지	건조기 가동 여부 판단	운전원

*주) n : 시료의 크기, c : 불합격 판정개수

2.3 배합(계량 및 혼합)공정관리 및 작업 표준

2.3.1 적용범위

본 품질기준(안)은 분말형 레디믹스트 숏크리트 제조공정 중 원재료 계량 및 혼합작업에 대하여 규정한다.

2.3.2 목표품질

본 작업의 목표품질은 기준에 맞는 정확한 원재료 계량과 균일한 제품이 제조되어야 한다.

2.3.3 작업설비

설 비 명	비 고
스크류 컨베이어(Screw Conveyor)	계량 및 혼합 설비는 국내에서 일반적으로 사용되는 표준화된 장비를 갖추어야 하며, 치수· 용량 및 수량은 생산 규모에 따라 별도로 결정한다.
버킷 엘리베이터(Bucket Elevator)	
턴 헤드(Turn Head)	
원재료 사일로(Silo)	
도싱 스크류 컨베이어(Dosing Screw Conveyor)	
스케일(Scale)	
믹서(Mixer)	
에어컴프레서 (Air Compressor)	
백필터(Bag Filter)	

2.3.4 사용원료

시멘트, 잔골재(S1,S2,S3), 굵은골재(S4), 합성섬유, 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 실리카 흄, 분말형유동화제, 증점제 외 첨가재 및 혼화제

2.3.5 작업명, 작업방법 및 작업조건

<table>
<tr><th>작업순서</th><th>작업방법 및 작업조건</th><th>유의 및 관리사항</th></tr>
<tr><td>1. 준비작업</td><td>1) 공기 압축기를 가동하여 에어 공급라인의 압력을 확인한다.
- 공기압 0.5MPa 이상
2) 각 기계의 이상 유무를 점검한다.
3) 저장조의 원재료 재고량 확인</td><td></td></tr>
<tr><td>2. 계량작업</td><td>1) 혼합기 공정화면을 선택하고, 시작을 클릭하여 Start-On 한다.
2) 배합비 화면에서 생산하고자 하는 양 및 배합비를 선정·입력하고 제품 사일로를 선택 입력한다.
- 저장조의 제품 종류 확인
3) 배합비 화면에서 자동계량을 선택할 경우 입력 완료 후 연속계량을 선택한다.
4) 계량오차는 아래와 같이 관리하여야 한다.
1회 계량 분량의 계량오차(%)
시멘트 : ± 1 골 재 : ± 3 혼화재 : ± 2
혼화제 : ± 3 합성섬유 : ± 3
5) 계량 및 혼합이 연속 공정이므로 계량이 완료되면 자동으로 배출, 혼합공정으로 진행된다.</td><td>※ 고로슬래그 미분말의 계량오차는 1회 계량분량에 대하여 ± 1%로 한다.</td></tr>
<tr><td>3. 혼합작업</td><td>1) 계량 완료후 자동으로 진행된다.
2) 일반용 플랜트의 경우
- 1번 계량기에서는 S1, S2, S3가 계량완료후 방출 된다
- 2번 계량기에서는 섬유, 실리카 흄 등의 혼화재가 계량 완료 후 방출된다.
- 3번 계량기에서는 시멘트, 고로슬래그 미분말, 굵은골재(S4)가 계량 완료후 계량기로 방출 된다</td><td>1)계량기 청소 및 점검
2)로드셀이상유무
3)계량기 안정</td></tr>
<tr><td>4. 배출 및 저장작업</td><td>
<table>
<tr><th>생산 Batch</th><th>혼합 시간(초)</th><th>믹서 Rotor Speed</th><th>A/B Speed</th><th>원재료 투입 방법 및 순서</th></tr>
<tr><td>3ton/ batch</td><td>150</td><td>투입 전 35%
투입 후 80%
거출 시 35%</td><td>35%</td><td>① S1, S2, S3(투입)
② 섬유, 실리카 흄 (투입)
③ 시멘트, 슬래그, S4 (투입)</td></tr>
</table>
1) 믹싱시간에 의한 혼합 완료후 자동으로 배출된다.
2) 믹싱된 제품은 믹서게이트 Open에 의해 배출된다.
3) 믹서내부 Coating 제거를 위해 30초 경과후 2초동안 Motor 가동 후 다시 30초후 게이트를 3회 Open 및 Close한 후 게이트를 닫는다.
4) 배출된 제품을 벨트컨베이어, 버킷 엘리베이터로 이송하여 제품 저장조에 저장하며, 저장조의 상부에 설치된 레벨의 작동에 의해 혼합이 중지된다.</td><td>1)믹서구동부, 회전부위 이상유무 점검
2)믹서내부 마모상태</td></tr>
</table>

2.3.6 작업시 주의사항

1) 믹서의 운전시 암페어("A")를 확인하여 믹서 내부의 회전날개 마모, Gate Sealing 상태를 인지하여야 한다.

2) 계량 기록지가 제대로 출력 되는지 수시로 프린터를 확인하여야 한다.

2.3.7 공정 검사 및 관리

공정	항목	기 준	주 기	방 법	관리결과 해 석	관리데이터 활용 방법	담 당
배합 공정	배합비	**1회 계량 분량의 계량오차(%)** 시멘트 : ± 1 골 재 : ± 3 혼화재 : ± 2 혼화제 : ± 3 합성섬유 : ± 3	1회/일	단순 랜덤 샘플링 (n=1,c=0)	시험일지	계량기 낙차 및 기차 보정	시험원
	배합 시간	분말형 레디믹스트 숏크리트용 (3ton/batch) 150초	1회/주	입력내용 확인	설정치 확인	배합시간 재설정	시험원
	혼합 상태	배합비 기준± 3%	1회/일	단순 랜덤 샘플링 (n=1,c=0)	시험일지	믹서설비 점검 및 배합시간 재설정	시험원
	중간 검사	해당 제품 규격별 품질 기준	1회/일 단, 보수성은 1회/월	단순 랜덤 샘플링 (n=1,c=0)	시험일지	제품 배합조정	시험원
	저장 LEVEL	High Level Low Level	수 시	판넬 모니터	혼합기 운전일지	제품 적정 재고유지	운전원

*주) n : 시료의 크기, c : 불합격 판정개수

2.4 포장·야적 공정관리 및 작업 표준

2.4.1 적용범위

본 품질기준(안)은 분말형 레디믹스트 숏크리트 제조공정 중 제품 포장· 야적 공정관리 및 작업표준에 대하여 규정한다.

