R&D / 09 기술혁신 E01

교통류 보존형 터널단면 확대 시공기술 개발

2012

국토해양부 한국건설교통기술평가원

건설기술혁신사업 제3차년도 최종보고서

R&D / 09기술혁신E01

교통류 보존형 터널단면 확대 시공기술 개발(3차년도)

2012 . 10. 25.

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
공동연구기관 / 대 우 건 설
대 원 토 질 (주)

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

국토해양부 장관 귀하

이 보고서를 “교통류 보존형 터널단면 확대 시공기술 개발”과제의 보고서로 제출합니다.

2012. 10. 25.

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원
주관연구책임자 : 김 동 규
연구원 : 이 규 필

공동연구기관명 : 대우건설
공동연구책임자 : 백 기 현
연구원 : 서 경 원
연구원 : 김 웅 구
연구원 : 진 병 무

공동연구기관명 : 대원토질(주)
공동연구책임자 : 이 재 덕
연구원 : 이 대 인
연구원 : 이 홍 성
연구원 : 백 선 기

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>09기술혁신
E01</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2011.06.26~
2012.10.25</td><td>단 계 구 분</td><td>3/3</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"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">교통류 보존형 터널단면 확대 시공기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">김 동 규</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 10 명
내부 : 9 명
외부 : 1 명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부 :
182,000천원
기업 :
195,000 천원
계 :
377,000 천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 32 명
내부: 29 명
외부: 3 명</td><td>총연구비</td><td>정부
:414,000
천원
기업 :
457,000 천원
계 :
871,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국건설기술연구원, 대우건설, 대원토질</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">대우건설, 대원토질</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="5">연구기관명 : 연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약</td><td>보고서면수</td><td>600</td></tr>
<tr><td colspan="6">본 연구는 도심시내 교통량 증대에 의한 교통정체를 완화하기 위한 차선증가시 기존 터널에서의 교통흐름이 확보된 터널 단면 확대 공정기술을 개발하는 것이고 궁극적으로는 시공기술개발이 최종 목표이다. 본 차년에서는 터널확대 기술 정립을 위하여 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석 기법 및 설계기법의 검증 및 완성, 터널단면 확대 실물 실대형 실험, 프로텍터 시작품 제작 및 검증, 협소 공간 시공 시뮬레이션, 협소공간 보강공법 검증 및 완성, 터널 단면 확대 설계 및 시공 지침(안) 작성을 정립하였다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">터널, 확폭, 프로텍터, 지보, 보강</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Tunnel, Enlargement, Protector, Support, Reinforcement</td></tr>
</table>

ii

요 약 문

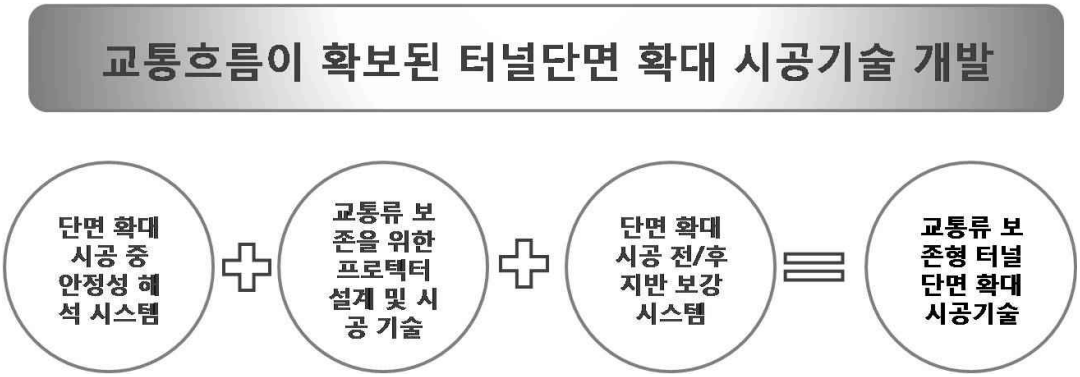
Ⅰ. 제목

교통류 보존형 터널단면 확대 시공기술 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 기존도로의 노선 증가 및 터널 노후화에 대한 대처 방법으로는 대부분 기존 터널의 양쪽으로 신규로 터널을 건설하거나, 우회로를 건설하고 있으나, 기존의 방법을 적용할 경우 새로운 터널을 추가해야 함에 따라 불필요한 용지매입과 근접한 기존 터널의 안전성 확보 등을 위해 추가적인 경제적인 부담이 발생한다. 또한 공용중인 도심지 터널을 확장하거나 보수하는 경우 차량의 진입을 통제해야 하는 부담을 함께 안고 있는 실정이다.

따라서 터널에서의 교통 정체 해소, 도로 구조의 노선변경, 물류차량의 대형화나 터널 노후화 등에 대응하기 위해서 교통류를 보존하는 가운데 터널의 단면 확대 시공이 요구되어지고 있다. 이를 위해서 **교통량 증대, 차량의 대형화 및 철도터널의 전철화 등에 대응하기 위한 기존 터널에서의 교통흐름이 확보된 터널 단면 확대 공정기술을 개발하는 것이고 궁극적으로는 시공기술개발에 본 연구의 목표이다.**



나. 연구개발의 중요성

국내에서도 본격적으로 터널 건설이 시작된 지 약 40여년이 넘었다. 그 동안 차량이 대형화되고 교통량도 증가되면서 터널 구간이 만성적인 정체현상을 빚게 되었고, 터널 라이닝이 노후화되어 안정성도 문제가 되고 있다. 이에 대한 문제점을 해결하기 위해 유럽이나 일본에서는 기존 터널에 대한 확대 공사를 수행하고 있다.

터널 확대 시공은 용지매입 비용의 절감 및 자연환경 파괴를 최소화 할 수 있다는 장점이 있지만, 순 공사비가 신설 터널에 비해 많이 들고, 좁은 공간에서 소형 장비를 이용해 공사를 하기 때문에 효율이 떨어져 공기가 늘어나게 되는 등의 문제점이 있다.

국내에서는 신설터널에 대한 설계 및 시공기술에 대한 발전을 도모하였고 기존 터널에 대한 확폭 설계 및 시공기술은 매우 미미한 상태이다. 교통의 흐름을 확보하면서 기존 터널을 확폭하는 설계 및 시공기술은 신설터널의 설계와 시공기술과 상당히 다른 점들을 가지고 있다. 교통의 흐름을 확보하면서 기존 터널을 확폭하는 설계 및 시공기술은 교통흐름 보호를 위하여 프로텍터를 사용하므로 작업공간이 협소하다.

설계기술에서는 기존 라이닝과 지보재의 제거시 기존 굴착된 지반의 안정성에 대한 해석 및 설계기술이 필수적이다. 또한 확폭시공시 기존의 거대한 장비를 사용할 수 없고 협소공간에 작업효율과 이동성을 고려하여 소형이면서 다목적으로 사용할 수 있는 시공장비가 필수적이다. 지보재의 설치 시, 록볼트이 경

우 한 번에 시공하기에는 거의 불가능하며 강지보재인 경우도 지금과 같은 시스템으로는 시공이 불가능하다. 터널은 변위 계측을 동반하여 시공을 수행하는데 프로텍터가 존재할 경우 지금의 계측기술로는 내공변위 및 천단변위를 계측하는 것은 불가능하다.

그러나 공사비가 비싸고 공사가 어려운 조건 아래에서도 일본에서 40여 차례나 시공이 되었을 만큼 공용 중인 터널의 확대 공사를 진행할 수밖에 없는 터널 현장이 나타났다. 국내에서도 터널이 점차 노후화되고 교통량의 증대로 터널 구간의 정체현상이 가속화됨에 따라 터널 확대 공법에 대해 검토 할 필요성이 있으며, 향후 그 시장은 확대될 것으로 판단된다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 교통량 증대, 차량의 대형화 및 철도터널의 전철화 등에 대응하기 위한 기존 터널에서의 교통흐름이 확보된 터널 단면 확대 기술을 개발하는 것으로써 최종목표는 **'교통흐름을 확보한 터널 단면 확대 공정 기술 개발'**임. 본 연구를 통하여 개발될 공법은 주로 도심지내에서 포화된 교통량을 해결하기 위하여 도로 확장시 신설터널의 건설이 어려운 구간에 주 목표로 하고 있음.

■ 터널 확대 안정성 분석 및 설계 기술 개발
■ 교통흐름 유지 터널 확대 시공 기술 개발
■ 교통흐름 유지 터널 확대 보강 기술 개발

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪ 터널 확대 안정성 분석 및 설계 기술 개발(I)	▪ 실제 시공사례를 통한 터널 단면 확대시 지반안정성 분석 ▪ 터널 단면 확대형식 및 규모에 따른 지반 안정성 해석(I) ▪ 터널 지보재 및 라이닝의 역학적 특성 조사
	▪ 교통흐름 유지 터널 확대 시공 기술 개발(I)	▪ 국내외 터널 단면 확대 시공기술 적용 현황 조사 및 분석 ▪ 국외 프로텍터 설계 및 제작기술 분석 ▪ 터널 단면 확대 시공 프로세서 정립 ▪ 협소공간 및 프로텍터를 고려한 시공장비 분석 및 개념 정립
	▪ 교통흐름 유지 터널 확대 보강 기술 개발(I)	▪ 터널 단면 확대시 보강공법 조사 및 분석 ▪ 터널 단면 확대 보강 프로세서 정립

2차년도	▪터널 확대 안정성 분석 및 설계 기술 개발(II)	▪터널 단면 확대형식 및 규모에 따른 지반 안정성 해석(II) ▪프로텍터 시작품 제작 및 실대형 실험에 의한 검증 및 보완 ▪터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석기법 및 설계기법 제시
	▪교통흐름 유지 터널 확대 시공 기술 개발(II)	▪터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 프로텍터 충격하중 및 안정성 해석 ▪발파시 교통제어를 위한 교통량 평가 기법 제시 ▪프로텍터 설계제작 기술 ▪터널 단면 확대 시공법 Prototype 제시 및 시뮬레이션 검증
	▪ 교통흐름 유지 터널 확대 보강 기술 개발(II)	▪경사 록볼트 시스템에 대한 안정성 분석 ▪협소 공간 보강공법 시뮬레이션(Ⅰ)
3차년도	▪교통흐름을 확보한 터널 단면 확대공법 개발	▪터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석 기법 및 설계기법의 검증 및 완성 ▪터널단면 확대 실물 실대형 실험(Ⅱ) ▪프로텍터 시작품 제작 및 검증 ▪협소 공간 시공 시뮬레이션 ▪협소공간 보강공법 검증 및 완성 ▪터널 단면 확대 설계 및 시공 지침(안) 작성

Ⅳ. 연구개발결과

연 차	연구 내용	연구 결과
1차년도	실제 시공사례를 통한 터널 단면 확대 시 지반안정성 분석	- 확대 터널의 강지보, 숏크리트에 발생하는 응력은 토피고가 비교적 작은 갱구부 등에서는 높은 경우가 있지만, 일정심도 이상인 경우는 비교적 적음
	터널 단면 확대형식 및 규모에 따른 지반안정성 해석(Ⅰ)	- 확대형식(수치해석):양측확대보다는 편측확대에서 변위가 크게 산정되는 경향을 보이이므로 양측확대가 편측확대에 비해 변위측면에서 다소 유리함 - 확대규모(수치해석): 기존터널과 확대터널의 천단침하가 수렴하는 영역은 기존터널의 단면크기 및 확대터널의 차로와 큰 관계를 보이지 않고 막장으로부터 전방 0~10m에서 급격히 변한 후 10~20m에서는 완만히 변하다가 20m이후에서는 모두 일정한 값으로 수렴 - 기존터널 지보재의 거동 분석(수치해석): 기존터널의 록볼트 축력과 콘크리트 라이닝의 압축응력은 기존터널의 약 2D 후방에 신규터널이 근접하면 변화되기 시작함
	터널 지보재 및 라이닝의 역학적 특성 조사	- 7개의 철도폐터널과 3개의 지하철 및 철도 터널에서 콘크리트 라이닝 압축강도 측정 - 건설된 지 10년이 지난 1개의 시험터널(숏크리트, 록볼트, 및 강지보재 사용)에서 숏크리트 압축강도 및 록볼트의 인발실험 수행 - 채취된 시편을 대상으로 수질분석 및 열화현상 조사를 위한 기기분석 수행
	국내외 터널 단면 확대 시공기술 적용 현황 조사 및 분석	- 국내의 경우 현재까지는 교통흐름을 완전히 차단하거나, 우회시키고 터널을 확대하고 있음 - 국외의 경우 차량의 안전 확보를 위해 프로텍터를 이용한 공사가 23건으로 가장 많고, 다음으로 기존터널의 라이닝을 프로텍터로서 이용한 사례가 5건이 있음 - 국내 특허의 경우 터널 확대 시공 장비 및 장치관련이 2건, 터널 확대 시공법과 관련된 것이 2건이 있음

		- 국외 특허의 경우 터널 확대 시공 장비 및 장치관련이 8건, 터널 확대 시공법과 관련된 것이 13건이 있음 - 터널확대 설계·시공 핵심기술 도출을 위하여 터널 확대 시공의 계획 선정방법, 협소공간에서의 굴착, 협소공간에서의 보강공법, 프로텍터 설계, 프로텍터의 현장조립 및 해체 등에 대한 요소기술이 필요함
	국외 프로텍터 설계 및 제작기술 분석	- 터널 곡선부에 대응할 수 있는 프로텍터 설계 필요 - 프로텍터 설계하중으로는 장비, 버력의 적재에 의한 하중과 낙반의 충돌하중, 기타 구조물의 설치의한 하중이 있음 - 특히, 발파 시 혹은 기계굴착 시 낙반의 충돌하중이 프로텍터 구조물에 어떠한 영향을 미치는지 사전에 충분히 검토되어야 함
	터널 단면 확대 시공 프로세서 정립	- 기존 재래식 터널과 NATM 터널에서 교통류 흐름 유지를 하면서 확대시공 기술 정립 - 프로텍터의 크기 및 터널과 프로텍터사이의 최소 한계 정의
	협소공간 및 프로텍터를 고려한 시공장비 분석 및 개념 정립	- 터널 시공장비 조사 및 기존터널의 건축한계를 고려할 경우 1차선 확폭의 경우 최대 6m 정도의 장비운영공간이 확보될 것으로 예측됨. - 양측확대의 경우에는 최대 장비운용공간이 4m 내외일 것으로 예상됨. - 편측확대의 경우에는 기존 라이닝 철거 등에 많은 시공상 문제점이 발생할 것으로 예상됨.
	터널 단면 확대시 보강공법 조사 및 분석	- 터널 시공장비 조사 및 기존터널의 건축한계를 고려할 경우 1차선 확폭의 경우 최대 6m 정도의 장비운영공간이 확보될 것으로 예측됨. - 양측확대의 경우에는 최대 장비운용공간이 4m 내외일 것으로 예상됨. - 편측확대의 경우에는 기존 라이닝 철거 등에 많은 시공상 문제점이 발생할 것으로 예상됨. - 협소공간에서의 국외 지반보강 사례: 록볼트는 확대터널에서도 주지보재로서의 역할이 크며, 시공은 좁은 공간에서 작업이 이루어지므로 경사볼트를

		채용하고 있는 곳도 있으며 길이가 짧은 것을 연결하여 시공하는 경우도 있음 - 작업공간 협소로 인해 경사록볼트 설치 시 보강효과 분석(수치해석): 록볼트의 설치각도에 따른 축력의 변화를 살펴보면 수직설치(90°)되었을 경우 가장 큰 축력을 보이며 75°를 변곡점으로 75°까지는 완만히 변하다가 75°이하에서는 급하게 변화하는 경향을 나타냄
	터널 단면 확대 보강 프로세서 정립	- 터널 굴착 및 보조공법에 대한 시공성을 분석한 결과 양측확대가 적절한 것으로 분석됨. - 양측확대를 적용할 경우 록볼트 공법은 경사 록볼트로 시공되어야 할 것으로 분석됨. - 기존 터널보조공법은 교통류를 보존할 경우에도 시공성은 확보되는 것으로 분석됨.
2차년도	터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 지반 안정성 해석(Ⅱ)	- 최대 천단침하에 대한 각 지점별 천단침하의 비는 지반의 물성과 관계없이 거의 유사한 것으로 나타남. 즉 터널의 굴착에 따라 해방된 응력이 터널 종방향으로 재분배될 때 지반의 물성과 관계없이 길이방향으로 일정한 비율로 분배됨을 의미 - 확대터널의 경우 기존터널이 건설되어 있어 해방된 응력을 지지할 수 있는 지반의 신규터널에 비해 작기 때문에 기존에 제안된 종단변형곡선식은 터널확대 시의 종단변형특성을 합리적으로 반영하지 못할 것으로 판단 - 수치해석결과를 토대로 터널 확대 시 적합한 종단변형곡선식을 제안하였으며 검증결과 기존에 제안된 Carranza and Fairhust(2000)와 이두화(2002)등의 제안식보다 잘 일치하는 것으로 나타남. 따라서 제안한 종단변형곡선식이 터널 확대 시 지반의 변형특성을 잘 예측할 수 있을 것으로 판단됨
	프로텍터 시작품 제작 및 실대형 실험에 의한 검증 및 보완	- 프로텍터 1세그먼트의 길이가 2m이므로 2m의 실험체를 제작하였으며 길이방향의 구속효과가 있으므로 이를 고려하기 위하여 길이방향 양끝에 프로텍터 주부재와 동일한 규격의 H-beam 을 추가로 제작 - 실험체 설치과정은 설치위치 스케치 -> 하부앵커리지를 위한 천공 -> 설치지점별 레벨측정 -> 프

		로텍터 반입 -> 프로텍터 정위치 설치 및 간이조립 -> 프로텍터 완전조립 순으로 진행됨 - 길이 2m의 실험체를 설치 및 해체 시 소요되는 시간을 분석한 결과 설치하는데 소요되는 시간은 약 9~10시간이며 해체하는데 소요되는 시간은 약 4시간인 것으로 나타남. 하지만 실제로는 여러 개의 프로텍터 세그먼트를 조립해야되므로 각각의 공정시간은 보다 단축될 것으로 판단됨 - 실험 시 설치된 계측기로는 가속도계, 변위계, 변형률계, 하중계 및 초고속카메라 임 - 실험은 프로텍터 상부에 탄성매트 설치 및 미설치 시 즉, 낙석이 프로텍터에 직접 충돌의 두 가지 경우에 대해 수행 - 충격실험 결과 낙하고 6m에서도 탄성매트가 설치되어 있는 경우에는 계측기에 데이터가 거의 측정되지 않아 탄성매트가 충격하중을 거의 흡수하는 것으로 판단됨. 따라서 발파 충격하중의 저감재로서 탄성매트가 매우 유용할 것으로 보이며 강재에 비해 비용이 적게 들기 때문에 경제성면에서도 우수할 것으로 판단됨. 하지만 낙석이 프로텍터에 직접 충돌할 경우에는 프로텍터 상부 낙하지점에 3mm 내외의 소성변위가 발생되었으며 각 계측 데이터도 큰 변화가 발생되었음. 따라서 충격저감재가 없을 경우 프로텍터에 상당한 충격하중이 발생되는 것으로 판단됨
	터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석기법 및 설계기법 제시	- 기존 2차로 단면에서 3차로, 4차로로 확폭하는 경우 및 기존 3차로 터널에서 4차로 터널로 확폭하는 경우 • 측벽부 록볼트 설치 유무에 따른 터널내 변위 및 숏크리트 발생응력에 대한 검토결과 록볼트를 설치하지않은 경우 변위는 미소(내공변위:1~2mm)하게 증가하는 것으로 나타나며, 숏크리트 휨압축응력은 1.3MPa 증가하는 것으로 나타남 - 측벽부 록볼트 시공유무에 따른 터널내 천단부 변위 및 숏크리트 발생응력의 변화량은 크지 않은 것으로 나타났으며, 측벽부 하부에서만 변위 및 숏크리트 응력이 다소 증가하는 것으로 나타남

		- 록볼트 미설치구간에서 숏크리트 두께를 증가 시키는 경우에 대한 검토결과 숏크리트 두께를 약 20~25%정도 증가 시킬 경우 숏크리트 발생응력이 록볼트 보강시와 유사한 응력응력 수준을 나타냄 - 록볼트 보강 및 숏크리트 추가보강에 대한 개략공사비 검토결과 숏크리트 추가보강에 의한 방법이 다소 공사비가 작게 산출됨. - 숏크리트의 보강효과는 굴착 후 조기에 타설하여 터널의 내압을 증가시켜 터널의 안정성을 확보하지만, 록볼트의 경우 터널의 내압 증가 뿐만 아니라 봉합효과를 통한 주변지반을 보강함 - 록볼트와 숏크리트는 터널의 주지보재로 분류 되지만 보강목적 및 보강효과가 상이하므로 이에 대한 검토도 추가로 진행되어야 할 것으로 판단됨 - 본 검토에서는 지반조건 및 토피고를 가정하여 적용하였으므로, 실제 시공시 현장 조건을 반영한 상세검토를 수행하여야 할 것으로 판단됨
	터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 프로텍터 충격하중 및 안정성 해석	- 교통흐름을 유지한 채 터널을 확대시공하기 위해서는 차량보호용 프로텍터가 필요하며 프로텍터의 안정성을 확보하기 위해서는 발파 시 파쇄암의 입도를 설계입도로 제어해야할 것으로 판단됨 - 발파 파쇄암의 최대입도는 암반의 상태와 큰 상관성을 가짐. 절리의 수가 많고 간격이 좁은 등급이 낮은 암반일수록 파쇄암의 최대입도는 작아지는 것으로 나타남 - 천공밀도가 클수록 최대입도가 작아지는데 등급별 경향은 다르게 나타나 등급별 관계를 정립시킬 필요가 있을 것으로 판단됨 - 천공밀도와 천공장을 조절함으로서 파쇄암의 최대입도를 제어할 수 있을 것으로 판단됨 - 버력이 완전탄성 거동을 할 경우 충격하중은 약 0.002sec 이내에 최대점에 도달하며 충돌부터 최대점에 도달하는 시간과 최대점 도달이후 반발되는 시간이 동일한 대칭형 형태를 보이고 있음. 하지만 탄소성 거동을 하는 경우에는 최대점 도달시간은 유사하나 최대점 이후 접촉시간이 매우 길어 비대

		칭형태를 보임. 이는 완전탄성의 경우에는 충돌이 후 버력의 운동에너지를 모두 회복하는데 비해 탄소성의 경우에는 소성변형에 의해 운동에너지가 모두 소산되기 때문으로 판단됨 - 최대충격하중은 완전탄성 거동 시 버력 크기, 탄성계수 및 낙하높이가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으나 탄소성의 경우에는 탄성계수에는 큰 영향이 없고 버력의 크기와 낙하높이에 영향을 받는 것으로 나타남. 이는 버력이 탄소성일 경우 충돌과 동시에 탄성한계를 넘어 소성상태가 되기 때문으로 판단됨 - 재료거동에 따른 수치해석결과를 비교한 결과 버력이 완전탄성거동을 할 경우에 비해 탄소성거동을 할 경우 충격하중은 7~12%의 수준인 것으로 나타남. 즉, 탄소성에 비해 완전탄성으로 가정할 경우 약 10배의 충격하중이 가해지는 것으로 이는 교통 유지형 터널확대공법의 경제성을 좌우할 수 있는 차이로 판단됨. 따라서 실대형 실험을 통해 버력과 프로텍터가 충돌 시 실제 버력의 재료거동을 명확히 파악해야 될 것으로 판단됨 - 수치해석결과와 이론해의 결과를 비교한 결과 버력이 완전탄성 거동을 할 경우 직선선형관계를 나타내며 회귀식의 기울기는 0.925로 거의 1:1의 관계를 나타내며 R^2=0.99로 매우 잘 일치하는 것으로 나타남. 따라서 제안된 이론해는 버력이 완전탄성거동을 할 경우 충격하중을 잘 예측할 수 있을 것으로 판단됨 - 충격저감장치를 구성하는 충격저감재로는 폐타이어로 제작한 탄성매트를 고려함. 탄성매트는 사용 후 다시 재생이 가능하므로 폐기물 발생을 최소화시킬 수 있음. 폐기물을 재활용하고 강재사용량을 줄임으로서 공사 중 탄소배출량 절감에 기여할 수 있음. 탄성매트는 폐타이어를 분쇄한 것을 접착제로 접착시킨 것으로서 고무와 유사한 거동을 보이며 Hyper-elastic 특성을 가짐 - 충격저감재의 설치두께를 산정하기 위하여

		Explicit FEA 프로그램(Abaqus)을 이용하여 동해석을 실시함. 최악의 조건을 고려하기 위하여 버력의 탄성계수는 100GPa, 크기는 직경 50cm, 완전탄성체로 모델링하였으며 발파 시 버력의 초속을 정상발파에서의 최대속도인 30m/sec로 적용. 탄성매트는 Hyper-elastic 특성을 정의하기 위해 Ogden 모델을 적용함. 해석결과 탄성매트를 56cm 두께로 설치하면 버력의 충돌이 프로텍터에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타남
	발파시 교통제어를 위한 교통량 평가기법 제시	- 해외 터널 확대 발파 사례는 Shikishimanai터널 1건으로 터널 확대 발파 시 교통정체를 최소화하기 위해 교통량이 가장 적은 심야(22:00~05:00)에 발파함. 발파부터 환기까지 평균 20분 정도 소요되었으며 이 시간동안은 교통을 완전히 차단함. 터널갱구 전방 48m 위치에 정지선을 마련하였으며 40m 위치에 감응식 신호기를 설치하여 불의의 사고에 대비함. 따라서 발파 시 교통량이 최소화되는 시간대에 작업을 해야 하며 적절한 교통규제대책을 마련하여야 할 것으로 판단됨 - 서울시 주요 터널의 월별 교통량을 분석한 결과 대체적으로 3월이 최대이며 3월을 기점으로 8월까지 감소하다가 다시 증가하는 추세를 보이며 같은 도심지라도 지점별 특성이 다를 수 있음. 따라서 계획단계부터 대상 터널의 실제 교통량을 조사·분석하여 공사착수 시점에 대한 검토가 필요할 것으로 판단됨 - 시간대별 교통량 특성을 보면 각 터널 모두 유사한 경향을 보이는 데 5시에 교통량이 최소가 되며 9시까지 급격히 증가하다가 13시까지 감소하고 13시부터 19시까지 큰 변화가 없다가 다시 5시까지 감소하는 것으로 나타남. 따라서 교통을 완전히 차단하고 발파하는 경우 야간시간대를 이용하는 것이 합리적일 것으로 판단되며 특히 3시~6시 사이가 가장 효과적일 것으로 판단됨. 만약 하루에 2발파 이상을 하고자 할 경우에는 운전자의 마음이 급해지는 출근시간대를 피하고 오후 교통량이 급

		격히 떨어지는 17시부터 다음날 6시까지 작업계획을 수립하는 것이 교통 차단에 의한 위험과 불편을 최소화하는 방법일 것으로 판단됨
	프로텍터 설계제작 기술	- 운영 중 터널확대 시에는 프로텍터 내부에 차량이 운행되므로 차량충돌에 의한 충돌하중이 작용할 수 있다. NCHRP Report 86(1970)에는 차량 충돌하중 산정 시 자주 인용되는 다음 식과 같은 Olson 모델이 제시되어 있다. $$\max F_{lat} = \frac{\pi}{2}\left(\frac{V_I^2 \sin^2\theta}{2g[A\sin\theta - 0.5B(1-\cos\theta)+D]}\right)W$$ - 프로텍터의 충격하중을 분석한 결과 발파 시 최악의 경우 프로텍터에 2873tonf의 집중하중이 발생될 수 있는 것으로 나타남. 본 하중에 대해 국내에서 생산되는 강재의 규격별 구조해석결과 어떠한 강재에서도 최대발생응력이 허용응력인 1400kgf/cm2을 초과하는 것으로 나타나 강재 자체로는 안정성을 확보할 수 없을 것으로 판단됨. 따라서 충격저감재를 설치하여야만 할 것으로 판단되며 충격저감재는 강재에 비해 비용이 적게 들므로 충격저감재를 두껍게 설치하면 강재를 크게 절감시킬 수 있어 공사의 경제성을 증가시킬 수 있을 것으로 판단됨. 하지만 충격저감재를 설치할 경우 작업공간이 더욱 협소해지는 문제가 발생되어 설치 두께에 제한이 있음. 이러한 문제점을 해결하기 위해 이동식 충격저감장치를 제안함. 또한 저감장치의 단면형상을 원형으로 하여 발파 후 프로텍터 상부에 버력이 쌓이지 않게 함으로서 버력처리장비를 프로텍터에 탑재하지 않아도 되게 함으로서 장비하중의 저감 및 공간활용을 극대화하였음. 추가적으로 발파 시 버력이 프로텍터 측면에 충돌할 수 있으므로 프로텍터 내부에 수평지지대를 휜 지형태로 설치하여 차량운행시에는 접어두고 발파 시에 이를 체결하여 수평력에 지지할 수 있도록 고안함 - 기존의 프로텍터는 그 폭이 터널의 단면, 즉 폭과 대응되는 길이를 갖도록 형성되기 때문에 1차로에

		적용되었던 프로텍터를 2차로에 적용시키지 못하고, 2차로에 적용되었던 프로텍터를 1차로에 적용하지 못하며, 이로 인해 프로텍터를 재활용하지 못하는 문제점이 있음. 이 경우 새로운 강재를 계속 사용하여야 되므로 공사 비용이 증가하는 요인이 될 수 있을 것으로 판단됨. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 어떠한 터널단면에도 적용시킬 수 있도록 내공단면 가변형 프로텍터를 제안하였으며 본 기술을 적용할 경우 강재의 활용도가 증대되고 공사비용을 절감시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 길이를 조절할 수 있게 하여 보관 시 공간활용을 극대화하였음
	터널 단면 확대 시공법 prototype 제시 및 시뮬레이션 검증	- 2차선 도로터널을 3차선 도로터널로 확장하는 경우에 대하여 장비운용 시뮬레이션을 실시함. - 시뮬레이션은 국내 터널 시공에 주로 사용되고 있는 장비(5종)을 묘사하였으며, 2차선 도로터널의 건축한계를 프로텍터 한계로 설정함. - 내부 작업공간의 문제로 굴삭기는 0.6㎥ 규격은 운영상 제약이 많은 것으로 분석됨. - 터널 공사를 위한 주요장비는 장비 운영상 문제가 없는 것으로 분석됨.
	협소 공간 보강 기술 제시 및 시공성 시뮬레이션(Ⅰ)	- 2차선 도로터널을 3차선 도로터널로 확장하는 경우에 대하여 장비운용 시뮬레이션을 실시함. - 시뮬레이션은 국내 터널 시공에 주로 사용되고 있는 장비(5종)을 묘사하였으며, 2차선 도로터널의 건축한계를 프로텍터 한계로 설정함. - 내부 작업공간의 문제로 굴삭기는 0.6㎥ 규격은 운영상 제약이 많은 것으로 분석됨. - 터널 보강공사를 위한 주요장비는 장비 운영상 문제가 없는 것으로 분석됨.
	경사 록볼트 시스템에 대한 안정성 분석	- 경사를 가지고 설치되는 록볼트의 성능을 평가하기 위한 모형시험을 계획함. - 모형시험은 록볼트의 지지아치 형성능력을 평가하는 것으로 계획하였으며, 설치각도 및 토피고를 변수로 설정하였으며, 대상 지반은 표준사를 이용함. - 시험결과 각 시험 Case에서 록볼트 설치각도가

		60°인 경우 처짐량이 가장 적게 발생하는 것으로 나타남.
3차년도	터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석 기법 및 설계기법의 검증 및 완성	- 기존에 제안한 터널확대 시 지반변형곡선의 적용성 검증 - 실제 터널확대 시 수행한 해외 계측사례분석 및 기존 제안식과 비교분석 - 비교분석결과 기존 제안식의 적용성 확인 - 제안된 예측식에서 총변위의 5%가 발생될 때까지는 라이닝에서 응력을 분담하여 그 이상 발생될 경우 지반변위가 발생. 이를 기존터널 제안식에 적용하여 다음과 같이 터널확대 시 기존터널 보호범위 산정식 제안 $x = 4.336\sqrt{R_{enlage}^2 - R_{old}^2}$
	터널단면 확대 실물 실대형 실험 (Ⅱ)	- 발파버력 충돌 시 프로텍터의 거동특성을 분석하기 위해 실대형 낙석 낙하실험을 수행 - 낙석은 포천화강암을 사용하여 직경 50cm로 제작 - 구조물에 전달하는 하중, 변형률, 잔류변위 등을 분석하기 위해 변형률계 26개, 변위계 13개, 가속도계 2개를 설치 - 낙하 시 낙석의 속도와 구조물의 동적변위를 측정하기 위해 녹화속도 1000fps의 초고속 카메라 설치 - 계측결과 충돌하중 저감을 위해 경제적인 탄성매트 적용 시 충돌에너지의 대부분을 흡수할 수 있음을 확인
	프로텍터 시작품 제작 및 검증	- 1차로 터널에 대응하는 내공단면 폭 3m, 높이 4m의 프로텍터 시작품 제작 및 도면 확보 - 길이 2m의 실험체 설치 및 해체 시 소요되는 시간을 분석한 결과 설치 시 소요되는 시간은 약 9~10시간이며 해체하는데 소요되는 시간은 약 4시간 정도임 - 실제 현장적용 시에는 부지정리 및 크레인 설치시간이 최초 프로텍터 설치에만 투입되므로 시공시간은 단축될 것으로 판단됨 - 실대형실험결과 충격하중이 정하중과 다르게 지속적으로 프로텍터에 작용하는 것이 아니라 매우 짧은 시간에 발생하고 소산되므로 그 영향범위는 타격위치에 국한되는 것으로 나타나 프로텍터의 전체

		거동에는 큰 영향이 없을 것으로 판단됨
	협소 공간 시공 시뮬레이션	- 도심지내 기존 2차로 도로터널을 3차로 및 4차로 도로터널로 확대하는 경우와 기존 3차로 도로터널을 4차로 도로터널로 확대하는 경우에 대한 경제성 분석을 수행함 - 기존 2차로 도로터널->3차로 도로터널 확대, 기존 2차로 도로터널->4차로 도로터널 및 기존 3차로 도로터널->4차로 도로터널 확대에 대한 3가지 경우에 대하여 확대터널내 교통흐름을 완전히 차단한 경우와 프로텍터를 사용하여 어느정도 터널내 교통흐름을 허용하는 경우인 총 6가지 경우에 대하여 터널건설을 위한 직접공사비와 터널내 교통흐름의 유무에 따른 터널주변 도심지 교통흐름변화에 따른 사회간접손실비용을 비교분석함 - 터널확대를 위한 직접 시공비는 프로텍터를 사용하는 경우가 1.5배정도 크게 분석되었으나 교통정체에 의한 사회적 간접손실비용은 프로텍터를 사용하는 경우가 프로텍터를 사용하지 않는 경우에 비해 50%이상 절약하는 효과가 있음 - 이동식 프로텍터를 사용하여 완전교통차단을 하지 않고, 터널을 확장하는 공법을 적용하는 경우가 사회적 간접비까지 고려하였을 때, 이동식 프로텍터를 적용하지 않는 경우에 비해 그 비용 절감 효과가 약 2배가량 발생하는 것으로 예상됨
	협소공간 보강공법 검증 및 완성	- 경사를 가지고 설치되는 록볼트의 성능을 평가하기 위한 2차 모형시험을 실시함. - 록볼트의 설치각도 및 정착길이를 변화하면 총 111회의 모형시험을 실시함. - 모형볼트의 설치각도를 90°, 75°, 60°, 45°로 변화하며 실시한 모형시험 결과는 설치각도 75°~60° 사이의 변화경향이 90°~75° 및 60°~45° 사이의 변화경향보다 크게 나타났으며, 최적의 보강효과를 얻기 위한 설치각도는 90°~75° 범위인 것으로 판단된다. 그러나 현장의 여건에 따라 볼트의 길이 및 설치간격을 변경하는 경우에는 최저 설치각도는 60°까지 적용할 수 있을 것으로 판단됨.

		- 각각의 모형볼트의 설치각도에서 모형볼트 1개가 부담하는 면적 변화에 대한 이완하중 발생률은 부담면적이 감소에 따른 이완하중 발생률이 감소효과가 뚜렷하게 나타났으며, 상관관계는 다음과 같음. $A_{decrement}(\%) = 73.111 - 0.812 \times A$ 여기서, $A_{decrement}$: 볼트 부담면적 감소율(%) A : 볼트의 설치각도(°) - 모형볼트 정착 길이 변화에 따른 이완하중 발생률은 정착 길이가 증가 할수록 이완하중 발생률이 감소하는 경향을 뚜렷하게 나타내고 있으며, 상관관계는 다음과 같다. $B_{\in crement}(\%) = 100.245 - 1.114 \times A$ 여기서, $B_{increment}$: 볼트의 정착 길이 증가량(%) - 단순보의 처짐량 산정식에 의하여 모형볼트 보강된 지반의 변형계수를 산정할 수 있다. 각 모형시험에 대한 변형계수를 산정한 결과, 모형볼트 1개가 부담하는 면적 변화에 따라른 변형계수 증가율은 선형적인 관계를 나타내는 것으로 나타났남. - 터널 지보재 설치효과를 주변 지반의 공학적 특성 증가로 고려하는 하는 수치해석 기법에 의한 각 지보패턴에 대한 2차원 수치해석을 실시하였다. 록볼트와 숏크리트의 지보효과에 대응하는 주변지반 변형계수를 산정하여 모형시험에 나타난 록볼트의 설치각도 및 부담면적 감소율 변화에 대한 천단침하량 발생 경향을 분석결과 수치해석과 모형시험의 침하 증가량 발생경향이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나 경사로 설치되는 시스템 록볼트에 대한 예비해석 단계에서 충분히 사용 가능한 것으로 판단됨.
	터널 단면 확대 설계 및 시공 지침(안) 작성	- 도심지내에서 프로텍터를 활용하여 터널내 교통흐름을 어느정도 허용하면서 기존 터널 단면을 확대 시공하는데 참고가 될 수 있는 교통류 보존형 도로터널 단면확대 설계 및 시공 지침 및 매뉴얼을 작성함

		- 총 5개장, 제1장 총칙, 제2장 계획, 제3장 조사, 제4장 설계, 제5장 시공, 으로 구성되어 있음. - 국내에서 아직 정의가 되지 않은 기존 터널 단면 확대 설계 및 시공에 대한 용어정의를 수록하였으며 확대단면 및 확대공법 선정과 프로텍터선정 및 운영에 대한 내용에 중점을 두어 작성하였음

V. 연구개발결과의 활용계획

- 현재 국내의 노후터널 확폭은 차량운행을 전면 중지시키고 신축하거나 기존 노선의 인근에 새로운 터널을 신설하는 방향으로 진행되고 있다. 그러나 본 연구를 통해 기존 노후터널의 차량 운행을 유지하면서 확대하는 기술 개발을 통해 사회적 비용을 크게 줄일 수 있으며 전국의 노후화된 터널의 확대 및 확장하는 경우에 적용할 수 있을 것으로 판단됨.
- 본 연구에서 개발되는 기술에 대한 지속적인 홍보로 도심지내 교통량 증가에 의한 교통정체가 심한 도로터널을 중심으로 적용할 예정임
- 본 연구에서 개발되는 좁은 공간에서의 지반보강 기술은 터널단면 확대시 뿐만 아니라 소형 공동구, 수직구, 분할 굴착시의 보강기술로 활용될 수 있을 것으로 기대됨.
- 기존 터널의 단면확대 공법은 노후터널의 개축뿐만 아니라 터널내에서의 분기 확폭, 노후터널의 보강공법으로서도 활용될 수 있을 것으로 기대됨

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 1

제 1 절 연구개발의 목적 ····· 1

제 2 절 연구개발의 필요성 ····· 2

제 3 절 연구목표 및 내용 ····· 4

1. 연구개발 최종목표 ····· 4
2. 연구개발 내용 및 범위 ····· 4

제 2 장 국내·외 기술개발 현황 ····· 8

제 3 장 3차년도 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 23

제 1 절 터널 확대 안정성 분석 및 설계 기술 개발 ····· 23

1. 실제 시공사례를 통한 터널 단면 확대시 지반안정성 ····· 23
2. 터널 단면 확대형식 및 규모에 따른 지반 안정성 ····· 42
3. 터널 지보재 및 라이닝의 역학적 특성 ····· 53
4. 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석기법 및 설계기법 제시 58
5. 운영 중 터널확대 시 지반종단변형특성 ····· 81

제 2 절 교통흐름 유지 터널 확대 시공 기술 개발 ····· 107

1. 협소공간 및 프로텍터를 고려한 시공장비 분석 ····· 107
2. 터널 단면 확대 시공 프로세서 ····· 123
3. 프로텍터 설계 및 제작기술 ····· 128
4. 프로텍터 시작품 제작 및 실대형 실험 ····· 136
5. 프로텍터 충격하중 및 안정성 해석 ····· 173
6. 발파 시 교통제어를 위한 교통량 평가기법 제시 ····· 191

7. 협소공간 시공 및 경제성 분석 ····· 201
제 3 절 교통흐름을 유지 터널 확대 보강기술 개발 ····· 279
1. 터널 단면 확대시 보강공법 조사 및 분석 ····· 279
2. 터널 단면 확대 보강 프로세서 ····· 295
3. 터널 천단보강법의 보강효과 검증을 위한 수치해석 ····· 296
4. 경사 록볼트 보강효과 확인을 위한 모형시험 ····· 309
5. 모형시험 결과 검증을 위한 2차원 수치해석 ····· 346

제4장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 363

제5장 연구개발결과의 활용계획 ····· 366

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 368

제 7 장 참고문헌 ····· 369

부 록 - 1. 교통류 보존형 도심지 도로터널단면 확대 설계/시공 지침 및 매뉴얼

부 록 - 2. 연구과제 설명자료

부 록 - 3. 연구 성과집

표 목 차

표 2.3 확폭공법별 굴착방식과 시공기계의 사용 예 ····· 16

표 3.1 확대터널 발파시 진동 계측 결과 사례 ····· 25
표 3.2 회귀분석 결과 ····· 25
표 3.3 확대터널의 시공순서 ····· 29
표 3.4 발파진동 속도 측정 결과 ····· 35
표 3.5 분석터널의 제원 ····· 37
표 3.6 지반 물성값 ····· 43
표 3.7 지보재의 물성값 ····· 44
표 3.8 확대공법별 수치해석 모델링 ····· 44
표 3.9 확대종류에 따른 기존터널의 천단변위 ····· 45
표 3.10 확대종류에 따른 터널의 천단변위 ····· 46
표 3.11 확대종류에 따른 지표변위 ····· 46
표 3.12 확대종류에 따른 기존터널의 내공변위 ····· 47
표 3.13 지반의 물성값 ····· 48
표 3.14 터널 제원 및 지보량 ····· 48
표 3.15 터널 차로별 지보패턴 ····· 48
표 3.16 터널 확대시 숏크리트 주응력 분포도 ····· 52
표 3.17 본 연구에 적용된 폐터널 현황 및 압축강도 ····· 53
표 3.18 수질검사 결과 ····· 54
표 3.19 록볼트 인발시험 결과 ····· 57
표 3.20 주 지보재의 물성값 ····· 84
표 3.21 해석케이스 산정 ····· 85
표 3.22 터널 A의 제원 및 지반조건 ····· 93
표 3.23 터널 B의 제원 및 지반조건 ····· 98
표 3.24 터널 C의 제원 및 지반조건 ····· 101

표 3.25 제안된 예측식에 의한 기존터널의 종단변형 곡선-터널 A ····· 103
표 3.26 변위 및 변형률 계측-터널 A ····· 104
표 3.27 제안된 예측식에 의한 기존터널의 종단변형 곡선-터널 B ····· 105
표 3.28 록볼트 축력 계측-터널 B ····· 106
표 3.29 시뮬레이션을 위해 선정된 주요 시공장비 ····· 118
표 3.30 지역별 터널의 분포(2007년 기준) ····· 123
표 3.31 연장별/지역별 터널의 분포 ····· 124
표 3.32 준공별/지역별 터널의 분포 ····· 124
표 3.33 기존기술과 제안기술 비교 ····· 132
표 3.34 충격저감장치의 형상 ····· 133
표 3.35 수평지지대의 구성 ····· 133
표 3.36 충격저감장치의 운용 ····· 134
표 3.37 프로텍터 실험체 개요 및 각 부재의 명칭 ····· 139
표 3.38 프로텍터 상세도면-전체도 ····· 140
표 3.39 프로텍터 상세도면 ····· 141
표 3.40 프로텍터 실험체 설치순서 ····· 143
표 3.41 프로텍터 실험체 설치 및 해체시간 ····· 144
표 3.42 사용계측기 및 계측목적 ····· 145
표 3.43 F형 변형률게이지의 제원 ····· 145
표 3.44 CDP형 전기식 변위계의 제원 ····· 146
표 3.45 압전식 가속도계의 제원 ····· 147
표 3.46 압축 센터홀형 하중계 ····· 148
표 3.47 정적 데이터 로거의 사양 ····· 149
표 3.48 동적 데이터 로거의 사양 ····· 149
표 3.49 초고속카메라 상세제원 ····· 150
표 3.50 계측위치에 적용된 계측센서 ····· 150
표 3.51 계측기 설치상세(1) ····· 153
표 3.52 계측기 설치상세(2) ····· 154
표 3.53 계측기 설치상세(3) ····· 155
표 3.54 계측기 설치상세(4) ····· 156

표 3.55 계측기 설치상세(5) ····· 157
표 3.56 실대형 실험조건 ····· 158
표 3.57 낙석 충격실험 순서도 ····· 160
표 3.58 실험 이력 및 조건 ····· 161
표 3.59 최종잔류변위 계측결과(단위 : mm) ····· 164
표 3.60 충격하중과 가속도 계측결과 ····· 165
표 3.61 변형률 계측결과(단위:με) ····· 168
표 3.62 초고속 카메라에 의한 계측 결과 ····· 172
표 3.63 버력의 재료물성 ····· 175
표 3.64 수치해석 케이스 ····· 176
표 3.65 재료거동에 따른 충격하중 ····· 183
표 3.66 터널 확장공사에 대한 기존공법 및 신공법 비교를 위한 직·간접비용 항목화 202
표 3.67 다차로 도로의 방향별 용량 ····· 211
표 3.68 2차로 방향별 분포 보정계수 ····· 212
표 3.69 2차로 도로의 방향별 용량 ····· 212
표 3.70 점용공사로 인한 지체비용의 구성 ····· 214
표 3.71 선행연구 조사내용 분석 ····· 221
표 3.72 서울특별시 2011 통계연보 ····· 224
표 3.73 연도별 고정비 종합비교표 (단위: 원/대*hr) ····· 224
표 3.74 2011년 평균가격 (한국석유공사제공) ····· 225
표 3.75 차량 1대당 평균 통행시간가치 (수도권: 2007년 기준) ····· 225
표 3.76 차종별 · 속도별 대기오염비용(2007년 기준) ····· 227
표 3.77 추가 우회거리 산정기준 (시설안전공단, 2006) ····· 228
표 3.78 각 타입별 단면확대 직접시공비 ····· 231
표 3.79 각 분석 Case 별 특징 ····· 235
표 3.80 남산 3호 터널 개요 ····· 235
표 3.81 매봉터널 개요 ····· 237
표 3.82 기존공법을 이용한 공기산출근거 ····· 238
표 3.83 프로텍터를 이용한 공기산출근거 ····· 239
표 3.84 프로텍터를 이용 시 공기추가비용 산출근거 (2차로→3차로) ····· 241

표 3.85 프로텍터를 이용 시 공기추가비용 산출근거 (2차로→4차로) ····· 242
표 3.86 프로텍터를 이용 시 공기추가비용 산출근거 (3차로→4차로) ····· 243
표 3.87 프로텍터 재료비 산출근거 ····· 244
표 3.88 단위길이 (3m*1m*4.5m)기준일 때 프로텍터 비용 ····· 245
표 3.89 2차선도로-> 3차선 터널 (7m*46m*4.5m) ····· 247
표 3.90 2차선 -> 4차선 터널 (10.5m*54m*4.5m) ····· 248
표 3.91 3차선 -> 4차선 터널 (10.5m*60m*4.5m) ····· 248
표 3.92 기존공법에 대한 총 공사비 산출 내역 ····· 249
표 3.93 프로텍터를 사용한 경우에 대한 총 공사비 산출 내역 ····· 250
표 3.94 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 252
표 3.95 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 253
표 3.96 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용 ····· 253
표 3.97 CASE 1의 간접비 총액 ····· 254
표 3.98 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 255
표 3.99 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 256
표 3.100 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용 ····· 256
표 3.101 CASE 3의 간접비 총액 ····· 256
표 3.102 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 257
표 3.103 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 258
표 3.104 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용 ····· 258
표 3.105 CASE 5의 간접비 총액 ····· 258
표 3.106 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 259
표 3.107 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 260
표 3.108 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용 ····· 260
표 3.109 CASE 2의 야간통제 30일간의 간접비 총액 ····· 260
표 3.110 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 261
표 3.111 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 261
표 3.112 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용 ····· 262
표 3.113 CASE 2의 부분통제 1408일간의 간접비 총액 ····· 262
표 3.114 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 262

표 3.115 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 263
표 3.116 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용 ····· 263
표 3.117 CASE 2의 총 공사기간 중 일반교통흐름에서의 간접비 총액 ····· 263
표 3.118 CASE 2의 간접비 총액 ····· 264
표 3.119 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 265
표 3.120 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 265
표 3.121 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용 ····· 266
표 3.122 CASE 2의 야간통제 30일간의 간접비 총액 ····· 266
표 3.123 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 267
표 3.124 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 267
표 3.125 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용 ····· 268
표 3.126 CASE 2의 부분통제 1408일간의 간접비 총액 ····· 268
표 3.127 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 268
표 3.128 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 269
표 3.129 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용 ····· 269
표 3.130 CASE 4의 총 공사기간 중 일반교통흐름에서의 간접비 총액 ····· 269
표 3.131 CASE 4의 간접비 총액 ····· 270
표 3.132 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 271
표 3.133 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 271
표 3.134 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용 ····· 272
표 3.135 CASE 6의 야간통제 30일간의 간접비 총액 ····· 272
표 3.136 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 273
표 3.137 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 273
표 3.138 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용 ····· 274
표 3.139 CASE 6의 부분통제 150일간의 간접비 총액 ····· 274
표 3.140 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 275
표 3.141 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비 ····· 275
표 3.142 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용 ····· 275
표 3.143 CASE 6의 총 공사기간 중 일반교통흐름에서의 간접비 총액 ····· 276
표 3.144 CASE 6의 간접비 총액 ····· 276

표 3.145 각 분석대상 별 직·간접비용 총액 계산 결과 (단위: 원) ····· 277
표 3.146 지보구조 및 보조공법 ····· 291
표 3.147 보강공법 비교표 ····· 294
표 3.148 3차원 수치해석 수행 Case ····· 298
표 3.149 3차원 수치해석에 적용한 지반 물성치 ····· 299
표 3.150 보강범위 120°에서 이완범위 및 거동각도 ····· 307
표 3.151 보강범위 180°에서 이완범위 및 거동각도 ····· 307
표 3.152 시험에 사용된 주문진 표준사의 물리적 특성 ····· 318
표 3.153 주문진 표준사에 대한 삼축압축시험 결과 ····· 319
표 3.154 주문진 표준사의 직접전단시험결과 ····· 320
표 3.155 모형시험에 사용된 전산볼트의 물리적 성질 ····· 321
표 3.156 모형시험에 사용된 변위계 및 토압계의 제원 ····· 324
표 3.157 설치 간격에 따른 모형볼트 설치개수 ····· 324
표 3.158 모형볼트 보강지반에 대한 시험 Case-1 ····· 325
표 3.159 모형볼트 보강지반에 대한 시험 Case-2 ····· 326
표 3.160 모형볼트 보강지반에 대한 시험 Case-3 ····· 327
표 3.161 설치각도에 따른 모형볼트 부담면적 감소율 ····· 340
표 3.162 표준지보패턴 3타입 및 적용 지보패턴 ····· 351
표 3.163 표준지보패턴 4타입 및 적용 지보패턴 ····· 351
표 3.164 표준지보패턴 5타입 및 적용 지보패턴 ····· 352
표 3.165 지보패턴에 따른 지반 물성값 ····· 352
표 3.166 숏크리트 물성값 ····· 352
표 3.167 록볼트 물성값 ····· 352
표 3.168 지보패턴에 따른 하중분담율 ····· 353
표 3.169 지보패턴 3타입에서 록볼트 모형화 유/무에 따른 수치해석결과 ····· 354
표 3.170 지보패턴 4타입에서 록볼트 모형화 유/무에 따른 수치해석결과 ····· 355
표 3.171 지보패턴 5타입에서 록볼트 모형화 유/무에 따른 수치해석결과 ····· 356
표 3.172 각 지보패턴에서 록볼트 설치각도 90°에 대응하는 변형계수 ····· 358
표 3.173 록볼트의 부담면적 감소율과 설치각도에 따른 변형계수 증가율 ····· 359
표 3.174 3타입에서 록볼트의 부담면적 감소율과 설치각도에 따른 변형계수(MPa) ·· 359

표 3.175 4타입에서 록볼트의 부담면적 감소율과 설치각도에 따른 변형계수(MPa) ·· 360
표 3.176 5타입에서 록볼트의 부담면적 감소율과 설치각도에 따른 변형계수(MPa) ·· 360

그 림 목 차

그림 1.1 도심지 터널의 준공연도별 누계 ····· 2
그림 1.2 도심지 터널의 폭원(m)별 현황 ····· 2

그림 2.1 프로텍터 삽입 개념도 ····· 11
그림 2.3 기존터널 연장과 확폭시공 연장 ····· 12
그림 2.4 기존터널과 확폭터널의 내공폭 ····· 13
그림 2.5 기존터널과 확폭터널의 단면적 ····· 13
그림 2.6 확폭터널 연장과 시공기간 ····· 14
그림 2.7 확폭터널의 지반조건 ····· 14
그림 2.8 터널확폭의 목적 ····· 15
그림 2.9 운영터널의 교통규제 방식 ····· 16
그림 2.10 확폭터널의 굴착방식 ····· 17
그림 2.11 터널굴착시 안전확보 방법 ····· 17
그림 2.12 시공연장과 프로텍터 연장 ····· 18
그림 2.13 프로텍터의 치수 ····· 18

그림 3.1 발파진동 계측 위치도 ····· 24
그림 3.2 발파진동의 예측 ····· 26
그림 3.3 토노미에 터널 전경(확대전) ····· 28
그림 3.4 토노미에 터널 전경(확대후) ····· 28
그림 3.5 터널 계측단면 및 계획 ····· 30
그림 3.6 계측데이터 분석 ····· 31
그림 3.7 발파형 굴착방식인 나폴레온 헷드 형 스테이지 개념도 ····· 32
그림 3.8 터널표준단면 ····· 33
그림 3.9 발파패턴도 ····· 33
그림 3.10 발파 직후의 막장모습 ····· 34

xxx

그림 3.11 기존터널 라이닝의 계측결과 ····· 38
그림 3.12 강지보 응력 경시변화 ····· 39
그림 3.13 숏크리트 응력 경시변화 ····· 39
그림 3.14 각 지보부재의 최종값 ····· 40
그림 3.15 천단침하 및 내공변위 ····· 41
그림 3.16 록볼트 축력 ····· 41
그림 3.17 이동식 프로텍터 보강범위 ····· 42
그림 3.18 해석영역 및 메쉬 ····· 49
그림 3.19 기존터널의 천단침하 ····· 50
그림 3.20 확대터널의 천단침하 ····· 50
그림 3.21 굴착면적과 침하량의 상관관계 ····· 51
그림 3.22 기존터널 라이닝 영향범위 ····· 52
그림 3.23 XRD 검사결과 ····· 55
그림 3.24 SEM 분석결과 ····· 56
그림 3.25 EDS 분석결과 ····· 57
그림 3.26 종단변형특성 개요도(이인모, 2004) ····· 82
그림 3.27 터널확대 개요도 ····· 83
그림 3.28 시공단계 구성 ····· 84
그림 3.29 지반물성에 따른 확대터널을 종단변형곡선 ····· 86
그림 3.30 지반물성에 따른 기존터널의 종단변형곡선 ····· 87
그림 3.31 2차로 → 3차로 확대 VS. 3차로 신규건설 시 종단변형특성 ····· 88
그림 3.32 2차로 → 4차로 확대 VS. 4차로 신규건설 시 종단변형특성 ····· 88
그림 3.33 확대차로별 확대터널의 종단변형곡선 ····· 89
그림 3.34 확대차로별 기존터널의 종단변형곡선 ····· 90
그림 3.35 터널 A 개요도(F.Tonon, 2010) ····· 93
그림 3.36 터널 A 계측배치도(F.Tonon, 2010) ····· 94
그림 3.37 Section 4의 변형률 및 변위계측결과(F.Tonon, 2010) ····· 95
그림 3.38 Section 5의 변형률 및 변위계측결과(F.Tonon, 2010) ····· 96
그림 3.39 측정위치별 최종변위(F.Tonon, 2010) ····· 97
그림 3.40 측정위치별 숏크리트 응력(F.Tonon, 2010) ····· 97

그림 3.41 측정위치별 록볼트 축력(F.Tonon, 2010) ····· 98
그림 3.42 터널 B 개요도(F.Tonon, 2010) ····· 99
그림 3.43 터널 B의 계측배치도(F.Tonon, 2010) ····· 99
그림 3.44 B2의 록볼트축력 계측결과(F.Tonon, 2010) ····· 100
그림 3.45 터널 C 개요도(F.Tonon, 2010) ····· 101
그림 3.46 터널 C의 계측배치도(F.Tonon, 2010) ····· 102
그림 3.47 B2의 록볼트축력 계측결과(F.Tonon, 2010) ····· 102
그림 3.48 화악터널 시공전경 ····· 107
그림 3.49 화악터널의 기존 터널 단면 및 확대 터널단면 ····· 108
그림 3.50 화악터널에 대한 장비운영공간 분석결과 ····· 108
그림 3.51 방화터널의 기존 터널 단면 및 확대 터널단면 ····· 109
그림 3.52 방화터널에 대한 장비운영공간 분석결과 ····· 110
그림 3.53 굴삭기(0.2㎥의 버켓용량)의 장비규격 ····· 110
그림 3.54 운반기(0.37㎥의 버켓용량)의 장비규격 ····· 111
그림 3.55 일반적 공압식 크로라드릴의 장비규격 ····· 112
그림 3.56 점보드릴의 장비규격 ····· 113
그림 3.57 화악터널의 확대터널 단면도 ····· 114
그림 3.58 방화터널의 확대터널 단면도 ····· 115
그림 3.59 일본 오쿠라터널의 확대터널 단면도 ····· 115
그림 3.60 일본 신고베터널의 확대터널 단면도(J-1 구간) ····· 116
그림 3.61 일본 세이칸터널의 확대터널 단면도 ····· 116
그림 3.62 양측확대의 시뮬레이션 단면도 ····· 117
그림 3.63 편측확대의 시뮬레이션 단면도 ····· 117
그림 3.64 조사된 기존터널 정보예 ····· 125
그림 3.65 터널단면 확대 단면도 ····· 126
그림 3.66 확대시공 프로세스 ····· 126
그림 3.67 프로텍터의 종류 ····· 128
그림 3.68 강제 프로텍터의 기존터널내 설치 ····· 128
그림 3.69 이동식 프로텍터에서 막장전방 보호구간 ····· 129
그림 3.70 이동식 프로텍터의 전체 모습 ····· 129

그림 3.71 프로텍터 설계 시 핵심사항 ····· 130
그림 3.72 Olson 모델에서의 기호 ····· 131
그림 3.73 강재프로텍터 구조해석모델 ····· 136
그림 3.74 강재프로텍터 구조해석결과 ····· 137
그림 3.75 프로텍터 실험체 개요 및 각 부재의 명칭 ····· 138
그림 3.76 전기저항식 변형률 게이지 ····· 145
그림 3.77 CDP형 전기식 변위계 ····· 146
그림 3.78 계측위치와 계측센서 설치도 ····· 151
그림 3.79 계측기 설치전경 ····· 152
그림 3.80 낙하장치 및 정위치 타격을 위한 로프구성 ····· 159
그림 3.81 낙하추의 타격위치 ····· 162
그림 3.82 최종잔류변위 계측위치 ····· 163
그림 3.83 TC12의 수직하중 및 가속도 계측 결과 ····· 166
그림 3.84 프로텍터의 주요영향범위 ····· 167
그림 3.85 초고속 카메라에 의한 계측 ····· 169
그림 3.86 초고속 카메라에 의한 추의 낙하 속도 계측 결과 (TC12) ····· 170
그림 3.87 초고속 카메라에 의한 동적 변위 계측 결과 (TC5) ····· 170
그림 3.88 기존터널 발파굴착 개요 ····· 174
그림 3.89 해석모델 ····· 175
그림 3.90 버력이 완전탄성거동을 할 경우 충격하중 ····· 177
그림 3.91 완전탄성거동 시 낙하높이에 따른 충격하중 ····· 178
그림 3.92 완전탄성거동 시 버력의 크기에 따른 충격하중 ····· 179
그림 3.93 버력이 탄소성거동을 할 경우 충격하중 ····· 180
그림 3.94 탄소성거동 시 낙하높이에 따른 충격하중 ····· 181
그림 3.95 탄소성거동 시 버력의 크기에 따른 충격하중 ····· 182
그림 3.96 완전탄성거동 시 이론해와 수치해석결과 비교 ····· 184
그림 3.97 탄소성거동 시 이론해와 수치해석결과 비교> ····· 185
그림 3.98 탄성매트 압축시험 ····· 186
그림 3.99 탄성매트 압축시험 결과 ····· 187
그림 3.100 수치해석 모델링 ····· 188

그림 3.101 충격저감재를 고려한 충격해석 결과 ····· 189
그림 3.102 Shikisimanai 터널확대 개요도 ····· 191
그림 3.103 발파에 의한 터널확대 시공프로세서 ····· 192
그림 3.104 교통 규제중의 “대기시간” 표시전경 ····· 193
그림 3.105 교통규제용 신호기 ····· 193
그림 3.106 차량통행제한 확인용 게이트 ····· 194
그림 3.107 상도터널 시간대별 통행량 ····· 195
그림 3.108 문성터널 시간대별 통행량 ····· 195
그림 3.109 북악터널 시간대별 통행량 ····· 195
그림 3.110 금호터널 시간대별 통행량 ····· 196
그림 3.111 화곡터널 시간대별 통행량 ····· 196
그림 3.112 남산2호터널 시간대별 통행량 ····· 196
그림 3.113 사직터널 시간대별 통행량 ····· 197
그림 3.114 자하문터널 시간대별 통행량 ····· 197
그림 3.115 남산3호터널 시간대별 통행량 ····· 197
그림 3.116 금화터널 시간대별 통행량 ····· 198
그림 3.117 요일별 교통량 분석 ····· 198
그림 3.118 월별 교통량 분석 ····· 199
그림 3.119 우회로의 유무에 따른 도로 변화 ····· 202
그림 3.120 과업수행 방법 ····· 203
그림 3.121 지체비용 산정 흐름도(송윤섭, 2005) ····· 207
그림 3.122 EMME/2 데이터뱅크의 구성 ····· 208
그림 3.123 지체도 산정 흐름도 ····· 209
그림 3.124 비용 산정 FLOW ····· 211
그림 3.125 교통혼잡비용의 구성 요소 ····· 216
그림 3.126 도시부 도로 교통혼잡비용 추정 방법의 절차 ····· 217
그림 3.127 간접비 산출 방법 분류 ····· 222
그림 3.128 최종 간접비 산출 방법 분류 ····· 222
그림 3.129 2차로 검토단면(남산 3호터널) ····· 230
그림 3.130 3차로 검토단면(매봉터널) ····· 230

그림 3.131 4차로 검토단면(단면 가정) ····· 231
그림 3.132 남산 3호 터널 우회도로 ····· 236
그림 3.133 매봉터널 우회도로 ····· 237
그림 3.134 각 분석대상 별 직·간접비용 총액 계산 결과 ····· 278
그림 3.135 터널 굴착에 의한 변형 거동 ····· 279
그림 3.136 터널 주변 응력장 변화 ····· 280
그림 3.137 터널 굴착에 의한 전방 코어의 구속압 변화 ····· 282
그림 3.138 안정성과 관련된 굴진면의 거동 ····· 283
그림 3.139 지반-구조물의 상호작용에 의한 내공변위-구속력 곡선 ····· 284
그림 3.140 터널보강시 막장면 반경방향에 대한 내공변위-구속 곡선 ····· 285
그림 3.141 굴진면 종방향 보강만 실시한 내공변위-구속 곡선 ····· 286
그림 3.142 굴진면 수평보강공법 ····· 287
그림 3.143 우산망 보강공법과 굴진면 수평보강방법 ····· 288
그림 3.144 우산망 보강공법의 형상 ····· 289
그림 3.145 록볼트를 주 보조공법으로 한 신설터널 표준패턴도 ····· 292
그림 3.146 훠폴링을 주 보조공법으로 한 터널 ····· 293
그림 3.147 보강 공법 시공 프로세서(안) ····· 295
그림 3.148 3차원 수치해석 모델 ····· 296
그림 3.149 보강범위 따른 모형화 횡단면도 ····· 297
그림 3.150 토사터널 120° 보강범위 중첩길이 4.0m 에서의 침하량 ····· 299
그림 3.151 토사터널 120° 보강범위 중첩길이 6.0m 에서의 침하량 ····· 300
그림 3.152 토사터널 120° 보강범위 중첩길이 8.0m 에서의 침하량 ····· 300
그림 3.153 토사터널 180° 보강범위 중첩길이 4.0m 에서의 침하량 ····· 301
그림 3.154 토사터널 180° 보강범위 중첩길이 6.0m 에서의 침하량 ····· 301
그림 3.155 토사터널 180° 보강범위 중첩길이 8.0m 에서의 침하량 ····· 301
그림 3.156 풍화암터널 120° 보강범위 중첩길이 4.0m 에서의 침하량 ····· 302
그림 3.157 풍화암터널 120° 보강범위 중첩길이 6.0m 에서의 침하량 ····· 302
그림 3.158 풍화암터널 120° 보강범위 중첩길이 8.0m 에서의 침하량 ····· 303
그림 3.159 풍화암터널 180° 보강범위 중첩길이 4.0m 에서의 침하량 ····· 303
그림 3.160 풍화암터널 180° 보강범위 중첩길이 6.0m 에서의 침하량 ····· 304

그림 3.161 풍화암터널 180° 보강범위 중첩길이 8.0m 에서의 침하량 ····· 304
그림 3.162 토피고에 따른 침하량 ····· 305
그림 3.163 터널 굴착에 의한 이완영역 계산방법 ····· 305
그림 3.164 막장면 거동각도 계산방법 ····· 306
그림 3.165 토사터널에서의 예상파괴면과 거동각도의 차이 ····· 308
그림 3.166 풍화암터널에서의 예상파괴면과 거동각도의 차이 ····· 308
그림 3.167 선단정착 록볼트 ····· 311
그림 3.168 수지형 전면정착 록볼트 ····· 312
그림 3.169 시멘트 모르타르형 전면정착 록볼트 ····· 312
그림 3.170 선단정착 록볼트의 거동 ····· 313
그림 3.171 선단정착 록볼트의 인발거동 특성 ····· 313
그림 3.172 전면정착 록볼트의 거동 ····· 314
그림 3.173 전면정착 록볼트에 의한 강도 증가효과 ····· 315
그림 3.174 록볼트와 숏크리트의 지지효과 ····· 315
그림 3.175 터널에서 록볼트에 의한 원지반 아치 형성모형 ····· 316
그림 3.176 록볼트 설치로 형성된 원지반 아치(Rabcewicz, 1964) ····· 317
그림 3.177 주문진 표준사의 입도분포곡선 ····· 319
그림 3.178주문진 표준사의 축차응력-변형률 관계 ····· 320
그림 3.179 주문진 표준사의 응력경로 ····· 320
그림 3.180 주문진 표준사 직접전단시 수직응력-파괴시 전단응력 관계 ····· 321
그림 3.181 모형시험에 사용된 모형볼트 ····· 322
그림 3.182 가공된 철판 전경 ····· 322
그림 3.183 시험에 사용한 모형토조의 제원 ····· 323
그림 3.184 시험에 사용한 강사장치 ····· 323
그림 3.185 모형시험 순서 ····· 328
그림 3.186 모형시험에서의 계측기 설치위치 ····· 329
그림 3.187 모형볼트 및 강판 설치 전경 ····· 329
그림 3.188 처짐제어 장치 및 변위계 설치 전경 ····· 330
그림 3.189 토압계 설치전경 ····· 330
그림 3.190 강사장치를 이용한 모형지반 조성전경 ····· 331

그림 3.191 토피고 24cm A지점에서 종방향 설치간격에 따른 연직토압 변화량 ·· 332
그림 3.192 토피고 24cm B지점에서 종방향 설치간격에 따른 연직토압 변화량 ·· 333
그림 3.193 토피고 36cm A지점에서 종방향 설치간격에 따른 연직토압 변화량 ·· 333
그림 3.194 토피고 36cm B지점에서 종방향 설치간격에 따른 연직토압 변화량 ·· 334
그림 3.195 토피고 60cm A지점에서 종방향 설치간격에 따른 연직토압 변화량 ·· 334
그림 3.196 토피고 60cm B지점에서 종방향 설치간격에 따른 연직토압 변화량 ·· 335
그림 3.197 모형볼트 횡방향 1열 설치 시 설치각도에 따른 처짐 감소량 ····· 336
그림 3.198 모형볼트 횡방향 2열 설치 시 설치각도에 따른 처짐 감소량 ····· 336
그림 3.199 토피고 24cm에서 모형볼트 설치각도에 따른 이완하중 발생률 ····· 337
그림 3.200 토피고 36cm에서 모형볼트 설치각도에 따른 이완하중 발생률 ····· 338
그림 3.201 토피고 60cm에서 모형볼트 설치각도에 따른 이완하중 발생률 ····· 338
그림 3.202 모형볼트 1개당 부담면적에 따른 이완하중 발생률 ····· 339
그림 3.203 모형볼트 부담면적 변화에 따른 이완하중 발생률 ····· 340
그림 3.204 모형볼트 부담면적 감소율에 따른 설치각도 ····· 341
그림 3.205 종방향 설치간격에 따른 B지점의 연직토압의 변화량 ····· 342
그림 3.206 종방향 설치간격에 따른 최대 침하량 감소량 ····· 343
그림 3.207 설치각도에 따른 이완하중 발생률 ····· 343
그림 3.208 모형볼트 정착 길이 변화에 따른 이완하중 발생률 ····· 344
그림 3.209 볼트 장착 길이 증가율에 대한 설치각도 ····· 345
그림 3.210 토피고 60cm에서 설치각도에 따른 변형계수 증가율 ····· 347
그림 3.211 부담면적(종방향 간격) 감소율에 따른 변형계수 증가율 ····· 347
그림 3.212 2차원 수치해석 과정 ····· 348
그림 3.213 록볼트 모형화에 대한 2차원 수치해석 단면 모식도 ····· 349
그림 3.214 록볼트 모형화한 경우에 대한 2차원 수치해석 순서 ····· 349
그림 3.215 록볼트와 숏크리트를 모형화 하지 않은 경우에 대한 2차원 수치해석 단면 모식도 ····· 350
그림 3.216 록볼트와 숏크리트를 모형화 하지 않은 경우에 대한 2차원 수치해석 순서 ··· 350
그림 3.217 표준 지보패턴에 대한 2차원 해석 단면 ····· 353
그림 3.218 지보패턴 3타입에서 주변지반 변형계수에 따른 최대 천단침하량의 관계 357
그림 3.219 지보패턴 4타입에서 주변지반 변형계수에 따른 최대 천단침하량의 관계 357

그림 3.220 지보패턴 5타입에서 주변지반 변형계수에 따른 최대 천단침하량의 관계 358
그림 3.221 록볼트 부담면적 감소율 0%에서 천단 침하량 증가량 ····· 361
그림 3.222 록볼트 부담면적 감소율 15%에서 천단 침하량 증가량 ····· 361
그림 3.223 록볼트 부담면적 감소율 30%에서 천단 침하량 증가량 ····· 362

제1장 연구개발과제의 개요

제1절 연구개발의 목적

국내에서도 본격적으로 터널 건설이 시작된 지 약 40여년이 넘었다. 그 동안 차량이 대형화되고 교통량도 증가되면서 터널 구간이 만성적인 정체현상을 빚게 되었고, 터널 라이닝이 노후화되어 안정성도 문제가 되고 있다. 이에 대한 문제점을 해결하기 위해 유럽이나 일본에서는 기존 터널에 대한 확대 공사를 수행하고 있다.
현재 기존도로의 노선 증가 및 터널 노후화에 대한 대처 방법으로는 대부분 기존 터널의 양쪽으로 신규로 터널을 건설하거나, 우회로를 건설하고 있으나, 기존의 방법을 적용할 경우 새로운 터널을 추가해야 함에 따라 불필요한 용지매입과 근접한 기존 터널의 안전성 확보 등을 위해 추가적인 경제적인 부담이 발생한다. 또한 공용중인 도심지 터널을 확장하거나 보수하는 경우 차량의 진입을 통제해야 하는 부담을 함께 안고 있는 실정이다. 터널 확대 시공은 용지매입 비용의 절감 및 자연환경 파괴를 최소화 할 수 있다는 장점이 있지만, 순 공사비가 신설 터널에 비해 많이 들고, 좁은 공간에서 소형 장비를 이용해 공사를 하기 때문에 효율이 떨어져 공기가 늘어나게 되는 등의 문제점이 있다.
그러나 공사비가 비싸고 공사가 어려운 조건 아래에서도 일본에서 40여 차례나 시공이 되었을 만큼 공용 중인 터널의 확대 공사를 진행할 수밖에 없는 터널 현장이 나타났다. 국내에서도 터널이 점차 노후화되고 교통량의 증대로 터널 구간의 정체현상이 가속화됨에 따라 터널 확대 공법에 대해 검토 할 필요성이 있으며, 향후 그 시장은 확대될 것으로 판단된다.

본 연구는 교통량 증대, 차량의 대형화 및 철도터널의 전철화 등에 대응하기 위한 기존 터널에서의 교통흐름이 확보된 터널 단면 확대 기술을 개발하는 것으로써 최종목표는 '교통흐름을 확보한 터널 단면 확대시공 개발'이다. 본 연구를 통하여 개발될 공법은 주로 도심지내에서 포화된 교통량을 해결하기 위하여 도로 확장 시 신설터널의 건설이 어려운 구간을 주 목표로 하고 있다.

제2절 연구개발의 필요성

현재 우리나라 도심지 터널의 경우 30년 이상된 곳이 28개소(26%)로 급격한 노후화 진행이 예상되고, 터널 폭이 15m 이하인 터널이 71개소(66%)로 도로 확장 요구가 증가 할 것으로 판단된다.

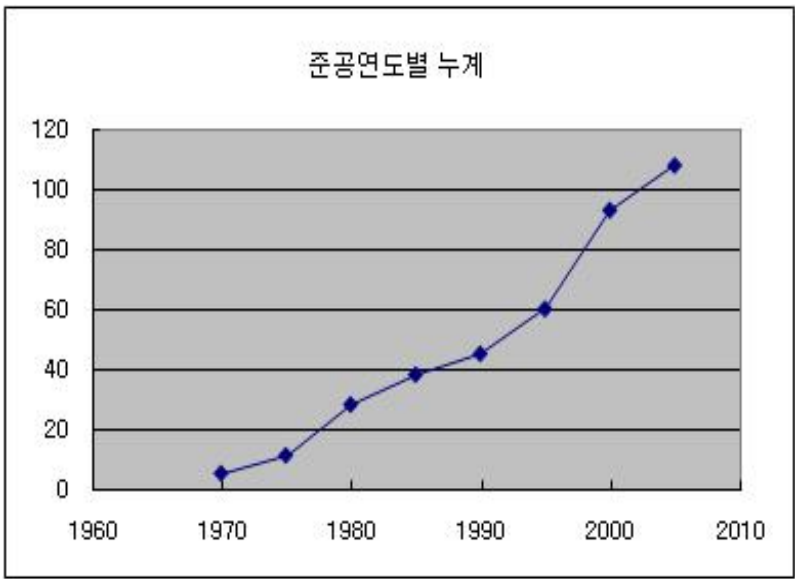


그림 1.1 도심지 터널의 준공연도별 누계

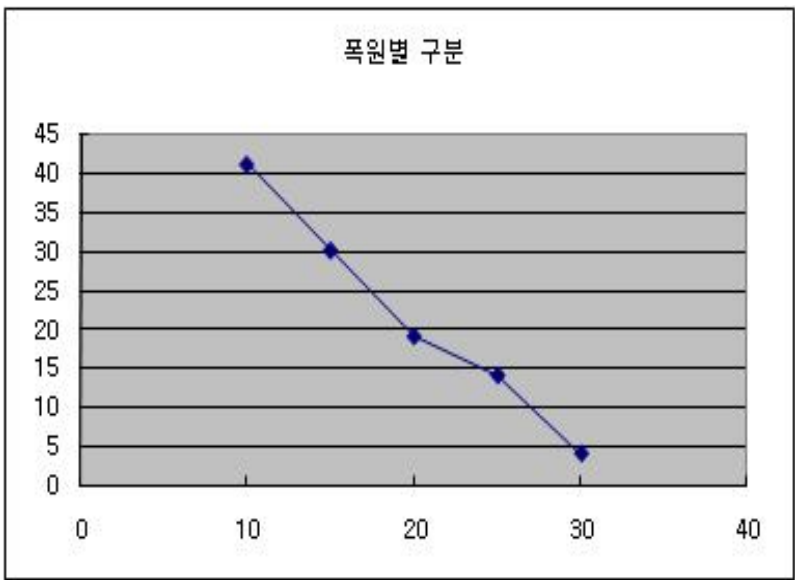


그림 1.2 도심지 터널의 폭원(m)별 현황

일본 국토교통성 도로국에서는 1998년에 “신도로기술 5개년 계획”을 수립하여, 물류의 국제화・다양화 및 차량의 대형화에 대응하기 위하여 도로 공간을 유효하게 활용하기 위한 기술 개발을 5개년간 실시하였으며, 주요 내용은 “터널의 단면 확대 기술”, “교량의 차량 대형화 대응 기술” 및 “이론적 포장 구조 설계법의 개발”로 구성되어 있다. 특히 “터널의 단면 확대 기술” 연구에서 1차선~2차선 차량 통행이 가능한 노후 터널의 확대・개축기술 개발 수행하였다.

