

최종보고서(일반과제용)										보안등급 일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부				사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업			
전문기관명	국토교통과학기술진흥원					내역사업명					
공고번호					총괄연구개발 식별번호						
					연구개발과제번호		21CTAP-C156958-02				
국가과학기술 표준분류	EI0401	50%	EI0303	30%	EI0406	20%					
총괄연구개발명	국문										
	영문										
연구개발과제명	국문	고함량 서냉슬래그를 적용한 내동해성 콘크리트 포장 개발 및 실용화 연구									
	영문	Development of anti-frost concrete pavement incorporating high volume air-cooled slag and its application									
주관연구기관	기관명	군산대학교 산학협력단				사업자등록번호		401-82-06407			
	주소	(54150)전라북도 군산시 대학교 558				법인등록번호		211171-0001870			
주관연구책임자	성명	이 승 태				직위		교수			
	연락처	직장전화	063-469-4877				휴대전화		010-3666-9561		
		전자우편	stlee@kunsan.ac.kr				국가연구자번호		1011-3575		
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 9개월)									
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31(9개월)									
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(12개월)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원	기관부담		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
	연구개발비	연구개발비	연구개발비	연구개발비	연구개발비	연구개발비	연구개발비	연구개발비	연구개발비	연구개발비	
	현금	현금	현금	현금	현금	현금	현금	현금	현금	현금	현금
총계	370,000	13,000	111,000	-	-	-	-	383,000	111,000	494,000	-
1년차	150,000	5,500	45,000	-	-	-	-	155,500	45,000	200,500	-
2년차	220,000	7,500	66,000	-	-	-	-	227,500	66,000	293,500	-
공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편		비고				
							역할		기관유형		
공동연구기관	(주)빌드캠	하상욱	대표이사	010-3896-0139	swha@buildchem.co.kr		공동		중소기업		
위탁연구기관											
연구기관 외 기관											
연구개발담당자 실무담당자	성명	박 세 호				직위		연구교수			
	연락처	직장전화	063-469-4877				휴대전화		010-6844-4057		
		전자우편	sekhok88@kunsan.ac.kr				국가연구자번호		1117-9494		

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

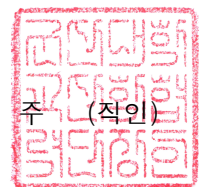
2022년 2월 4일

주관연구책임자 : 이 승 태



주관연구기관의 장 : 군산대학교 산학협력단

김 형 주 (직인)



국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요약 문 >

사업명		국토기술촉진연구사업			총괄연구개발 식별번호				
내역사업명					연구개발과제번호			21CTAP-C156958-02	
국가과학기술 표준분류		EI0401	50%	EI0303	30%	EI0406	20%		
총괄연구개발명									
연구개발과제명		고함량 서냉슬래그를 적용한 내동해성 콘크리트 포장 개발 및 실용화 연구							
전체 연구개발기간		2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 9개월)							
총 연구개발비		총 494,000천원 (정부지원연구개발비 : 370,000천원, 기관부담연구개발비 : 124,000천원, 지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)							
연구개발단계		기초[☒] 응용[☐] 개발[☐] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[☐]			기술성숙도		착수시점 기준(☐) 종료시점 목표(☐)		
연구개발과제 유형		지정공모 [☒] 자유공모 [☐]							
연구개발과제 특성		실용화							
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표	콘크리트 포장의 역학적 성능 20% 향상, 동해저항성 20% 증진, 유지관리비용 20% 절감의 효율성을 가진 고함량(15% 이상) 서냉슬래그 적용 내동해성 콘크리트 포장 실용화 기술 개발							
	전체 내용	[구성기술1] 내동해성 콘크리트 포장 원천기술 개발 □콘크리트 포장의 기후변화에 따른 열화원인 정립 - 국내 콘크리트 포장의 동해 현장조사 - 해외 내동해성 콘크리트 설계 문헌고찰 - 콘크리트의 동해 원인 분석 및 대책 제언 □서냉슬래그의 고내구화 기술 및 품질평가 - 서냉슬래그의 분쇄능 고도화 기술 - 서냉슬래그의 경화 및 밀실화 메커니즘 - 서냉슬래그의 응결, 유동성 및 강도특성 분석 □서냉슬래그 적용 콘크리트의 역학적 성능 평가 - 흡수율, 투수성 등 콘크리트 밀실도 평가 - 열적/결정학적 특성분석 - 미세조직구조 분석 [구성기술2] 콘크리트 포장의 내동해성 극대화 및 현장적용 기술 □SAM에 의한 급속 내동해성 평가 기법 개발 - SAM 지수 정의 및 평가 기법 개발 - 배합별 내동해성과 SAM 지수 상관관계 도출 □내구성능 기반 최적배합 설계 - 내구성능 기반 배합설계(안)개발 - 기존 콘크리트 포장과 성능 비교 □콘크리트 포장의 내동해성 평가 - 동결융해 저항성, 스케일링 저항성, 기포간격계수 측정 - 열화된 콘크리트의 미세구조 분석 - 서냉슬래그 대체율에 따른 콘크리트 내동해성 비교 □콘크리트 포장의 현장적용성 평가 - Mock-up 테스트 베드 운영 - 코어링에 의한 장기모니터링 □내동해성 콘크리트 포장 실용화 기술 개발 - 현장 적용기술에 대한 보완 및 수정 - 결합재 투입 방식(안) 제시							
	1년차	목표	[구성기술1] 내동해성 콘크리트 포장 원천기술 개발 □ 콘크리트 포장의 기후 변화에 따른 열화원인 정립 □ 서냉슬래그 적용 콘크리트의 역학적 성능 평가 □ 서냉슬래그의 품질 평가						
내용		[구성기술1] 내동해성 콘크리트 포장 원천기술 개발 - 내동해성 콘크리트 포장 문헌 고찰 - 포장 콘크리트의 동해 원인 분석 - 포장 콘크리트의 강도 평가(압축, 휨, 인장)							

			- 포장 콘크리트의 열적/결정화 분석 - 포장 콘크리트의 밀실도 평가 - 포장 콘크리트의 미세구조 분석 - 서냉슬래그 혼입 콘크리트의 응결 평가 - 서냉슬래그 혼입 콘크리트의 유동성 평가									
	2년차	목표	[구성기술2] 콘크리트 포장의 내동해성 극대화 및 현장적용 기술 □ 콘크리트 포장의 내동해성 평가 □ 콘크리트 포장의 현장적용성 실용화 연구									
		내용	[구성기술2] 콘크리트 포장의 내동해성 극대화 및 현장적용 기술 - 콘크리트의 동결융해 저항성 평가 - 콘크리트의 스케일링 저항성 평가 - 콘크리트의 복합열화 저항성 평가 - 열화된 콘크리트의 미세구조분석 - 콘크리트의 SAM 지수 평가 - Mock-up 테스트를 통한 현장적용성 평가 - 코어링에 의한 성능 모니터링 - 결합재(서냉슬래그) 투입방식 제안 - 현장적용기술 수정 및 보완									
연구개발성과			[구성기술1] 내동해성 콘크리트 포장 원천기술 개발 □고함량 서냉슬래그를 적용한 내동해성 콘크리트 포장 배합설계 기술 개발 □SAM 기반 내동해성 콘크리트 포장 성능 평가 장비 및 기법 개발 [구성기술2] 콘크리트 포장의 내동해성 극대화 및 현장적용 기술 □개발된 제품의 현장 적용성 및 실용화 기술 개발									
연구개발성과 활용방안 및 기대효과			□친환경 고내구성 콘크리트 포장 기술 개발로 인한 원천기술 선점 및 국가 기술 경쟁력 확보 □포장 관련 기업과 연계하여 Test Bed 추진 및 장기 모니터링을 통하여 본 연구 개발제품의 우수성 검증 □고속도로 및 지자체의 콘크리트 포장 시공 현장을 대상으로 지속적인 공법소개 및 기술교류를 통한 최종성과물의 빠른 사업화 추진 □고내구성 콘크리트 포장 기술발전으로 인한 도로구조물의 수명향상에 기여 □콘크리트 포장의 내구성 증진으로 인한 유지보수비용 절감 효과 □기술향상 및 판로확대에 따른 참여기업의 매출증대 효과 □내구수명 향상을 위한 고함량 서냉슬래그 적용 콘크리트 포장 개발을 통하여 도로 구조물의 수명 연장이 가능하며, 도로 사용자의 만족도 증가 및 유지보수 비용 감소									
연구개발성과의 비공개여부 및 사유			해당없음									
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	4	출원 2 등록 2	1									
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
국문핵심어 (5개 이내)	서냉슬래그		내동해성		콘크리트 포장		배합설계		공용수명			
영문핵심어 (5개 이내)	Air-cooled slag		Anti-frost		Concrete Pavement		Mix design		Service life			

< 목 차 >

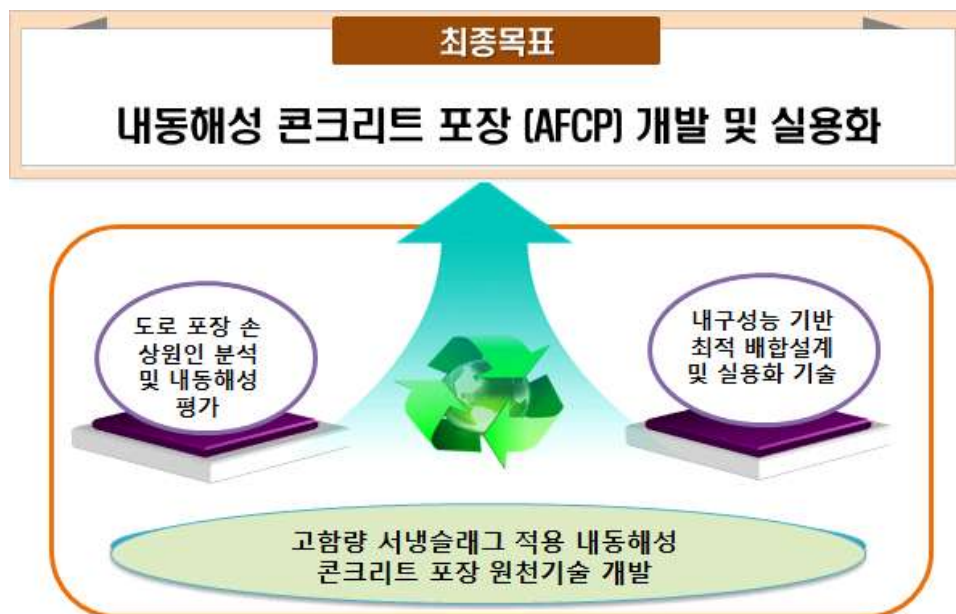
1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	4
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	25
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	38
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	39
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	40

별첨자료(참고문헌 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

- 기후변화, 환경요인 등에 노출된 콘크리트 포장의 장기 공용성 및 안정성을 향상 시키고 콘크리트 포장의 역학적 성능 20% 향상, 동해저항성 20% 증진, 유지관리비용 20% 절감(20-20-20)의 효율성을 가진 고함량(15% 이상) 서냉슬래그 적용 내동해성 콘크리트 포장(AFCP : anti-frost concrete pavement) 실용화 기술 개발
- 국내 공용중인 콘크리트의 동해에 의한 열화정도를 조사하고, 콘크리트의 내동해성을 극대화 시킬 수 있는 콘크리트 포장(AFCP : anti-frost concrete pavement)의 최적배합설계 및 내동해성 증진 방안에 대하여 고찰할 예정임
- 콘크리트 포장의 결합재와는 다르게 친환경/저비용의 효율을 가진 신개념의 서냉슬래그를 결합재 함량 대비 15%까지 적용 가능한 고함량 서냉슬래그(high-volume air-cooled slag)콘크리트 포장체를 개발하여, 겨울철 및 한랭지역 콘크리트 포장의 장수명화를 위한 설계 및 시공기술 시스템을 구축할 계획임
- 본 기술개발은 이상기후로 인한 콘크리트 포장에서 발생하는 탈락, 누구, 균열, 반응물질의 생성을 근본적으로 억제하므로써, 이상기후로 인한 극한환경에 노출된 콘크리트 포장의 내구성 향상 및 유지보수 비용 절감에 획기적인 효과가 있음. 또, 환경요인에 능동적으로 대응하는 콘크리트 포장체의 내구수명을 향상시키므로써 콘크리트 포장 유지관리 계획 및 설계에 직접적으로 적용할 수 있음
- 본 과제는 다음의 연구 성과물을 제시함으로써 최종목표를 달성하고자 함
 - ▶ 고함량 서냉슬래그를 적용한 내동해성 콘크리트의 포장 배합설계 기술 개발
 - ▶ SAM 기반 내동해성 콘크리트 포장 성능 평가 장비 및 기법 개발
 - ▶ 개발된 제품의 현장 적용성 및 실용화 기술 개발



< 과제의 최종목표 및 연구내용 >

2) 연구개발과제의 년차별 목표

- (1차년도) 내동해성 콘크리트 포장 원천기술 개발
 - 콘크리트 포장의 기후변화에 따른 열화원인 정립
 - 서냉슬래그 적용 콘크리트의 역학적 성능 평가
 - 서냉슬래그의 품질 평가
- (2차년도) 콘크리트 포장의 내동해성 극대화 및 현장적용 기술
 - 콘크리트 포장의 내동해성 평가
 - 콘크리트 포장의 현장적용성 실용화 연구

구분	연구개발목표		핵심 연구개발성과 (연구개발성과 물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	내동해성 콘크리트 포장 원천기술 개발	콘크리트 포장의 기후변화에 따른 열화원인 정립	내동해성 콘크리트 문헌고찰	[국내] 기초연구 수준 [국외] 연구개발 단계	문헌조사 5건	내동해성 문헌 고찰을 통한 DB 구축	10
			콘크리트의 동해 원인 분석	[국내] 기초연구 수준 [국외] 연구개발 단계	분석 5건	콘크리트의 동해 원인별 메커니즘 및 DB 구축	10
		서냉슬래그 적용 콘크리트의 역학적 성능 평가	강도평가(압축, 휨, 인장)	[국내] 기초연구 수준 [국외] 기초연구 수준	압축강도 30MPa 이상 휨 강도 4.5MPa 이상 인장강도 3.5MPa 이상	서냉슬래그 적용 콘크리트 포장의 강도 기준 제시	25
			열적/결정학 분석	[국내] 기초연구 수준 [국외] 기초연구 수준	열적/결정학 분석 3건	서냉슬래그 적용 콘크리트의 수화생성물 분석	10
			밀실도 평가	[국내] 기초연구 수준 [국외] 기초연구 수준	0.1mm/m 이하	서냉슬래그 함량에 따른 콘크리트의 밀실도 분석	15
			미세구조 분석	[국내] 기초연구 수준 [국외] 기초연구 수준	미세구조 분석 10건	서냉슬래그 적용 콘크리트의 수화생성물 및 밀실도 분석	10
		서냉슬래그 의 품질 평가	응결시간	[국내] 기초연구 수준 [국외] 기초연구 수준	초결 3시간 이하	서냉슬래그 함량에 따른 콘크리트의 응결 특성 분석	10
			유동성	[국내] 기초연구 수준 [국외] 기초연구 수준	유동성 50mm 이하	서냉슬래그 함량에 따른 콘크리트의 유동성 분석	10
2년차 (2021)	콘크리트 포장의 내동해성 극대화 및 현장적용 기술	콘크리트 포장의 내동해성 평가	동결융해 저항성	[국내] 연구개발 단계 [국외] 기술개발 단계	DF 80% 이상	서냉슬래그 적용 콘크리트 포장의 동결융해 저항성 기준 제시	20
			스케일링 저항성	[국내] 연구개발 단계 [국외] 기술개발 단계	외관 1등급	서냉슬래그 적용 콘크리트	5