2.4.2 목표품질

본 작업의 목표품질은 기준에 적합한 물량 및 품질로 레디믹스트 숏크리트가 제조 되어 저장되어야 한다.

2.4.3 작업설비

설 비 명	비 고
스크류 컨베이어(Screw Conveyor)	포장 및 야적 설비는 국내에서 일반적으로 사용되는 표준화된 장비를 갖추어야하며, 치수·용량 및 수량은 생산 규모에 따라 별도로 결정한다.
턴헤드(Turn Head)	
제품사일로(Product Silo)	
자동포장기(Rotary Packer)	
백플레이서(Bag Placer)	
중량선별기(Check weigher)	
드리븐 롤러웨이(Driven Roller Way)	
벨트 컨베이어(Belt Conveyor)	
백필터(Bag Filter)	
팰릿(palletizer)	
포장기계(Wrapping Machine)	

2.4.4 사용원료

분말형 레디믹스트 숏크리트 일반용, 고강도용, 차수용 및 기능성 재료 외

2.4.5 작업명, 작업방법 및 작업조건

작 업 명	작업방법 및 작업조건	유의 및 관리사항
1) 준비작업	1) 공기 공급라인의 에어 압력을 확인한다. - 공기압: 0.5MPa 이상 2) 각 기계의 이상유무를 점검한다. 3) 제품 사일로의 재고량 확인 4) 포장, 출하할 제품의 종류 확인	
2) 포장작업	1) 빈백을 포장기 전면에 묶음 단위로 올려 놓는다. 2) 포장기 측면 판넬의 집진기 S/W ON한 후 포장기 S/W ON 한다. 3) 포장기를 가동시킨다. 4) 자동작업으로 포장기 스파우트에 지대를 투입하여 제품을 포장한다. ◦ 포장중량 가. 일반용 제품 - 시료의 개별무게치 : 규격무게 이내 - 시료의 평균무게치 : 규격무게 이상 나. 특수용 제품 - 시료의 개별무게치 : 규격무게 이내 - 시료의 평균무게치 : 규격무게 이상 5) 포장된 제품은 설정된 중량에 도달하면 이송 컨베이어로 배출된다. 6) 기타 세부사항은 운전매뉴얼에 따른다.	
3) 야적작업	1) 파레트 시설의 각 기계를 점검한다. 2) 포장이송 벨트 컨베이어를 가동한다. 3) 포장이송 컨베이어의 수직 롤러 컨베이어를 파레트 위치로 변환한다. - 야적제품 종류 확인 4) 파레트 시설의 각 기계를 가동한다. 5) 파레트에 적재된 제품을 출하장에 야적한다. 6) 기타 세부사항은 운전매뉴얼에 따른다.	- 안전장치의 이상유무를 확인한다. - 가동중인 시설에 관계자외 접근금지 - 제품 야적을 위한 운행시 안전사고에 주의한다.

2.4.6 작업시 주의사항

1) 포장기 가동전에 팰릿(Palletizer)은 미리 가동시켜야 한다.

2) 포장제품에 생산일자가 프린트될 수 있도록 수시 점검하여야 한다.

2.4.7 공정 검사 및 관리

공 정	항 목	기 준	주 기	방 법	관리결과 해 석	관리데이터 활용 방법	담 당
제품 포장 및 저장	제품 검사	해당 제품 규격별 품질기준	해당 제품 주기 적용	단순 랜덤 샘플링 (n=1,c=0)	시험일지	제품 출하 적/부 판정 및 배합조정	시험원
	포장 중량	- 시료개의 개별 무게치 : 규격무게 이내 - 시료개의 평균 무게치 : 규격무게 이상	1회/월	체크검사 (n=1,c=0)	포장질량 검량일지	포장기 설정무게 보정	시험원

*주) n : 시료의 크기, c : 불합격 판정개수

제 2 장 품질기준

3.1 시멘트

3.1.1 시멘트는 KS L 5201에 적합한 보통 포틀랜드시멘트를 사용하는 것을 원칙으로 한다.

3.1.2 “3.1.1” 이외의 시멘트에 대해서는 소요의 품질을 얻기 위해 적합하다는 것을 확인(도로공사 표준시방서;2009 15-1절)한 후 사용하여야 한다.

3.2 골재

3.2.1 입고된 골재를 수분함량 0.3% 이하로 건조시켜야 한다.

3.2.2 건조된 골재를 S1, S2, S3, S4의 선별작업을 실시하여야 한다.

단, 골재최대치수 10㎜ 이하의 경우 표 1을 기준으로 하며, 골재최대치수 8㎜ 이하 골재를 사용하는 경우, 표 2의 S1은 0.8㎜이하, S2는 0.8~2.4㎜, S3은 2.4~5.6㎜, S4는 5.6~8㎜의 입도선별 과정을 거치는 것을 원칙으로 한

다.

3.2.3 선별된 골재는 규정입도 사일로에 저장되어야 하며, 자동화에 의해 입도별로 투입 및 혼합이 이루어져야 한다.

3.2.4 표1 및 표2 에 명시된 골재최대치수별 표준입도의 범위내에 설계요구입도가 속하여야 하며, 책임 감독자의 요구에 의해 표준입도 범위내에서 조정할 수 있다.

3.2.5 상기 명시된 품질 기준 외 잔골재 및 굵은 골재의 품질기준은 상위기준 『도로공사 표준시방서:2009』 및 『고속도로공사 전문시방서:2009』에 따른다.

표 1. 골재최대치수 10㎜에 사용되는 추천 입도분포(도로공사 표준시방서)

표 준 체	체를 통과한 중량 백분율(%)
13mm	100
10mm	90 ~ 100
5mm	65 ~ 85
2.5mm	50 ~ 70
1.2mm	35 ~ 55
0.6mm	20 ~ 35
0.3mm	8 ~ 20
0.15mm	2 ~ 10

표 2. 골재최대치수 8㎜에 사용되는 추천 입도분포(EFNARC 참고)

표 준 체	체를 통과한 중량 백분율(%)
16mm	100
8mm	90 ~ 100
5mm	73 ~ 100
2.5mm	55 ~ 90
1.2mm	37 ~ 72
0.6mm	22 ~ 50
0.3mm	11 ~ 26
0.15mm	4 ~ 12

3.3 혼화재료

3.3.1 급결제

① 급결제는 액상형 알칼리프리계나 시멘트 광물계 등의 가급적 환경피해와 인체 영향이 적은 재료를 사용하는 것을 원칙으로 하고 지반조건, 현장 상황, 시공 상황 등에 따라 책임기술원의 승인을 얻어 이와 동등하거나 유사한 성능의 다른 급결제 종류를 사용할 수 있다.