일본의 경우 약 40여 개소에서 터널 확폭 시공이 이루어졌으며, 대상지반도 토사~경암 등 모든 지반에서 적용가능한 공법이 개발되었고, 프로텍터 내로 교통흐름을 유지한 채 외곽에서 발파 굴착하는 공법도 개발되었다. 특히 지반조건, 차선규제 방식, 프로텍터 종류, 굴착방식 등에 대한 다양한 시공사례를 바탕으로 설계·시공 매뉴얼이 제정되는 등 기존 노후터널의 교통흐름을 유지한 상태에서 확폭하는 공법이 보편적인 공법으로 자리를 잡고 있으며, 이를 통해 차선 통제로 인한 각종 사회직간접 비용을 최소화 시키고 있다.

교통 흐름을 유지한 터널의 확장 시공기술은 국내에서도 교통량 증가에 따른 터널부에서의 교통 병목현상, 정체 유발 터널 개소 증가 등의 사유로 이에 대한 해소 노력이 요구되고 있다. 특히 신설 보다는 기존 노선의 확장시공 및 터널의 노후화에 따른 유지보수 수요 발생이 예상되며, 전면 통제 시공시(예 : 남산2호터널) 교통정체에 따르는 막대한 간접비용 억제 및 삶의 질 향상을 위한 교통정책의 대안으로 제시될 수 있다. 그러나 각 발주처(도로, 철도)에서 하나의 대안으로는 거론되고 있지만 이에 대한 실제 적용에 관해서는 기반 기술이 매우 부족한 실정이다.

국내의 경우 수 곳에서 기존터널의 리뉴얼 시공이 이루어졌으나 모두 도로를 폐쇄하고 개축한 것으로 교통흐름을 유지한 터널 확폭시공은 이루어진 적이 없으며, 교통흐름을 유지한 터널 확폭에 관한 기초연구, 설계법, 시공법 등에 대한 기본적 연구가 미미한 실정이다. 따라서 터널에서의 교통흐름이 확보된 터널 단면 확대 시공기술에 대한 연구가 절실히 요구 된다.

제3절 연구목표 및 내용

1. 연구개발 최종목표

본 연구는 교통량 증대, 차량의 대형화 및 철도터널의 전철화 등에 대응하기 위한 기존 터널에서의 교통흐름이 확보된 터널 단면 확대 기술을 개발하는 것으로써 최종목표는 '교통흐름을 확보한 터널 단면 확대 공정 기술 개발'이며, 본 연구를 통하여 개발될 공법은 주로 도심지내에서 포화된 교통량을 해결하기 위하여 도로 확장시 신설터널의 건설이 어려운 구간에 주목표로 하고 있다.

- 터널 확대 안정성 분석 및 설계 기술 개발
- 교통흐름 유지 터널 확대 시공 기술 개발
- 교통흐름 유지 터널 확대 보강 기술 개발

2. 연구개발 내용 및 범위

가. 연구개발 목표

교통 흐름을 확보한 터널 단면 확대 공법은 이탈리아, 일본 등 터널 선진국에서도 극히 일부 시행된 것으로 증가하는 노후터널의 리뉴얼 대책으로서도 각광받기 시작하고 있지만 국내의 경우 차량의 안전성 확보의 어려움으로 인해 모두 차선을 폐쇄하고 확대가 이루어지고 있는 실정이다.

1차년도 연구개발은 국외 시공사례수집, 분석 및 전문가 의견 청취를 통한 적용가능성 분석 및 기본적인 시공 프로세스 정립에 목표를 두었다. 또한 기존 터널의 지보시스템과 콘크리트 라이닝은 사용기간의 경과로 내적 또는 외적 요인에 의해 열화가 되어 시공당시보다 지보성능이 감소되었을 수 있으므로 지보성능이 떨어진 지보재 및 콘크리트 라이닝과 지반거동과의 역학적 특성을 조사하며, 국내 주요 도심지의 터널 현황을 분석 및 단면 분석을 수행하여 터널 확대 필요성 여부를 파악

하고자 한다.

2차년도 연구에서는 1차년도에 수립된 시공 프로세스를 수정 보완하여 이에 따른 지반조건 및 터널형식에 따라 터널 단면 확대 형식 및 규모별로 지반안정성을 수치해석을 통하여 검증하며, 터널 단면 확대 설계 시 안정성 분석에 활용할 수 있는 설계방법에 대한 기본적인 가이드 라인을 수립하는데 목표를 두었다.

또한 교통흐름을 확보한 터널 단면 확대 공법의 개발 중 가장 중요한 요소로 평가되는 프로텍터에 대한 다양한 조건의 수치해석 및 실대형 실험을 통한 설계법의 검증을 통하여 경제적인 설계법의 기초를 확보하고자 하였으며, 국내 주요 터널 시공장비에 대한 가정된 협소공간에서의 장비 운용성 평가를 통하여 시공 시 문제점을 파악 및 경사록볼트 보강효과를 실내모형실험을 통하여 검증하고자 하였다.

3차년도 연구에서는 1&2차년도의 연구결과를 바탕으로 다양한 조건을 고려한 수치해석 및 실내 실대형 실험을 바탕으로한 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석기법 및 설계기법을 완성하여 제시하며, 프로텍터 실물 실대형 실험을 통하여 프로텍터 시작품 제작하여 검증한다. 프로텍터를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 실제 확대공사비와 터널 주변교통 정체에 의한 사회적 손실비용에 대한 경제성분석 수행한다. 또한 협소공간에 지보보강을 위한 경사 록볼트 시스템에 대한 모형시험 결과를 이용한 경사 록볼트 설계기법을 제시하였다. 마지막으로 도심지내 교통흐름을 유지하면서 기존 터널을 단면확대하는 공사시 참고가 될 수 있는 지침 및 매뉴얼을 작성한다

나. 연구내용 및 범위

표 1.1 연구내용 및 범위

주요 연구내용		연구범위
1차년도	▪ 실제 시공사례를 통한 터널 단면 확대시 지반 안정성 분석	-교통 흐름을 유지하면서 터널 단면 확폭시공을 수행한 국외사례 분석 -터널 단면 확폭시 주변 지반의 안정성 분석
	▪ 터널 단면 확대형식 및 규모에 따른 지반 안정성 해석(I)	-수치해석을 통한 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 지반 안정석 해석 - 국내 대표 지반에 대한 지반안정석 해석

	▪ 터널 지보재 및 라이닝의 역학적 특성 조사	- 공용중인 터널의 지보재 및 콘크리트 라이닝에 대한 열화 및 장기내구성 평가 - 기존 지보재와 지반거동과의 역학적 특성
	▪ 국내외 터널 단면 확대 시공 기술 적용 현황 조사 및 분석	-국외 시공 사례중 교통흐름을 유지한 채 터널 확대 시공을 한 사례 조사 및 각종 제원 분석 -국내 터널 개축 및 확폭 시공 사례 조사 및 분석
	▪ 국외 프로텍터 설계 및 제작기술 분석	-차량 방호를 위한 프로텍터 종류 및 설계 특성 조사 -차량 방호를 위한 프로텍터의 제작기술에 대한 조사 및 분석
	▪ 터널 단면 확대 시공 프로세서 정립	-터널단면 확대 형식에 따른 시공프로세서의 조사 -단면 확대 형식 및 규모에 따른 시공 기술 조사 및 분석 -국내 적용 가능성 분석
	▪ 협소공간 및 프로텍터를 고려한 시공장비 분석 및 개념 정립	- 국내외 시공사례를 통한 시공장비 분석 - 국내 실정에 적합한 시공장비 개발을 위한 개념 정립
	▪ 터널 단면 확대 시공시 보강공법 조사 및 분석	-터널 단면 확대 시공이 이루어지는 협소한 공간에서의 국외 지반보강 사례 조사 -국내외 터널 보강공법 분석을 통한 협소 공간에서의 보강공법 적용성 제시
	▪ 터널 단면 확대 보강 프로세서 정립	-터널 단면 확대 형식에 따른 공정 분석 -적용 가능한 터널 확대 보강 프로세서 정립
2차년도	▪ 터널 단면 확대형식 및 규모에 따른 지반 안정성 해석(II)	- 국내 대표 지반 적용 터널 단면 확대형식 및 규모에 따른 지반 안정성 해석
	▪ 프로텍터 시작품 제작 및 실대형 실험에 의한 검증 및 보완	- 프로텍터 시작품 제작 및 실대형 실험에 의한 성능평가 및 보완
	▪ 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석기법 및 설계기법 제시	- 수치해석 및 실대형 실험을 통한안정성 해석기법 및 설계기법 제시 - 진동에 의한 콘크리트라이닝 품질평가
	▪ 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 프로텍터 충격하중 및 안정성 해석	-발파식 및 기계식 굴착이 프로텍터에 미치는 영향 분석 -프로텍터 충격하중에 대한 수치해석 - 진동에 의한 콘크리트라이닝 품질평가 - 발파시 교통류 안정성 확보방안
	▪ 발파시 교통제어를 위한 교통량 평가기법 제시	-기존 사례를 통한 발파시 교통대책 검토 -효율적인 시공을 위한 교통량 평가방안 제시

	▪ 프로텍터 설계제작 기술	-안전성을 확보한 프로텍터 설계기술 정립 -단면확대 형식에 따른 프로텍터 설계기술 확립 - 터널의 기하조건을 고려한 프로텍터 제작기술
	▪ 터널 단면 확대 시공법 prototype 제시 및 시뮬레이션 검증	-터널 단면 확대 시공시 형식에 따른 터널 시공법의 prototype 및 로드맵 제시 -단면 확대 굴착방법에 따른 시공 개념 제시 -기존 터널을 이용한 가상 시뮬레이션 검증
	▪ 협소 공간 보강기술 제시 및 시공성 시뮬레이션(Ⅰ)	-프로텍터를 이용한 협소공간 보강기술 제시 -터널 확대형식 및 규모에 따른 보강공법 시공 시뮬레이션(Ⅰ) -프로텍터를 이용한 협소공간 보강기술 제시
3차년도	▪ 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석 기법 및 설계기법의 검증 및 완성	-발파식/기계식의 터널 확대 형식에 따른 프로텍터 및 지반 안정성 해석 기법에 관한 이론적 검증 및 완성 -터널 확대 형식에 따른 설계기법의 검증 및 완성
	▪ 터널단면 확대 실물 실대형 실험(Ⅱ)	-터널 단면 확대 실물 실대형 실험을 통한 안정성 해석 -이론 및 실험을 통한 프로텍터 안정성 검증
	▪ 프로텍터 시작품 제작 및 검증	-프로텍터 시작품에 대한 설계 및 구조적 안정성 검증 -터널 단면 확대 공법을 위한 프로텍터의 현장 실험을 통한 안정성 확보 -한국형 프로텍터 제작
	▪ 협소 공간 시공 시뮬레이션	-터널 확대형식 및 규모에 따른 협소공간 시공 시뮬레이션 -교통류 보존 확폭터널에 대한 경제성 검토
	▪ 협소공간 보강공법 검증 및 완성	-단경간 연결보강재를 이용한 보강공법 개발 -2차년도 연구결과를 토대로 지반종류 및 시험조건을 변경한 추가실험으로 다양한 조건에서 경사 록볼트 시스템의 보강효과 검증.
	▪ 터널 단면 확대 설계 및 시공 지침(안) 작성	-교통흐름을 유지한 터널 단면 확대 시공시의 조사, 설계, 시공, 보강에 관한 지침(안) 작성

제2장 국내·외 기술개발 현황

국내의 경우 수 곳에서 기존터널의 리뉴얼 시공이 이루어졌으나 모두 도로를 폐쇄하고 개축한 것으로 교통흐름을 유지한 터널 확폭시공은 이루어진 적이 없으며, 교통흐름을 유지한 터널 확폭에 관한 기초연구, 설계법, 시공법 등에 대한 기본적 연구가 미미한 실정이다.

따라서 각 발주처(도로, 철도)에서 하나의 대안으로는 거론되고 있지만 이에 대한 실제 적용에 관해서는 기반 기술이 매우 부족한 실정이다.

- 국내의 경우 기존터널의 교통흐름을 유지한 채 확대 시공한 사례는 없음
- 기존 터널의 교통흐름을 완전히 차단한 채 이루어진 공사는 남산○○터널, 가평의 ○○터널이 있음
- 최근 영동고속도로의 ○○터널과 남해고속도로의 ○○터널 등에서 우회도로를 만들고 기존터널을 확대하려는 계획이 수립되고 있음
- 이중 영동고속도로 ○○터널은 1994년 일방향 2차선 터널로 준공되었으나 교통정체 등으로 확대할 필요가 있어 우회노선을 만들고 기존터널을 확대할 계획임
- 즉, 국내의 경우 현재까지 교통의 흐름을 보존한 터널확대 시공은 실적은 전무함

일본 국토교통성 도로국에서는 1998년에 “신도로기술 5개년 계획”을 수립하여, 물류의 국제화·다양화 및 차량의 대형화에 대응하기 위하여 도로 공간을 유효하게 활용하기 위한 기술 개발을 5개년간 실시하였으며, 주요 내용은 “터널의 단면 확대 기술”, “교량의 차량 대형화 대응 기술” 및 “이론적 포장 구조 설계법의 개발”로 구성되어 있다. 특히 “터널의 단면 확대 기술” 연구에서 1차선~2차선 차량 통행이 가능한 노후 터널의 확대·개축기술 개발 수행하였다.

일본 토목연구소에서는 2004년 민관 19개 기관이 공동으로 터널확폭 공법에 대한 연구를 수행하여 8개의 공법을 개발하였으며, 기술의 주요내용은 발파 굴착형·기계 굴착형의 프로텍터 설계 및 시공법이며 이에 대한 시공 매뉴얼을 작성하였다.

일본의 경우 약 40여 개소에서 터널 확폭 시공이 이루어졌으며, 대상지반도 토사

~경암 등 모든 지반에서 적용가능한 공법이 개발되었고, 프로텍터 내로 교통흐름을 유지한 채 외곽에서 발파 굴착하는 공법도 개발되었다. 특히 지반조건, 차선규제 방식, 프로텍터 종류, 굴착방식 등에 대한 다양한 시공사례를 바탕으로 설계·시공 매뉴얼이 제정되는 등 기존 노후터널의 교통흐름을 유지한 상태에서 확폭하는 공법이 보편적인 공법으로 자리를 잡고 있으며, 이를 통해 차선 통제로 인한 각종 사회직간접 비용을 최소화 시키고 있다.

터널확폭 초기에는 도로 1차선 규모의 확폭만 가능하였으나 현재는 프로텍터 설계기술의 개발, 전용 굴착기 개발 등으로 2차선의 차량운행을 확보할 수 있는 기술이 개발·적용되고 있다. 터널확폭 초기에는 100m 이하의 극히 짧은 터널에서만 확폭시공이 이루어졌지만 최근에는 300m급 터널에서도 교통흐름을 유지한 채 확폭시공이 이루어지고 있으며, 시공기술의 발달로 터널 연장의 한계를 극복하고 있는 것으로 조사되었다.

이하에는 해외 시공 사례를 바탕으로 교통류 흐름을 유지한 터널 단면 확대 공법의 적용 현황에 대하여 나타내었다.

■ 터널 단면 확대의 방식

기존터널의 확폭은 확폭량과 확폭 방향에 따라 크게 4가지 패턴으로 분류할 수 있다(표 2.1).

(1) 하부부분 확대공법

기존 터널의 폭원을 변경하지 않고 노반아래 굴착과 포장두께의 축소에 의한 내공높이만을 확대한다. 비교적 비용은 저렴하지만 터널의 지지력확보와 배수공 이설 등에 문제가 있다.

(2) 상부부분 확대공법

기존 터널의 폭원을 변경하지 않고 터널 상부 아치의 일부 또는 전면을 확대 굴착하여 내공높이만을 확대한다. 작업공간이 협소하여 작업효율이 나쁘며 결과적으로는 전단면 확폭에 비하여 비용이 높게 되는 경우가 많다. 도로터널에서는 실제 시공사례가 없으며, 철도터널에서는 전기 시설물 공사를 위한 사례가 있다.

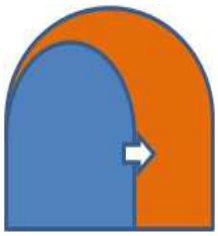
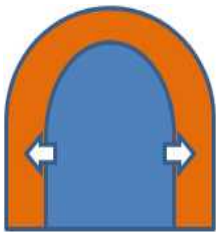
(3) 편측확대 공법

기존 터널의 중심선을 이동하여 한쪽 방향으로 집중하여 작업공간을 크게 확보하므로 효율적인 시공이 가능하다. 단 도로선형 등의 제약조건을 받는 것 이외에 기존 콘크리트 라이닝의 건전도 및 접속부에 관한 구조 등이 중요한 요소이다.

(4) 양측확대 공법

기존 터널의 양측으로 단면전체를 확폭한다. 터널중심의 이동량이 크지 않은 경우에 적용하며 실제 시공사례가 가장 많은 시공패턴이다.

표 2.1 터널 확폭의 종류

확폭 종류	하부부분 확대공법	상부부분 확대공법	편측확대 공법	양측확대 공법
개념도				

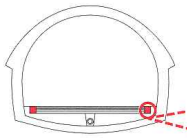
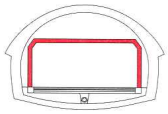
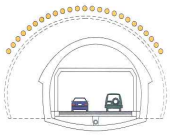
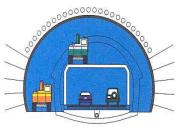
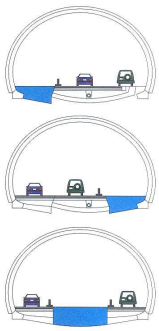
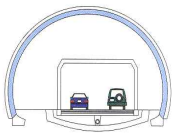
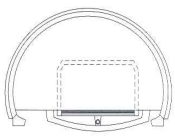
■ 터널 확폭의 순서

운영중 터널의 확폭 공정은 크기, 노선위치 등에 따라 다르지만 개략 표 2.2와 같은 순서로 이루어진다. 먼저 프로텍터를 설치하는 위치에 기초공을 설치하고 프로텍터를 설치한다. 프로텍터는 갱외에서 조립이 이루어지며 설치는 야간에 교통통제를 실시하고 이루어진다. 이때 프로텍터의 치수는 기존 터널의 제원에 따라 다르지만 보통 폭 4~6m, 길이 6m 전후의 강재프로텍터가 이용된다. 그림 3과 4는 기존터널에 프로텍터가 삽입된 모습을 개념도와 사진으로 나타내었다. 이후 기존터널 주변의 확폭되는 부분을 포아폴링 등으로 사전보강하고 굴착하게 된다. 이때 굴착방식에 따라 기계굴착과 발파굴착으로 나뉘는데 이의 시공사례는 제3장에서 분석

하기로 한다.

굴착후 지보는 신설터널과 마찬가지로 숏크리트와 록볼트가 주체가 된다. 굴착이 완료되면 라이닝을 설치하고 프로텍터를 철거하게 된다. 여기서 중요한 것은 기존 터널 외곽부를 굴착해도 프로텍터 내부로는 교통흐름이 유지된다는 것이다.

표 2.2 터널 확폭 시공 순서

시공순서					
	❶ 기초공	❷프로텍터 설치	❸사전보강	❹굴착공	
					
	❺라이닝설치	❻프로텍터 제거	❼포장공		인버트 시공

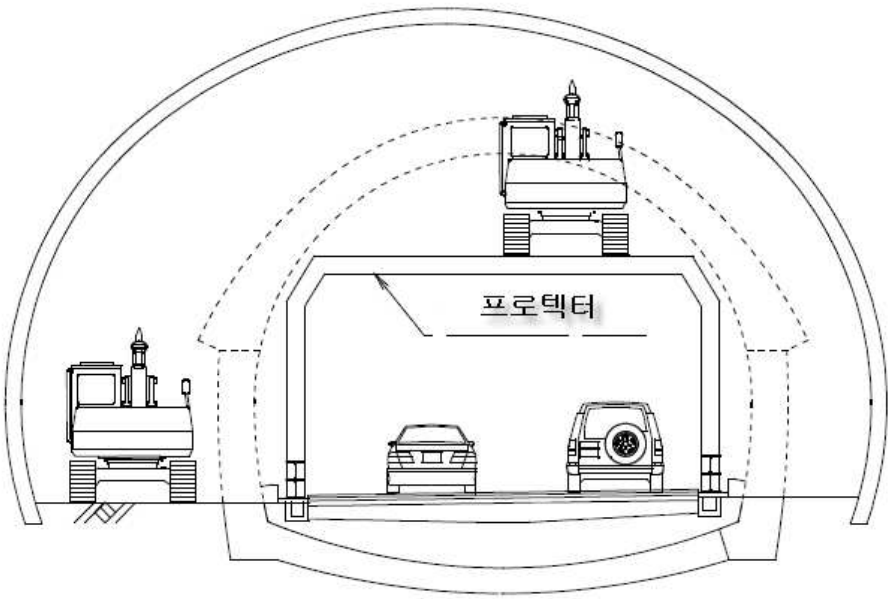


그림 2.1 프로텍터 삽입 개념도



그림 2.2 프로텍터 실제 삽입

■ 터널단면 확대의 제원

운영중 확폭 사례 터널의 연장, 시공연장, 내공폭, 단면적, 확폭율(확폭 터널의 내공폭/기존터널의 내공폭)에 대한 각각의 관계를 나타내었다.

- 확폭공사를 실시한 터널은 1,000m 이상도 6건 있지만 이는 터널 내의 분기부 확폭 등에 의한 것이며, 주로 수 십m에서 300m 미만이 대부분임을 알 수 있다.

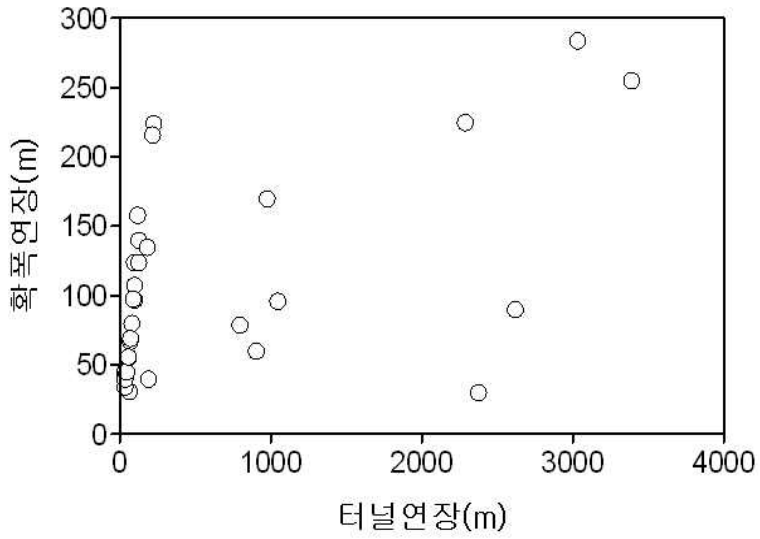


그림 2.3 기존터널 연장과 확폭시공 연장

- 기존터널의 폭은 5~10m인 경우가 많으며 이를 1.2~2.0배로 확장하는 경우가 많은 것을 알 수 있다. 이는 일본의 도로특성상 과거 편도 1차로의 터널을 편도 2차로로 확장하는 경우가 많았기 때문으로 생각된다.
- 터널확폭 연장과 시공기간을 나타내었다. 운영중 터널확폭은 교통통제, 지형적 여건 등으로 신설터널의 굴착보다 많은 시간이 소요되는 것으로 나타났다.

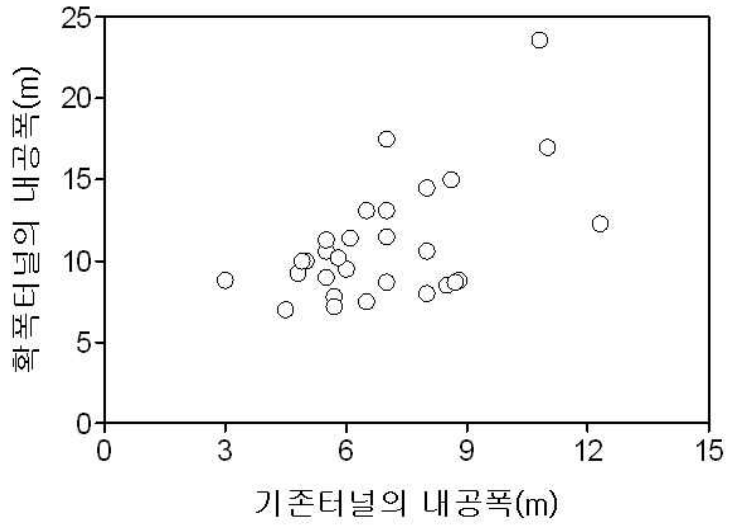


그림 2.4 기존터널과 확폭터널의 내공폭

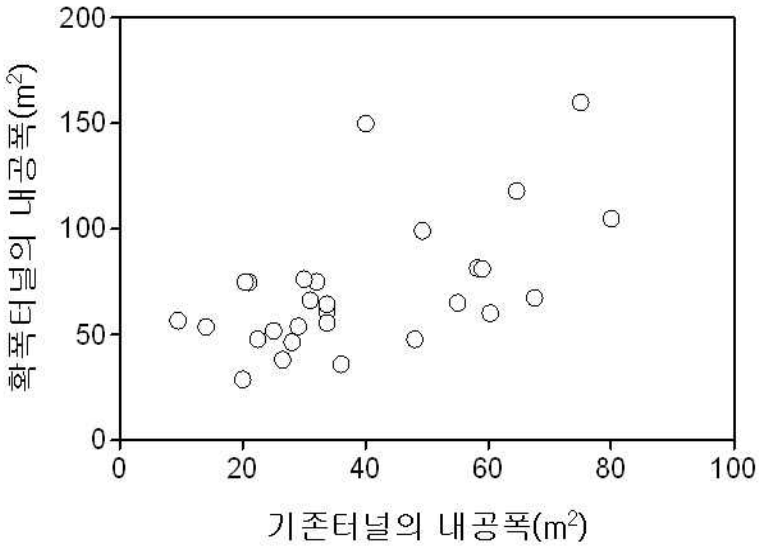


그림 2.5 기존터널과 확폭터널의 단면적

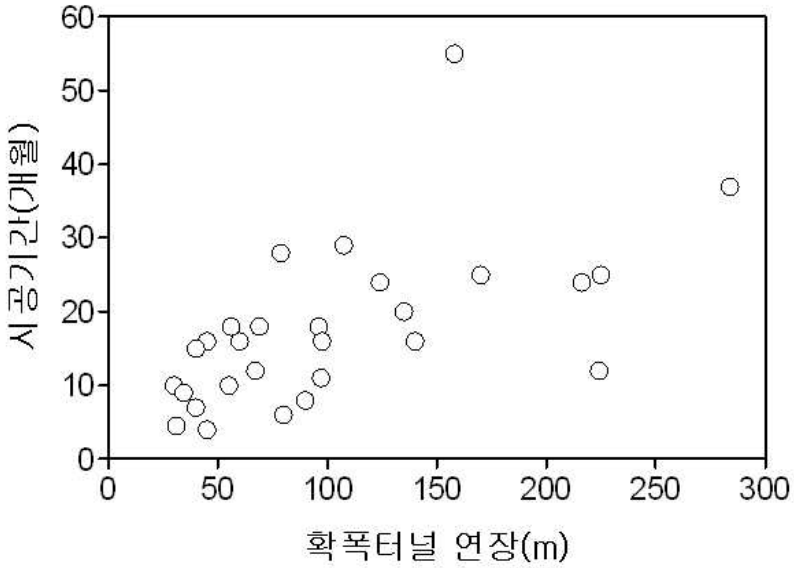


그림 2.6 확폭터널 연장과 시공기간

• 터널확폭이 이루어진 29개소의 지반분류를 나타내었다. 전체의 약65%인 19건이 토사층, 연암층에서 굴착이 이루어졌지만 중경암 이상의 지반에서도 35%인 10건이 이루어져 지반강도에 관계없이 적용될 수 있음을 보여주고 있다.

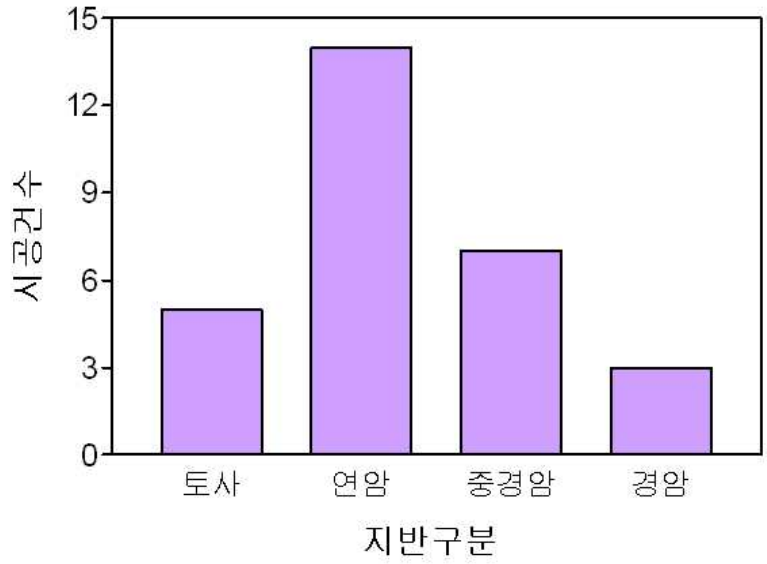


그림 2.7 확폭터널의 지반조건

■ 확폭의 목적

그림 2.8에 운영중 터널 확폭공사의 목적을 나타내었다. 공사목적은 교통 정체해소가 가장 많은 14건이었고 다음으로 선형개량, 인도설치, 분기합류부의 시공 순이었으며, 기존터널내 대피소의 신설에 의한 부분 확폭도 1건 있었다.

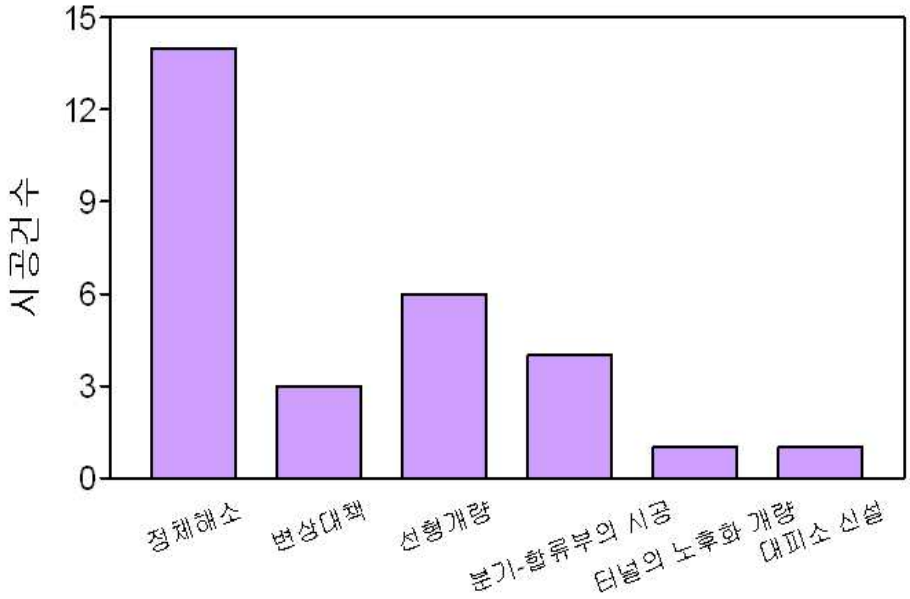


그림 2.8 터널확폭의 목적

■ 교통규제방식

확폭을 행한 사례터널의 교통규제방식을 나타내었다.

• 교통규제방식은 교호통행이 15건으로 가장 많고 다음으로 시간규제를 행한 교호통행이 9건이었다.

• 한편, 교통규제를 하지 않고 터널을 굴착한 경우가 4건 있었다. 이 4건 가운데 3건은 분기・합류부의 시공, 램프부의 합류차선의 추가 등 공사개소의 내공폭이 비교적 큰 경우이다.

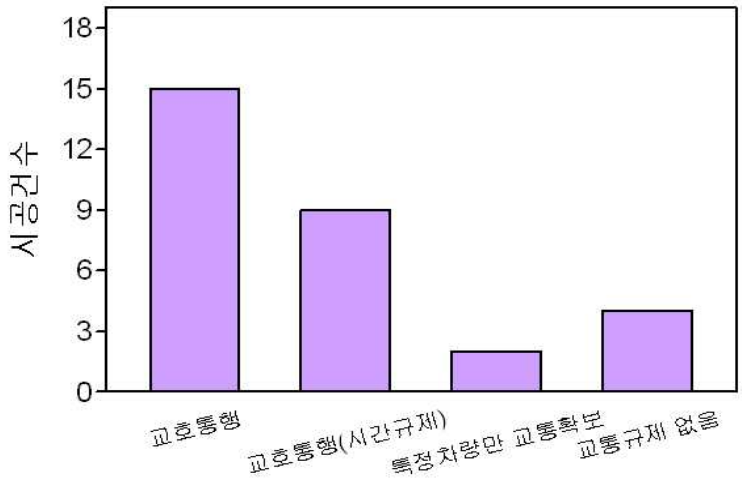


그림 2.9 운영터널의 교통규제 방식

■ 굴착방식

기존 시공사례를 바탕으로 한 확폭공법별 굴착방식과 시공기계의 예를 나타내었다. 그림 2.10의 28개소의 터널확폭에 대한 굴착방식을 보면 로드헤더 및 자유단면 형상기와 같은 기계 굴착이 전체의 65%를 차지하고 있으며, 발파와 기계 굴착을 병행한 경우가 21%(6건)이지만 이는 대부분 기계굴착을 하고 발파를 일부 병용한 경우이다. 순수한 발파에 의한 굴착을 행한 경우는 전체의 1건으로 대부분 기계굴착으로 시공하고 있음을 알 수 있다.

표 2.3 확폭공법별 굴착방식과 시공기계의 사용 예

확폭공법		굴착방식	시공기계
전체확대	양측확폭공법	기계굴착	범용굴착기
			전용굴착기
		발파굴착	범용・전용굴착기
	편측확폭공법	기계굴착	범용굴착기
			반전용굴착기
부분확폭	하부확폭공법	기계굴착	범용굴착기
	상부확폭공법	기계굴착	범용굴착기

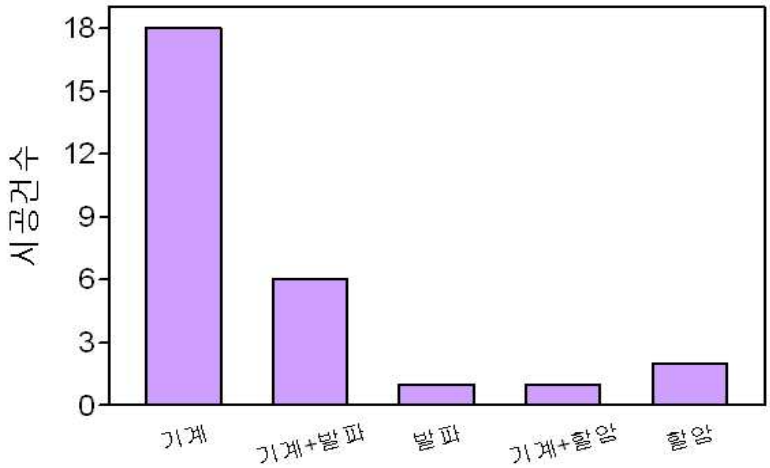


그림 2.10 확폭터널의 굴착방식

■ 안전의 확보, 프로텍터의 구조・치수

공영중 터널의 확폭시 안전 대책과 사용된 프로텍터의 규격을 나타내었다.

- 안전의 확보는 프로텍터를 이용한 공사가 23건으로 가장 많고, 다음으로 기존 터널의 라이닝을 프로텍터로서 이용한 사례가 5건이 있다(그림 2.11).
- 프로텍터의 연장은 시공연장과 같거나 약간 긴 경우가 많았다(그림 2.12).
- 프로텍터의 높이는 약 4m가 가장 많고, 폭은 약3m부터 약8m로 편차가 크지만 4m정도가 많다.

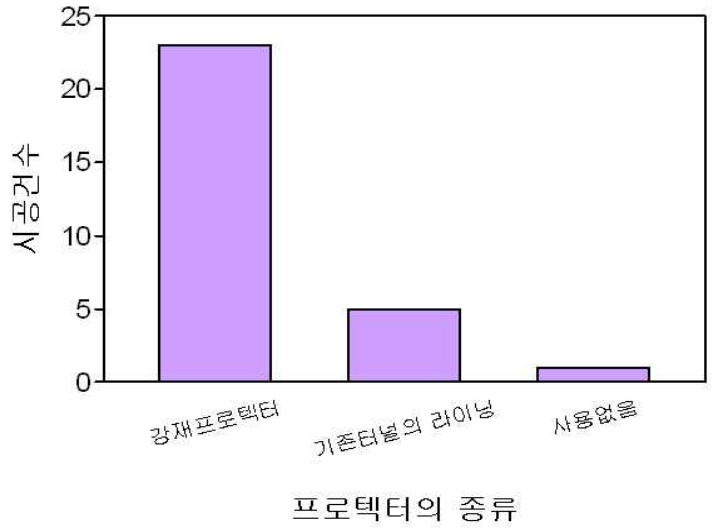


그림 2.11 터널굴착시 안전확보 방법

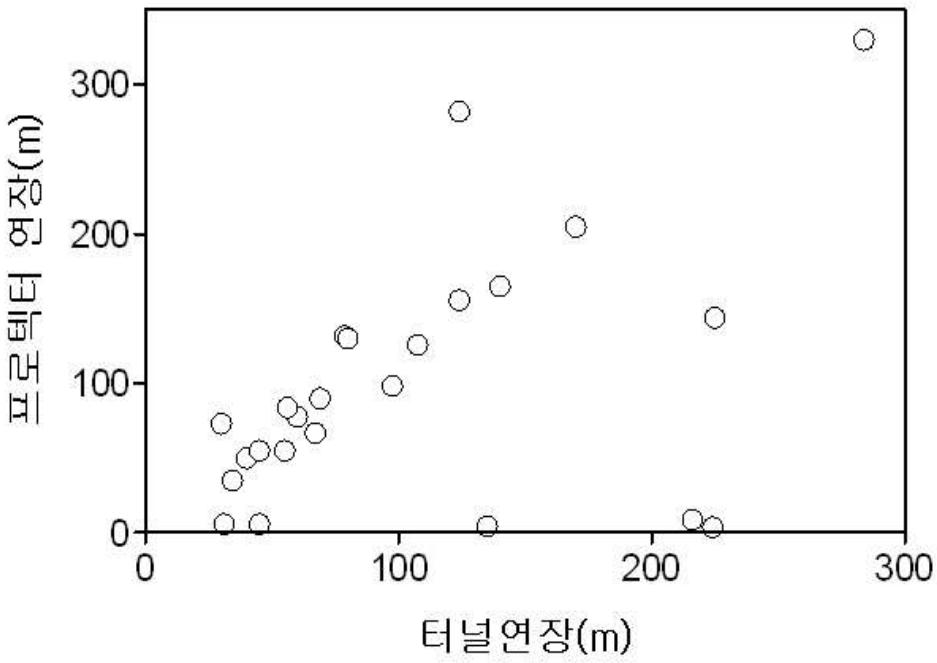


그림 2.12 시공연장과 프로텍터 연장

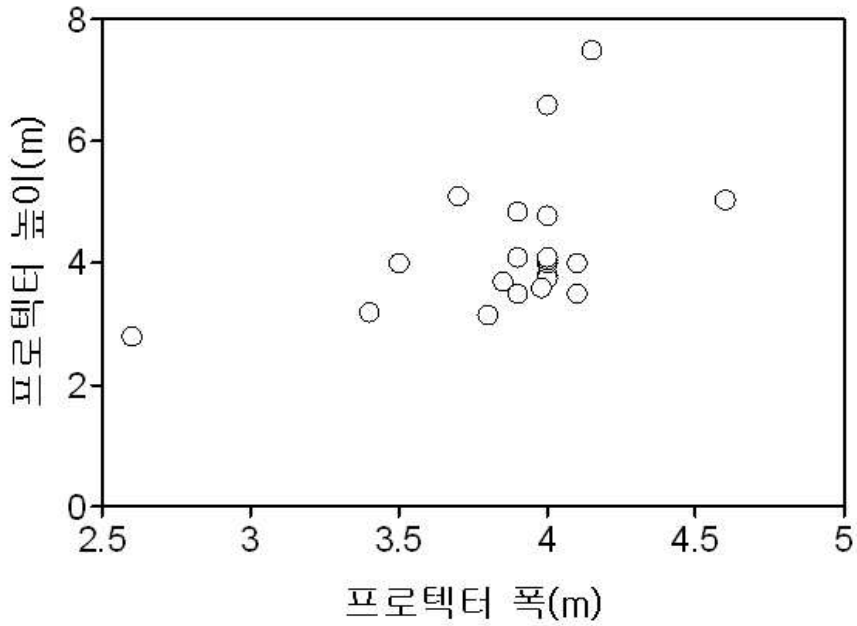


그림 2.13 프로텍터의 치수

■ 지보시스템

확대터널은 시공연장이 비교적 짧고 토피고도 50m 이하에서 시공된 경우가 많아 연암이하의 지반으로 추정되며 다양한 암종의 지반에서 수행된 것을 알 수 있다. 각 현장의 지반 물성값은 명시되어 있지 않지만 단편적으로 소개된 문헌과 암종 분포상 상당히 풍화가 진행된 지반인 것으로 추정할 수 있다.

이때 지보시스템은 신설터널과 마찬가지로 숏크리트, 록볼트, 강아치공이 주가됨을 알 수 있다(표 4).

특히 록볼트는 확대터널에서도 주지보재로서의 역할이 크며, 시공은 좁은 공간에서 작업이 이루어지므로 경사볼트를 채용하고 있는 곳도 있으며 길이가 짧은 것을 연결하여 시공하는 경우도 있다. 지반이 견고한 경우에는 강아치공을 생략하는 경우도 있으며, 숏크리트는 15~30cm까지 타설한 현장이 많다.

즉 기존터널의 확대시에도 신설터널의 지보시스템과 유사하며 단지 좁은 공간에서 작업이 이루어지기 때문에 기존공법의 시공성을 향상시키는 노력과 적절한 작업 프로세스를 구축하는 것이 중요함을 알 수 있다.

■ 보조공법

확대터널의 보조공법에 관해서는 휘폴링과 록볼트가 주로 사용되고 있으며, 극히 연약한 지반에서는 신설터널과 마찬가지로 측벽 혹은 상부에서 선진도갱 공법이 이루어지는 경우가 많다. 이외에는 신설터널과 비슷하나 표 4의 F, H터널은 프로텍터를 설치하기 전에 기존터널의 라이닝에서 배면 지반쪽으로 록볼트를 타설해서 선행보강을 해 놓은 상태에서 확대한 것이 특징이다. 또한 G터널의 경우처럼 특별한 보강없이 주변을 확대하는 경우도 있다. 각 터널의 지반조건, 보강공법 및 보조공법의 주요 제원은 표 2.4와 같다.

■ 록볼트를 주 보조공법으로 사용한 시공사례

그림 2.14에는 록볼트를 주 보조공법으로 사용한 확대터널의 지보패턴을 나타내었다. 확대널의 제원은 다음과 같다.

- 기존터널 시공년도 : 1950~1953

- 확대터널 시공년도 : 1989~1989
- 지보공 : CⅡ, DⅢ
- 숏크리트 : t=10cm(CⅡ), 20cm(DⅢ)
- 록볼트 : L 3.0m×8본/단면
- 보조공법 : 기존터널의 배면에 주입한 모르타르, 사전보강 볼트 L 3.0m×@0.6m, ctc 1.5m

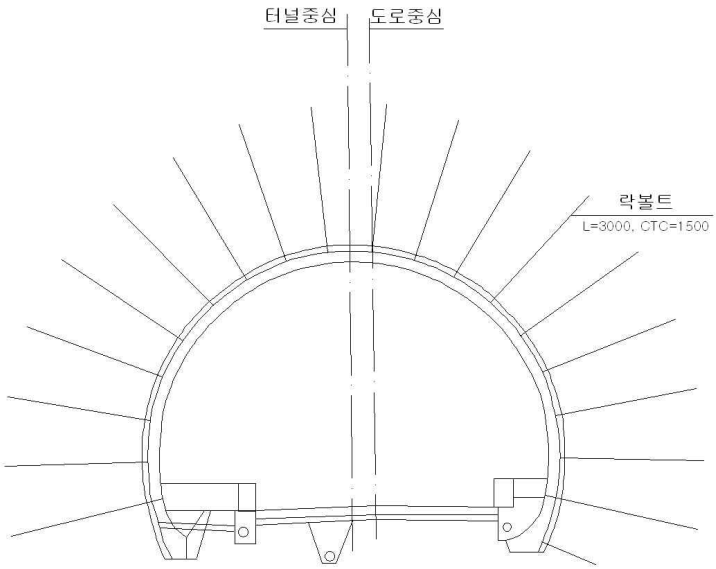


그림 2.14 록볼트를 주 보조공법으로 한 신설터널 표준패턴도

■ 훠폴링을 주 보조공법으로 사용한 시공사례

그림 2.15에는 훠폴링을 주 보조공법으로 사용한 확대터널의 지보패턴을 나타내었다. 확대터널의 제원은 다음과 같다.

- 기존터널 시공년도 : 1939
- 확대터널 시공년도 : 1998.03~1999.08
- 지보공 : H-200@1.0m
- 숏크리트 : t=25cm
- 록볼트 : L 4.0m×4본/단면, ctc 1.0m
- 보조공법 : 포어폴링 L 3.0m×@0.6m, 17본/단면, ctc 1.0m

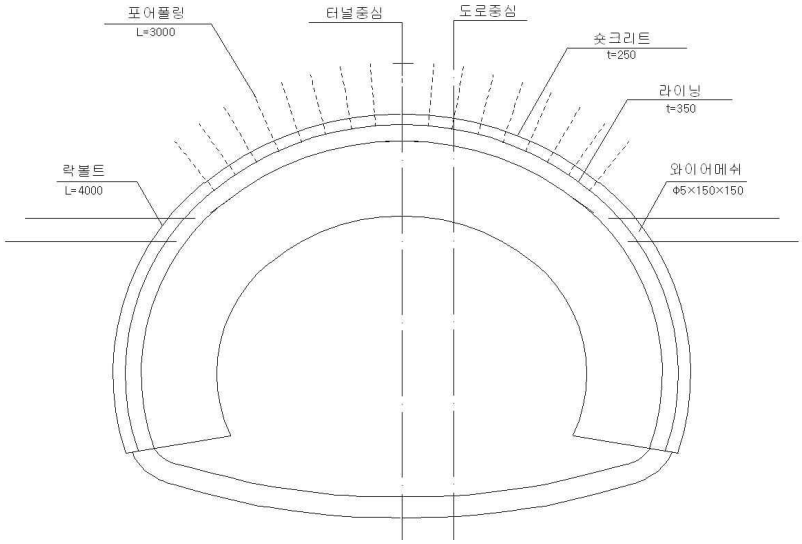


그림 2.15 훠폴링을 주 보조공법으로 한 터널

표 2.4 지보구조 및 보조공법

터널명	연장(m)	최대 토피고(m)	신설 단면적(㎡)	암종	시공	지보상태	보조공법
A 터널	34.5	-	75.0	화산각력암, 화산쇄설암	NATM(상부선진)	표준지보(CⅠ해당)	지반개량공(천단부)
B 터널	40.0	9	56.8	중생대 변성대의 강풍화 화강암(마사토화 됨)	재래공법(중단도갱, 상반선진)	숏크리트 t=20cm, 강지보 H150	
C 터널	55.0	20	54.9 ~ 58.8	녹색편암	NATM(상부선진)	표준지보(CⅡ, DⅢ), 측벽부만 록볼트 시공	포아폴링(부분적으로 우레탄 주입)
D 터널	56.0	23	75.3	제3기퇴적암인 이암	NATM(상부선진)	표준지보(DⅢ), 단 록볼트는 수평으로 한쪽에 2본 설치	포아폴링
E 터널	80.0	15	56.0	응회질사암, 역암의 호층	NATM(3분할시공)	표준지보, DⅠ~DⅢ의 패턴볼트(인력시공+연결볼트)	갱구부 포아폴링
F 터	97.0	40	66.0	애추퇴적암, 응회암	NATM(-)	표준지보, 록볼트는 천단부 L=3.0m,	선행볼트(천단부)

널						40°의 경사타설	
G 터널	97.5	50	74.9	제3기 퇴적암, 사암(qu=10MPa)	재래공법(상반선진, 링컷)	표준지보(재래지보 때문에 볼트 없음), 강지보(H150@0.75~1.0m)	특별히 없음
H 터널	107.5	30	60.8	안산암질응회각력암(qu=13.5MPa) 안산암력(qu=60~80MPa)	NATM(상반선진)	표준지보(CⅡ, DⅠ, E), 강지보(H125@1.0m), 숏크리트 t=15~20cm, 록볼트(패턴볼트)L=4.0m(인력시공+연결볼트)	선행볼트(천단부)
I 터널	124.0	30	105.0	제3기 사암, 이암의 호층(qu=40MPa)	NATM(측벽도갱선진)	표준지보(DⅠ), 강지보(H200@0.75m)	측벽도갱선진, 전구간 포아폴링
J 터널	142.0	20	66.33	제3기 신선세 세류사암	NATM(측벽도갱선진)	강지보(H200), 숏크리트 t=25cm	측벽도갱선진 전구간 포아폴링
K 터널	181.0	-	56.0	제3기 신선세의 응회암(qu=0.3~0.8MPa)	NATM(상반선진)	강지보 없음, 숏크리트와 록볼트만으로 지보	
L 터널	225.0	-	38.3	사암	NATM(-)	지보불명확(C, D), 인력시공+레그에 의한 연결볼트	
M 터널	265.0	-	65.2	점판암을 기반암으로 하며 상부에 화산역층, 용결응회암, 단구퇴적물	NATM(상반선진)	강지보(H200), 숏크리트 t=30cm 보강볼트 L=6.0m@1.0m	분기부에 록볼트 보강
N 터널	283.8	-	88.1~187.6	화강섬록암	NATM(상반선진)	숏크리트 t=15~20cm, 록볼트 L=4.0m(@1.2~1.5m)	
O 터널	1,440	-	-	사암·이암호층, 혈암	NATM(상반선진)	강지보(H200@1.0), 숏크리트 t=25cm, 록볼트 L=4.0m, 서쪽은 지반개량으로 록볼트 생략	주입식포아폴링

제3장 3차년도 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 터널 확대 안정성 분석 및 설계 기술 개발

1. 실제 시공사례를 통한 터널 단면 확대시 지반안정성

국내의 경우 교통을 통행시키면서 확대된 경우는 전무하여 본 절에서는 해외사례 중 시공 중 계측이 이루어진 현장데이터를 바탕으로 단면 확대시 지반 안정성에 관해 분석해 보고자 한다.

가. Isai 터널 확대 공사(일본, 발파 확대굴착 시 진동 계측사례)

(1) 터널 기본 정보

Isai터널은 연장 416m, 폭 4.1m로서 터널 내에서 교차통행이 불가능하여 연장 401m, 폭 8.0m로 확장한 사례이다. 확대시공은 주변에 광역임도가 있어 기존 교통을 우회시키고 발파에 의해 확대하여 2004년 공사를 완료하였다. 터널 지반은 중생대 및 그 이전의 화강섬록암이 주체이며 풍화 및 균열이 발달하였고 일축압축강도는 50~100MPa 정도이다. 터널 확대는 그림 3.1의 개념도와 같이 기존터널을 중앙부에 두고 양측을 확대하는 방식을 취하였다.

(2) 발파진동의 측정

발파진동은 확대터널 막장에서 약 20m, 40m, 80m 떨어진 3개소에 측정하였다. 이때 측정위치를 고정하고 있기 때문에 측정지점까지의 거리는 굴착이 이루어짐에 따라 점점 짧아지게 된다. 측정은 터널 축방향(X), 수평종단방향(Y), 연직방향(Z)의 3 방향 변위속도이다. 최소 측정거리를 비석 및 풍속으로 인한 케이블 등의 손상을 막기 위해 막장에서 20m 이격된 지점으로 설정하였지만 실제 발파시에는 5m 정도의 위치에서도 측정 가능하였다. 계측은 3회 발파에 대하여 실시하였다.

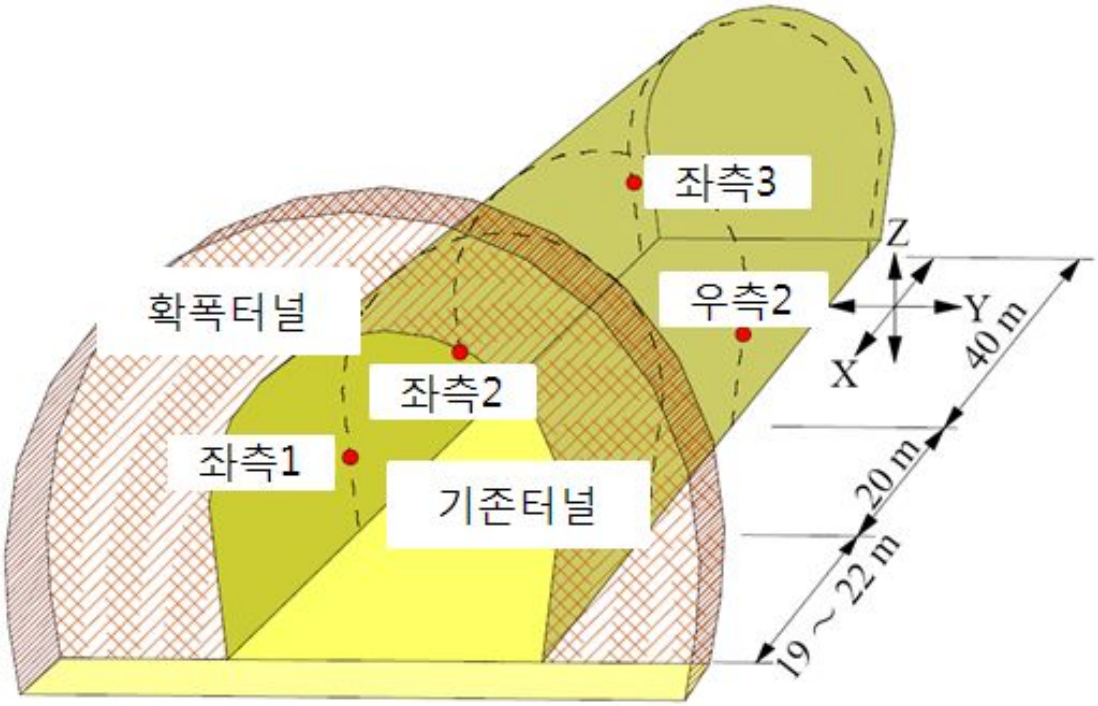


그림 3.1 발파진동 계측 위치도

(3) 발파진동의 검토

발파진동의 계측결과 일례를 표 3.1에 나타내었다. 보통의 신설터널에서는 막장의 자유면이 하나이기 때문에 심빼기에 많은 장약을 사용하고 저항도 크기 때문에 발파진동이 커지지만, 확대를 위한 발파에서는 장약량이 적고 막장에 이미 자유면(기존 터널)이 있어 발파진동은 표와 같이 크지 않은 것으로 나타났다.

발파진동의 예측식은 일반적으로 다음과 같이 표현되는 경우가 많다.

$$V = K \cdot W^{\alpha} \cdot D^{\beta} \quad \text{혹은} \quad \log V = \log K + \alpha \cdot \log W + \beta \cdot \log D$$

여기서, V : 발파진동속도(cm/sec=kine),

K : 발파나 지반의 조건 등에 의한 계수(40~1,000),

W : 지발당 장약량(kg),

D : 폭파점부터의 거리(m),

α : 폭약량에 대한 지수(0.5~1),

β : 거리감쇄지수(-1~-2)

표 3.1 확대터널 발파시 진동 계측 결과 사례

		측선좌측									측선우측		
		측점1			측점2			측점3			측점2		
		진동속도 V(kine=cm/s)			진동속도 V(kine=cm/s)			진동속도 V(kine=cm/s)			진동속도 V(kine=cm/s)		
뇌관 단수	거리(m)	20.0			40.0			80.0			40.0		
	지발당장약량 (kg)	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
순발	1.8	0.391	0.296	0.110	0.164	0.358	0.073	0.042	0.031	0.015	0.066	0.110	0.124
DS2	2.4	0.240	0.283	0.278	0.116	0.257	0.057	0.024	0.028	0.012	0.107	0.128	0.064
DS3	2.2	0.169	0.110	0.101	0.098	0.248	0.059	0.028	0.042	0.010	0.069	0.098	0.072
DS4	1.8	0.140	0.193	0.087	0.069	0.248	0.046	0.015	0.041	0.008	0.077	0.110	0.050
DS5	0.8	0.251	0.316	0.223	0.124	0.146	0.042	0.020	0.041	0.009	0.097	0.059	0.058
DS6	1.8	0.109	0.195	0.094	0.117	0.196	0.037	0.024	0.022	0.009	0.048	0.042	0.059
DS9	0.6	0.213	0.243	0.196	0.119	0.101	0.055	0.031	0.021	0.007	0.094	0.047	0.062

표 3.2에는 발파진동속도의 계측과 회귀분석에 의해 구해진 계수 K, α, β를 나타내었고 그림 3.2에는 회귀분석한 그래프를 나타내었다.

표 3.2 회귀분석 결과

	X	Y	Z	전체
K	25	28	37	30
a	0.157	0.316	0.225	0.233
β	-1.598	-1.540	-1.884	-1.674

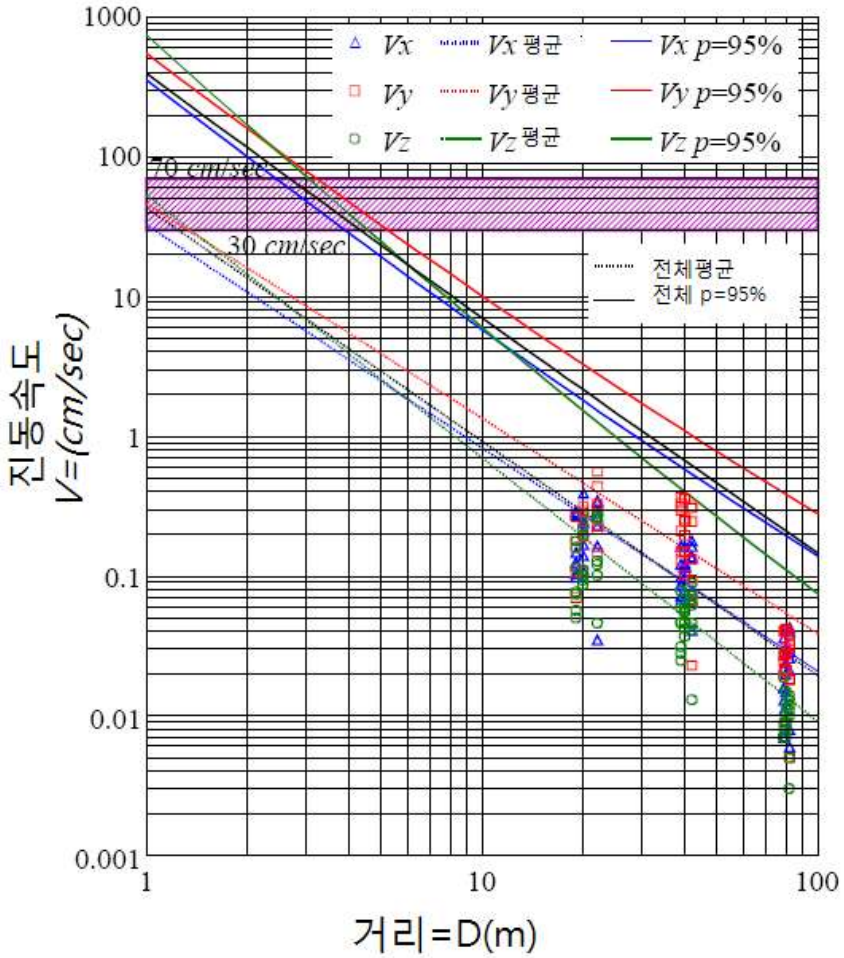


그림 3.2 발파진동의 예측

회귀분석결과로부터 발파나 지반의 조건 등에 의한 계수 K는 일반적인 값보다도 작고 발생하는 진동도 작은 것을 알 수 있다. 또한 거리감쇄 지수 β는 지금까지 사용되어온 -1.5~-2.0의 범위에 있지만 연직방향(Z방향)의 감쇄가 다른 2방향보다 크고 발생하는 진동도 작다. 한편, 장약량에 대한 지수 α는 일반적인 값보다도 작고 진동속도에의 영향은 거의 없다. 이것은 장약량이 적고 지반이나 발파에 의한 편차에 비하여 영향이 작고 명료한 차이가 없기 때문으로 생각된다. 또한 터널 축방향(X방향)의 K와 α가 다른 2방향에 비하여 작다. 이것은 진동의 방향이 장약공의 방향과 일치하기 때문에 발생하는 진동이 작고 장약량의 영향도 작아지는 것으로 생각된다.

회귀분석 그래프로부터 보통의 범위(수 m이상)에서는 수평횡단방향(Y방향)의 진동이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 발파가 터널 중심을 향하여 이루어지기 때문에 기존 터널의 벽면에 직각방향의 진동이 커지기 때문으로 판단된다.

새롭게 관측된 값의 95%를 포함하는(이의 진동속도를 넘을 확률이 5%) 범위의 상한값을

그림에 나타내었다. 한편, 콘크리트에 균열을 발생시키는 발파진동속도는 지금까지의 실험으로 보아 30~70cm/sec로 평가되고 있다. 이 한계값보다 막장후방 3~5m의 범위에서는 콘크리트에 균열이 발생할 가능성이 있다. 그러나 균열이 발생하여도 경미하고 기설터널의 안정을 해치지 않는다면 이 후에 굴착되므로 아무런 문제도 되지 않을 것으로 판단된다.

(4) 발파진동이 기존터널에 미치는 영향

① 발파 및 지반조건 등에 의한 계수(K값)가 작고 발생하는 발파진동도 작다

② 확대터널에서는 기존 터널이 자유면이 되어 순발과 단발의 차이가 거의 없다.

③ 장약량이 작기 때문에 지반이나 발파조건 등에 의한 편차가 작아지고 장약량이 발파진동에 미치는 영향은 명확하지 않다.

④ 거리감쇄 지수는 -1.5~-1.9이며 특히 연직방향의 감쇄가 크다

⑤ 발파에 의한 진동이 기존 라이닝 콘크리트에 미치는 영향은 작고 균열이 발행하여도 막장에서 3~5m의 좁은 범위이며 기존 터널이 불안정하게 되는 큰 손상을 받는 범위는 더욱 작다고 생각한다.

이상 발파에 의해 발생하는 진동은 작고 기존 라이닝이 순차적으로 제거되는 확대 터널에서는 거의 문제가 되지 않는다고 생각한다. 단 라이닝 콘크리트의 노후화 등에 의해 이미 어떤 손상이 있는 경우에는 보다 넓은 범위에 영향을 미칠 수도 있다고 생각한다.

나. Tonomie터널 확대공사(일본, 굴착기계에 의한 확대 굴착시의 계측사례)

(1) 지형 및 지질

Tonomie 터널은 가나가와현(일) 하코네에 위치하고 있으며 화산활동으로 생성된 1,000m내외의 산들과 중앙화구들로 이루어졌다. 지층은 화산의 일차퇴적물로 이루어졌으며 상부는 화산력응회암층, 하부는 응회각력암층으로 이루어졌다. 터널(철도터널) 구간은 상부의 화산력응회암층을 관통하고 있다.

(2) 확대계획

- 확대구간 : 25m
- 내공단면 : $20m^2 \rightarrow 50m^2$
- 굴착공법 : 상부반단면 선진공법
- 공법 : NATM

- 공사기간 : 1990.03～1994.07

다음 그림 3.3과 3.4에는 확대 전후의 터널 전경을 나타내었다.

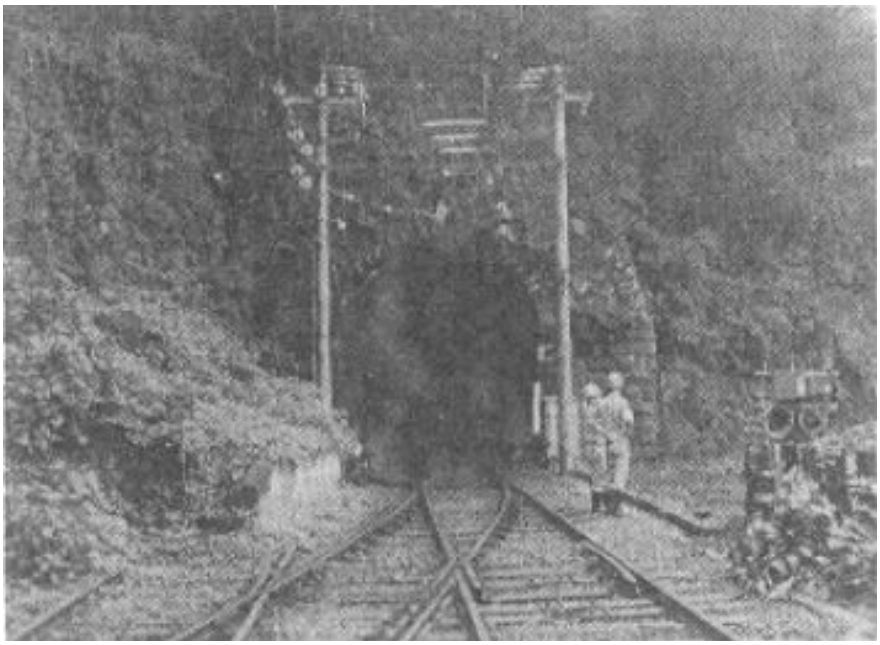


그림 3.3 토노미에 터널 전경(확대전)

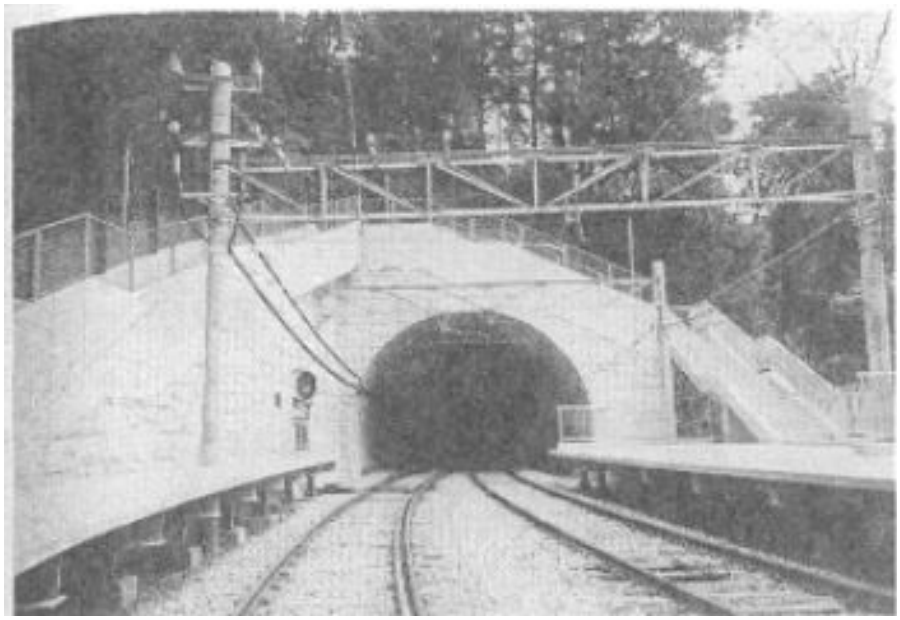


그림 3.4 토노미에 터널 전경(확대후)

(3) 시공순서

확대터널의 시공순서는 표 3.3과 같이

① 기존터널의 방호공 설치

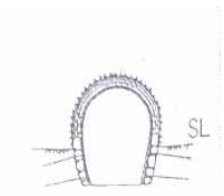
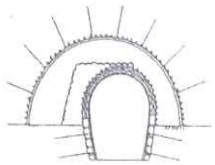
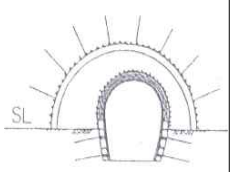
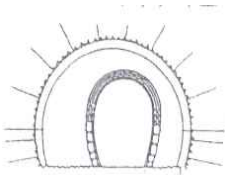
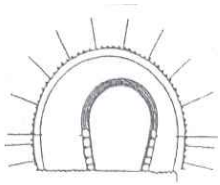
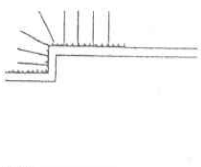
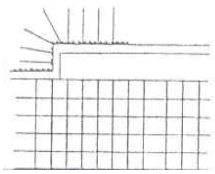
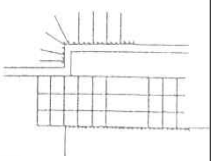
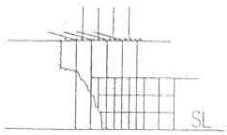
② 상반굴착+지보공

③ 상반라이닝 콘크리트

④ 상반굴착+지보공+하반 라이닝 콘크리트

⑤ 방호공 철거 및 해체의 순으로 이루어졌다.

표 3.3 확대터널의 시공순서

①방호공 설비	②상반굴착공	③상반 라이닝 콘크리트	④하반굴착 및 측벽콘크리트	⑤방호공 철거
				
				

(4) 계측계획

그림 3.5에 확대구간의 계측공 배치도와 변위계측을 위한 배치도를 나타내었다. 계측 구간 30m에서 막장관찰은 매 막장 실시하며, 내공변위는 5개소, 응력은 2개소에서 측정하였다.

거리(m)	6	12	18	24	30
측점위치	A	B	C	D	E
갱내관측	전 구 간				
내공변위	*	*	*	*	*
응력측정		*			*

확 폭 구 간 | 추정영향구간

서쪽갱구

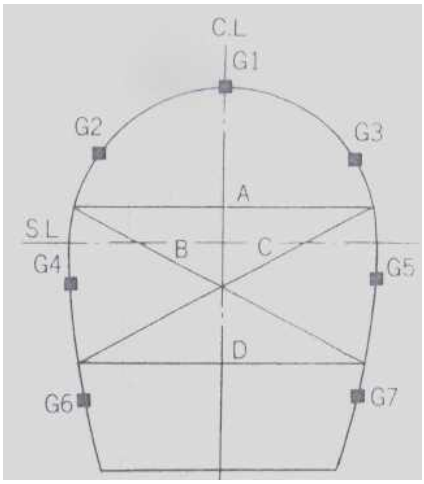
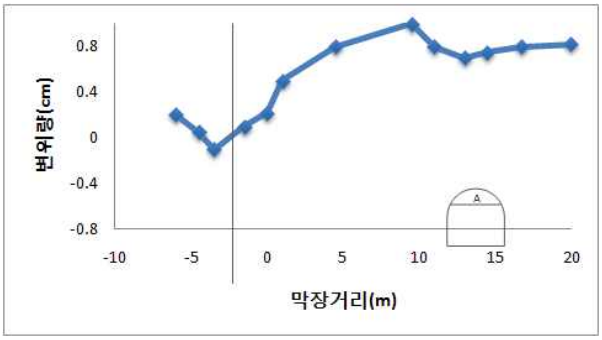


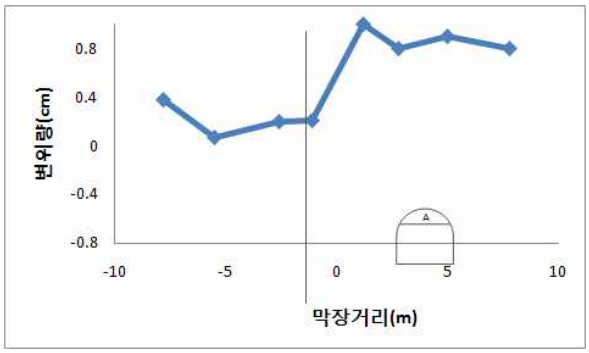
그림 3.5 터널 계측단면 및 계획

(5) 계측결과

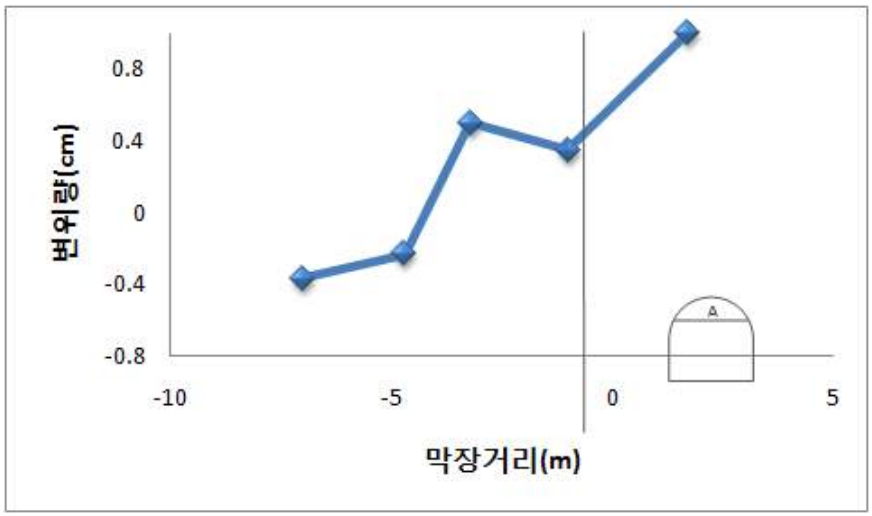
그림 3.6에는 터널확대와 동시에 계측된 기존터널 천단부의 수평변위를 나타내었다. 막장전방에서는 융기가 발생하고 있으며 후방에서는 침하를 나타내고 전체적으로 10mm 이내의 범위에서 발생하고 있다. 이는 보통 국내 신규터널 건설현장에서 관리기준 값으로 설정하고 있는 50mm에 비하면 상당히 작은 값을 보이고 있다.



(a) 확대 단계별 변위량



(b) 확대 단계별 변위량



(c) 확대 단계별 변위량

확대단계별 변위량(+ : 융기, - : 침하)

그림 3.6 계측데이터 분석

다. Sikisima터널 확대공사(일본, 발파굴착에 의한 확대 사례)

앞에서 분석하였듯이 해외시공 사례의 경우 대부분 브레커, 백호우 등을 이용한 기계식 굴착을 수행하고 있다. 그러나, 국내의 경우 확대공법이 수행된다면 지반 및 장비 수급 특성상 발파식 굴착으로 이루어질 가능성이 크므로 발파 굴착으로 확대된 시공사례의 계측데이터를 분석해 보고자 한다. 이 사례는 후절에서 설명하는 나폴레온 햇형 스테이지 공법을 이용한 것으로 1건의 시공 사례가 있다. 그림 3.7에 개념도를 나타냈다. 이 방식은 이동식 프로텍터 위에 슬라이드식 TWS(Tunnel Work Station)을 탑재한 형태이다.