						포장의 스케일링 저항성 기준 제시	
			복합열화 저항성	[국내] 연구개발 단계 [국외] 기술개발 단계	DF 70% 이상	서냉슬래그 적용 콘크리트 포장의 복합 열화 저항성 기준 제시	5
			열화된 콘크리트의 미세조직 구조분석	[국내] 기초연구 수준 [국외] 연구개발 단계	미세구조 분석 10건	콘크리트의 미세조직 분석을 통한 열화 원인 분석	5
			SAM 지수 평가	[국내] 기초연구 수준 [국외] 기술개발 단계	SAM 지수 10건	서냉슬래그 적용 콘크리트 포장의 SAM 지수 기준 마련	20
		콘크리트 포장의 현장적용성 실용화 연구	Mock-up 테스트 배드 운영	[국내] 연구개발 단계 [국외] 기술개발 단계	시작품 1건	서냉슬래그 적용 콘크리트 포장의 현장 적용성 평가	25
			코어링에 의한 성능 모니터링	[국내] 연구개발 단계 [국외] 기술개발 단계	모니터링 5건	서냉슬래그 적용 콘크리트 포장의 현장 적용성 특성 평가	10
			결합재 투입방식 제안	[국내] 기초연구 수준 [국외] 연구개발 단계	결합재 투입방식 1건 제안	서냉슬래그 및 급냉슬래그의 유사한 화학성분을 나타내므로 투입 방식 제시	5
			현장적용기술 수정 및 보완	[국내] 기초연구 수준 [국외] 연구개발 단계	현장 적용기술 수정 및 보완 1건	서냉슬래그 및 급냉슬래그 혼입 콘크리트 포장 적용 사례가 적어 현장 적용기술 제시	5

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

TASK 1. 내동해성 콘크리트 포장 원천기술 개발

[콘크리트 포장의 기후변화에 따른 열화 원인 정립]

○ 내동해성 콘크리트 문헌고찰(국내)

- 국내의 고속도로 포장 배합은 주로 G_{max} 32mm, 공기량 4-6%의 OPC 배합이 주류를 이루었으며, 20008년 이후 내구성 증진을 위한 플라이애시 배합이 본격적으로 시공되기 시작함.
- 2010년대 이후, 한국도로공사, 한국건설기술연구원 등 콘크리트 포장 분야 연구기관을 중심으로 플라이애시 이외에 급냉슬래그, 서냉슬래그 등 고로슬래그를 콘크리트 포장에 적용하는 방안에 대하여 장기적인 실험 및 현장적용을 바탕으로 연구실적을 발표함.
- 콘크리트의 내동해성은 콘크리트 포장의 수명을 결정하는 중요한 인자로 알려져 있으나, 시공초기 콘크리트의 강도확보 및 굳지 않은 콘크리트의 양생관리에 중점을 두고 있으며, 이상 기온 하에 노출된 콘크리트 포장의 내구수명 향상 방안은 미흡한 실정임.

<표 2.1.1> 국내 콘크리트 포장 배합 변천사

구 분	G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
						W	C	FA	S	G	AE 감수제
1986년	32	3-5	3-6	45	38	153-170	356 -378	-	595 -694	1135 -1272	-
'96년 이전	32	4	4-6	45	38	156	348	-	687	1137	-
'96~'98	32	4-6	4-6	45	38	151	336	-	678	1162	1.5%
'98.~'02	32	4-6	4-6	45	38	151	336	-	678	1162	0.3%
'02.~'08	32	4-6	4-6	45	38	147	326	-	692	1122	0.3%
'08 ~	32	4-6	5-7	43	36	150	280	70	630	1150	0.3%

<표 2.1.2> 국내 콘크리트 포장 배합 예 (2006년 이후)

구간 (준공년)	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m³)						혼화제량 (g/m³)
						W	C	FA	S	G		
										32mm	19mm	
경주-동대구	32	2.5	4.4	44.0	38.0	148	336		681	1161		1008
부산-언양	25	2.5	4.5	49.5	42.0	157	317		329	1075		951
고서-담양	32	3~5	4±1	45	42	150	333		748	1100		999
성산-옥포	32	3~5	4±1	45.3	37.7	149	329		703	1162		0.99
고창-담양	32	3~5	4±1	43.9	38.1	148	337		686	1126		2359
익산-장수	32	4	4.5	43.5	39	151	347		701	1108		1.041
현풍-김천	32	2.5	4~7	43.7	40.1	149	341		739	1112		1023
무안-광주	32	4.0	4.5	43.0	41.4	142	263	66	735	1061		2303

○ 내동해성 콘크리트 문헌고찰(국외)

- 국외의 콘크리트 포장 배합 기준은 압축강도, 휨 강도, w/c, 시멘트 량 공기량 등이 나타나 있음.
- 또한, 내동해성이 우수한 고로슬래그 및 플라이애시의 사용을 권장하고 있음.

<표 2.1.3> 국외 내동해성 콘크리트 포장용 배합기준

Country	압축강도 기준 [MPa]	휨강도 기준 [MPa]	w/c [%]	Gmax [mm]	최소 시멘트량 [kg/m ³]	공기량 [%]	SCMs [치환률, %]	
							고로슬래그	플라이 애시
캐나다	> 30 (Ontario) > 35 (Québec)	-	-	19, 37.5 혼합골재	-	6.0±1.5	< 25	< 10
독일	> 37 (cube)	-	50	-	> 320	> 4.0	-	-
	-	-	45	-	> 350 (EAC, > 420)	-	-	-
오스트리아 (이층포설)	35	5.5	-	-	> 320 (fixed-form) > 350 (silp form)	4.5±1.0 (fixed-form paving)	20~25	-
RVS 8S.06.32	40	7.0	-	-	> 370 (fixed-form) > 400 (silp form)	5.0±1.0 (silpform paving)	20~25	-
네덜란드	45 (cube)		55		> 320		allowable limit < 60	allowable range 30~35

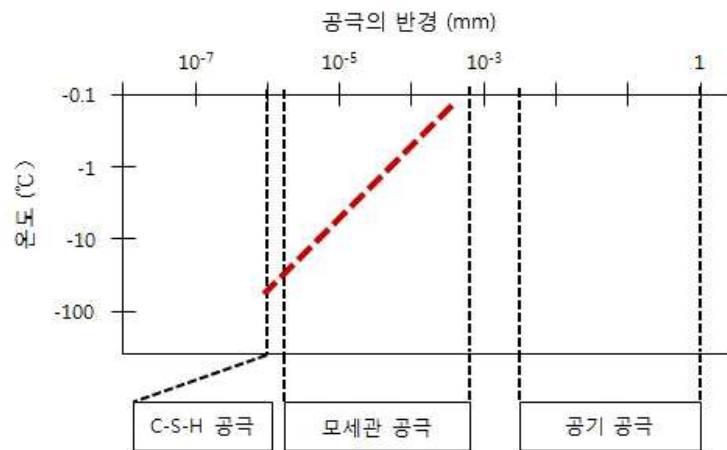
- 국외의 콘크리트 포장 배합은 내구수명 향상을 위하여 포졸란계 산업부산물을 적용한 콘크리트 포장을 시공하고 있음.

<표 2.1.4> 각국의 콘크리트 포장용 재료로서 고로슬래그 미분말의 적용 기준

국가		고내구성 콘크리트 포장용 포졸란 재료
캐나다	온타리오주	- 고로슬래그 25% 혹은 플라이애쉬 10%
	퀘벡주	- 삼성분계 배합(OPC+고로슬래그+플라이애쉬)
독일		- 라임스톤 혼입시멘트 (CEM II) - 고로슬래그 + CEM II (42.5MPa)
오스트리아		- 고로슬래그 (20 - 25%)
네덜란드		- 고로슬래그(60% 이하)
벨기에		- 고로슬래그 + CEM II (42.5MPa)

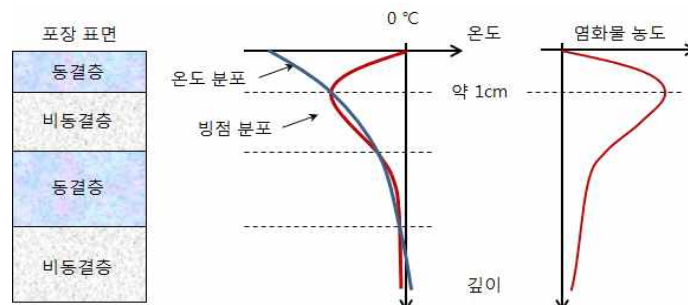
○ 콘크리트의 동해원인 분석

- 동결융해 : 콘크리트 중 모세관공극의 온도가 0°C 이하로 낮아지면 콘크리트의 모세관수가 동결하고 얼음으로의 상변화가 생기게 되며 약 9%의 체적변화가 발생함. 체적팽창을 완충 시킬 수 있는 공간이 모세관 공극 내에 존재하지 않으면 주변 수는 모세관공극에서 이동할 수 없게 되며, 치밀한 콘크리트의 경우 동결된 모세관 공극으로부터 물의 이동은 콘크리트 조직을 통과하기 어려워 조직의 치밀화 정도, 모관수의 이동거리 및 이동속도에 비례하여 콘크리트 조직은 인장압을 받게 됨. 그러나 인장압이 콘크리트의 인장강도를 초과하지 않는 범위에서 체적팽창을 완화하는 공간이 존재한다면 콘크리트는 동결융해를 입지 않지만 반대의 경우에는 콘크리트가 동결융해를 받게 됨. 초기재령의 콘크리트에는 물이 0°C 부근에서 동결하는 큰 공극이 많기 때문에 0°C 부근에서도 콘크리트의 팽창거동이 일어나게 되며, 콘크리트 조직의 변화를 유발시킴. 그러나 충분히 경화한 콘크리트의 공극구조는 초기재령 콘크리트보다 수화작용으로 인하여 치밀해지기 때문에 -10°C 의 저온에서도 모세관공극이 동결되지 않게 됨. 이러한 콘크리트의 경우 동결융해 작용의 지속적인 반복에 의하여 공극내의 포화도가 높게 되면 냉각온도가 저하하기 때문에 콘크리트의 열화가 발생하게 됨.



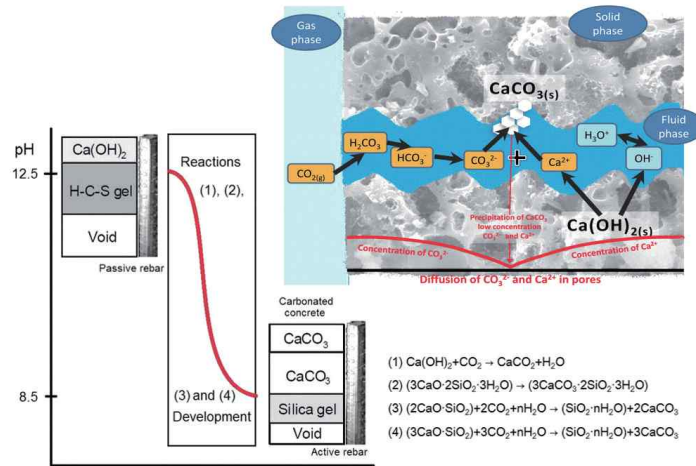
<그림 2.1.1> 콘크리트 내부 공극의 종류 및 빙점의 변화

- 스케일링 : 겨울철 콘크리트 포장 도로의 동결을 방지하기 위해 화학적 제설방법으로 염화칼슘 및 염화나트륨을 사용하고 있음. 제설을 위해 염화물을 살포할 경우, 콘크리트의 표면에 복합열화가 발생하여 스케일링과 같은 열화 현상이 나타나게 됨. 콘크리트 스케일링의 주된 원인 중 하나는 수산화칼슘의 용해이며, 이는 제설제의 주성분인 염화나트륨을 장기적으로 살포할 경우 심하게 나타남. 염화나트륨 용액의 장기적 폭로에 의하여 수산화칼슘이 용해되고 얼음형성을 증가시킴으로써 표층부근이 다공성화 되며, 콘크리트의 투과성이 증가함. 또한, 콘크리트 표면에 존재하는 염화나트륨이 녹아있는 얼음 층이 생성되면 콘크리트 표면의 온도가 급격하게 저하되어 열 충격을 일으켜 염화나트륨의 수용 시 흡열반응이 일어나 콘크리트 표면의 온도가 급속하게 저하되어 미세균열의 발생이 나타나게 됨.



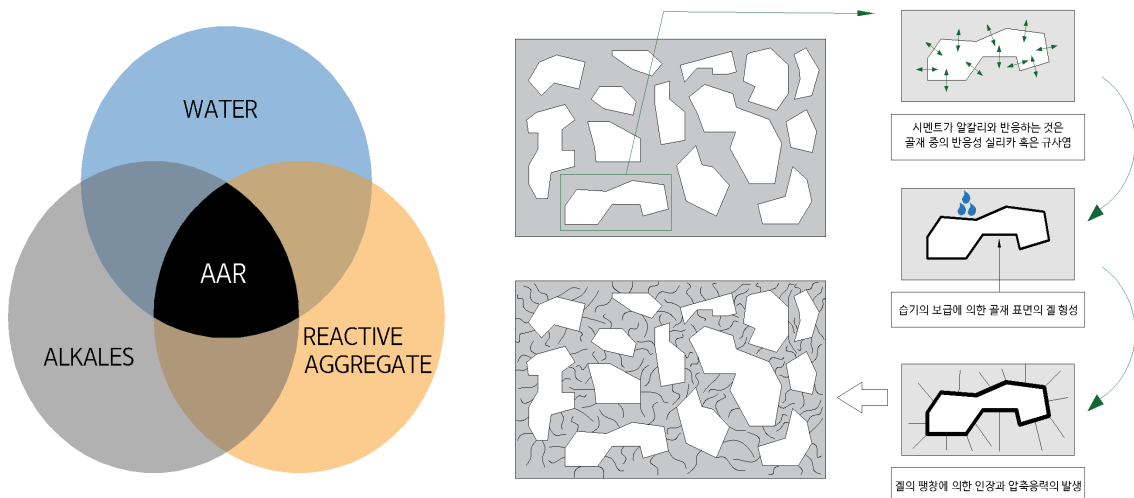
<그림 2.1.2> 염화물 농도 및 빙점의 변화

- 탄산화 : 콘크리트 내의 알칼리성이 탄산화 반응, 산성비, 산성토양의 접촉, 화재 등으로 알칼리성이 저하한 현상을 중성화라 하며 이 중 콘크리트 내의 수산화칼슘, 수산화나트륨, C-S-H, 에트링가이트, 모노설페이트 등이 이산화탄소와 반응하여 탄산화합물 및 기타 물질로 분해되는 현상을 탄산화라 함. 탄산화에 의한 영향은 콘크리트의 공극과 공극의 크기 분포에 영향을 미침. 콘크리트 내부의 공기간극의 체적을 감소시키게 되는데 특히 작은 공극이 생성되어 탄산칼슘으로 채워짐. 이는 다른 손상원인을 가중시키는 결과를 가져옴.



<그림 2.1.3> 콘크리트의 탄산화 메커니즘

- 알칼리 골재반응 : 알칼리 골재반응은 시멘트 중의 알칼리 성분이 시멘트 페이스트의 모세관공극 중의 수산화칼슘을 함유한 고알칼리성의 공극용액과 골재 중에 함유된 반응성 실리카질 광물에 의해서 일어나는 화학반응으로써, 반응생성물의 형성과 알칼리 실리카겔의 흡수에 따라 콘크리트 내부에서 국부적인 체적팽창이 생기므로 콘크리트의 균열 및 박리현상 등이 유발되고, 이것과는 다른 성능저하 요인이 상승적으로 작용하면 콘크리트의 내구성이 현저하게 저하됨.