② 사용량은 5~10%를 표준으로 하며 책임기술원의 승인을 얻어 현장 상황에 따라 적절하게 조정하여 사용할 수 있다. 급결제의 사용량은 숏크리트의 장기강도에 영향을 미치므로 필히 과다한 양이 사용되지 않도록 사용량과 장기강도에 대한 영향을 검토하여야 한다.

③ 급결제는 초기강도 발현 및 장기강도에 악영향을 미치지 않아야 하며 리바운드 량을 최소화할 수 있어야 한다. 또한, 강재를 부식시키지 않아야 하며 습기에 강하고 보존성이 좋아야 하고 인체에 유해한 영향을 미치지 않아야 한다.

④ 급결제는 0℃이하에서 성능이 저하 될 수 있으므로 보관 및 사용시 주의하여야 한다.

⑤ 숏크리트 용 급결제의 성능시험은 KS F 2436, KS F 2560 , ASTM C-494에 의거 시험해야 한다.

⑥ 급결제는 KS F 2782(숏크리트용 급결제)에 적합한 것이어야 한다.(2007년 제정)

3.3.2 고유동화제

① 고유동화제는 사용목적에 적합하고 숏크리트 또는 급결제 등에 악영향을 미치지 않아야 한다. 또한, 사용하고자 하는 혼화제는 시험성적서를 제출하고 현장시험을 통하여 혼화제의 효과와 적정사용량을 확인한 후, 사용여부에 대하여 감독원의 승인을 득하여야 한다.

② 혼화제는 동결의 영향이 없는 방습창고 또는 사일로 등에 저장하고 입하순으로 사용한다.

③ 유동화제의 성능시험은 『고속도로 공사 전문시방서:2009 13-6절』의거해 시험을 실시 하여야 한다.

④ 유동화제는 콘크리트 학회 기준 KCI-AD 101에 적합한 것이어야 한다.
(-콘크리트 표준시방서, 2003 참조)

3.3.3 AE 감수제

① 숏크리트의 워커빌리티를 개선하기 위하여 AE제, AE감수제 등과 같은 혼화제를 사용할 수 있으며, 공사착수 전에 품질확인 후 감독원의 승인을 받고 사용하여야 한다.

② AE 감수제는 KS F 2560에 적합하고, 또한 유동화제와 병용한 경우에도 숏크리트에 나쁜 영향을 미치지 않아야 한다. (-콘크리트 표준시방서(2003) 참조

3.3.4 혼화재

① 분말형 레디믹스트 숏크리트의 성질 개선, 리바운드 감소, 초기강도 및 장기강도 발현 및 열화에 대한 장기내구성 향상 등의 목적으로 혼화재를 사용할 경우에는 실리카 흄, 고로슬래그 미분말 및 플라이 애시 등과 같은 혼화재를 사용 할 수 있다.

② 지반조건, 현장 상황, 시공 상황 등에 따라 책임기술원의 승인을 받아 실리카 흄과 동등하거나 혹은 유사한 성능의 혼화재 종류와 적절한 사용량을 결정할 수 있다. 단, 고로슬래그 미분말의 혼입량을 산정할 경우 책임감독자의 요구에 따라 30%이내에서 그 혼입량을 결정할 수 있다.

③ 혼화재를 사용하기 위해서는 사전 혼화재의 품질, 배합비 및 배합에 따른 혼합물의 강도 영향 등을 충분히 고려한 시험을 실시하고 감독원의 승인을 획득하여야 한다.

④ 혼화재는 동결의 영향이 없는 방습창고 또는 사일로 등에 저장하고 입하순으로 사용한다.

3.3.5 보강섬유(강섬유와 합성섬유)

① 합성섬유 또는 기타섬유의 적용이 필요한 경우는 국내외 연구 성과 및 현장 적용 사례를 충분히 검토하여 적용여부를 결정하고, 감독원의 승인을 받아야 한다.

② 보강섬유는 분산성이 좋아 콘크리트 내에 분산이 잘 되어야 하고, 정착성이 우수하여 콘크리트 내에서 빠지지 않고 견뎌야 한다. 또한, 높은 인장강도를 가지고 있어 외부응력에 강력히 대응을 해야 한다.

③ 보강섬유 혼입량은 투입재료에 따라 혼입량이 결정되어야 하며, 터널설계 기준(2007) 및 고속도로 전문시방서(2009)에 휨인성을 나타내는 등가휨강도 기준값을 만족하는 범위 내에서 혼입량을 조정할 수 있다.

④ 보강섬유 혼입량 시험은 굳지 않은 숏크리트와 현장에 타설된 숏크리트에 대해 모두 실시하여야 하며, 혼입량 품질기준은 10개 이상의 견본을 무작위로 채취하여 90% 이상이 합격한 섬유의 사용을 원칙으로 한다.

⑤ 보강섬유 사용시에는 합성섬유의 뭉침현상(Fiber balling)과 노즐의 막힘현상(Plugging)에 특히 주의하여 시공하여야 한다.

⑥ 강섬유는 인장강도 700MPa 이상, 형상비 60이상이어야 하며 길이는 30~40mm를 표준으로 한다 (-터널설계기준(2007) 참조)

제 2 편 시공 및 품질관리

제 1 장 시공

1.1 시공일반

1.1.1 재료 준비 및 비비기

① 사전에 공장에서 건비빔으로 운반된 벌크(톤백과 BCT) 숏크리트용 재료를 최대한 재료분리가 발생하지 않게 하여 현장의 이동식 및 고정식 사일로에 적재시킨다.

② 건비빔 되어 있는 재료를 혼합할 수 있는 믹서에 투입 후 계량된 혼합수와 믹싱을 실시하여야 한다.

③ 현장비비기는 재료가 균등하게 섞어지도록 충분히 비벼야 하며, 또 비벼진 재료는 될 수 있는 대로 빨리 타설하여야 한다.

1.1.2 타설 면의 사전 처리

작업 중 낙하 위험이 있는 돌, 풀, 나무 등은 주의해서 제거하여야 하며,타설 면에 용수가 있을 경우에는 배수파이프나 배수필터를 설치하는 등 적절한 배수처리를 하여야 한다.

1.1.3 비탈면이 동결되었거나 빙설이 있는 경우에는 녹여서 표면의 물을 없앤 다음 타설하여야 한다.

1.2 배합

1.2.1 분말형 레디믹스트 섬유보강 숏크리트는 섬유의 분산효과를 높이기 위하여 섬유분산장치를 반드시 사용하여야 하며 다음과 같은 순서로 혼합한다.