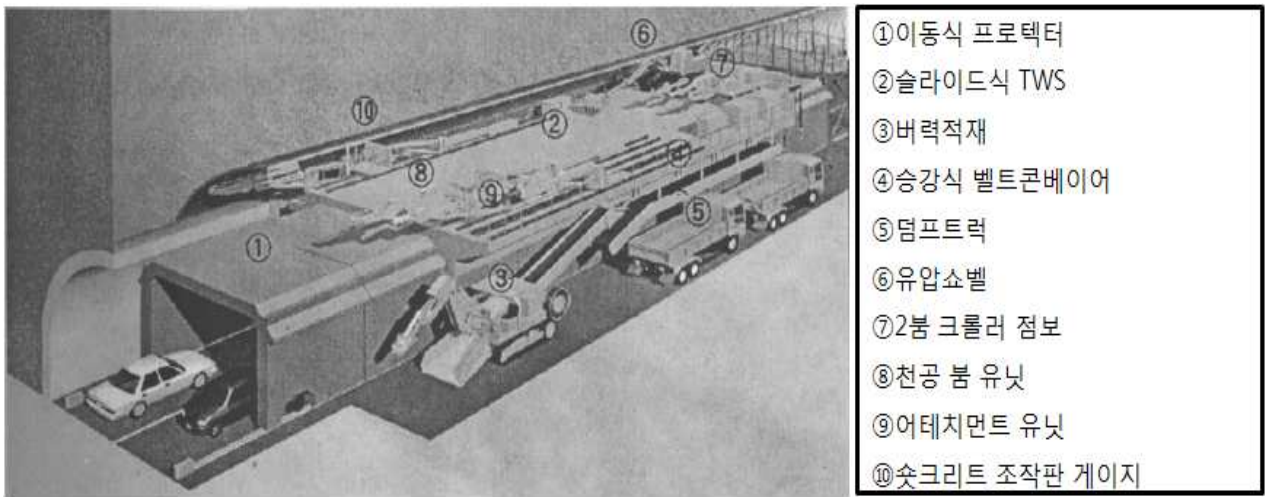


그림 3.7 발파형 굴착방식인 나폴레온 헷드 형 스테이지 개념도

이의 시공사례를 간략히 소개키로 한다.

(1) Sikisimanai(시키시마)터널의 개요

- 소재 : 일본 홋가이도 일반국도 229호선
- 확대개요 : 내공단면적 31.0m^2, 폭원 6.0m → 내공단면적 62.9m^2, 폭원 9.75m로 확대
- 지반개요 : 기반암은 안산암으로 평균 일축압축강도는 1,500kg/cm^2, 최대 일축압축강도는 2,600kg/cm^{2}이며 130kg/cm^{2}의 파쇄대 및 풍화대가 혼재되어 있다.

(2) 발파시스템

발파시스템은 아래와 같은 이유로 인해 비전기식 뇌관을 사용한 제어발파를 하였다.

① 일반차량을 통행시키면서 장약작업을 하기 때문에 누전전류, 정전기 등에 민감하지 않은 비전기식 뇌관을 사용하였다.

② 기존 라이닝에 발파진동의 영향을 고려하여 1단의 장약량을 줄이고 단수를 많이 두어 발파진동을 경감시켰다.

③ 버력의 크기를 가능한 작게(직경 40cm 정도)하고 시간적으로 분산시켜 프로텍터에 충돌하도록 발파설계를 통해 프로텍터에 대한 설계하중을 저감시켰다.

다음 그림에는 터널표준단면(그림 3.8) 및 발파패턴도 (그림 3.9)를 나타내었고 그림 3.10에는 발파후 단면 모습을 나타내었다.

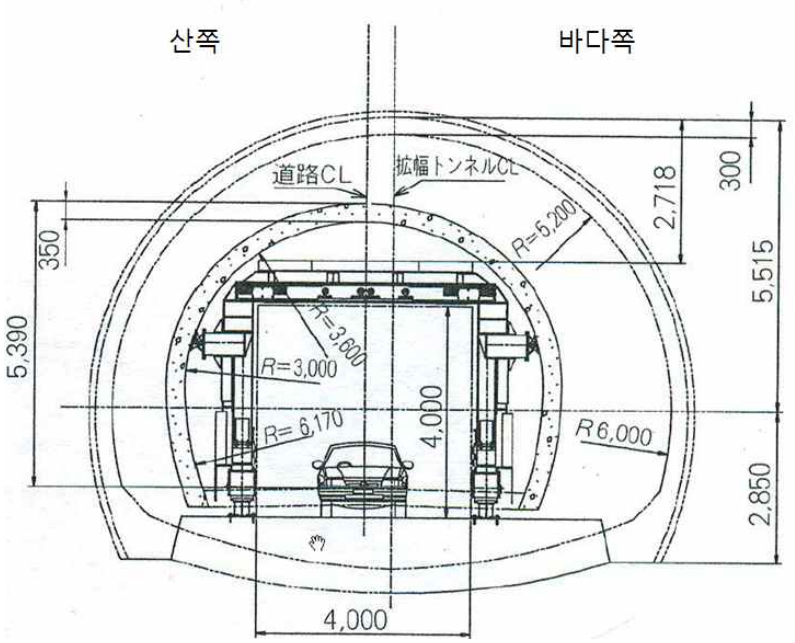


그림 3.8 터널표준단면

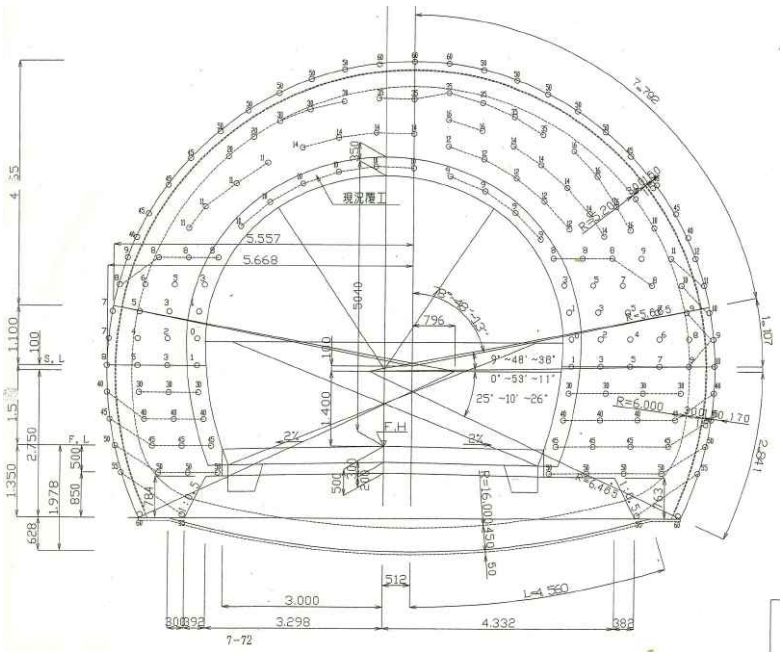


그림 3.9 발파패턴도



그림 3.10 발파 직후의 막장모습

(3) 발파진동 측정

막장에서 7.5~12m 떨어진 A 지점, 측정 A에서 5m 떨어진 B, 측정 B로부터 5m 떨어진 C의 3 지점에서 발파진동을 측정하였다.

다음 표 3.4와 같이 실제로 사용한 1단의 최대 장약량은 0.6~2.2kg의 범위였기 때문에 계획 최대 장약양(3.0kg)에 미치지 못하지만 진동속도는 막장에서 7.5m~12.5m에서 측정한 측점 A에서 최대 3.55cm/s, 측점 B 및 측점 C에서는 1cm/s에 미치지 못하였다.

표 3.4 발파진동 속도 측정 결과

회수	지발당 장약량 (kg)	항목	측점 A			측점 B			측점 C		
1	0.6	막장에서의 거리(m)	10.5			15.5			20.5		
		방향*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		진동속도(cm/s)	0.30	0.10	0.20	0.16	0.12	0.30	0.07	0.10	-
2	1.0	막장에서의 거리(m)	7.5			12.5			17.5		
		방향*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		진동속도(cm/s)	3.55	1.43	0.70	-	-	-	0.13	0.18	-
3	2.0	막장에서의 거리(m)	10.5			15.5			20.5		
		방향*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		진동속도(cm/s)	1.13	0.78	2.33	0.65	0.38	0.56	0.35	0.20	-
4	2.2	막장에서의 거리(m)	12.5			17.5			22.5		
		방향*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		진동속도(cm/s)	1.13	0.88	2.18	0.45	0.40	0.75	0.25	0.13	-

(4) 전파계수 K 값의 산정

위의 표와 같이 측정결과를 바탕으로 나타낸 진동속도 예측식을 이용하여 전파계수 K값을 구하였다.

$$\nu = K\frac{W^n}{r^m}$$

여기서, υ:진동가속도 값(cm/s),

W : 장약량(kg),

r: 거리(m),

K : 전파계수,

m,n : 계수(m=2, n=2/3)

K값은 31~201(평균 71)정도이며 지금까지의 실적에 의한 K값의 범위(200~700)과 비교하면 작은 값이다. 이는 발파진동이 커지는 심빼기 발파가 없기 때문으로 생각된다.

(5) 발파진동의 평가

기존 터널에 프로텍터 삽입길이인 5m 지점에서의 발파진동이 기존 라이닝에의 영향을 평가하면 최대 K값(201), 계획 최대 지발당 장약량 3.0kg의 조건에서 이용하여 막장에서 5m 지점의 진동속도를 산출하면 16.8cm/s가 된다. 이는 산요신간선에서 시험한 미세균열이 생기기 시작하는 진동치가 33.8cm/s인 것과 비교하면 반 정도로 작은 값이다.

라. 4개소 터널의 계측데이터 분석

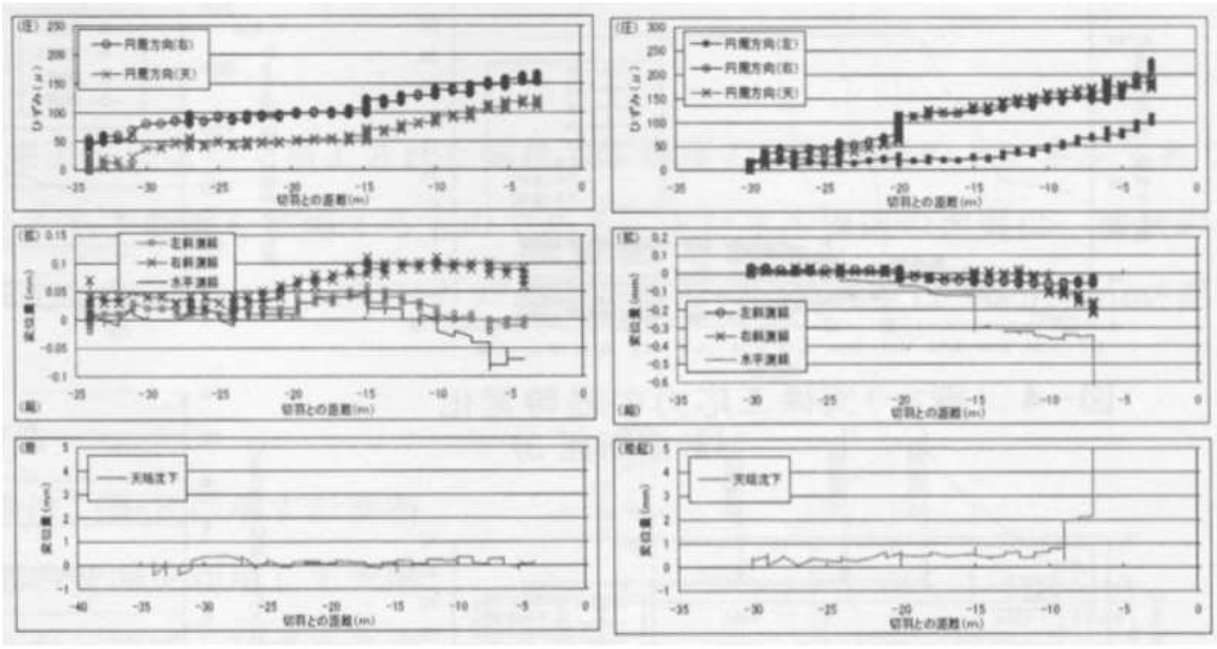
石村(2005)는 일본에서 시공된 4개소 터널 확대사례의 계측데이터를 분석하였는데 각 터널의 확대 제원은 다음 표 3.5와 같다.

표 3.5 분석터널의 제원

터널명		A터널	B터널	C터널	D터널
기존터널 굴착공법		재래공법 1973년 완공	재래공법 1950년 완공	재래공법 1962년 완공	재래공법 1983년 완공
연장(m)		975.0	115.5	146.0	81.9
내공폭(m)		9.8	6.0	6.0	6.0
내공높이(m)		6.3	4.9	5.0	5.1
라이닝 두께 (cm)		50~70	30	35	30
확대터널공법		NATM	NATM	NATM	NATM
연장(m)		170	120	146	102
내공폭(m)		15.6	12.5	9.75	12.5
내공높이(m)		8.0	7.0	7.1	7.0
라이닝 두께 (cm)		45.4	30.3	30	30.5
주요지반		사암, 혈암, 응회암 호층	이암	안산암	실트질이암
지반강도(N/mm2)		16~30	1~9	13~150	4~10
최대토피고(m)		약 38	약 38	약 42	약 30
굴착방식		기계굴착	기계굴착	발파굴착	기계굴착
계측항목	기존라이닝의 계측	라이닝 변형율 천단침하 내공변위	천단침하 내공변위	-	-
	신설라이닝의 계측	강지보응력, 숏크리트 응력, 록볼트 축력	강지보 응력, 숏크리트 응력, 록볼트 축력	-	-
	사전 록볼트 계측	-	-	록볼트 축력	록볼트 축력

(1) 기존터널의 라이닝 계측결과

다음 그림 3.11에는 A터널의 기존터널 라이닝의 변위 계측결과를 나타내었다. 계측단면4에서는 콘크리트 라이닝의 원주방향 변형율은 막장이 30m(2D)정도에서 일단 증가하고 15m(1D)까지 근접하면 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 내공변위는 25m(1.5D)정도까지 막장이 근접하면 수평계측선 및 좌우계측선의 변위가 원주방향의 변형율 변화에 대응하여 변화하고 막장이 15m(1D)정도 까지 근접하면 지금까지 확대 경향이었던 내공변위가 전체적으로 수축쪽으로 변화하고 있어 굴착에 의한 영향을 볼 수 있다. 단, 천단침하의 변화는 보이지 않고 있다. 계측단면5에서는 콘크리트 라이닝의 원주방향 변형율은 막장이 25m(1.5D)정도까지 근접하면 현저한 증가경향을 보이고 있고 막장이 3m까지 근접하면 급격한 증가를 보이고 있다. 내공변위는 25m정도까지 막장이 근접하면 수평측선 및 좌우측선의 변위가 축소쪽으로 변하고 막장이 10m(0.6D)정고 근접하면 천단침하가 지반쪽으로 융기하는 방향으로 변하고 있다.



(a) 계측단면 4　　(b) 계측단면 5

그림 3.11 기존터널 라이닝의 계측결과

다음 그림 3.12 및 그림 3.13에는 A터널의 강지보 및 숏크리트 응력의 경시변화를 나타내었다.

각각 천단의 측점을 제외하고 지보설치 후 서서히 응력이 감소하지만 하반굴착의 영향으로 일단 저하하고 이후 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 단, 증가후의 각각 지보에 발생하는 응력은 모두 작다. 다른 계측단면에서도 경시변화의 거동은 거의 같은 양상이었다.

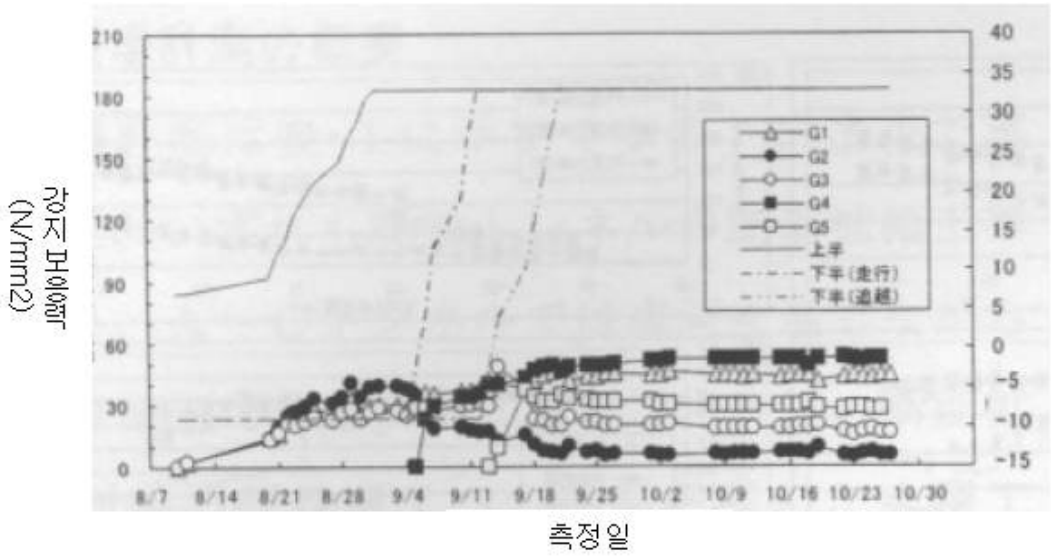


그림 3.12 강지보 응력 경시변화

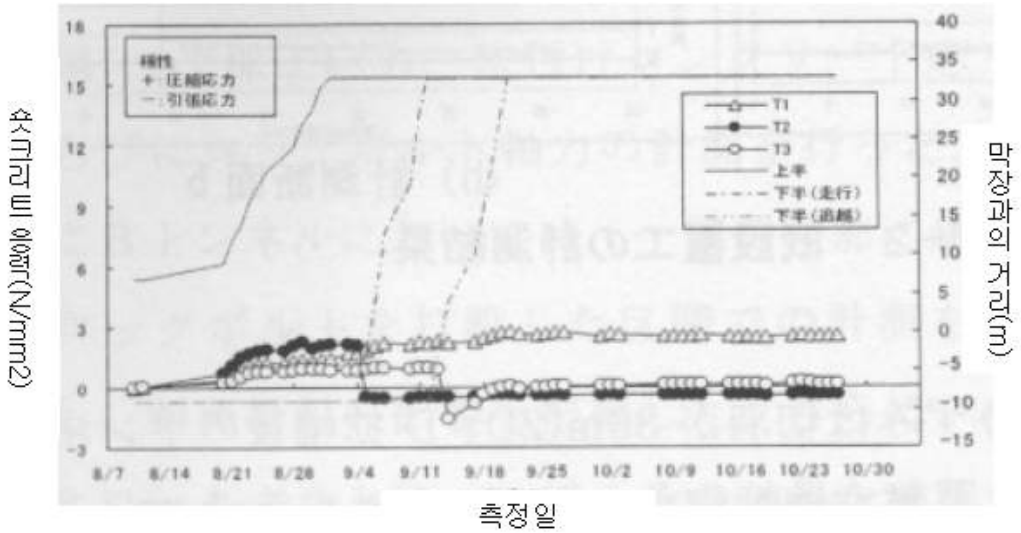


그림 3.13 숏크리트 응력 경시변화

다음 그림 3.14에 각지보가 수렴되었다고 생각하는 최종값을 나타내었다. 강지보응력은 토피고가 20m로 저토피 계측단면 1, 2의 일부 측점에서는 약 240N/mm^2 정도로 비교적 큰 응력을 보이고 있다. 토피고가 30m 이상의 계측단면 3, 4에서는 지보패턴은 모두 DⅠ이지만 일부 측점에서 최대 약 60N/mm^{2}의 응력을 보이고 있지만 전체적으로 보면 20~30N/mm^{2}으

로 비교적 작다. 숏크리트 응력도 토피고가 얕은 지점에서 약 10N/mm^{2}을 넘는 부분이 있지만 대부분 4N/mm^{2}으로 작음을 알 수 있다.

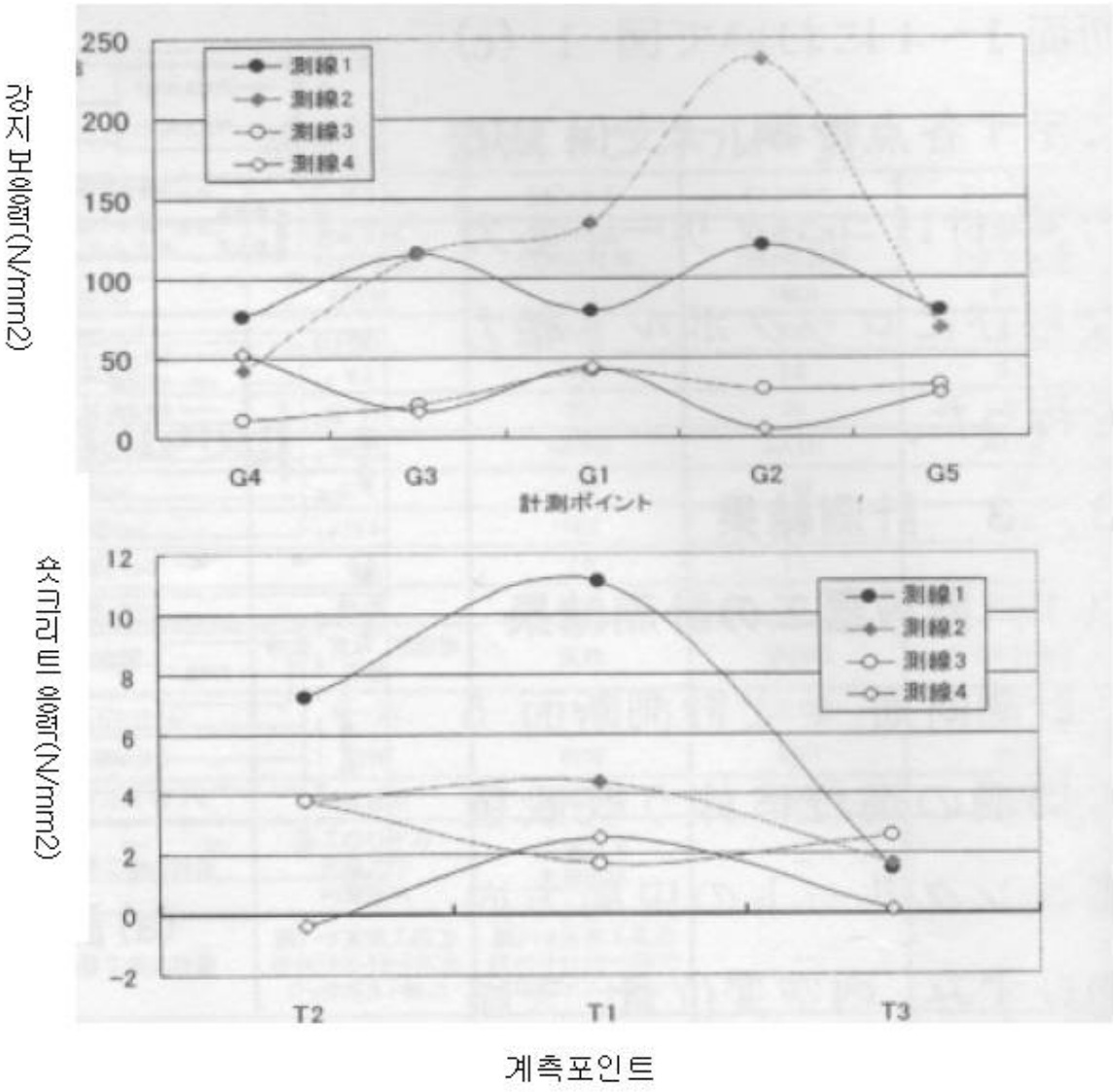


그림 3.14 각 지보부재의 최종값

다음 그림 3.15에는 B터널의 천단침하 및 내공변위를 나타내었다. 천단침하량은 갱구부 DⅢa 및 터널 중앙부근의 집조패턴 DⅠ구간에서도 최대 약 20mm 이내로 작다. 내공변위는 계측위치에 따라 다르며 계측단면 1에서는 거의 0, 계측단면 2에서 지반쪽으로, 계측단면 3에서 내공측으로 각각 변화하고 있다.

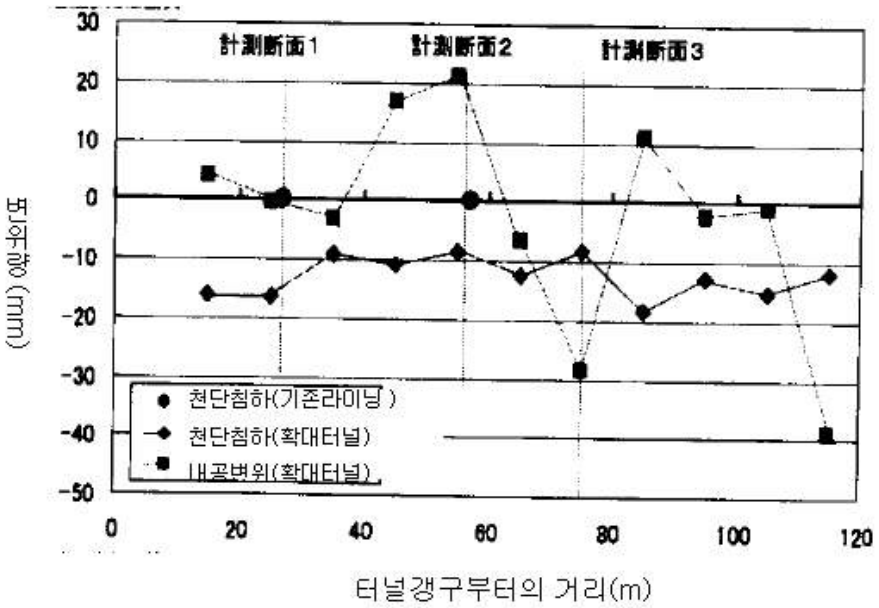


그림 3.15 천단침하 및 내공변위

다음 그림 3.16에는 D터널의 록볼트 축력에 대해 막장 진행에 따른 경시변화를 나타내었다. 그림으로부터 막장 진행에 따라 큰 축력은 볼 수 없지만 이후 막장 통과후에 인장응력이 증가하고 10~20m 정도 막장 통과후 일정한 값에 수렴하고 있다. 이 축력의 변화는 사전에 록볼트를 타설하는 것으로 막장 통과시에 천단에서 어깨부에 걸쳐 지반굴착에 따른 지반 변형을 억제하는 효과 등을 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

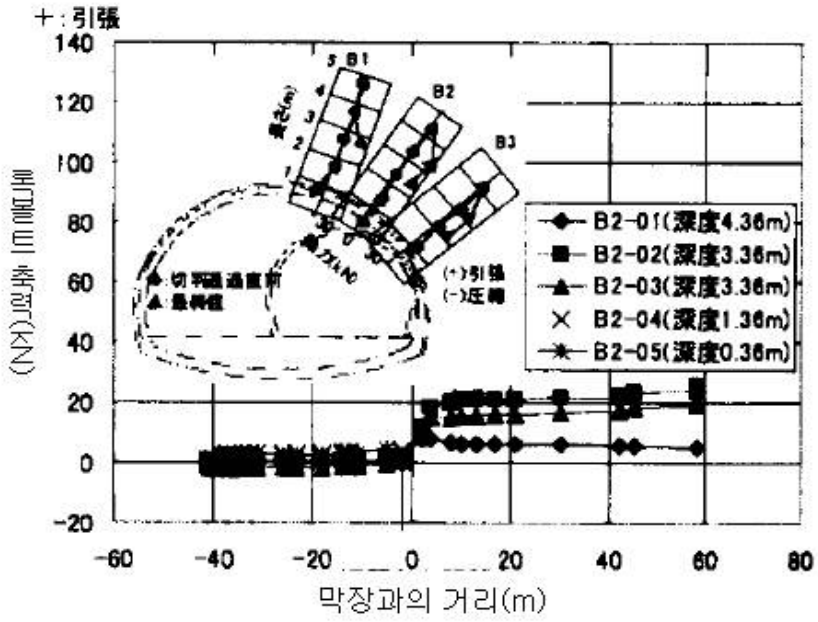


그림 3.16 록볼트 축력

2. 터널 단면 확대형식 및 규모에 따른 지반 안정성

기존 터널의 확대는 동일 차로의 신설 터널에 비해 공사비가 많이 드는 단점이 있지만 용지 경계, 주변 건물에의 영향, 개발 제한 등과 같은 문제가 발생할 소지가 많아 부득이 기존 터널을 확대해야 하는 장소 즉, 교통체증이 심해 차로의 확대 요구가 크고 주변 건물이 산재해 있는 번잡한 도심지 터널에서 매우 유용한 공법이다. 이 경우 교통을 차단한 후 터널을 확대할 경우 민원의 발생이 매우 커 공사의 진행이 매우 어려우므로 교통의 흐름을 유지한 체 터널을 확대해야하며 이를 위해 프로텍터 혹은 기존터널 내부를 보호할 수 있는 장치를 사용하게 된다. 프로텍터를 설치한 후 프로텍터 내측에서는 차량의 흐름을 유지하고 외측과 터널과의 공간에서는 터널을 확대 굴착한다. 즉, 신설 터널 공사와 터널 확대 공사의 가장 큰 차이점은 프로텍터의 이용과 이에 수반되는 발파의 설계 혹은 소형 기계장치에 있다.

터널의 대부분은 수백m ~ 수km에 이르며 프로텍터 외측에서 굴착 시 발생하는 충격력으로부터 내부 차량을 보호하기 위해서는 프로텍터를 강성이 큰 강재로 하는 것이 현실적이다. 그러나 전 범위를 프로텍터로 보호하기에는 공사비가 과대해지므로 비경제적이며 현실적으로 어려움이 있다. 반면 다음 그림과 같이 굴착에 따른 지반의 거동을 예측하여 프로텍터의 보호범위를 산정하고 공사의 진행에 따라 프로텍터를 이동시킬 수 있다면 매우 경제적이고 효율적인 공사가 될 것이다(그림 3.18).

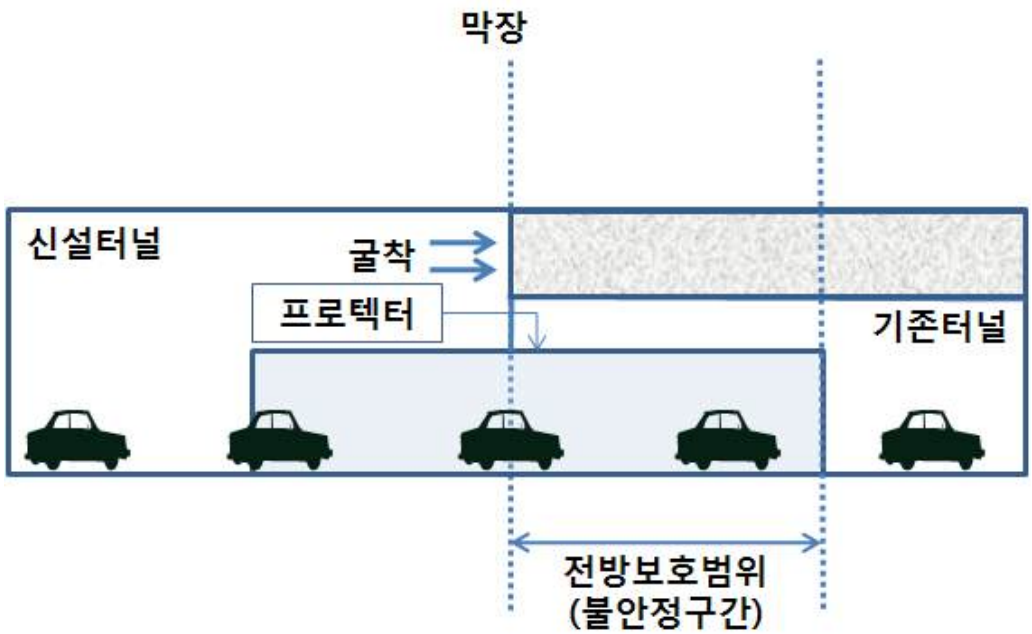


그림 3.17 이동식 프로텍터 보강범위

본 장에서는 굴착단계를 고려한 3차원 유한요소해석을 통하여 확대차로 및 확대종류에 따라 표준지보패턴에서 지반의 거동을 예측하고 사례분석을 통하여 터널 막장 전방으로 프로텍터로 보호해야할 범위 산정을 하고 굴착 시 어떠한 종류의 확대가 유리한지 살펴보고자 한다. 또한, 터널 확대는 좁은 공간에서의 굴착이 많으므로 이러한 곳에서는 터널 주지보재중 하나인 록볼트의 시공이 매우 어렵다. 이러한 경우 록볼트를 굴착방향과 경사지게 설치하는 경우의 지반 안정성에 관해 분석해 보고 이의 현장 적용성에 대해 검토해 보았다.

가. 터널확대 형식에 따른 지반 안정성 분석

(1) 해석 개요

확대의 종류는 크게 하부부분, 상부부분, 편측, 양측 확대로 분류할 수 있다. 국내의 경우 기존의 산악터널로 시공된 곳은 연암 이상의 암반이 예상되므로 본 연구에서는 연암지반의 강도특성을 4가지로 분류 후 수치해석을 통해 기존의 1차로 터널을 3차로 터널로 편측 및 양측으로 확대 시 터널의 거동특성을 분석하였다.

해석 case는 다음 표 3.6에 나타낸 바와 같이 탄성계수와 점착력에 따라 4가지의 경우에 대해 해석을 수행하였다.

표 3.6 지반 물성값

구분	탄성계수 (t/m^2)	포아송비 (ν)	단위중량 (t/m^3)	점착력 (t/m^2)	내부마찰각 (°)	K_0
case1	100,000	0.3	2.5	40	35	0.5
case2	100,000	0.3	2.5	13	35	0.5
case3	50,000	0.3	2.5	40	35	0.5
case4	50,000	0.3	2.5	13	35	0.5

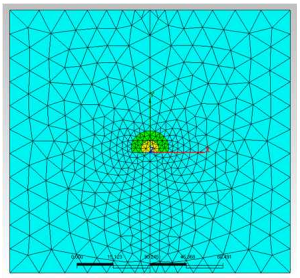
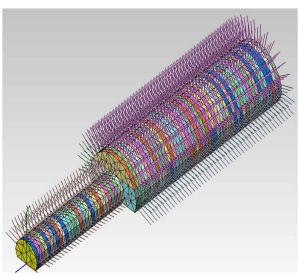
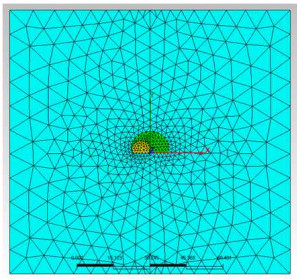
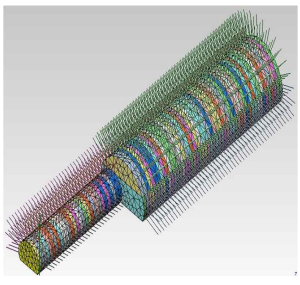
터널은 1차로에서 3차로로 확대되는 것으로 하였으며 터널의 지보는 록볼트와 숏크리트만을 고려하였다. 해석에 사용된 터널의 단면 및 지보재의 물성값은(표 3.7) 도로터널 표준단면을 사용하였다.

표 3.7 지보재의 물성값

구분	탄성계수 (t/m^2)	포아송비 (ν)	단위체적중량 (t/m^3)	비고
Hard S/C	1,500,000	0.2	2.4	• 두께 -1차로: 8cm -3차로: 12cm
Soft S/C	500,000	0.2	2.4	
Rock bolt	21,000,000	0.3	7.85	• 길이 -1차로: 4m -3차로: 5m • 설치개수 -1차로: 2m/6ea -3차로: 1.2m/18ea

해석영역은 지반의 크기에 따른 영향을 최소화하기 위해 3차로 터널의 외곽으로부터 상·하·좌·우 동일하게 3차로 터널의 등가직경(12.5m)의 4배로 하였다. 터널의 굴착은 연암인 것을 고려하여 전단면 굴착으로 하였으며 1회 굴진장은 1m로 하였다. 다음 표 3.8에 각 확대 공법별 생성한 지반과 터널의 Mesh를 표시하였다.

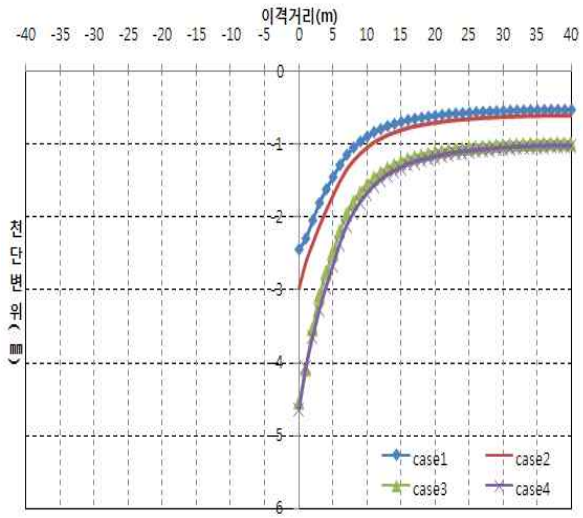
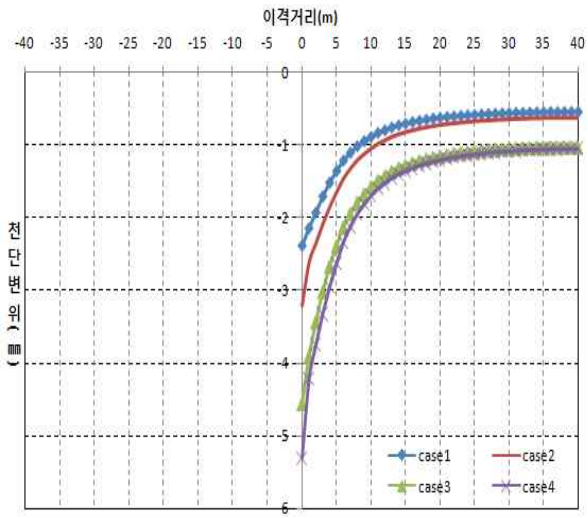
표 3.8 확대공법별 수치해석 모델링

양측 확대공법		편측 확대공법	
지반	터널	지반	터널
			

(2) 결과분석

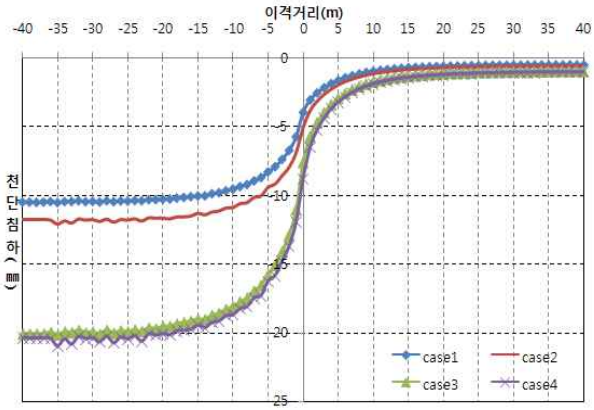
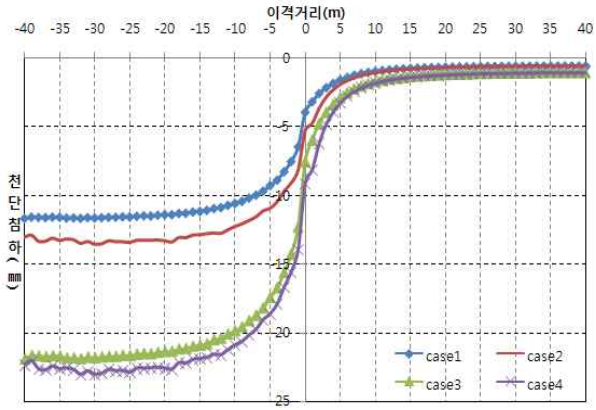
확대 시 지반의 강도에 따른 기존터널의 천단변위 경향을 다음 표에 도시하였다. 표 3.9에서 알 수 있듯이 기존터널의 천단변위는 지반의 점착력보다 탄성계수에 따라 크게 변하였으며 양측확대보다 편측확대에서 다소 크게 산정되었다. 하지만 변위가 수렴하는 지점은 지반의 강도 및 확대공법과 관계없이 막장으로부터 약 15m로 3차로 터널 직경 기준으로 1.25D 지점이다.

표 3.9 확대종류에 따른 기존터널의 천단변위

양측 확대	편측 확대
	

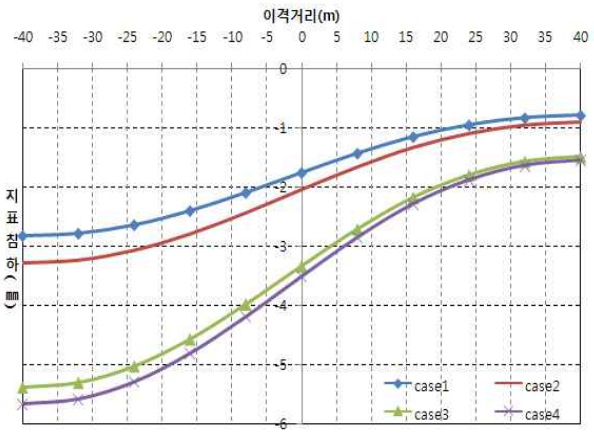
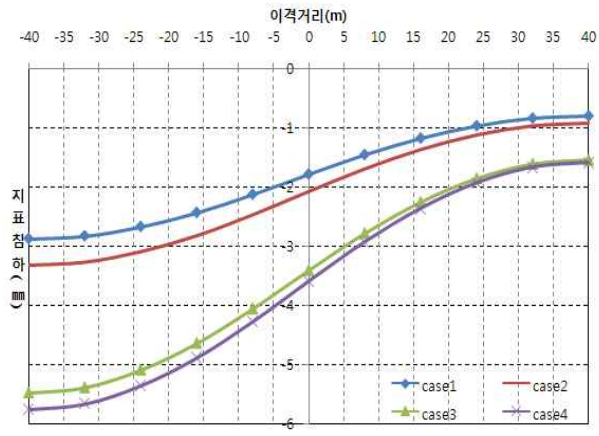
다음 표 3.10에는 확대종류에 따른 확대터널의 천단변위에 대해서 나타내었다. 확대에 따른 확대터널 자체의 천단변위 경향은 기존터널의 경향과 유사하게 나타났다. 점착력보다는 탄성계수에 따라 크게 변하였으며 양측확대보다는 편측확대에서 크게 산정되었다. 변위가 수렴되는 지점은 약 12~15m 사이로 지반의 강도 및 확대공법과 상관없이 유사한 지점에서 수렴되었다.

표 3.10 확대종류에 따른 터널의 천단변위

양측 확대	편측 확대
	

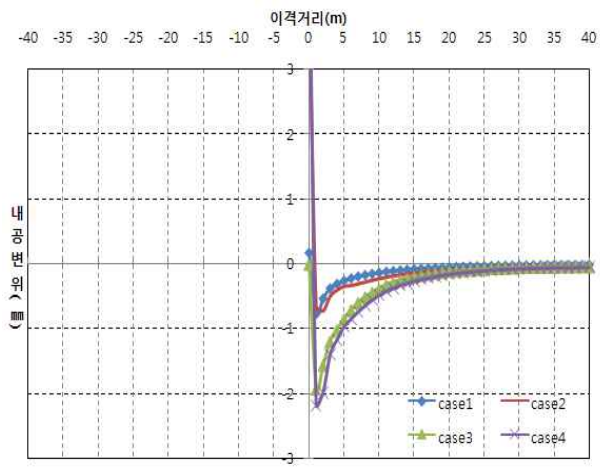
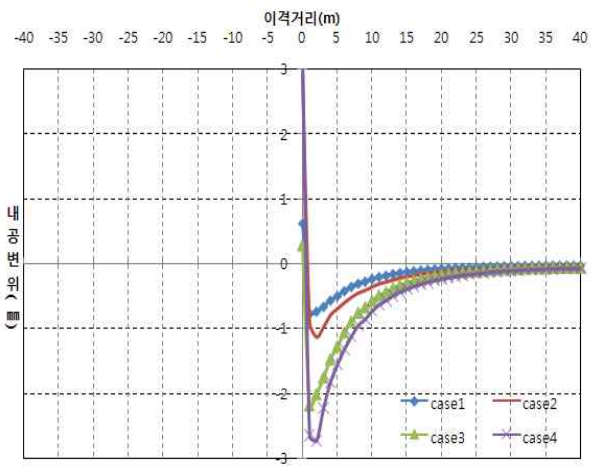
다음 표 3.11에는 확대 종류에 따른 지표침하를 나타내었다. 지표침하는 지반의 강도가 같을 경우 확대공법에 관계없이 거의 일치하였다. 확대 시 기존터널에서 발생하는 내공변위를 살펴 본 결과 편측확대에서 다소 크게 나타났다.

표 3.11 확대종류에 따른 지표변위

양측 확대	편측 확대
	

다음 표 3.12에는 확대 종류에 따른 내공변위를 나타내었다. 내공변위는 터널의 반경이 변하는 양쪽 측벽에서의 횡방향 변위를 나타내며, '-'부호는 단면의 확대를 뜻하며 '+'는 단면의 축소를 나타낸다. 그림에서 보듯이 -부호의 변위가 발생하였는데 이는 터널을 확대하면서 굴착된 부분의 단면이 축소되고 응력의 재분배가 일어나면서 기존 터널의 단면이 약간 확대되었기 때문으로 생각된다. 내공의 확대는 양측확대보다 편측확대에서 더 크게 나타났다. 즉 굴착에 의한 막장면으로의 응력집중이 편측확대에서 더 크게 일어남을 알 수 있다.

표 3.12 확대종류에 따른 기존터널의 내공변위

양측 확대	편측 확대
	

나. 터널확대 규모에 따른 지반 안정성 분석

(1) 해석개요

본 해석은 기존의 터널을 양측확대 시공 시 1차로를 2차로, 3차로, 4차로로 확대할 경우와 2차로를 3차로, 4차로로 확대할 경우 지반의 거동을 분석하기 위하여 수행되었으며 해석에 사용된 지반 및 지보재 물성값과 터널의 제원은 다음과 같다.

터널은 심도 60m에 위치한다고 가정하였으며 지반은 연암으로 가정하였다(표 3.13). 지반경계가 해석 결과에 미치는 영향을 최소화하기 위해 해석영역을 충분히 크게 하였으며 굴착길이는 80m, 1회 굴진장은 1~2m로 하였다. 연암지반이므로 터널의 지보는 락볼트와 숏크리트를 영구지보재로 고려하였으며 라이닝은 제외하였다(표 3.14).

표 3.13 지반의 물성값

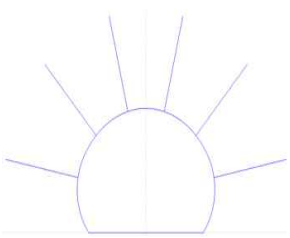
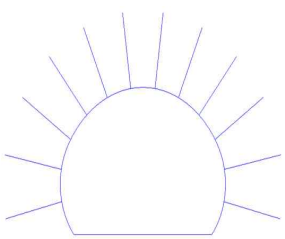
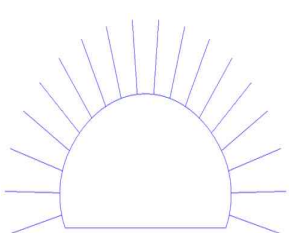
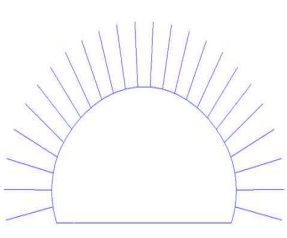
구분	탄성계수 (t/m^2)	포아송비 (ν)	체적중량 (t/m^3)	점착력 (t/m^2)	내부마찰각 (°)	Ko
연암	100,000	0.3	2.5	40	35	0.5

표 3.14 터널 제원 및 지보량

구분	R1	R2	A1	A2	숏크리트			락볼트	
					물성값		두께 (cm)	물성값	간격(m) /개수(ea)
					Hard S/C	Soft S/C			
1차로	3.9	2.7	60	70	·탄성계수: 1.5e+06t/m^2 ·포아송비: 0.2 ·단위중량: 2.4t/m^3	·탄성계수: 5e+05t/m^2 ·포아송비: 0.2 ·단위중량: 2.4t/m^3	8	·탄성계수: 2.1e+07t/m^2 ·포아송비: 0.3 ·단위중량: 7.85t/m^3	2/6
2차로	6.0	4.1	60	69.6			8		1.7/12
3차로	8.3	5.3	60	55			12		1.2/18
4차로	10.4	6.1	55	58.8			18		1.2/24

확대에 의한 기존터널의 거동특성을 분석하기 위해 지반 및 터널을 3차원으로 모델링하여 해석을 수행하였다(표 3.15). 다음 그림 3.18에 지반 및 터널의 형상을 나타내었다.

표 3.15 터널 차로별 지보패턴

1차로	2차로	3차로	4차로
			

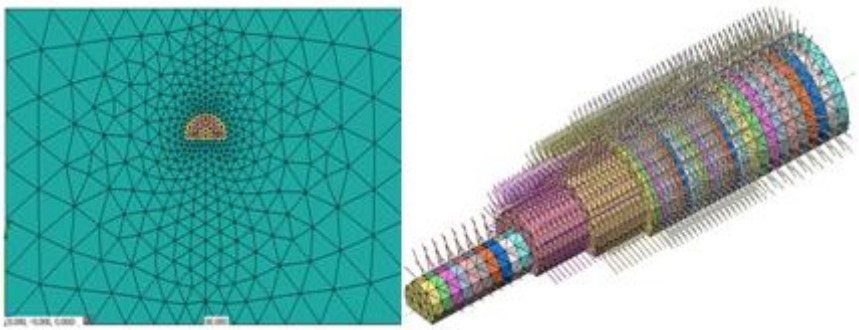


그림 3.18 해석영역 및 메쉬

(2) 결과분석

다음 그림 3.19 ~ 그림 3.21들에서는 확대 시공시 기존터널과 확대터널의 굴착에 따른 천단침하를 나타내었다. 여기서 이격거리의 '-'부호는 굴착한 부분을 나타내며 '0'은 막장면을 '+' 부호는 굴착할 부분을 나타낸다. 확대에 의한 기존터널의 천단침하를 살펴보면 확대 차로가 증가할수록 증가하였으며 1차로에서 확대할 때보다 2차로에서 확대할 경우 즉, 기존터널의 단면이 클수록 증가하였다. 이는 같은 차로의 확대라도 기존터널의 단면이 클수록 횡방향보다는 종방향으로의 아칭현상이 더 크다는 것을 뜻한다. 확대터널의 천단침하를 보면 기존터널과 같이 확대 차로가 증가할수록 증가하나 위와는 반대로 기존터널의 단면이 작을수록 즉, 굴착면적이 커질수록 증가하였다. 확대터널의 경우 굴착면적과 천단침하는 직선 비례관계를 보였으며 이를 다음 표에 나타내었다.

기존 터널을 확대하는 경우와 새로이 건설하는 경우의 천단침하를 보면 같은 차로의 터널 건설시 확대에 의한 천단침하가 작게 발생하며 이는 전술한 바와 같이 확대할 경우 굴착면적이 작아지기 때문이다. 따라서 같은 차로의 터널을 건설하더라도 확대에 의한 터널 건설이 변위 측면에서 유리할 것으로 생각된다.

천단침하는 막장에서 멀어질수록 일정한 값으로 수렴되었다. 기존터널과 확대터널 모두 0~10m이내에서 급격히 변한 후 10~20m에서 완만히 변화하다가 20m이상에서는 모두 수렴되었다. 따라서 이동식 프로텍터를 이용하여 기존터널을 보호할 경우 막장 전방 0~20m 사이를 보호해야 할 것으로 판단된다. 이는 石村(2005)가 4개소의 확대터널 계측 결과를 종합한 결론에서 단면확대에 의한 기존터널에의 영향범위는 최대 1.5D~2D 정도로 분석한 결과와 유사하다.

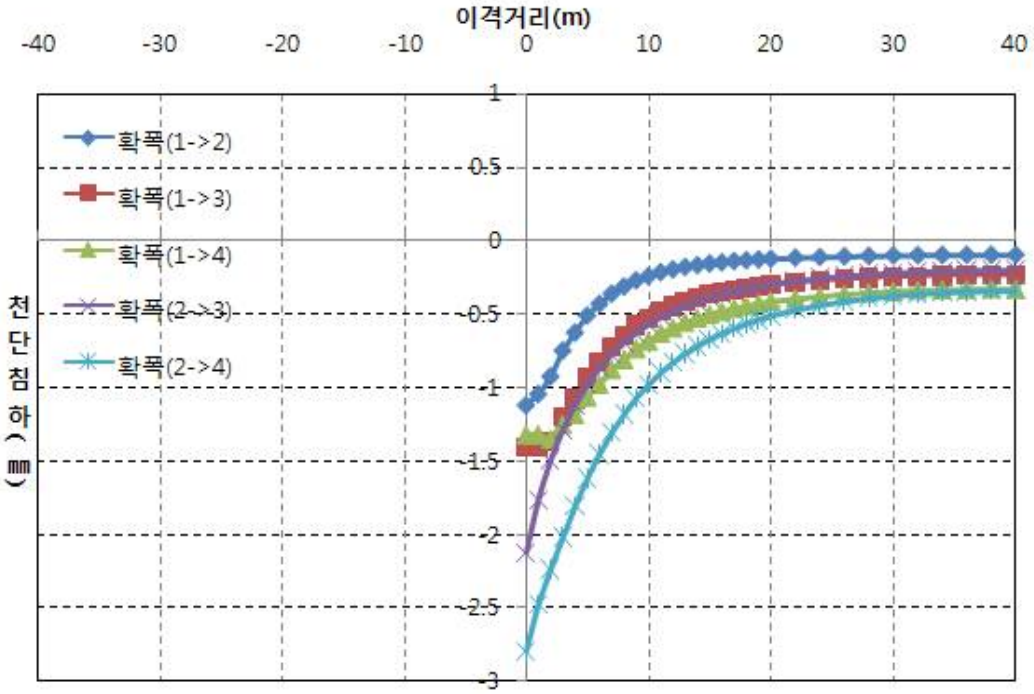


그림 3.19 기존터널의 천단침하

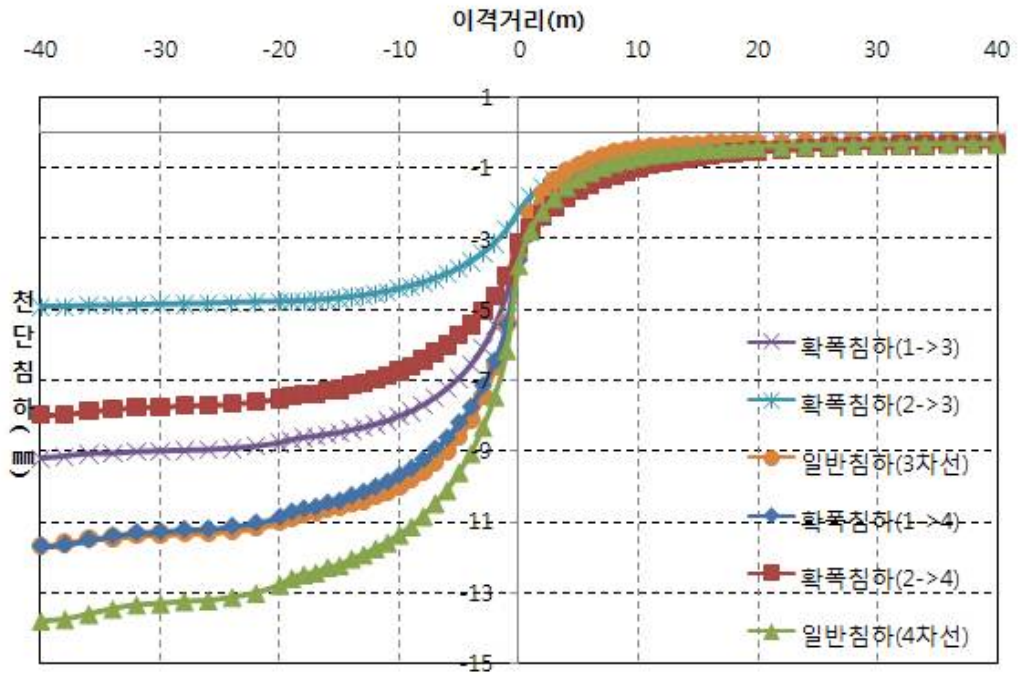


그림 3.20 확대터널의 천단침하

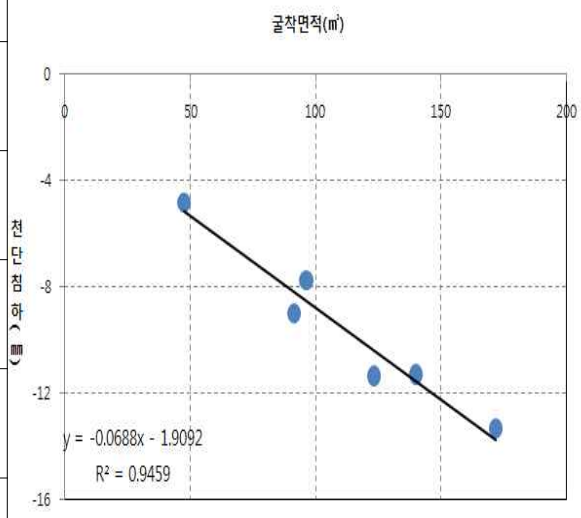
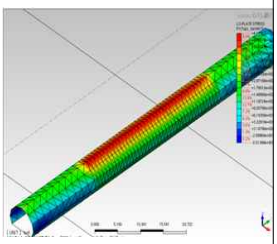
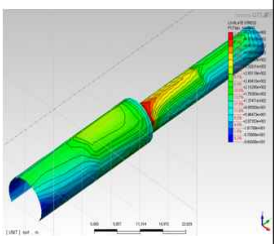
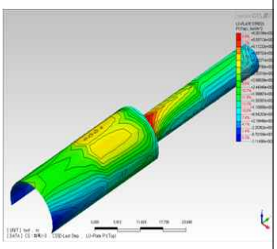
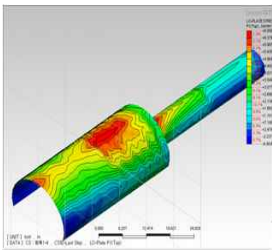
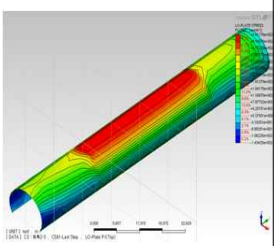
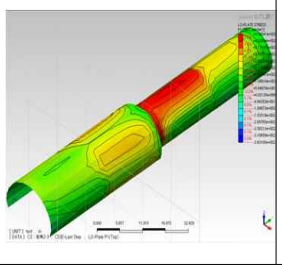
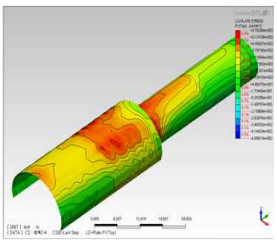
구분	굴착면적(㎡)	침하량(㎜)	상관그래프
확대(1->3)	91.4	-8.98	
확대(2->3)	47.5	-4.82	
일반3차로	123.1	-11.36	
확대(1->4)	140	-11.3	
확대(2->4)	96.2	-7.75	
일반4차로	171.7	-13.33	

그림 3.21 굴착면적과 침하량의 상관관계

다음 표 3.16에는 확대시 숏크리트에 작용하는 주응력의 변화를 알아보기 위해 기존의 1차로와 2차로 터널을 확대할 때 나타나는 숏크리트의 주응력 분포도를 나타내었다. 여기서 보면 확대터널의 차로가 증가할수록 응력은 막장면쪽으로 집중되는 것을 볼 수 있으며 2차로보다는 1차로 터널을 확대할 때 이러한 현상이 더 두드러짐을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 기존터널의 단면이 클수록 횡방향보다는 종방향 아칭현상이 크기 때문으로 생각된다. 또한 확대에 의해 기존 터널의 숏크리트에 미치는 영향 범위는 천단변위가 수렴되기 전인 막장으로부터 0~20m이내 임을 알 수 있으며 이 영역에 대해 프로텍터로 보호해야할 것으로 판단된다. 이는 (蒲田, 2001)의 연구와 유사한 경향을 보이고 있다(그림 3.22).

蒲田는 수치해석을 통해 터널확대가 이루어지는 경우 기존터널 라이닝에는 막장전방으로는 0.5D, 막장 후방으로는 2D 정도에서 응력이 증가한다고 보고하였다.

표 3.16 터널 확대시 숏크리트 주응력 분포도

기존 터널	굴착전	2차로 확대	3차로 확대	4차로 확대
1차로				
2차로		-		

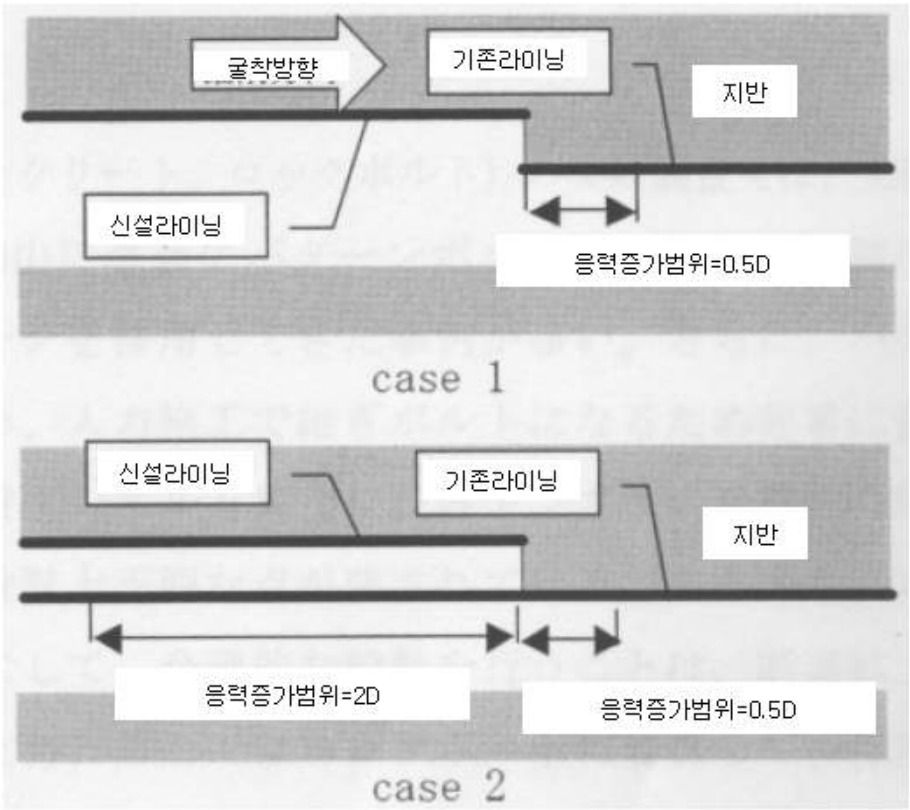


그림 3.22 기존터널 라이닝 영향범위

3. 터널 지보재 및 라이닝의 역학적 특성

노후 터널구조물 라이닝 콘크리트의 성능저하도 및 원인을 규명하기 위하여 공용년수 약 10 ~ 70년이 경과한 철도터널, 지하철터널 및 시험터널을 선정하여 조사 및 분석을 실시하였다. 표 3.17은 본 연구의 조사 대상 구조물인 철도터널 8개소(1 ~ 8), 지하철터널 2개소(9, 10,) 및 시험터널 1개소(11)의 개요를 정리하여 나타낸 것이다. 시험터널을 제외한 모든 터널에서 수차례에 걸쳐 보수·보강공사의 흔적이 존재하였으며 철도터널(1 ~ 8) 대부분은 누수와 박리·박락, 탈락 및 백태 등 라이닝 콘크리트의 열화가 상당히 진행된 상태였다.

공용중이거나 사용이 중지된 재래식 터널의 내구성를 파악하기 위하여 콘크리트 라이닝의 압축강도를 비파괴실험(슈미트 해머 실험)과 코아 채취에 의한 실내 일축압축강도 실험을 수행하였다.

표 3.17 본 연구에 적용된 폐터널 현황 및 압축강도

터널	연장(m)	형식	준공년도	코어 공시체 압축강도(MPa)	반발 경도법 압축강도 (MPa)
1	190	마제형, 콘크리트 라이닝	1937	12.8 ~ 41.7	17.3 ~ 34.7
2	240	마제형, 콘크리트 라이닝	1937	-	-
3	75	마제형, 콘크리트 라이닝	1958	5.1 ~ 13.3	-
4	80	마제형, 콘크리트 라이닝	1942	8.1 ~ 19.4	14.6 ~ 17.8
5	400	마제형, 콘크리트 라이닝	1963	6.7 ~ 13.6	8.1 ~ 23.2
6	220	마제형, 콘크리트 라이닝	1968	8.3 ~ 13.6	10.5 ~ 24.0
7	100	마제형, 콘크리트 라이닝	1940	11.5 ~ 26.6	8.8 ~ 16.0
8	2,450	마제형, ASSM	1974	6.0 ~ 16.0	6.4 ~ 23.2
9	945	마제형, NATM	1974	24.0 ~ 38.6	17.6 ~ 28.0
10	920	마제형, NATM	1985	11.7 ~ 26.7	16.0 ~ 28.8
11	140	마제형, NATM,	1996	4.3 ~ 18.6	4.4 ~ 20.1

콘크리트 라이닝의 내구성 파악을 위하여 조사터널 주변의 지하수에 대한 수질분석을 수행하였다. 터널은 지반 혹은 암반 내에 건설되는 구조물로서 이러한 지하공간에 건설되는 구조

물은 주로 지하수 등에 접하게 된다. 이러한 지하수 등에 생활하수, 공장폐수 또는 토양중에 SO_4^{2-}, Cl^-, Mg^{2+} 및 Ca^{2+} 이온이 다량으로 존재하는 경우 콘크리트는 유해한 이온들의 침투로 인하여 화학적 침식을 받을 우려가 있다. 이러한 유해이온들의 침식을 받은 콘크리트는 내구성능 저하 및 내구수명에 영향을 받게 되며 구조체로서의 역할이 상실될 우려가 있다.

본 연구의 조사대상인 11개 터널 중 누수, 유해수 및 지하수가 존재하는 터널 9개에 대하여 유해이온의 유무를 확인하기 위하여 무균채수병으로 침출수를 채취하여 수질검사를 실시하였다. 표 3.18에 각 터널의 수질분석 결과와 침출수의 유해이온 유무를 비교하기 위하여 정수기물 및 수돗물에 대한 수질검사 결과를 나타내었다. 수돗물을 기준으로 각 성분이 수돗물을 초과하는 부분은 회색으로 표시하였다.

표 3.18 수질검사 결과

	pH	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Fe
단위	-	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ
정수기	6.88	0.7	8.000	12.8	2.9	0.045
수돗물	**7.21**	**16.1**	**13.29**	**19.4**	**5.1**	**0.090**
1	6.43	28.5	51.312	37.20	14.8	-
2	5.90	5.1	4.548	20.80	9.2	-
3	6.84	ND*	2.880	22.02	2.9	0.489
4	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-
6	7.25	8.025	20.907	22.42	1.69	0.429
7	7.58	ND	291.2	124.12	52.03	0.432
8	6.55~7.51	-	3.6~201.3	5.4~116.1	1.7~49.5	ND
9	6.23	86.8	0.117	84.1	77.8	-
10	6.12	97.8	1.983	100.1	72.9	-
11	7.42~7.50	5.1~5.8	15.2~17.5	18.8~22.8	5.1~7.0	0.060

* ND : Not Detected, ** 침출수 없음

대부분의 터널에서 침출수의 pH는 5.90~ 7.51 정도로 약산성 또는 중성으로 나타났으며, 콘크리트의 성능을 저하시키는 황산염이온(SO_4^{2-}) 농도는 7 터널에서 291.2ppm으로 가장 높았으며, 1 터널의 경우에도 51.3ppm 으로 측정되었다. 황산염에 의한 침식은 그 농도가 비교적 높을 때 현저해지며 본 연구에서 조사된 터널의 침출수는 콘크리트에 직접적인 영향을 미치는 농도는 아니지만 오랜 시간동안 지속적으로 황산염 환경에 노출되는 경우 화학적 침식

에 대하여 고려해야 할 것이다. 한편 Ca^{2+} 및 Mg^{2+}의 농도 또한 각각 5.4 ~ 124.12ppm 및 1.69 ~ 77.8 ppm 정도로 검출되었으며 지하철 터널인 9 및 10터널과 철도터널인 1 터널 등에서 소량 검출되었다. 특히 R8 터널의 경우 붉은색 침전물이 발생한 지역에 대하여 수질조사를 한 결과 예상외로 철(Fe)성분은 전혀 검출되지 않았으며 추가적인 성분분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

이상의 수질 분석결과 본 연구에서 선정된 철도터널을 비롯한 지하철터널 및 시험터널 구조물의 환경적 요인은 지하수로부터 기인하는 화학적 침식에 대하여 어느 정도 영향을 받을 가능성이 높은 것으로 판단되며 성능저하 원인 및 정도를 분석하기 위하여 코어 공시체를 채취하여 실험을 실시하였다.

채취된 코아를 대상으로 기기분석(XRD,SEM, EDS)를 수행하였다. 그림 3.23은 채취한 라이닝 콘크리트 코어 공시체의 표면 부분에 대한 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 높은 강도(intensity)를 가진 quartz 피크가 검출됨을 알 수 있었다. XRD pattern에서 quartz 피크는 분석에 사용된 분말이 라이닝 콘크리트로부터 채취된 탓으로 골재에 의한 성분물질로 추정된다. 또한 라이닝 콘크리트의 외부로부터 침투한 유해 이온의 작용으로 인하여 9.1° 2Θ부근에서 ettringite 및 thaumasite의 중첩피크가 관찰됨을 확인할 수 있었다.

반면 18.1° 2Θ부근에서 portlandite의 피크 강도가 매우 약하게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 현상이 나타난 이유는 라이닝 콘크리트의 표면부에서 건습반복작용으로 인한 수산화칼슘의 용출(leaching) 및 반응물질의 생성이 심화된 탓으로 해석된다. 이러한 환경에서는 mirabilite(Na2SO4·2H2O)의 생성에 의한 결정압(crystal pressure)이 크게 작용하여 라이닝 콘크리트의 조직에 심각한 손상을 유발할 가능성이 높은 것으로 보고되고 있다.

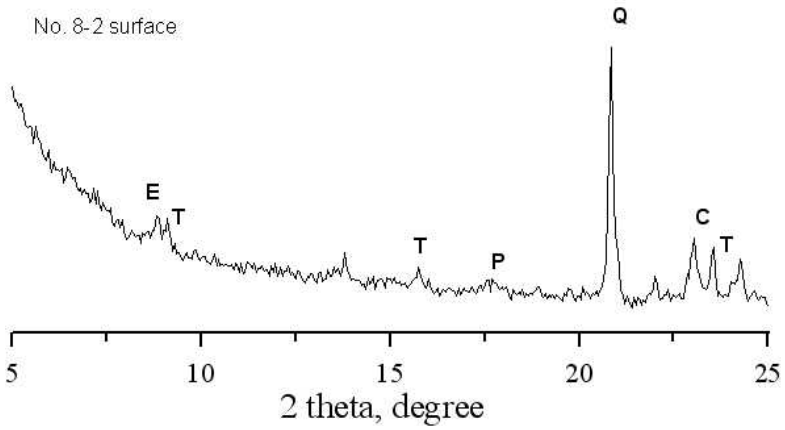


그림 3.23 XRD 검사결과

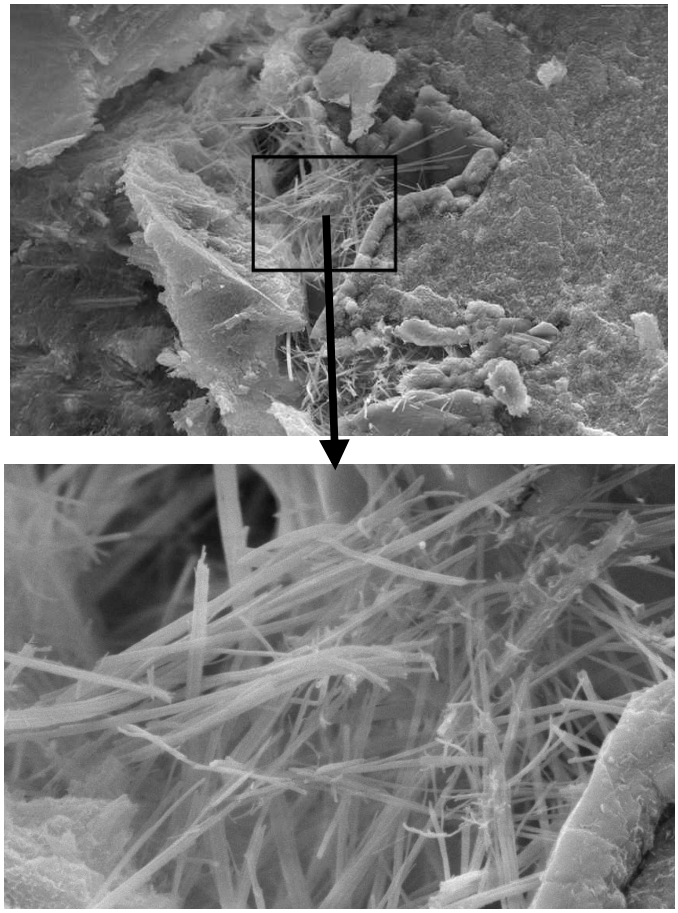


그림 3.24 SEM 분석결과

다음으로 동일한 라이닝 콘크리트 코어 공시체에서 채취한 샘플의 성능저하 원인을 시각적으로 조사하기 위하여 Scanning Electron Microscopy (SEM)법을 사용하여 미세구조를 조사하였다.

그림 3.24는 코어 공시체의 표면으로부터 약 10mm 깊이에 대한 미세구조 촬영결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 라인이 콘크리트의 조직은 반응물질의 생성으로 인한 다공화 현상이 두드러진 것으로 관측되었으며, 안정된 조식구조인 섬유상의 물질보다는 오히려 침상의 물질이 다량으로 관찰되므로써, 성능저하가 발생한 것으로 추정된다. 그림에서 보여주듯이 공극부분에 생성된 침상물질에 대한 확대촬영을 실시한 사진으로써, 각주상의 생성물과는 다른 형상을 나타냄을 알 수 있다. 이 침상물질에 대한 EDS profile을 나타낸 것이 그림 3.25이다. 시편 홀더(holder)의 영향으로 인한 Au성분의 검출외에도 calcium, sulfur, silicon 및 oxygen의 원소가 관찰되므로써, 저강도(low- intensity)의 thaumasite가 생성되었음을 확인할 수 있었다.

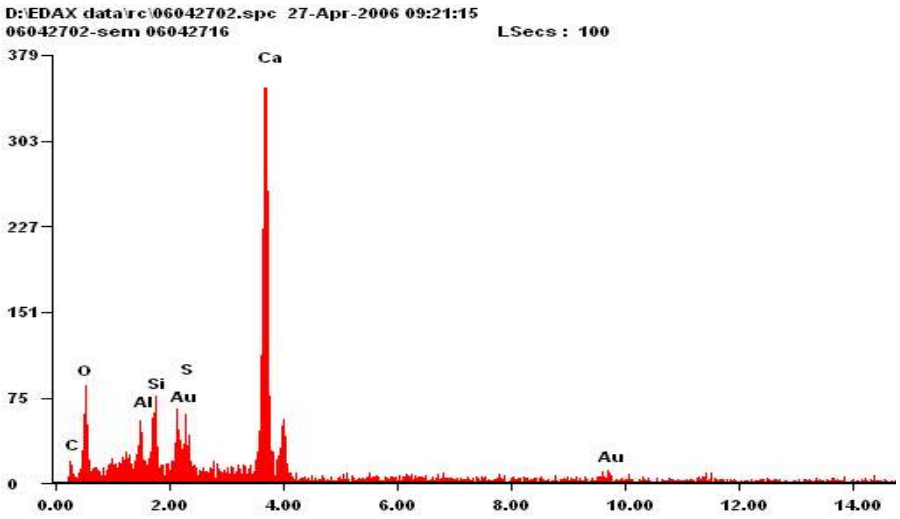


그림 3.25 EDS 분석결과

다른 공시체에 대한 기기분석결과 연화물질인 Thaumasite와 Gypsum이 생성되었으며 팽창성 물질인 Ettringite도 생성되었고 시멘트 수화 생성물인 Portlandite 피크는 많이 손실되었다.

공용중인 NATM터널에서 록볼트의 내구성을 파악하기 위하여 위 표의 터널 11에서 현장 록볼트 인발실험을 수행하였다. 록볼트가 시공된지 10년이 경과하였지만 인발력의 설계기준은 10ton을 상외하는 것으로 나타났다.

표 3.19 록볼트 인발시험 결과

시편	충진재	하중(ton)	비 고
1	시멘트 모르터	15.0	-
2	시멘트 모르터	15.5	아답터 빠짐, 강봉마디 파괴
3	레진	11.5	-

4. 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석기법 및 설계기법 제시

가. 목적

기 시공되어 공용중인 터널 중 교통량 증가등에 의해 추가적인 차로 확보가 필요한 경우 터널확폭 및 신설터널의 시공이 필요하다. 도심지 터널의 경우 여유부지 확보 등이 곤란하여 추가적인 신설터널 시공이 곤란한 경우가 많다.