<그림 2.1.4> 콘크리트의 알칼리 골재반응

[서냉슬래그 적용 콘크리트의 역학적 성능 평가]

서냉슬래그 적용 콘크리트의 역학적 성능을 평가하기 위하여 한국도로공사에서 사용되어지고 있는 콘크리트 배합을 참조하여 표 2.1.5와 같이 콘크리트 배합을 설정함. 보통포틀랜드시멘트 100%를 사용한 OPC, 보통포틀랜드시멘트 대비 급냉슬래그 40%를 치환한 WS40, 보통포틀랜드시멘트 대비 급냉슬래그 35% 및 서냉슬래그 5%를 치환한 WS35AS05, 보통포틀랜드시멘트 대비 30% 및 서냉슬래그 10%를 치환한 WS30AS10, 보통포틀랜드시멘트 대비 25% 및 서냉슬래그 15%를 치환한 WS25AS15 총 5종류의 콘크리트를 제작함. 콘크리트 제작 1일 후 탈형을 진행하였으며, 20±3℃에서 수중양생을 하였음.

<표 2.1.5> 콘크리트 배합

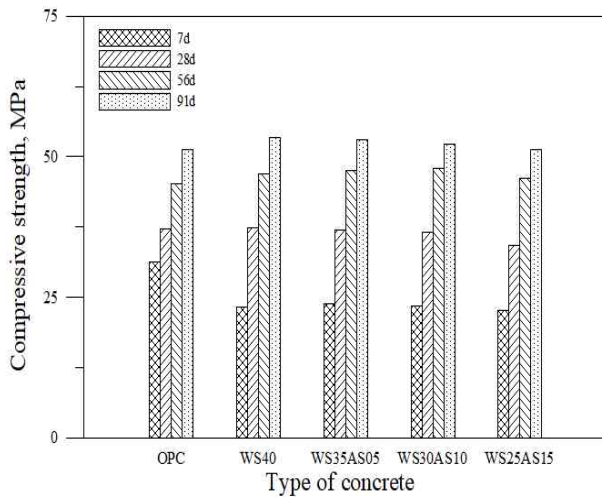
Unit : kg/m³

Symbol	Slump (mm)	Air (%)	W/b (%)	S/a (%)	Water	Binders			Sand	Gravel	SP*	AEA**
						OPC	WS	AS				
OPC	20±10	6±1	43	39	163	380	-	-	648	1017	0.50	0.30
WS40						228	152	-	636	999	0.40	0.51
WS35 AS05						228	133	19	636	999	0.38	0.50
WS30 AS10						228	114	38	636	999	0.36	0.49
WS25 AS15						228	95	57	636	999	0.36	0.48

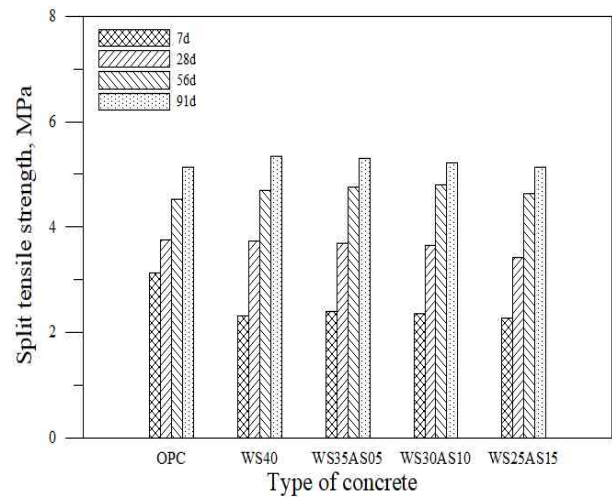
OPC : 보통포틀랜드시멘트, WS : 급냉슬래그, AS : 서냉슬래그, *SP : wt. of binder, % **AEA : wt. of SP, %

○ 압축, 휨 및 인장강도 평가

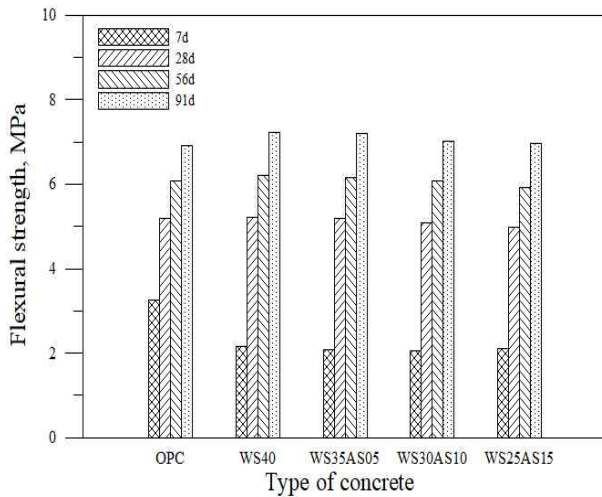
- 그림 2.1.5는 콘크리트의 재령별 강도특성을 나타낸 것으로써, 재령 7일 압축강도는 OPC 콘크리트가 약 31.2MPa로 나타난 반면, WS40 콘크리트의 압축강도는 약 23.2MPa, WS35AS05 콘크리트는 약 23.9MPa, WS30AS10는 콘크리트 약 23.5MPa, WS25AS15 콘크리트는 약 22.8MPa로 OPC 콘크리트 보다 상대적으로 낮은 값을 나타냄. 한편, 재령 28일 압축강도 측정 결과, OPC 콘크리트는 약 37.3MPa로 나타났으며, WS40 콘크리트는 약 37.4MPa, WS35AS05 콘크리트는 약 36.9MPa, WS30AS10 콘크리트는 약 36.6MPa, WS25AS15 콘크리트는 약 34.3MPa로써 OPC 콘크리트와 강도발현이 유사하게 나타냄. 또한 장기재령(91일) 압축강도를 측정한 결과, OPC 콘크리트는 약 51.3MPa, WS40 콘크리트는 약 53.5MPa, WS35AS05 콘크리트는 약 53.0MPa, WS30AS10 콘크리트는 약 52.2MPa, WS25AS15 콘크리트는 약 51.3MPa로 서로 유사한 경향을 확인함. 콘크리트의 인장강도 및 휨 강도는 압축강도와 유사한 발현 경향을 나타냄.



(a) 압축강도



(b) 인장강도

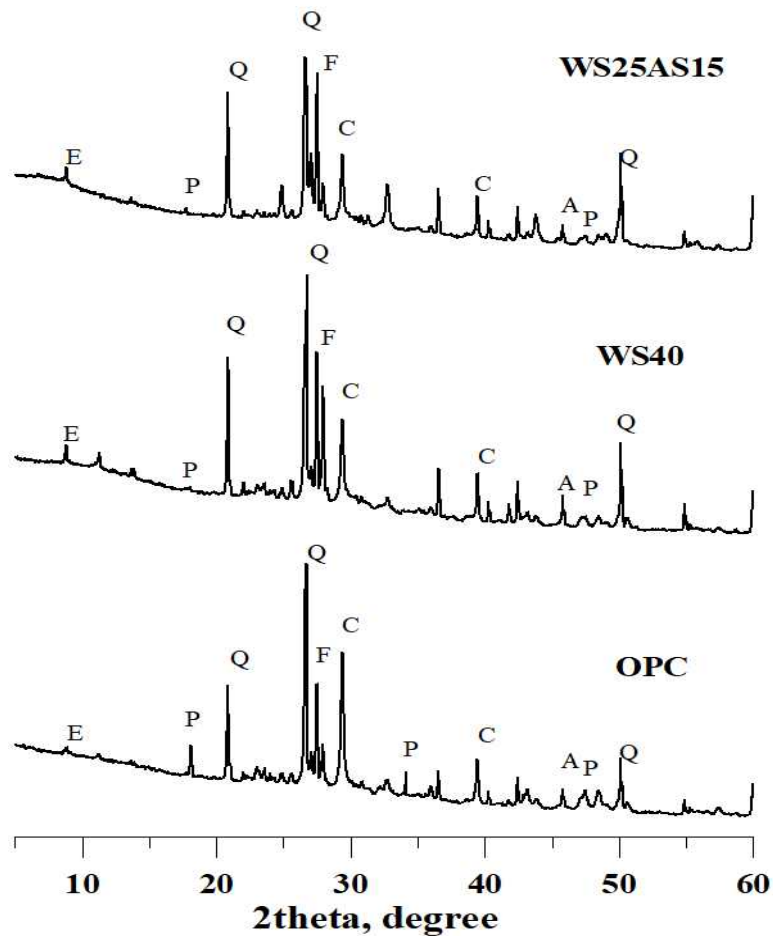


(c) 휨 강도

<그림 2.1.5> 콘크리트의 강도 특성

○ 열적/결정학적 분석

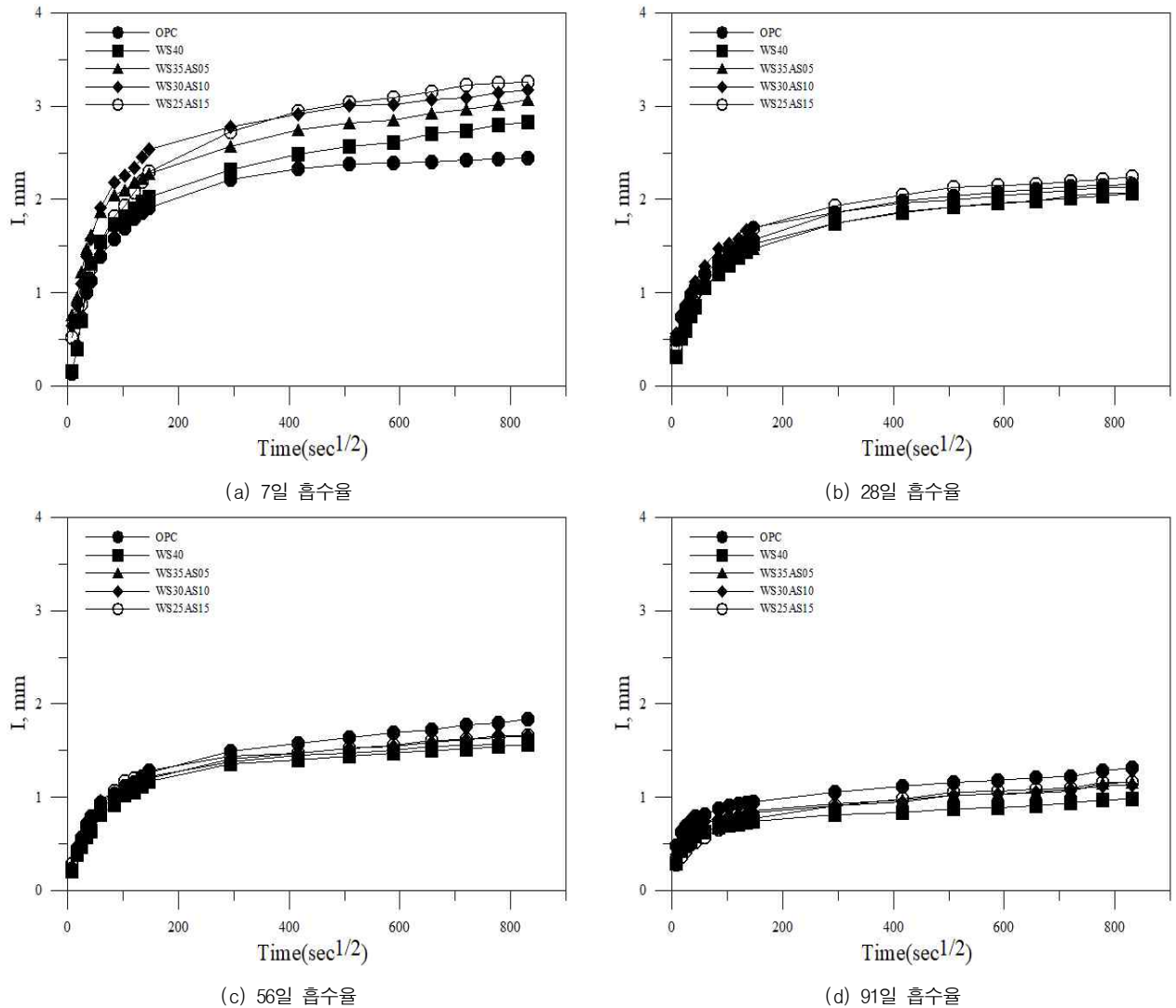
- 그림 2.1.6은 재령 28일 콘크리트 분말샘플에 대한 XRD 분석결과를 나타낸 것으로써, 콘크리트 배합에 관계없이 골재의 영향으로 인한 quartz, feldspar의 피크가 강하게 검출됨을 알 수 있음. WS40 및 WS25AS15 콘크리트 샘플에 대한 XRD 결과에 따르면, 결합재의 잠재수경성 반응으로 인하여 수산화칼슘(portlandite)의 피크가 매우 약하게 검출되었으나, OPC 콘크리트는 주피크에서 상대적으로 강한 portlandite 피크를 관찰할 수 있음.



<그림 2.1.6> 콘크리트 샘플의 XRD 분석결과 (E: ettringite, P: portlandite, C: calcite, Q: quartz, F: feldspar, A: aragonite)

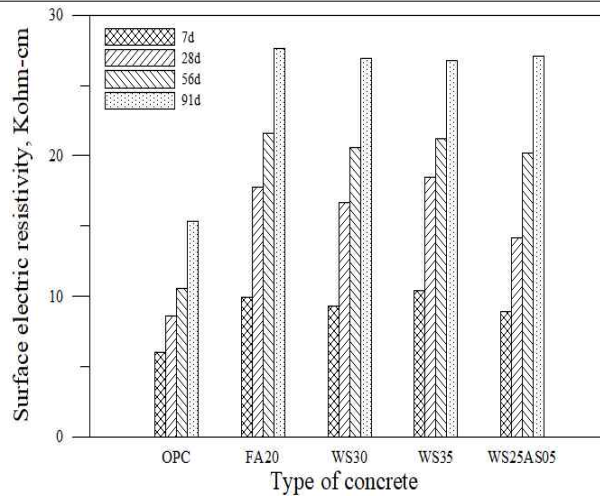
○ 밀실도 평가

- 콘크리트의 밀실도를 평가하기 위하여 흡수율, 표면전기저항성 및 염소이온침투저항성 실험을 진행함. 그림 2.1.7은 콘크리트의 흡수율 실험결과를 나타낸 것으로써 재령 7일 흡수율은 OPC 콘크리트가 가장 작게 나타났으며, WS40, WS35AS05, WS30AS10, WS25AS15 콘크리트 순으로 크게 나타남. 재령 28일 흡수율은 OPC, WS40, WS35AS05, WS30AS10 및 WS25AS14 콘크리트가 유사하게 관찰됨. 한편, 재령 56 및 91일 흡수율은 OPC 콘크리트가 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, WS40, WS35AS05, WS30AS10 및 WS25AS15 콘크리트는 유사한 흡수율 값을 나타냄.