① 이동식 및 고정식 사일로에 적재되어 있는 재료를 믹서에 투입한다 (투입시간 : 1~2분).

② 현장에서 유용가능한 용수로 배합표에 표기된 단위수량 만큼의 물을 가수한다. 이때 혼합수는 KS F 4009 부속서 2의 기준에 적합한 것을 표준으로 한다. (-콘크리트 표준시방서(2003)참조)

③ 혼합시간은 시험에 의해 정하는 것을 원칙으로 하되 완전히 혼합될 때까지 1분간 혹은 그 이상을 혼합한다.

1.2.2 레디믹스트 숏크리트 표준배합은 휨강도 4.5MPa 을 기본으로 하며, 혼입되는 혼화재료에 따라 고로슬래그 레디믹스트 숏크리트 및 다기능(고강도, 고차수) 레디믹스트 숏크리트로 구분한다.

표 3. 분말형 레디믹스트 숏크리트 구분

배합 구분	호칭 강도 (MPa)	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (mm)	압축강도 (MPa)		휨강도 (MPa)	휨인성 (MPa)	함성섬유 혼입량
				1일	28일			
표준	4.5 (휨강도)	8~13	10~12	10 이상	21 이상	4.5이상	등가휨강도 3.0 이상	투입기준량의 90%이상
고로슬래그				10 이상	21 이상			
다기능 고강도				10 이상	35 이상			
다기능 고차수				10 이상	21 이상			

※ 터널표준시방서 2009, 터널설계기준 2007 참고

표 3-1. 배합별 분말형 레디믹스트 숏크리트 배합비(예시)

배합 구분	호칭 강도 (MPa)	굵은 골재 최대 치수 (mm)	슬럼프 범위 (mm)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	골재(kg)				혼화재(kg)			분말형 유동화제 (kg)	합성 섬유 (kg)
							S1	S2	S3	S4	고로슬래그	실리카흄	재유화형 분말수지		
표준	4.5 (휨강도)	8~13	10~12	49.5	230	465	560	347	332	347	-	-	-	2.05	12~14
고로슬래그						325	560	347	332	347	140	-	-	2.05	
다기능 고강도						465	560	347	332	347	-	23	-	2.23	
다기능 고차수						465	560	347	332	347	-	-	30	2.05	

[골재크기에 의한 구분]

S1	S2	S3	S4
0~0.8mm	0.8~2.4mm	2.4~5.6mm	5.6~8mm

1.3 장비

1.3.1 분말형 레디믹스트 섬유보강 숏크리트 시공에 사용되는 타설 장비는 숏크리트 시공에 적합한 것이어야 하며, 현장 투입 전 책임기술원 감독 하에 검사 및 시험을 실시하여야 한다.

1.3.2 타설 장비의 노즐 직경은 40㎜ 이하를 원칙으로 하고 재질은 우레탄 재질을 사용하여야 하며, 지반조건, 현장상황, 시공상황 등에 따라 책임기술원의 승인을 받아 조정이 가능하다.

1.3.3 타설 장비에 대한 검사항목 및 검사내용은 **표 4와** 같다.

표 4 타설 장비의 검사항목 및 검사내용

검사항목	검사기준	검사내용
장비 일반	불법개조 여부 확인	• 타설 작업 투입 전 공인인증기관에 의해 검사를 필함
노즐 직경	40mm 이하	• 섬유 혼입량에 따라 45mm까지 허용 • 변형 및 손상 여부, 노즐 파이프와의 체결 여부, 분사각도 및 토출량 검사
노즐 재질	우레탄 계열	
배송 파이프 직경	60mm 이하	• 섬유 혼입량에 따라 65mm까지 허용 • 변형 및 손상 여부 확인
급결제 및 공기 호스	작동 여부	• 급결제 및 공기의 주입이 원활하게 이루어지는 지를 확인

1.4 시공

1.4.1 분말형 레디믹스트 섬유보강 숏크리트의 1회 타설 두께는 50㎜ 이내로 하여야 하며, 소정의 두께가 될 때까지 반복해서 타설해야 한다.

1.4.2 노즐은 항상 타설 면에 직각이 되도록 유지하고, 적절한 타설 거리 및 압력을 유지하여야 한다.

1.4.3 숏크리트 타설 작업시 리바운드량이 최소가 되도록 해야 하고 리바운드된 재료가 다시 혼입되지 않도록 해야 한다.

1.4.4 숏크리트 표면은 특별히 필요한 경우를 제외하고는 숏크리트 만으로 마무리 하는 것을 원칙으로 한다.

1.4.5 기타 시공사항은 습식 숏크리트 시공에 준한다.

1.5 안전 및 위생관리

1.5.1 분말형 레디믹스트 섬유보강 숏크리트 시공시 동반되는 리바운드 및 발생하는 분진에 대하여 보안경 등 적절한 보호구를 통해 작업자의 안전과 건강을 보호하여야 하며, 동시에 발생하는 분진의 처리 등 적절한 안전대책을 강구하여야 한다.

1.5.2 분말형 레디믹스트 섬유보강 숏크리트는 저온, 건조 및 급격한 온도변화 등에 의해 유해한 영향을 받지 않도록 충분히 양생하여야 한다.

1.6 유의사항

1.6.1 여굴된 부분의 숏크리트는 1회에 전량 시공하지 말고 적정 횟수로 나누어 시공하여야 한다.

1.6.2 숏크리트 타설 후 숏크리트면 밖으로 돌출된 철선은 방수 쉬트 설치 전 제거하여야 한다.

1.6.3 강제식 믹서로 혼합할 경우 1회 비비기 양을 믹서용량의 100%로 하여도 비비기는 가능하지만, 전력부하가 과다하여 장비 손상이 우려되므로 1회 혼합량을 적정 수준으로 조정하여야 한다.

1.6.4 압축강도 시험을 위한 공시체는 숏크리트 유출량이 일정하게 될 때 제작하여 균질한 공시체를 제작하여야 한다.

1.6.5 리바운드량의 조정을 급결제의 양으로 조정하여서는 안된다.

제 2 장 품질시험 및 평가

2.1 분말형 레디믹스트 숏크리트 품질기준

2.1.1 분말형 레디믹스트 섬유보강 숏크리트는 소요의 강도, 내구성, 수밀성과 함께 강재를 보호하는 성질을 가지고 품질의 변동이 적은 것이어야 한다.