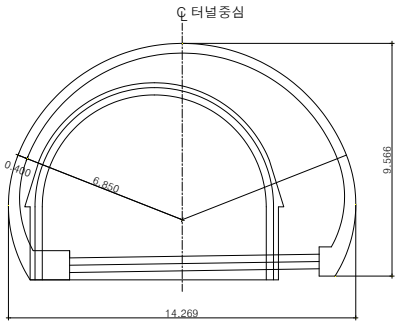
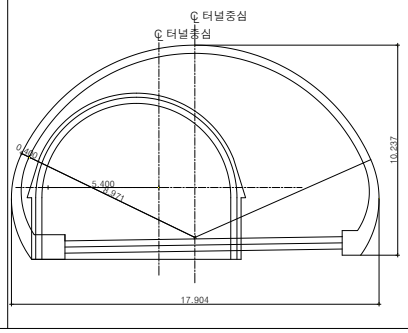
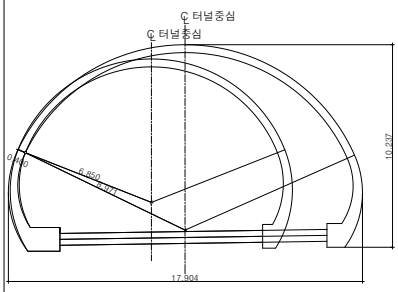
본 검토에서는 차선 증가를 위하여 기 시공되어 운용중인 터널을 확폭하는 경우 추가시공에 따른 터널의 안정성 검토를 수행하였다. 기존 터널을 확폭하는 경우 차선 통제 후 공사를 진행하는 것이 안정성 확보 및 경제성 측면에서 가장 적합한 방법이나, 기존 이용차량들의 우회 등이 곤란한 경우 시공 중 교통에 지장이 없는 공법 적용이 필요하다. 기존 터널의 차량통행을 확보하면서 동시에 시공을 수행할 수 있는 방법으로 프로텍터공법 등이 적용된다. 프로텍터 공법은 터널 굴착후 보강공법 적용시 측벽부 등에서 작업공간 확보가 다소 곤란할 수 있다.

따라서, 본 검토에서는 프로텍터 공법 적용시 측벽부 록볼트 보강이 곤란한 경우에 대하여, 록볼트 설치 有·無에 따른 터널 거동을 검토하고, 록볼트 미 설치시 적정 보강공법에 대한 검토를 수행하였다

나. 내용

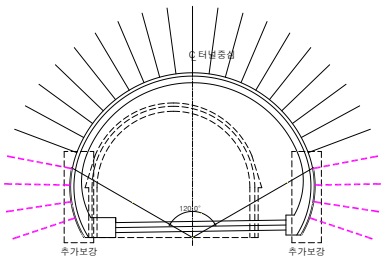
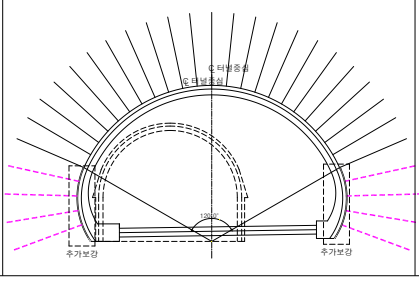
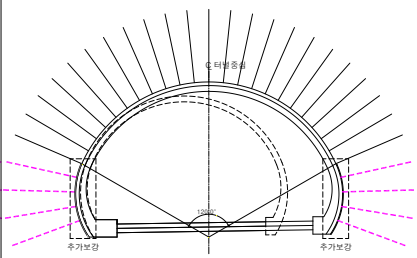
(1) 조건별 해석단면

해석은 기존 2차로 단면에서 3차로, 4차로로 확폭하는 경우 및 기존 3차로 터널에서 4차로 터널로 확폭하는 경우에 대한 검토를 수행하였다. 도심지 병설터널의 경우 양측확폭이 곤란한 경우가 많으므로 편측확폭에 대한 검토를 수행하였다. 편측확폭에 대한 단면검토시 편측확폭이 가장 크게 될 경우에 대한 검토를 수행하였다

2차로 → 3차로 확폭 (토피 40m)	2차로 → 4차로 확폭 (토피 40m)	3차로 → 4차로 확폭 (토피 20m)
		

(2) 조건

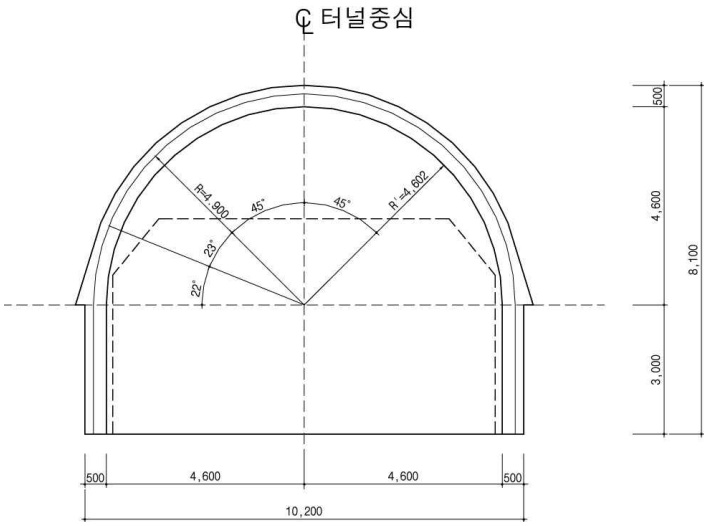
프로텍터 공법 시공 등에 의하여 하부 록볼트 시공이 다소 어려운 경우에 대하여, 하부 록볼트 시공 有· 無에 따른 터널거동에 대한 검토를 수행하였다. 실제 시공조건(시공장비, 록볼트 길이)등에 따라 차이가 있지만, 본 검토에서는 록볼트 유·무에 따른 영향을 검토하고자, 하부 굴착과 함께 시공되는 측벽부 록볼트(편측 4ea) 유·무에 대한 검토를 수행하였다. 해석은 기존 터널 굴착 및 보강 후 라이닝 타설과 함께 지보재를 제거하였으며, 지반의 변위 초기화 후 확폭 터널의 굴착을 진행하였다.

2차로 → 3차로 숏크리트 보강범위	2차로 → 4차로 숏크리트 보강범위	3차로 → 4차로 숏크리트 보강범위
		

다. 적용 터널 단면

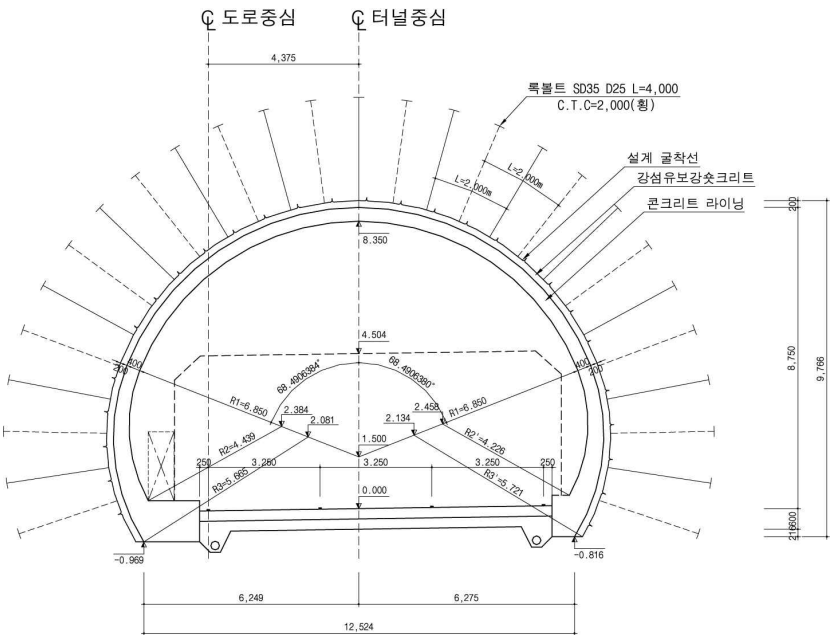
터널단면은 기 시공된 터널 중 2차로는 남산 3호터널을 3차로는 매봉터널 단면을 적용하였다. 4차로 해석단면은 매봉터널(3차로) 도로횡단구성에서 3차선을 4차선으로 증가하여 단면을 구성하였다.

2차로 검토단면(남산 3호터널)

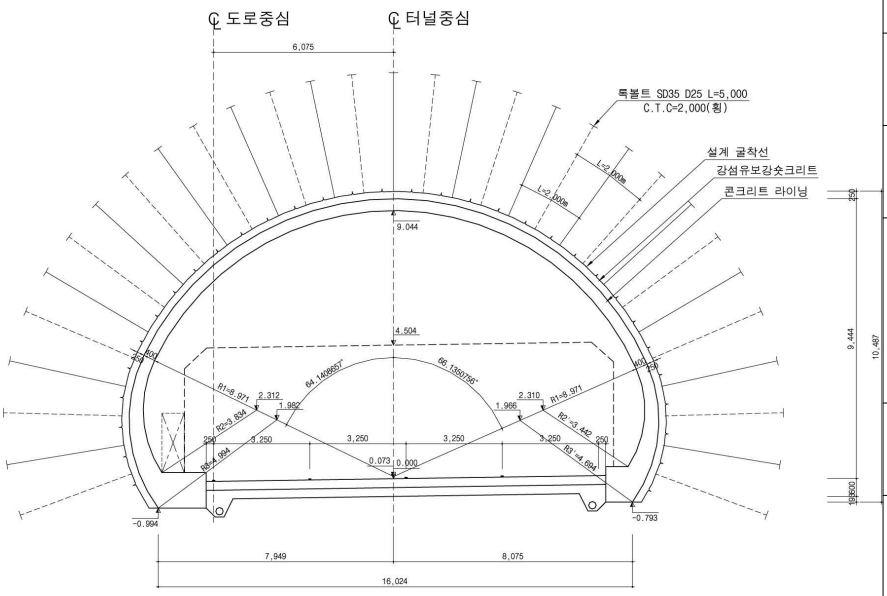


지보패턴		P-5
굴진장		1.0m
라이닝	1차	200mm
	2차	300mm
록볼트	종	-
	횡	-
강지보		-
보조공법		-

3차로 검토단면(매봉터널)



지보패턴		P-5
굴진장		1.0m
숏크리트		200mm
록볼트	종	2.0m
	횡	1.0m
강지보		-
보조공법		-

4차로 검토단면(단면가정)			
	지보패턴		P-5
	굴진장		1.0m
	숏크리트		250mm
	록볼트	종	2.0m
		횡	1.0m
	강지보		-
	보조공법		-

라. 해석조건

(1) 지반조건

지반조건은 서울 및 서울근교에서 시공된 설계조건을 준용하여 지반조건을 가정하였다

암반등급	단위중량 (KN/m^3)	탄성계수 (MPa)	포아송비 (v)	점착력 (kPa)	마찰각 (°)	측압계수
V등급	21	500	0.30	200	30	1.0

(2) 지보재 물성치

숏크리는 시간에 따른 경화를 고려한 연성숏크리트 단계와 강성 숏크리트 단계로 구분하여 적용하였다.

구 분		단위중량(kN/m^3)	탄성계수 (MPa)	비 고
록볼트		78.5	210,000	SD35 D25
숏크리트	연성	23.5	5,000	f_{ck}=21MPa
	강성	23.5	15,000	

(3) 하중 분담율

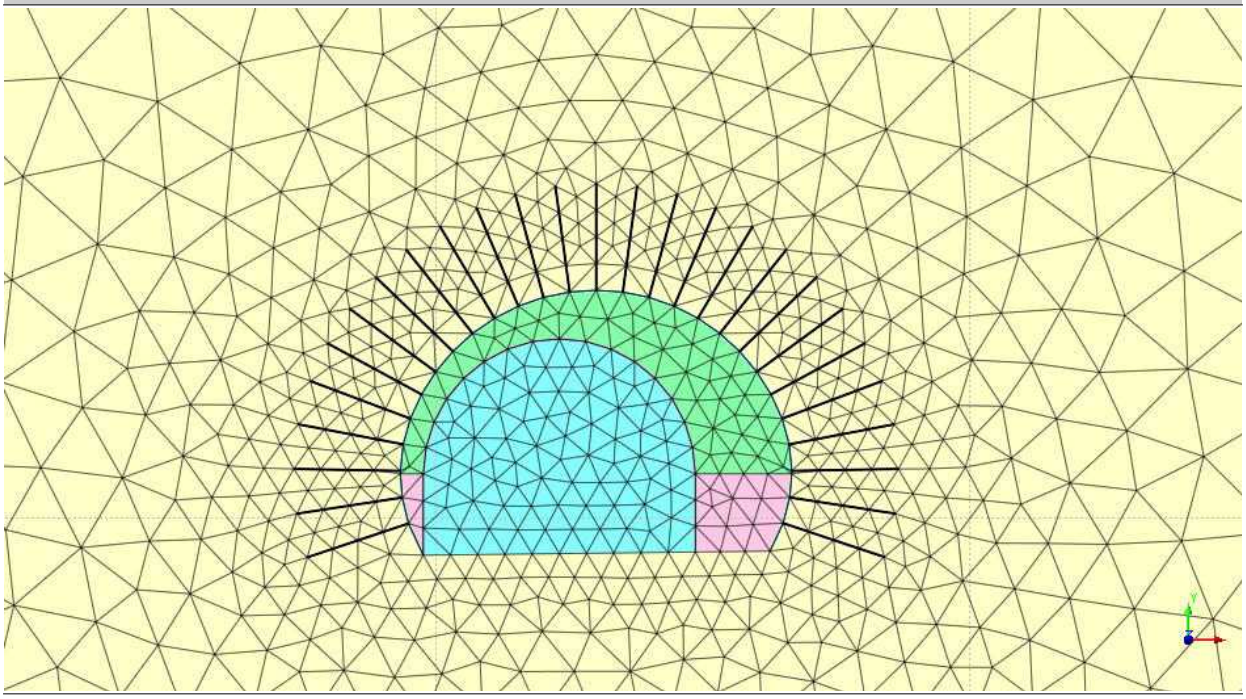
구 분	굴착단계	연성 숏크리트	강성 숏크리트	비 고
상반/하반굴착	40%	30%	30%	-

마. 측벽부 록볼트 보강 有·無에 따른 터널거동

(1) 2차로 ⇨ 3차로 확폭

(가) 해석단면

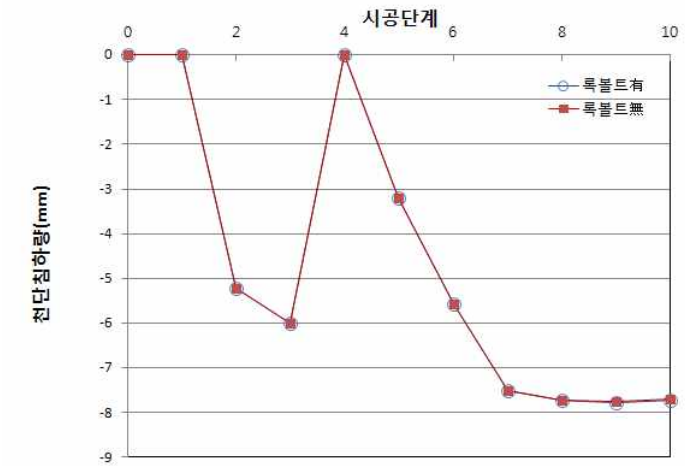
2차로 → 3차로 확폭단면



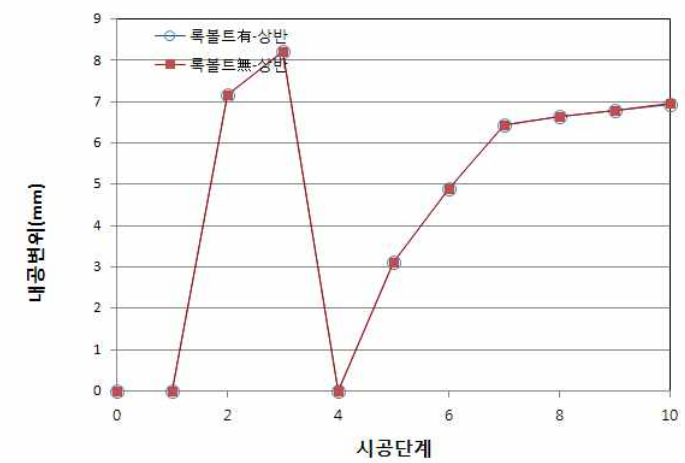
(나) 시공단계

구 분	시 공 단 계	비 고
step 00	지반 초기화	
step 01	null stage	
step 02	2차로 터널 전단면 굴착	하중분담율 70%
step 03	2차로 터널 라이닝시공	하중분담율 100%
step 04	초기화	변위 zero
step 05	3차로 터널 상부 굴착 및 2차로 라이닝 삭제	하중분담율 40%
step 06	3차로 터널 상부 연성숏크리트 및 록볼트 보강	하중분담율 70%
step 07	3차로 터널 상부 강성숏크리트	하중분담율 100%
step 13	3차로 터널 하부 굴착	하중분담율 40%
step 14	3차로 터널 하부 연성숏크리트 및 **록볼트 보강**	하중분담율 70%
step 15	3차로 터널 하부 강성숏크리트	하중분담율 100%

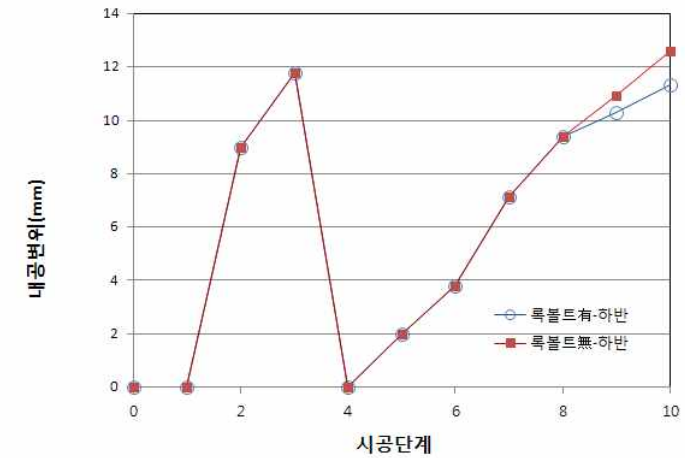
(다) 해석결과

천단 변위발생 경향


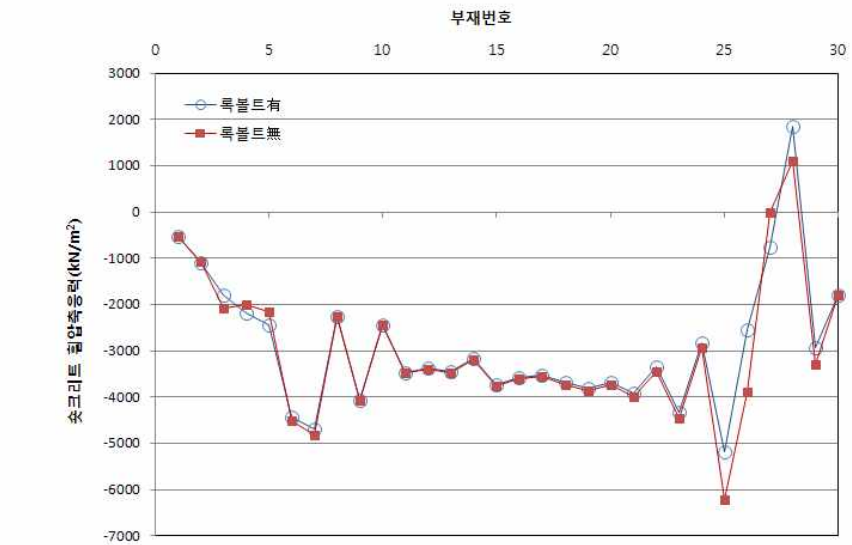
상반내공 변위발생 경향



하반내공 변위발생 경향



숏크리트 발생응력



(라) 검토결론

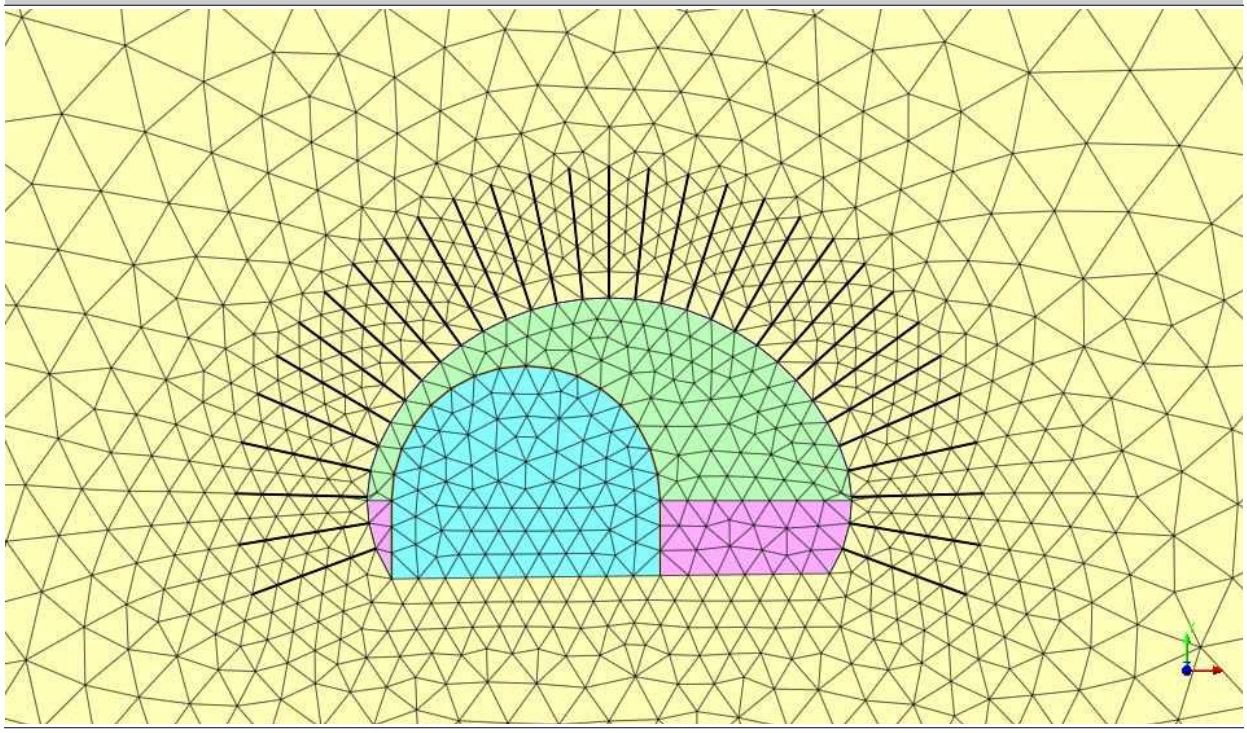
기존 운용중인 2차로 병설터널의 3차로 확폭공사에 따른 안정성 검토 결과는 다음고 같다. 변위발생 경향 검토는 하부 록볼트 유·무에 따른 천단침하량의 차이는 미소한 것으로 나타났고, 하부 록볼트 유·무에 따른 상반 내공변위의 차이는 미소한 것으로 나타났다. 하부 록볼트 유·무에 따른 하반 내공변위는 최대 1.26mm 차이가 나는 것으로 나타났다.

숏크리트 발생응력 검토결과, 하부 록볼트 유·무에 따른 숏크리트 발생응력 검토결과 천단 및 아치부의 영향은 미소한 것으로 나타났으며, 편측 굴착에 의하여 우측벽부에서 휨압축응력 최대 증가량은 1.3MPa이며, 최대 발생응력은 6.2MPa이 발생하는 것으로 나타났다

(2) 2차로 ⇨ 4차로 확폭

(가) 해석단면

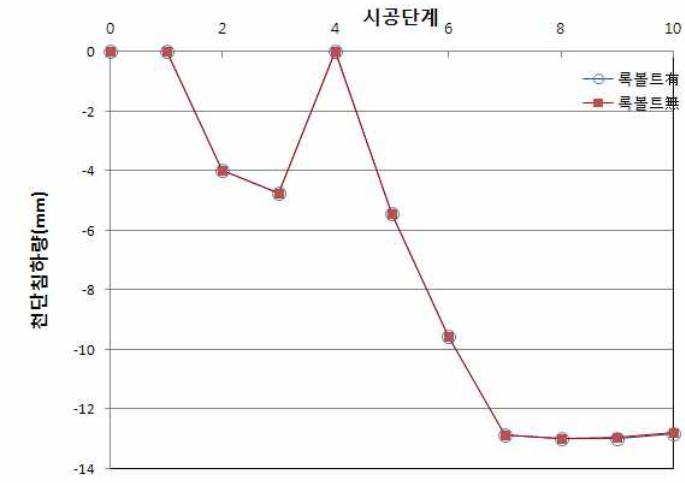
2차로 → 4차로 확폭단면



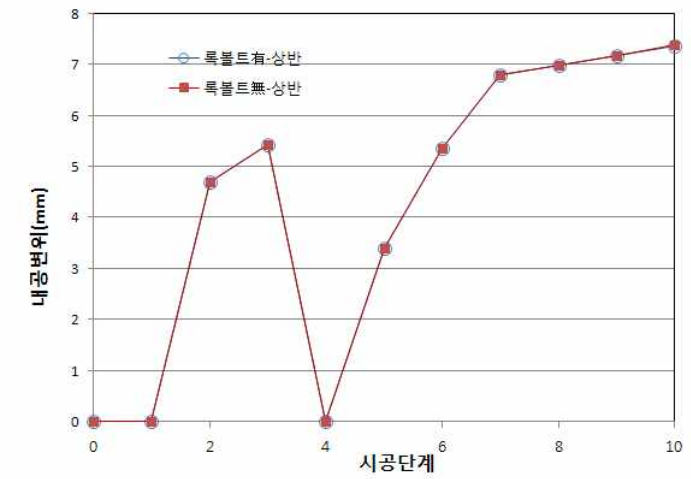
(나) 시공단계

구 분	시 공 단 계	비 고
step 00	지반 초기화	
step 01	null stage	
step 02	2차로 터널 전단면 굴착	하중분담율 70%
step 03	2차로 터널 라이닝시공	하중분담율 100%
step 04	초기화	변위 zero
step 05	4차로 터널 상부 굴착 및 2차로 라이닝 삭제	하중분담율 40%
step 06	4차로 터널 상부 연성숏크리트 및 록볼트 보강	하중분담율 70%
step 07	4차로 터널 상부 강성숏크리트	하중분담율 100%
step 13	4차로 터널 하부 굴착	하중분담율 40%
step 14	4차로 터널 하부 연성숏크리트 및 **록볼트 보강**	하중분담율 70%
step 15	4차로 터널 하부 강성숏크리트	하중분담율 100%

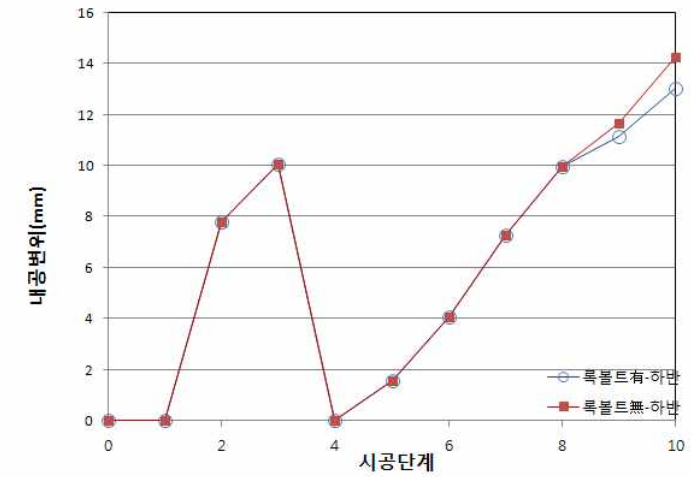
(다) 해석결과

천단 변위발생 경향


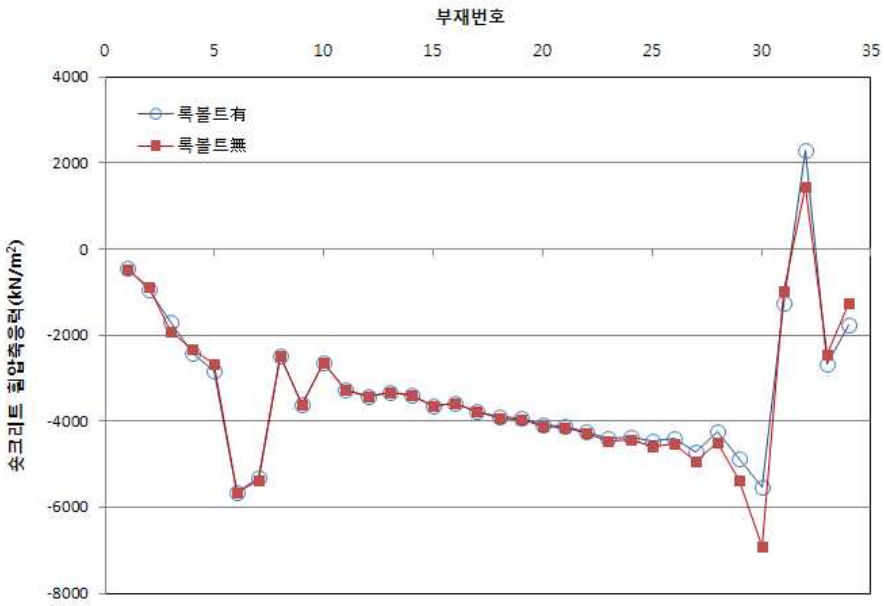
상반내공 변위발생 경향



하반내공 변위발생 경향



숏크리트 발생응력



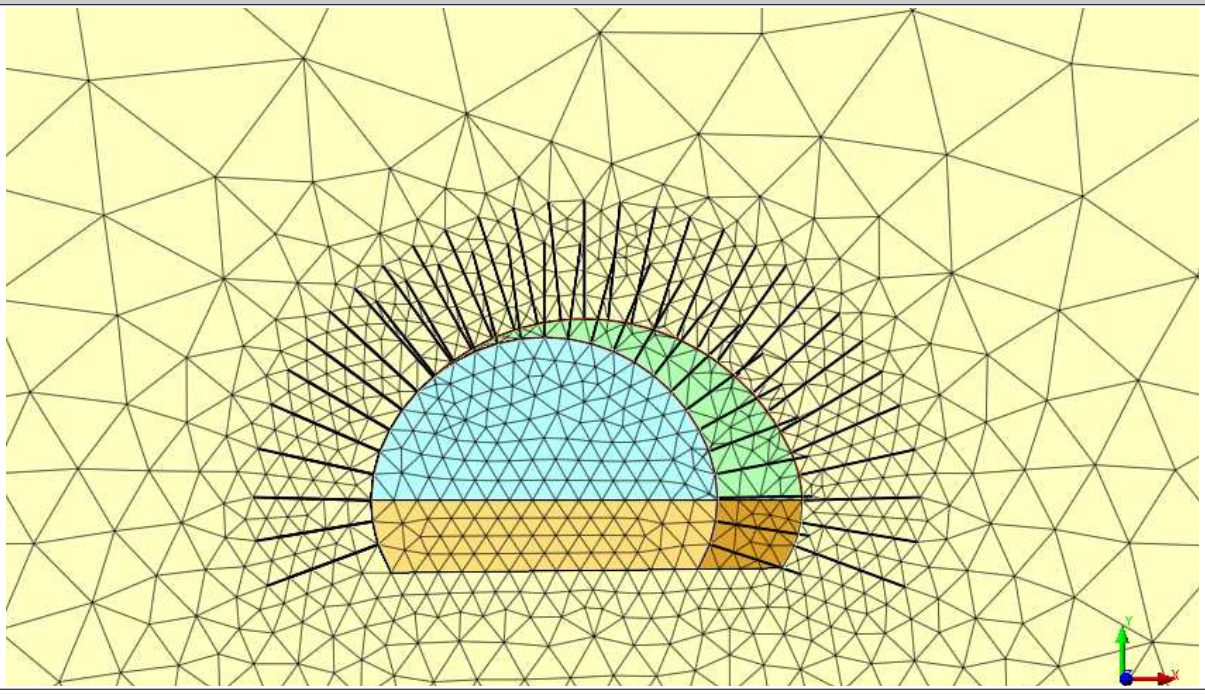
(라) 검토결론

기존 운용중인 2차로 병설터널의 3차로 확폭공사에 따른 안정성 검토 결과, 변위발생 경향은 하부 록볼트 유·무에 따른 천단침하량의 차이는 미소한 것으로 나타났다. 하부 록볼트 유·무에 따른 상반 내공변위의 차이는 미소한 것으로 나타났다. 하부 록볼트 유·무에 따른 하반 내공변위는 최대 1.22mm 차이가 나는 것으로 나타났다. 숏크리트 발생응력 검토결과, 하부 록볼트 유·무에 따른 숏크리트 발생응력 검토결과 천단 아치부의 영향은 미소한 것으로 나타났으며, 편측 굴착에 의하여 우측벽부에서 휨압축응력 최대 증가량은 1.3MPa이며, 최대 발생응력은 6.9MPa이 발생하는 것으로 나타났다.

(3) 3차로 ⇨ 4차로 확폭

(가) 해석단면

3차로 → 4차로 확폭단면(토피고 20m)

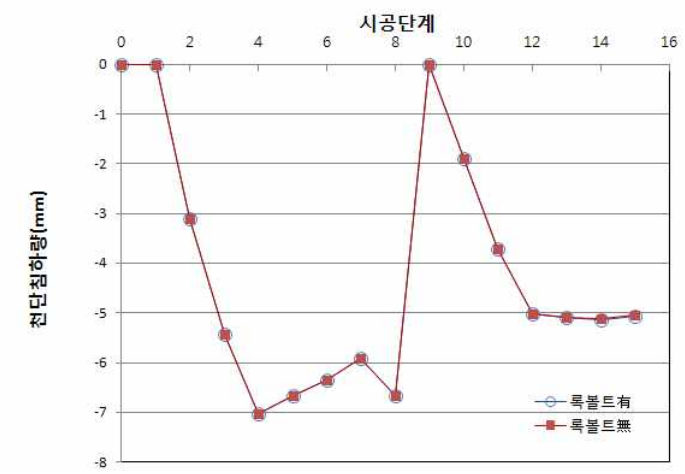


(나) 시공단계

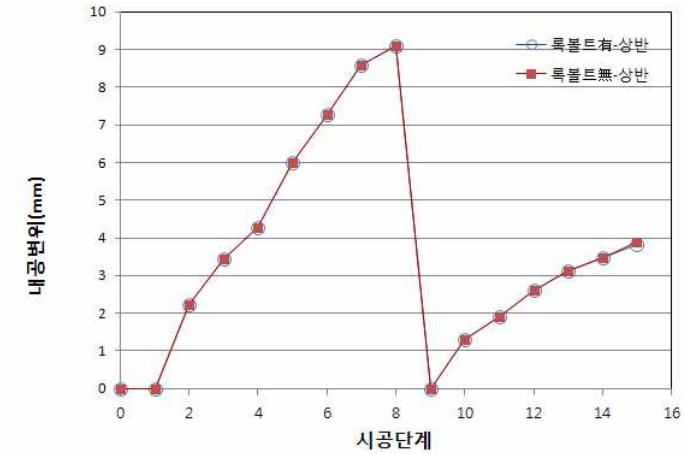
구 분	시 공 단 계	비 고
step 00	지반 초기화	-
step 01	null stage	-
step 02	3차로 터널 상부 굴착	하중분담율 40%
step 03	3차로 터널 상부 연성숏크리트 및 록볼트 보강	하중분담율 70%
step 04	3차로 터널 상부 강성숏크리트	하중분담율 100%
step 05	3차로 터널 하부 굴착	하중분담율 40%
step 06	3차로 터널 하부 연성숏크리트 및 록볼트 보강	하중분담율 70%
step 07	3차로 터널 하부 강성숏크리트	하중분담율 100%
step 08	3차로 터널 지보재 삭제 및 라이닝 타설	-
step 09	초기화	변위 zero
step 10	4차로 터널 상부 굴착 및 3차로 라이닝 삭제	하중분담율 40%
step 11	4차로 터널 상부 연성숏크리트 및 록볼트 보강	하중분담율 70%
step 12	4차로 터널 상부 강성숏크리트	하중분담율 100%
step 13	4차로 터널 하부 굴착	하중분담율 40%
step 14	4차로 터널 하부 연성숏크리트 및 **록볼트 보강**	하중분담율 70%
step 15	4차로 터널 하부 강성숏크리트	하중분담율 100%

(다) 해석결과

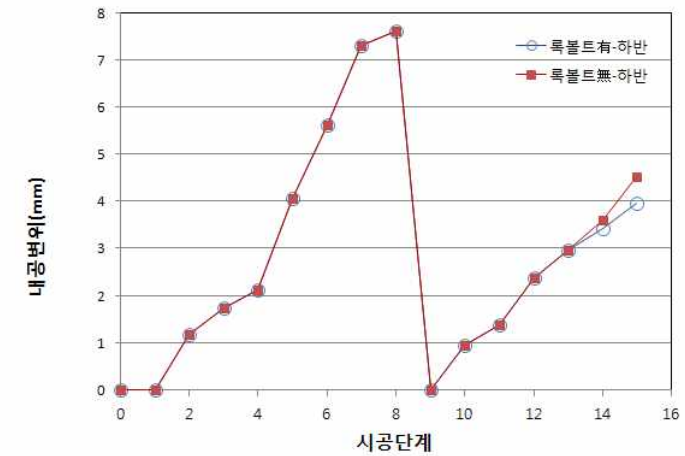
천단 변위발생 경향



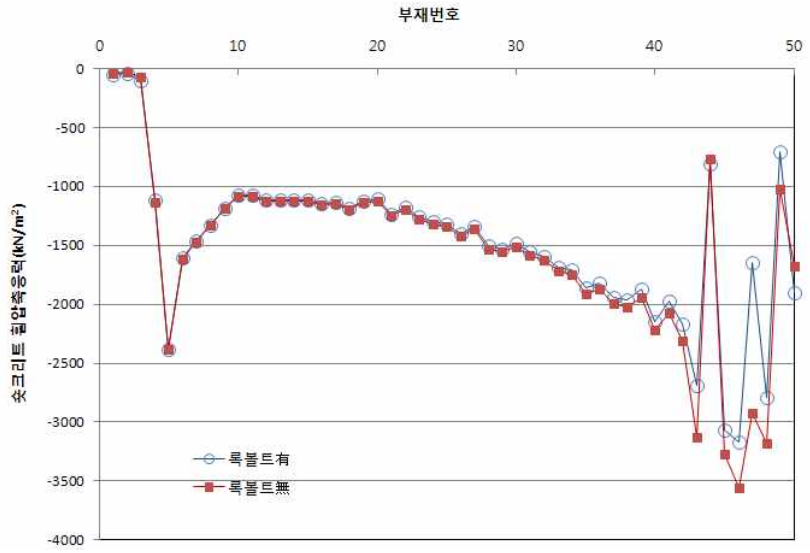
상반내공 변위발생 경향



하반내공 변위발생 경향



숏크리트 발생응력

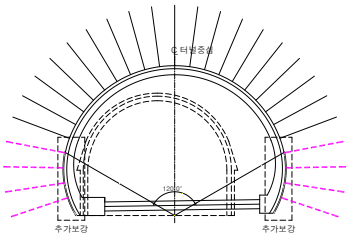
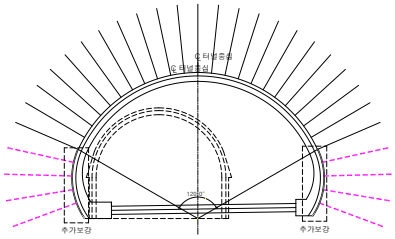
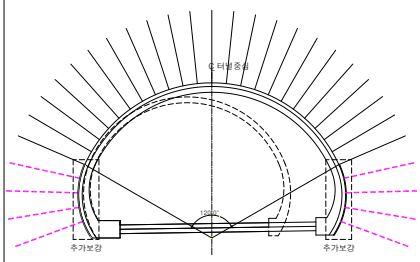


(라) 검토결론

기존 운용중인 2차로 병설터널의 3차로 확폭공사에 따른 안정성 검토 결과, 하부 록볼트 유·무에 따른 천단침하량의 차이는 미소한 것으로 나타났고, 하부 록볼트 유·무에 따른 상반 내공변위의 차이는 미소한 것으로 나타났으며- 하부 록볼트 유·무에 따른 하반 내공변위는 최대 0.57mm 차이가 나는 것으로 나타났다. 숏크리트 발생응력 검토결과, 하부 록볼트 유·무에 따른 숏크리트 발생응력 검토결과 천단 아치부의 영향은 미소한 것으로 나타났으며, 편측 굴착에 의하여 우측벽부에서 휨압축응력 최대 증가량은 1.2MPa이며, 최대 발생응력은 3.5MPa이 발생하는 것으로 나타났다

바. 록볼트 미설치부 숏크리트 두께 증가량 산정

측벽부 록볼트 시공 有·無에 따른 터널지보재(숏크리트)에 발생되는 응력에 대한 검토결과 록볼트를 미설치한 구간에서 숏크리트 응력이 다소 증가하는 것으로 나타났다. 록볼트 미설치구간에서 터널 주지보재인 숏크리트 두께를 증가시켜 록볼트 설치시에 발생되는 숏크리트 응력과의 비교 분석 수행하였다. 측벽 록볼트 미설치에 의한 영향 범위를 하부 바닥면 기준 120°범위로 가정하여 보강범위를 설정하였다.

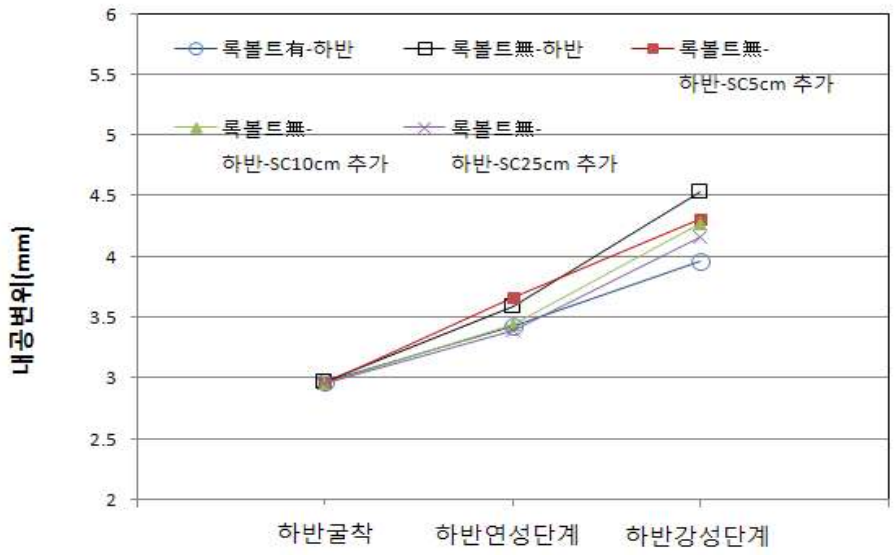
2차로 → 3차로 숏크리트 보강범위	2차로 → 4차로 숏크리트 보강범위	3차로 → 4차로 숏크리트 보강범위
		

(1) 측벽부 숏크리트 두께 증가에 따른 숏크리트 발생응력 검토

(가) 변위발생 경향

측벽부 숏크리트 두께증가(당초 25cm+α(증가량))에 따른 측벽부 내공변위 검토결과는 다음과 같다. 검토결과 숏크리트 두께증가에 따른 최종단계 측벽 내공변위 제어효과는 미소한 것으로 나타났다.

숏크리트 두께 증가에 따른 측벽부 내공변위 발생 경향(3차로 -> 4차로)

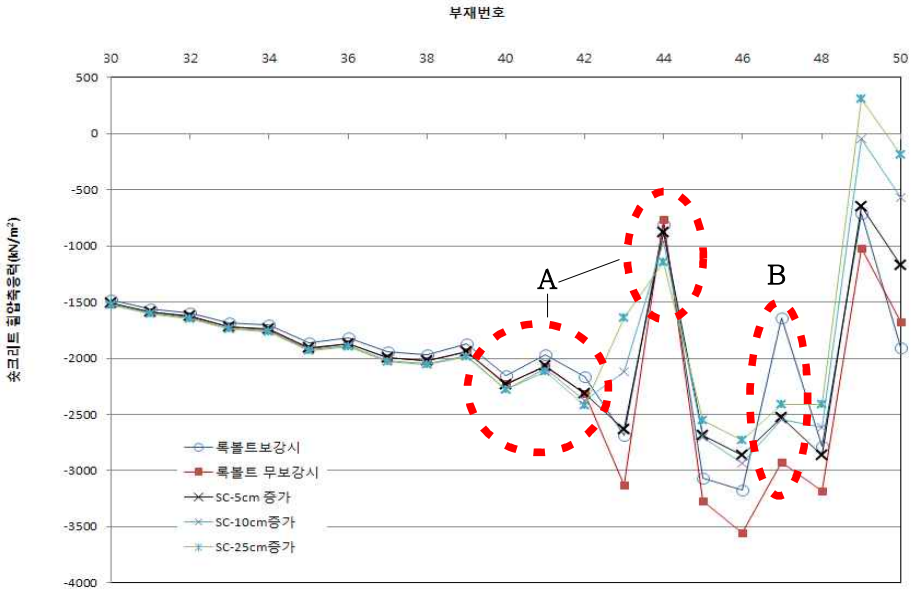


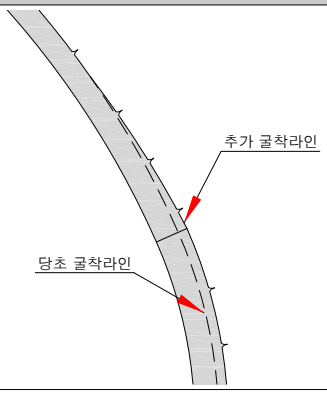
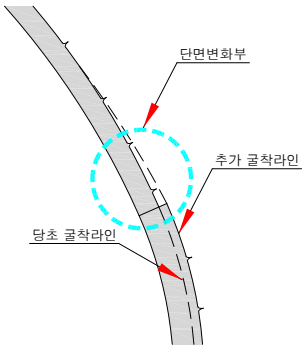
(나) 숏크리트 발생응력

3차로→4차로 확폭단면에 대하여 측벽부 숏크리트 두께 증가에 의한 발생응력 검토결과, "B" 지점은 상·하 분할 경계부로 록볼트 미설치로 인하여 숏크리트 응력이 상대적으로 크게 발생하는 구간으로 이 구간은 숏크리트 두께 증가에 따른 응력 감소량은 미소한 것으로

판단되었다. 숏크리트 두께가 변화하는 구간(부재번호 44~50)에서는 특이구간(B)이외에는 숏크리트 두께 증가로 숏크리트 발생응력이 감소하는 것으로 나타났다. 부재번호(~44) 이전구간에서는 측벽부 숏크리트 두께를 증가할수록 숏크리트 두께증가 이외의 구간에서 숏크리트 응력이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 영향은 해석적 검토시 검토영역에서 두께변화를 고려한 단면변화부(taper)를 고려하지 않아 강성차이에 의한 응력전이의 영향으로 판단된다. 단면변화에 의한 강성차이로 인한 응력역전이 발생하나 그 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

숏크리트 두께 증가에 따른 숏크리트 발생응력(우측벽부)



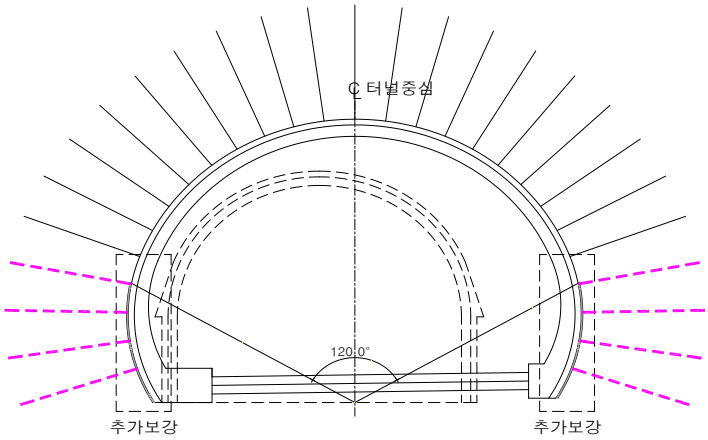
실제 시공조건	해석적 검토조건
	

(다) 결 론

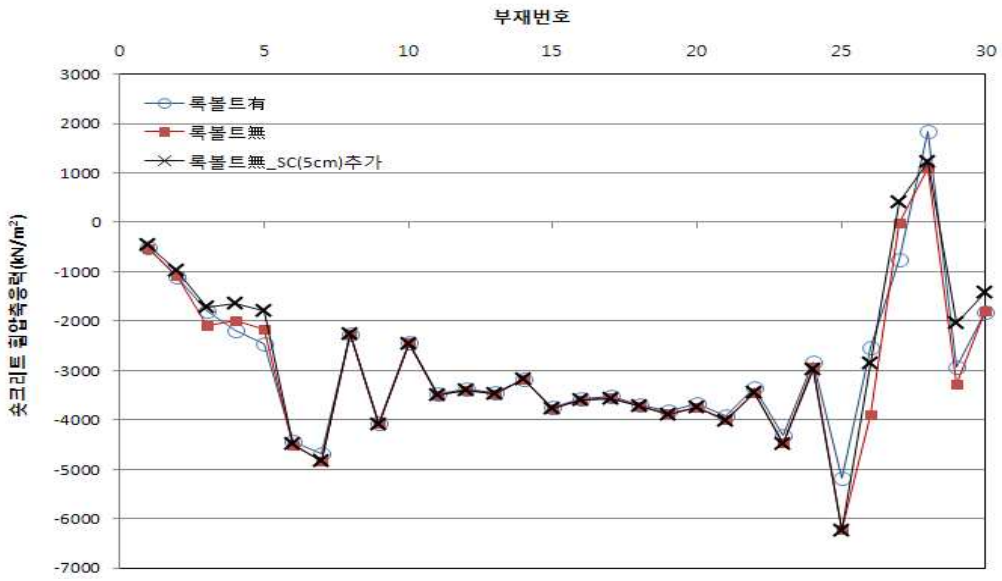
측벽부 록볼트 미설치부 터널 지보효과 증대를 위하여 숏크리트 두께 증가에 의한 검토결과, 숏크리트 두께 증가에 의한 터널 내공변위의 영향은 미소한 것으로 판단된다. 숏크리트 두께를 20%만 증가시켜도 록볼트 미설치에 의하여 숏크리트에 추가로 발생된 응력을 충분히 분담할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서, 록볼트 미설치에 의한 숏크리트 두께는 20~25%를 증가 시켜 검토조건별 해석을 수행하였다.

(2) 2차로 ⇨ 3차로 확폭구간 추가보강

2차로 → 3차로 확폭단면 추가보강 개념도



2차로 → 3차로 확폭단면 측벽부 추가보강시

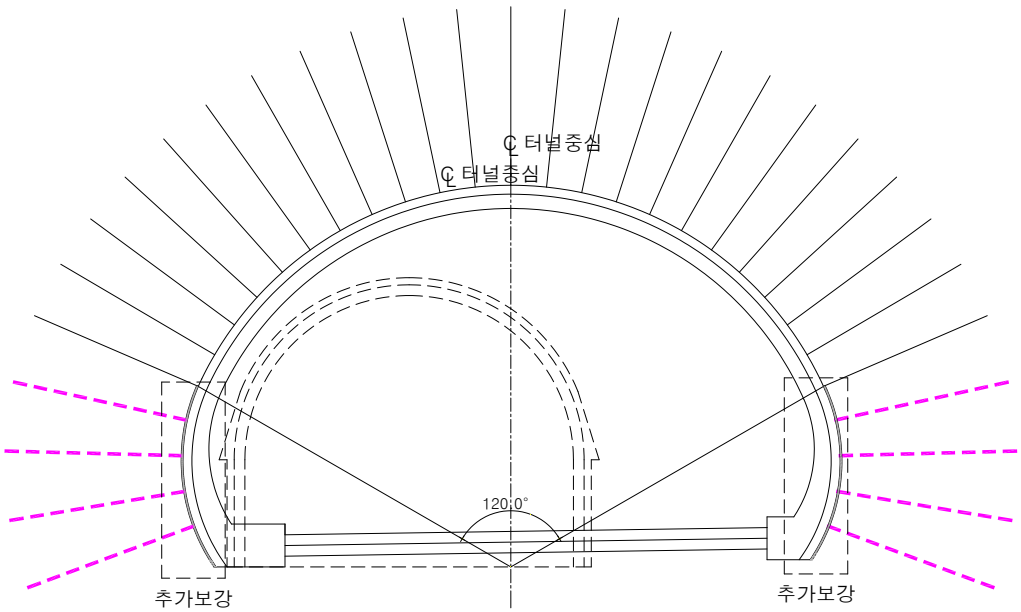


록볼트 미설치 구간의 숏크리트 두께 25% 증가(200mm → 250mm)시 하부 록볼트 설치시

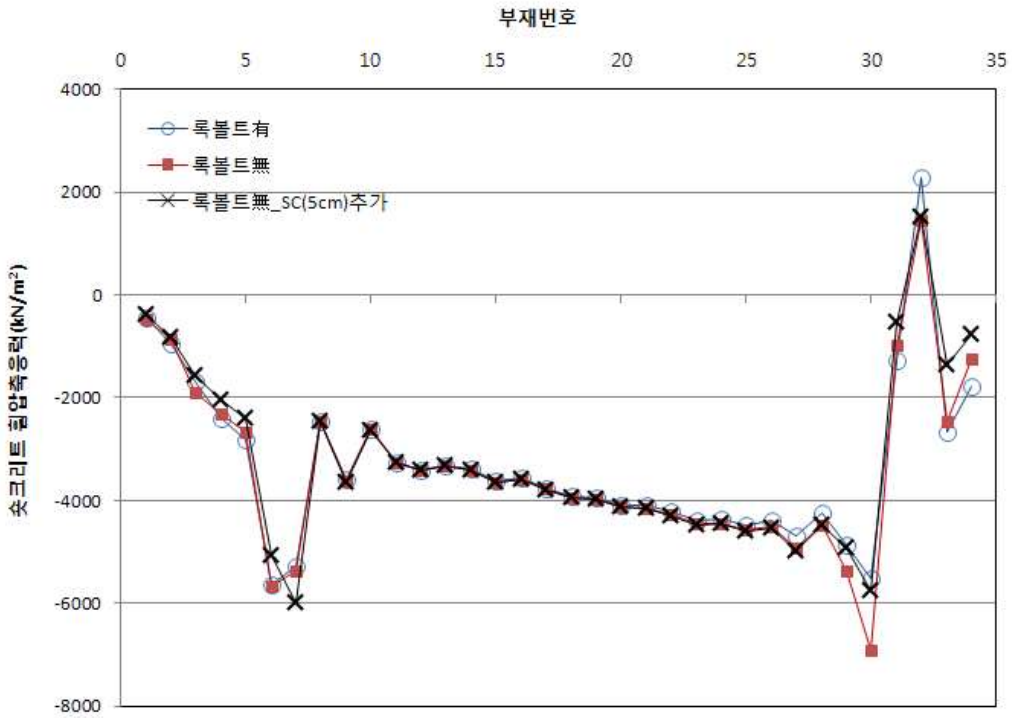
의 숏크리트응력과 비교하여 유사한 경향(보강효과)을 나타났다

(3) 2차로 ⇨ 4차로 확폭구간 추가보강

2차로 → 4차로 확폭단면 추가보강 개념도



2차로 → 4차로 확폭단면 측벽부 추가보강시

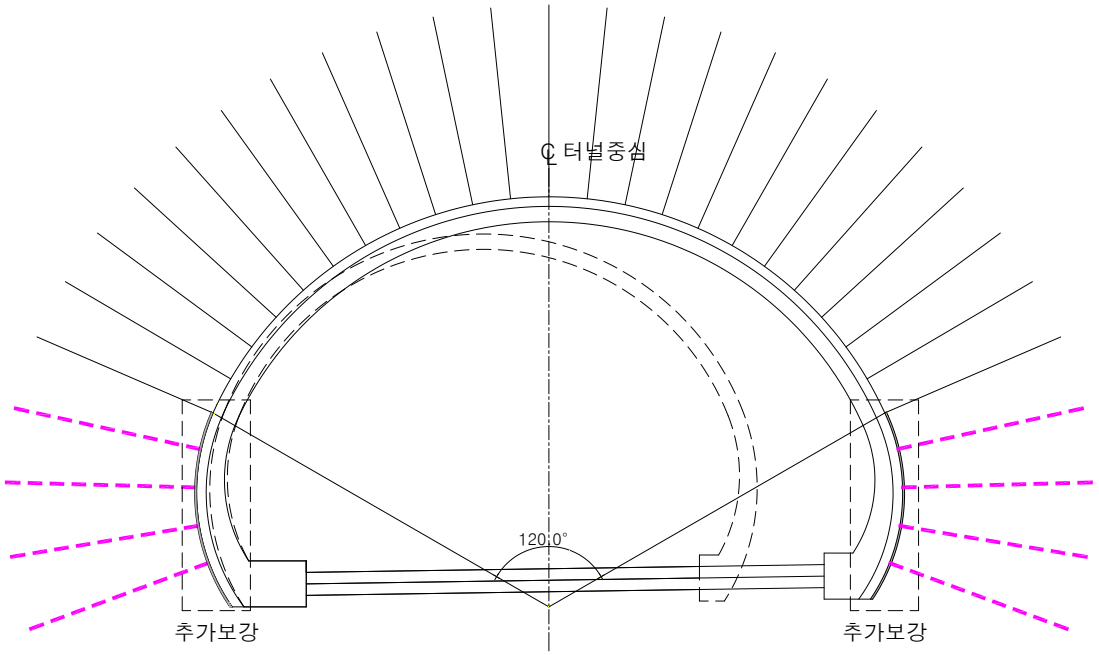


록볼트 미설치 구간의 숏크리트 두께 20% 증가(250mm → 300mm)시 하부 록볼트 설치시

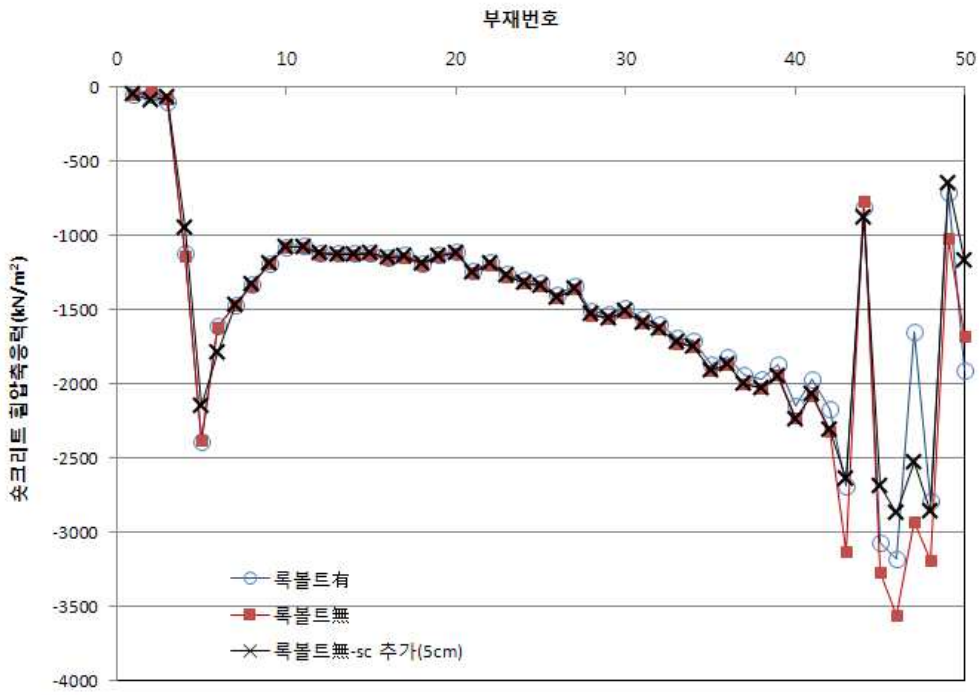
의 숏크리트응력과 비교하여 유사한 경향(보강효과)을 나타났다

(4) 3차로 ⇨ 4차로 확폭구간 추가보강

3차로 → 4차로 확폭단면 측벽부 추가보강시



3차로 → 4차로 확폭단면 측벽부 추가보강시



록볼트 미설치 구간의 숏크리트 두께 20% 증가(250mm → 300mm)시 하부 록볼트 설치시의 숏크리트응력과 비교하여 유사한 경향(보강효과)을 나타났다

(5) 결론

• 예비 검토를 통하여 측벽부 숏크리트를 일정두께 이상 증가시켜도 변위억제 및 숏크리트 응력 감소 효과는 적은 것으로 판단되어 터널 확폭에 의한 해석조건별 숏크리트 두께는 20~25%만 증가하여 검토수행하였다

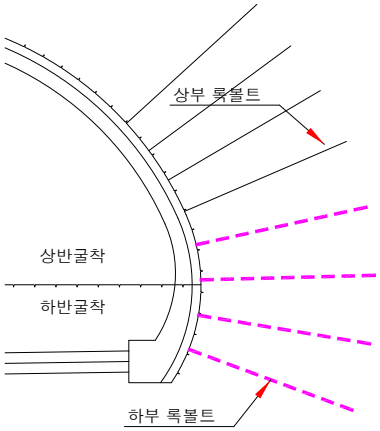
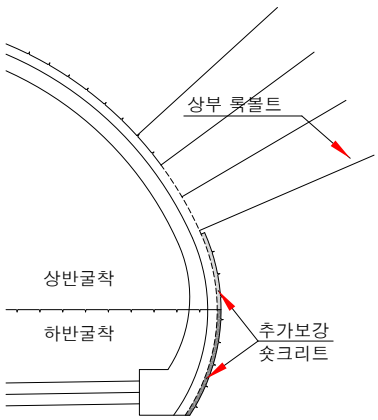
• 2차로에서 3차로 확폭조건 검토결과 록볼트가 미설치되는 측벽부 숏크리트를 25%증가시킨 경우(20cm→25cm) 일부 지점을 제외한 숏크리트 발생응력이 록볼트 설치시와 비슷한 응력 수준을 나타내는 것으로 나타났다

• 2차로에서 4차로 확폭조건 검토결과 록볼트가 미설치되는 측벽부 숏크리트를 20%증가시킨 경우(25cm→30cm) 일부 지점을 제외한 숏크리트 발생응력이 록볼트 설치시와 비슷한 응력 수준을 나타내는 것으로 나타났다

• 3차로에서 4차로 확폭조건 검토결과 록볼트가 미설치되는 측벽부 숏크리트를 20%증가시킨 경우(25cm→30cm) 일부 지점을 제외한 숏크리트 발생응력이 록볼트 설치시와 비슷한 응력수준을 나타내는 것으로 나타났다

• 록볼트 설치시와 숏크리트 두께 증가시에 대한 비교검토 수행시 록볼트 설치 지점 및 상하 분할 굴착 경계부에서의 응력이 다소 상이하게 나타났다

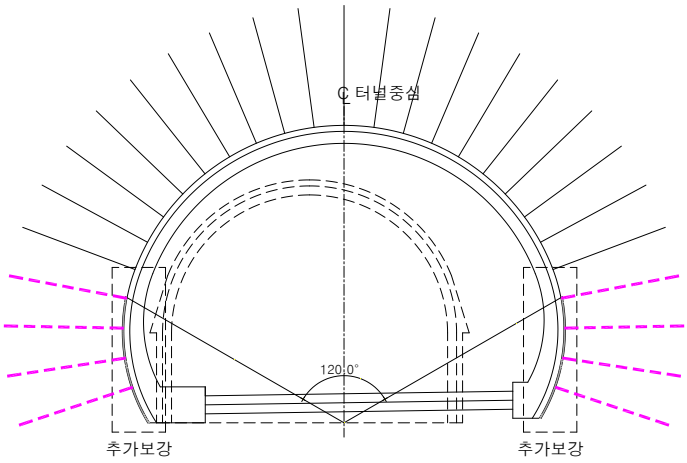
• 일반적으로 상반굴착시 상부하단부 록볼트는 시공성을 고려하여 하부굴착이 완료된 후 시공이 되므로 이에따라 상하분할 경계부에서 상부쪽 숏크리트를 추가 보강할 경우 숏크리트 응력이 록볼트 설치시 보다 다소 작게 발생되었다.

록볼트 보강시	숏크리트 추가보강시(록볼트 미설치)
	
• 하반 굴착 및 록볼트 설치 후 상반 측벽부 보강효과 발휘	• 상반 굴착 후 측벽부 숏크리트 두께 증가에 의한 보강효과 발휘

사. 개략 공사비 비교

(1) 2 → 3 차로 확폭

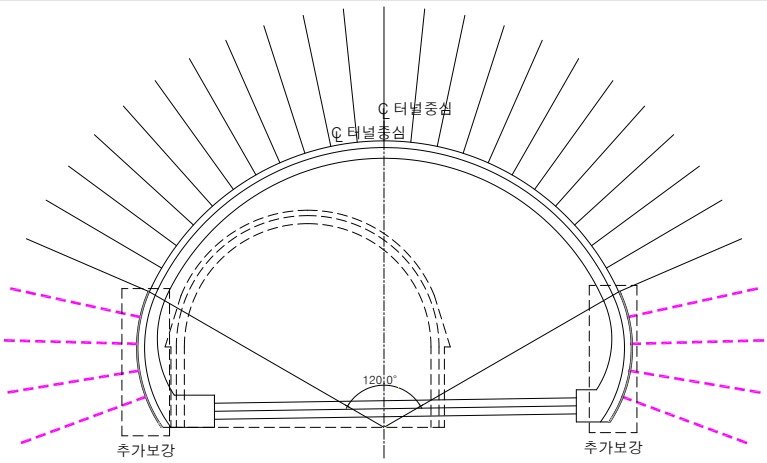
2차로 → 3차로 확폭(5cm 확폭시)



공 종		단위	수량	단가(원)	개략공사비(원)	비고
숏크리트추가	굴 착(50mm)	m^3/m	0.426	61,956	26,393	설계굴착량
	버력처리	m^3/m	0.426	3,072	1,309	-
	숏크리트(50mm)	m^3/m	3.333	193,527	91,603	리바운드량 10%포함
	숏크리트버력처리	m^3/m	0.333	3,088	146	-
록볼트		EA/m	8	57,097	456,776	-

(2) 2 → 4 차로 확폭

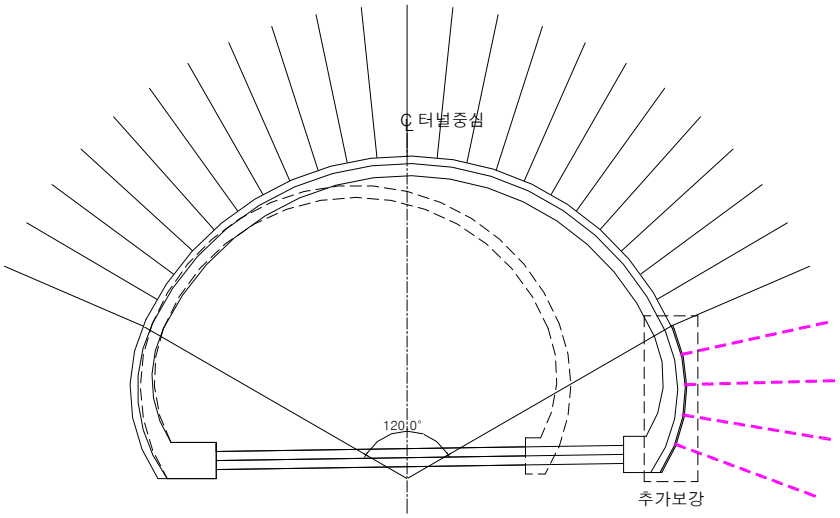
2차로 → 4차로 확폭(5cm 확폭시)



공 종		단위	수량	단가(원)	개략공사비(원)	비고
숏크리트 추가	굴 착(50mm)	m^3/m	0.521	61,956	32,279	설계굴착량
	버력처리	m^3/m	0.521	3,072	1,601	-
	숏크리트(50mm)	m^3/m	3.333	193,527	112,031	리바운드량 10%포함
	숏크리트버력처리	m^3/m	0.333	3,088	179	-
록볼트		EA/m	8	57,097	456,776	-

(3) 3 → 4 차로 확폭

3차로 → 4차로 확폭(5cm 확폭시)



공 종		단위	수량	단가(원)	개략공사비(원)	비고
숏크리트 추가	굴 착(50mm)	m^3/m	0.521	61,956	32,279	설계굴착량
	버력처리	m^3/m	0.521	3,072	1,601	-
	숏크리트(50mm)	m^3/m	3.333	193,527	112,031	리바운드량 10%포함
	숏크리트버력처리	m^3/m	0.333	3,088	179	-
록볼트		EA/m	8	57,097	456,776	-

(4) 개략 공사비 비교

본 연구에서는 설계공사비 기준으로 공사비를 산정하였으며, 숏크리트공 및 록볼트공 공사비 산정시 주요자재(시멘트, 세골재등)는 포함하지 않은 개략단가이다. 공사비 검토는 록볼트 설치 공사비와 숏크리트 두께 증가(5cm)량에 대한 공사비에 대한 비교검토 수행하였다.

구 분	록볼트 설치시	숏크리트 두께 증가시(록볼트 미설치)	비 고
2 → 3차로 확폭	456,776	119,451	양측 숏크리트 50mm 추가, 록볼트 8개
2 → 4차로 확폭	456,776	146,089	양측 숏크리트 50mm 추가, 록볼트 8개
3 → 4차로 확폭	456,776	146,089	양측 숏크리트 50mm 추가, 록볼트 4개

5. 운영 중 터널확대 시 지반종단변형특성

공사 중 차량을 운행시키기 위해서는 굴착작업과 차량운행공간을 분리시키고 차량을 보호하기 위한 프로텍터를 기존터널내부에 설치하는데 일본의 경우 본 공법이 적용된 터널연장이 대부분 300m 이내로 짧아 터널 전연장에 걸쳐 강재프로텍터를 설치한 후 터널을 확대하였다.(김동규 2007, 서경원 2008). 하지만 국내 터널의 경우 통상 수 백m 이상이므로 모두 강재프로텍터를 설치할 경우 경제성과 시공성이 급격히 저하될 우려가 있다. 일반적으로 터널 굴착 시 굴착에 의한 영향범위는 막장을 기준으로 일정범위로 국한된다. 따라서 터널확대 시 지반변형특성을 분석하여 프로텍터의 합리적인 보호범위를 도출한다면 공사의 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

기존에 제안된 터널종단변형곡선식은 신규터널건설에 국한된 것이므로 내부에 터널이 건설된 상태에서 확대 할 경우의 지반거동특성을 반영하지 못하는 문제가 있다. 터널확대 시 지반변형특성 분석으로는 김웅구(2008)는 1차선 터널을 3차선 터널로 확대 시 확대종류와 지반강도에 따른 거동특성을 분석하여 프로텍터의 보호범위를 막장 전후방 약 15m로 예측하였으며 서경원(2008)은 확대차선에 따른 지반변형특성을 분석하여 확대 시 터널을 천단침하는 굴착면적에 비례하여 프로텍터는 막장 전후방 약 20m를 보호해야할 것을 제안하였다. 하지만 이는 해석조건에 국한된 것으로 일반적인 조건에 대해 정량화시킬 필요가 있다.

가. 종단변형곡선 예측식

종단변형곡선은 터널 굴착면을 중심을 터널종방향으로 전·후방에 대한 터널 중심으로의 변위를 도시한 것이다. 종단변형곡선은 터널 굴착 시 하중분담율을 산정하거나 지반반응곡선(Ground Reaction Curve, GRC)과 지보재특성곡선(Support Characteristic Curve, SCC)과 더불어 지보재의 설치시기 및 지반과 지보재의 상호작용을 이해하는데 매우 중요하다. 종단변형특성에 대한 개요를 아래 그림 3.27에 나타내었다.

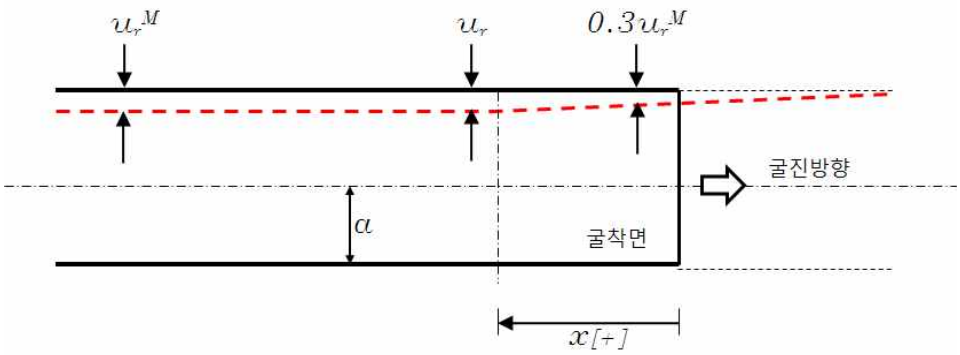


그림 3.26 종단변형특성 개요도(이인모, 2004)

Carranza and Fairhust(2000)는 Chen 등이 대만의 수력발전소 공동(cavern) 시공시의 실측 자료를 바탕으로 회귀분석한 결과 다음과 같은 터널종단변형 곡선식을 제안하였다.

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/R}{1.10}\right)\right]^{-1.7}$$

여기서, x : 굴착면 부터의 거리(후방은 '+', 전방은 '–')

u_r : 터널 임의의 지점 x에서 중심방향의 변위

u_r^M : 중심방향 최대 수렴변위

R : 원형터널의 반지름

이두화 등(2002)은 여러 지반을 대상으로 수치해석한 결과를 토대로 지반의 물성과 관계없는 다음과 같은 터널종단변형 곡선식을 제안하였다.

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/R}{0.56}\right)\right]^{-1.38}$$

기존에 제안된 터널종단변형 곡선식을 살펴보면 최대변위에 대한 임의의 지점 x에서 중심방향 변위의 비 즉, 터널굴착 시 해방된 응력에 대해 굴착면 전·후방에서 거리에 따른 분담율은 지반의 물성과는 무관하며 오직 터널의 크기와 상관관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 기존에 제안된 식을 일반화하면 다음과 같다.

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/R}{a}\right)\right]^b$$

여기서, x : 굴착면 부터의 거리(후방은 '+', 전방은 '-')

u_r : 터널 임의의 지점 x에서 중심방향의 변위

u_r^M : 중심방향 최대 수렴변위

R : 원형터널의 반지름

a, b : 회귀상수

하지만 위의 식은 신규터널건설에 국한되므로 아래그림과 같이 기존터널이 건설된 상태에서 확대하는 상황을 반영하지 못하고 있다. 터널확대 시 지반거동특성을 분석하기 위해서는 확대터널뿐 아니라 기존터널의 거동특성도 종합적으로 분석되어야 하며(그림 3.27) 기존터널이 건설된 상태가 지반종단변형에 미치는 영향을 분석하여 이를 종단변형곡선에 반영하여야 할 것으로 판단된다.

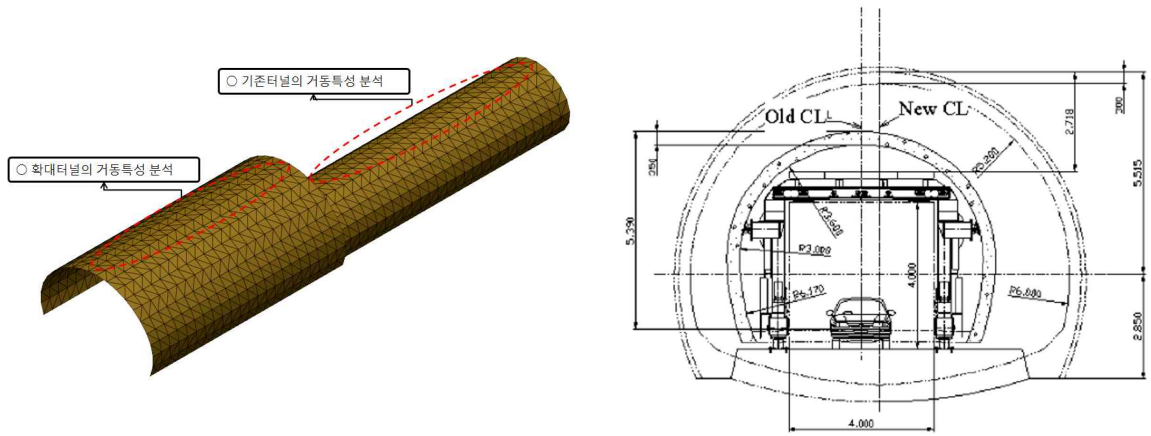


그림 3.27 터널확대 개요도

나. 수치해석

(1) 개요

3차원 유한요소 해석에 사용된 프로그램은 MIDAS GTS이며 지반의 구성모델은 탄소성해석을 위해 Mohr-Coulomb을 사용하였다. 굴착단계별 거동특성을 파악하기 위해 시공단계해석을 수행하였으며 시공단계 구성은 그림 3.28과 같다.



그림 3.28 시공단계 구성

(2) 해석조건

해석에 적용된 주 지보재의 물성은 다음 표 3.20과 같다.