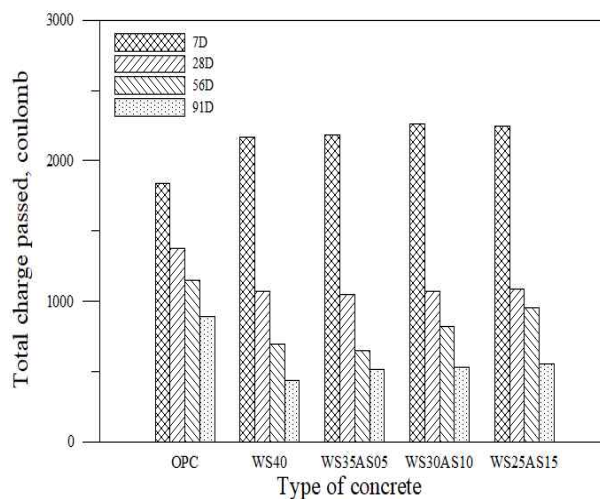
<그림 2.1.7> 콘크리트의 흡수율

- 그림 2.1.8은 콘크리트의 표면전기저항성 실험결과를 나타낸 것으로써, 초기재령(7일) 표면전기저항 OPC 콘크리트 약 6.0Kohm-cm로 가장 작게 나타난 반면, WS40 콘크리트 약 9.9Kohm-cm, WS35AS05 콘크리트 약 9.3Kohm-cm, WS30AS10 콘크리트 약 10.4Kohm-cm, WS25AS15 콘크리트 약 8.9Kohm-cm로 OPC 콘크리트보다 상대적으로 크게 나타남. 또한 재령 28일 표면전기저항성은 OPC 콘크리트 8.6Kohm-cm, WS40 콘크리트 약 17.8Kohm-cm, WS35AS05 콘크리트 약 16.7Kohm-cm, WS30AS10 콘크리트 약 18.5Kohm-cm, WS25AS15 콘크리트 약 14.2Kohm-cm로 나타나 재령 7일 표면전기저항성과 유사한 경향이 나타남을 확인함. 재령 91일 표면전기저항성은 OPC 콘크리트 약 15.3Kohm-cm, WS40 콘크리트 약 27.6Kohm-cm, WS35AS05 콘크리트 약 26.9Kohm-cm, WS30AS10 콘크리트 약 26.8Kohm-cm, WS25AS15 콘크리트 약 27.1Kohm-cm로 나타나 WS 및 AS 혼입 콘크리트가 OPC 콘크리트보다 약 1.5배 크게 나타나는 것을 확인함.



<그림 2.1.8> 콘크리트의 표면전기저항성

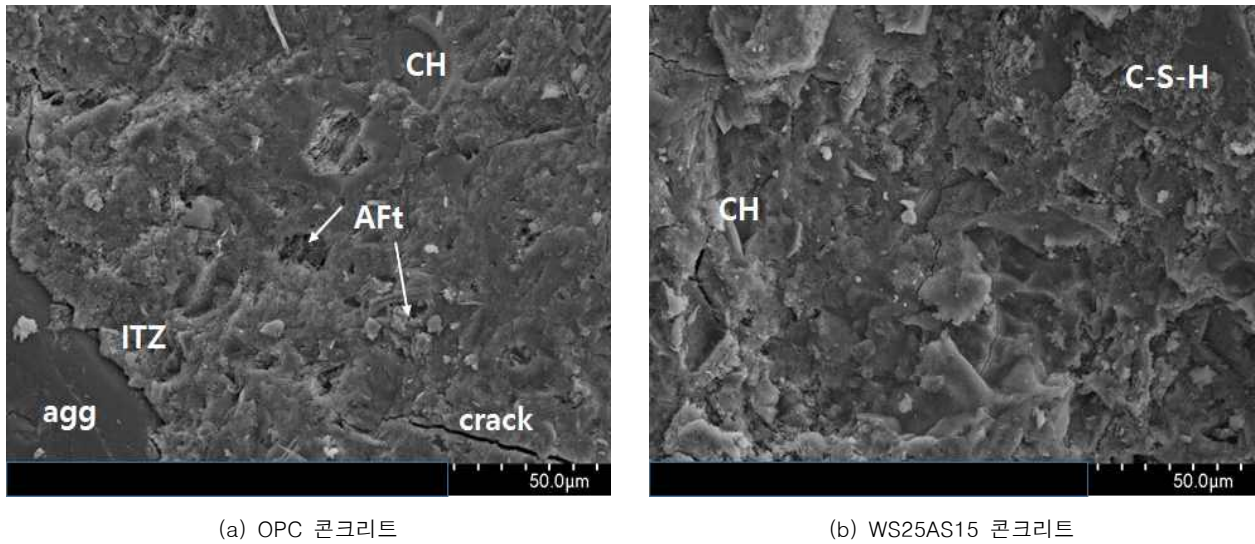
- 콘크리트의 총통과전하량을 측정하여 염소이온침투저항성을 그림 2.1.9에 나타내었으며, 재령 7일의 총통과전하량은 OPC 콘크리트가 가장 작은 값을 나타낸 반면, WS40, WS35AS05, WS30AS10 및 WS25AS15 콘크리트는 OPC 콘크리트보다 약 20% 크게 나타나는 것을 확인함. 한편, 재령 28일 총통과전하량은 WS40, WS35AS05, WS30AS10 및 WS25AS15 콘크리트가 유사하게 나타났으며, OPC 콘크리트가 가장 큰 값을 나타냄. 또한, 장기재령(91일) 총통과전하량은 WS40, WS35AS05, WS30AS10 및 WS25AS15 콘크리트가 OPC 콘크리트에 비하여 현저하게 작은 값을 나타냄.



<그림 2.1.9> 콘크리트의 염소이온 침투저항성

○ 미세구조 분석

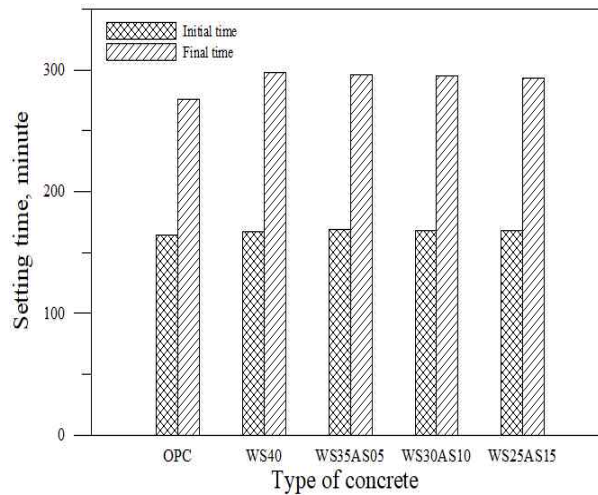
- 경화한 콘크리트의 SEM 촬영에 의한 미세조직구조를 분석한 결과를 나타낸 것이 그림 2.1.10으로써, OPC 콘크리트는 다량의 CH가 분포하는 것을 알 수 있으며, ettringite도 쉽게 관찰되었음. 또, 조직구조 내에 미세균열도 상대적으로 많이 관찰되었음. 반면, WS25AS15 콘크리트의 SEM 사진에 대한 분석 결과, 고로슬래그미분말의 잠재수경성으로 인한 C-S-H가 다량으로 관찰되었으며, 상대적으로 밀실한 조직구조를 나타내었음.



<그림 2.1.10> 콘크리트의 SEM image

○ 응결시간 분석

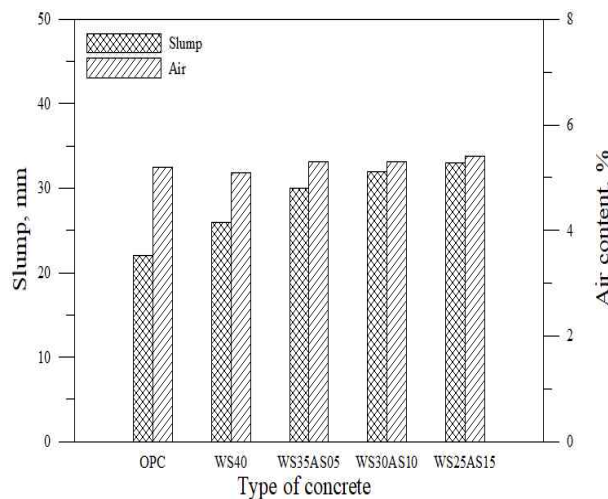
- 그림 2.1.11은 굳지 않은 콘크리트의 응결을 나타낸 것으로써, 초결은 모든 콘크리트배합에서 약 165분으로 유사하게 나타난 것을 확인함. 또한, 종결은 OPC 콘크리트가 약 276분으로 가장 빠르게 나타났으며, WS40, WS35AS05, WS30AS10 및 WS25AS15 콘크리트는 약 297분으로 유사한 경향을 나타냄.



<그림 2.1.11> 콘크리트의 응결시간

○ 유동성 평가

- 그림 2.1.12는 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 측정 결과를 나타낸 것으로 AS의 혼입률이 증가할수록 슬럼프가 증가하는 것으로 나타났으며, 공기량은 약 5.1~5.3%로써 모든 콘크리트에서 유사하게 관찰됨.



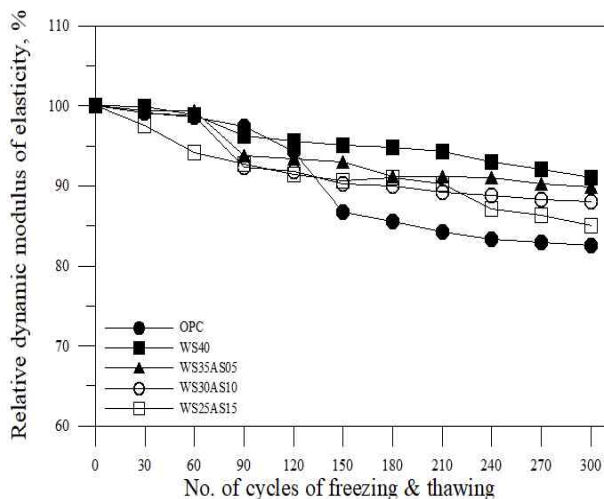
<그림 2.1.12> 콘크리트의 유동성 및 공기량

[콘크리트 포장의 내동해성 평가]

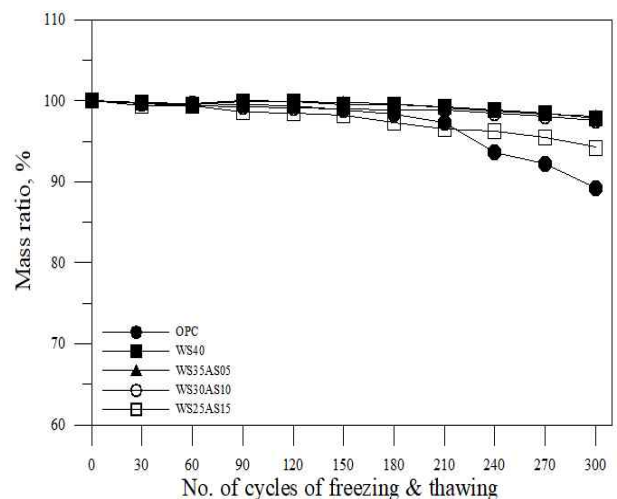
콘크리트의 내동해성 평가는 표 2.1.5와 같은 콘크리트 배합으로 진행함. 동결융해 및 복합열화 저항성은 제작 1일후 탈형하여 $20\pm3^{\circ}\text{C}$ 28일 동안 수중양생 후, 실험을 진행함. 스케일링 저항성은 제작 1일 후, 탈형하여 $20\pm3^{\circ}\text{C}$ 14일 동안 수중양생 및 14일 기건양생 후 스케일링 실험을 수행함.

○ 동결융해 저항성

- 그림 2.1.1은 동결융해를 받은 콘크리트의 상대동탄성계수 및 질량변화율을 나타낸 것으로써, 모든 콘크리트에서 상대동탄성계수 80% 이상으로 확인됨. 또한, 질량변화율은 상대동탄성계수와 유사한 경향을 나타냄



(a) 동결융해를 받은 콘크리트의 상대동탄성계수

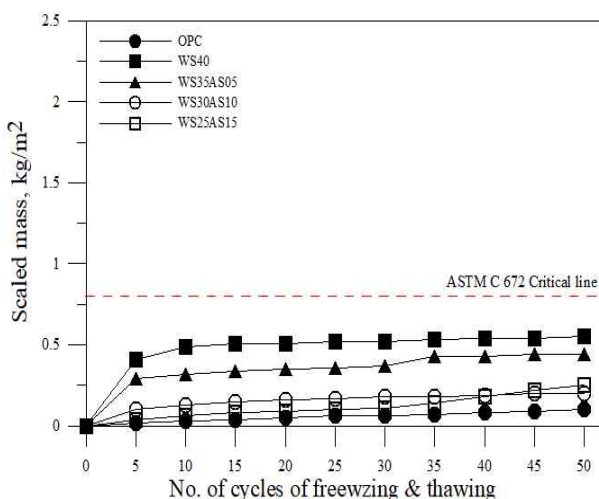


(b) 동결융해를 받은 콘크리트의 질량변화율

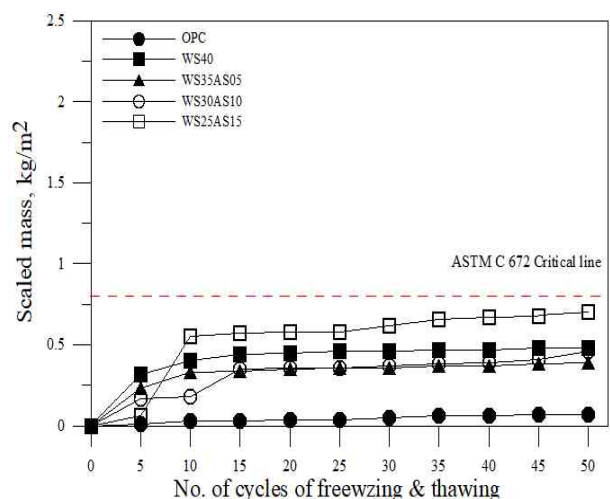
<그림 2.2.1> 콘크리트의 동결융해 저항성

○ 스케일링 저항성

- 그림 2.2.2는 4% CaCl_2 및 4% NaCl 를 적용한 콘크리트의 스케일링 저항성을 나타낸 것으로써, 용액 종류에 관계없이 모든 콘크리트에서 ASTM C 672 기준 0.8kg/m^3 이하의 스케일링 양을 나타냄. 또한, OPC 콘크리트의 스케일링 저항성이 가장 우수한 것으로 나타난 반면, WS 및 AS 혼입 콘크리트는 OPC 콘크리트보다 스케일링 저항성이 상대적으로 떨어지는 것을 알 수 있음.



(a) 4% CaCl_2 수용액을 적용한 콘크리트의 스케일링 저항성

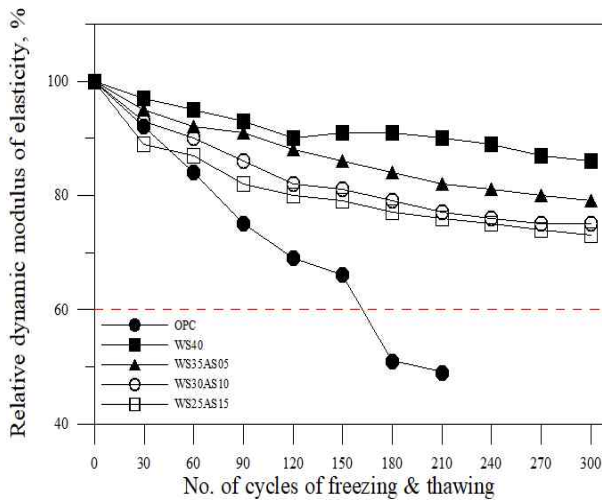


(b) 4% NaCl 수용액을 적용한 콘크리트의 스케일링 저항성

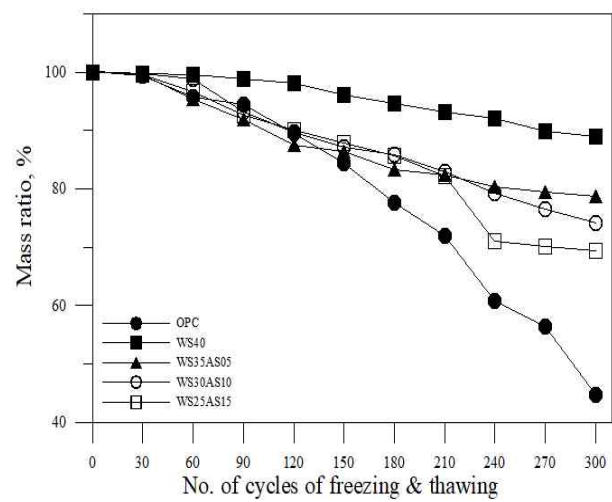
<그림 2.2.2> 콘크리트의 스케일링 저항성

○ 복합열화 저항성

- 복합열화 저항성은 4% CaCl_2 수용액을 동결수로 적용하여 동결융해 실험을 진행함. 그림 2.2.3은 염해-동해 복합열화 받은 콘크리트의 상대동탄성계수 및 질량변화율을 나타낸 것으로써, OPC 콘크리트는 240사이클에서 열화가 심각하게 나타나 상대동탄성계수 측정이 불가 하였으며, WS 혼입 콘크리트는 약 80% 이상의 상대동탄성계수를 나타냄. 또한, WS 및 AS 혼입 콘크리트는 약 70%이상의 상대동탄성계수가 나타나는 것을 확인함. 염해-동해 복합열화를 받은 콘크리트의 질량변화율은 상대동탄성계수와 유사한 경향을 나타내었으며, OPC 콘크리트는 약 60%의 질량감소율을 나타내어 복합열화 저항성이 가장 떨어지는 것으로 나타남.