2.1.2 분말형 레디믹스트 숏크리트의 강도는 터널 표준시방서(2009) 및 터널설계기준(2007)에 의거하여 재령1일 강도가 10MPa이상, 재령28일 강도가 21MPa 이상의 압축강도를 기준으로 한다.

2.1.3 분말형 레디믹스트 숏크리트 압축강도의 평가는 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 의해 실시하며, 시험에 사용하는 공시체는 별도로 정하는 규정 KCI-SC101(숏크리트의 압축강도 시험용 공시체의 제작방법)에 따라 제작한다.

2.1.4 분말형 레디믹스트 섬유보강 숏크리트 휨강도의 평가는 KS F 2781(강섬유보강 습식 숏크리트)에 의해 실시하며, 시험에 사용하는 공시체를 제작한다.

표 5. 일반 분말형 레디믹스트 숏크리트

구 분		품질기준	비 고
압축강도		1일 : 10MPa 이상 28일 : 21MPa 이상	일반숏크리트
휨강도		1일 : 2.1MPa이상 28일 : 4.5MPa 이상	섬유보강숏크리트
휨인성		등가휨강도 3.0MPa	터널설계기준(2007) 도로공사 표준시방서(2009)
합성섬유 혼입량	배합시	등가휨강도 기준 이상량	
	타설벽면	혼입량 대비 90%이상	

표 6. 요구강도별 분말형 레디믹스트 숏크리트(KS F 2781 및 터널설계기준)

구 분		굵은골재 최대치수 (mm)	호칭강도[1](MPa)						
			C21[2]	C24	C27	C30	C35	C40	C45
코어압축강도		8	18	20.5	23	25.5	30	34	38
휨강도			4.5						
휨인성			등가휨강도 3.0MPa 이상						
합성섬유 혼입량	배합시		등가휨강도 기준 이상량						
	타설벽면		혼입량 대비 90%이상						

주 (1) 호칭 강도의 기반은 설계기준 압축강도이며 호칭 강도와 코어 압축강도와의 차이는 현장 코어링의 영향을 고려한 것이다.

(2) 압축강도 21㎫을 의미한다.

표 7 한국도로공사 숏크리트 관련 품질기준(2002)

구 분		내 용
배합비	기준	지반 특성, 강섬유 혼입 등을 고려하여 구분 적용
압축강도 일반 숏크리트	기준	재령 28일 강도=19.6MPa, 재령 1일 강도=9.8MPa ⇒ 패널코어강도 85%, 최소 72% 이상
	빈도	1회/200㎡ 이상 또는 1일 1회 이상
휨강도	기준	재령 28일 f_{28bk}=4.5MPa , 재령 1일 f_{1bk}=2.05MPa
	빈도	B/P 당 1회/200㎡ 또는 1회/일 이상
휨인성	기준	**등가휨강도 3.0MPa이상 (2009 개정)** (몰드규격: 500×500×125mm, 150×150×550mm 병용 가능)
	빈도	휨 몰드 사용시 1회/1,000㎡ 및 휨 인성패널 1회/3000㎡이상
강섬유 혼입량 시험	기준	투입 기준량의 90%이상
	빈도	1회/1000/㎡ 이상(굳지 않은 콘크리트) 구간내 임의위치 1회(6공)이상/ 50m (숏크리트 타설 면에서 코어 채취)
두께측정	기준	평균: 설계 이상, 최소: 설계 75% 이상
	빈도	검사공:1회(7공)/20m 이상 및 강섬유혼입량 코어시료 등
코어압축 강도(28일)	기준	재령 28일 f_{28}=16.7MPa (일반 숏크리트) 재령 28일 f_{28}=19.6MPa (강섬유 숏크리트)
	빈도	구간내 임의 위치 3공/20m

2.1.5 숏크리트용 급결제 KS F 2782에서는 급결제 품질기준을 **표 8** 및 **표 9** 와 같이 규정하고 있으며, 국내외에서 주로 적용되고 있는 단체 기준으로서 급결제 품질기준은 **표 10** 및 **표 11** 와 같다.

표 8. 급결제를 혼입한 시험 모르타르의 압축강도 품질기준(KS F 2782)

재령 / 압축강도	1일 (MPa)	28일 강도비(%)
압축강도	9.0	75이상

표 9. 급결제 혼입 페이스트의 응결시간 품질기준(KS F 2782)

구분 / 항목	초결	종결
응결시간	5분 이내	15분 이내

표 10 국내외 숏크리트용 급결제의 품질기준(압축강도)

규 격 명	압축강도 규정	비 고
KCI SC 102 JSCE 1986	12시간 : 0.98MPa 이상 24시간 : 8.82MPa 이상 28일 : 플레인 대비 75% 이상	모르타르 (50×50×50mm)
대한터널협회(KTA)	1일 : 9.8MPa 이상 28일 : 17.6MPa 이상	실린더 공시체 강도
한국도로공사 전문시방서	1일 : 9.8MPa 이상 28일 : 19.6MPa 이상	일반 숏크리트 (공시체 강도)
EFNARC	28일 : 플레인 대비 75% 이상 90일 : 플레인 28일 강도 이상	숏크리트 코어강도

표 11 숏크리트용 급결제의 품질기준(응결시간)

규격		W/C	S/C	응결시간		시험방법
				초결	종결	
Mortar	KCI SC 102 JSCE 1986	50	3	5	15	관입저항시험
	ITA	-	-	3~10	9~30	관입저항시험
Paste	KTA	-	-	1~5	12~20	Gillmore시험
	ASTM C 1141	24~30	-	1~3	12	Gillmore시험
	EFNARC	35	-	10	60	Vicat시험

2.1.6 기타 분말형 레디믹스트 숏크리트 품질은 터널 설계기준(2007) 및 터널표준시방서(2009)에 규정된 습식 숏크리트 품질기준 이상을 만족하여야 한다.

2.1.7 강섬유 이외의 기타 섬유를 적용할 경우에는 터널설계 기준(2007) 및 고속도로 전문시방서(2009)에 휨인성을 나타내는 등가휨강도 성능기준 이상을 발현할 수 있도록 설계하여야 한다.

2.2 품질시험방법(안)

2.2.1 재료 샘플링 시험방법

① 적용범위

이 시험방법은 숏크리트용 재료의 시료 채취 방법에 대하여 규정한다. 이 시험방법은 포장 또는 비포장 상태로 배달된 재료나 야적장, 트럭 믹서 등에서 시료를 채취하는 것을 포함한다.

② 규격의 의의

이 시험방법은 숏크리트에 이용되는 재료 중 품질검사의 적합 여부를 판정하는 시험에 이용할 대표적인 시료를 채취하는 것에 이용된다.