표 3.20 주 지보재의 물성값

구분	단위중량 (kN/m^3)	점착력 (MPa)	마찰각(°)	탄성계수 (MPa)	포아송비
연성 숏크리트	24	-	-	5000	0.2
강성 숏크리트	24	-	-	15,000	0.2
록볼트	78.5		-	210,000	0.3

해석지반의 강도는 연암지반의 강도로 가정하였으며 차로별 단면은 도로터널 표준단면을 적용하였다. 지반의 강도와 확대조건에 따라 해석케이스를 산정하였으며 크게 지반강도의 영향을 확인하기 위한 해석케이스, 종단변형곡선을 제안하기 위한 케이스, 신규터널과 확대터널을 비교분석하여 기존에 제안된 종단변형곡선식의 적용성을 살펴보기 위한 케이스 및 제안한 곡선식을 검증하기 위한 케이스로 분류하였으며 다음 표 3.21에 나타내었다.

표 3.21 해석케이스 산정

구분	확대 조건	단위중량 (kN/m^3)	점착력 (MPa)	마찰각 (deg.)	탄성계수 (MPa)	포아송비	목적
CASE 1	2차로->3차로	25	0.5	40	5,000	0.3	지반강도에 따른 종단변형곡선 분석
CASE 2	2차로->3차로	25	0.5	40	5,000	0.22	
CASE 3	2차로->3차로	26	0.5	40	5,000	0.25	
CASE 4	2차로->3차로	21	0.5	40	5,000	0.25	
CASE 5	2차로->3차로	25	4.3	40	5,000	0.25	
CASE 6	2차로->3차로	25	0.15	40	5,000	0.25	
CASE 7	2차로->3차로	25	0.5	40	5,000	0.25	
CASE 8	2차로->3차로	25	0.5	31	5,000	0.25	
CASE 9	2차로->3차로	25	0.5	40	19,130	0.25	
CASE 10	2차로->3차로	25	0.5	40	14,545	0.25	
CASE 11	2차로->3차로	25	0.5	40	9,960	0.25	
CASE 12	2차로->3차로	25	0.5	40	790	0.25	
CASE 13	1차로->2차로	25	0.7	35	1,000	0.3	확대 시 종단변형곡선 제안
CASE 14	1차로->3차로	25	0.7	35	1,000	0.3	
CASE 15	1차로->4차로	25	0.7	35	1,000	0.3	
CASE 17	2차로->4차로	25	0.7	35	1,000	0.3	
CASE 18	3차로->4차로	25	0.7	35	1,000	0.3	
CASE 19	신규2차로	25	0.7	35	1,000	0.3	신규터널과 확대터널 비교분석
CASE 20	신규3차로	25	0.7	35	1,000	0.3	
CASE 21	신규4차로	2.5	70	35	100,000	0.3	
CASE 16	2차로->3차로	2.5	70	35	100,000	0.3	제안한 종단변형곡선 검증

다. 수치해석결과 분석

(1) 지반물성에 의한 분석

지반물성이 터널종단변형곡선식에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 각 케이스별 최대변위에 대한 각 지점별 변위의 비를 도시하여 아래 그림 3.29 및 그림 3.30에 나타내었다.

아래 그림에서 알 수 있듯이 최대 천단침하에 대한 각 지점별 천단침하의 비는 지반의 물성과 관계없이 거의 유사한 것으로 나타났다. 즉 터널의 굴착에 따라 해방된 응력이 터널 종방향으로 재분배될 때 지반의 물성과 관계없이 길이방향으로 일정한 비율로 분배됨을 의미한다.

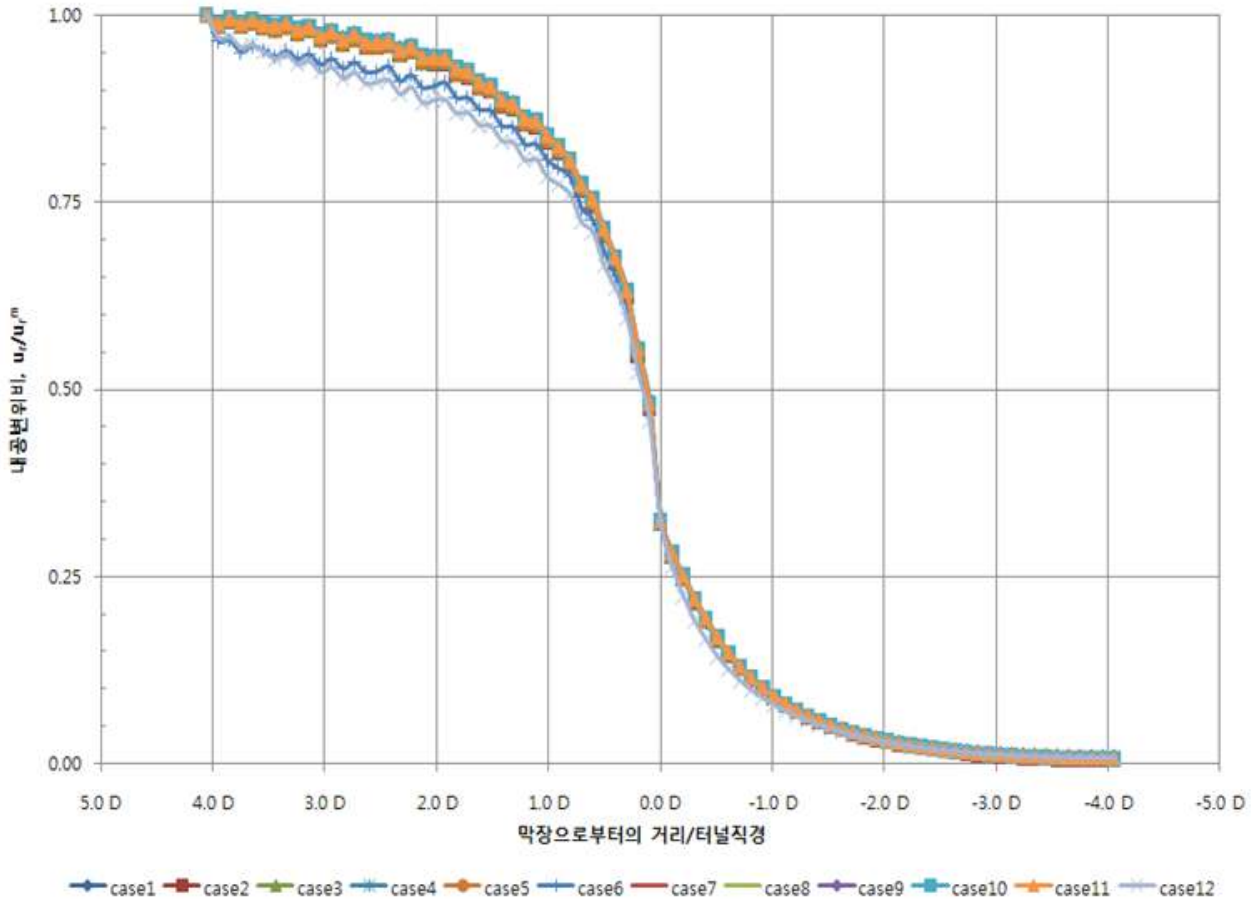


그림 3.29 지반물성에 따른 확대터널을 종단변형곡선

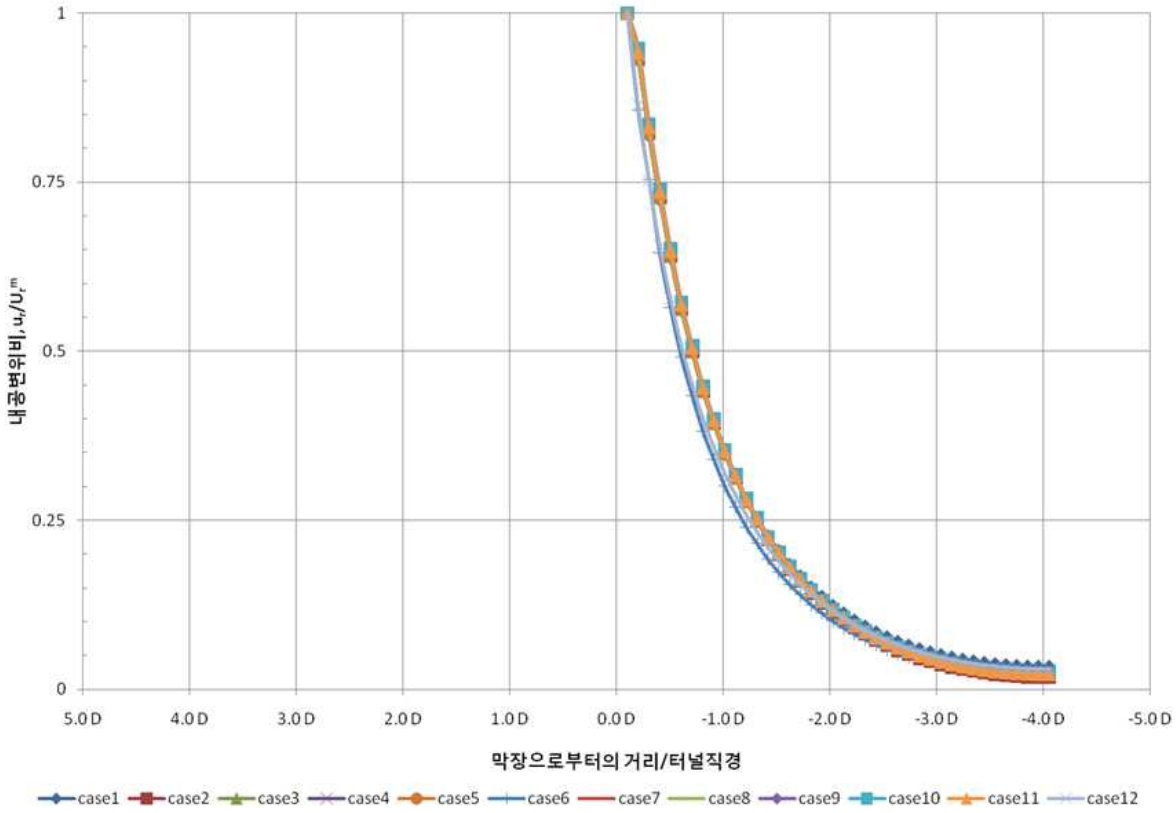


그림 3.30 지반물성에 따른 기존터널의 종단변형곡선

(2) 신규터널과 확대터널의 종단변형곡선 비교

그림 3.31 및 그림 3.32에는 2차로를 3차로와 4차로로 확대하는 경우와 신규로 3차로와 4차로 건설할 때 막장부터의 거리별 내공변위의 비를 도시하였다.

기존 제안된 식에서 차로가 같다면 동일한 종단변형특성을 보여야 하는데 그림에서 보면 동일한 차로일지라도 확대터널과 신규터널의 종방향 변형특성이 다른 것을 알 수 있다. 특히 굴착면 전방에서 더 큰 차이를 보이는데 그 이유는 확대터널의 경우 기존터널이 건설되어 있어 해방된 응력을 지지할 수 있는 지반이 신규터널에 비해 작기 때문으로 판단된다. 따라서 기존에 제안된 종단변형곡선식은 터널확대 시의 종단변형특성을 합리적으로 반영하지 못할 것으로 판단된다.

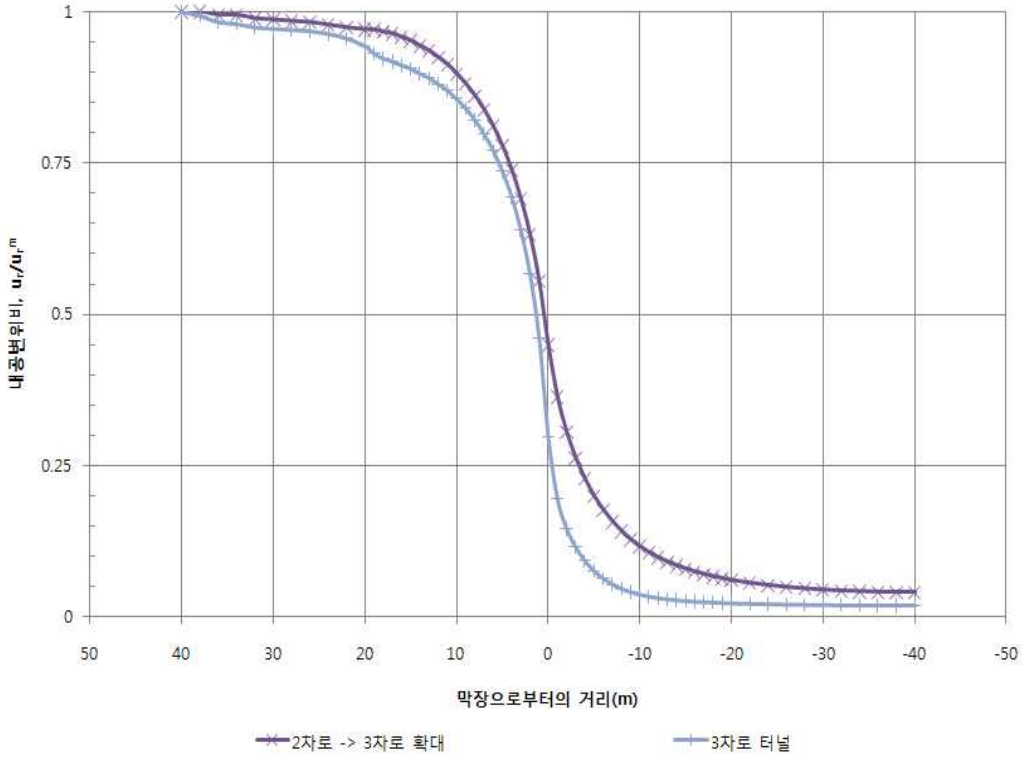


그림 3.31 2차로 → 3차로 확대 VS. 3차로 신규건설 시 종단변형특성

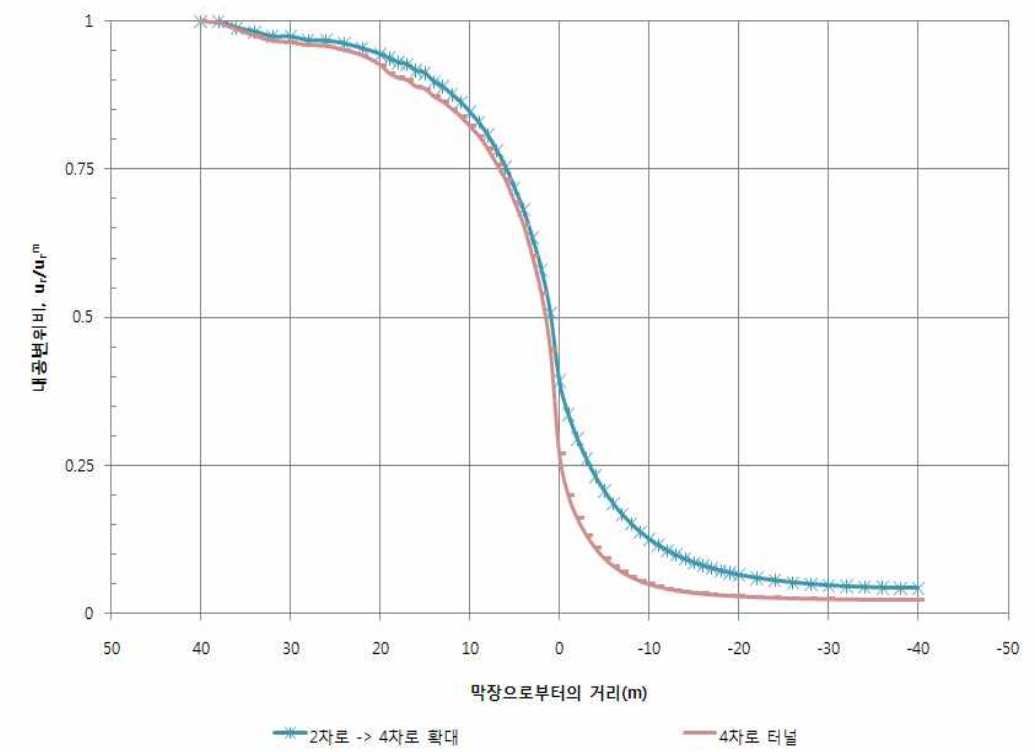


그림 3.32 2차로 → 4차로 확대 VS. 4차로 신규건설 시 종단변형특성

(3) 확대차로에 의한 영향 분석

확대차로 즉 터널의 기하조건이 터널종단변형곡선식에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 확대차로별 최대변위에 대한 각 지점별 변위의 비를 그림 3.33 및 그림 3.34에 나타내었다.

아래 그림에서 알 수 있듯이 확대터널의 종단변형곡선은 막장 전후방에서 다른 특성을 나타내는데 막장후방에서는 확대굴착면적이 적을수록 경사가 급하게 나타났으며 막장전방에서는 확대굴착면적과 관계없이 기존터널의 차로가 동일할 경우 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 확대된 부분의 변형은 굴착면적이 적을수록 영향범위가 적게 발생되나 기존터널 부분에서는 기존차로에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

기존터널의 종단변형곡선은 확대터널의 확대부분과 유사하게 확대굴착면적이 적을수록 경사가 급해지는 경향을 보이고 있다. 또한 최종변위에 대한 각 지점별 변위의 비의 최종값이 0의 값에 근접하지 못하고 있는 것을 알 수 있는데 이는 기 굴착의 영향으로 선행변위가 발생되어 있기 때문으로 판단된다.

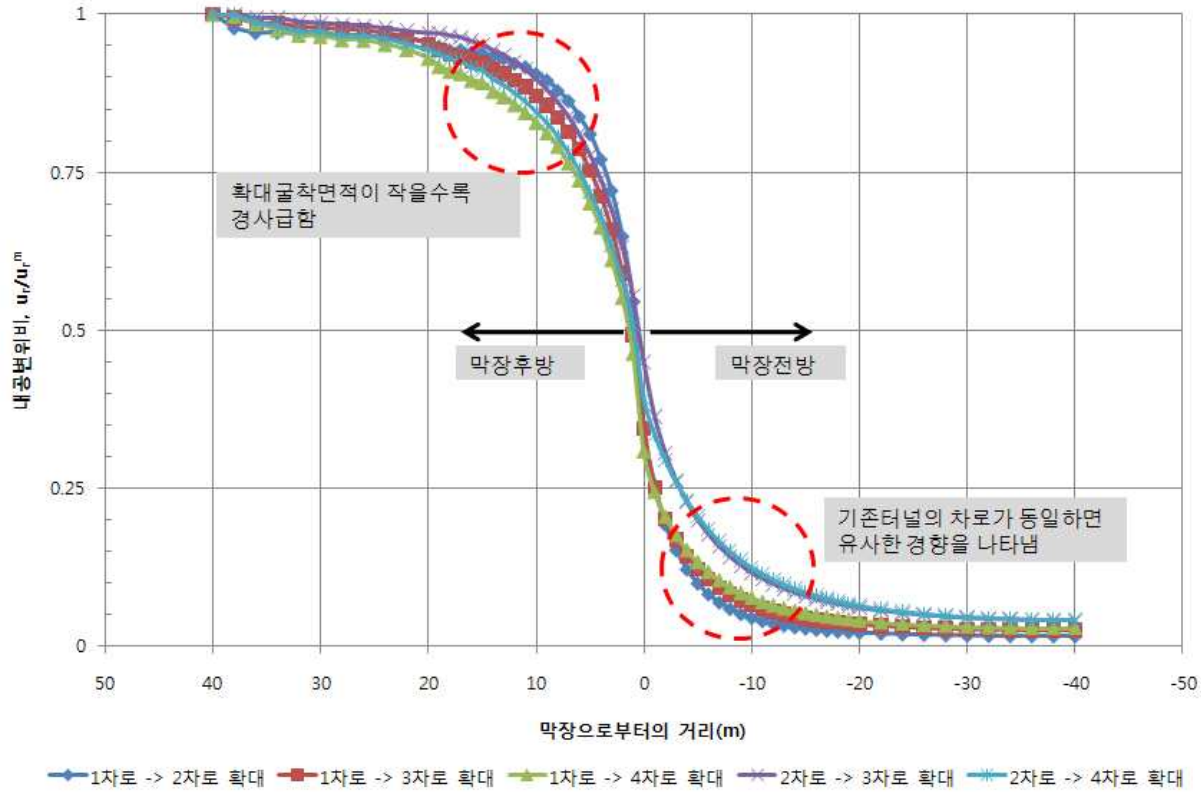


그림 3.33 확대차로별 확대터널의 종단변형곡선

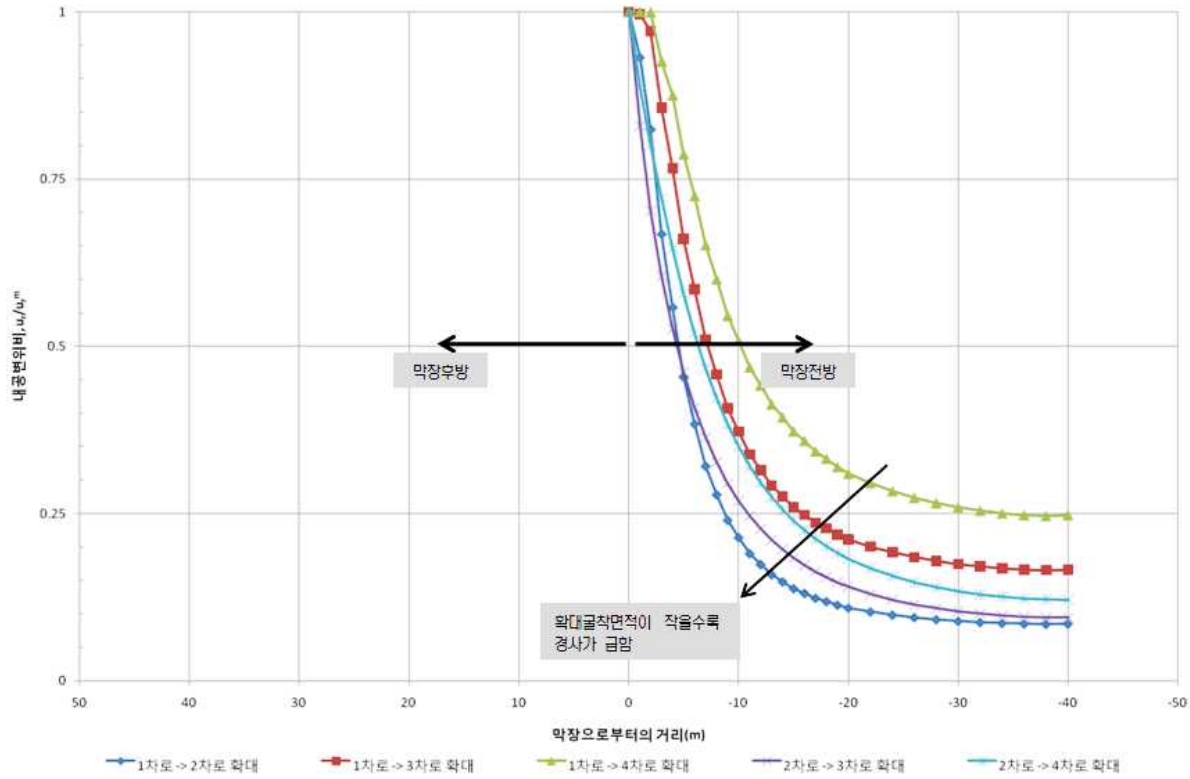


그림 3.34 확대차로별 기존터널의 종단변형곡선

라. 터널확대 시 종단변형곡선 제안 및 검증

(1) 확대터널의 종단변형곡선

수치해석을 분석한 결과 터널확대 시 지반의 종단변형곡선은 제안된 식과 같이 지반의 물성과는 무관하며 확대굴착면적과 기존차로의 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 또한 확대터널의 경우 막장 전후방에서 다른 특성을 나타내므로 이를 분리하여 파악하여야 한다. 제안된 식에서 변수인 터널의 직경이 굴착면적에 직접적으로 관련되는 것이므로 확대굴착면적을 등가의 원형터널 직경으로 환산하면 이를 쉽게 고려할 수 있을 것이다. 즉 기존의 터널 직경(R) 대신에 확대굴착면적을 나타내는 등가의 원형터널 직경($\sqrt{R_{enlarge}^2 - R_{old}^2}$)을 적용하면 보다 정확한 종단변형특성을 알 수 있을 것이다. 이상의 결과를 토대로 다음과 같이 확대터널의 종단변형곡선의 일반식을 얻을 수 있다.

$x \geq 0$인 경우(굴착면 후방의 경우)

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/(\sqrt{R_{enlarge}^2 - R_{old}^2})}{a}\right)\right]^b \quad (1)$$

$x < 0$인 경우(굴착면 전방의 경우)

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/R_{old}}{a}\right)\right]^b \quad (2)$$

여기서, x : 굴착면으로 부터의 거리(후방은 '+', 전방은 '−')

u_r : 터널 임의의 지점 x에서 중심방향의 변위

u_r^M : 중심방향 최대 수렴변위

$R_{enlarge}$: 확대터널의 반경

R_{old} : 기존터널의 반경

a, b : 회귀상수

즉, 식 (1)은 굴착면 후방에서 확대굴착면적에 따라 변하는 종단변형특성을 고려하기 위하여 굴착면적을 등가의 원형터널 반경으로 나타낸 것이며 식 (2)는 굴착면 전방에서 종단변형특성은 기존터널 크기에 지배되는 특성을 나타낸 것이다.

제안한 종단변형곡선식의 회귀상수를 구하기 위하여 Curve Fitting방법을 이용하여 확대차로별 수치해석결과에 대해 회귀분석을 실시하였다. 확대차로별 수치해석결과를 이용한 이유는 제안식이 기존터널과 확대터널의 상대적인 차이를 반영하기 때문에 여러 가지 경우의 조합이 필요하였기 때문이다. 회귀분석결과 결정계수 R^2=0.991로 잘 일치하는 것으로 나타났으며 회귀상수 a=0.958, b=−1.171이다.

(2) 기존터널의 종단변형곡선 및 검증

기존터널의 종단변형곡선은 확대굴착면적과 관련되며 기 굴착으로 인해 선행변위가 발생되어 있으므로 현 굴착으로 인한 종단변형곡선은 선행변위를 제거한 상태에서 파악되어야 한다. 선행변위는 현 굴착으로 인해 발생되는 것이 아니므로 각 지점별 변위값의 최하값으로 생각할 있다. 이를 고려할 경우 다음과 같이 기존터널의 종단변형곡선식을 제안할 수 있다.

$x < 0$인 경우(굴착면 전방의 경우)

$$\frac{u_r}{u_r^M}\left(=\frac{u_r^x-u_r^{\min}}{u_r^{\max}-u_r^{\min}}\right)=\left[1+\exp\left(\frac{-x/\left(\sqrt{R_{enlarge}^2-R_{old}^2}\right)}{a}\right)\right]^b \quad (3)$$

여기서, x : 굴착면으로 부터의 거리(후방은 '+', 전방은 '-')

u_r : 터널 임의의 지점 x에서 현 굴착으로 인한 중심방향의 변위

u_r^M : 현 굴착으로 인한 중심방향 최대 수렴변위

u_r^x : 터널 임의의 지점 x에서의 중심방향 변위

$u_r^{\min}$: 중심방향 최하 수렴변위(=선행변위)

$u_r^{\max}$: 중심방향 최대 수렴변위

$R_{enlarge}$: 확대터널의 반경

R_{old} : 기존터널의 반경

a, b : 회귀상수

회귀상수를 구하기 위하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석결과 결정계수 R^2=0.968로 잘 일치하는 것으로 나타났으며 회귀상수 a=0.02158, b=-0.01491이다.

(3) 제안된 종단변형곡선 검증을 위한 계측사례 분석

가. 터널 A

터널 A의 기존터널제원과 확대터널제원, 지반의 조건을 다음 표 3.22에 나타내었다. 터널 A는 기존터널의 전체연장 975m중 갱구부 일부인 170m를 확대한 사례이다.

표 3.22 터널 A의 제원 및 지반조건

구분	기존터널(Old)	확대터널(New)
Construction	Conventional method	NATM
Excavation type	-	기계굴착
Length(m)	975	170
Width(m)	9.8	15.6
Height(m)	6.3	8.0
[Ground condition] - Max. overburden(m) : 38 - Geology : Sandstone, Schist, Tuff - USC(MPa) : 16 ~ 30		

다음 그림 3.35에 터널 A 확대 시 적용된 보강공법을 나타내었다. 갱구부 토피가 낮은 구간에서는 pipe roof공법이 적용되었으며 토피가 어느 정도 확보된 구간에서는 forepolling 공법이 적용되었다.

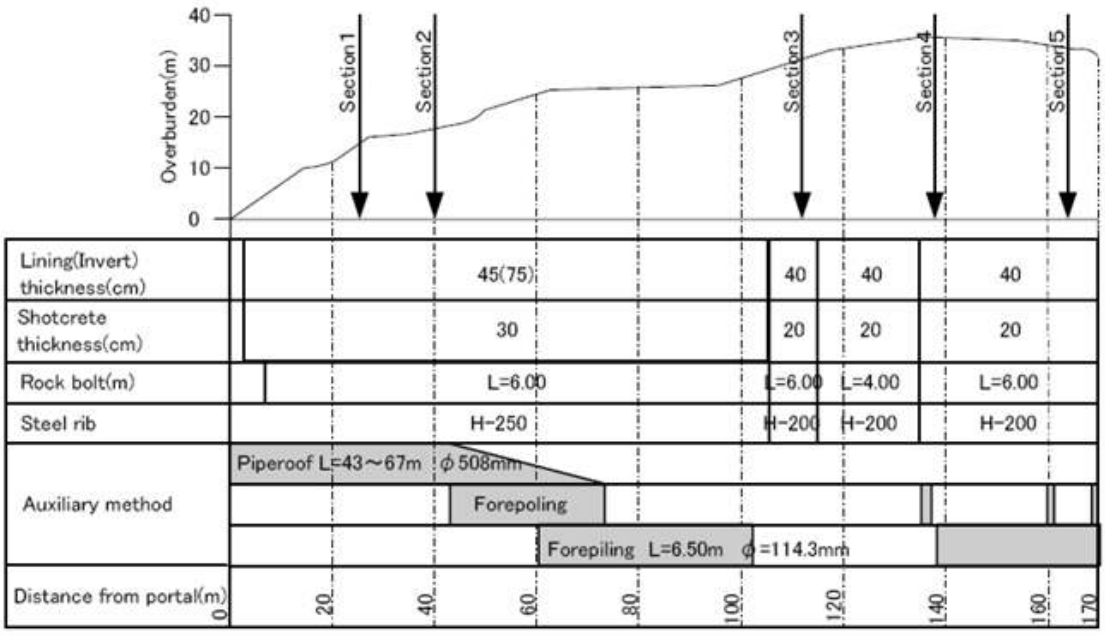


그림 3.35 터널 A 개요도(F.Tonon, 2010)

계측은 위 그림에서 section 1, 2, 3, 4, 5에서 측정되었으며 천단변위, 내공변위, 록볼트축

력, 숏크리트응력, 변형률 및 steel lib 응력이 측정되었다. 다음 그림 3.36에 변형률 및 변위의 측점과 지보재의 응력 측점을 나타내었다.

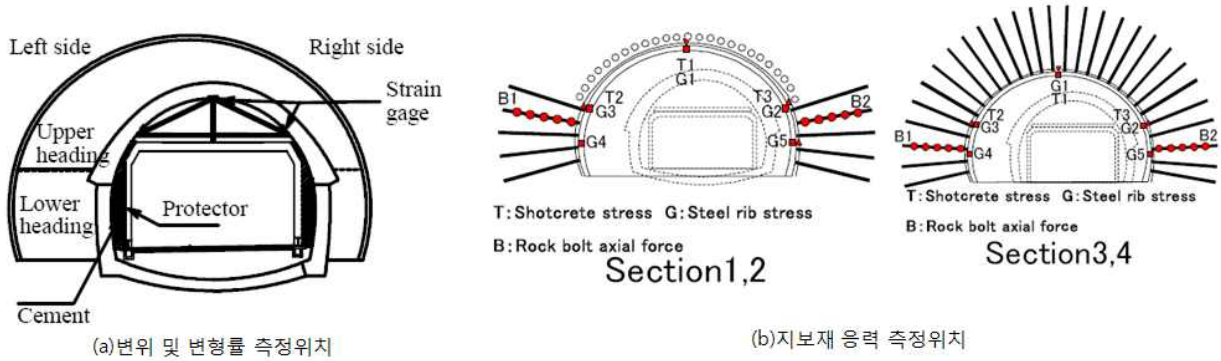


그림 3.36 터널 A 계측배치도(F.Tonon, 2010)

다음 그림 3.37은 Section 4의 변형률 및 변위 계측결과를 나타낸 것이다. Section 4의 경우 라이닝의 변형률은 터널의 막장이 계측지점 후방 2D(D: 터널직경)인 30m로 접근하였을 때 증가되기 시작하여 15m(1D)까지는 일정하다가 여기서부터 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 변위의 계측결과를 보면 막장이 계측지점 후방 25m(1.5D)까지 접근하였을 때 변위가 발생되기 시작하여 15m(1D)로 접근하였을 때 팽창경향의 변위가 압축으로 변하기 시작한다.

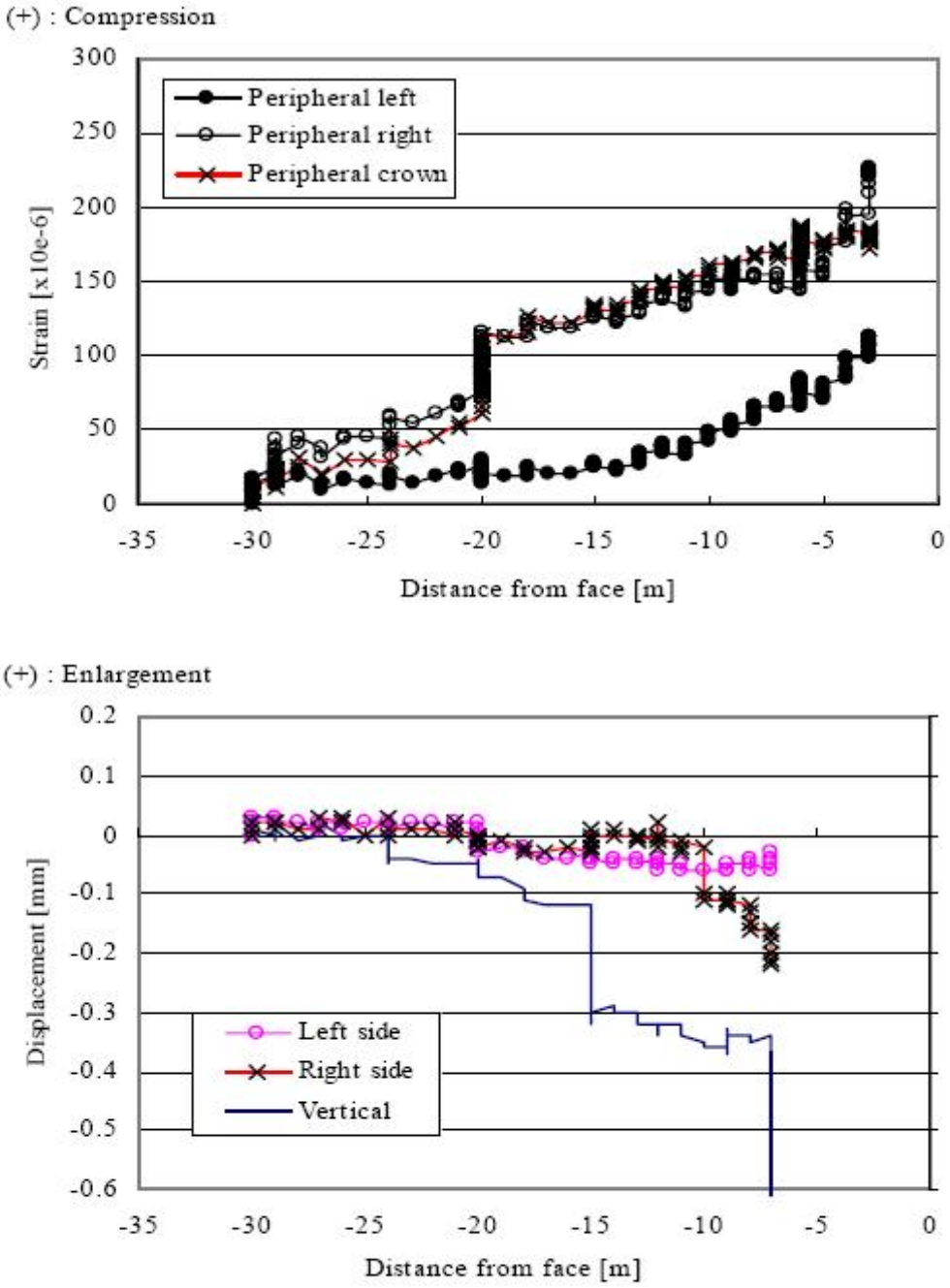


그림 3.37 Section 4의 변형률 및 변위계측결과(F.Tonon, 2010)

다음 그림은 3.38은 Section 5의 변형률 및 변위 계측결과를 나타낸 것이다. Section 5의 경우 라이닝의 변형률은 막장이 계측지점 후방 25m(1.5D)로 접근하였을 때 증가되기 시작하며 변위도 막장이 1.5D 후방에 접근할때부터 변화가 시작된다.

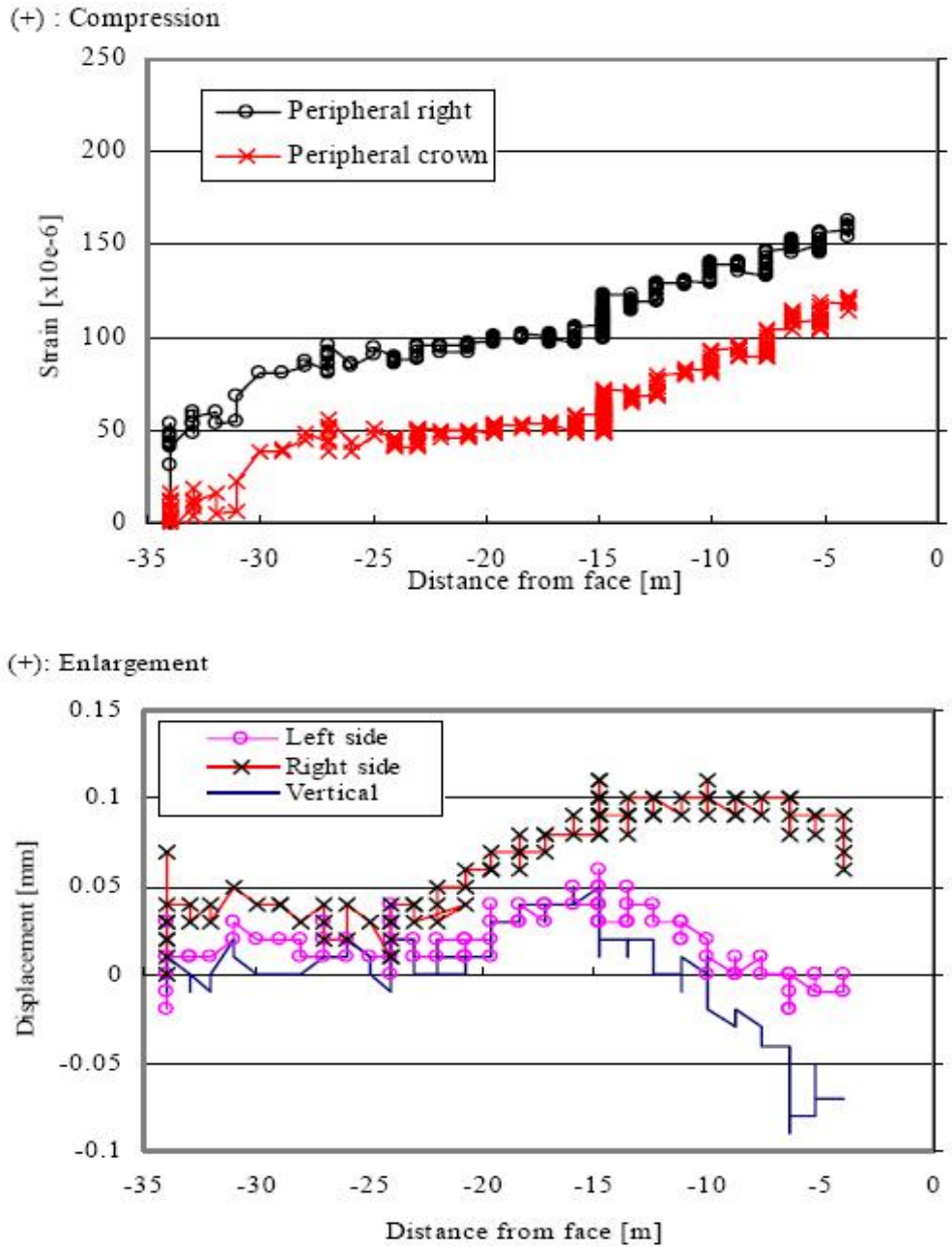


그림 3.38 Section 5의 변형률 및 변위계측결과(F.Tonon, 2010)

터널 A의 변형률과 변위계측결과를 보았을 때 터널확대 시 기존터널에 대한 영향범위는 막장 전방 약 1.5~2D인 것으로 판단된다.

다음 그림 3.39는 측정위치별 최종 천단침하와 내공변위를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 Section 1과 2의 경우 천단침하가 큰 것을 알 수 있는데 이 위치는 갱구부 근처이며 지질조건이 좋지 않고 토피고가 20m 이내로 매우 얕기 때문에 확대굴착 시 아칭이 제대로 발현하지 못했기 문으로 판단된다.

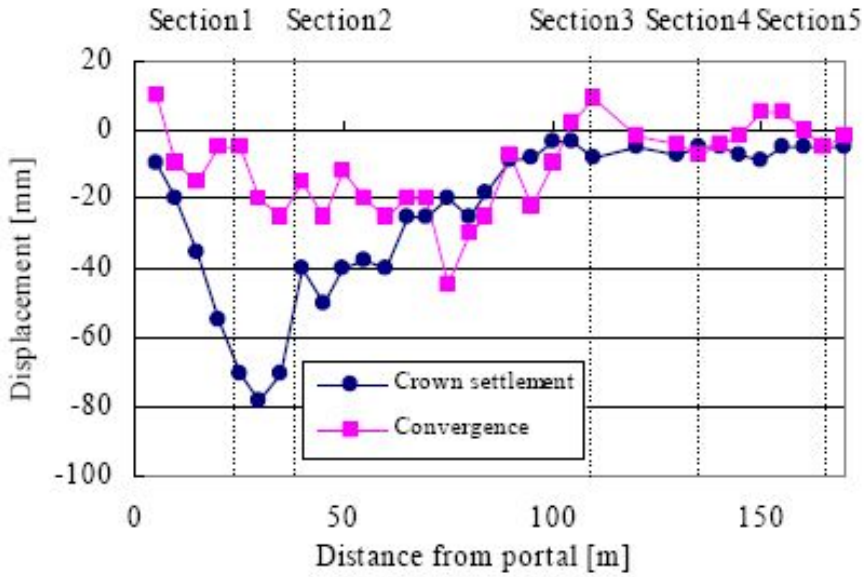


그림 3.39 측정위치별 최종변위(F.Tonon, 2010)

다음 그림 3.40은 숏크리트 응력의 계측결과를 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 천단침하가 상대적으로 크게 발생한 Section 1과 2의 천단부에서 숏크리트 응력이 크게 발생되고 있다.

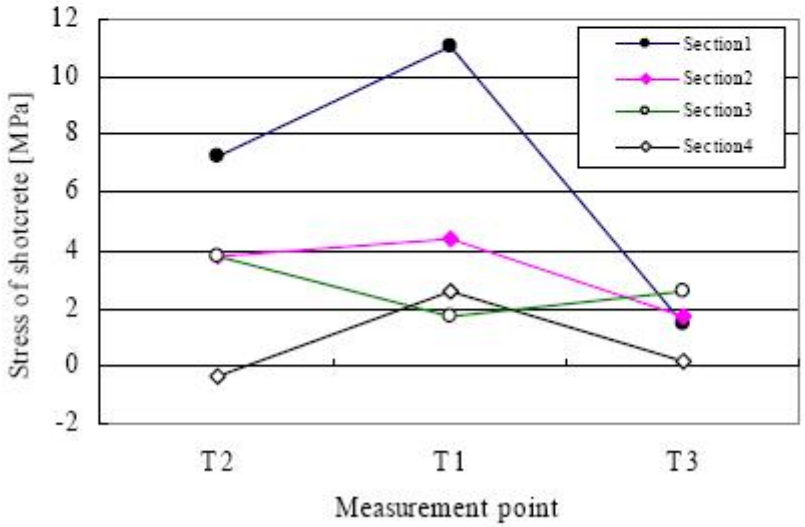


그림 3.40 측정위치별 숏크리트 응력(F.Tonon, 2010)

다음 그림 3.41은 측정위치별 록볼트의 축력을 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 Section 2의 경우 지질조건이 나쁘고 토피가 얕기 때문에 록볼트 전체에 걸쳐 축력이 발생되

나 어느 정도 토피고가 확보되는 Section 4의 경우 터널계획단면에서 약 3m이내에서만 록볼트 축력이 발생되는 것을 알 수 있다. 따라서 터널 A의 경우 확대 굴착 시 터널 횡단으로 약 3m 가량 영향을 받는 것으로 판단된다.

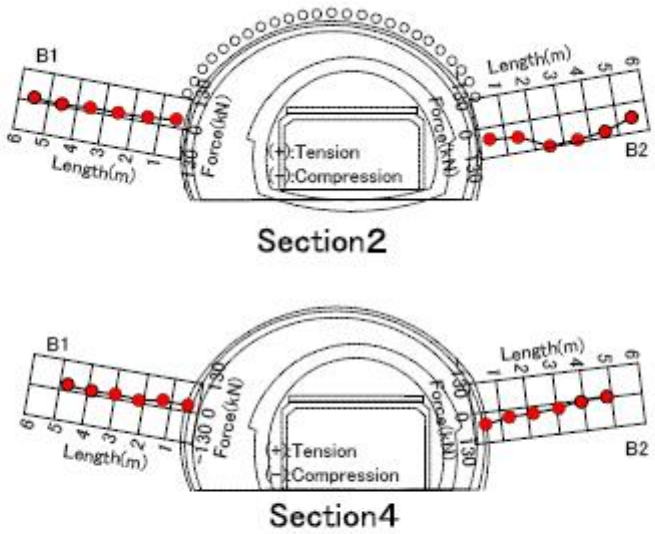


그림 3.41 측정위치별 록볼트 축력(F.Tonon, 2010)

나. 터널 B

터널 B의 기존터널제원과 확대터널제원, 지반의 조건을 다음 표 3.23에 나타내었다.

표 3.23 터널 B의 제원 및 지반조건

구분	기존터널(Old)	확대터널(New)
Construction	Conventional method	NATM
Excavation type	-	발파굴착
Length(m)	146	146
Width(m)	6.0	9.75
Height(m)	5.0	7.1
[Ground condition] - Max. overburden(m) : 42 - Geology : Andesite - USC(MPa) : 13(weak), 150(mean)		

다음 그림 3.42에 터널 B 확대 시 적용된 보강공법을 나타내었다.

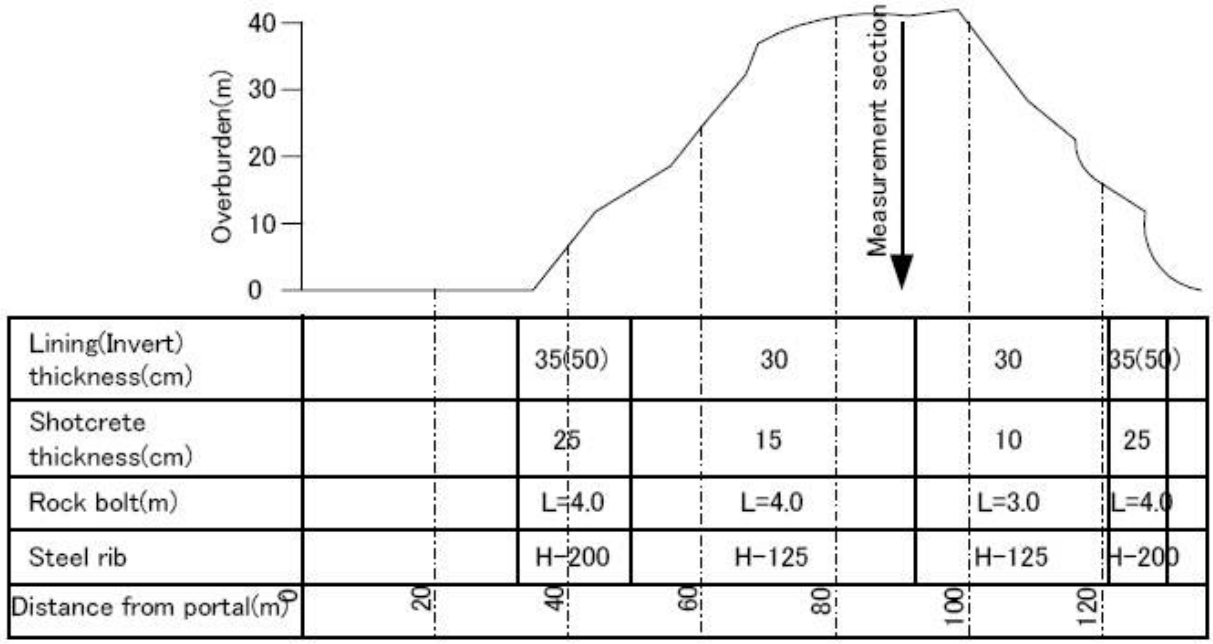


그림 3.42 터널 B 개요도(F.Tonon, 2010)

터널 B의 경우 기존터널에 계측용 록볼트를 시공하여 록볼트 축력을 측정하였으며 계측 배치도는 다음 그림 3.43과 같다.

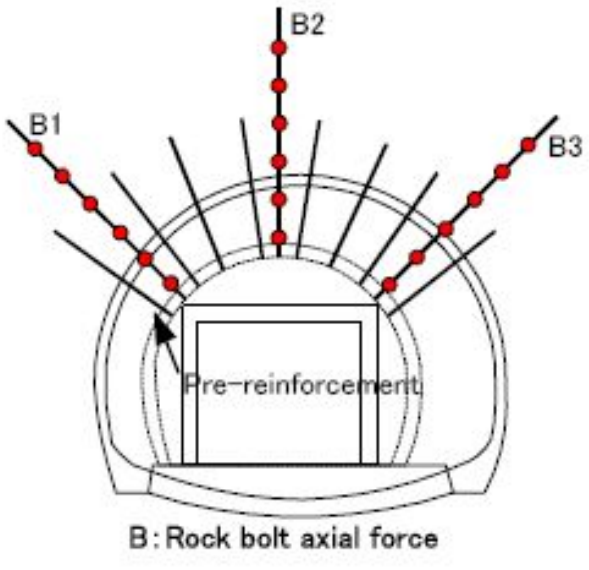


그림 3.43 터널 B의 계측배치도(F.Tonon, 2010)

다음 그림 3.44는 천단부에 설치된 B2에서 측정된 계측결과를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 막장의 위치가 계측위치로부터 후방 약 15~20m(1.5~2D)까지 접근할 경우 록볼

트 축력의 변화가 커지며 Point 3(3.0m)를 중심으로 그 내부의 변화가 심한 것을 알 수 있다. 따라서 터널 B의 경우 확대 굴착으로 인해 기존터널에 미치는 영향범위는 종단의 경우 1.5~2D이며 횡단의 경우 약 3m 이내일 것으로 판단된다.

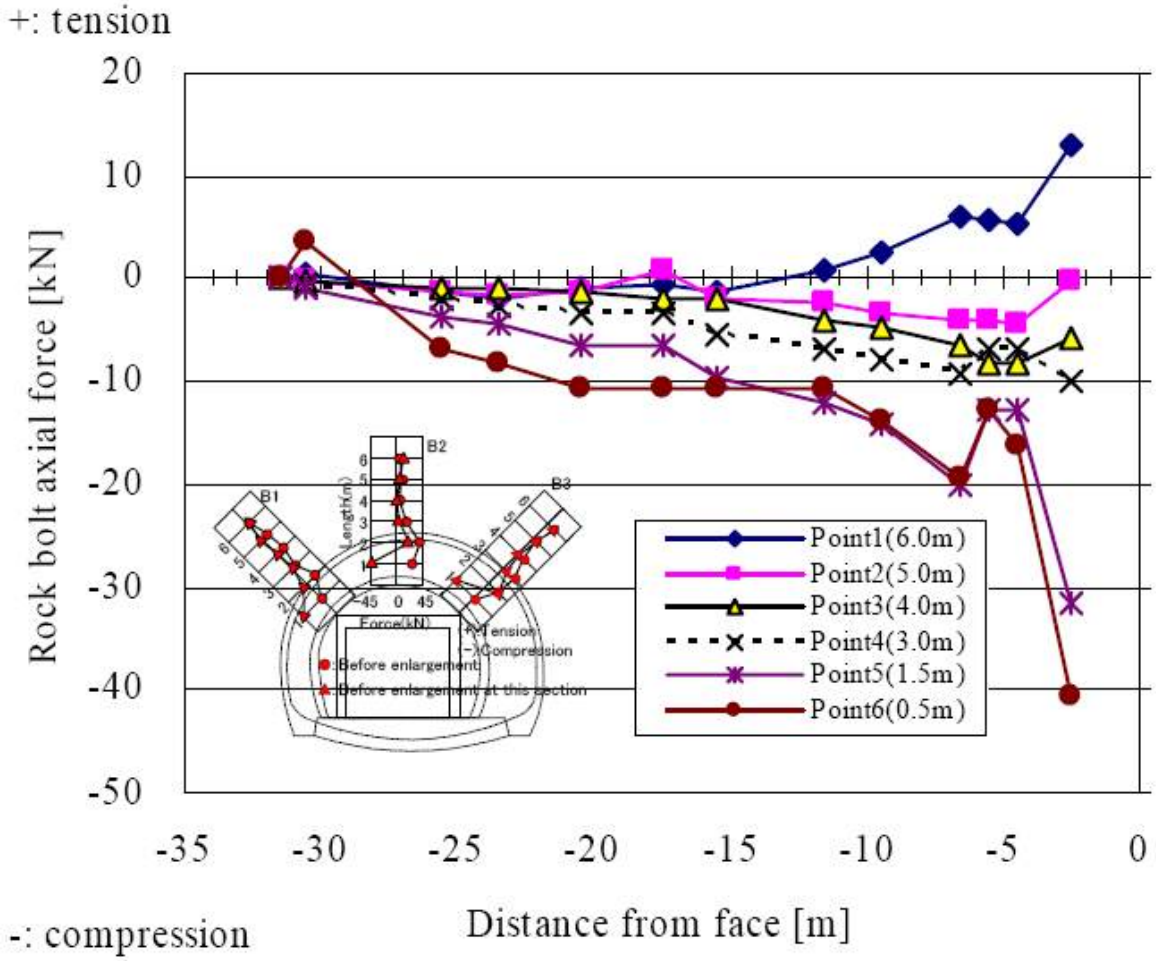


그림 3.44 B2의 록볼트축력 계측결과(F.Tonon, 2010)

다. 터널 C

터널 C의 기존터널제원과 확대터널제원, 지반의 조건을 다음 표 3.24에 나타내었다.

표 3.24 터널 C의 제원 및 지반조건

구분	기존터널(Old)	확대터널(New)
Construction	Conventional method	NATM
Excavation type	-	기계굴착
Length(m)	82	102
Width(m)	6.0	12.5
Height(m)	5.1	7.0
[Ground condition] - Max. overburden(m) : 30 - Geology : Silty mudstone - USC(MPa) : 4 ~ 10		

다음 그림 3.45에 터널 C 확대 시 적용된 보강공법을 나타내었다.

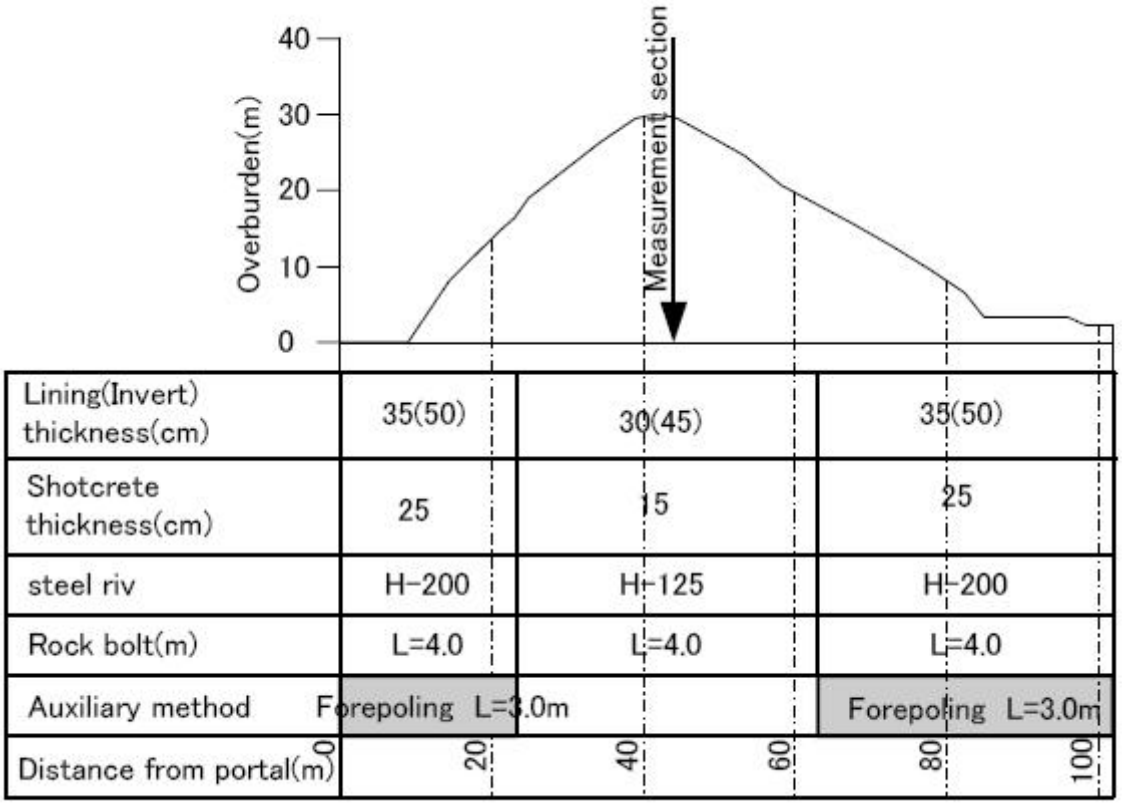


그림 3.45 터널 C 개요도(F.Tonon, 2010)

터널 C는 편측확대를 적용한 경우로 기존터널에 계측용 록볼트를 시공하여 록볼트 축력을 측정하였으며 계측 배치도는 다음 그림 3.47과 같다.

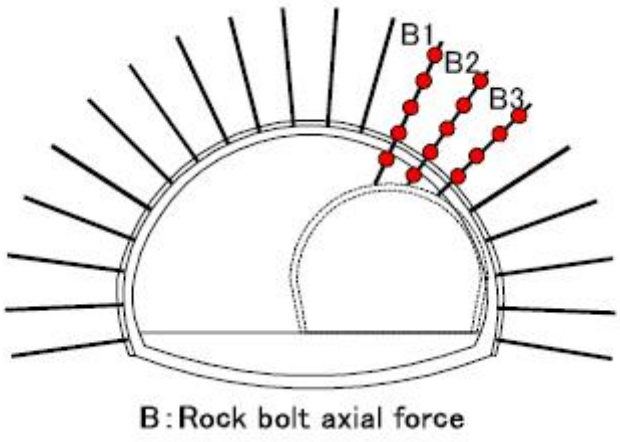


그림 3.46 터널 C의 계측배치도(F.Tonon, 2010)

다음 그림 3.47은 B2에서 측정된 록볼트 축력 계측결과를 나타낸 것이다. 터널 C의 경우 막장이 계측지점을 통과하기 전에는 록볼트의 축력에 거의 변화가 없으며 막장이 통과하면서 축력이 증가하다가 후방 약 10m(1D)이내에서 수렴되는 것을 알 수 있다.

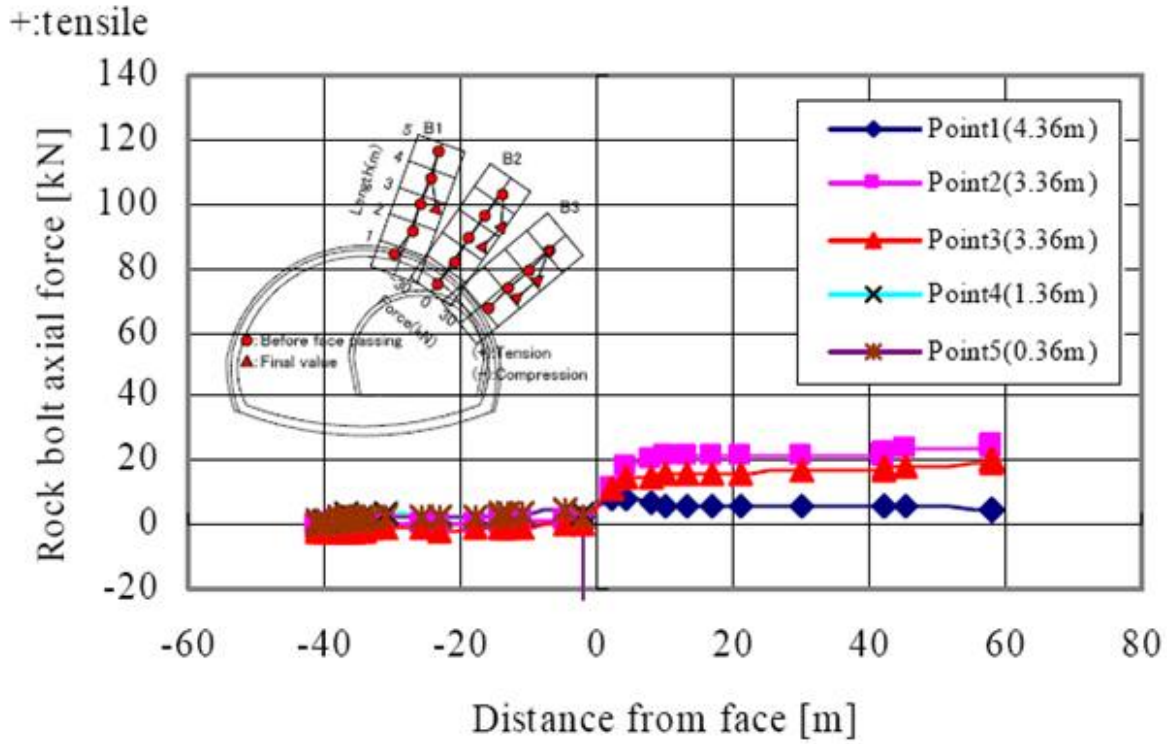


그림 3.47 B2의 록볼트축력 계측결과(F.Tonon, 2010)

(4) 제안된 종단변형곡선과 계측사례 비교분석

(가) 터널 A

다음의 표 3.24 및 표 3.25에 제안된 예측식에 의한 기존터널의 종단변형곡선과 변위 및 라이닝변형률계측결과를 나타내었다. 제안된 예측식에 의하면 터널 확대굴착으로 인해 기존터널에 변위가 발생되는 범위는 막장 전방 약 35m 이내이다. 즉, 예측식에 의하면 확대 굴착시 아칭현상에 의한 영향범위는 막장 전방 35m이며 라이닝 변형률 계측결과를 보면 막장이 계측지점에서 30m(Section 4), 35m(Section 5)에 접근할 때 변형률이 발생되기 시작되는 것으로 보았을 때 제안된 예측식이 잘 예측하고 있는 것으로 판단된다. 변위계측결과를 보면 Section 4와 Section 5 모두 막장이 25m에 접근했을 때 발생되는 것으로 나타나는데 이를 제안된 예측식에 적용하면 내공변위가 총 변위의 약 5%가 발생되는 지점이다. 이상의 결과를 보았을 때 내공변위가 총변위의 5%까지 발생될 때는 라이닝에서 응력을 담당하다가 5%이상이 될 경우 지반의 변위가 발생되는 것으로 판단된다.

표 3.25 제안된 예측식에 의한 기존터널의 종단변형 곡선-터널 A

(확대터널반경: 7.8m, 기존터널반경: 4.9m)

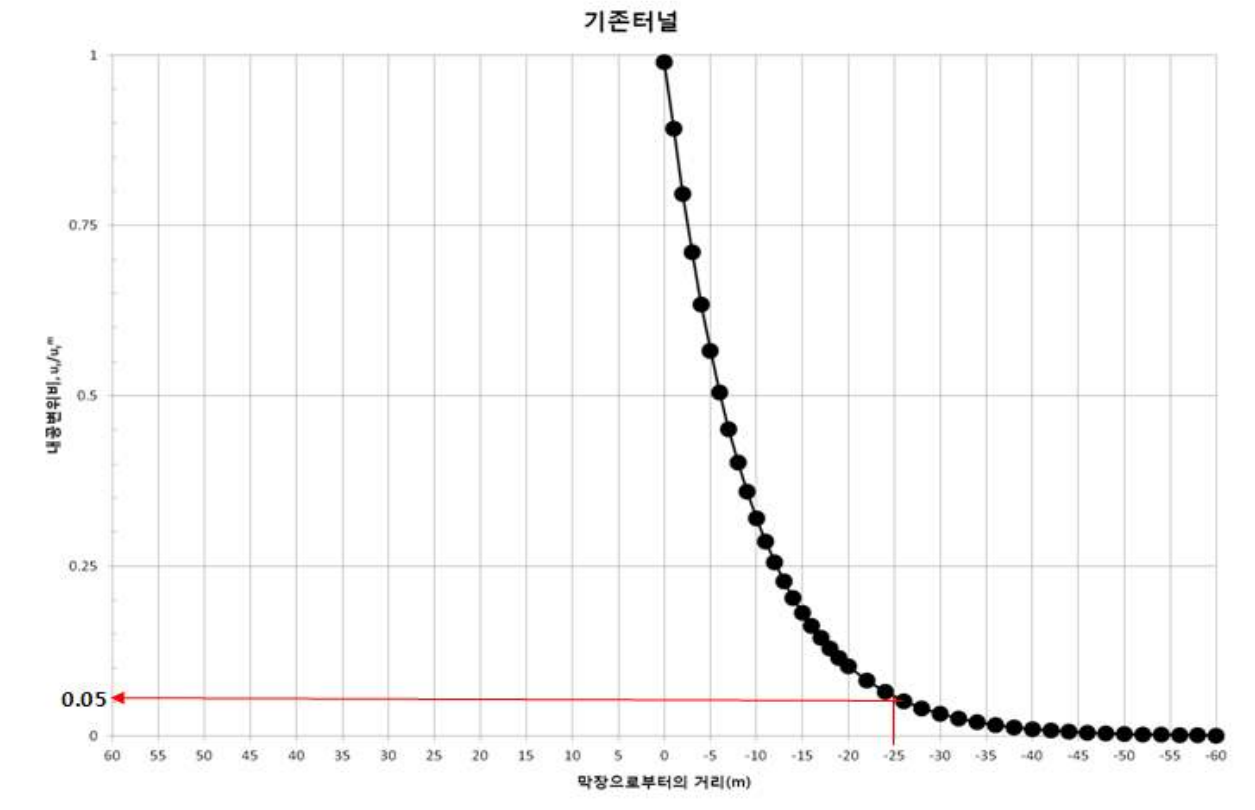
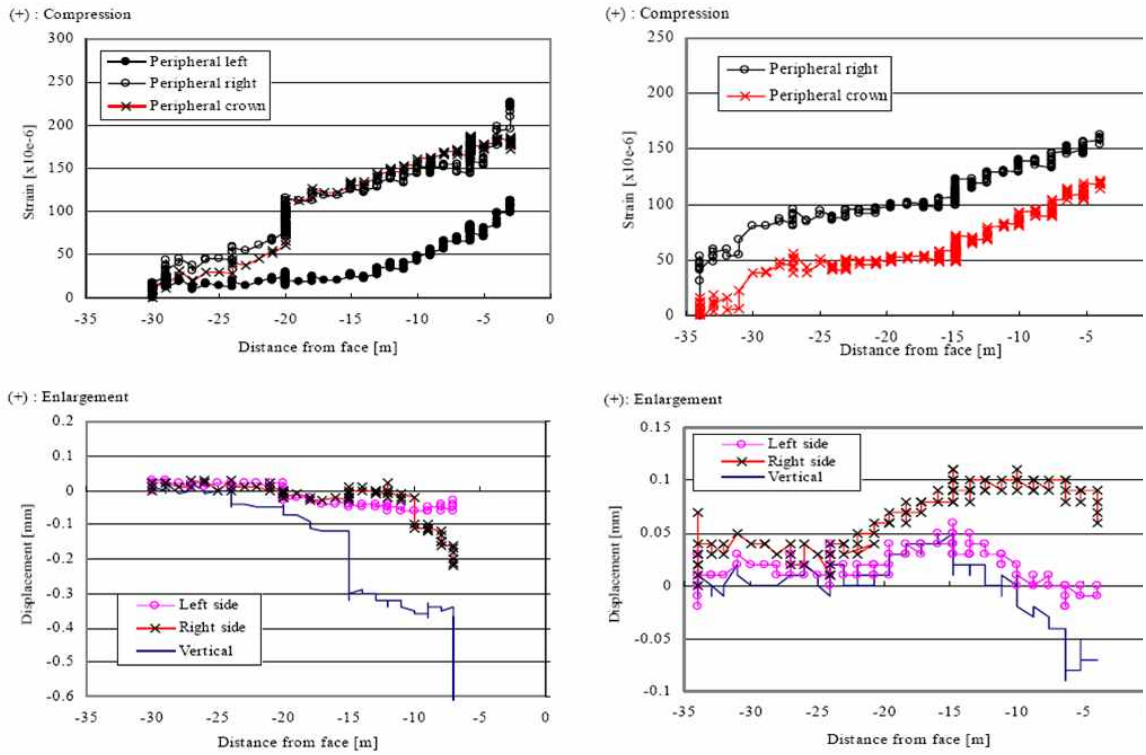


표 3.26 변위 및 변형률 계측-터널 A

변위 및 변형률 계측결과



Section 4 Section 5

(나) 터널 B

다음의 표 3.26 및 표 3.27에 제안된 예측식에 의한 기존터널의 종단변형곡선과 록볼트 축력 계측결과를 나타내었다. 제안된 예측식에 의하면 터널 B의 경우 터널 A에 비해 확대반경이 작기 때문에 굴착에 의한 영향범위가 작게 나타나며 막장 전방 25m 이내에서 지반변위가 수렴되는 것으로 나타났다. 이는 계측결과 록볼트 축력이 발생되는 시점과 매우 유사한 결과한 결과이며 따라서 제안된 예측식으로 영향범위를 잘 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 예측식에서 총변위의 5%가 발생되는 시점은 막장 전방 약 16m로 계측결과를 보면 이 지점부터 록볼트의 축력이 크게 변하기 시작하는 것을 볼 수 있다. 이상의 결과를 종합하면 예측식에서 총변위의 5%가 발생되는 지점까지 굴착에 의해 지반의 변위가 발생되는 영역으로 볼 수 있을 것으로 판단되며 이를 제안된 예측식 (3)에 적용하면 다음 식과 같이 전방영향범위를 산정할 수 있다.

$$x = 4.336\sqrt{R_{enlage}^2 - R_{old}^2} \tag{4}$$

여기서, x : 막장전방 영향범위(m)

$R_{enlarge}$: 확대터널의 반경

R_{old} : 기존터널의 반경

표 3.27 제안된 예측식에 의한 기존터널의 종단변형 곡선-터널 B

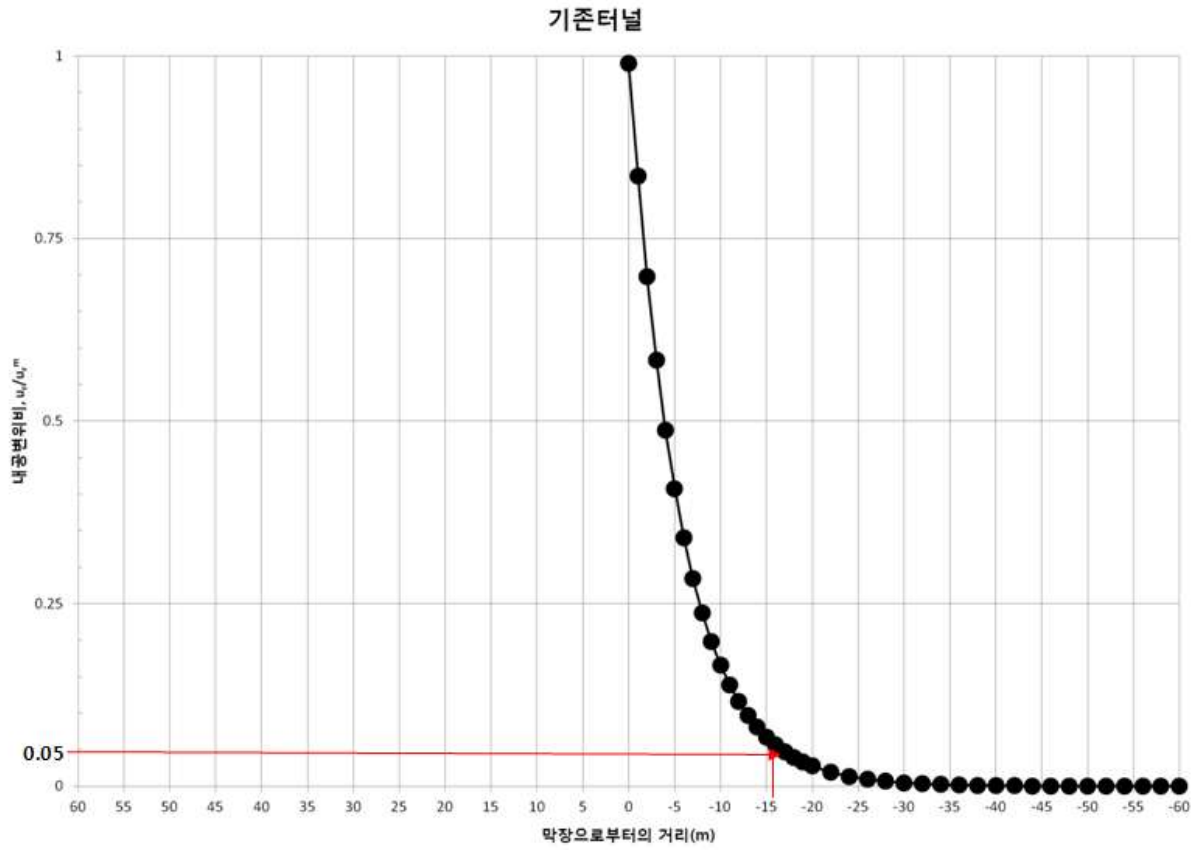
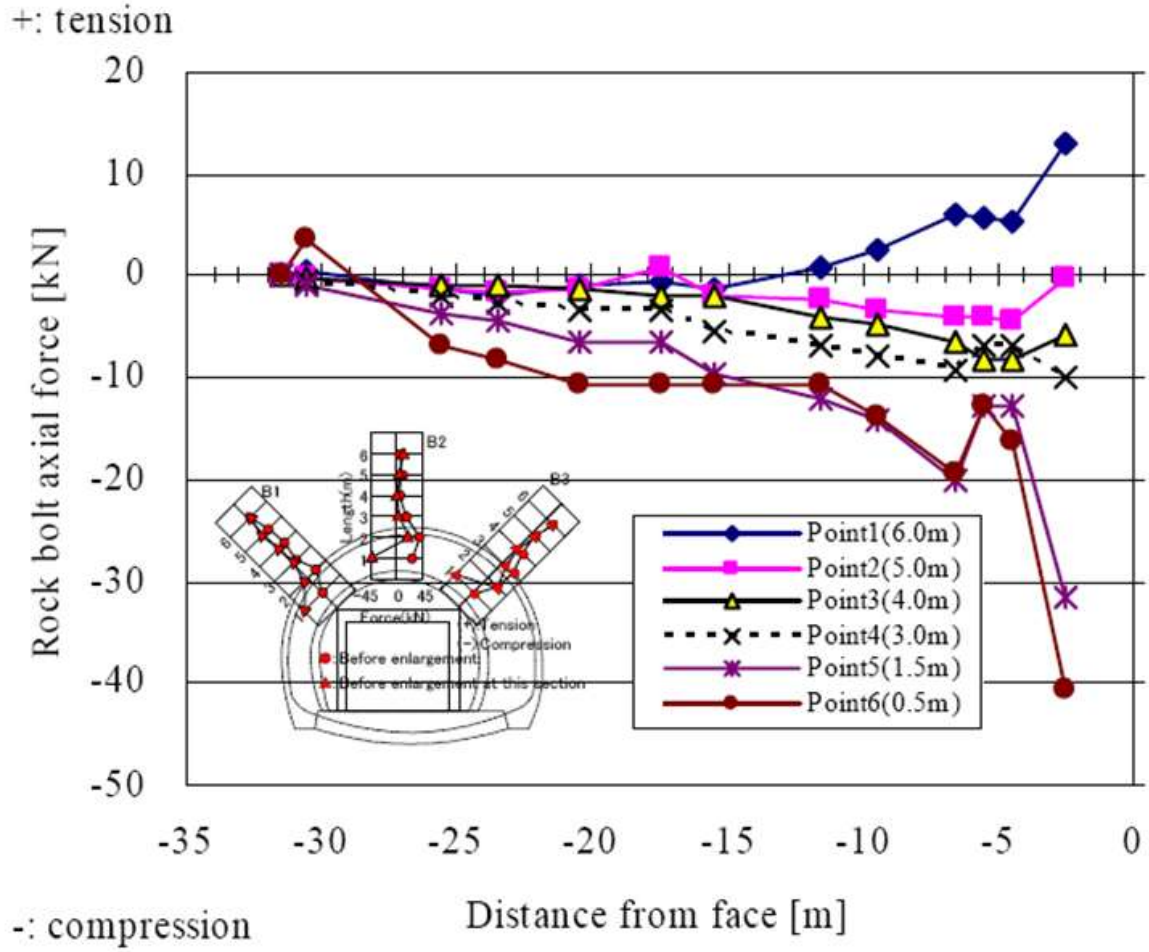
(확대터널반경: 4.875m, 기존터널반경: 3.0m)


표 3.28 록볼트 축력 계측-터널 B

록볼트 축력 계측결과


제 2 절 교통흐름 유지 터널 확대 시공 기술 개발

1. 협소공간 및 프로텍터를 고려한 시공장비 분석

가. 국내 확대터널 단면 분석

(1) 화악터널

교통을 통제한 후 단면 확대를 실시한 “화악~도계간 확·포장공사(지방도 341호선)” 중 화악터널에 대한 시공도면에 단면 분석하여 가상의 프로텍터 설치 후 가능한 장비운영 공간 분석하였다.