(a) 염해-동해 복합열화를 받은 콘크리트의 상대동탄성계수

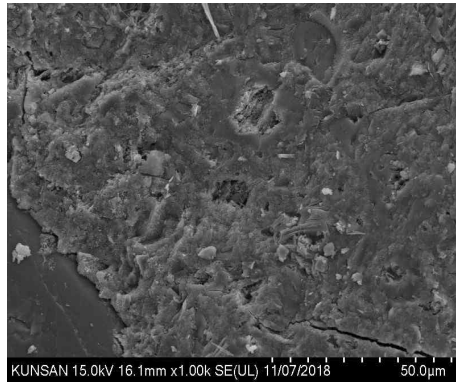


(b) 염해-동해 복합열화를 받은 콘크리트의 질량변화율

<그림 2.2.3> 콘크리트의 복합열화 저항성

○ 열화된 콘크리트의 미세조직 구조 분석

- 그림 2.2.4는 동결융해 작용을 받은 콘크리트의 수화 및 반응 생성물을 확인하기 위한 미세구조 분석 결과를 나타낸 것으로써, OPC 콘크리트는 동해작용의 영향으로 ITZ 및 조직구조의 밀실도가 다소 떨어지는 경향을 나타냄.
- 한편 WS40 콘크리트는 다른 콘크리트에 비하여 조직구조가 상대적으로 치밀하게 나타났으며, WS25AS15 콘크리트의 조직구조는 기공 및 미세균열이 다소 관찰되었으나, OPC 콘크리트에 비하여 조직구조는 치밀한 것으로 조사됨.
- 이러한 미세조직구조 관찰결과는 동결융해 촉진 시험결과와도 매우 유사한 경향인 것으로 판단됨.



(a) OPC



(b) WS40



(c) WS35AS05



(d) WS30AS10



(e) WS25AS15

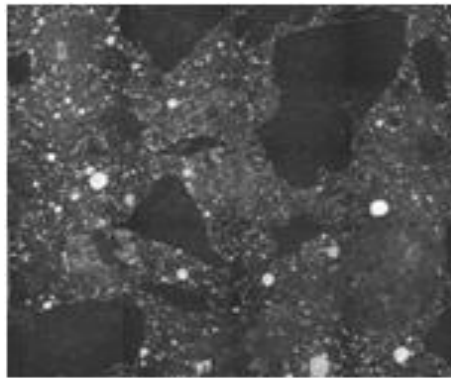
<그림 2.2.4> 동결융해를 받은 콘크리트의 미세구조 분석

○ SAM 지수 평가

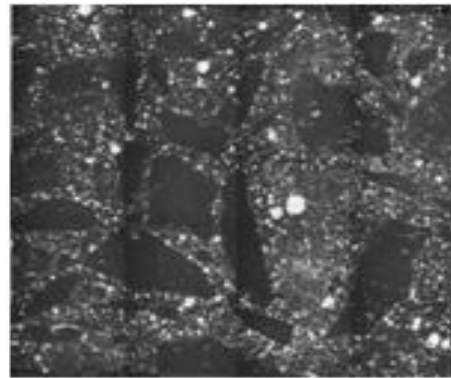
- 표 2.2.1은 SAM 지수 측정결과를 나타낸 것으로써, 모든 콘크리트에서 유사하게 나타남. 표 2.2.2는 콘크리트의 기포간격계수를 나타낸 것으로써, OPC 콘크리트 약 212 μ m, WS40 콘크리트 약 197 μ m, WS35AS05 콘크리트 약 195 μ m, WS30AS10 콘크리트 약 197 μ m, WS25AS15 콘크리트 약 201 μ m로 나타남

표 2.2.1 콘크리트의 SAM 지수

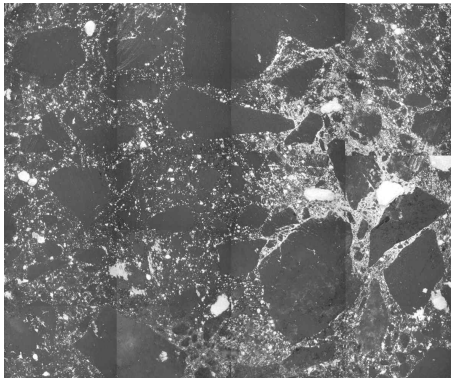
Type	OPC	WS40	WS35AS05	WS30AS10	WS25AS15
SAM Number	0.22	0.20	0.21	0.19	0.18
	0.23	0.19	0.18	0.21	0.18



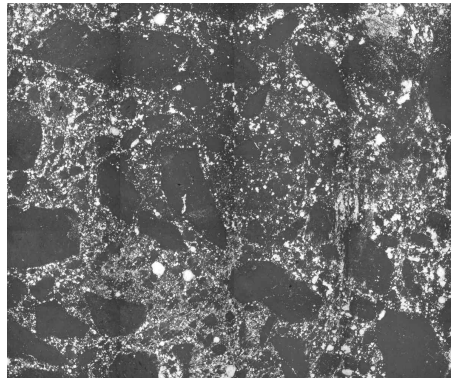
(a) OPC



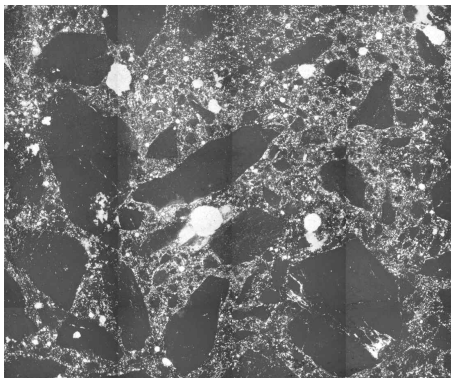
(b) WS40



(c) WS35AS05



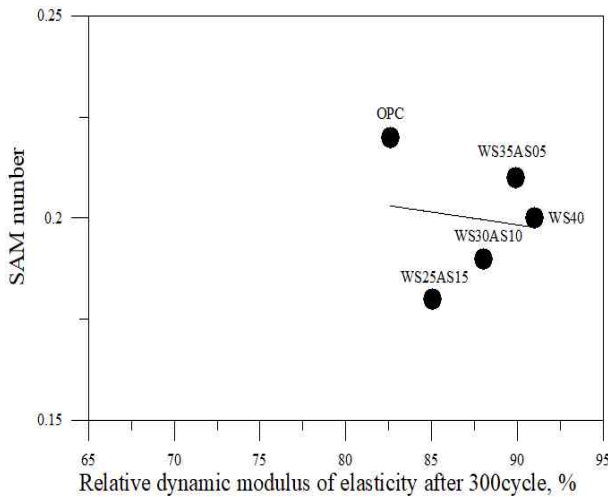
(d) WS30AS10



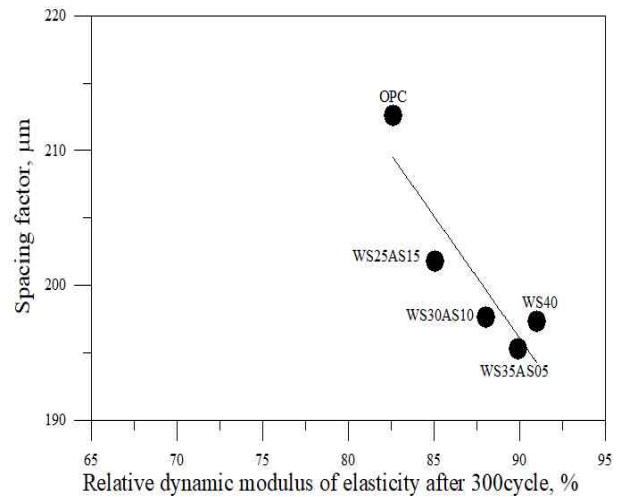
(e) WS25AS15

<그림 2.2.5> 콘크리트의 기포간격계수

- 그림 2.2.6 (a)는 SAM 지수 및 동결융해 300 사이클 후 상대동탄성계수의 상관관계를 나타낸 것으로써, SAM 지수가 0.25이하일 경우 콘크리트의 동결융해 저항성은 우수할 것으로 판단됨. 그림 2.2.6 (b)는 기포간격계수 및 동결융해 300사이클 후 상대동탄성계수의 상관관계를 나타낸 것으로써, 기포간격계수 220 μ m이하일 경우 콘크리트의 동결융해 저항성이 우수할 것으로 판단됨. 콘크리트의 SAM 지수 및 기포간격계수는 각각 0.25 및 220 μ m이하일 내동해성이 우수한 콘크리트로 예측 가능할 것으로 판단됨.



(a) SAM 지수 및 동결융해 300사이클 후 상대동탄성계수의 상관관계



(b) 기포간격계수 및 동결융해 300사이클 후 상대동탄성계수의 상관관계

<그림 2.2.6> SAM지수, 기포간격계수 및 동결융해 300사이클 후 상대동탄성계수의 상관관계

[콘크리트 포장의 현장 적용성 실용화 연구]

○ Mock-up 테스트 베드 운영

- 2021.11 Mock-up 테스트를 23m $\times$ 4m $\times$ 0.2m로 진행하였으며, 콘크리트 배합은 표 2.2.3에 나타냄. 콘크리트 시험시공은 인력 타설로 진행하여 슬럼프를 150 $\pm$ 10mm로 설정함. 또한, 타설 28일 후 염화칼슘 수용액을 주 1회 및 강설 시 살포하였으며, 약 60일 동안 진행 함. 콘크리트 표면에 균열이 거의 나타나지 않음.

<표 2.2.3> Mock-up 테스트 콘크리트 배합

Type	Slump (mm)	Air (%)	W/b (%)	S/a (%)	unit-weight : kg/m ³					
					W	C	WS	AS	S	G
OPC	150 $\pm$ 10	6 $\pm$ 1	43	39	163	380	-	-	648	1017
WS25AS15					163	228	95	57	636	999



<그림 2.2.7> Mock-up 테스트 및 현장모니터링

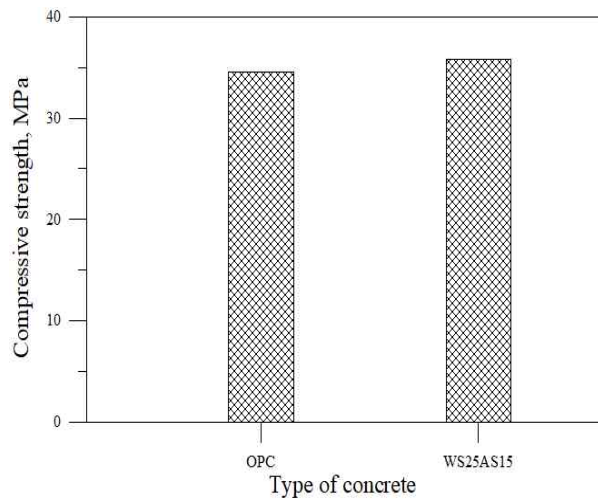
○ 코어링에 의한 성능 모니터링

- 콘크리트 타설 28일 후 그림 2.2.8과 같이 코어링을 진행하였으며, 압축강도, 흡수율, 표면전기저항성, 염소이온침투저항성 및 스케일링 저항성 실험 진행함.



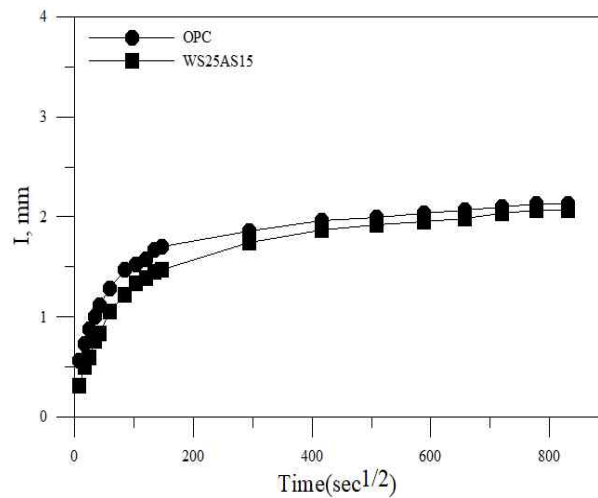
<그림 2.2.8> Mock-up 테스트 콘크리트 코어링

- 그림 2.2.7은 코어링 콘크리트의 압축강도 실험 결과를 나타낸 것으로써, OPC 콘크리트 약 34.6MPa, WS25AS15 콘크리트 35.8MPa로 유사하게 나타남.



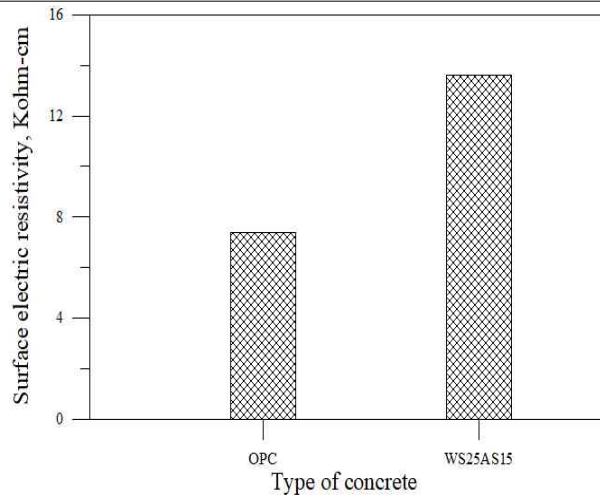
<그림 2.2.7> 코어링 콘크리트의 압축강도

- 그림 2.2.8은 코어링 콘크리트의 흡수율 실험 결과를 나타낸 것으로써, OPC 및 WS25AS15 콘크리트가 유사한 경향을 나타냄.



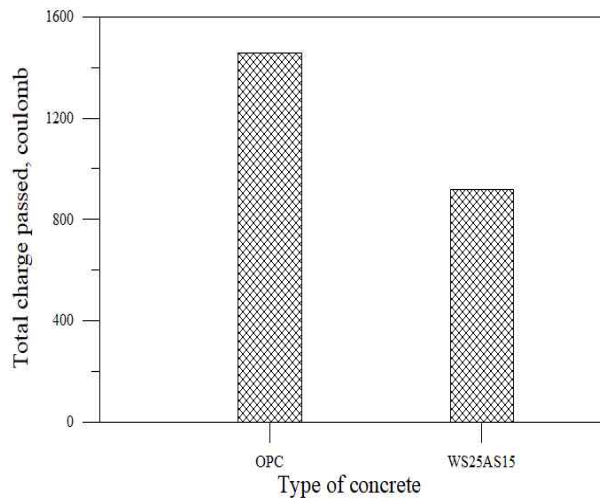
<그림 2.2.8> 코어링 콘크리트의 흡수율

- 표면전기저항성 실험 결과를 나타낸 것이 그림 2.2.9이며, OPC 콘크리트는 약 7.4Kohm-cm로 나타난 반면 WS25AS15 콘크리트 약 13.6Kohm-cm로 OPC 콘크리트 약 1.8배 크게 나타나는 것을 확인함.