③ 시험방법

(1) 이미 건식 또는 습식으로 혼합된 재료의 시료채취는 공사시방 등에 믹서의 효율성과 작업성의 균일성과 같은 특별한 시험방법이 규정되어 있지 않는 한 이 시험방법에 따른다. 특별시험을 위한 시료채취는 이 시험방법에서 제외하고 일반적인 재료의 품질기준을 파악하기 위해 이용되는 시료채취방법에 이용한다.

(2) 시료채취 시 혼합되지 않은 개별재료일 경우는 최소 12kg 이상, 혼합재료일 경우 최소 35kg 이상 채취한다. 혼합재료는 계획된 시험에 필요한 충분한 양을 채취한다.

(3) 시료채취는 숏크리트 재료가 숏크리트 타설기계에 이송되는 시점에 행한다. 시료채취 방법은 아래와 같이 시험대상 재료의 대표성을 지닐 수 있는 시료가 얻어질 수 있도록 주의하여야 한다.

(3)-1 건식 숏크리트 재료의 시료채취 방법

어느 배치의 중간부분에서 일정 간격으로 2군데 이상에서 채취하거나, 재료의 연속적 믹서의 하역 중에 무작위로 두 군데 이상에서 복합 시료를 채취한다. 시험시에는 이를 한 개의 군으로 합한다. 재료의 투입 시작과 끝나는 시점의 15% 이내에서는 시료를 채취하지 않는다.

(3)-2 습식 숏크리트 재료의 시료 채취방법

다음 기준 내에서 (3)-1에 기술된 방법에 따라 시료를 채취한다.

(가) 혼합시료의 채취 시간은 재료의 응결시간에 영향을 미치지 않도록 15분 이내로 가능한 짧게 한다.

(나) 시료 채취를 완료한 후 5분 이내에 슬럼프와 공기량 시험을 시작한다.

(3)-3 트럭 믹서와 믹서에서의 채취 방법

믹서를 멈추고 드럼 입구와 맨 뒤쪽에서의 거리가 같은 지점, 즉 거의 중앙 지점에서 다른 적당한 방법을 이용하여 시료를 채취한다. 시험을 위하여 다시 한 번 잘 혼합한다. 드럼 입구와 맨 뒤쪽에서는 시료를 채취하지 않는다. 습식 숏크리트 재료를 샘플링 하는 경우에는 (가)와 (나)에 기술된 시간 내에 한다.

(3)-4 포장 재료의 시료채취

무작위로 한 개의 포장, 또는 계획 실험을 수행하는데 적지 않은 충분한 양을 채취한다. 일반적으로 한 펠릿의 양은 900~1,300kg 정도이다.

(3)-5 비포장 재료의 시료채취

컨테이너 또는 운송 장비의 하역 중에 일정 간격으로 3곳 이상에서 숏크리트 타설기계에 도달하는 때에 시료채취를 한다. 운송단위의 처음, 중간 그리고 마지막 세 부분에서 채취한다. 이동시의 처음과 끝의 15%이내에서는 시료를 채취하지 않는다. 시험시에는 이를 하나로 합한다.

2.2.2 시험용 패널에 의한 공시체 채취방법

① 적용범위

이 규격은 건식 또는 습식 숏크리트의 시험용 패널을 제작하는 방법과 패널로 부터 공시체를 절취하는 방법에 대하여 규정한다.

② 인용규격

다음에 제시하는 규격은 이 규격에 인용되는 것에 따라 이 규격 규정의 일부를 구성한다. 이들 인용규격은 최신판을 적용한다.

KS F 2403 콘크리트 강도 시험용 공시체 제작방법

KS F 2406 콘크리트 양생용 재료의 보수능력 시험방법

KS F 2408 콘크리트의 휨강도 시험방법

KS F 2409 굳지 않은 콘크리트의 단위용적 질량 및 공기량 시험방법

KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법

KS F 2422 콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도 시험방법

ASTM C 457 경화된 콘크리트의 기공 측정을 위한 미세측정방법

ASTM C 511 수경성 시멘트 및 콘크리트에 이용되는 습윤 양생기, 양생실 및 수조 규격

ASTM C 513 콘크리트를 포함한 압축강도용 공시체의 채취 방법

ASTM C 642 경화된 콘크리트의 밀도, 흡수율 그리고 공극 측정방법

③ 시험방법 요약

숏크리트 시험용 패널은 충분한 사전 조사를 통하여 노즐공, 재료, 장비 그리고 뿜어붙이기 위치에 따라서 제조한다.

④ 규격의 의의

본 규격의 제조방법에 따라서 얻어지는 공시체는 공사기간 중의 노즐맨 또는 장비의 적합성 파악, 품질관리, 압축강도와 휨강도 시험을 위한 숏크리트 혼합물의 연구에 사용되어질 수 있다.

⑤ 시험용 패널

(1) 시험용 패널 : 숏크리트를 타설하기 위한 폼은 진동 또는 변형을 통해 숏크리트의 누출을 방지하기에 충분한 나무 또는 철 구조를 사용할 수 있다. 폼은

정사각형의 밑면과 밑면으로부터 45° 기울어진 옆면을 가진 모양으로, 크기는 가로 및 세로가 최소 500㎜ 이상, 깊이가 250㎜ 이상이어야 한다. 노즐맨, 장비 또는 배합 설계의 적합성 파악을 위해서는 보다 큰 패널이 권장된다.

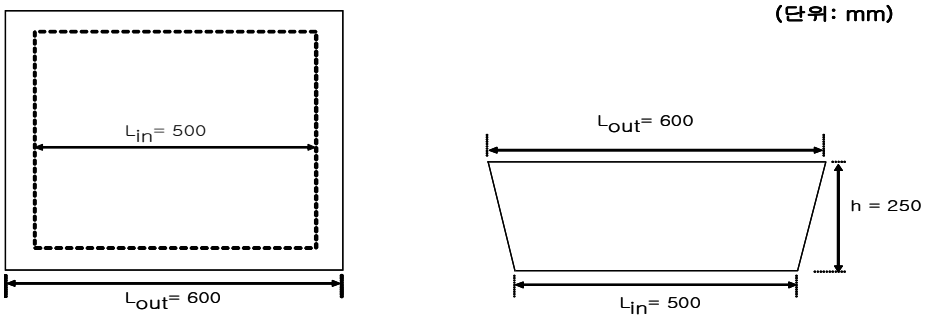


그림 1 시험용 패널 규격

(2) 목재 폼 : 목재 폼은 최소 19㎜ 이상의 두께를 지닌 합판으로 만들어진 밑면을 지녀야 한다. 옆면 부분은 최소 38㎜ 이상의 두께를 지닌 목재로 만들어져야 한다.