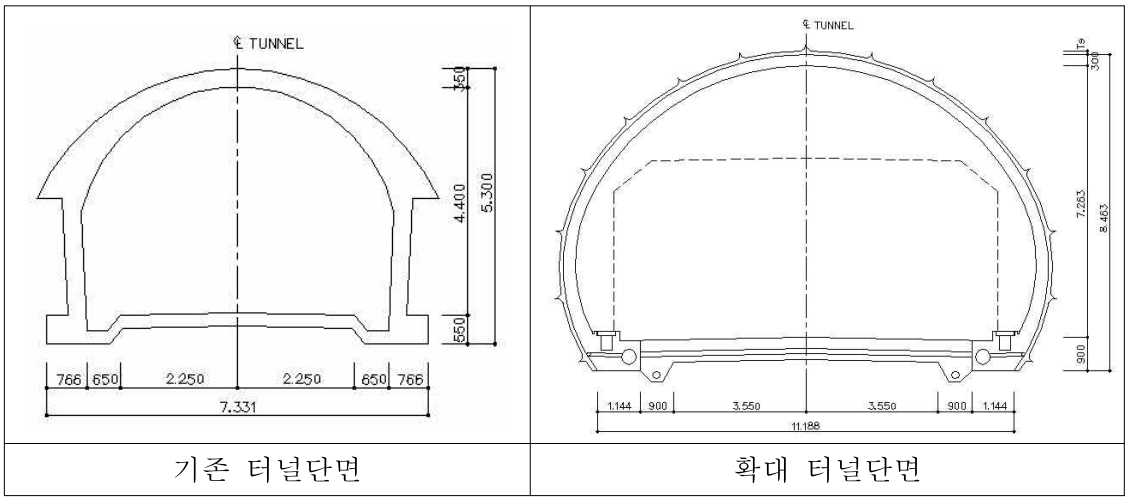
본 터널은 경기도 가평군과 강원도 화천군을 잇는 화악산 일대에 위치한 터널이다. 터널연장은 680m이며 동절기 온도는 영하 10~25℃까지 내려가는 해발 880m의 고지대에 위치하고 있으며, 국내사례가 거의 없는 기존 1차선 터널을 확대 굴착하여 왕복 2차선의 대면교통 터널을 건설하는 공사였다. 평면선형은 확장터널과 기존터널의 단면 중심선을 일치시키고, 종단선형은 확장터널과 기존터널의 도로노면 바닥부를 동일하게 계획되었다.



그림 3.48 화악터널 시공전경

기존터널은 1974년에 준공된 군도로서 도로 폭원 2.250m의 1차선 대면교통 터널이며, 터널의 규모는 폭 5.8m, 높이 4.3m로서 비교적 소단면 터널이다. 확·포장 공사로 인하여 도로폭원 및 규모가 확대되었다. 확장된 화학터널은 도로의 폭원이 3.500m인 2차선터널이며, 터널

의 규모는 폭 12.0m, 높이 7.3m이다.



기존 터널단면 | 확대 터널단면

그림 3.49 화악터널의 기존 터널 단면 및 확대 터널단면

약 4.5m의 폭을 형성하는 가상의 프로텍터를 설치하는 경우 측면 최대 폭은 4.35m이며, 천단 최대 높이는 4.28m로 나타났다.

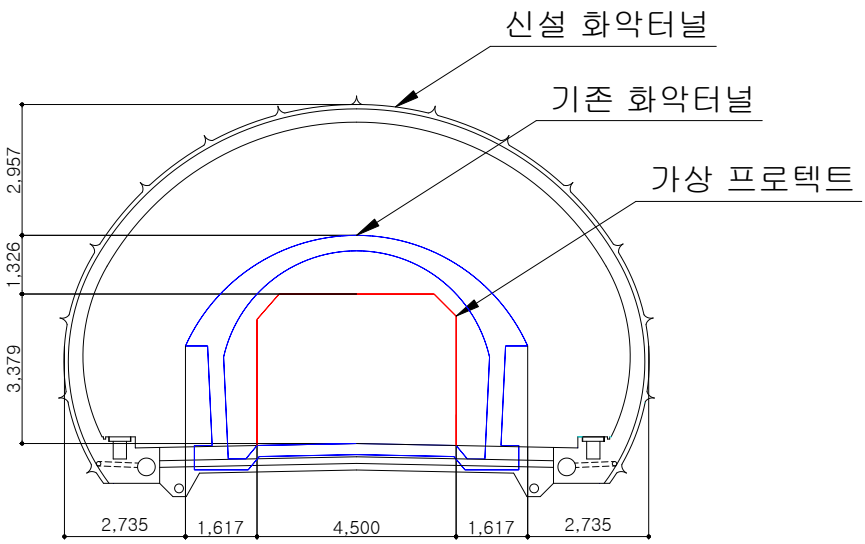


그림 3.50 화악터널에 대한 장비운영공간 분석결과

(2) 방화터널

최근 국내에서 수행된 기존 터널의 확대단면 설계인 “방화대교 남단 접속도로 건설공사” 중 방화터널에 대한 확장설계사례의 단면 분석을 통하여 장비 운영공간 분석하였다. 기존 터

널은 폭원 3.05m의 2차선 터널(폭 10.67m, 높이 7.7m)이였으나, 주변 교통여건의 변화로 폭원 3.05m의 3차선 터널(폭 17.18m, 높이 10.59m)로 변경 설계를 실시하였다.

2차선 기존 터널의 건축한계를 가상 프로텍터로 설정하였으며, 터널의 확대형식을 양측확대 및 편측확대로 구분하여 분석을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 가상 프로텍트 설치 후(편측확대) :

  측면 최대 폭 = 6.32m, 측면 최소 폭 = 1.53m, 천단 최대 높이=5.10m

- 가상 프로텍트 설치 후(양측확대) :

  측면 최대 폭 = 4.81m, 천단 최대 높이=5.14m

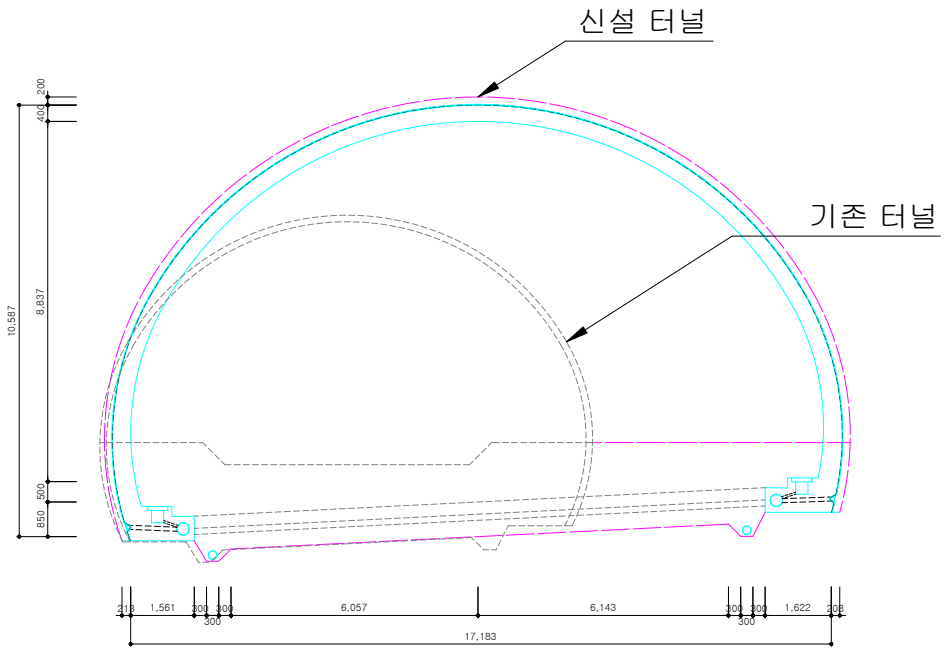
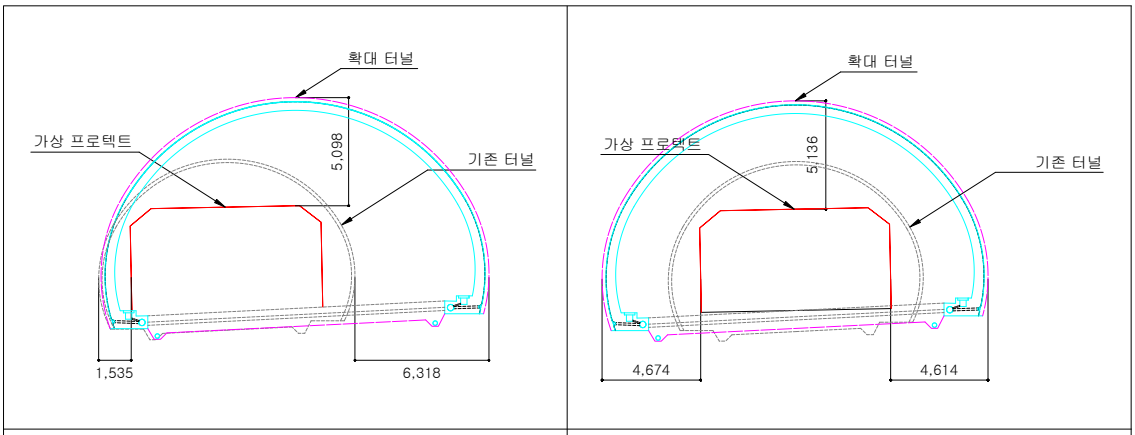


그림 3.51 방화터널의 기존 터널 단면 및 확대 터널단면



편측확대	양측확대

그림 3.52 방화터널에 대한 장비운영공간 분석결과

나. 국내 시공장비 분석

국내에서 제조 또는 판매되는 소형 굴삭기 및 운반장비에 대한 재원을 조사하여 터널 확대 시 기존 터널의 라이닝 철거, 굴착 및 발파천공 등에 필요에 최소한의 장비 운영공간으로 3.0m 예상된다.

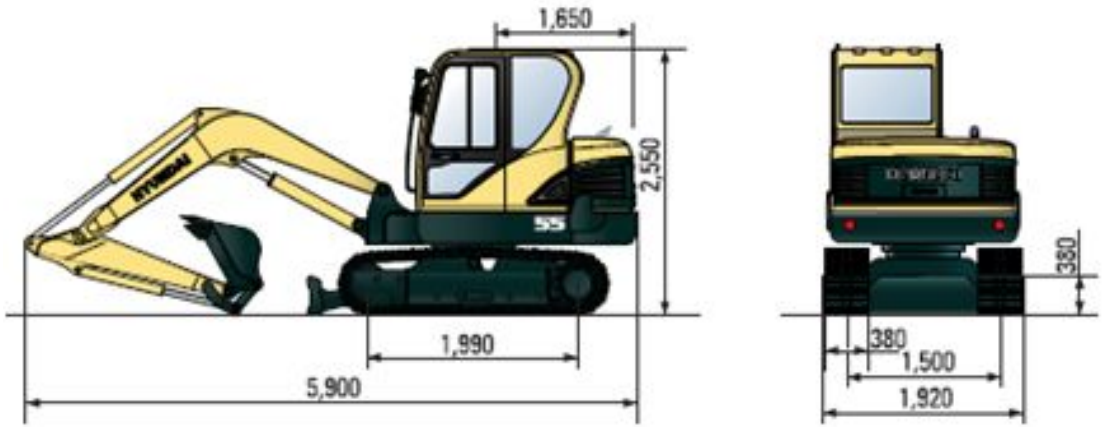
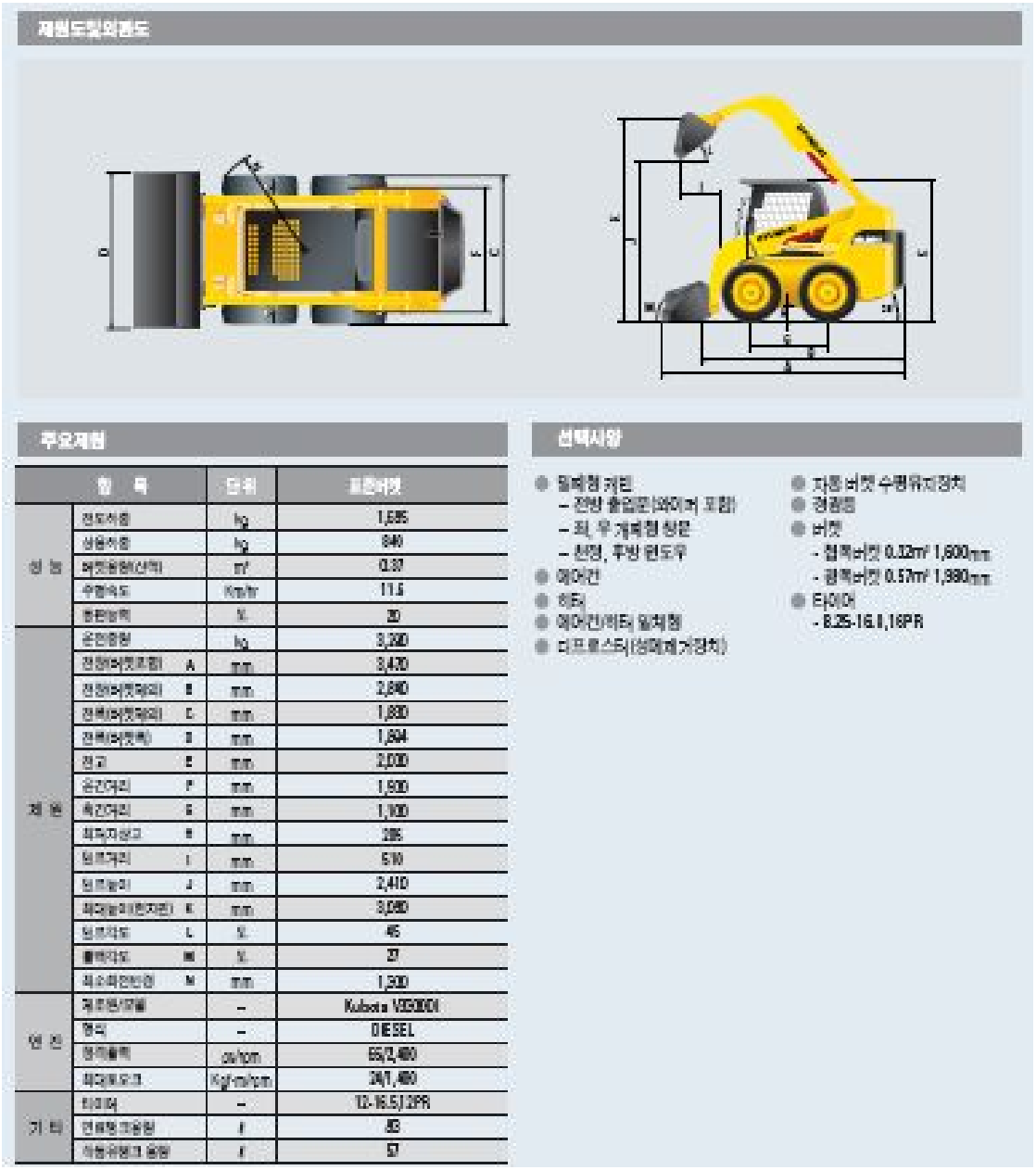


그림 3.53 굴삭기(0.2㎥의 버켓용량)의 장비규격



제원도및외관도

주요제원

항 목		단위	표준버켓
성 능	정격하중	kg	1,595
	운전중량	kg	840
	버켓용량(산적)	m³	0.37
	주행속도	Km/hr	11.5
	등판능력	%	30
제 원	운전중량	kg	3,200
	전장(버켓포함) A	mm	3,470
	전장(버켓제외) B	mm	2,840
	전폭(버켓제외) C	mm	1,830
	전폭(버켓폭) D	mm	1,604
	전고 E	mm	2,000
	윤간거리 F	mm	1,500
	축간거리 G	mm	1,100
	최저지상고 H	mm	205
	덤프거리 I	mm	510
	덤프높이 J	mm	2,410
	최대높이(힌지핀) K	mm	3,080
	덤프각도 L	°	45
	틸팩각도 M	°	37
	최소회전반경 N	mm	1,200
엔 진	제조회사/모델	–	Kubota V3300DI
	형식	–	DIESEL
	정격출력	ps/rpm	65(2,400)
	최대토크	Kgf·m/rpm	24(1,400)
기 타	타이어	–	12-16.5/12PR
	전체작동압력	ℓ	40
	작동유탱크 용량	ℓ	57

선택사양

- 일체형 키트
  - 전방 출입문(상하이커 포함)
  - 좌, 우 개폐형 창문
  - 천정, 후방 윈도우
- 에어건
- 히터
- 에어건/히터 일체형
- 디프로스터(성에제거장치)
- 자동 버켓 수평유지장치
- 경광등
- 버켓
  - 협폭버켓 0.32m³ 1,600mm
  - 광폭버켓 0.57m³ 1,880mm
- 타이어
  - 8.25-16.8,16PR

그림 3.54 운반기(0.37㎥의 버켓용량)의 장비규격

국내 및 일본의 경우 보강공법(록볼트, 강지보 및 숏크리트) 및 보조공법(강관다단그라우팅, 파이프루프 및 휘폴링)은 기존의 터널시공 기술에 사용되는 공법이 적용되며, 프로텍터, 기존 터널의 단면형상 및 시공여유 등을 고려할 경우 터널의 좌·우 측면부에서는 장비 운용 면적이 매우 협소하게 형성되는 것으로 나타났다.

또한, 국내 터널시공에서 보강 및 보조공법에 사용되는 천공장비를 조사 분석한 결과 록볼트 및 포폴링 시공에서는 점보드릴 장비가 주로 사용되고 있으며, 강관다단그라우팅 등의 막장면 안정을 위한 보조공법 시공에서는 크로라드릴 형태의 장비(일반적인 전폭은 2.3m 임)들

이 사용되고 있었다.

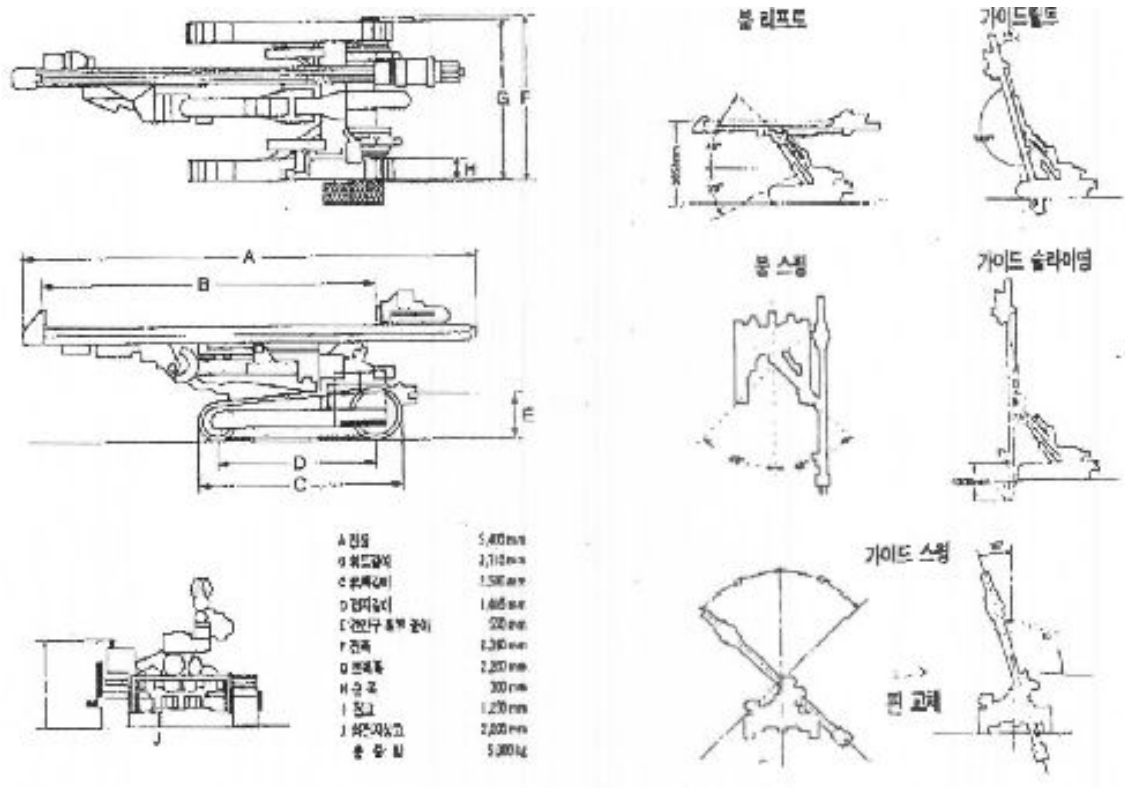


그림 3.55 일반적 공압식 크로라드릴의 장비규격

국내 터널시공에 주로 사용되는 장비제원을 분석한 결과 막장천단 안정성을 확보하기 위한 보조공법 및 발파를 위한 천공은 가능한 것으로 판단되나, 굴진면과 직각방향을 설치되는 록볼트는 측벽부에서 불가능한 것으로 판단되었다. 따라서, 록볼트 공법은 경사 록볼트 시공 또는 기존터널에서 선 록볼트 시공을 고려해야 할 것으로 판단되었다.

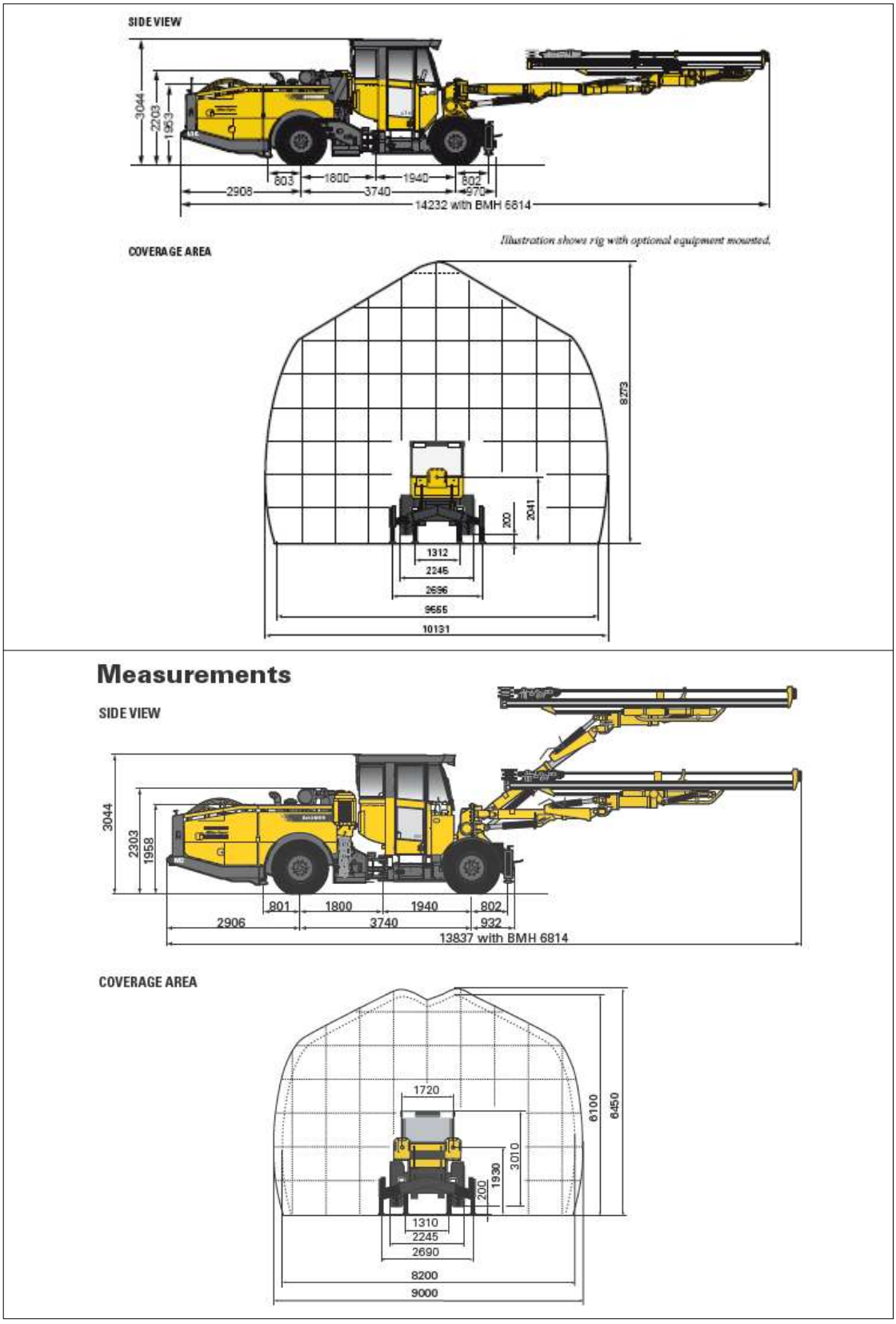


그림 3.56 점보드릴의 장비규격

다. 터널 단면 확대 시공법 Prototype 제시 및 시뮬레이션 검증

터널 시공에 주로 사용되고 장비의 운용성을 평가하여 확대터널에서의 굴착 및 보강공법의 시공성을 평가하고자 하였다.

(1) 국내 터널확대 단면 분석

아직 국내에서는 교통류를 유지한 터널확대 사례는 없으나, 소수의 차량 통행을 차단한 국내 터널확대 시공사례(서울의 방화터널, 가평의 화악터널 및 영동고속도로 강천터널)는 있는 것으로 조사되었다. 이중 화악터널은 재래식 터널공법인 ASSM으로 건설되어진 폭원 2.25 m의 1차로 터널을 NATM공법에 의한 폭원 3.5m의 2차로 터널로 확대시공을 실시한 사례이며, 방화터널은 NATM공법으로 시공된 폭원 3.05m의 2차로 터널을 3차로 터널로 확대 시공한 사례이다.

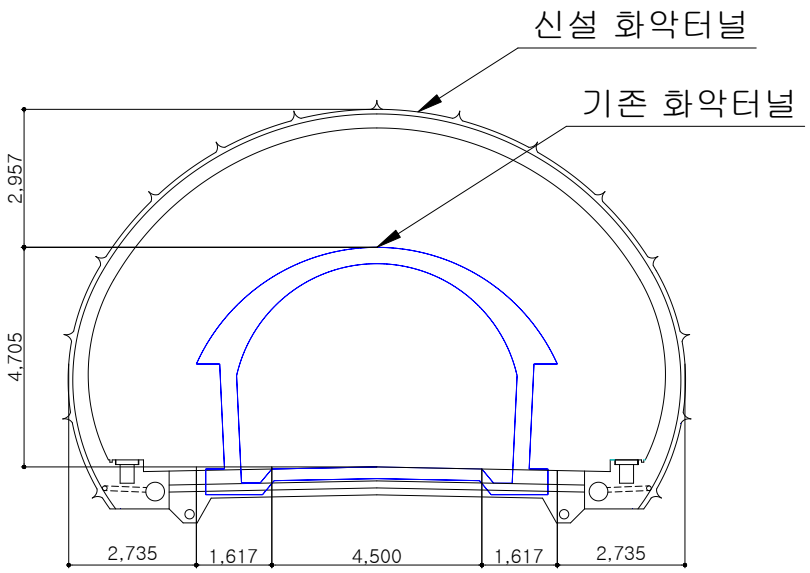


그림 3.57 화악터널의 확대터널 단면도

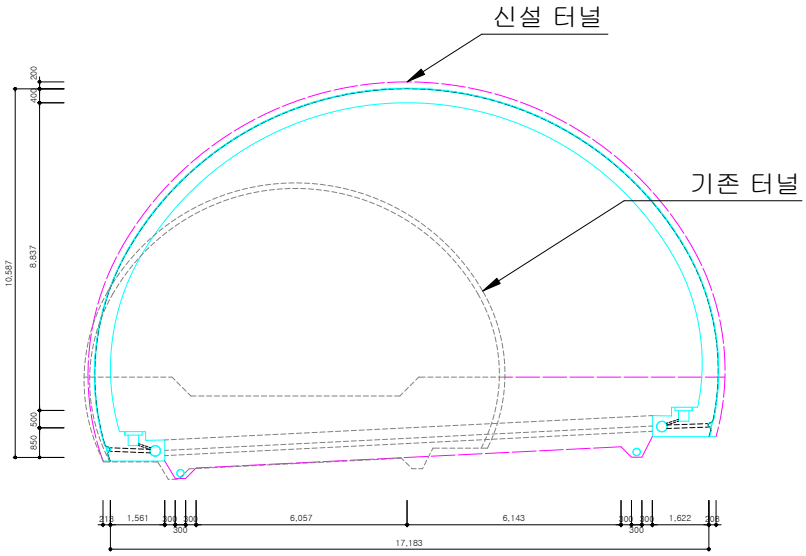


그림 3.58 방화터널의 확대터널 단면도

(2) 국외 터널확대 단면 분석

해외 발표논문 등을 통하여 공용중 터널에 대하여 교통류를 보존한 터널 확대시공 사례에 대한 일본사례를 확인할 수 있었으며, 실제 시공경험이 있는 시공사를 방문 등을 통하여 수집된 자료를 토대로 일본의 터널 확대단면을 분석하였다.

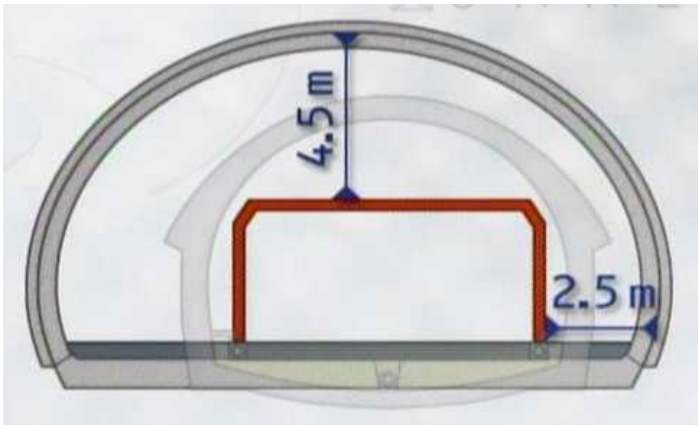


그림 3.59 일본 오쿠라터널의 확대터널 단면도

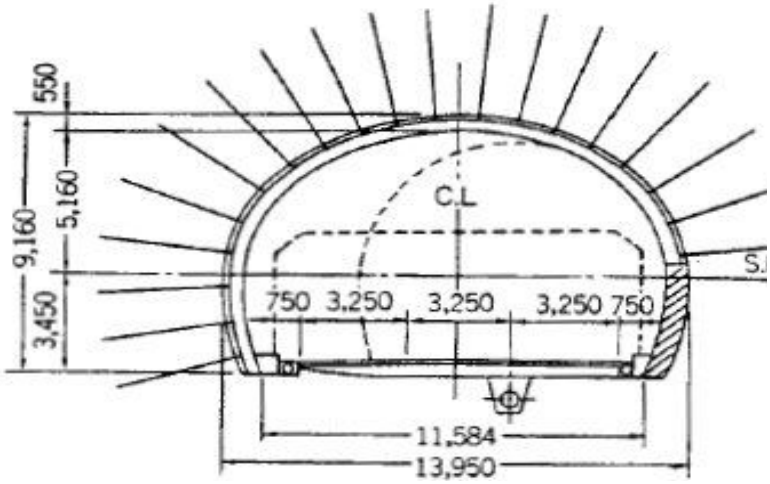


그림 3.60 일본 신고베터널의 확대터널 단면도(J-1 구간)

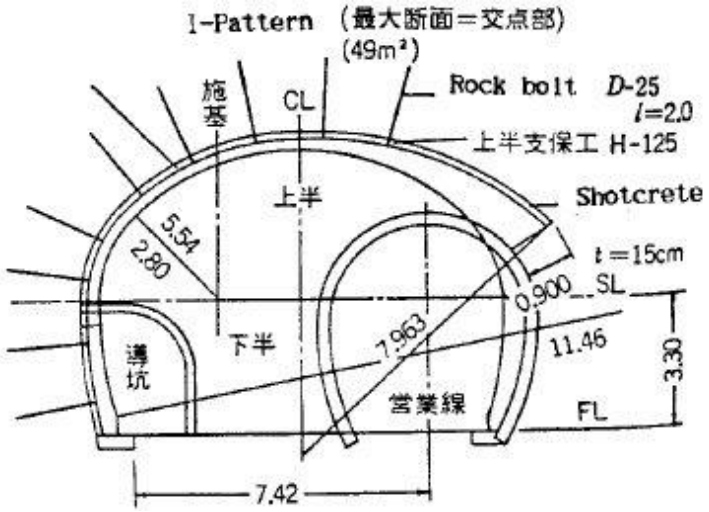


그림 3.61 일본 세이칸터널의 확대터널 단면도

(3) 시뮬레이션 단면결정

국내외의 터널확대 단면분석 및 제안한 프로텍터 설치기준을 참고하여 터널 확대단면 협소공간은 양측확대와 편측확대(최소 여유폭=3.0m)인 경우로 고려하였으며, 터널의 형상은 실제 시공 중인 방화터널의 기존 단면 및 확대단면을 기준으로 하여 2차로 도로 터널에서 3차로 도로터널로 확대하는 경우에 대한 터널 단면을 결정하였다.

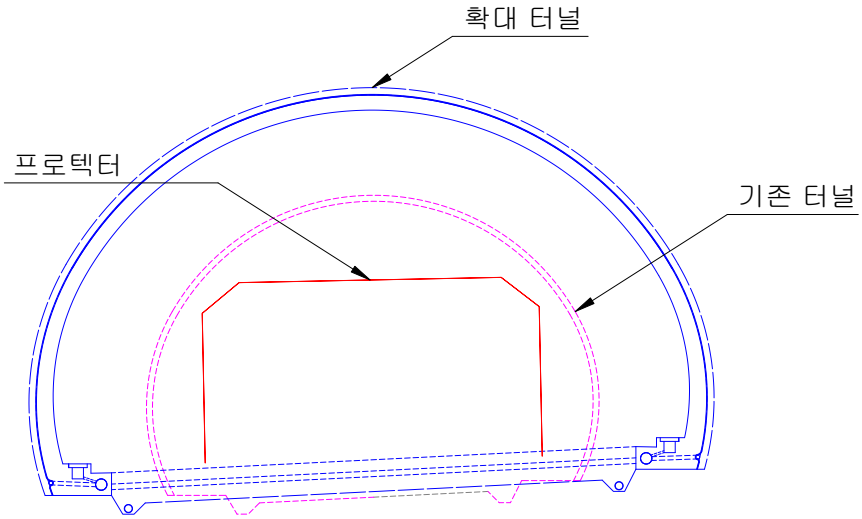


그림 3.62 양측확대의 시뮬레이션 단면도

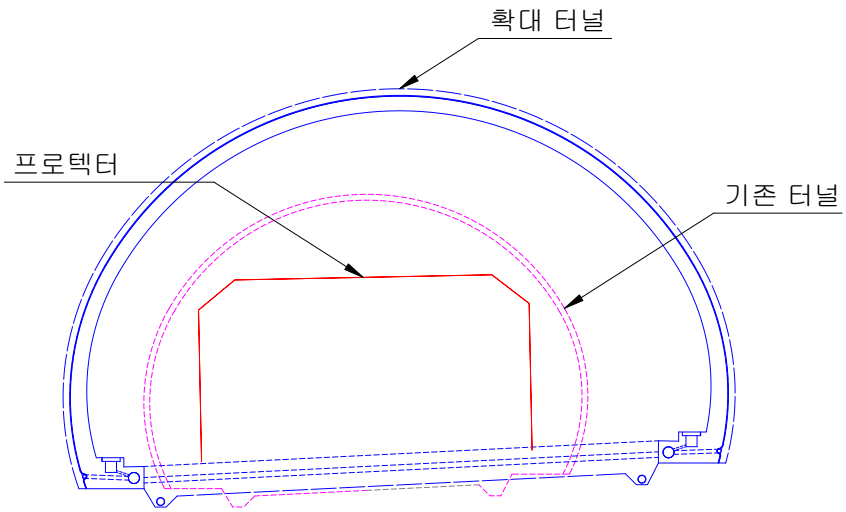


그림 3.63 편측확대의 시뮬레이션 단면도

(4) 시뮬레이션을 위한 시공장비 선정 및 시뮬레이션

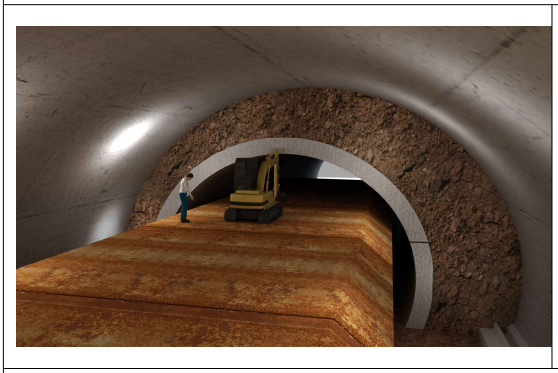
국내 터널 시공시 주로 사용되고 있는 장비를 조사하였으며, 이를 토대로 다음과 같이 5종의 시공장비를 선정하여 터널 굴착, 지보설치 및 보강공법 시공에 따른 협소공간에서의 시공성을 분석하는 것으로 계획하였다.

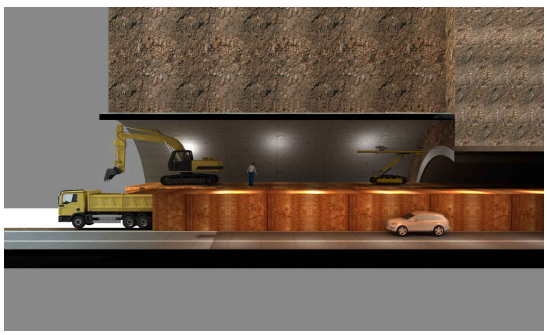
표 3.29 시뮬레이션을 위해 선정된 주요 시공장비

사용 목적	장 비 명	주요 제원 및 규격		신설 터널 시공시 사용여부
버럭 처리, 지보재 설치 및 스케일링	굴삭기	0.6㎥	전고=6.3m, 전폭=2.6m	O
		0.2㎥	전고=2.6m, 전폭=1.9m	X
발파 천공, 록볼트 및 Forpoling 시공	점보드릴	2 Boom 및 3 Boom		O
차수 및 보강공법 시공	크롤러 드릴 (PCR 200)	전고=1.3m, 전폭=2.4m		O
보강공법 시공	보강용 전용장비 (E15TJ)	전고=3.7~6.1m, 전폭=2.5~3.5m		O

(가) 굴삭기 시뮬레이션

굴삭기는 터널 시공 시 버럭처리, 굴착 및 강지보재 설치 등 다양한 용도로 사용되고 있으며, 국내 터널 시공시 주로 사용되고 있는 굴삭기(버켓용량≒0.6㎥) 규격에 대한 협소공간에서의 장비 운영성을 분석한 결과 장비 운영이 어려운 것으로 나타났다. 따라서 국내에서 생산되는 굴삭기의 규격은 버켁용량으로 구분되고 있으며, 버켓용량이 약 0.6㎥ 이하인 굴삭기의 버켓용량은 약 0.2㎥ 인 것으로 조사되어 버켓용량이 약 0.2㎥인 굴삭기에 대한 장비 운영성을 평가한 결과 협소공간에서 장비의 운영은 문제가 없는 것으로 평가되었다.

굴 삭 기	표준 버켓용량=0.18㎥ 중량=5,500kg 전폭=1.92m, 전장=5.9m
	
양측확대	
	
편측확대	

굴 삭 기	표준 버켓용량=0.58㎥ 중량=13,980kg 전폭=2.6m, 전장=7.8m
	
양측확대	

(나) 점보드릴 시뮬레이션

국내 터널 시공시 사용되고 있는 점보드릴은 터널 발파를 위한 천공작업 및 록볼트 및 보강

공법(Forpoling 등) 시공에 사용되고 있으며, 국내에서는 2 Boom 및 3 Boom을 가지고 있는 장비가 주로 사용되고 있다. 이중 대표적인 장비의 규격으로 묘사하여 협소공간에서의 장비 운영성을 평가한 결과 프로텍터 상부에서의 발파 천공 및 보강공법 시공에는 장비 운영에 문제가 없을 것으로 판단되었으나, 확대터널 하부 및 측벽부에서의 록볼트 시공에서는 장비가 가동되는 특징으로 현재 일반적으로 시공되는 굴착면에 수직한 방향으로 록볼트를 설치하는 것으로 어려울 것으로 판단된다.

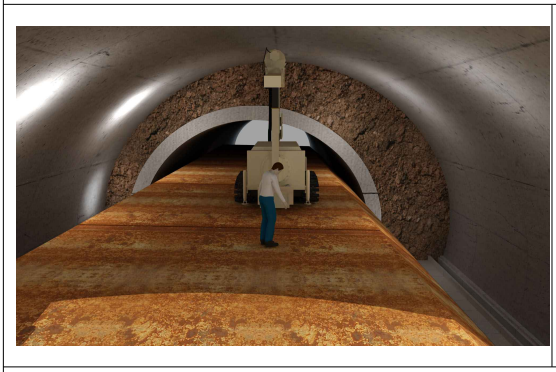
<table>
<tr><td>점보드릴(천공기)</td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2">   </td></tr>
<tr><td colspan="2">양측확대</td></tr>
<tr><td colspan="2">   </td></tr>
<tr><td colspan="2">편측확대</td></tr>
</table>

(다) 크로러 드릴(PCR200) 및 천단 보강공법 전용장비(E15TJ) 시뮬레이션

국내 터널 시공시 적용되는 보강공법으로는 주로 차수그라우팅 및 천단부 보강공법인 강관다단 그라우팅 공법 등이 적용되고 있으며, 이들 공법의 시공에 주로 사용되고 있는 시공장비 중 규모가 큰 장비는 천공 시 사용되는 장비로 조사되었다.

따라서 보강공법 시공에 주로 사용되고 있는 장비인 크로러 드릴(PCR 200)과 다양한 보강공법 전용장비 중 비교적 장비의 규격이 작은 보강공법 전용장비(E15TJ)를 선정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 천단 보강공법으로 주로 적용되고 있는 강관다단그라우팅 공법 등은 시공 시 장비의 운영에 어려움이 없을 것으로 판단되었다.

<table>
<tr><td>PCR200(천공기)</td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2">  
양측확대</td></tr>
<tr><td colspan="2">  
편측확대</td></tr>
</table>

E15TJ(천공기)	
	
양측확대	
	
편측확대	

2. 터널 단면 확대 시공 프로세서

국외사례를 바탕으로 교통류 흐름를 유지하면서 기존 터널을 확대하는 경우는 도심지내 터널로 국한됨. 도로와 철도를 위한 산악터널인 경우 부지확보가 가능하므로 교통류 흐름를 유지하면서 기존 터널을 확대하는 공법적용은 미미할 것으로 판단된다

지역별 터널의 분포도를 살펴보면 산악 지형이 많은 강원도가 터널수 151 개소, 연장 112km로 전국 광역시도 중에서 터널이 제일 많은 것으로 조사되었다. 반면 울산광역시와 제주특별자치도에는 터널이 없는 것으로 나타났다.

표 3.30 지역별 터널의 분포(2007년 기준)

구 분	개소, (%)		연장(km), (%)		구 분	개소, (%)		연장 (km), (%)	
합계	1,064		754		경기도	136	(12.8%)	89	(11.8%)
서울특별시	65	(6.1%)	46	(6.1%)	강원도	151	(14.2%)	112	(14.9%)
부산광역시	37	(3.5%)	34	(4.5%)	충청북도	97	(9.1%)	68	(9.0%)
대구광역시	22	(2.1%)	18	(2.4%)	충청남도	57	(5.3%)	35	(4.6%)
인천광역시	5	(0.5%)	3	(0.4%)	전라북도	79	(7.4%)	50	(6.6%)
광주광역시	18	(1.7%)	7	(0.9%)	전라남도	109	(10.2%)	71	(9.4%)
대전광역시	21	(2.0%)	17	(2.3%)	경상북도	139	(13.1%)	101	(13.4%)
울산광역시	0	(0.0%)	0	(0.0%)	경상남도	128	(12.0%)	103	(13.7%)
					제주특별자치도	0	(0.0%)	0	(0.0%)

교통류 흐름를 유지한면서 기존 터널을 확대하는 경우는 도심지내 터널에서 적용할 가능성이 매우 높으므로 국내 특별시 및 광역시를 중심으로 연장 및 준공년도에 따라 조사함. 터널의 최소 차선은 2차로이다

표 3.31 연장별/지역별 터널의 분포

터널 연장	300m미만	300~500m	500~1km	1km 이상	계
서울특별시	26	12	8	13	59
부산광역시	2	13	8	12	35
대구광역시	2	0	2	0	4
대전광역시	1	4	0	0	5
인천광역시	1	2	0	2	5
광주광역시	7	7	6	0	20
합 계	39	38	24	27	128

표 3.32 준공별/지역별 터널의 분포

준공년도	1990년 이전	1990년 - 1995년	1996년 - 2000년	2000년 이후	계
서울특별시	20	12	11	16	59
부산광역시	19	2	10	4	35
대구광역시	0	0	0	4	4
대전광역시	2	2	0	1	5
인천광역시	0	0	0	5	5
광주광역시	0	0	11	9	20
합 계	41	16	32	39	128

	상하	위치	연장	총폭	유효폭	높이	차선	준공일	관리기관	비고
매봉터널		강남구 도곡동 ~ 강남구 도곡동(언주로)	250.0	25.1	21.1	8.5	3차선 3차선	1992. 7. 31	서울특별시	시공자 : 대호건설 설계자 : 동일기술공사 공법 : NATM공법





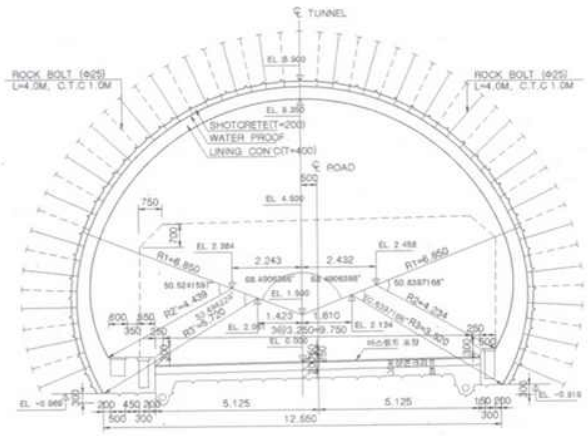


그림 3.64 조사된 기존터널 정보예

조사된 터널현황을 통하여 교통량현황, 준공년도, 터널주변 부지등을 고려하여 교통류 흐름를 유지하면서 기존 터널을 확대할 수 밖에 없는 터널을 결정하였다.

국내 도로에 적합한 프로텍터 설계를 위한 차로폭원 및 건축한계는 다음과 같다.

· 차로폭 : 설계속도 80km/hr 이상일 경우 차로 최소폭 3.5m

· 건축한계 : 규정값은 4.5m이지만 도로공사 기준상 시공시 실제 확보해야할 높이는 4.8m 이상으로 함

· 헌치부 : 헌치부 폭은 길어깨의 폭으로 최대 1.0m 이며, 헌치부 높이는 건축한계 높이에서 4.0m를 뺀 값으로 0.8m

· 검사원 통로 : 도로공사 기준 폭 0.75m×높이 2m

· 시공시 오차에 대한 고려 : 시공시 측량, 거푸집의 형상, 거푸집의 제작오차 및 콘크리트 타설시 발생하는 변형 등 여러 가지 원인으로 오차가 발생하므로 콘크리트 라이닝과 건축한계의 여유(300mm)와 검사원 통로와의 여유 (50mm)를 고려하여야 함.

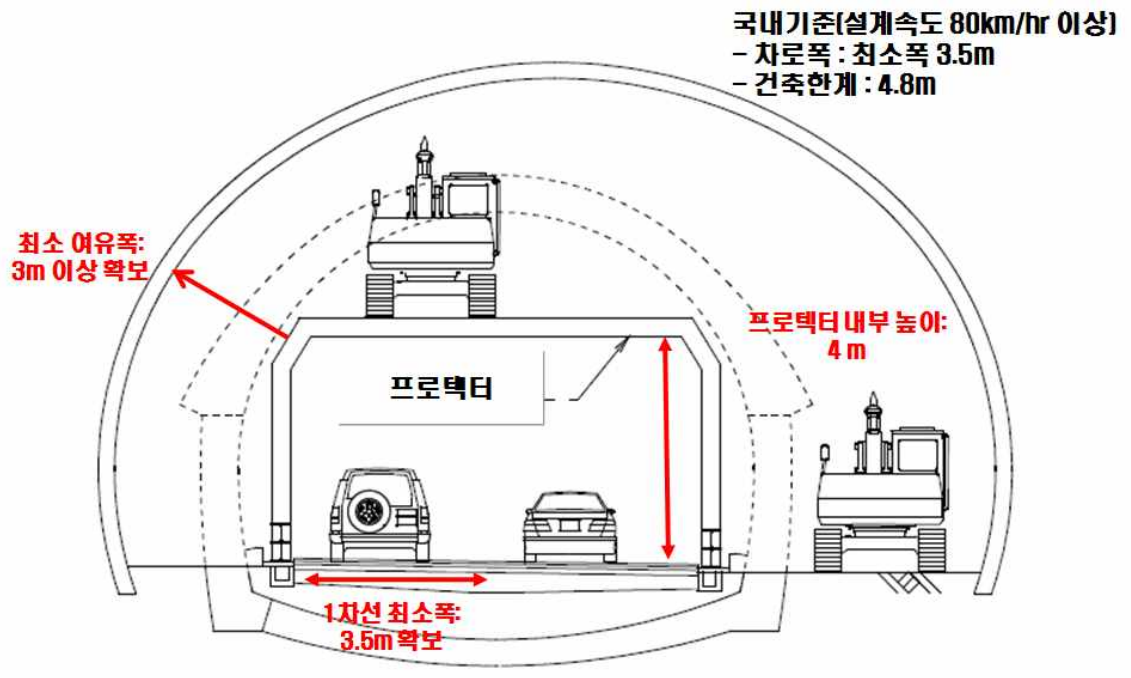


그림 3.65 터널단면 확대 단면도

교통류를 유지하면서 기존 터널의 확대시공 프로세스와 보강 프로세는 그림 2.2.3과 2.2.4에 나타내었다

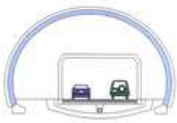
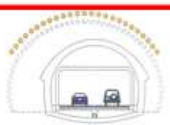
시공순서	시공개요도	주요사항	시공순서	시공개요도	주요사항
① 기초 공법		• 프로텍터 연결 기초부 시공	⑤ 공동구		• 방수막, 공동구 설치 • 가포장 시공 • 확대터널 구간 조명설치
② 프로텍터 설치		• 강재프로텍터 설치 • 야간 교통통제후 설치	⑥ 프로텍터 이동		•프로텍터 이동(야간통행 금지)
③ 사전 보강		• 불안정 지반 사전 보강 작업	⑦ 라이닝 설치		• 콘크리트 라이닝 타설 (확대굴착이 완료후)
④ 굴착 및 지보재 설치		• 발파천공 • 발파 및 환기(20분간 교통통제) • 기존 라이닝 및 지보재, 버력처리 • 지보재 시공	⑧ 프로텍터 제거 및 포장		• 프로텍터 제거 • 배수공 및 포장 완료 • 부대시설 설치

그림 3.66 확대시공 프로세스

터널의 교통을 유지시킨 채 확대하는 경우는 터널내의 교통안전 확보는 물론 재해의 미연 방지, 터널의 리뉴얼, 자연환경도 고려해서 검토해야 하였다

표준지보 패턴의 록볼트(이하 패턴볼트)를 타설할 수 없는 경우에는 배치나 길이를 적절히 설정해서 경사볼트를 타설해도 터널 벽면에 대해 45° 정도 이상이라면 일정한 지보효과를 기대할 수 있다

기존터널을 확대하는 경우 기존터널 라이닝 배면에 공동이 있다면 시공 중에 암괴가 낙하하여 기존터널 라이닝에 손상을 주고 작업원이나 터널 이용자의 안전 확보에 중대한 영향을 미칠 우려가 있음. 그러므로 사전보강의 필요성을 검토하여 기존터널의 상황에 따른 사전 보강공을 설계/시공을 하여야 한다

기존터널을 확대하는 경우 갱구위치는 횡단방향으로는 크게 변경할 수 없지만 종단방향으로는 갱구부의 안전성, 경제성, 시공성 및 주변환경 등을 고려하여 검토를 하고 최적 위치를 결정해야 한다

기존터널의 단면 확대는 신설터널과 달리 작업공간에 제한을 받으므로 시공계획의 입안시에는 작업의 안전성, 효율성에 대해서도 충분히 검토할 필요가 있다

시공계획 시에는 설계도서・공사규모・공기・지반조건・입지조건・현지교통조건 등에 적합한 계획을 세우도록 하여야 한다

굴착방법은 굴착방식(기계굴착, 폭파굴착 등), 분할굴착, 시공기계(범용기, 전용기)의 선정에는 설계에서 정한 확대공법(하부확대공법, 상부확대공법, 편측확대공법, 양측확대 공법)에 따라 지반조건, 기존터널의 크기·거리, 시공환경, 공기 등을 충분히 고려한 검토가 필요가 있다

기존터널의 확대를 운영 중 시공으로 하는 경우에는 터널 이용자의 안전을 확보하는 것을 목적으로 반드시 방호공을 설치하여야 한다

3. 프로텍터 설계 및 제작기술

프로텍터의 목적은 기존터널내 운행 차량의 보호 및 상부 신설터널 작업자의 안전을 확보하기 위한 것이다. 프로텍터의 종류는 강성이 크고 연성인 강재프로텍터가 주로 사용되지만 일부 기존터널 콘크리트라이닝을 이용한 사례도 있으나 콘크리트의 재료특성상 취성파괴가 발생할 수 있다. 확대 구간 전체에 프로텍터 설치할 경우 장대터널인 경우 비경제적으로 판단된다. 외국 시공사례를 바탕으로 확대터널의 연장이 300m이상이면 프로텍터를 확대터널 전체에 설치하는 것은 비경제적이며 이러한 300m이상 또는 장대터널인 경우에는 이동식 프로텍터의 적용이 경제적이다.

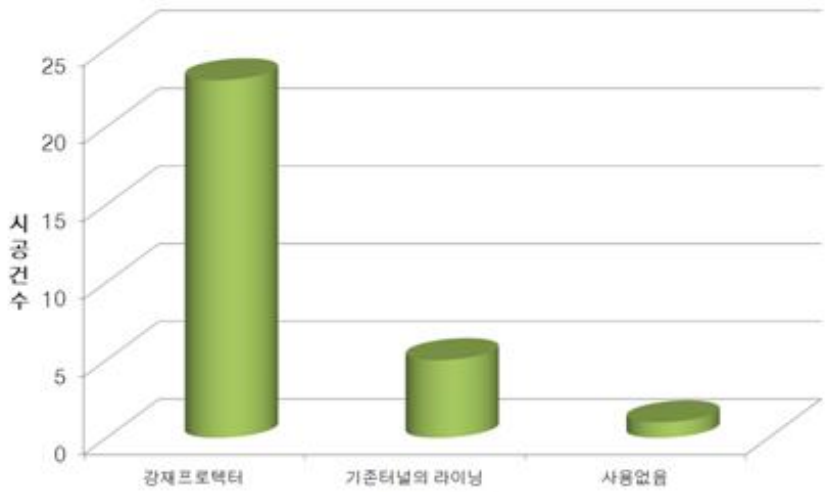


그림 3.67 프로텍터의 종류



그림 3.68 강제 프로텍터의 기존터널내 설치

그리하여 이동식 프로텍터에 설계/제작/운영 기술 필요로 하다. 이동식 프로텍터의 최소길이는 기존 외국 시공사례 및 수치해석결과를 바탕으로 다음과 같이 정의할 수 있다

이동식 프로텍터 최소길이 = 기존터널 막장 전방 최대 보호구간($2D_1$) +
기존터널 막장 후방(확대터널) 최소보호구간($2D_2$)

여기서 D_1: 기존터널 폭,
D_2: 확대터널 폭

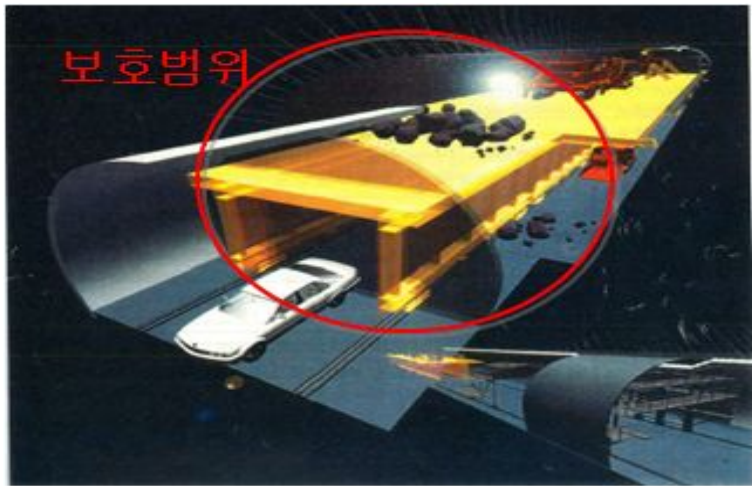


그림 3.69 이동식 프로텍터에서 막장전방 보호구간

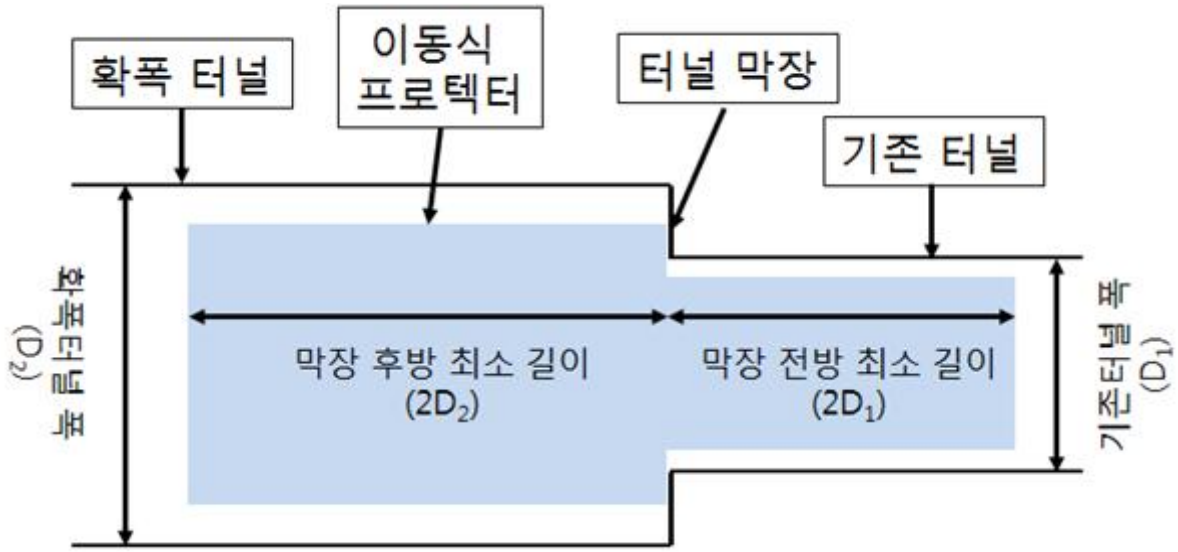


그림 3.70 이동식 프로텍터의 전체 모습

아래 그림에 본 과제에서 제안한 이동식 프로텍터 설계 시 핵심사항에 대해 나타내었다.

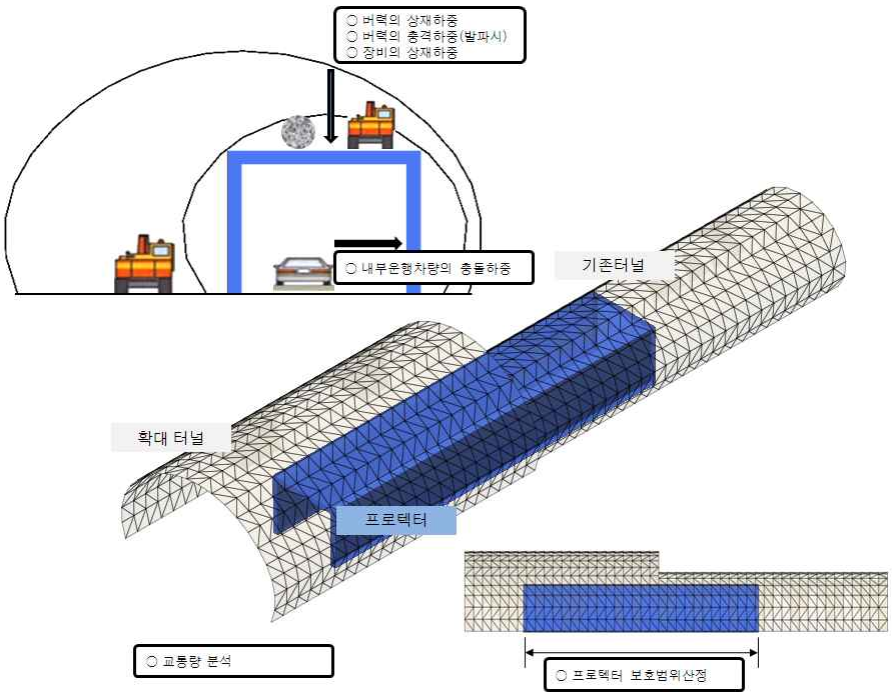


그림 3.71 프로텍터 설계 시 핵심사항

위의 그림에서 알 수 있듯이 이동식 프로텍터를 설계하기 위해서는 우선 교통량분석을 통한 프로텍터 내공단면산정, 지반변형특성을 반영한 프로텍터의 합리적인 보호범위 산정이 필요하여 프로텍터의 구조해석을 위한 하중분석이 필요하다.

교통량과 지반변형특성에서는 전술하였으므로 본 절에서는 프로텍터에 작용하는 하중에 대해 논의하도록 한다. 프로텍터에 작용하는 하중은 크게 사하중과 동하중으로 나눌 수 있으며 사하중에는 굴착된 버력의 적재에 의한 적재하중과 굴착장비의 중량하중이 있으며 동하중에는 발파 시 버력의 충돌하중과 프로텍터 내부의 차량에 의한 충돌하중이 있다. 충돌하중에 대해서는 전술하였으므로 프로텍터 내부의 차량에 의한 충돌하중에 대해 검토한다.

교통을 유지하더라도 프로텍터 내부에서는 차량이 빠르게 이동하지 못하기 때문에 차량에 의한 충돌하중이 발생할 가능성은 매우 희박 혹은 매우 적을 것으로 판된되나 프로텍터의 안정성은 운전자의 생명과 직결되는 중요한 문제이기 때문에 차량 충돌하중의 검토방법에 대해 살펴보고자 한다.

NCHRP Report 86(1970)에는 차량 충돌하중 산정 시 자주 인용되는 다음 식과 같은 Olson 모델이 제시되어 있다.

$$\max F_{lat} = \frac{\pi}{2}\left(\frac{V_I^2 \sin^2\theta}{2g[A\sin\theta - 0.5B(1-\cos\theta) + D]}\right)W$$

여기에서, $\max F_{lat}$: 최대 충돌하중, V_I: 충돌 전의 차량 속도, A: 차량 앞면으로부터 무게중심까지의 거리, B: 차량 폭, θ: 충돌각도, D: 방호울타리의 횡방향 변위, W: 차량 중량.

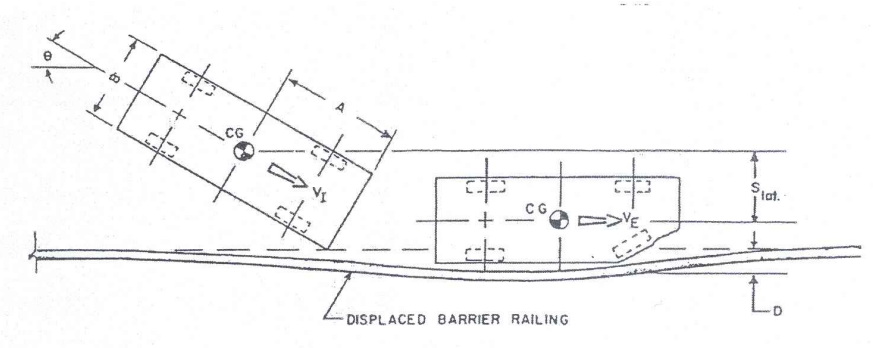


그림 3.72 Olson 모델에서의 기호

프로텍터의 충격하중을 분석한 결과 발파 시 최악의 경우 프로텍터에 2,873tonf의 집중하중이 발생될 수 있는 것으로 나타났으며 본 하중에 대해 국내에서 생산되는 강재의 규격별 구조해석결과 어떠한 강재에서도 최대발생응력이 허용응력인 1,400kgf/cm^{2}을 초과하는 것으로 나타나 강재 자체로는 안정성을 확보할 수 없을 것으로 판단된다. 따라서 충격저감재를 설치하여야만 할 것으로 판단된다.

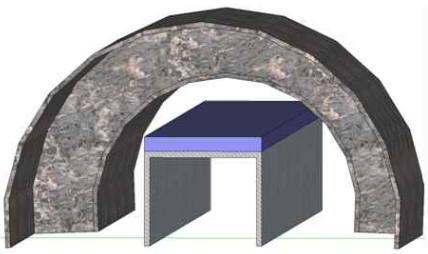
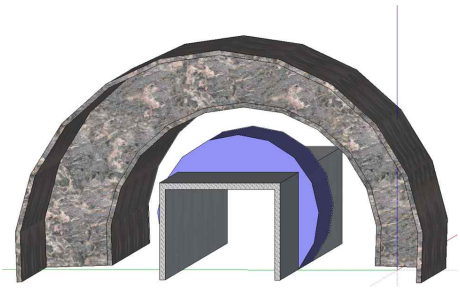
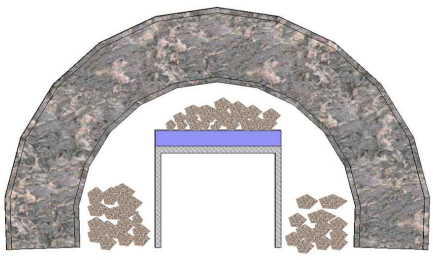
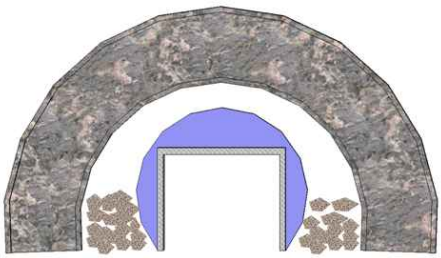
충격저감재로는 전술한 바와 같이 폐타이어를 이용하여 만든 탄성매트를 적용하였으며 강재에 비해 비용이 적게 들므로 충격저감재를 두껍게 설치하면 강재를 크게 절감시킬 수 있어 공사의 경제성을 증가시킬 수 있다. 하지만 충격저감재를 설치할 경우 작업공간이 더욱 협소해지는 문제가 발생되어 설치 두께가 제한되는데 이러한 문제점을 해결하기 위해 이동식 충격저감장치를 제안하였다.

또한 저감장치의 단면형상을 원형으로 하여 발파 후 프로텍터 상부에 버력이 쌓이지 않게 하여 버력처리 장비를 프로텍터에 탑재하지 않아도 되게 하였으며 이를 통해 버력적재하중과 장비하중의 저감 및 공간활용을 극대화할 수 있도록 하였다. 추가적으로 발파 시 버력이 프로텍터 측면에 충돌할 수 있으므로 프로텍터 내부에 수평지지대를 힌지형태로 설치하여 차량운행 시에는 접어두고 발파 시에 이를 체결하여 수평충격력에 지지할 수 있도록 하였다.

기술의 특장점은 다음과 같다

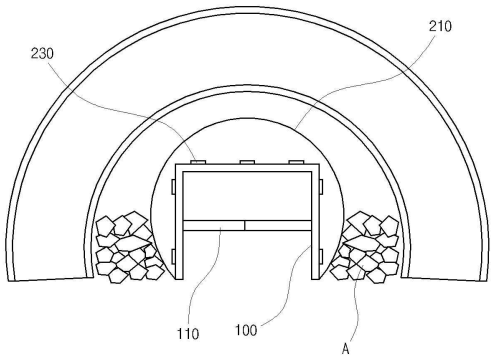
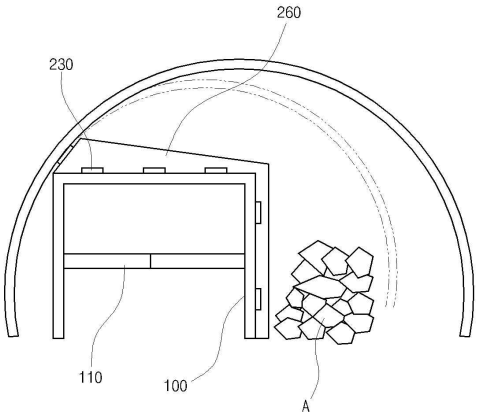
- 이동식으로 발파 위험구간만 집중 보호 -> 설치비용 감소로 경제성 확보
- 작업공간에 영향을 주지 않으므로 설치 두께의 제한을 크게 완화시켜 프로텍터 강재절감 및 안정성 상승
- 발파 버력이 프로텍터에 쌓이지 않고 좌우측으로 낙하하도록 유도 -> 프로텍터 상부에 버력처리 장비가 필요없고 버력처리시간이 필요없음 -> 프로텍터 작용하중 감소, 프로텍터 이동시 추진력 감소, 공기단축(프로텍터 상부에서 버력처리장비를 사용하면 천공장비와 간섭이 발생하여 작업시간이 길어질 수 있음)
- 프로텍터 내부에 수평지지대를 설치하여 발파 시 수평충격력에 저항

표 3.33 기존기술과 제안기술 비교

구분	기존기술	제안기술
충격저감장치 설치길이		
발파 후 버력의 위치		

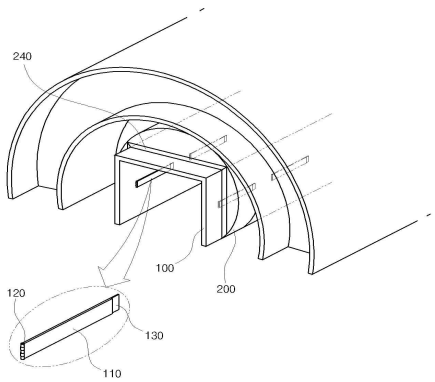
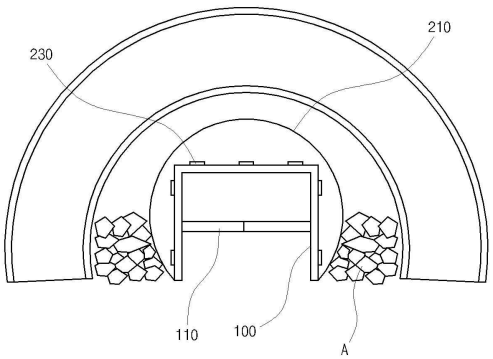
충격저감장치의 형상은 발파 후 버력이 프로텍터 상부에 적재되지 않는 형상을 지니도록 원형 및 일정한 기울기를 가지는 형상을 하도록 하였다.

표 3.34 충격저감장치의 형상

양측 확대 시	편측확대 시
	

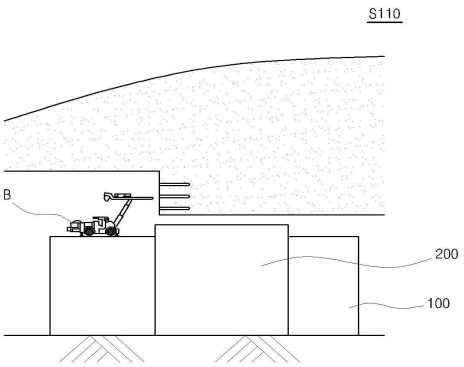
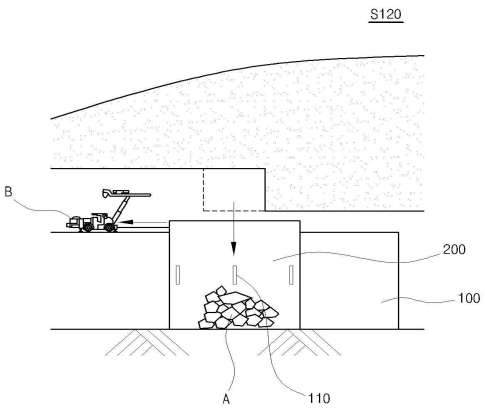
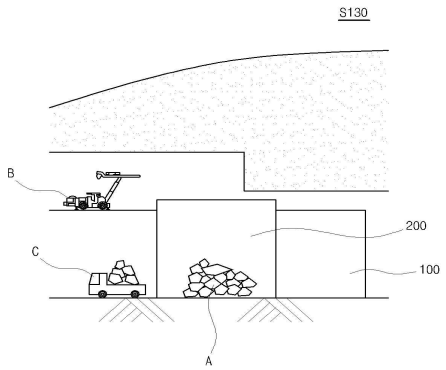
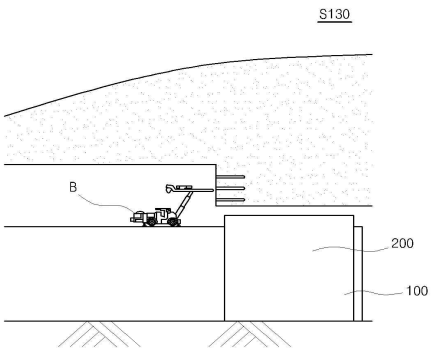
발파 시 수평충격력에 대응할 있도록 수평지지대를 설치하였으며 흰지의 형태로 하여 차량 통행 시에는 수평지지대를 접어두고 발파 시에는 이를 체결하여 수평충격력을 지지할 수 있도록 하였다.

표 3.35 수평지지대의 구성

차량 운행 시	발파 시
	

충격저감장치의 운용방법을 아래 표에 나타내었다. 천공 시 이동식 충격저감장치를 기존터널 내부로 밀어넣어 천공작업 시 충격저감장치가 작업공간에 영향을 주지않는다. 천공 후 천공장비가 후진할 때 충격저감장치를 끌고 나와 발파구간에 위치시킨다. 버력을 처리한 후 천공작업 시 장비가 충격저감장치를 다시 기존터널 내부로 밀어넣어 작업공간을 확보하게 된다. 또한 충격저감장치는 좌, 우 및 상부로 분리될 수 있게하여 버력처리 시 충격저감장치 상부만 기존터널 내부로 밀어넣은 상태에서 지보재설치 작업을 진행할 수 있다. 이러한 운용방법을 통하여 충격저감장치가 작업공간을 협소하게 하는 문제점을 해결하였으며 최종적으로는 저비용의 충격저감장치를 두껍게 설치할 수 있어 발파 시 프로텍터의 안정성확보는 물론 프로텍터 단면을 축소할 수 있어 강재량절감에 따른 경제성상승의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

표 3.36 충격저감장치의 운용

<table>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>① 천공</td><td>② 천공 후 장비후진 시 장비와 연결시켜
충격저감장치를 발파구간에 원위치</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>③ 발파 후 버력처리</td><td>④ 천공장비 전진 시 장비와 연결시켜
충격저감재를 기존터널 내부로 이동시킴</td></tr>
</table>

다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

○ 발파 시 과도한 충격하중이 발생되므로 이에 대응하기 위해 강재의 단면을 키우기보다는 저비용의 충격저감장치를 설치는 것이 안정성 및 경제성을 확보할 수있는 방법으로 판단된다.