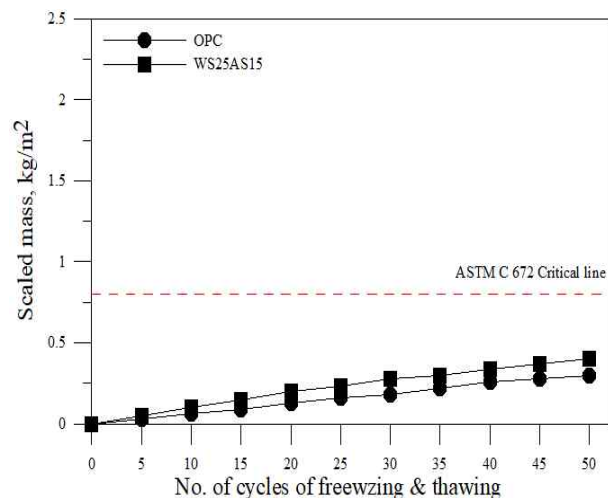
<그림 2.2.9> 코어링 콘크리트의 표면전기저항성

- 코어링 콘크리트의 염소이온 침투저항성 결과를 그림 2.2.10에 나타내었으며, WS25AS15 콘크리트는 OPC 콘크리트보다 약 1.4배 작은 총 통과전하량을 나타내어 염소이온 침투저항성이 우수한 것으로 관찰됨.



<그림 2.2.10> 코어링 콘크리트의 염소이온 침투저항성

- 그림 2.2.11은 4% CaCl_2 수용액을 적용한 코어링 콘크리트의 스케일링 실험 결과를 나타낸 것으로써, OPC 및 WS25AS15 콘크리트의 스케일링 양은 각각 약 0.3 및 0.4 kg/m^2 으로 나타남. 또한, OPC 및 WS25AS15 콘크리트 모두 ASTM C 672 기준 0.8 kg/m^2 을 초과하지 않는 것으로 나타남.



<그림 2.2.11> 코어링 콘크리트의 스케일링 저항성

○ 결합재 투입방식 제안

- 서냉 및 급냉슬래그는 화학적 성분, 물리적 성질 및 형상이 유사하여 프리믹스시 균질함 품질이 확보 가능함. 그림 2.2.12와 같이 프리믹스인 리본 믹서 및 고속유동믹서를 적용 할 수 있음. 또한, 프리믹스 사용 시 시멘트를 제외한 서냉 및 급냉슬래그를 사전에 혼합 후 별도의 사일로 없이 기존의 고로슬래그 미분말의 사일로를 활용하여 공급할수 있어 경제성 확보와 품질의 균질성을 확보 할 수 있음.



<그림 2.2.12> 혼화재 투입 방식(프리믹스)

○ 현장적용기술 수정 및 보완

- 강도, 내구성 미세구조분석 등 실내실험 결과를 반영하여 현장적용 배합을 설정하여 Mock-up 테스트를 실시함.
- 결합재로써 서냉슬래그를 0~15% 치환한 콘크리트 배합에 대한 성능을 검토하였으며, 장기 모니터링 결과 도출을 위한 콘크리트 코어링을 실시하였으며, 모니터링 결과를 바탕으로 내동해성 콘크리트 포장에 대한 배합수정을 실시할 예정임.
- 고함량 서냉슬래그 적용 현장배합을 도출하여 내동해성 콘크리트 포장 시방서(안)에 반영함.

○ 고함량 서냉슬래그 콘크리트 포장의 CO₂ 및 시공비용 저감량 산정

- 고함량 서냉슬래그 콘크리트 포장은 JCP 대비 CO₂ 26.8% 저감, 시공비용 2.5% 저감(1km, 2차로 시공 시)

<표 2.2.4> 콘크리트 포장의 CO₂ 및 시공비용 저감량 산정결과

구 분			1km, 2차로 시공 시			
			CO ₂ (ton)		시공비용(천원)	
			합계	저감량	합계	저감량
고함량 서냉슬래그 콘크리트 포장	비교	JCP	2,420.0	-26.8%	216.357	-2.5%
	개발	개발	1,772.6		210.841	

- 고함량 서냉슬래그 콘크리트 포장의 절감효과를 시나리오 1, 2 및 3으로 분석함. 그 결과, 시나리오 1은 CO₂ 24.3% 및 비용 7.4% 절감, 시나리오 2 CO₂ 25.8% 및 비용 18.7% 절감, 시나리오 3 CO₂ 25.9% 및 비용 33.9% 절감효과가 있음.

<표 2.2.5> 콘크리트 포장의 시나리오 별 CO₂ 및 시공비용 저감량 산정결과

구 분		CO ₂ (ton)		시공비용(천원)	
		합계	저감량	합계	저감량
시나리오 1	비교	2,493	-24.3%	523,543	-7.4%
	개발	1,887		484,583	
시나리오 2	비교	2,493	-25.8%	523,543	-18.7%
	개발	1,851		425,823	
시나리오 3	비교	2,493	-25.9%	523,543	-33.9%
	개발	1,847		345,891	

분석 시나리오	
S1	JCP대비 공용수명 10% 향상
S2	JCP대비 공용수명 20% 향상
S3	JCP대비 공용수명 30% 향상 (노면, 단면보수 미 실시)

	비교대상공법	S1	S2	S3
	JCP	고함량 서냉슬래그 콘크리트 포장	고함량 서냉슬래그 콘크리트 포장	고함량 서냉슬래그 콘크리트 포장
2020				
2021				
2022				
2023				
2024				
2025				
2026				
2027	출눈보수			출눈보수
2028				
2029	단면보수	출눈보수		
2030		단면보수	출눈보수	
2031				
2032			단면보수	
2033				
2034	출눈보수+노면			출눈보수
2035				
2036		출눈보수+노면		
2037				
2038			출눈보수+노면	
2039	SMA(8cm)			SMA(8cm)
2040				
2041		SMA(8cm)		
2042				
2043			SMA(8cm)	
2044				
2045				
2046	SMA(5cm)			SMA(5cm)
2047				
2048		SMA(5cm)		
2049				

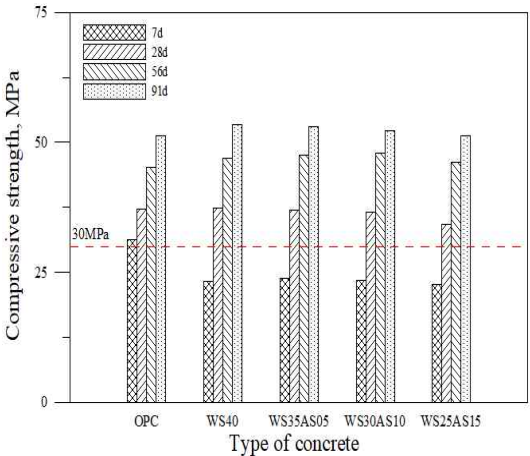
<그림 2.2.13> 콘크리트 포장의 CO₂ 및 시공비용 저감량 시나리오

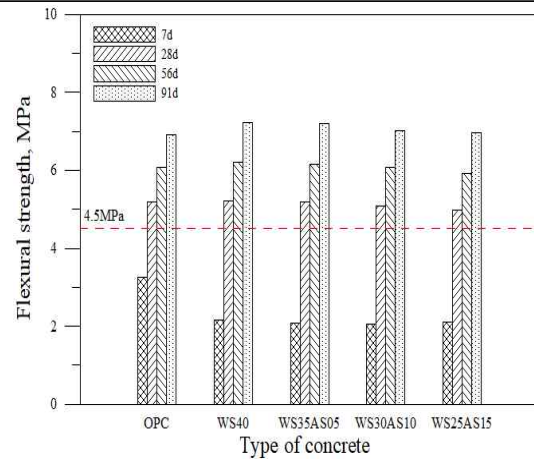
- 고함량 서냉슬래그 혼입 콘크리트 배합의 특성 분석 결과, 서냉슬래그를 최대 15%까지 혼입이 가능할 것으로 판단되며, 역학적 성능, 내구성능 및 Mock-up 테스트가 우수하게 나타나 한랭지역, 제설제의 사용이 잦은 지역 등에 적용이 가능할 것으로 사료됨. 또한, 고함량 서냉슬래그 혼입 콘크리트 배합은 역학적 및 내구성능이 일반 콘크리트 포장 배합보다 우수하여 폭염, 강우 등 이상기후가 나타나는 지역에도 적용이 가능할 것으로 판단됨.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

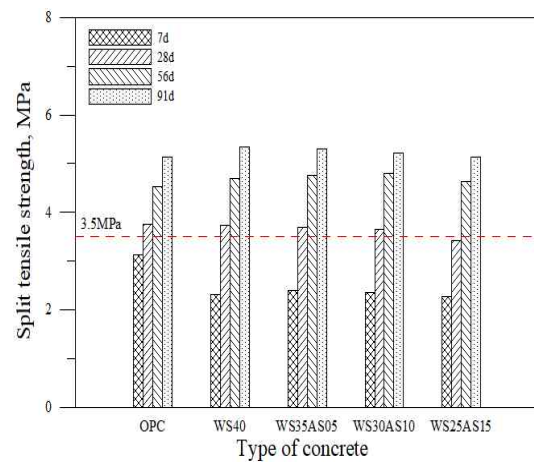
1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

성과목표	연구개발 성과																														
(A-1) 콘크리트 포장의 기후변화에 따른 열화원인 정립 ① 내동해성 콘크리트 문헌 고찰(A-1-①)	• 국내외 내동해성 콘크리트 문헌 고찰 완료 국내의 내동해성 콘크리트 포장은 설계 기준, 사용재료, 평가방법 등이 명확히 제시되어 있지 않음 국외의 경우, 콘크리트 포장 배합의 설계 기준 사용 재료의 품질, 평가 방법 등이 제시되어 있으며, 내구성능이 우수한 결합재(고로슬래그, 플라리아시, 실라카 흙 등)의 사용을 제시하고 있음																														
② 콘크리트의 동해 원인 분석 (A-1-②)	• 포장 콘크리트의 동해 원인 분석 완료 콘크리트의 동해원인은 재료의 품질관리, 공기량, 타설 후 양생관리 등이 있음. 또한, 환경적인 동해의 요인은 동결융해, 스케일링, 탄산화 등이 있으며, 이를 예방하기 위하여 재료의 품질관리 강화, 적절한 공기량 혼입, 광물질 혼화재 적용 등의 고려가 필요함																														
(A-2) 서냉슬래그 적용 콘크리트의 역학적 성능 평가 ① 강도평가(압축, 휨, 인장강도) (A-2-①)	• 서냉슬래그 적용 콘크리트 역학적 성능 평가 완료  Compressive strength, MPa Type of concrete 압축강도 <table border="1"><thead><tr><th>Type of concrete</th><th>7d</th><th>28d</th><th>56d</th><th>91d</th></tr></thead><tbody><tr><td>OPC</td><td>~30</td><td>~35</td><td>~40</td><td>~45</td></tr><tr><td>WS40</td><td>~45</td><td>~50</td><td>~55</td><td>~60</td></tr><tr><td>WS35AS05</td><td>~40</td><td>~45</td><td>~50</td><td>~55</td></tr><tr><td>WS30AS10</td><td>~35</td><td>~40</td><td>~45</td><td>~50</td></tr><tr><td>WS25AS15</td><td>~30</td><td>~35</td><td>~40</td><td>~45</td></tr></tbody></table>	Type of concrete	7d	28d	56d	91d	OPC	~30	~35	~40	~45	WS40	~45	~50	~55	~60	WS35AS05	~40	~45	~50	~55	WS30AS10	~35	~40	~45	~50	WS25AS15	~30	~35	~40	~45
Type of concrete	7d	28d	56d	91d																											
OPC	~30	~35	~40	~45																											
WS40	~45	~50	~55	~60																											
WS35AS05	~40	~45	~50	~55																											
WS30AS10	~35	~40	~45	~50																											
WS25AS15	~30	~35	~40	~45																											



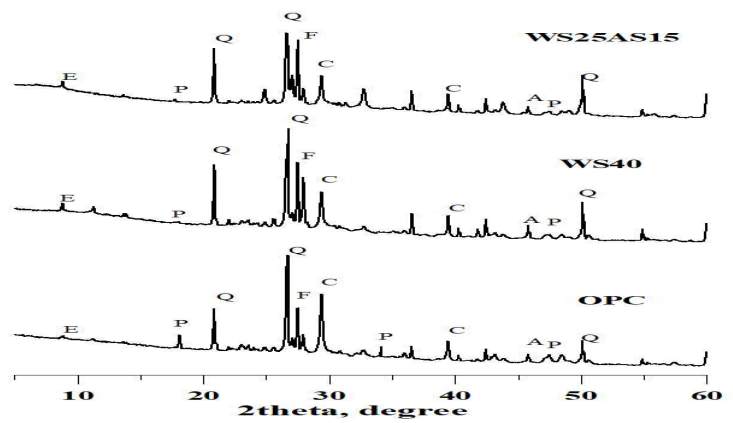
휨 강도



인장강도

② 열적/결정학적 분석 (A-2-②)

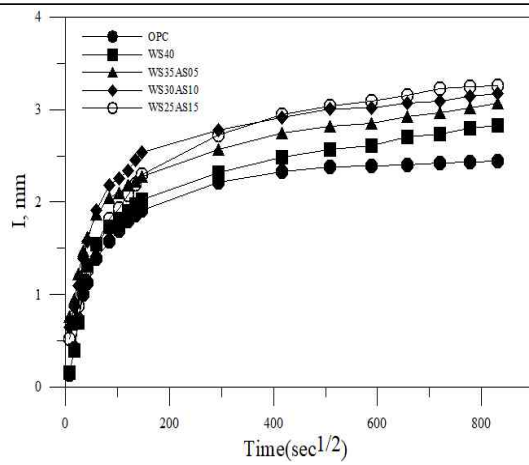
- 서냉슬래그 혼입 콘크리트의 XRD 분석 완료



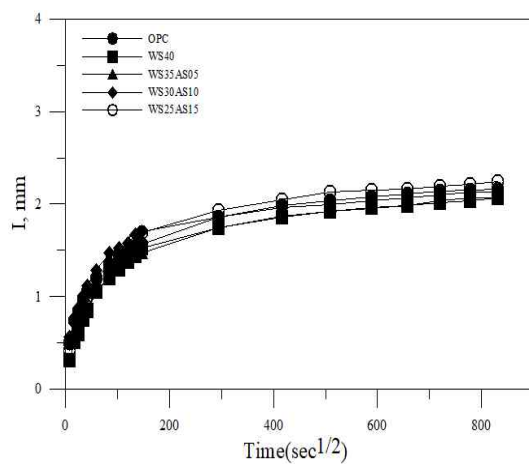
XRD 실험결과

③ 밀실도 평가 (A-2-③)