(3) 강철 폼 : 강철 폼은 최소 5㎜ 이상의 두께를 지닌 재료를 이용하여 만들어져야 한다.

⑥ 재료

(1) 건식공법 : 혼합물은 구조물에 사용되거나 사용되어질 동일 배합과 재료로 만들어져야 한다.

(2) 습식공법 : 시험혼합물은 규정된 슬럼프를 지녀야 하고 규정된 공기량과 단위질량을 가져야 하며, 또는 섬유를 사용할 때는 사용 중이거나 사용 예정중인 혼합물에 대해 규정된 가사시간, 공기량 및 단위질량을 지녀야 한다. 시험방법 KS F 2421에 따라 공기량을, 시험방법 KS F 2409에 따라 단위질량을, 시험방법 KS F 2402에 따라 슬럼프를 측정한다.

⑦ 시험방법

(1) 패널 수 : 혼화재의 형태와 투입량, 섬유의 종류와 첨가량을 대표할 만한 혼합물과 구조물의 예상 타설 위치(즉, 슬래브, 비탈면, 벽면, 천장)에 따라 결정한다.

(2) 단일종류만 사용한다면 혼합물은 구조물의 사용 시기 등에 따라 동일방법

과 투입량으로 더해질 수 있다.

(3) 노즐공, 장비 및 기술의 적합성용이거나 함침 철근의 연구용으로 사용되는 공시체에는 보강용 철근이 사용될 수 있다.

(4) 장비 : 숏크리트는 구조물에 사용되기 위해서 장비, 수압, 공기압을 이용하여 타설되어야 한다.

(5) 노즐공 : 작업하는 사람(노즐맨, 숏팅 건 운전자)은 지하구조물에 익숙한 사람으로서 최소 1년 이상의 경험이 있어야 하며, 감리자의 요청이 있는 경우 숏크리트를 적절히 칠 수 있는 능력을 시범해야 한다.

(6) 숏크리트 뿜어붙이기 : 숏크리트는 구조물에 사용했거나 사용 될 동일한 방법으로 패널 폼에 뿜어져야 한다. 목재 폼은 뿜어붙이기 바로 직전에 물에 적시도록 한다.

⑧ 양생

(1) 패널은 타설이 끝난 후 수분 증발 및 충격 방지를 위해 KS F 2406의 조건에 만족하는 시트 재료를 이용하여 곧바로 안전한 방법으로 싸여져야 한다. 그리고 KS F 2403을 만족하는 습윤실에서 양생되어야 한다. 현장 양생된 시편은 시험 전에 시험실로 옮겨져야 한다.

(2) 라텍스 혼입 숏크리트 패널은 양생 사이클의 균형을 위해 기건 양생 전에 24시간 습윤 양생되어야 한다.

⑨ 공시체 절취 및 시험

(1) 공시체는 시험방법 KS F 2402에 준하여 코어링에 의한 원주형 형태 및 절단에 의한 빔 시편 형태, 또는 시험방법 ASTM C 513에 준한 절단에 의한 입방체 형태 로 패널로부터 채취되어야 한다. 코어와 빔은 균일치 못한 절단 또는 코어링에 의하여 영향을 받아서는 안되며, 평면 절단시에는 평행성과 면의 균일성에 대한 주의가 필요하다. 코어는 패널 표면에 수직으로 절취되고 압축강도용으로 이용되는데, 입방체와 빔은 패널의 표면에 평행 또는 수직으로 시험된다. 시험방향은 결과에 영향을 줄 수 있기 때문에 미리 결정되어야 한다. 경화과정 동안 진동, 충격 및 지나친 기온에 의한 손상을 방지할 수 있도록 적절한 관리가 필요하다.

(1)-1 양생 : 시편은 패널로부터 채취되어 예정된 재령에 따라 시험되어야 한다. 만약 습도 조건이 규정되어 있지 않으면, 시편은 시험 전 2시간 이내에 패널로부터 채취되어야 한다.

(1)-2 시험조건 : 습도 조건이 규정되고 구매자에 다른 요구사항이 없다면, 시험방법은 KS F 2402에 준하여 시행되어야 한다.

(2) 밀도, 흡수율, 공극율 또한 시험방법 ASTM C 642의 규정에 의거하여 측정되어야 한다. 훰 시험에서 얻어진 데이터는 KS F 2566에 준하여 처리되어야 한다.

(2)-1 만약 구매자의 요구가 있으면 경화된 숏크리트의 공기량은 시험방법 ASTM C 457에 준하여 측정할 수 있다.

⑩ 계산

(1) 시험방법 KS F 2422에 근거한 지름에 대한 길이의 보정은 압축강도 측정에 적용되어야 한다. 절단된 입방체에서 압축강도는 코어 공시체의 압축강도에 해당하는 보정계수 0.85를 고려해야 한다.

⑪ 결과보고

(1) 시험 결과를 보고할 경우에는 다음의 항목을 포함해야 한다.

(1)-1 시멘트와 혼화재, 골재최대크기 및 입도를 포함한 굵은골재와 잔골재의 종류, 배합비, 습식 숏크리트인 경우에는 잉여수 함유량, 온도

(1)-2 사용 섬유의 종류 및 비율

(1)-3 뿜어붙일 때의 패널 위치

(1)-4 숏크리트의 종류(습식 또는 건식)

(1)-5 노즐맨 및 운전자의 이름

(1)-6 시편 크기 및 습도 조건

(1)-7 패널 표면에 대한 시험의 방향

(1)-8 단위질량, 공기량, 흡수율, 공극, 슬럼프, 가능하다면 가사시간

(1)-9 평가된 강도, 다른 기계적 특성, 사용된 시험방법, 적용된 보정 계수

2.2.3 압축강도 평가 방법

① 시험용 패널로부터 채취 된 코어 공시체는 항온 항습실(20±2℃)에 보관하여야 하며, 압축강도 측정 당일 일정한 크기로 절단 한 후 연마작업을 실시한다. 연마작업은 연마기를 사용하는 것을 원칙으로 하되, 현장 여건상 연마기 사용이 불가피한 경우에는 컴파운드 및 유황 캐핑도 가능하다.