○ 기존기술에서는 프로텍터 전구간에 충격저감재를 설치하였으나 본 기술에서는 이동식으로 발파 위험구간만 집중보호하도록 하여 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

○ 발파 시 수평방향으로 충돌이 발생할 수 있으며 이에 대응하기 위해 접이식 수평지지대를 프로텍터 내부에 설치하였다. 이를 통해 프로텍터의 안정성을 보다 상승시킬 수 있을 것으로 판단된다.

○ 충격저감장치 운용방법을 제안하였으며 이를 통해 충격저감장치가 작업공간을 협소하게 하는 문제점을 해결하였다. 최종적으로는 저비용의 충격저감장치를 두껍게 설치할 수 있어 발파 시 프로텍터의 안정성확보는 물론 프로텍터 단면을 축소할 수 있어 강재량절감에 따른 경제성상승의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 프로텍터 시작품 제작 및 실대형 실험

기존 연구결과에 의하면 프로텍터에 작용하는 하중 중 가장 크고 위험도가 높은 것은 발파 굴착 시 낙하버럭에 의한 충격하중이므로 발파 시 프로텍터의 안정성을 검증하기 위해 시작품 제작 및 실대형 시험을 수행하였다.

가. 강재프로텍터의 제작

강재프로텍터는 1차로 터널에 대응되는 것으로 내공단면은 폭 3m, 높이 4.5m이며 길이방향의 구속효과를 알아보기 위하여 프로텍터의 길이를 변경시키며 Midas-Civil을 이용하여 구조해석을 실시하였다. 구조해석모델은 그림 3.73과 같다.

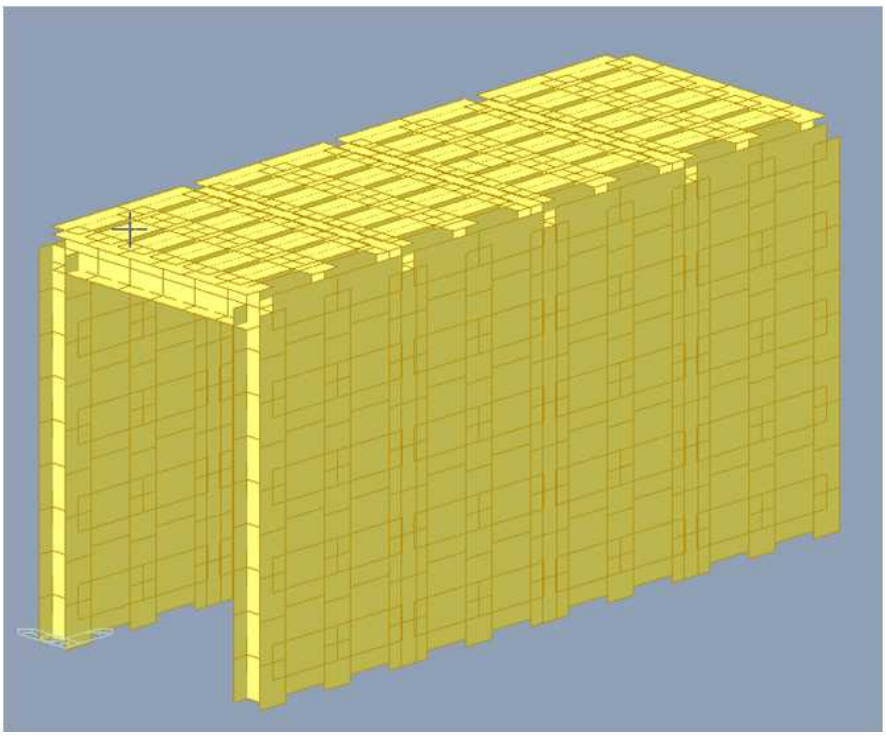


그림 3.73 강재프로텍터 구조해석모델

프로텍터의 1세그먼트의 길이가 2m이므로 2m씩 증가시키며 해석을 수행하였으며 해석결과를 그림 3.74에 나타내었다.

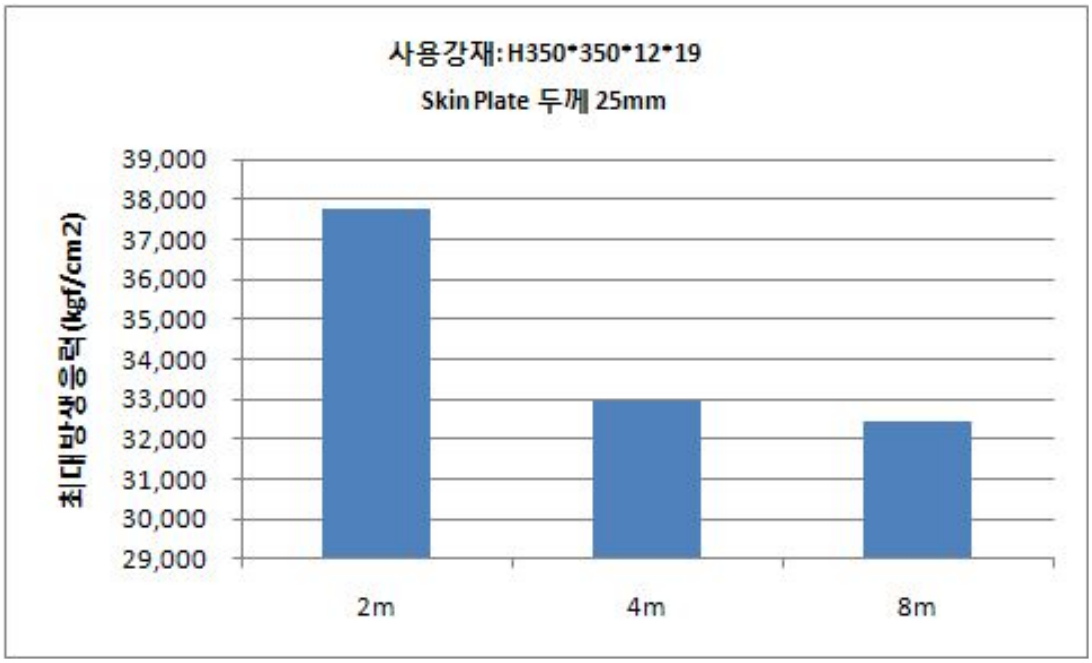


그림 3.74 강재프로텍터 구조해석결과

해석결과 프로텍터의 길이가 4m 이상 되어도 발생응력이 4m와 유사하므로 길이는 4m로 하는 것이 적정할 것으로 판단된다. 하지만 4m로 할 경우 실험부지의 확보가 수월하지 않고 동해석결과 충돌로 인한 응력의 전파가 정해석에 비해 크지 않기 때문에 실험체의 길이는 2m로 하였으며 길이방향의 구속효과를 고려하기위해서 프로텍터 실험체 양단에 프로텍터와 동일한 프레임을 각 1개씩 더 설치하였다. 실험체의 상세도면 및 강재의 규격을 그림 3.75와 표 3.35에 나타내었다.

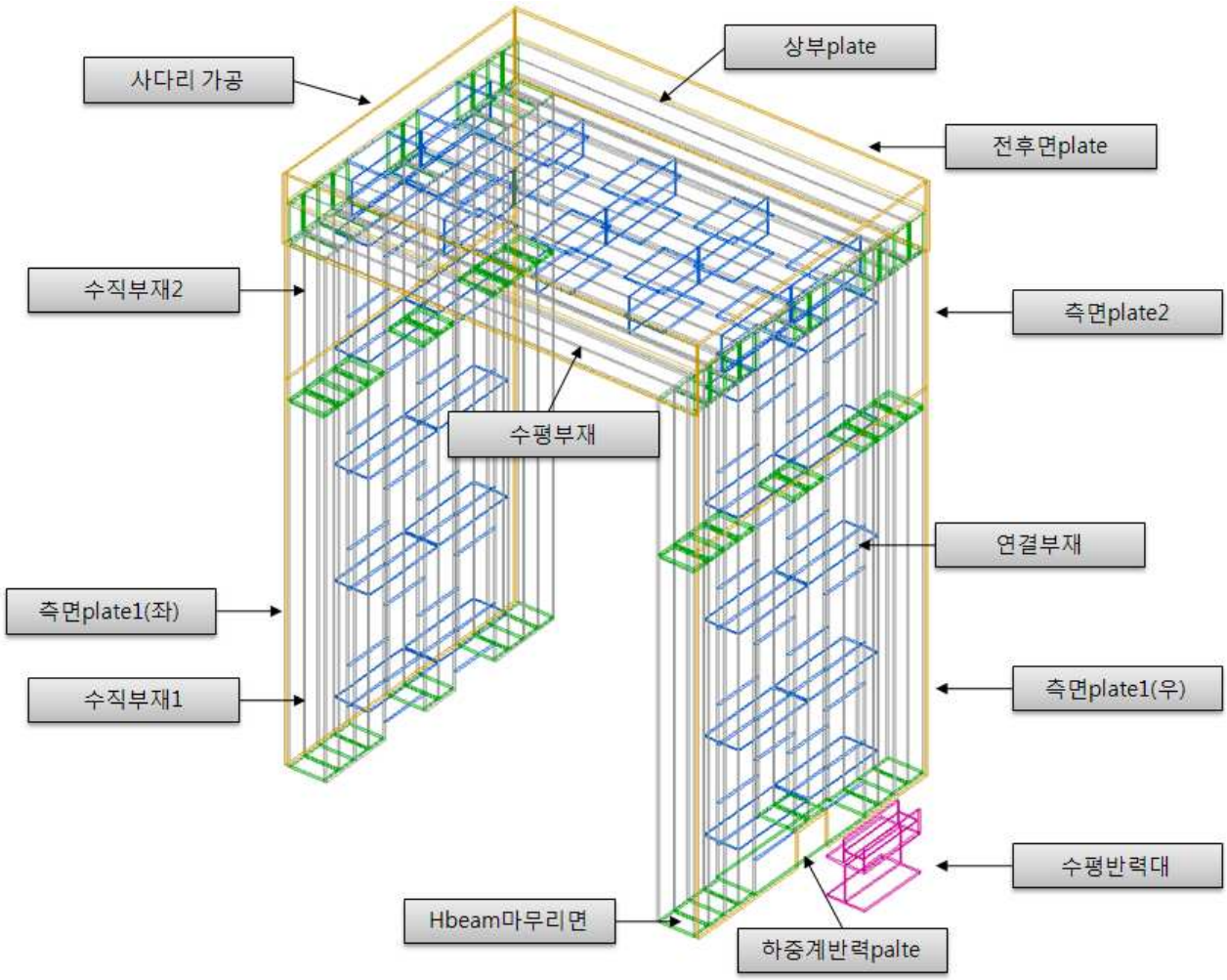


그림 3.75 프로텍터 실험체 개요 및 각 부재의 명칭

표 3.37 프로텍터 실험체 개요 및 각 부재의 명칭

구분	강재	규격	비고
수직부재1	H-beam	350*350*12/19	하부 수직부재
수직부재2	H-beam	350*350*12/19	상부수직부재
수평부재	H-beam	350*350*12/19	
연결부재	H-beam	350*350*12/19	
측면plate1(좌)	Plate	두께: 25mm	
측면plate1(우)	Plate	두께: 25mm	수직 및 수평반력 측정을 위해 가공
측면plate2	Plate	두께: 25mm	
상부plate	Plate	두께: 25mm	
전후면plate	Plate	두께: 25mm	
Hbeam마무리면	Plate	두께: 19mm	
하중계반력plate	Plate	두께: 19mm	수직반력측정을 위한 반력plate
수평반력대	Hbeam	350*350*12/19 200*200*10/15	

프로텍터는 운반을 용이하게 하기 위해 3개의 세그먼트로 분리하여 공장에서 제작되었으며 현장반입 후 현장에서 완전조립되었다. 프로텍터의 상의 상세도면은 표 3.38~3.39와 같다.

표 3.38 프로텍터 상세도면-전체도

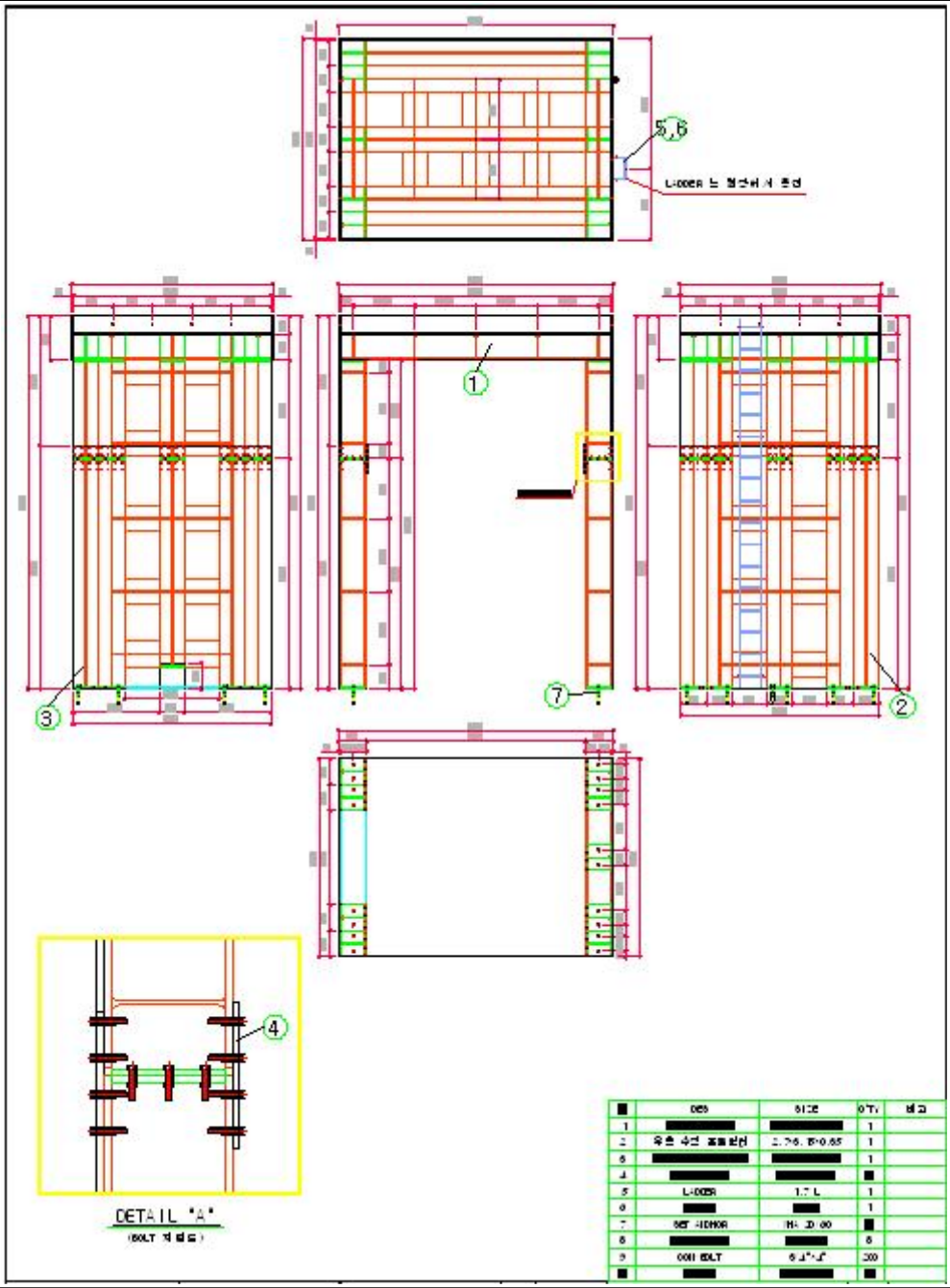
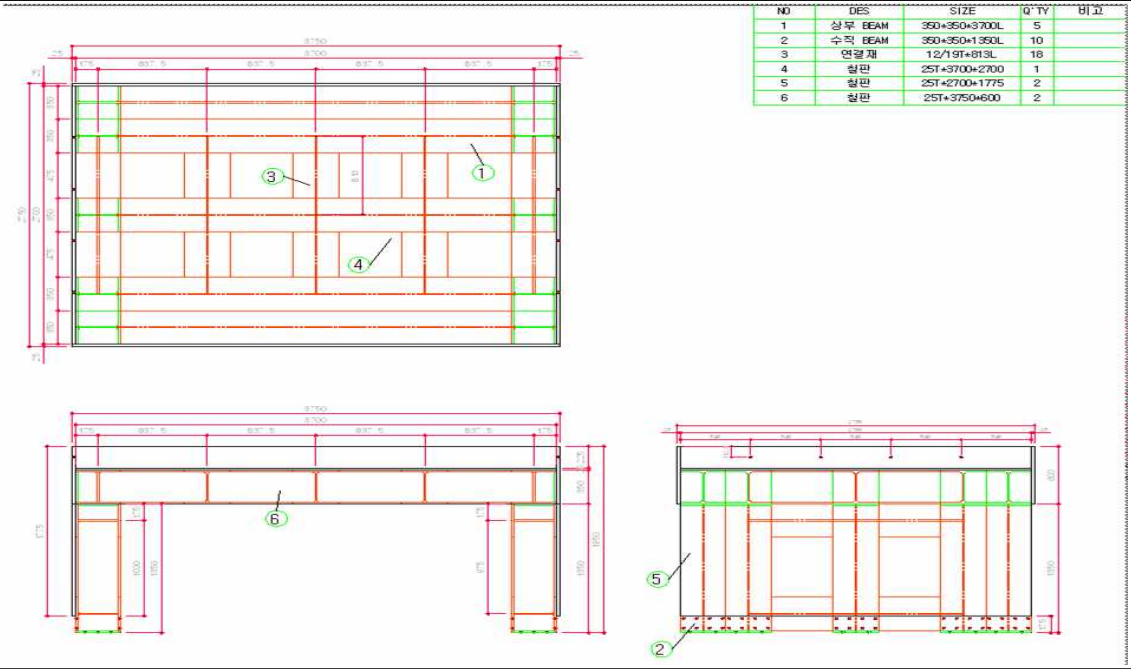
프로텍터 전체도


표 3.39 프로텍터 상세도면

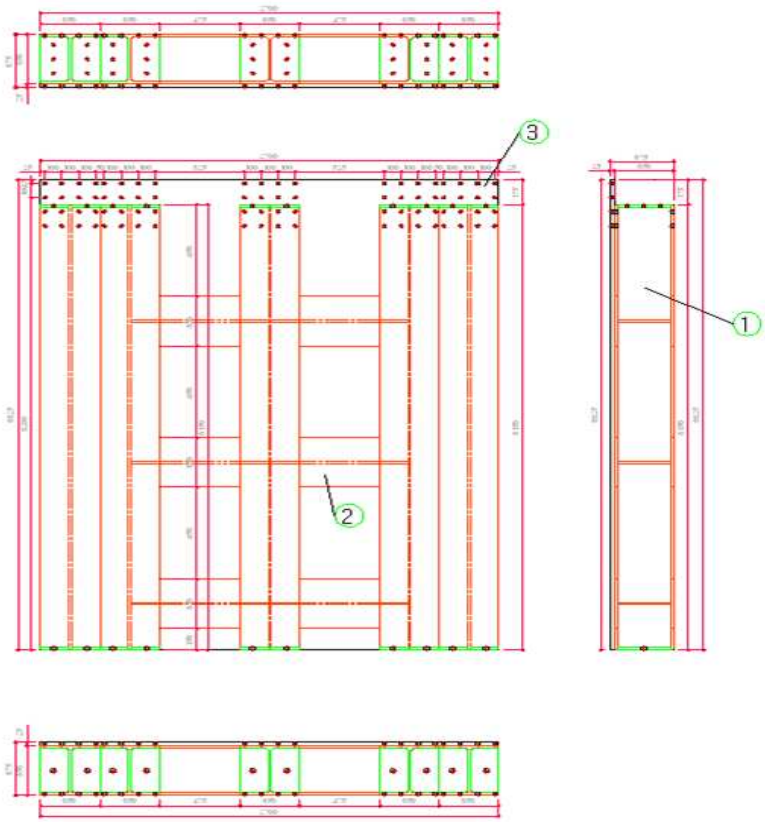
프로텍터 상부세그먼트

NO	DES	SIZE	Q'TY	비고
1	상부 BEAM	350*350*3700L	5	
2	수직 BEAM	350*350*1350L	10	
3	연결재	12/19T*813L	18	
4	철판	25T*3700*2700	1	
5	철판	25T*2700*1775	2	
6	철판	25T*3750*600	2	



프로텍터 측면세그먼트

NO	DES	SIZE	Q'TY	비고
1	수직 BEAM	350*350*3150L	5	
2	연결재	12/19T*813L	6	
3	철판	25T*2700*3325	1	



조립순서는 우선 프로텍터를 정위치시키기 위해 현장에서 설치위치를 스케치하고 각 설치위치별 레벨을 측정하여 보정하였다. 다음으로 프로텍터를 현장으로 반입한 후 가조립하고 각 세그먼트를 볼팅체결하여 완전조립하였으며 실험 시 안전을 위하여 상부에 안전난간을 설치하였다. 실험체 설치 순서를 표 3.39에 나타내었다.

표 3.40 프로텍터 실험체 설치순서

	
① 프로텍터 설치 위치 sketch	② 하부앵커리지를 위한 천공
	
③ 설치지점별 레벨측정	④ 프로텍터 반입
	
⑤ 프로텍터 세그먼트 하차-1	⑥ 프로텍터 세그먼트 하차-2
	
⑦ 프로텍터 정위치 설치 및 간이 조립-1	⑧ 프로텍터 정위치 설치 및 간이 조립-2
	
⑨ 각 세그먼트 볼팅체결	⑩ 안전난간 설치 및 설치완료

실제 현장적용 시 프로텍터의 설치시간은 공사기간에 직접적으로 영향을 주기 때문에 실험체 설치 시 시공시간을 측정하여 설치시간을 분석하였다. 측정된 시공시간을 표 3.40에 나타내었다.

표 3.41 프로텍터 실험체 설치 및 해체시간

구분	순서	소요시간(hr)
프로텍터 설치	① 부지정리	0.5
	② 프로텍터 설치 위치 sketch	0.6
	③ 하부앵커리지를 위한 천공	0.3
	④ 각 지점부 레벨 측정	0.3
	⑤ 프로텍터 반입 및 가조립	4
	⑥ 프로텍터 완전 조립	4
프로텍터 해체	① 프로텍터 볼트 해체	3
	② 프로텍터 해체 및 반출	1

길이 2m의 실험체를 설치 및 해체 시 소요되는 시간을 분석한 결과 설치 시 소요되는 시간은 약 9~10시간이며 해체하는데 소요되는 시간은 약 4시간인 것으로 나타났다. 하지만 실제 현장적용 시에는 부지정리 및 스케치시간과 반입을 위한 프로텍터 하차를 위한 크레인의 설치시간은 최초 1회에 그치며 조립시간만 반복되므로 시공시간은 보다 단축될 것으로 판단된다.

나. 계측기 제원 및 배치

동해석 결과 낙석의 충돌부터 반발되기까지의 시간은 극히 짧은 시간에 발생되므로 측정 rate를 5000Hz이상인 데이터로거 및 계측기를 사용하였다. 사용된 계측기를 표 3.41에 나타내었다.

표 3.42 사용계측기 및 계측목적

계측기 종류	설치 목적
가속도계	충돌 시 가속도측정을 통한 충격하중 평가
변위계	충돌 후 구조물의 잔류변형 측정
변형률계	충돌 시 구조물의 거동 평가
하중계	하부 이동장치 설계를 위한 반력특성 평가
초고속카메라	낙석의 충돌속도 및 반발속도 측정

F형 전기저항식 변형률게이지는 수 미크론의 합금박을 이용하여,베이스에는 두께 약 0.03mm의 절연성이 높은 에폭시 수지를 사용한 게이지로 비닐 리드선을 붙인 게이지이다. 게이지는 리드선 부착 폴리미드 피복선으로 이어져 있다. 게이지 단자의 부착이나 결선이 불필요하기 때문에 작업시간이 단축된다. 센서를 그림 3.76에 나타내었으며 제원을 표 3.42에 나타내었다.



그림 3.76 전기저항식 변형률 게이지

표 3.43 F형 변형률게이지의 제원

주된 대상재료	금속, 유리, 세라믹	베이스재료	에폭시
사용온도범위	-20～+80℃	저항소자	Cu-Ni박
온도보상범위	+20～+80℃	실온에 있어서의 strain 한계	3% (20000×10^{-6})
주된 적용접착제	CN, P-2, EB-2	실온에 있어서의 피로한계	1×10^{6} ($\pm1500\times10^{-6}$)

CDP형 전기식 변위계 (LVDT : linear variational deformation transducer) 대상 구조물의 처짐, 솟음이나 회전 등의 변위를 측정하는 전기적 변환기 형태를 말하며 실험에 사용된 CDP형식의 LVDT는 외형이 Compact해서 취급이 용이하고 안정적인 변위계로서 고정도 측정, 고출력, 뛰어난 응답성으로 정·동적 계측에 널리 사용되고 있다. 센서를 그림 3.77에 나타내었으며 제원을 표 3.43에 나타내었다.

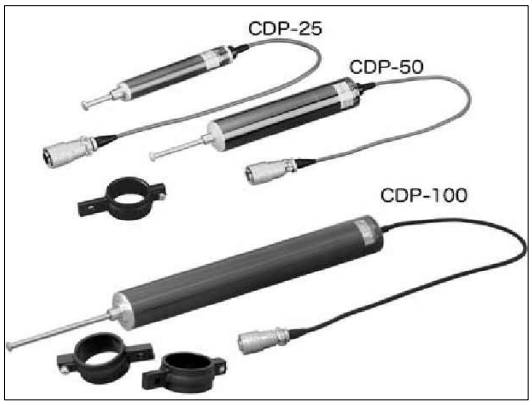


그림 3.77 CDP형 전기식 변위계

표 3.44 CDP형 전기식 변위계의 제원

모델명	CDP-50	CDP-100	CDP-25M
용량 (mm)	50	100	25
정격출력	5mV/V±0.1% (10000×10^{-6}±0.1%)		6.25mV/V±0.3% (12500×10^{-6}±0.3%)
민감도(1×10^{-6}/mm)	200	100	500
비직선성	0.1%RO		0.3%RO
측정력	4.9N	5.4N	1.5N
응답주파수(Hz)	6Hz	3Hz	7Hz
영점의 온도영향	1×10^{-6}/℃ (0～+40℃)		0.05%RO
허용온도범위	0～+60℃		-10～+80℃
입출력 저항	350Ω		
허용인가전압	10V		

Charge 출력형 압전식 가속도계는 교량의 케이블 장력을 비롯한, 구조물이나 기계의 진동 모드, 충격실험 등의 충격가속도 측정에 적합한 소형 가속도계이다. 플랜지 부착의 육각볼트 모양을 하고 있으므로 나사 구멍에 간단하게 설치할 수 있어 설치가 매우 용이하다. 압전식 가속도계의 제원을 표 3.44에 나타내었다.

표 3.45 압전식 가속도계의 제원

모델명	350B23
용량 (mm)	1～98,000m/s^2
허용과부하	500%
민감도(mV/(m/s^2))	0.05±30%
비직선성	2.0% 이하
응답주파수(±1dB)	0.4～10,000Hz
응답주파수(Hz)	0.2～25,000Hz
온도의 영향	-18～+66℃
입출력 저항	200Ω
사이즈(mm)	9.5×19.1
무게(g)	4.5

압축 센터홀형 하중계는 원주형의 변형부에 Strain Gauge를 부착한 Center-hole Type의 하중계이다. 어느 정도의 편심하중에 대해서도 안정적인 측정치를 얻을 수 있는 하중계로써 특히 현장에서의 측정에 가장 적합한 하중계이다. 하중계의 제원을 표 3.45에 나타내었다.

표 3.46 압축 센터홀형 하중계

형식	SELC-60	ELC-100S
용량 (mm)	600kN	1,000kN
정격출력	1.2610mV/V	1.4460mV/V
허용과부하	150%RO	
비직선성	1.0%RO	
히스테리시스	1.0%RO	
절연저항	DC25V 500M Ω 이상	
허용인가전압	10V 이하	
허용온도범위	-20～+60℃	
입출력 저항	700Ω±1%	

정적데이터 로거 (TDS-102)는 스위치박스를 내장한 Potable Data Logger이다. AC 100V를 사용할 수 없는 장소에서 장기에 걸쳐 자동적으로 측정을 계속할 수 있도록, 대용량의 data memory, slip 기능부 interval timer를 갖추고, 현재 시판되고 있는 알칼리 건전지로 작동이 가능하다. 측정 모드는 스트레인 게이지, 스트레인 게이지식 변화기에 의한 스트레인 측정, 열전대, 백금측온저항체에 의한 온도측정, 직류전압측정이 가능하다. 측정 모드 등은 본체에서 수동에 의한 설정 외에 RS-232C에 의한 외부에서의 프로그램이 가능하다. JEIDA 규격의 메모리카드를 사용하여 측정 데이터를 컴퓨터로의 전송이 가능하며, 외부 스위치박스를 접속함에 따라 최대 100채널까지의 측정이 가능하다. 본체 내부에 Telemeter를 내장하고, 측정 데이터의 무선송신도 가능한 계측장비이다. 로거의 상세제원을 표 3.46에 나타내었다.

표 3.47 정적 데이터 로거의 사양

계측기기	사양		형상
정적 데이터 로거	외형	298(W)×110(H)×279(D)mm	
	중량	약 4.5 kg	
	전원	전용 AC Adaptor (option) 알칼리 건전지 4개	
	속도	Sampling 속도 : 0.2초	

동적데이터 로거 (DRA-30A)는 컴퓨터와 온라인 측정을 목적으로 한 소형 다채널 디지털 스트레인 측정기이다. 이 기기의 특징은 동적 스트레인과 정적 스트레인이 모두 측정이 가능하며, 각 채널마다 A/D 변화기가 내장되어 있어 디지털 값에 의해 전 채널이 동시에 측정이 가능하다. 또한 GP-IB, USB 1.1 인터페이스가 내장되어 있으며, 컴퓨터에 의한 온라인 측정이 가능하다. 전원은 AC 90~250V(20/60Hz) 또는 DC 10~30V에서 사용이 가능하다. 부속 소프트웨어인 DRA-730A에 의한 소형디지털 동적 스트레인 측정기로 사용하거나, 다채널 동시 샘플데이터로거로 사용이 가능하다. 동적데이터 로거의 상세제원을 표 3.47에 나타내었다.

표 3.48 동적 데이터 로거의 사양

계측기기	사양		형상
동적 데이터 로거	외형	380(W)×148(H)×486(D)mm	 
	중량	약 12 kg	
	전원	AC90-250V 50/60Hz 100Va MAX DC 10~30V 3.5A Max	
	주파수	DC~3kHz	

초고속 카메라 Memrecam GX-1 PLUS는 세계 최고 감도의 소형, 일체형 high-speed 카

메라로 촬영 속도에 대하여 픽셀수를 임의로 설정가능하며, 농도계조(8, 10, 12bit)의 선택이 가능하다. 또한 외부 HDD에 직접적으로 데이터 전송이 가능하여 고속촬영 및 충격시험 등의 촬영에 사용된다. 초고속카메라의 상세제원을 표 3.48에 나타내었다.

표 3.49 초고속카메라 상세제원

계측기기	사양		형상
초고속 카메라	해상도	1280×1024	
	감도(칼라)	ISO5000	
	감도 (흑백)	ISO20000	
	셔터속도 (최단)	1μsec	
	녹화속도	50～200,000 코마/sec	
	녹화시간	2.6sec/4GB(1000fps)	

프로텍터의 충격하중에 대한 거동을 확인하기 위하여 사전에 계측 항목을 분석하여 현장 여건에 가장 적합한 센서를 설치하였다. 그림 3.78과 표 3.49에는 본 과업인 프로텍터 충격하중 실험 시의 계측위치와 계측위치에 설치된 계측센서를 자세히 나타내었다. 변형률 센서의 경우 x, y, z 축으로 구분하여 표기하였으며, 추의 낙하위치인 ②번과 ⑧번 지점에는 가속도계와 초고속카메라의 타겟이 같이 설치되었다.

표 3.50 계측위치에 적용된 계측센서

No.	계측 센서(방향)	No.	계측 센서(방향)
①	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)	⑧	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z), 가속도 게이지2, 타겟
②	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z), 가속도 게이지 1, 타겟	⑨	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)
③	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)	⑩	변형률 게이지 (y, z), LVDT(z)
④	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)	⑪	변형률 게이지 (y, z), LVDT(z)
⑤	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)	⑫	변형률 게이지 (z), LVDT(z)
⑥	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)	⑬	변형률 게이지 (z), LVDT(z)
⑦	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)		

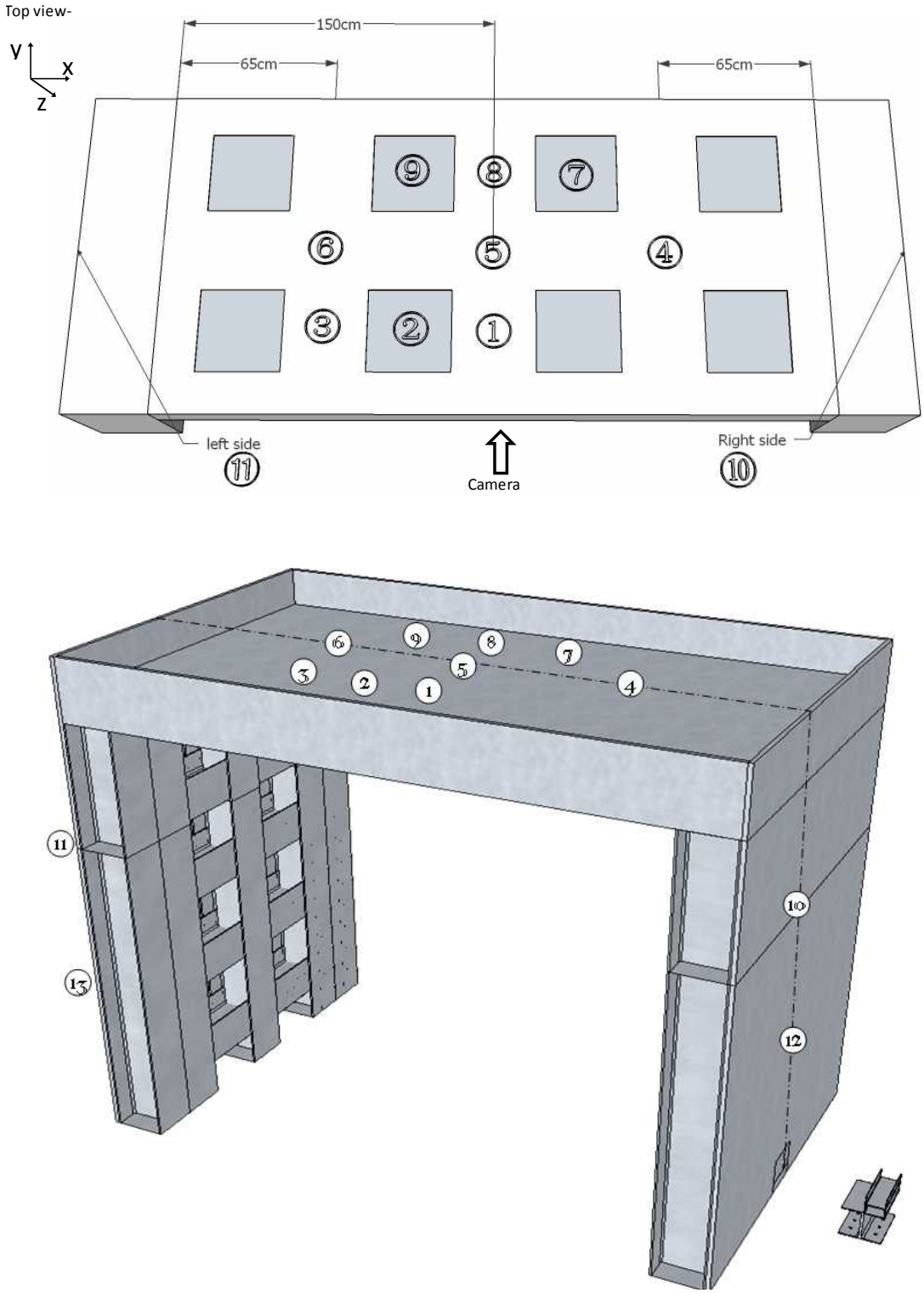


그림 3.78 계측위치와 계측센서 설치도

그림 3.79에 나타낸 바와 같이 프로텍터의 주요 계측 위치에 계측 센서를 설치하였다. 그림의 센서 설치 전경에서 알 수 있듯이 미리 제작된 강재 프로텍터가 제작된 후 지그와 센서를 설치하였다. 센서 설치 후 미리 포설해 놓은 연결케이블을 연결하였다. 케이블 연결 후 변위계는 최종잔류 변형만을 확인하기 때문에 정적데이터 로거에 연결하였으며, 변형률계와 가속도계, 하중계는 시간에 따른 동적 거동을 확인하기 위하여 동적데이터 로거에 연결하였다. 충격실험 전에 센서의 연결과 송신 이상 유무를 확인하였다. 한편, 초고속 카메라는 추가 타격하는 위치와 수평선상에 놓이도록 설치하였으며, 추의 낙하속도와 동적거동을 확인하기 위하여 추와 프로텍터에 마커를 설치하였다.

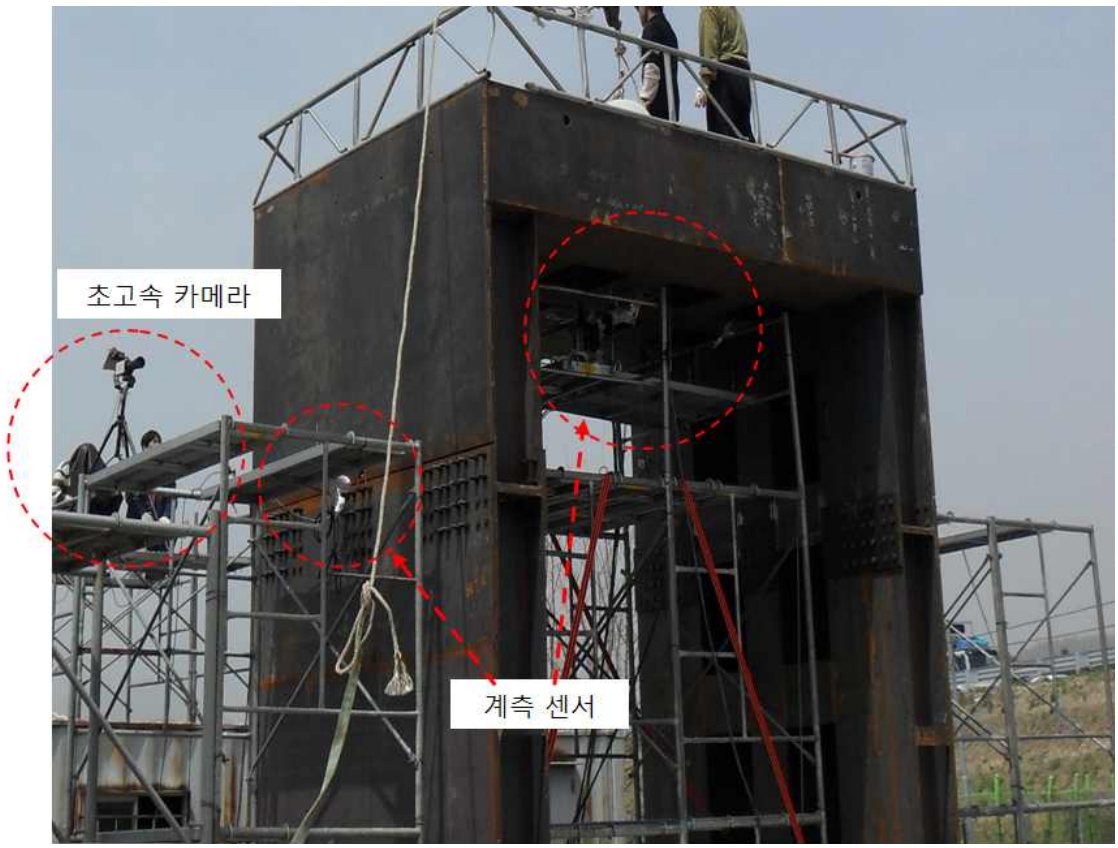
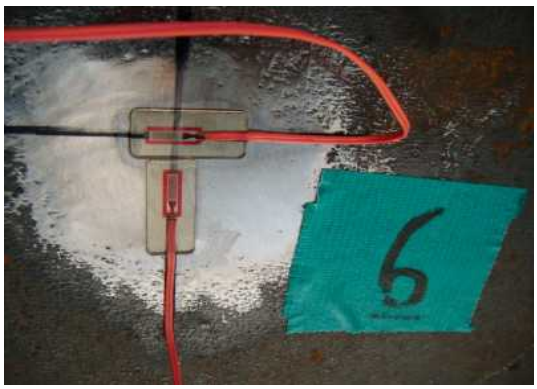


그림 3.79 계측기 설치전경

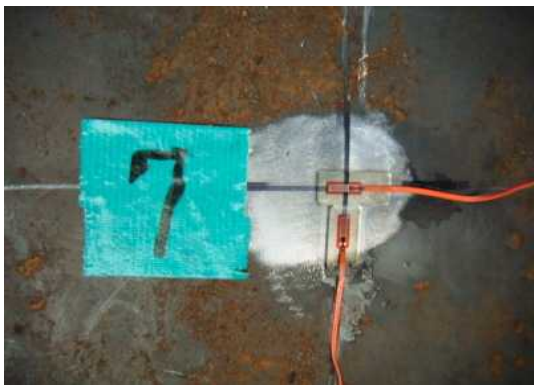
표 3.51 계측기 설치상세(1)

					
프로텍터 충격실험	센서설치	카메라 변위 지그	프로텍터 충격실험	센서설치	가속도계 지그
					
프로텍터 충격실험	센서설치	마킹 및 그라인딩	프로텍터 충격실험	센서설치	그라인딩 완료
					
프로텍터 충격실험	센서설치	표면 세척	프로텍터 충격실험	센서설치	X축 설치

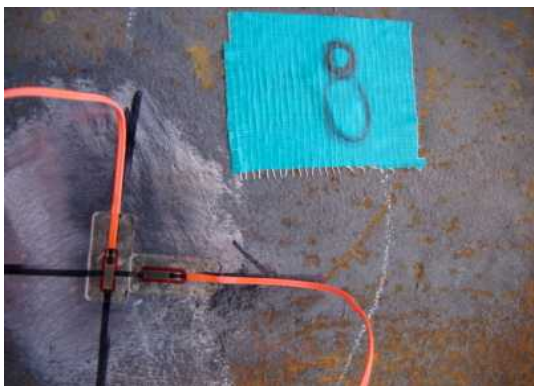
표 3.52 계측기 설치상세(2)



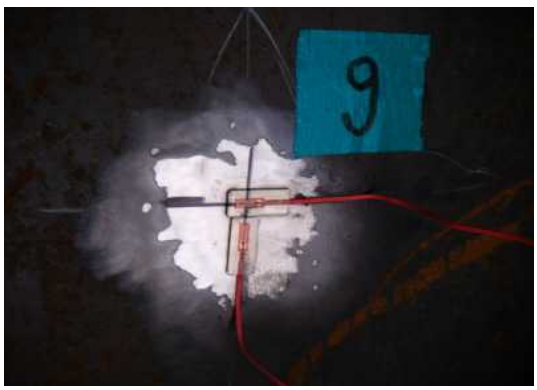
프로텍터 충격실험	센서설치	위치 ⑥



프로텍터 충격실험	센서설치	위치 ⑦



프로텍터 충격실험	센서설치	위치 ⑧



프로텍터 충격실험	센서설치	위치 ⑨



프로텍터 충격실험	센서설치	위치 ⑩



프로텍터 충격실험	센서설치	위치 ⑫

표 3.53 계측기 설치상세(3)





프로텍터 충격실험	센서설치	위치 ⑪	프로텍터 충격실험	센서설치	위치 ⑬





프로텍터 충격실험	센서설치	센서 코팅	프로텍터 충격실험	센서설치	센서 코팅





프로텍터 충격실험	센서설치	마커 ⑧	프로텍터 충격실험	센서설치	마커 ②

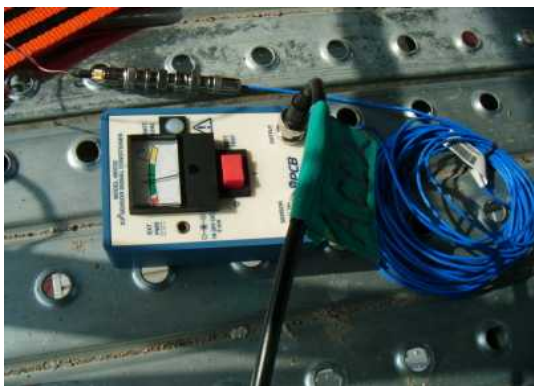
표 3.54 계측기 설치상세(4)



프로텍터 충격실험	센서설치	가속도계 ⑧



프로텍터 충격실험	센서설치	가속도계 ②



프로텍터 충격실험	센서설치	가속도계 amp



프로텍터 충격실험	센서설치	하부 변위계



프로텍터 충격실험	센서설치	측면 변위계



프로텍터 충격실험	센서설치	수직 하중계

표 3.55 계측기 설치상세(5)



프로텍터 충격실험	센서설치	수평 하중계



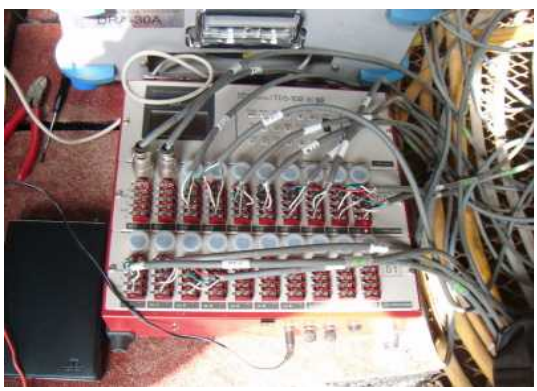
프로텍터 충격실험	센서설치	화강암 타격 추



프로텍터 충격실험	센서설치	초고속 카메라



프로텍터 충격실험	센서설치	카메라 설치위치



프로텍터 충격실험	센서설치	데이터 로거



프로텍터 충격실험	센서설치	계측기 구성

다. 실대형 충격실험

발파 버력 충돌 시 프로텍터에 작용하는 충격하중 및 프로텍터의 거동을 분석하기 위하여 실대형 충격실험을 실시하였으며 실험조건은 표 3.55와 같다.

표 3.56 실대형 실험조건

구분	설명
낙석	직경 50cm 포천화강암 비중 : 2.72 ton/m^3 Poison ratio : 0.18 Young's modulus : 42.27 GPa
낙하지점	Beam 1개소와 Plate 1개소(계측기설치도 참조)
낙하높이	1m ~ 6m

충격조건은 낙석이 프로텍터에 직접적으로 충돌할 때와 충격저감재로서 탄성매트를 설치하였을 때의 두 가지 조건에 대해 실험을 수행하였으며 설치된 탄성매트의 두께는 21.5cm로 충돌 수치해석상 낙석의 낙하높이가 6m일 경우 프로텍터에 소성변위가 발생하지 않을 조건이다.

낙석을 정위치에 낙하시키고 충돌 후 낙석이 주변으로 떨어지는 것을 방지하기 위하여 특별히 제작된 낙하장치와 로프를 사용하여 낙하실험을 수행하였다. 낙석 낙하장치는 낙석을 거는 훅과 쐐기로 구성되어 있으며 낙석 훅은 크레인의 주 훅과 연결되며 쐐기는 보조훅과 연결되어 쐐기를 끼운 상태에서 소정의 낙하높이까지 들어올린 후 보조훅을 당기면 쐐기가 빠져 낙석이 낙하하게 되며 쐐기를 빼는 과정에서 거의 흔들림이 없어 낙석의 정위치 낙하가 가능하였다. 또한 로프를 이용하여 낙석이 바람에 흔들리는 영향을 최소화하였으며 충돌 후 낙석이 프로텍터 하부로 떨어지지 않도록 낙하높이별로 낙석고정용 로프를 조정하여 낙석과 크레인 주 훅과 연결한 후 실험을 실시하였다. 낙석낙하장치 및 로프연결 상세를 그림 3.80에 나타내었다.



(a) 낙석 낙하장치 (b) 정위치 타격 및 낙석 고정 로프

그림 3.80 낙하장치 및 정위치 타격을 위한 로프구성

충격실험의 순서는 프로텍터 상부에서 낙석을 매단 후 낙석고정용 로프를 설치한다. 그 후 낙석을 약간 들어올려 타격위치를 조정한 상태에서 하부에 위치 측정을 위한 페인트를 칠한 후 낙하높이까지 들어올린다. 낙석을 목표높이에 들어올린 다음에는 정위치타격을 위해 대칭형태의 로프를 설치한 후 크레인 보조 훅에 의해 쐐기를 빼어 낙석을 낙하시킨다. 낙석이 낙하된 후에는 낙하지점을 마킹하고 다음 실험을 준비한다. 실험순서도를 표 3.56에 나타내었다.

표 3.57 낙석 충격실험 순서도

	
① 낙석 달기 및 로프 정비	② 낙석하부 페인팅 및 낙하높이 조절
	
③ 낙석 정위치	④ 낙석 낙하-1
	
④ 낙석 낙하-2	⑤ 낙하지점 마킹

라. 계측결과분석

(1) 계측이력

실험은 경기도 이천시에 위치하고 있는 대원토질(주)의 대형 토질실험동 옥외에서 수행하였다. 실험 이력은 Test Case (TC)별로 시간에 따라 기록하였으며, 타격 위치는 Beam과 Plate에서 벗어난 위치를 방향별로 표시하였다. 표 3.57은 충격실험의 계측 이력을 보여주고

있으며, 그림 3.81은 낙하 추의 실제 타격위치를 나타내고 있다.

표 3.58 실험 이력 및 조건

Test Case	측정 시간	타격 위치(cm)	낙하 추의 낙하 높이	탄성 매트
TC 1	2011-05-02 13:24	Beam-W16S10	3m	3 layer (22.5cm)
TC 2	2011-05-02 13:36	Beam	3m	3 layer (22.5cm)
TC 3	2011-05-02 13:50	Beam-W15S7	6m	3 layer (22.5cm)
TC 4	2011-05-02 14:09	Beam	6m	3 layer (22.5cm)
TC 5	2011-05-02 14:28	Plate-W27S13	3m	3 layer (22.5cm)
TC 6	2011-05-02 14:46	Plate-W16S13	3m	3 layer (22.5cm)
TC 7	2011-05-02 15:00	Plate-W2N7	6m	3 layer (22.5cm)
TC 8	2011-05-02 15:19	Plate-W2N7	6m	3 layer (22.5cm)
TC 9	2011-05-03 10:56	Beam-E23N10	6m	-
TC 10	2011-05-03 11:12	Beam-E27N4	6m	-
TC 11	2011-05-03 11:25	Beam-W16	6m	-
TC 12	2011-05-03 11:51	Plate-E30N13	6m	-
TC 13	2011-05-03 13:18	Plate-E7N10	3m	-
TC 14	2011-05-03 13:35	Beam-E10N12	3m	-
TC 15	2011-09-02 16:01	Beam-E13N5	3m	2 layer (15cm)
TC 16	2011-09-02 16:13	Beam-E13N5	6m	2 layer (15cm)
TC 17	2011-09-02 17:03	Beam	1m	-
TC 18	2011-09-03 10:25	Beam-E5N8	1m	-
TC 19	2011-09-03 14:10	측면 타격	수평 4.1m 수직 1.4m	-

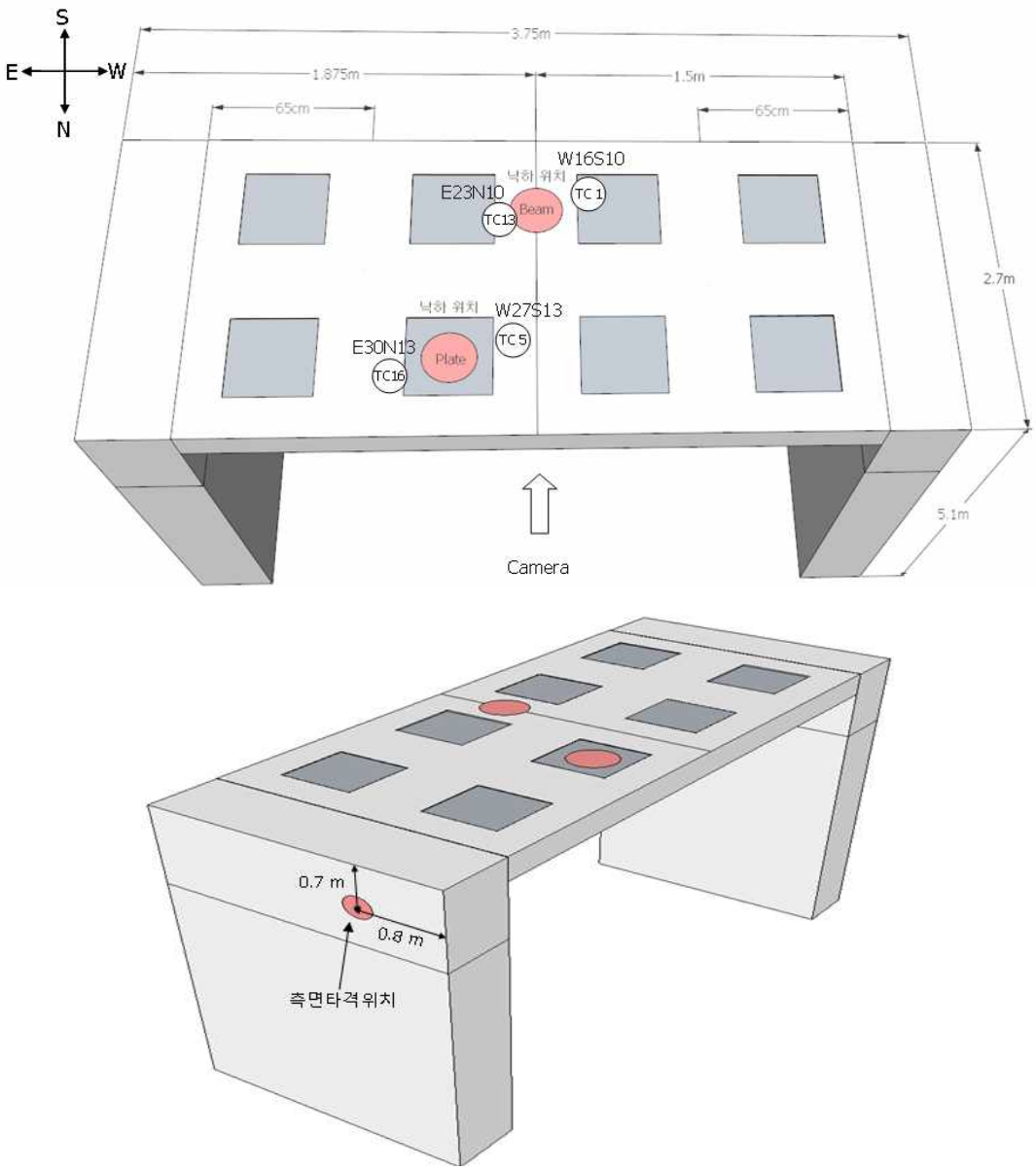


그림 3.81 낙하추의 타격위치

(2) 정적계측결과

본 과업에서 변위는 타격 후 정적 데이터로거를 통하여 최종 잔류 변위만을 측정하였으며, Test Case(TC)와 위치별로 표 3.58에 나타내었다. 실험 결과 탄성매트가 설치되어 있는 경우에는 변위가 매우 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, TC17~TC18은 추의 낙하 높이가 1m로 매우 낮아 큰 변형을 일으키지 않았다. 그러나, 탄성매트를 제거하고 추를 6m 높이에서 낙하시킨 TC9 ~ TC10의 경우 ⑨번 지점에서 각각 3.22mm와 2.57mm의 상대적으로 큰 변형을 일으키는 것으로 나타났다. 그림 3.82는 정적 데이터 계측 위치를 나타내고 있다.

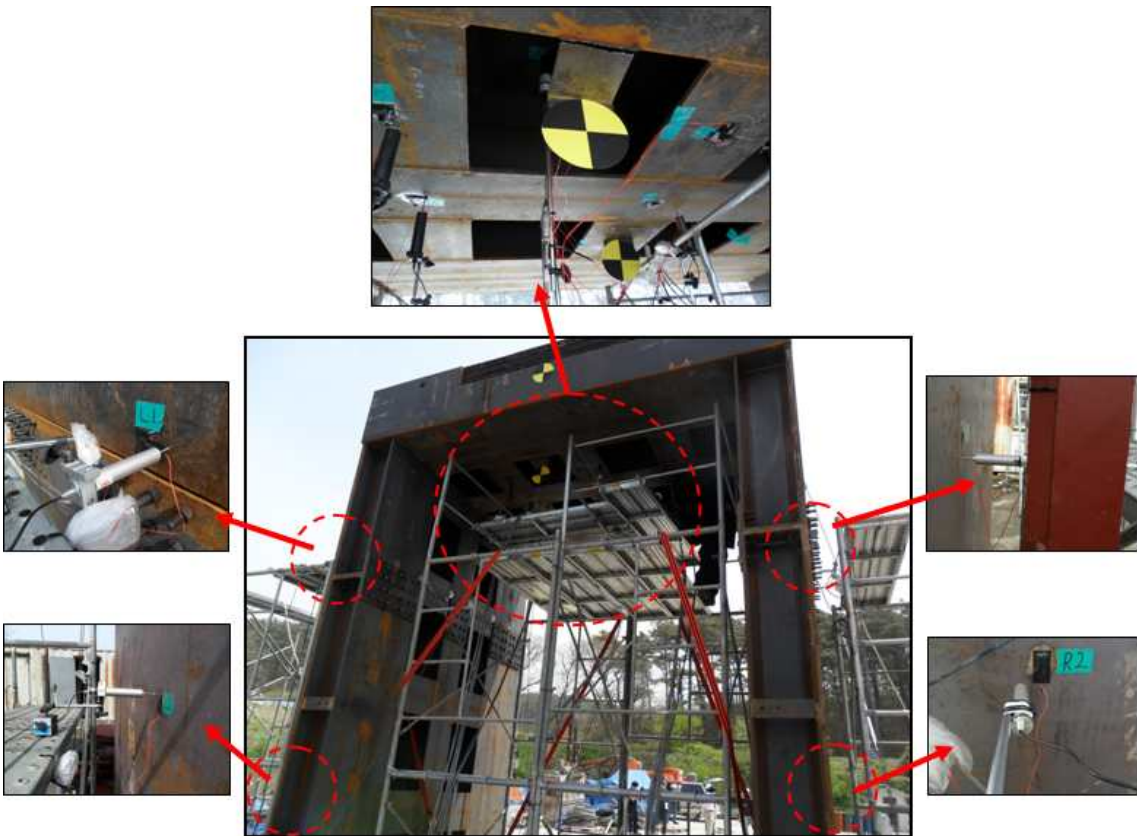


그림 3.82 최종잔류변위 계측위치

표 3.59 최종잔류변위 계측결과 (단위 : mm)

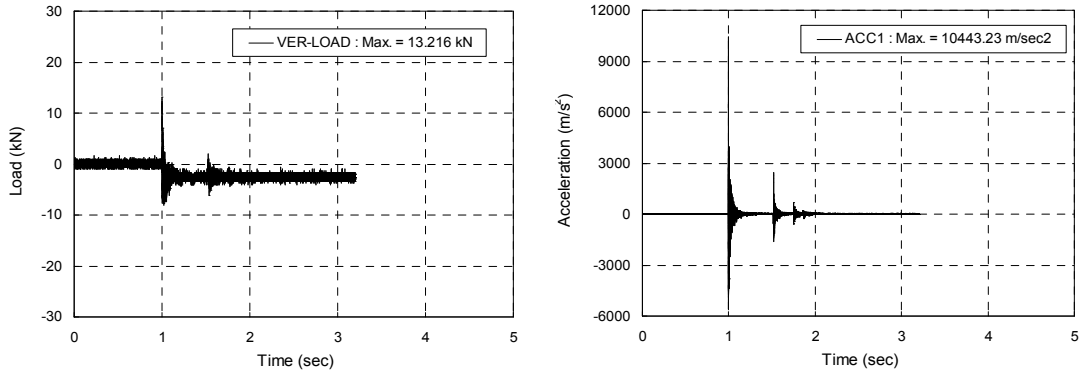
위치		TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC9	TC10	TC11	TC12	TC13	TC14	TC15	TC16	TC17	TC18	TC19
상부 변위	①	-0.03	0	-0.06	-0.06	-0.04	-0.02	-0.05	-0.18	-0.02	-0.01	-0.06	0.01	-0.02	-0.09	-0.11	-0.03	-0.2	-
	②	-0.03	0	-0.06	-0.1	-0.04	-0.04	-0.14	-0.08	0.06	-0.04	-0.16	0.02	0.04	-0.1	-0.08	-0.04	-0.19	-
	③	-0.08	-0.04	-0.07	-0.18	-0.02	0	-0.06	-0.14	-0.01	0.01	-0.14	0.01	0.1	-0.14	-0.08	-0.04	-0.14	-
	④	-0.23	-0.04	-0.06	-0.16	-0.05	0	-0.05	-0.27	-0.19	-0.02	-0.18	-0.02	-0.13	-0.21	-0.1	0.25	-0.09	-
	⑤	-0.07	0	-0.07	-0.12	-0.05	-0.01	-0.02	-0.31	-0.06	-0.15	-0.03	-0.01	0.03	-0.08	-0.09	0.01	-0.18	-
	⑥	-0.03	0	-0.04	-0.09	-0.02	0	-0.03	-0.27	0.02	-0.08	-0.07	0	0.03	-0.08	-0.13	-0.02	-0.12	-
	⑦	-0.07	0.03	-0.11	-0.14	-0.04	-0.01	0	0.11	-0.06	-	-	-	-	-0.07	-0.11	0.01	-0.22	-
	⑧	-0.07	-0.02	-0.06	-0.1	-0.05	0	-0.01	-0.19	-0.05	0.18	0.08	0	0.04	-0.05	-0.13	0.07	0.1	-
	⑨	0.02	0	-0.04	-0.06	-0.03	-0.01	-0.03	-3.22	-2.57	0.77	0.22	0.22	-0.22	-0.04	-0.08	0	0	-
측면 변위	⑩	0.04	0.03	0.04	0.01	-0.04	-0.07	-0.02	0.06	0.05	0.09	0	-0.03	-0.03	-0.18	-0.28	0	0.01	-
	⑫	0.06	0.05	0.05	0.02	-0.01	-0.04	-0.04	-0.03	-0.05	0.02	-0.07	0.04	0.07	-0.09	-0.07	0.04	-0.06	-
	⑪	-0.04	-0.03	-0.09	-0.05	0	-0.06	-0.16	-0.23	-0.54	-0.42	-0.38	-0.18	-0.05	0.02	-0.07	0.02	-0.03	0.54
	⑬	-0.05	-0.03	-0.05	-0.07	-0.01	-0.03	-0.05	0.07	-0.1	-0.13	0.07	0.32	0.15	0	-0.01	0	0.14	0.46

(3) 동적계측결과

가속도, 하중, 변형률은 충격 하중을 가한 후 동적 데이터로거를 통하여 시간에 따른 거동을 확인하였다. 표 3.59는 추의 타격 후 프로텍터의 하부에 설치한 하중계와 추의 타격 위치인 ②, ⑧ 위치의 하부에 설치한 가속도의 계측 결과이다. 최대수직하중은 TC12에서 약 13.2kN으로 측정되었으며, 최대수평하중은 TC10~TC11에서 약 14kN으로 측정되었다. 최대가속도는 최대수직하중이 발생한 TC12에서 약 10,443 m/sec^{2}으로 측정되었다. 가속도의 경우 탄성매트가 설치된 경우 200m/sec^{2}을 넘지 못하는 것으로 나타났다. 그러나, 탄성매트가 제거된 경우에는 약 1,608~10,443m/sec^{2}의 범위를 갖는 것으로 나타나 탄성매트에 의한 에너지 흡수가 매우 큰 것으로 계측되었다.

표 3.60 충격하중과 가속도 계측결과

위치		TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC9	TC10	TC11	TC12	TC13	TC14	TC15	TC16	TC17	TC18	TC19
하중 (kN)	VER	1.355	1.355	1.694	3.049	1.355	1.694	2.033	11.860	6.777	8.810	13.216	8.472	9.827	2.711	3.727	5.083	5.422	5.422
	HOR	1.165	1.398	3.497	3.730	1.398	1.398	2.564	9.325	13.988	13.988	7.926	5.595	6.061	3.263	5.828	6.994	9.092	3.030
가속도 (㎨)	ACC1 ②	18.91	18.91	37.83	37.83	56.75	75.67	132.43	4654	3991	3859.45	10443	9970.26	2799.99	56.75	132.43	2251.34	1608.10	756.75
	ACC2 ⑧	42.98	42.98	42.98	64.47	42.98	42.98	42.98	6167.75	3760.82	4942.79	1697.74	1074.52	5673.47	85.96	193.41	4727.89	4083.17	429.80



(a) 수직하중 (b) ②번 위치에서 측정된 가속도

그림 3.83 TC12의 수직하중 및 가속도 계측 결과

변형률 계측값도 앞의 가속도 결과와 유사한 경향으로 계측되었다. 탄성매트가 설치된 경우에는 최대 335με으로 측정되었으나, 탄성매트가 없는 경우에는 변형률이 748~5120με으로 계측되었다. 탄성 매트가 설치된 경우 Test Case별 최대변형률은 ②-Y, ⑤-X, ⑦-Y 위치에서 계측되었으나, 탄성매트 제거 후 최대변형률 ②-Y에서만 계측되는 것을 알 수 있다. 이러한 계측 결과는 충격하중에 의해 ②-Y가 손상을 입어 소성거동을 하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 탄성매트가 제거된 후 타격위치에 따른 변형률을 보면 Beam에 타격하였을 경우에는 타격위치 주변 계측기에서도 변형률이 상대적으로 크게 측정되지만 Plate에 타격했을 경우에는 크게 발생되지 않는 것을 알 수 있다. 이는 Beam보다 Plate가 강성이 약하여 변형이 발생되므로 그로 인해 충격에너지를 흡수하기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 전체 변형률 발생경향을 보았을 때 Beam과 Plate 어느 부분을 타격하더라도 충격에 의한 영향은 타격위치에 국한되는 것을 볼 수 있는데 이는 충격하중이 매우 짧은 시간에 발생하여 소산되기 때문인 것으로 판단되며 충격하중이 프로텍터 전체의 거동에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

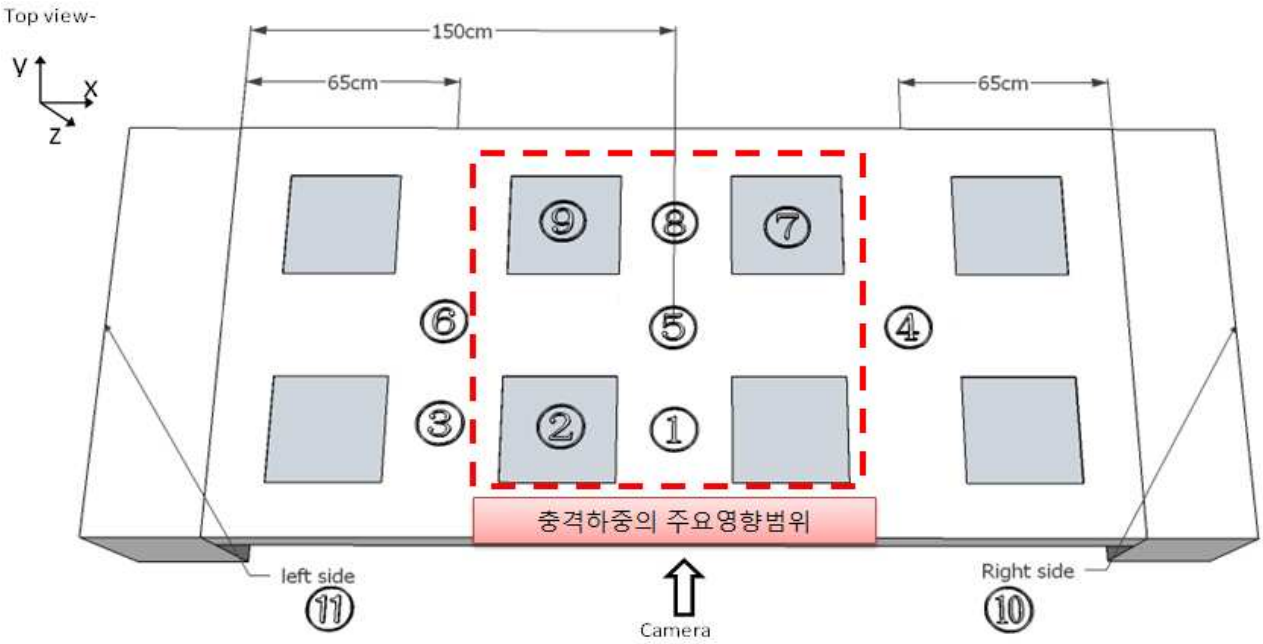


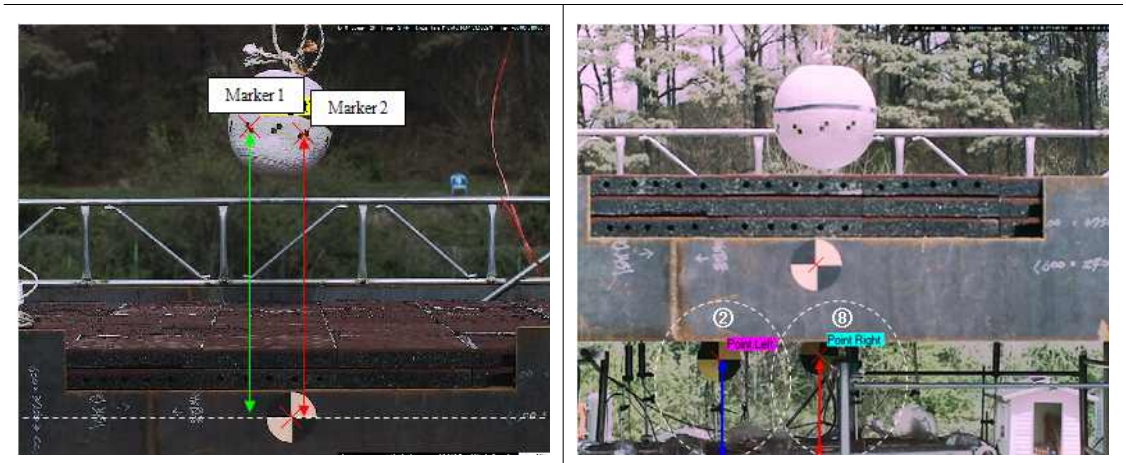
그림 3.84 프로텍터의 주요영향범위

표 3.61 변형률 계측결과(단위:με)

위치		TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC9	TC10	TC11	TC12	TC13	TC14	TC15	TC16	TC17	TC18	TC19
상부 변형률 (με)	①-X	2.85	4.76	-9.52	6.66	-21.90	-20.00	-19.04	182.86	195.24	129.52	291.43	251.43	138.09	7.61	-16.19	151.43	128.57	-52.38
	①-Y	4.76	4.76	-12.38	30.47	46.66	32.38	55.23	-81.90	-84.76	-89.52	188.57	112.38	-57.14	20.00	39.04	-83.81	-59.04	-15.23
	②-X	-4.76	-10.47	-10.47	-20.95	-12.38	261.91	288.57	-222.86	-230.48	112.38	277.14	539.05	-156.19	-20.00	-28.57	-50.47	67.62	24.76
	②-Y	4.76	-3.80	-8.57	3.80	135.24	335.24	318.10	-3429.59	-3544.83	-2421.00	-3100.06	-5120.10	-3374.35	-6.66	-8.57	-1317.16	-748.58	-1072.40
	③-X	3.80	3.80	-7.61	-6.66	-9.52	-14.28	-45.71	-160.95	184.76	164.76	-558.10	-291.43	156.19	-7.61	11.42	-89.52	95.24	58.09
	③-Y	5.71	3.80	-6.66	5.71	11.42	22.85	73.33	29.52	-66.66	60.95	147.62	100.00	43.81	7.61	12.38	59.04	42.85	23.81
	④-X	34.28	22.85	55.23	39.04	13.33	14.28	22.85	215.24	237.14	260.00	238.10	196.19	190.48	28.57	65.71	175.24	141.90	-24.76
	④-Y	5.71	-4.76	-7.61	-8.57	-5.71	-4.76	-11.42	-94.28	-94.28	-105.71	-222.86	-151.43	-86.66	9.52	-17.14	59.04	-67.62	23.81
	⑤-X	69.52	80.95	130.47	149.52	63.81	46.66	70.47	424.77	399.05	398.10	287.62	244.76	353.34	132.38	247.62	307.62	297.14	-26.66
	⑤-Y	-59.04	-75.23	-115.24	-140.0	21.90	16.19	12.38	-428.58	-390.48	-446.67	-134.28	-108.57	-464.77	-125.71	-235.24	-391.43	-420.00	24.76
	⑥-X	14.28	17.14	28.57	36.19	18.09	29.52	93.33	212.38	235.24	199.05	399.05	216.19	209.52	28.57	61.90	130.47	169.52	-62.85
	⑥-Y	-6.66	-7.61	-8.57	-14.28	9.52	9.52	-11.42	-203.81	-207.62	139.05	-245.71	-100.00	-160.95	-9.52	-24.76	-85.71	-127.62	-20.95
	⑦-X	110.47	32.38	134.28	130.47	-9.52	-6.66	-11.42	216.19	211.43	-502.86	-148.57	-99.04	181.90	-50.47	-86.66	-192.38	-157.14	22.85
	⑦-Y	136.19	75.23	303.81	139.05	3.80	4.76	4.76	-269.52	-206.67	665.72	140.00	-149.52	-195.24	35.23	127.62	115.24	103.81	-20.95
	⑧-X	-16.19	-21.90	-32.38	-46.66	-4.76	-3.80	5.71	-365.72	-275.24	-268.57	-140.95	-146.66	-437.15	-40.00	-74.28	-580.96	-469.53	33.33
	⑧-Y	41.90	52.38	79.04	107.62	3.80	3.80	-6.66	279.05	199.05	294.29	-83.81	-85.71	393.34	84.76	152.38	304.76	374.29	12.38
	⑨-X	-16.19	-29.52	-31.42	-42.85	-21.90	-26.66	-34.28	-934.30	851.44	241.90	-159.05	-140.00	-528.58	-45.71	-55.23	-186.67	-285.72	-38.06
	⑨-Y	-7.61	25.51	-11.42	53.33	3.80	5.71	7.61	2221.94	1435.26	196.19	147.62	204.76	806.68	60.95	29.52	154.28	209.52	-33.33
측면 변형률 (με)	⑩-Y	-3.80	5.71	5.71	4.76	-3.80	3.80	4.76	37.14	31.42	45.71	-33.33	27.61	25.71	-3.80	8.57	18.09	18.09	-10.47
	⑩-Z	3.80	5.71	-7.61	-4.76	-3.80	3.80	5.71	39.04	32.38	-31.42	-32.38	-31.42	-26.66	-5.71	4.76	20.95	17.14	-13.33
	⑫-Z	-3.80	-4.76	2.85	-4.76	3.80	3.80	5.71	25.71	26.66	28.57	26.66	20.95	21.90	-6.66	6.66	-16.19	20.00	-7.61
	⑪-Y	-3.80	3.80	3.80	5.71	4.76	5.71	11.42	73.33	-77.14	-82.85	70.47	49.52	-95.24	-6.66	-11.42	-53.33	-51.42	-291.43
	⑪-Z	-3.80	2.85	4.76	4.76	3.80	-3.80	4.76	-33.33	-33.33	28.57	-40.95	-24.76	-36.19	4.76	5.71	12.38	16.19	-104.76
	⑬-Z	-3.80	-3.80	4.76	7.61	4.76	4.76	5.71	-25.71	23.81	21.90	24.76	20.95	-22.85	4.76	-7.61	13.33	13.33	45.71

(4) 초고속카메라계측결과

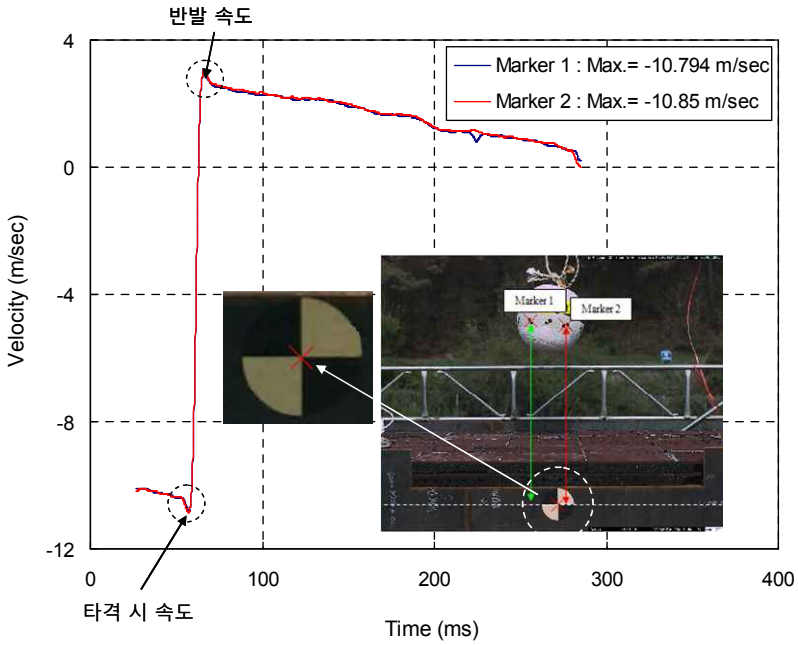
녹화속도 1000fps의 초고속 카메라를 이용하여 타격 추의 낙하속도 및 프로텍터 하부의 동적변위를 계측하였다. 아래 그림은 초고속 카메라에 의한 계측 전경으로 타격 추의 속도는 타격 추에 부착된 마커와 프로텍터의 중앙에 부착된 마커의 시간에 따른 연직거리차로부터 확인하였으며 프로텍터의 동적변위는 추가 낙하되는 Beam과 Plate 하부 지점에 설치된 마커와 초고속 카메라 화상 하부와의 연직거리차로부터 확인하였다.