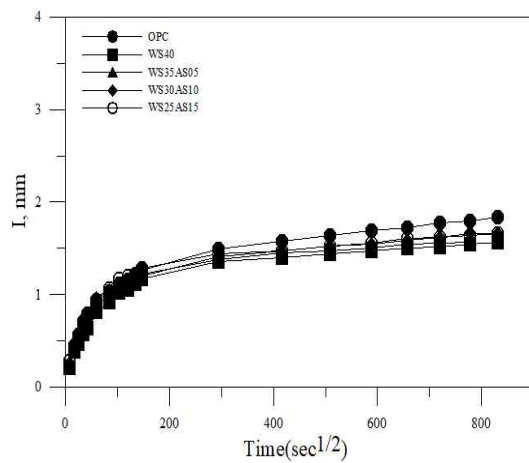
- 콘크리트의 밀실도 평가 완료(흡수율, 표면전기저항성, 염소 이온 침투저항성)



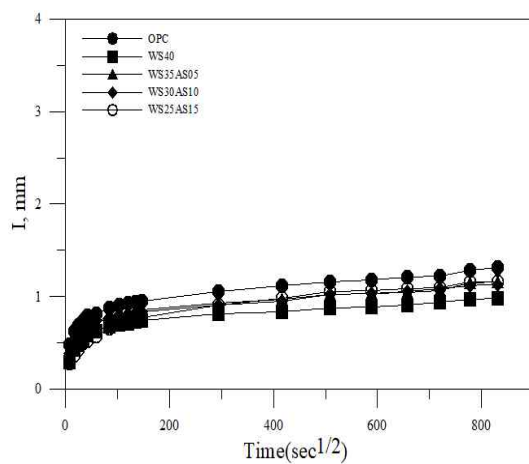
7일 흡수율



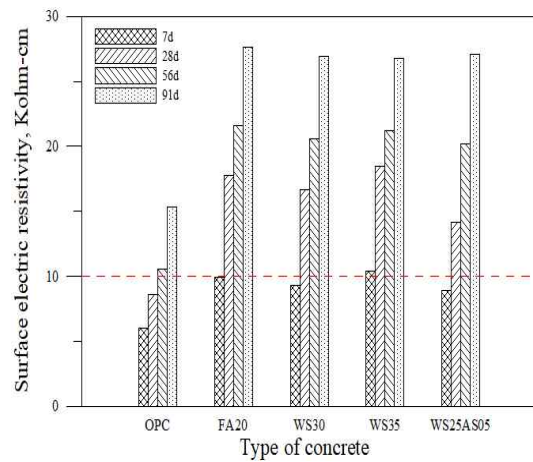
28일 흡수율



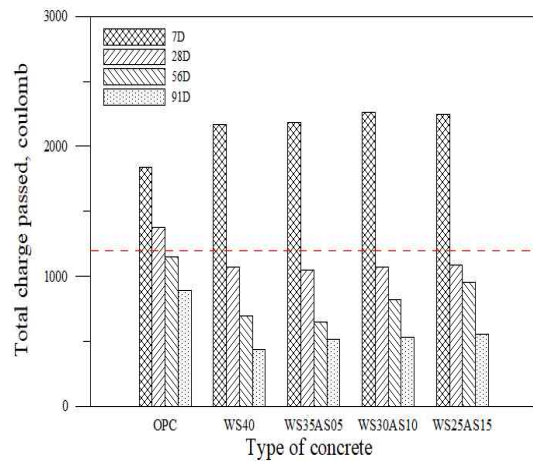
56일 흡수율



91일 흡수율

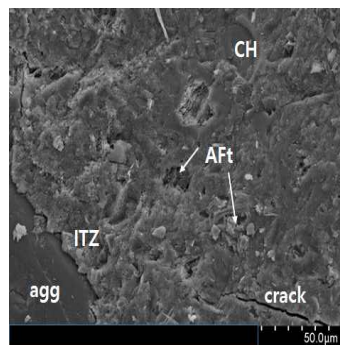


표면전기저항성

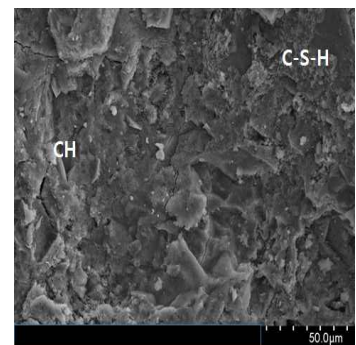


염소이온 침투저항성

- 경화된 콘크리트의 SEM 분석을 통한 서냉슬래그의 적응성 검토 완료



OPC 콘크리트



WS25AS15 콘크리트

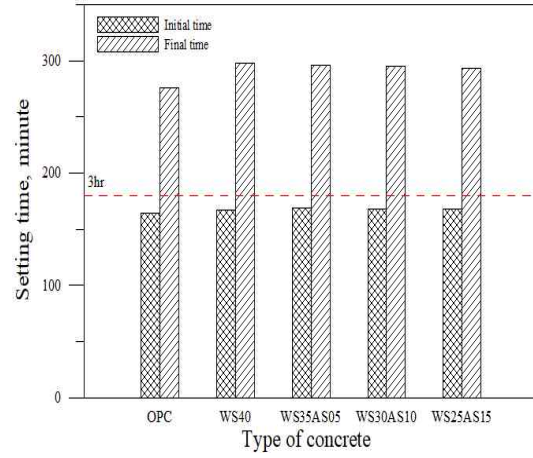
SEM image

④ 미세구조 분석 (A-2-④)

(A-3) 서냉슬래그의 품질 평가

① 응결시간 (A-3-①)

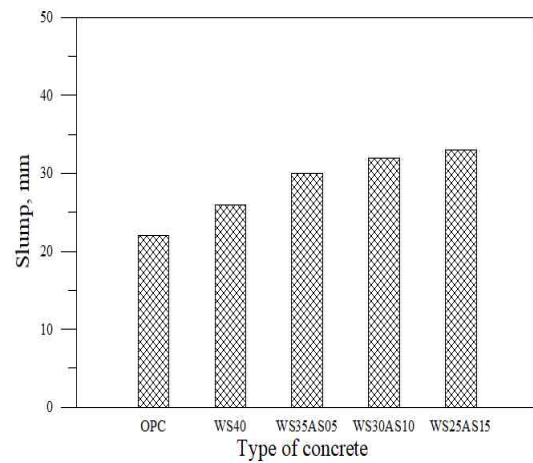
- 서냉슬래그 콘크리트의 응결 초결 3시간 이하 검증 완료



응결

② 유동성 (A-3-②)

- 서냉슬래그 콘크리트의 유동성 50mm 이하 검증 완료

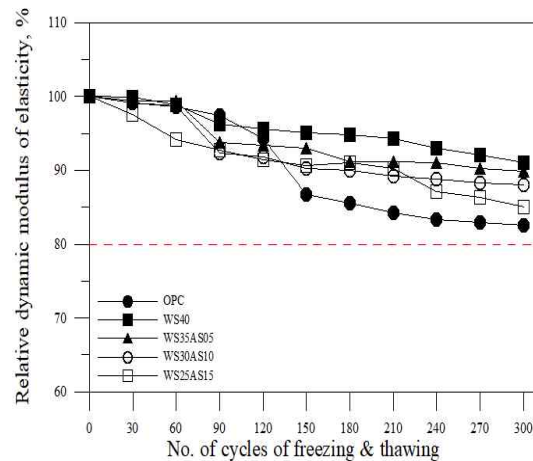


유동성

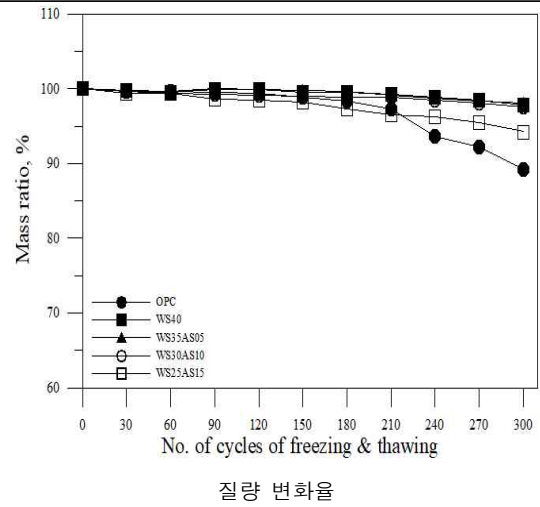
(B-1) 콘크리트 포장의 내동해성 평가

① 동결융해 저항성 (B-1-①)

- 서냉슬래그 콘크리트의 동결융해 저항성 상대동탄성계수 80% 이상 검증 완료



상대동탄성계수



- 서냉슬래그 콘크리트의 스케일링 저항성 외관등급 1등급 검증 완료

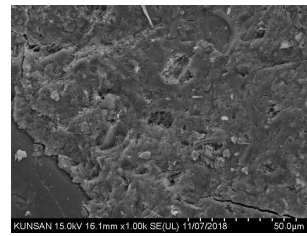
② 스케일링 저항성 (B-1-②)

Type	4% CaCl ₂	4% NaCl
OPC		
WS40		
WS35AS05		
WS30AS10		
WS25AS15		

③ 열화된 콘크리트 미세조직 구조 분석

- 동결융해를 받은 콘크리트의 미세조직 구조 분석 완료

(B-1-③)



OPC



WS40



WS35AS05



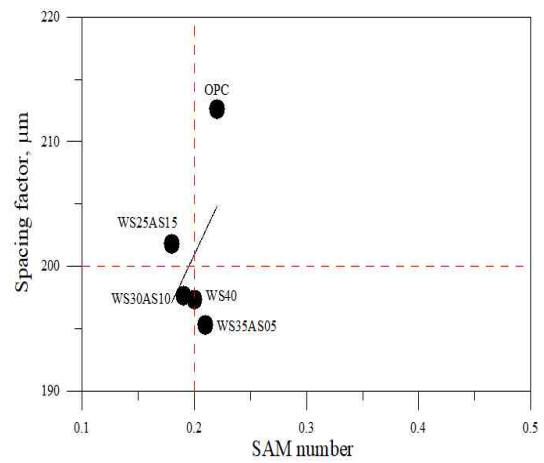
WS30AS10



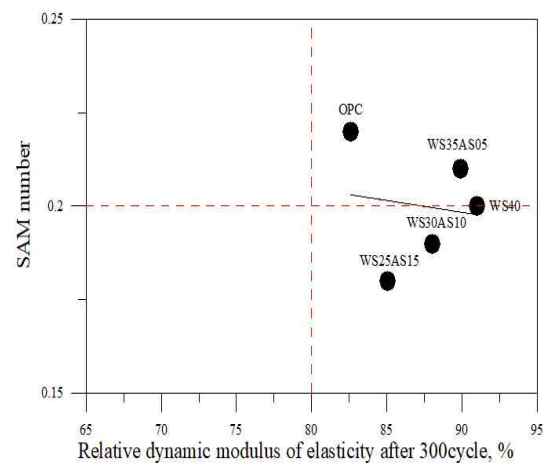
WS25AS15

- SAM 지수, 300사이클 후 상대동탄성계수 및 기포간격계수의 상관관계 분석 완료

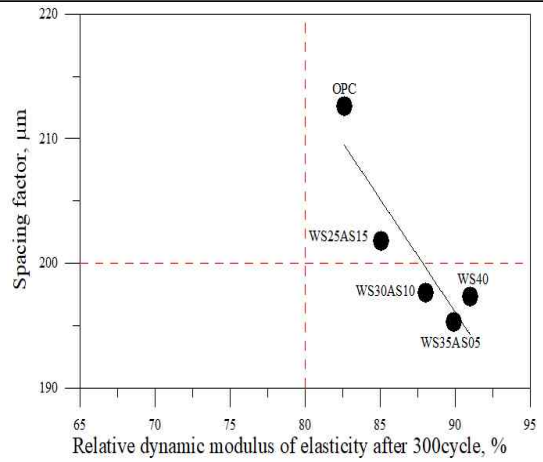
④ SAM 지수 평가 (B-1-④)



SAM 및 기포간격계수 상관관계



SAM 및 상대동탄성계수 상관관계



기포간격계수 및 상대동탄성계수 상관관계

(B-2) 콘크리트 포장의 현장적용성 실용화 기술

① Mock-up 테스트 베드 운영 (B-2-①)

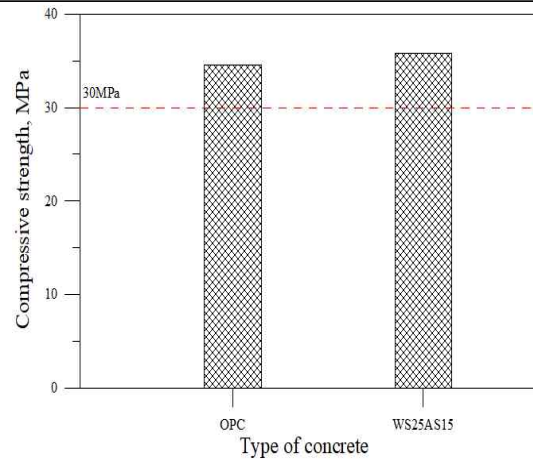
- OPC(10m×4m×0.2m) 및 고함량 서냉슬래그 콘크리트 (13m×4m×0.2m) 배합 Mock-up 테스트 진행 완료



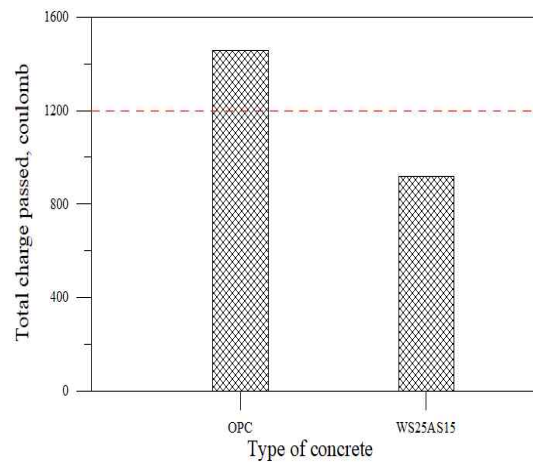
Mock-up 테스트

② 코어링에 의한 성능 모니터링 (B-2-②)

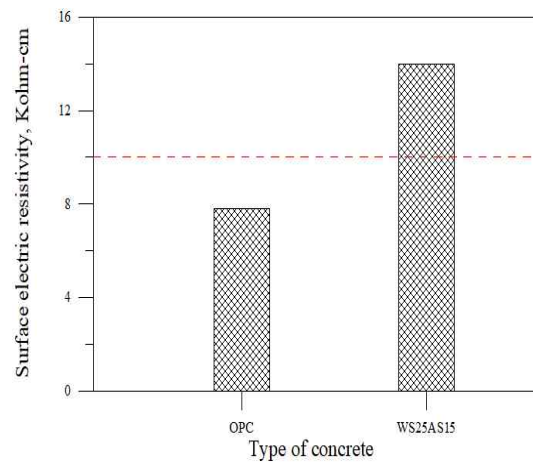
- Mock-up 테스트 28일 후, 콘크리트의 성능 모니터링 검증 완료