② 절단 및 연마 작업 후 압축강도 측정을 바로 실시하여야 하나, 절단 및 연마작업을 완료한 후에 일정 재령동안 항온 항습실(20±2℃)에 보관 후 측정 재령 당일 압축강도를 측정하는 것도 가능하다.

③ 압축강도 시험은 KS F 2405(콘크리트 압축강도 시험 방법)에 따라 실시하며, 숏크리트 시험체 상하면에 대하여 1/100㎜의 정확도를 가진 버니어 캘리퍼스를 이용하여 지름과 높이를 3번 측정 후 단면적 및 길이를 계산한다. 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 시험체를 가압할 때 시험체가 시험기 가압판의 중앙에 위치 하도록 한다. 하중은 매초 0.6±0.4N/㎟의 일정한 속도로 시험체가 파괴될 때까지 가압하며, 공시체는 1개조 3개씩으로 하여 각 시험체마다 시험체가 받는 최대 하중을 단면적으로 나누어 그 평균값을 측정하여 구한다.

2.2.4 휨인성 평가 방법

① 숏크리트 타설 후 시험용 패널로부터 7일 재령일 때 탈형을 하여야 하며, 탈형후 바로 절단 가공작업을 실시한다. 절단 된 공시체의 평편도의 정도는 양단에서 2㎜ 이내이어야 한다.

② 절단 가공된 공시체는 일정 재령동안 항온 항습실(20±2℃)에 보관 후 측정 재령 당일 KS F 2566 강섬유 보강 콘크리트의 휨인성 시험방법에 준하여 휨인성 측정을 실시한다.

③ 변위측정방법

시험편의 하중-처짐 곡선을 구하는 경우에는 시험편 중앙에서의 순수 처짐을 측정해야 하고, 처짐 측정의 정밀도를 높이기 위해 전기적인 변위계(LVDT)를 사용한다(그림 2).

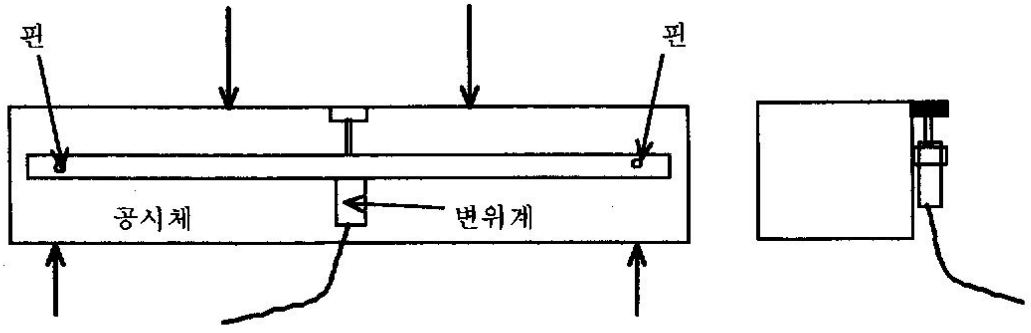


그림 2 휨인성 시험시 중앙점 순수 처짐 측정장치

④ 등가휨강도의 계산방법

휨강도(σt)는 third point loading 시험에서 얻은 최대하중으로부터 다음 식에 의해 계산된다.

$$\sigma_t = \frac{P_u \cdot l}{b \cdot h^2}$$

여기서, Pu : 최대하중

ℓ : 시험편의 지간길이(300mm 또는 450mm)

b, h : 시편의 폭, 높이(100mm 또는 150mm)

등가휨강도(휨인성계수)는 third point loading 시험에서 얻은 하중-처짐 곡선으로부터 규정 처짐 $\delta_{tb} = \ell/150$까지의 인성(toughness)을 기초로 하여 다음 식에 의해 계산된다(그림3).

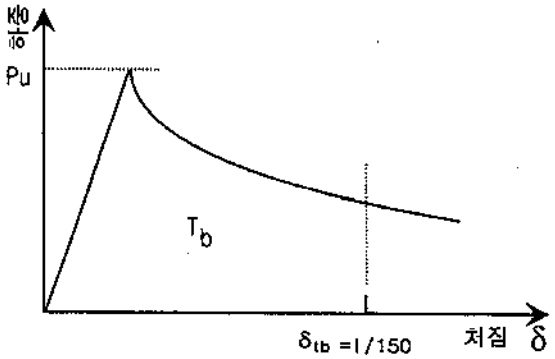


그림 3 휨인성을 구하기 위한 기준 처짐 지점

$$f_e = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bh^2}$$

여기서, T_b : 기준 처짐까지의 휨인성(flexural toughness)

δ : 기준 처짐(ℓ/150) (지간이 300mm인 경우 2mm, 45cm인 경우 3mm)

ℓ : 시험편의 지간 길이

b, h : 시험편의 폭, 높이

2.2.5 중금속 용출 시험 방법 및 규정

- KSLT(Korean Standard Leaching Test) 용출시험

폐기물 공정 시험법 제 2장 제 5항에 따라 타설된 레디믹스트 숏크리트 시료 10g 을 정확히 달아 정제수에 HCl을 가하여 pH 5.8~6.3으로 한 용매 100ml

를 500ml 삼각플라스크에 넣어 상온, 상압 하에서 진탕 회수가 매분당 200회, 진폭이 40~50mm인 진탕기를 사용하여 6시간 연속 진탕한다. 진탕한 용액을 1.0㎛의 유리섬유여지로 여과한 후 검액으로 사용한다.

분말형 레디믹스트 숏크리트의 용출시험 기준은 폐기물 관리법 시행규칙[별표 1]을 따르며 기준은 다음 표 12와 같다.

표 12. 유해중금속 용출 기준(폐기물관리법 시행규칙[별표1])

유 해 물 질	기 준
Pb	≤3 mg/L
Cu	≤3 mg/L
As	≤1.5 mg/L
Hg	≤0.005 mg/L
CN^-	≤1.0 mg/L
Cr(VI)	≤1.5 mg/L
Cd	≤0.3 mg/L
유기인	≤1.0 mg/L
테트라클로로에틸렌	≤0.3 mg/L
트리클로로에틸렌	≤0.1 mg/L
기름성분	≤5 %

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원 TEL 031)381-6311
(주)태영건설 TEL 02)2090-2294
한국건설기술연구원 TEL 031)910-0563

R&D / 06건설핵심C05

산업부산물의 경제적 재활용과 시공품질 향상을 위한
분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 숏크리트 개발

■ 발행일 / 2010. 03. 10.
■ 발행처 / (주)태영건설
서울시 영등포구 여의도동 10-2 태영빌딩
TEL : 02-2090-2294
■ 인쇄처 /