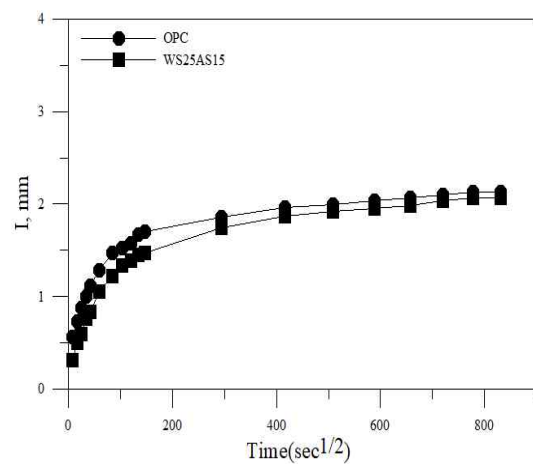
압축강도



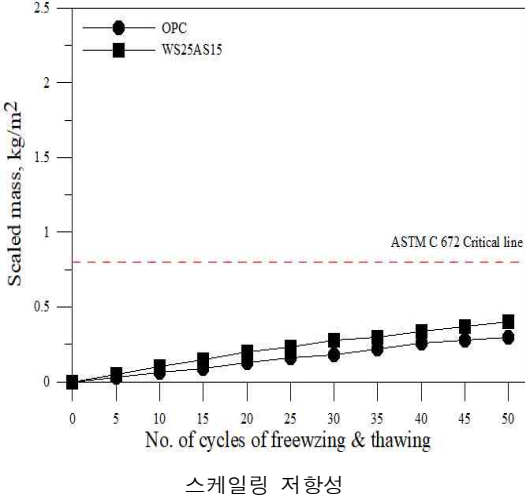
염소이온 침투저항성



표면전기저항성



흡수율

	 스케일링 저항성
③ 결합재 투입방식 제안 (B-2-③)	• 서냉슬래그 투입방식 제안 완료 - 프리믹스인 리본 믹서 및 고속유동믹서 적용 - 프리믹스 사용 시 시멘트를 제외한 서냉슬래그를 사전에 혼합 후 별도의 사일로 없이 기존의 고로슬래그 미분말의 사일로를 활용하여 공급
④ 현장적용성 기술 수정, 보완 (B-2-④)	• 고함량 서냉슬래그 현장적용성 기술 수정 및 보완 완료 - 역학적 특성, 내구성 및 기기분석을 통해 수정, 보완된 콘크리트 배합의 Mock-up 테스트 수행 - Mock-up 테스트 구간의 장기모니터링을 진행 후, 내동해성 콘크리트 포장 배합에 대한 수정을 실시할 예정 - 또한, 내동해성 콘크리트 포장 시방서(안)에 고함량 서냉슬래그 현장배합을 반영

(2) 정량적 연구개발성과

구분		목표	달성치	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	1	1	100	
	비SCI				
	계	1	1	100	
국내 논문 게재	SCI				
	비SCI	3	3	100	
	계	3	3	100	
특허 출원	국내	2	2	100	
	국외				
	계	2	2	100	
특허 등록	국내	1	2	200	1건 초과 달성
	국외				
	계	1	2	200	
인력 양성	석사				
	박사				
	계				
기술 이전	계약 건수				
	계약액				
	징수액				
국제 표준화	기고서 제출				
	기고서 채택				
	표준안 채택				
국내 표준화	기고서 제출				
	기고서 채택				
	표준안 채택				
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문				
	연구시설·장비				
	기술요약정보				
	생명자원	생명정보			
		생물자원			
		신품종			
	소프트웨어				
	화학물				
기타	시제품	1	1	100	
	성과 홍보				
	일자리 창출				

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	서냉 및 급냉 고로슬래그미분말 을 활용한 시멘트 콘크리트 포장의 탄산화-스케일링 복합열화 저항성에 대한 실험적 연구	한국도로학 회	박세호	5	대한민국	한국도로학회	비SCIE	2020.09.	2287-3678	100
2	결합재로서 서냉 및 급냉 슬래그를 적용한 콘크리트의 내동해성에 대한 실험적 연구	한국도로학 회	이승태	5	대한민국	한국도로학회	비SCIE	2020.09.	2287-3678	100
3	광물질 혼화재를 적용한 콘크리트의 내동해성 평가	한국도로학 회	박세호	6	대한민국	한국도로학회	비SCIE	2021.12.	2287-3678	100
4	Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Performance of Concrete Containing Water-Cooled and Air-Cooled Slag	Applied Sciences	이승태	16	스위스	Applied Sciences	SCIE	2021.08.	2076-3417	100

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2021 한국콘크리트학회 봄학술대회	골재입경에 따른 콘크리트의 기포간격계수 평가	박규민	2021.05.14	여수 엑스포 컨벤션센터	대한민국
2	2021 한국콘크리트학회 가을학술대회	서냉 및 급냉슬래그 혼입 콘크리트의 내동해성 평가	박규민	2021.11.05	경주 화백컨벤션센터	대한민국
3	2021 한국콘크리트학회 가을학술대회	광물질 혼화재를 사용한 포장 콘크리트 성능 평가	김지훈	2021.11.05	경주 화백컨벤션센터	대한민국

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	고로급냉 슬래그 및 고로서냉 슬래그 분말을 이용한 콘크리트 조성물 및 이를 이용하여 제조되는 콘크리트 구조물	대한민국	군산대학 교 산학협력 단	2020.10.2 8	10-2020- 0140779	군산대학 교 산학협력 단	2021.07.1 4	10-22796 25	100	
2	특허	서냉 슬래그 분말을 활용한 콘크리트 구조물 보수용 친환경 모르타르 조성물 및 이를 이용한 콘크리트 구조물 보수 공법	대한민국	군산대학 교 산학협력 단, 빌드웍	2021.04.2 9	10-2021- 0055803	군산대학 교 산학협력 단, 빌드웍	2021.11.0 3	10-23237 80	100	

[경제적 성과]

□ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)
1	고함량 서냉슬래그 콘크리트 포장	2021.11.09	군산대학교, 빌드웍	군산대학교, 빌드웍	충남 공주시 우송산업단지

2) 목표 달성 수준

연구개발목표	달성내용	달성도(%)
(A-1) 콘크리트 포장의 기후변화에 따른 열화원인 정립 ① 내동해성 콘크리트 문헌 고찰 (A-1-①)	- 콘크리트 포장의 내동해성 원인 분석 완료 - 국내외 내동해성 콘크리트 배합 고찰 완료	100%
② 콘크리트의 동해 원인 분석 (A-1-②)	포장 콘크리트의 물리적 및 화학적 동해 원인 분석 완료	100%
(A-2) 서냉슬래그 적용 콘크리트의 역학적 성능 평가 ① 강도평가(압축, 휨, 인장강도) (A-2-①)	- 서냉슬래그(5, 10, 15%) 적용 콘크리트의 압축, 휨, 인장강도 평가 완료 - 압축강도 30MPa 이상, 휨 강도 4.5MPa 이상, 인장강도 3.5MPa 이상 확보	100%
② 열적/결정학적 분석 (A-2-②)	서냉슬래그의 XRD 분석을 통해 콘크리트 재료로써 적합성 분석 완료	100%
③ 밀실도 평가 (A-2-③)	- 콘크리트의 흡수율, 표면전기저항성 및 염소이온 침투 저항성 평가 완료 - 서냉슬래그 혼입 콘크리트의 밀실도 검증 완료	100%
④ 미세구조 분석 (A-2-④)	- 서냉슬래그 혼입 콘크리트의 미세구조 분석 완료 - 서냉슬래그가 콘크리트에 미치는 수화반응 분석 수행	100%

(A-3) 서냉슬래그의 품질 평가 ① 응결시간 (A-3-①)	- 서냉슬래그 혼입 콘크리트의 응결시간 분석 완료 - 초결 3시간 이하, 종결 5시간 이하 확보	100%
② 유동성 (A-3-②)	- 서냉슬래그 혼입 콘크리트의 유동성 분석 완료 - 유동성 50mm 이하 확보	100%
(B-1) 콘크리트 포장의 내동해성 평가 ① 동결융해 저항성 (B-1-①)	- 서냉슬래그 혼입 콘크리트의 동결융해 저항성 평가 완료 - 상대동탄성계수 80% 이상 확보	100%
② 스케일링 저항성 (B-1-②)	- 서냉슬래그 혼입 콘크리트의 스케일링 저항성 평가 완료 - 스케일링 저항성 1등급 및 스케일링 양 0.8kg/m^2 이하 확보	100%
③ 열화된 콘크리트 미세조직 구조 분석 (B-1-③)	동결융해를 받은 콘크리트의 미세조직구조 분석 완료	100%
④ SAM 지수 평가 (B-1-④)	- 서냉슬래그 혼입 콘크리트의 SAM 지수 평가 완료 - SAM 지수, 동결융해 저항성 및 기포간격계수의 상관관계 분석 완료	100%
(B-2) 콘크리트 포장의 현장적용성 실용화 기술 ① Mock-up 테스트 베드 운영 (B-2-①)	고함량 서냉슬래그 적용 콘크리트 포장 Mock-up 테스트 완료	100%
② 코어링에 의한 성능 모니터링 (B-2-②)	고함량 서냉슬래그 콘크리트 포장의 코어링 실험을 통해 현장적용성 검증 완료	100%
③ 결합재 투입방식 제안 (B-2-③)	각종 문헌 고찰을 통해 서냉슬래그 투입방식 제안 완료	100%
④ 현장적용성 기술 수정, 보완 (B-2-④)	- 강도, 내구성, 미세구조분석 등의 실험결과를 토대로 현장 적용 배합을 수정 및 보완 - 수정 및 보완된 콘크리트 배합의 Mock-up 테스트를 진행하여 장기모니터링을 수행하였으며, 내동해성 콘크리트 포장에 대한 배합수정을 실시함 예정 - 고함량 서냉슬래그 적용 현장배합 도출하여 콘크리트 포장 시방서(안)에 반영	100%

4. 목표 미달 시 원인분석(해당사항 없음)

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 기술적인 기여

- 본 과제를 통한 연구결과는 이상기후 등 특수 환경에 노출되는 도로구조물에 적용함으로써 도로포장의 고성능화가 가능함
- 콘크리트 포장의 내구성 손상원인 평가기법 개발을 통하여 고내구성 콘크리트 포장의 설계기술 및 연구체계 확립에 기여
- 고내구성 콘크리트 포장 기술발전으로 인한 도로구조물의 수명향상에 기여
- 기계공학, 시멘트 화학, 공정 화학 등 건설공학과 접목하기 어려운 분야와의 융복합 학문 발전에 기여할 수 있음
- 본 연구는 신소재공학, 유기화학, 시멘트 화학 등 타 연구 분야와 새롭게 접목함으로써 콘크리트 공학 및 건설 산업에 새로운 학문적/기술적 패러다임으로 활용 가능함
- 고품질 포장 재료의 적용을 통하여 콘크리트 건설 산업의 경쟁력이 강화되며, 이를 바탕으로 건설 소재 분야의 획기적인 발전을 기대할 수 있음
- 본 연구를 통하여 개발된 건설소재 및 포장공법은 향후 국제표준 제정을 위한 데이터로 활용 가능
- 도로 포장체의 고내구성화에 따른 콘크리트 구조물의 장수명화 설계 기술의 향상 및 이를 내구성 기반 설계의 가이드 라인으로 활용

○ 경제적·산업적인 기여

- 도로 포장의 성능저하 원인 평가로 인하여 동일 환경에서의 환경하중에 의한 열화원인 조사 및 진단에 따른 비용 및 인력의 절감 효과
- 업데이트가 가능한 신뢰성 높은 열화 D/B 구축으로 건설관련 연구자 및 실무자를 위한 효율적인 콘크리트 내구성 프로그램 개발 촉진 효과
- 콘크리트 포장의 내구성 증진으로 인한 유지보수비용 절감 효과
- 복합열화 환경에 적용 가능한 고내구성 콘크리트 포장 개발로 인한 포장체의 생애주기비용 절감 효과
- 도로 구조물의 열화로 발생하는 반복적인 보수 재시공에 따른 국가예산 낭비 절감 효과
- 국내외적으로 기술발전이 더딘 친환경/저비용 포졸란 재료 기술개발 분야에서 독자적인 기술우위 선점 및 국가 기술 경쟁력 확보하는데 일조
- 고기능성 포장기술 개발은 경기침체에 따른 건설 산업 경기부양을 촉진하며, 건설 산업에 대한 긍정적인 이미지를 회복하는데 기여
- 건설신기술 연구를 위한 연구 환경 조성에 기여하며 유관산업 및 신산업 발전을 도모
- 기술향상 및 판로확대에 따른 참여기업의 매출증대 효과

○ 사회적인 기여

- 내구수명 향상을 위한 고품질 서냉슬래그 적용 콘크리트 포장 개발을 통하여 도로 구조물의 수명 연장이 가능하며, 도로 사용자의 만족도 증가 및 유지보수 비용 감소
- 연구개발을 통한 내구성 기반 도로 포장 설계 가이드라인이 제시됨에 따라 내구성 설계법의 수출이 가능하며 이로 인한 국가 이미지 제고 가능
- 국내 실정에 적합한 포장재료 생산, 관리, 시공 원천기술 개선됨으로 포장 건설 업체의 시공성 및 안정성 향상에 기여함
- 친환경 포졸란 재료 적용 도로 포장 기술을 통한 고품질 건설 소재 개발에 응용
- 신뢰도 높은 콘크리트 포장 기술 개발로 인한 콘크리트 생산업체, 시공업체, 설계업체 등 건설업체와의 기술 공조 및 전략적 컨소시엄 가능
- 노후화된 도로 시설물의 파손에 대한 근본적인 원인 규명에 따른 최적 배합설계를 통해 도로시설물의 재파손을 최소화 하고 장기 공용성을 증대하여 도로이용자 중심의 지속적인 안전한 도로 서비스를 제공할 수 있을 것으로 예상됨
- 내구수명 예측을 통하여 생애주기비용을 고려한 유지보수 공법의 적용이 가능해지며, 이를 적용함으로써 효율적인 유지보수 예산 운용이 가능할 것으로 예상됨

-
- 정부 지원 하에 효율적인 고성능/고내구성 고속도로 콘크리트 포장 유지보수 시스템 적용을 시시하면 교통사고 발생량 감소 및 경제 활성화 촉진을 통해 사회기반 시설 투자에 긍정적인 효과를 불러올 것이며, 이에 따라 국가 인프라 시설 유지보수 시스템이 해외시장 관련기술 산업분야에서도 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상됨
-

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

- 개발된 기술을 도로 포장 설계에 적극 반영함으로써 환경 대응형 콘크리트 포장 신기술의 발전 및 포장 재료에 대한 신산업 창출에 활용
 - 친환경 고내구성 콘크리트 포장 기술 개발로 인한 원천기술 선점 및 국가 기술 경쟁력 확보
 - 도로 포장 유지관리 지침 및 국가/국제 표준 개발에 활용 가능
 - 포장 관련 기업과 연계하여 Test Bed 추진 및 장기 모니터링을 통하여 본 연구 개발제품의 우수성 검증
 - 지자체, 한국도로공사 등 유관기관과 연계하여 참여기업의 국내외 네트워크 및 기술 홍보를 통한 사업화 및 기술 수출 추진
 - 품질관리 지침 작성 및 지적재산권 확보를 통한 적극적인 실용화를 유도하여 참여기업 주도의 빠른 사업화 추진
 - 고속도로 건설 및 지자체의 콘크리트 포장 시공 현장을 대상으로 지속적인 공법 소개 및 활발한 기술 교류를 통한 최종성과물의 빠른 사업화 추진
 - 콘크리트 포장의 목표 내구수명 30년을 확보한 내동해성 콘크리트 포장 개발을 통하여 콘크리트의 유지관리 비용 절감 및 포장도로분야 국가 경쟁력 향상
 - 콘크리트 포장 구성 재료 중 역학적 성능 20% 향상, 내동해성 20% 향상, 유지관리 비용 20% 절감 기술로써, 시멘트 사용량 감소 및 포졸란계 산업부산물 활용에 따른 CO₂ 배출량 저감이 가능하며, 자원 재활용 문제를 능동적으로 대처 가능함
 - 포졸란계 건설재료의 생산 및 고도화 기술 개발에 따른 생산기술의 확보를 통하여 콘크리트 포장 건설 재료 분야의 해외진출 및 기술 수출
-

< 별첨 >

별첨 자료
1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
2. 자체평가의견서
3. 연구비 사용실적보고서
4. 연구성과활용계획서

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘고함량 서냉슬래그를 적용한 내동해성 콘크리트 포장 개발 및 실용화 연구’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.