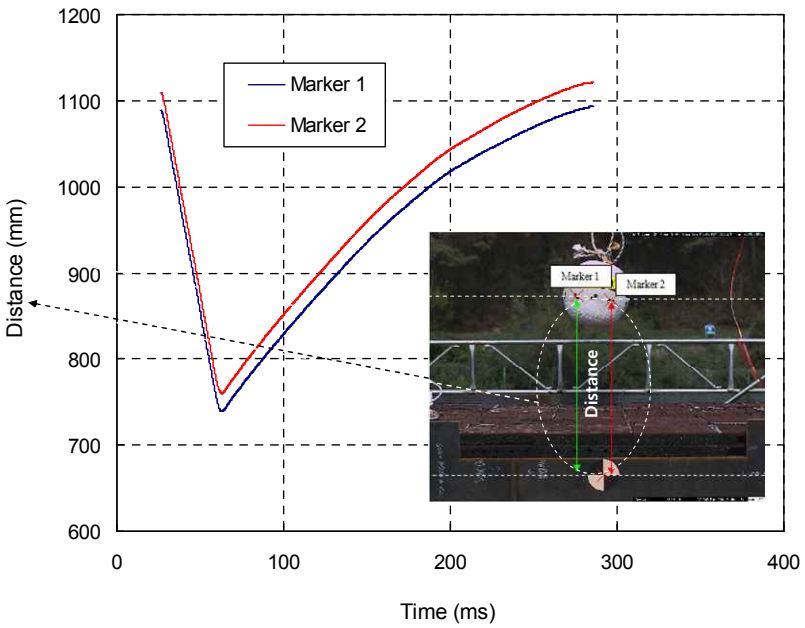
(a) 추의 낙하 속도 | (b) 프로텍터의 하부 동적변위

그림 3.85 초고속 카메라에 의한 계측

그림 3.86는 TC12에서의 추의 낙하 속도와 추의 위치를 나타낸 것이다. 낙하 속도는 이미 알고 있는 길이(ex: 추의 직경(50cm))로부터 비례식에 의해 화상 1프레임의 길이를 유추하여 추에 부착한 마커의 시간에 따른 이동거리로 부터 추의 낙하 속도를 계산하며 시간에 따른 타격 추의 위치로 프로텍터에 부착한 타겟과 추에 부착해 놓은 2개의 마커와의 거리(Distance)를 나타낸 것이다.



(a) 추의 낙하 속도



(b) 시간에 따른 추의 위치

그림 3.86 초고속 카메라에 의한 추의 낙하 속도 계측 결과 (TC12)

그림 3.87는 TC5에서의 초고속 카메라에 의한 프로텍터의 동적변위를 나타낸 것이다. 동적변위는 그림에서 나타난 것과 같이 추의 낙하지점인 Beam과 Plate 하부에 부착된 타겟의 시간에 따른 거동을 나타낸 것이다.

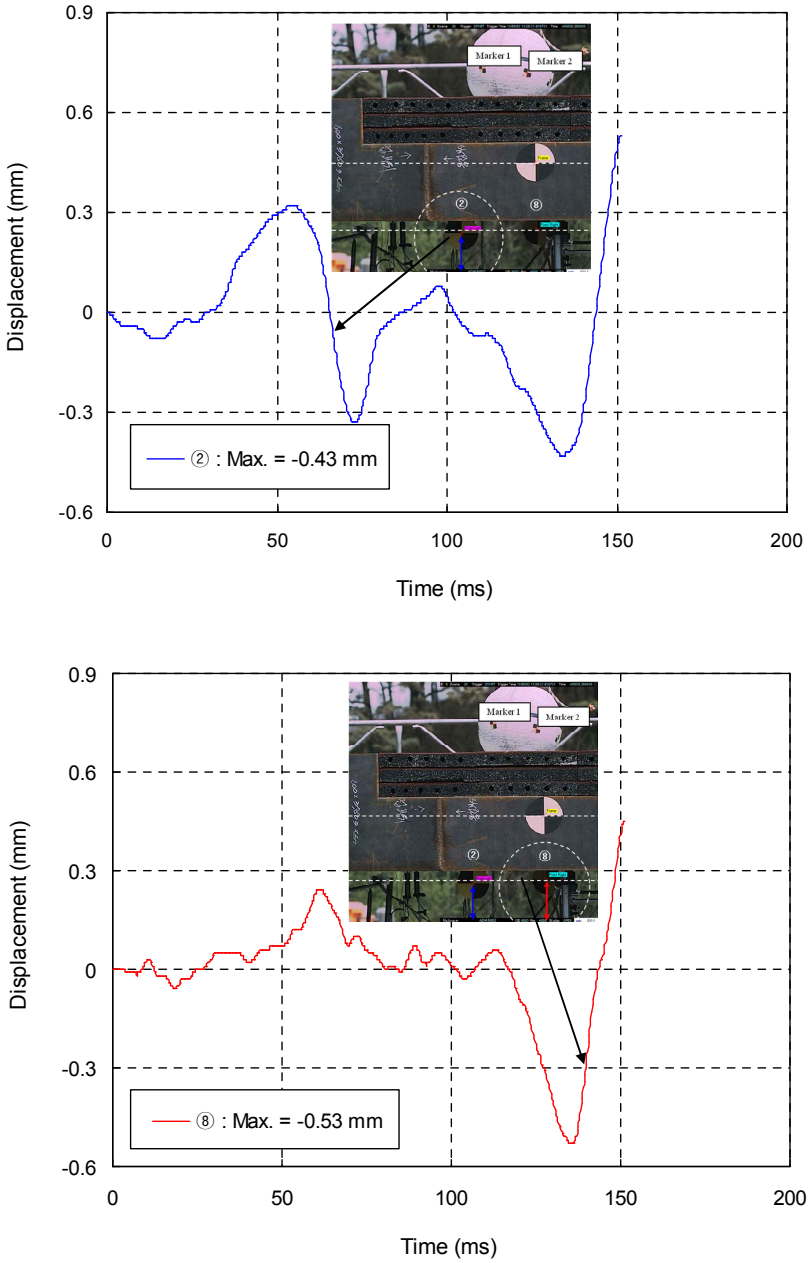


그림 3.87 초고속 카메라에 의한 동적 변위 계측 결과 (TC5)

표 3.62 초고속 카메라에 의한 계측 결과

new 위치		TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9	TC10	TC11	TC12	TC13	TC14	TC15	TC16	TC17	TC18
추의 타격 시 속도 (m/sec)	Maker 1	-7.1946	-10.794	-	-7.5688	-7.8414	-10.939	-10.887	-11.346	-11.402	-11.047	-10.794	-8.0923	-8.0047	-7.8784	-11.08	-4.5804	-4.5396
	Maker 2	-7.2011	-10.766	-	-7.6383	-7.7752	-11.047	-11.101	-11.512	-11.441	-11.115	-10.85	-7.9117	-8.037	-7.9135	-11.075	-4.6112	-4.5981
추의 반발 속도 (m/sec)	Maker 1	4.3715	5.8969	-	4.3094	4.6823	6.0915	6.2647	4.1772	4.3065	3.9353	3.0219	2.6732	2.5594	4.2817	5.1446	1.4786	1.6576
	Maker 2	4.1969	6.0388	-	4.1711	4.5197	5.9054	6.2546	4.5659	4.4091	3.7662	3.0597	2.9337	2.9365	4.2753	5.5338	1.4294	1.7484
최대 변위 (mm)	②			-0.38	-0.43													
	⑧			-0.55	-0.53													

계측 결과 추의 타격 시 속도는 약 4.54~11.51m/sec로 계측되었으며, 높이에 따라 높이 1m의 경우 약 4.54~4.61m/sec이고, 높이 3m의 경우에는 약 7.19~8.09m/sec, 높이 6m의 경우에는 약 10.77~11.51m/sec로 측정되었다. 이러한 결과는 하중단계별 낙하높이와 탄성매트의 유·무, 풍향·풍속, 실험오차 등의 영향으로 다소 차이를 보이기 때문이다.

추의 반발속도는 탄성매트가 설치된 경우 탄성매트가 없는 경우에 비해 상대적으로 빠른 것으로 나타났다. 높이 6m에서 자유낙하를 시켰을 때 추의 반발속도는 탄성매트가 설치된 경우(TC8)에는 약 6.26m/sec의 속도를 계측되었으며, 탄성매트가 없는 경우(TC12)에는 약 3.06m/sec의 속도로 계측되었다. 높이 3m에서 자유낙하를 시켰을 때 추의 반발속도는 탄성매트가 설치된 경우(TC6)에는 약 4.68m/sec의 속도이며, 탄성매트가 없는 경우(TC13)에는 약 2.93m/sec의 속도로 탄성매트가 설치된 경우 반발속도가 크게 계측되었다.

최대변위 계측결과 TC4와 TC5에서 측정된 순간 최대변위는 ⑧번 위치에서의 변위가 ②번 위치에 비해 상대적으로 크게 발생하였다. 이러한 계측결과는 TC4와 TC5의 타격 지점이 ⑧ 위치이기 때문에 상대적으로 큰 변형을 나타낸 것이다. 그러나, 탄성매트가 설치된 경우 낙하높이에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이는 탄성매트가 충격에너지를 대부분 흡수하기 때문인 것으로 판단된다.

5. 프로텍터 충격하중 및 안정성 해석

프로텍터에 작용하는 하중은 크게 정하중과 동하중으로 나눌 수 있으며 정하중에는 천공, 숏크리트 및 록볼트 타설 장비에 의한 하중과 굴착된 버력에 의한 적재하중이 있으며 발파굴착을 가정하면 동하중에는 발파 시 비산석에 의한 충격하중이 있다. 여기서 장비하중과 버력의 적재하중은 장비나 확대면적을 통해 쉽게 산정이 가능하나 충격하중은 버력의 크기와 재료거동특성 및 발파 시 가스압과 충격압에 의해 비산석이 갖는 초기속도 등 여러 가지 요인에 의해 변화되므로 산정이 용이하지 않다. 국외 사례를 보면 터널확대굴착 시 기계에 의한 굴착이 대부분이나 국내의 경우 공기, 경제성, 발파 굴착에 대한 노하우 등을 고려하면 발파굴착이 효과적일 것으로 예상된다. 따라서 국내에서 차량 흐름을 유지한 채 터널을 확대시공하는 공법을 적용하기 위해서는 발파 시 비산석의 충격하중에 대한 연구가 필요하다.

백(2011)은 버력을 완전탄성체로 가정하였을 때 프로텍터에 가해지는 충격하중에 관한 이론해로부터 충격저감재의 효과 및 충격하중에 관한 연구를 수행하였다. 여기서 버력의 충격하중은 버력과 프로텍터의 등가탄성계수, 버력의 무게, 단위중량 및 낙하높이의 함수이며 발파 시 가스압과 충격압에 의해 버력이 갖는 초기속도를 등가의 낙하높이로 환산하여 적용되었다. 하지만 대부분의 암반공학적 문제에서 암석은 탄소성재료로 가정하며, 탄소성재료는 탄성영역에서는 하중증가에 의해 변형이 발생되지만 탄성영역을 초과하여 소성영역에 들어가게 되면 하중의 증가 없이도 변형이 발생된다. 따라서 충격 발생 시 완전탄성체는 하중의 증가가 계속되지만 탄소성재료는 탄성영역에서만 하중의 증가가 이루어지므로 일반적으로 완전탄성체에 비해 탄소성재료의 충격하중이 더 적게 발생된다.

프로텍터의 효율적인 설계를 위해 발파 시 비산버력을 완전탄성체와 탄소성체로 가정하여 프로텍터에 미치는 충격하중을 이론해와 수치해석 값을 비교하여 평가하였다. 수치해석은 ABAQUS프로그램을 사용하여 동해석인 Explicit해석을 수행하였다.

발파에 의해 프로텍터에 가해지는 충돌하중은 발파시 발생되는 충격파와 가스압을 받은 버력이 아래 그림과 같이 높이 H에서 낙하할 때 프로텍터에 가하는 하중으로 생각할 수 있으며 순차적 발파로 인해 버력의 높이가 증가되지만 기존에 발파된 버력이 적재되어 있기 때문에 충격하중은 최초 발파 시 발생되는 버력에 의한 것이 가장 클 것으로 예상할 수 있다.

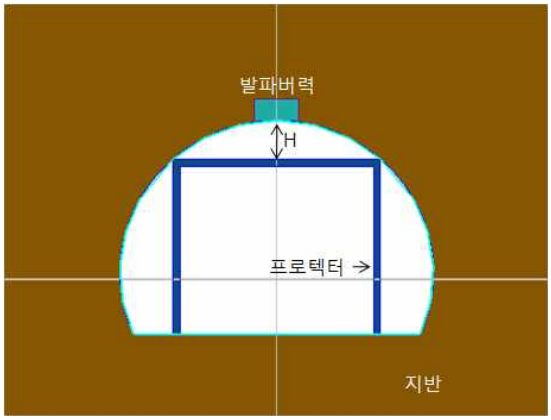


그림 3.88 기존터널 발파굴착 개요

백(2011)의 연구에서는 Hertz의 접촉이론과 뉴톤의 가속도법칙 및 에너지보존법칙을 적용하여 충격하중을 다음 식(1)과 같이 제시하였다.

$$F_{max} = 1.7672(E^*)^{2/5}(\gamma)^{-1/15}(W)^{2/3}(H)^{3/5} \quad (1)$$

여기서, γ : 버력의 단위중량(kgf/m^3)

W : 버력의 중량(kgf)

H : 낙하높이(m)

재료의 거동특성에 따른 충격하중의 특성을 분석하고 제안된 이론해와 비교분석하기 위해서 수치해석을 수행하였다. 사용된 프로그램은 충격문제를 해석할 수 있는 ABAQUS프로그램을 사용하여 동해석인 Explicit해석을 수행하였으며 버력의 낙하높이를 변화시키며 해석을 수행하였다. 버력은 완전탄성재료와 탄소성재료로 나누어 해석을 수행하였으며 프로텍터는 강체로 모델링하였다. 버력의 모양은 다양하지만 구체가 가장 안정적인 구조이므로 구체로 모델링하였다. 충돌 시 contact force를 측정하여 이를 충격하중으로 고려하였다.

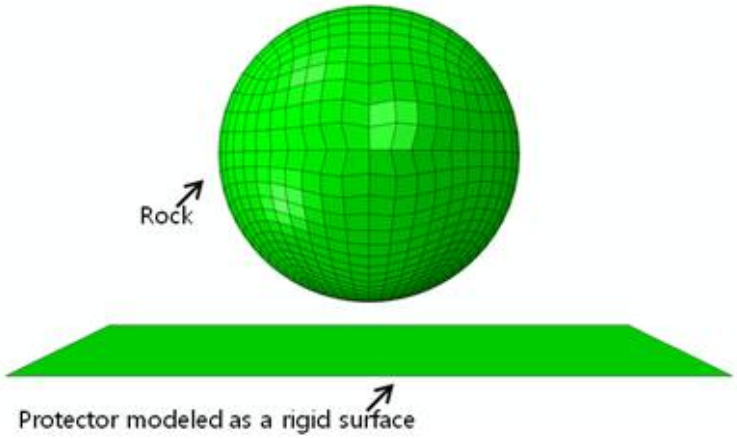


그림 3.89 해석모델

버력의 탄소성 거동은 Mohr-Coulomb모델을 적용하여 점착력과 마찰각을 고려하였다. 완전탄성체인 경우에는 탄소성재료와 탄성특성은 동일하고 점착력과 마찰각을 제외하였다. 3등급암반에서 발파하는 것으로 가정하였으며 기존의 터널 해석사례를 분석하여 버력의 물성을 적용하였다. 기존 터널 해석사례를 분석한 결과 밀도, 점착력, 마찰각 및 포아송비는 특정값이 높은 빈도로 사용되고 있어 이를 적용하였으나 탄성계수의 경우 암종에 따라 큰 차이를 보이고 있어 가장 빈도가 높은 5GPa과 가장 큰 값인 15GPa를 적용하여 해석을 수행하였다. 적용된 버력의 물성을 다음 표에 나타내었다.

표 3.63 버력의 재료물성

구분	완전탄성거동	탄소성거동
밀도(kg/m^3)	2500	2500
탄성계수(GPa)	5, 15	5, 15
점착력(MPa)	-	0.5
마찰각(°)	-	40
포아송비	0.25	0.25

이론해에서 충격하중은 버력의 무게, 탄성계수 및 낙하높이의 함수이므로 이를 변경시켜 여러 조건에 대해 해석을 수행하였다. 2차선 터널을 확대 시공하는 것으로 가정하였으며 터널 건축한계를 고려할 때 프로텍터의 내공단면은 폭 6m, 높이 4.5m가 된다. 따라서 발파가 없을

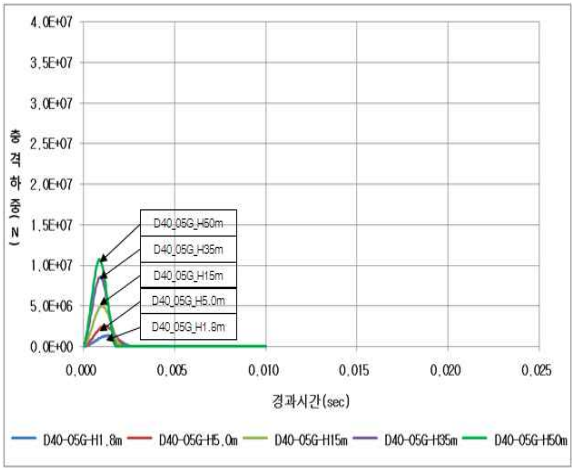
경우 버력의 높이는 터널 천단높이와 프로텍터 높이의 차이가 되며 약 1.8m이다. 또한 기존의 연구결과에 의하면 정상규모의 발파에서 비산석의 초기속도는 10~30m/s이다(대한주택공사연구처, 1993). 초속 30m/s는 에너지보존법칙에 의해 버력을 45.87m에서 자유 낙하시키는 것을 의미한다. 즉, 초기 버력의 위치에서 45.87m 상부에서 자유낙하시킬 경우 버력이 초기 위치를 통과할 때 30m/s의 속도를 가짐을 의미한다. 따라서 프로텍터에 작용하는 최대의 충격하중은 초기높이 1.8m에 45.87m를 합한 47.67m에서 버력이 자유낙하하여 프로텍터와 충돌할 때 발생한다.

본 해석에서는 발파 시 발생될 수 있는 모든 충돌상황을 포함하기 위해 최초 버력의 위치인 1.8m에서 50m까지 버력의 낙하높이를 변경시켜 해석을 수행하였다. 또한 해석의 효율성을 높이기 위해 낙하높이를 그대로 모델링하지 않고 프로텍터와 버력을 약간 띄운 상태에서 등가의 속도로 환산하여 이를 버력에 적용하였다. 낙하높이는 1.8m, 5m, 15m, 35m와 50m로 각 낙하높이에서 완전탄성체일 경우와 탄소성일경우로 구분하였으며 탄성계수를 5GPa와 15GPa로, 직경을 40cm, 50cm와 60cm로 모델링하여 총 60case에 대해 해석을 수행하였다(표 3.64 참조).

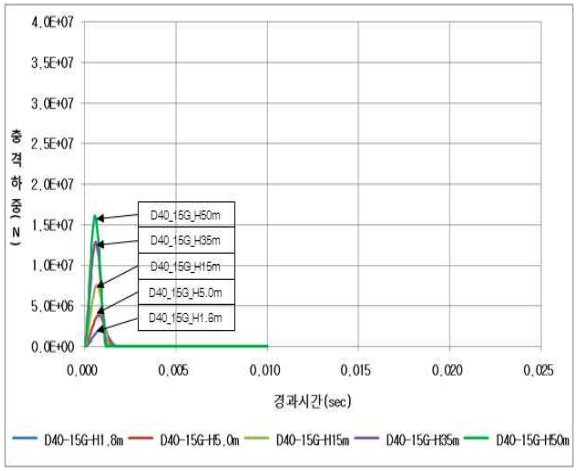
표 3.64 수치해석 케이스

해석변수	해석제원	
낙하높이	1.8m, 5m, 15m, 35m, 50m	5case
버력모델	완전탄성체, 탄소성체	2case
버력 탄성계수	5GPa, 15GPa	2case
버력직경	40cm, 50cm, 60cm	3case
합계		60case

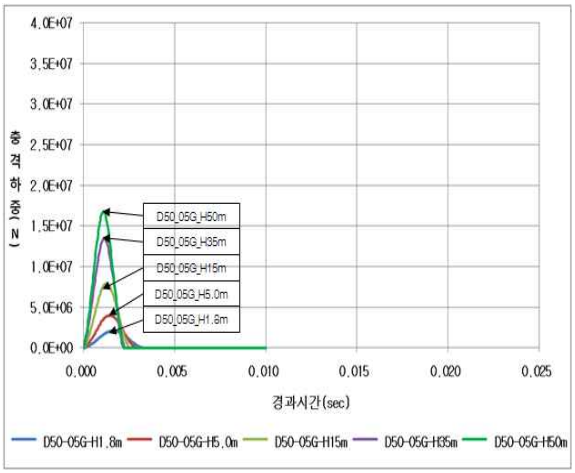
버력이 완전탄성거동을 할 경우 수치해석결과를 그림 3.91에 나타내었다.



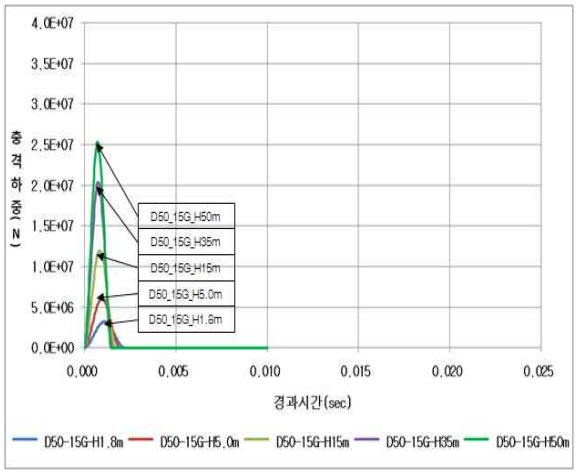
(a) 버력 직경 40cm, 탄성계수 5GPa



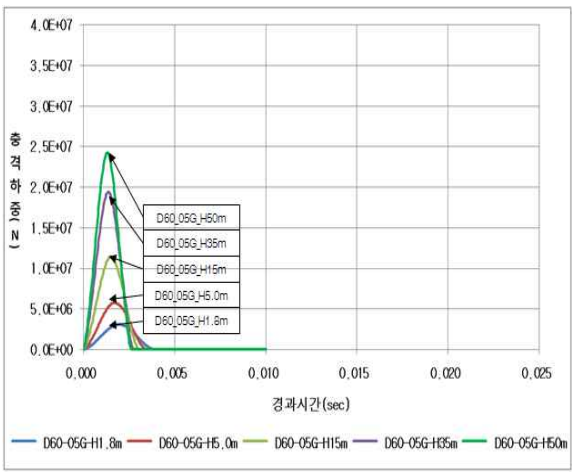
(b) 버력 직경 40cm, 탄성계수 15GPa



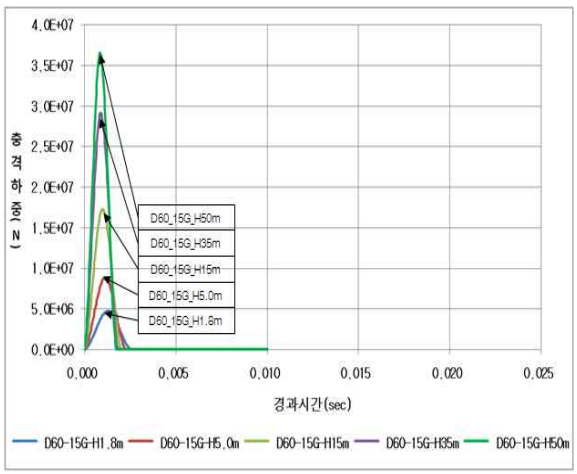
(c) 버력 직경 50cm, 탄성계수 5GPa



(d) 버력 직경 50cm, 탄성계수 15GPa



(e) 버력 직경 60cm, 탄성계수 5GPa



(f) 버력 직경 60cm, 탄성계수 15GPa

그림 3.90 버력이 완전탄성거동을 할 경우 충격하중

위의 그림에서 볼 수 있듯이 버력의 충격하중은 약 0.002초 이내에 최대점에 도달하며 충

돌부터 최대점에 도달하는 시간과 최대점 도달이후 반발되는 시간이 동일한 대칭형 형태를 보이고 있다. 최대점에 도달하는 시간은 버력의 크기와는 큰 관계를 보이지 않으며 버력의 탄성계수와 낙하높이가 클수록 짧아지는 경향을 보이고 있다. 이는 탄성계수가 클수록 버력의 저항력이 크고 낙하높이가 클수록 충돌 직전의 속도가 크기 때문에 단위시간동안 속도의 변화가 크게 발생하기 때문으로 판단된다. 최대충격하중은 버력의 크기 즉, 버력의 무게, 탄성계수 및 낙하높이가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 백(2011)의 연구와도 유사한 결과이다.

아래 그림에 낙하높이와 충격하중의 관계를 살펴보기 위해 낙하높이별 최대충격하중을 도시하였으며 상관관계를 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 실시한 결과 충격하중은 낙하높이와 거듭제곱의 관계를 보이며 결정계수 R^2=1로 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 낙하높이와 관계된 회귀상수는 약 0.62로 백(2011)의 연구에서의 0.6과 매우 유사한 결과를 나타내고 있다.

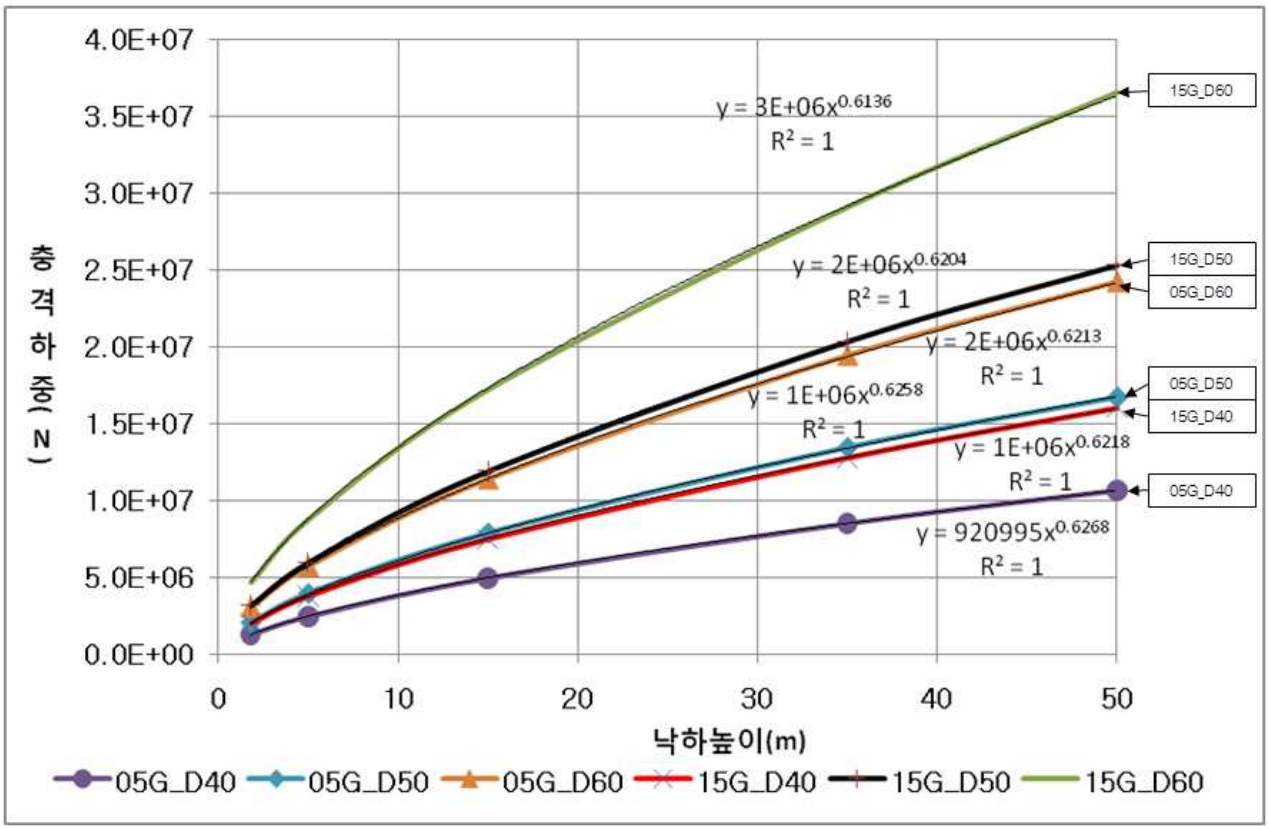
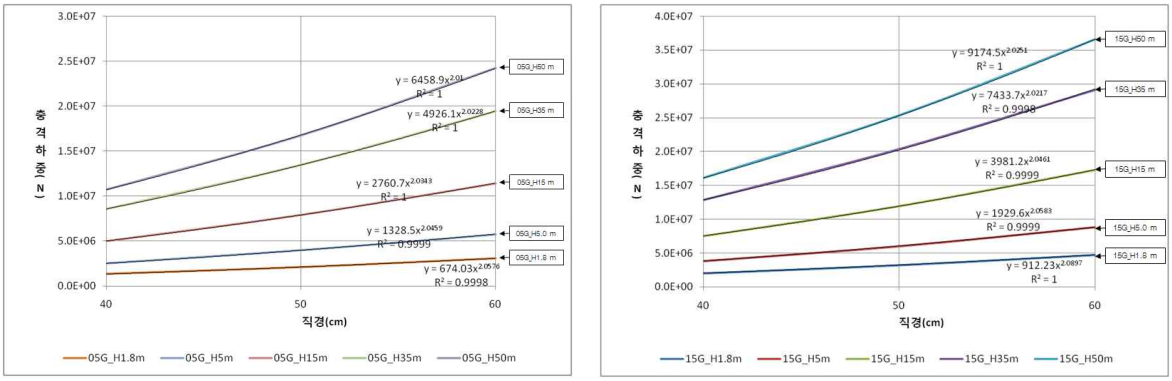


그림 3.91 완전탄성거동 시 낙하높이에 따른 충격하중

그림 3.92에 버력 크기와 충격하중과의 관계를 살펴보기 위해 버력 크기별 충격하중을 나타

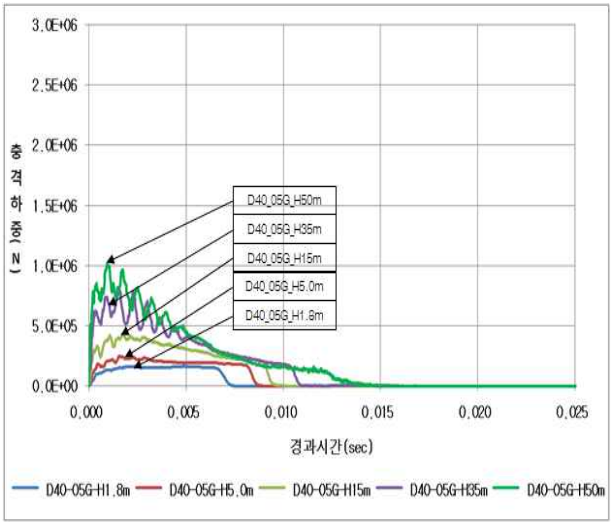
내었으며, 상관관계를 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 실시한 결과 충격하중과 버력의 크기는 거듭제곱의 관계를 보이며 결정계수 $R^2 \fallingdotseq 1$로 매우 잘 일치하였다. 버력의 크기와 관련된 회귀상수는 버력의 탄성계수에 상관없이 약 2로 나타났으며 버력의 크기는 무게와 관련되므로 이를 백(2011)의 연구에서의 충격하중식의 무게항과 비교할 경우 매우 유사한 결과를 보이는 것을 알 수 있다(무게의 2/3에 비례하므로 $W = \frac{4}{3}\pi R_1^3 \gamma_1$의 관계에서 버력 크기(R)의 2승에 비례함).



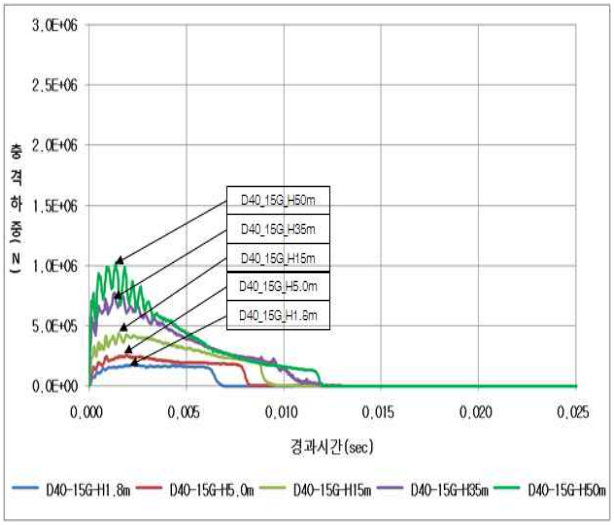
(a) 버력탄성계수 05GPa　　(b) 버력탄성계수 15GPa

그림 3.92 완전탄성거동 시 버력의 크기에 따른 충격하중

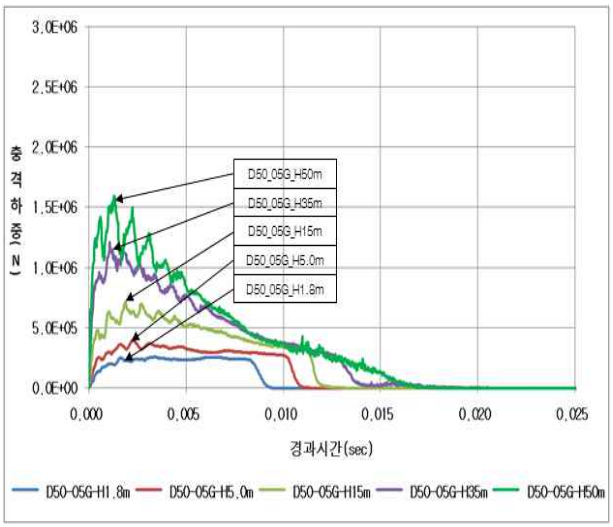
버력이 탄소성거동을 할 경우 수치해석결과를 그림 3.93에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 버력이 탄소성거동을 하는 경우에는 완전탄성과 비교하였을 때 매우 다른 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 충돌직후부터 분리될 때까지의 접촉시간이 매우 긴 것을 알 수 있으며 최대점 도달시간은 유사하나 최대점 이후 접촉시간이 긴 것을 알 수 있다. 특히 완전탄성거동에 비해 탄성계수에 따른 충격하중의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 하지만 버력의 크기와 낙하높이가 증가할수록 충격하중이 증가하는 경향은 완전탄성거동과 유사하게 나타났다. 가장 큰 차이점으로는 충격하중이 완전탄성거동에 비해 매우 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 버력이 탄성한계를 넘어 소성영역에 들어서면 소성변형으로 인해 버력의 운동에너지가 소산되기 때문으로 판단된다.



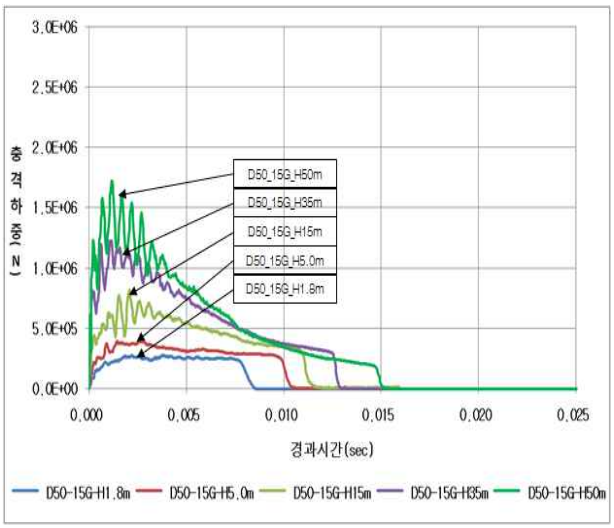
(a) 버력 직경 40cm, 탄성계수 5GPa



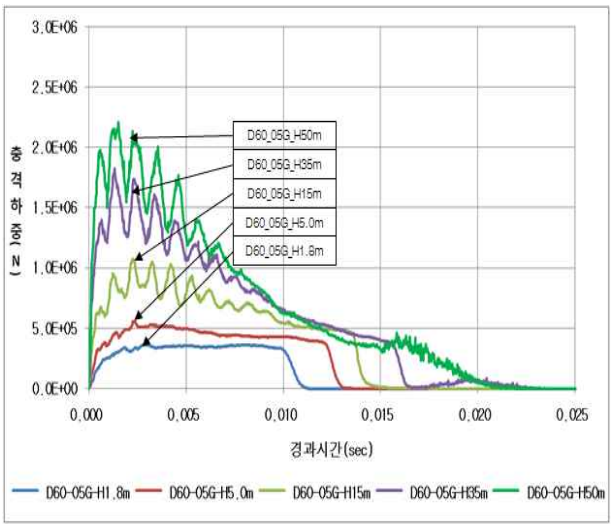
(b) 버력 직경 40cm, 탄성계수 15GPa



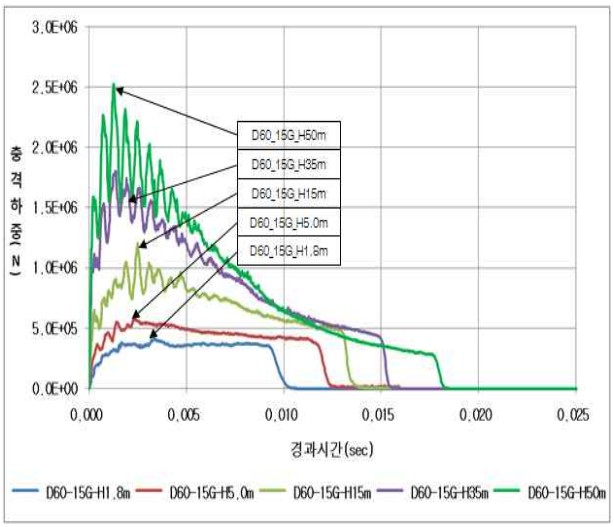
(c) 버력 직경 50cm, 탄성계수 5GPa



(d) 버력 직경 50cm, 탄성계수 15GPa



(e) 버력 직경 60cm, 탄성계수 5GPa



(f) 버력 직경 60cm, 탄성계수 15GPa

그림 3.93 버력이 탄소성거동을 할 경우 충격하중

그림 3.94에 버력이 탄소성거동 시 낙하높이와 충격하중의 관계를 살펴보기 위해 낙하높이별 최대충격하중을 도시하였으며 상관관계를 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 실시한 결과 충격하중은 낙하높이와 거듭제곱의 관계를 보이며 결정계수 $R^2 \fallingdotseq 0.98$로 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 낙하높이와 관계된 회귀상수는 약 0.53~0.55로 탄소성거동을 할 경우 백(2011)의 연구에서의 충격하중식에 비해 높이에 대한 영향이 적은 것으로 나타났다.

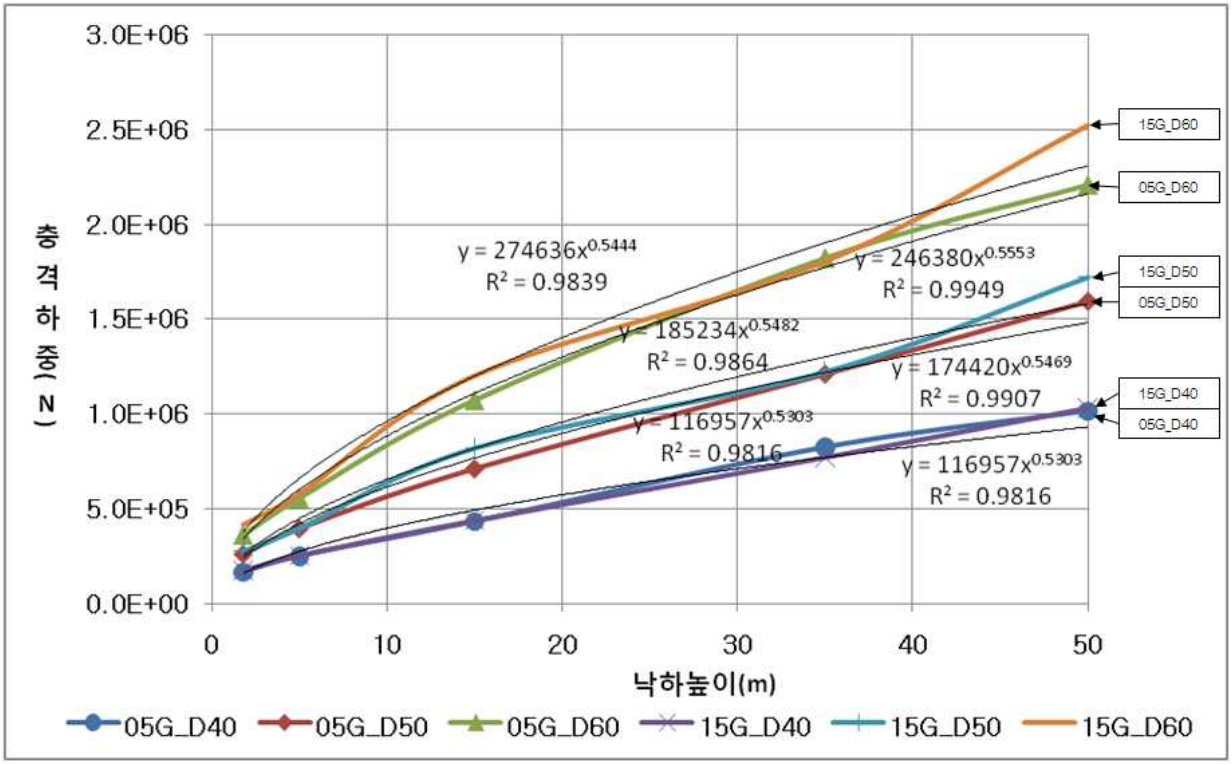
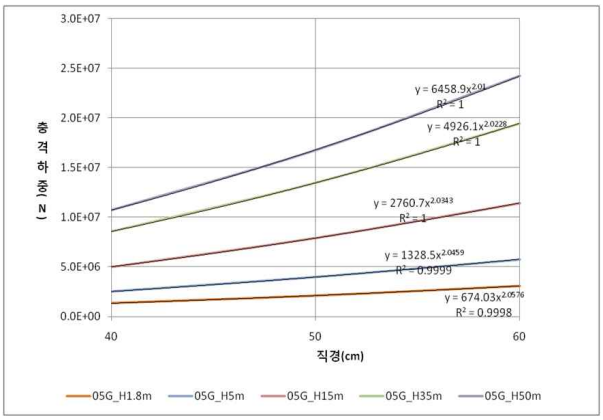
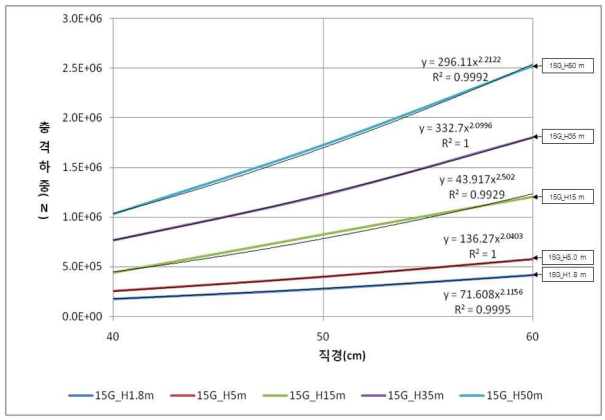


그림 3.94 탄소성거동 시 낙하높이에 따른 충격하중

그림 3.96에 탄소성거동 시 버력의 크기와 충격하중과의 관계를 살펴보기 위해 버력의 크기별 충격하중을 도시하였으며 상관관계를 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 실시한 결과 충격하중과 버력의 크기는 거듭제곱의 관계를 보이며 결정계수 $R^2 \fallingdotseq 0.99$로 매우 잘 일치하였다. 버력의 크기와 관련된 회귀상수는 1.91~2.5의 범위로 완전탄성거동과 유사한 것으로 나타났다. 따라서 탄소성거동을 할 경우에도 버력의 크기 즉, 무게에 의한 영향은 유사할 것으로 판단된다.



(a) 버력탄성계수 5GPa



(b) 버력탄성계수 15GPa

그림 3.95 탄소성거동 시 버력의 크기에 따른 충격하중

재료거동에 따른 충격하중 비교분석을 표 3.65에 각 해석조건별 충격하중과 완전탄성대비 탄소성에서의 충격하중의 비를 나타내었다.

표 3.65에서 알 수 있듯이 버력이 탄성거동을 할 경우에 비해 탄소성거동을 할 경우 충격하중은 7~12%의 수준인 것으로 나타났다. 즉, 탄소성에 비해 완전탄성으로 가정할 경우 약 10배의 충격하중이 가해지는 것으로 이는 교통 유지형 터널확대공법의 경제성을 좌우할 수 있는 차이로 판단된다. 따라서 실대형 실험을 통해 버력과 프로텍터가 충돌 시 실제 버력의 재료거동을 명확히 파악해야 될 것으로 판단된다.

또한 버력의 직경, 탄성계수 및 낙하높이가 증가할수록 재료거동에 따른 충격하중의 차이가 커지는 것으로 나타났다. 즉, 각 변수가 충격하중에 기여하는 비율이 완전탄성에 비해 탄소성에서 작아지는 것을 알 수 있다.

표 3.65 재료거동에 따른 충격하중

직경 (cm)	탄성계수 (GPa)	낙하높이 (m)	완전탄성거동 (N)	탄소성거동 (N)	탄소성/완전탄성 (%)
40	5	1.8	1.3E+06	1.7E+05	12%
		5	2.5E+06	2.5E+05	10%
		15	5.0E+06	4.3E+05	9%
		35	8.6E+06	8.2E+05	10%
		50	1.1E+07	1.0E+06	9%
	15	1.8	2.0E+06	1.8E+05	9%
		5	3.8E+06	2.5E+05	7%
		15	7.5E+06	4.4E+05	6%
		35	1.3E+07	7.7E+05	6%
		50	1.6E+07	1.0E+06	6%
50	5	1.8	2.1E+06	2.6E+05	12%
		5	4.0E+06	3.9E+05	10%
		15	7.9E+06	7.1E+05	9%
		35	1.3E+07	1.2E+06	9%
		50	1.7E+07	1.6E+06	10%
	15	1.8	3.2E+06	2.8E+05	9%
		5	6.0E+06	4.0E+05	7%
		15	1.2E+07	8.2E+05	7%
		35	2.0E+07	1.2E+06	6%
		50	2.5E+07	1.7E+06	7%
60	5	1.8	3.1E+06	3.6E+05	12%
		5	5.8E+06	5.6E+05	10%
		15	1.1E+07	1.1E+06	9%
		35	1.9E+07	1.8E+06	9%
		50	2.4E+07	2.2E+06	9%
	15	1.8	4.7E+06	4.2E+05	9%
		5	8.8E+06	5.8E+05	7%
		15	1.7E+07	1.2E+06	7%
		35	2.9E+07	1.8E+06	6%
		50	3.7E+07	2.5E+06	7%

이론해와 수치해석을 비교분석하였다. 버력이 완전탄성 거동을 할 경우 이론해와 수치해석결과를 그림 3.96에 도시하였으며 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석결과 이론해와 수치해석결과는 직선선형관계를 나타내며 회귀식의 기울기는 0.925로 거의 1:1의 관계를 나타내며 결정계수 $R^2 \fallingdotseq 1$로 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 이론해는 버력이 완전탄성 거동을 할 경우 충격하중을 잘 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

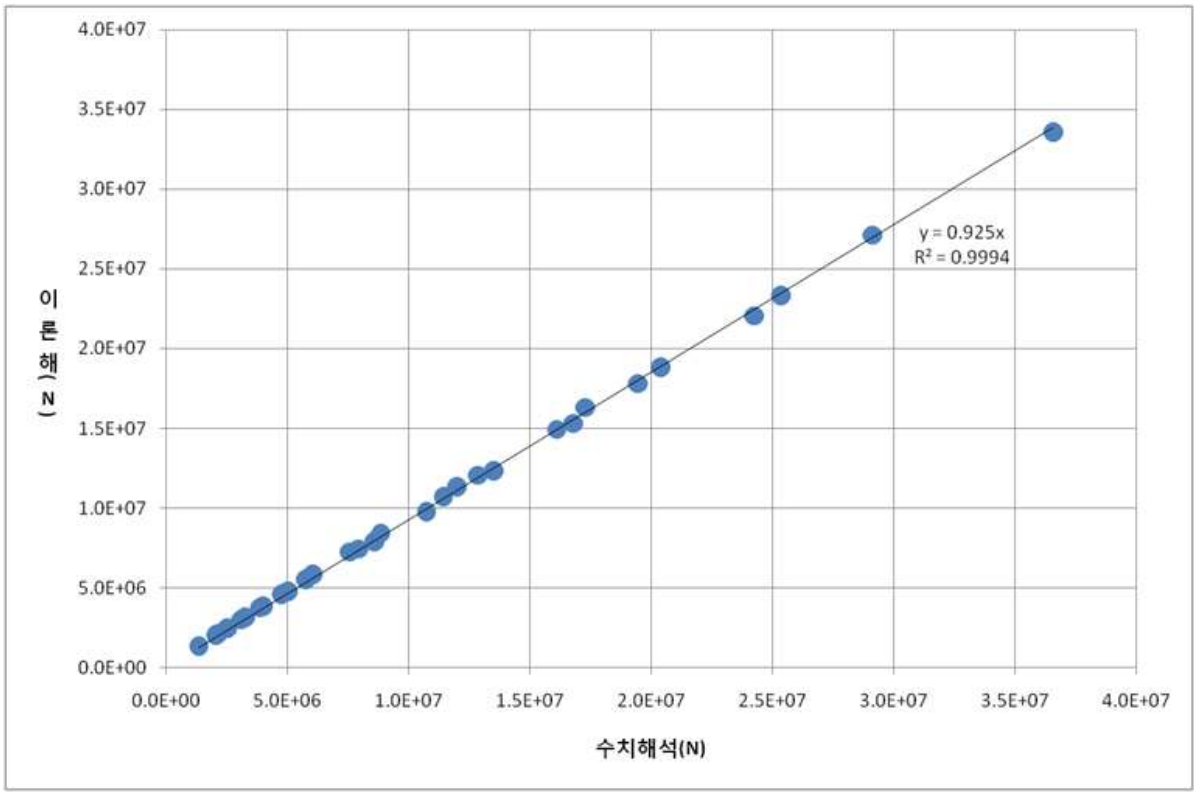


그림 3.96 완전탄성거동 시 이론해와 수치해석결과 비교

버력이 탄소성거동을 할 경우 이론해와 수치해석결과를 그림 3.98에 도시하였으며 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석결과 이론해와 수치해석결과는 완전탄성거동과 유사하게 직선선형관계를 나타내었으나 버력의 탄성계수에 따라 회귀분석결과가 다른 것으로 나타났다. 그림 3.97에서 보면 버력의 탄성계수가 클수록 회귀식의 기울기가 증가 즉, 두 결과의 차이가 크게 발생되는데 그 이유는 전술한 바와 같이 탄소성 거동 시 탄성계수의 변화에 따른 충격하중의 변화가 미미한데 비해 이론해에서는 탄성계수가 충격하중에 직접 영향을 주기 때문으로 판단된다. 따라서 실제 버력이 탄소성거동을 할 경우에는 제안된 이론해를 사용하는 것은 충격하중을 과대평가하여 공법의 경제성을 저하시킬 수 있으므로 각 탄성계수에 맞게 수정하여 사용해야 될 것으로 판단된다. 예를 들어 현재의 수치해석결과를 반영할 경우 다음과 같다.

버력의 탄성계수가 5GPa일 경우:

$$F_{max} = 9.8616 * 1.7672 (E^*)^{2/5} (\gamma_1)^{-1/15} (W)^{2/3} (H)^{3/5} = 17.427 (E^*)^{2/5} (\gamma_1)^{-1/15} (W)^{2/3} (H)^{3/5}$$

버력의 탄성계수가 15GPa일 경우:

$$F_{max} = 14.029 \times 1.7672 (E^*)^{2/5} (\gamma_1)^{-1/15} (W)^{2/3} (H)^{3/5} = 24.792 (E^*)^{2/5} (\gamma_1)^{-1/15} (W)^{2/3} (H)^{3/5}$$

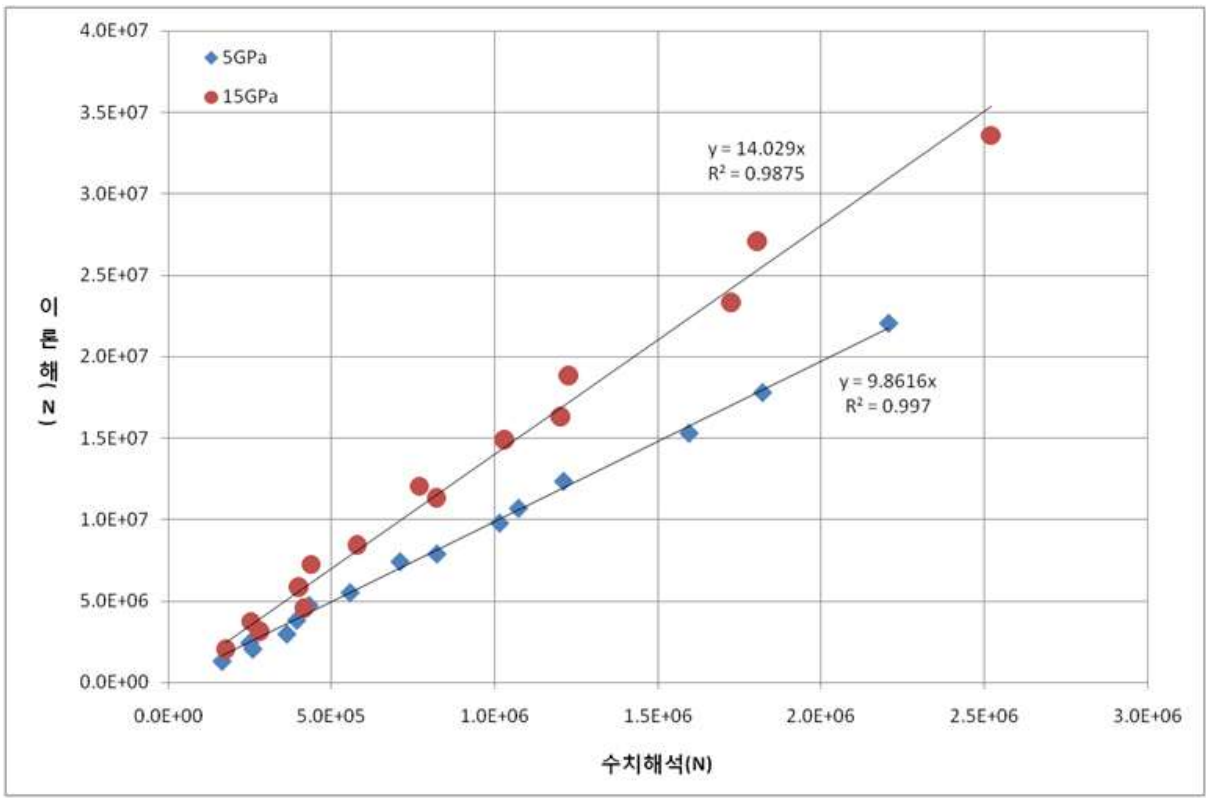


그림 3.97 탄소성거동 시 이론해와 수치해석결과 비교>

충격하중 산정식은 복잡하고 시간이 많이 소요되는 수치해석 없이 짧은 시간 안에 충격하중을 산정할 수 있는 이점이 있다. 따라서 국내 암석이 가지는 탄성계수에 대해 일련의 수치해석을 실시하고 이론해와 수치해석결과에 대한 각 회귀식의 기울기와 탄성계수와의 관계를 규명하고 제안된 이론해를 수정하여 사용한다면 탄소성거동 시 충격하중을 손쉽게 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

발파 시 발파 버력이 탄성거동을 할 경우 프로텍터에 과도한 하중이 발생되므로 이에 대응할 수 있도록 프로텍터를 설계해야 한다. 프로텍터를 강재이기 때문에 충격하중에 대응하도록 프로텍터의 단면을 크게 할 경우 경제성이 저하되므로 저비용의 충격저감재를 설치하여 충격하중을 줄일 수 있다면 경제적으로 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

충격저감재로는 폐타이어를 이용하여 제작된 탄성매트를 적용하였다. 탄성매트는 사용 후 다시 재생이 가능하므로 폐기물 발생을 최소화시킬 수 있으며 폐기물을 재활용하고 강재사용량을 줄임으로서 공사 중 탄소배출량 절감에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

탄성매트의 탄성특성을 측정하기 위하여 일축압축시험을 실시하였으며 실험전경과 실험결과를 그림 3.98과 3.99에 각각 나타내었다.



그림 3.98 탄성매트 압축시험

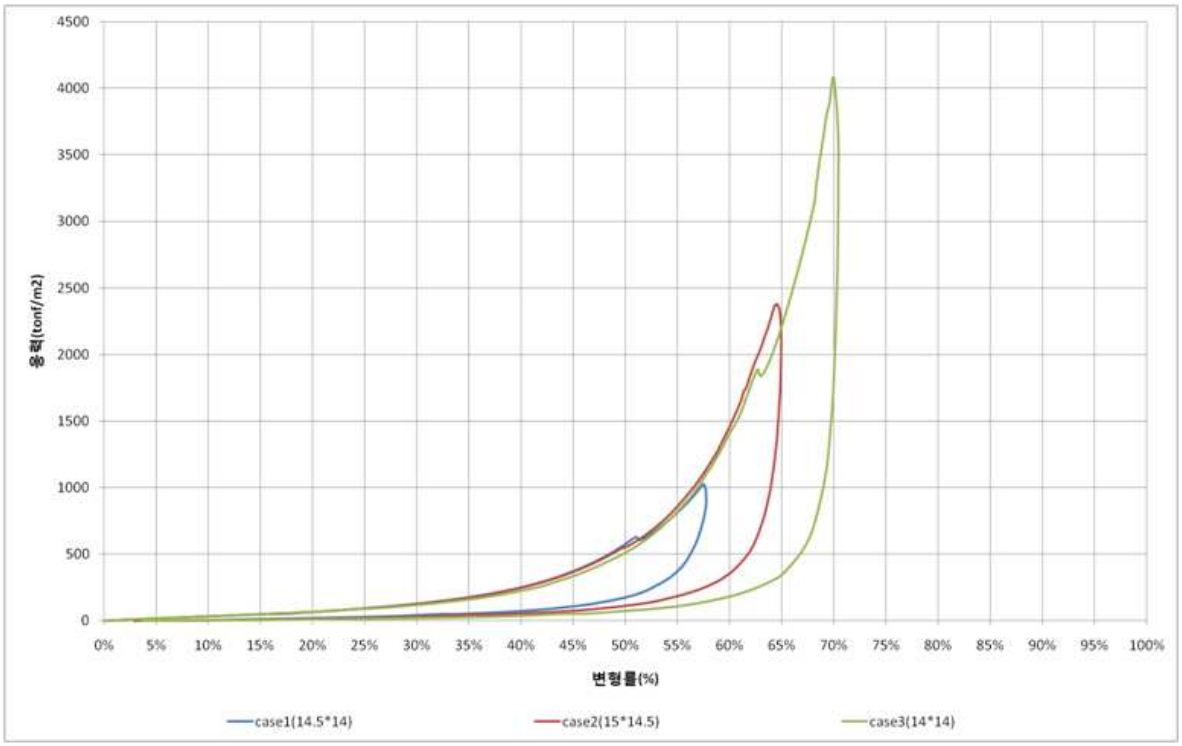
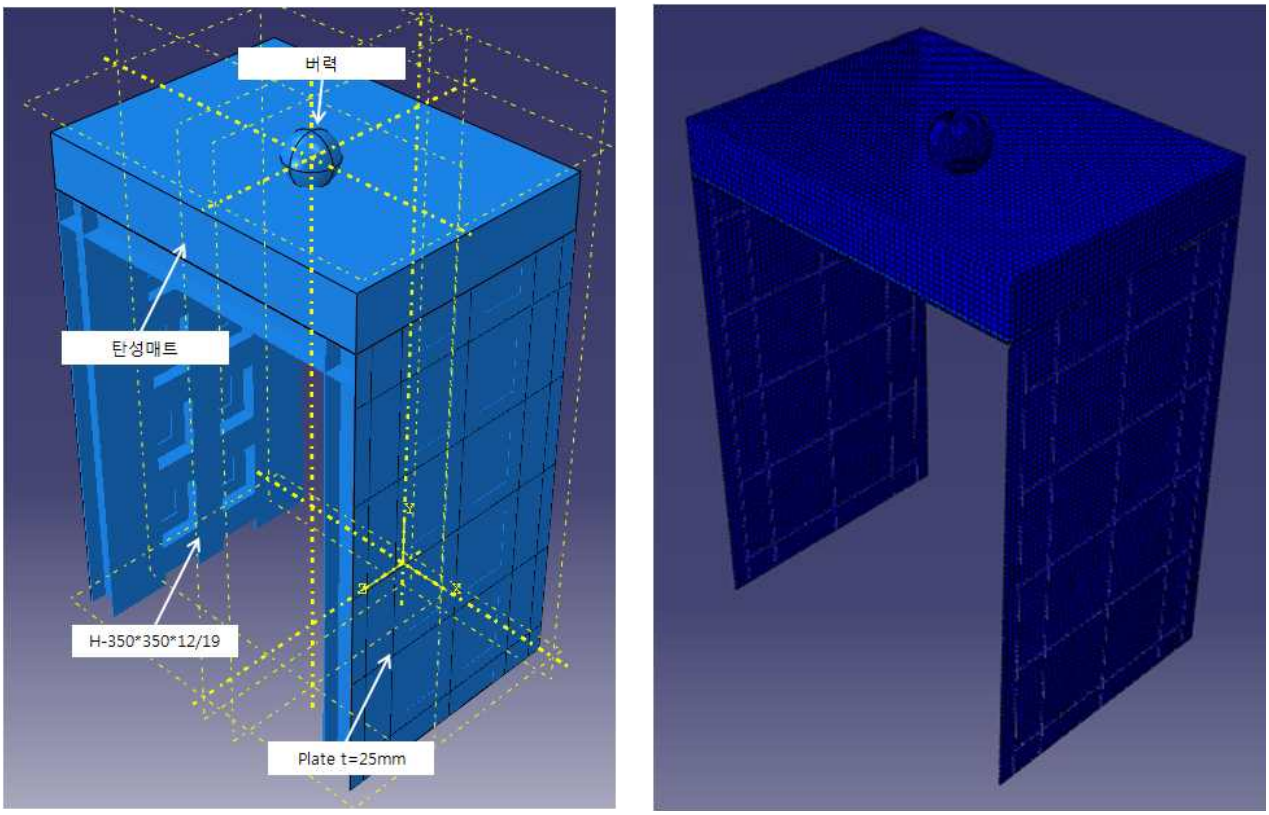


그림 3.99 탄성매트 압축시험 결과

탄성매트는 폐타이어를 분쇄한 것을 접착제로 접착시킨 것으로서 고무와 유사한 거동을 보이며 그림 3.100과 같이 응력상태가 낮을 경우 탄성이 작다가 응력상태가 높아질 경우 탄성이 커지는 Hyper-elastic 특성을 가지는 것으로 나타났다. 또한 대변형에서 하중을 제거할 경우 원형 그래도 복원되는 특성을 나타냈다.

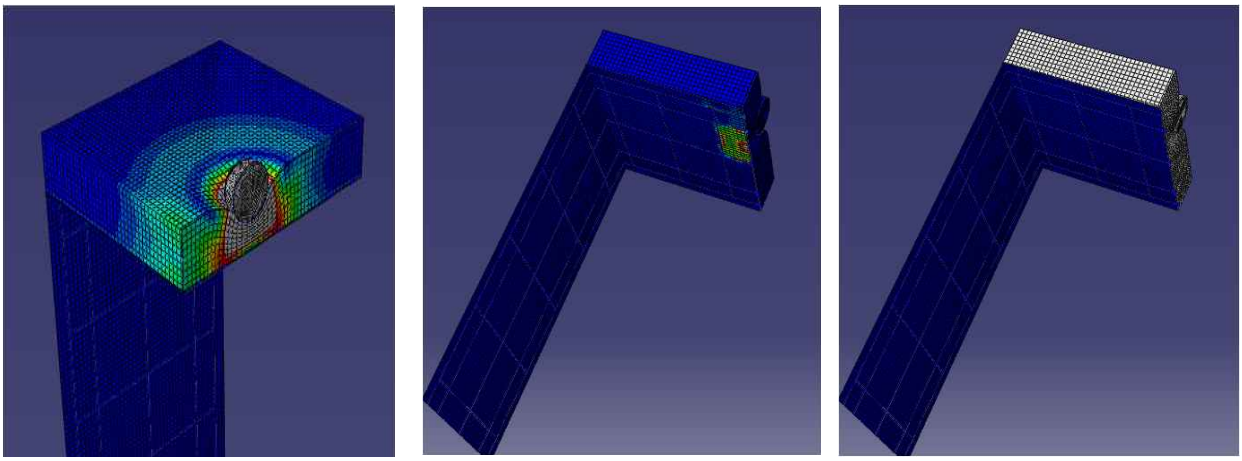
충격저감재의 설치두께를 산정하기 위하여 Explicit FEA 프로그램(Abaqus)을 이용하여 동해석을 실시하였다. 최악의 조건을 고려하기 위하여 버력의 탄성계수는 100GPa, 크기는 직경 50cm, 완전탄성체로 모델링하였으며 발파 시 버력의 초속을 정상발파에서의 최대속도인 30m/sec로 적용하여 해석을 수행하였다. 탄성매트는 Hyper-elastic 특성을 정의하기 위해 실제 압축시험결과를 적용하여 Ogden모델을 적용하였다. 그림 3.101에 수치해석 모델링 개요를 나타내었다.



(a) 해석모델 (b) 해석메쉬

그림 3.100 수치해석 모델링

충돌 시 최대변위, 응력분포 및 소성변위 분포를 그림 3.101에 나타내었다. 해석결과 탄성매트를 56cm 두께로 설치하면 변위는 탄성매트 내에서만 발생되며 충돌지점을 중심으로 일부 응력이 발생되나 강재의 허용응력을 초과하는 즉, 소성변위는 발생되지 않는 것으로 나타나 버력의 충돌이 프로텍터에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.



(a) 변위 (b) 응력 (c) 소성변위

그림 3.101 충격저감재를 고려한 충격해석 결과

본 연구에서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다

○ 최대충격하중은 완전탄성 거동 시 버력 크기, 탄성계수 및 낙하높이가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으나 탄소성의 경우에는 탄성계수에는 큰 영향이 없고 버력의 크기와 낙하높이에 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 버력이 탄소성일 경우 충돌과 동시에 탄성한계를 넘어 소성상태가 되기 때문으로 판단된다.

○ 재료거동에 따른 수치해석결과를 비교한 결과 버력이 완전탄성거동을 할 경우에 비해 탄소성거동을 할 경우 충격하중은 7~12%의 수준인 것으로 나타났다. 즉, 탄소성에 비해 완전탄성으로 가정할 경우 약 10배의 충격하중이 가해지는 것으로 이는 교통 유지형 터널 확대공법의 경제성을 좌우할 수 있는 차이로 판단된다. 따라서 실대형 실험을 통해 버력과 프로텍터가 충돌 시 실제 버력의 재료거동을 명확히 파악해야 될 것으로 판단된다.

○ 수치해석결과와 이론해의 결과를 비교한 결과 버력이 완전탄성 거동을 할 경우 직선선형관계를 나타내며 회귀식의 기울기는 0.925로 거의 1:1의 관계를 나타내며 R^2=0.99로 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 이론해는 버력이 완전탄성거동을 할 경우 충격하중을 잘 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

○ 그러나 버력이 탄소성 거동을 할 경우에는 수치해석과 이론해가 직선선형관계를 나타내나 버력의 탄성계수에 따라 다른 특성을 보이는 것으로 나타났다. 버력의 탄성계수가 클수록 회귀식의 기울기가 증가 즉, 두 결과의 차이가 크게 발생되는데 그 이유는 탄소성 거동 시 탄성계수의 변화에 따른 충격하중의 변화가 미미한데 비해 이론해에서는 탄성계수가 충격하중에 직접 영향을 주기 때문으로 판단된다.

○ 프로텍터를 강재이기 때문에 충격하중에 대응하도록 프로텍터의 단면을 크게 할 경우 경제성이 저하되므로 저비용의 충격저감재를 설치하여 충격하중을 줄일 수 있다면 경제적으로 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

○ 충격저감재로는 폐타이어를 이용하여 제작된 탄성매트를 적용하였다. 탄성매트는 사용 후 다시 재생이 가능하므로 폐기물 발생을 최소화시킬 수 있으며 폐기물을 재활용하고 강재 사용량을 줄임으로서 공사 중 탄소배출량 절감에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

○ 탄성매트는 응력상태가 낮을 경우 탄성이 작다가 응력상태가 높아질 경우 탄성이 커지는 Hyper-elastic 특성을 가지는 것으로 나타났다. 또한 대변형에서 하중을 제거할 경우 원형 그래도 복원되는 특성을 나타냈다.

○ 수치해석결과 탄성매트를 56cm 두께로 설치하면 변위는 탄성매트 내에서만 발생되며 충돌지점을 중심으로 일부 응력이 발생되나 강재의 허용응력을 초과하는 즉, 소성변위는 발생되지 않는 것으로 나타나 버력의 충돌이 프로텍터에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

6. 발파 시 교통제어를 위한 교통량 평가기법 제시

가. 기존사례를 통한 발파 시 대책 및 서울시 주요터널의 교통량 분석

Shikishimanai 터널은 해안가 절벽에 위치하고 있으며 지역의 교통이나 생활의 간선도로이므로 전면통제가 어려워 운영중 터널을 확대하였다. 터널지반은 안산암이 주를 이루고 있으며 평균 일축압축강도는 1,500kg/cm^{2}정도이다. 기존터널 및 확대터널의 제원은 다음과 같다 (Yamamoto, 2003).

- 기존터널 제원(내공단면적 31.0m2,폭 6.0m)
- 확대터널 제원(내공단면적 62.9m2,폭 9.75m)

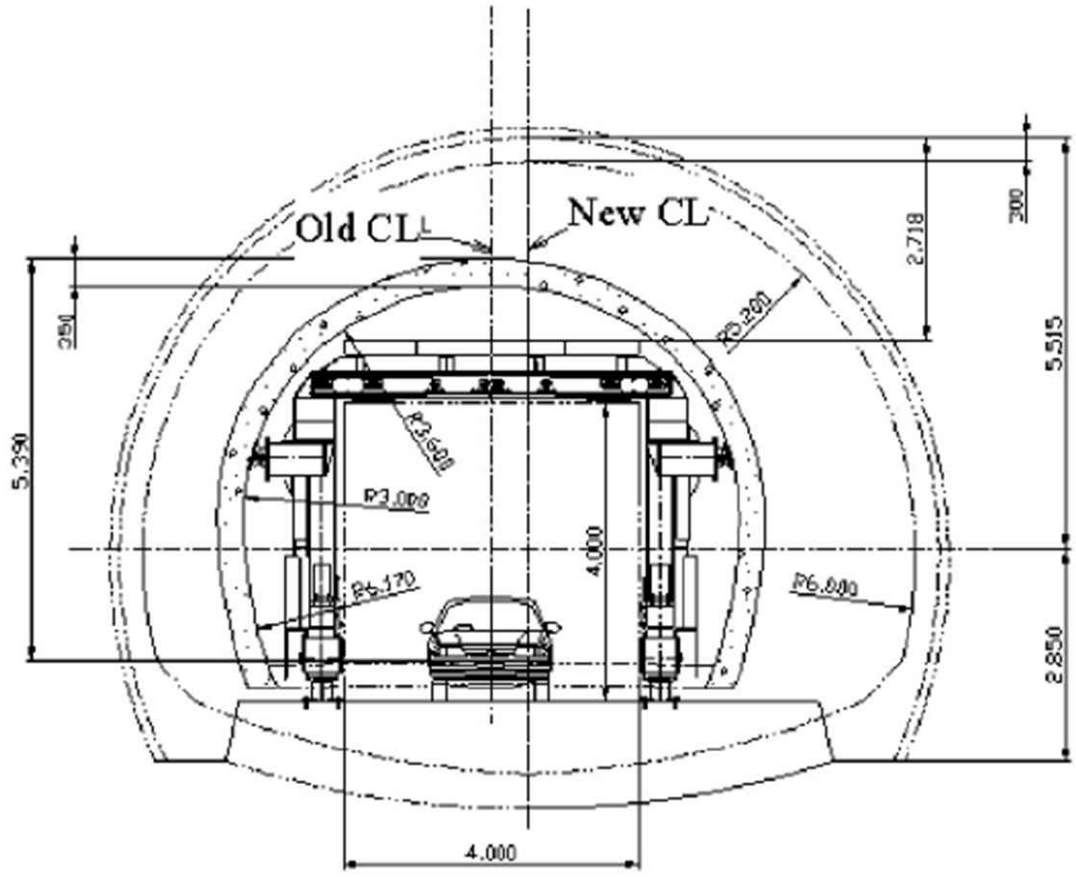


그림 3.102 Shikisimanai 터널확대 개요도

터널의 교통량은 5,000대/일 정도이며 야간 교통량(22:00~5:00)은 200대/일 정도이며 터널 발파는 주변이 관광지임을 고려하여 1일 1발파를 적용하였는데 교통량이 비교적 적은 심야시

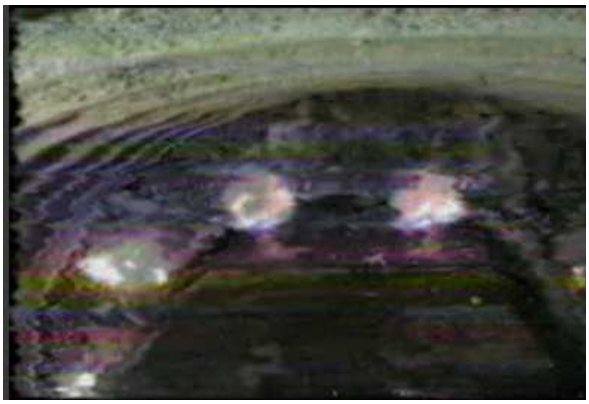
간대에(22:00～5:00) 실시함하였다. 이때 굴진장은 1발파당 1.0～1.2m 이다.
Shikishimanai터널의 발파에 의한 확대굴착 순서를 그림 3.104에 나타내었다.



a) 프로텍터 설치



b) 천공 및 장약



c) 발파



d) 버력처리



e) 지보설치



f) 방수막 설치

그림 3.103 발파에 의한 터널확대 시공프로세서

기존터널을 활선시공으로 확대하는 경우에는 교통규제, 차선변경에 의해 터널 이용자의 통행에 영향을 미치게 된다. 그러므로 공사의 사전예고, 공사규제 등의 공사에 관한 정보를 제

공하는 것으로 터널 이용자가 안심하고 통행하도록 하는 것이 필요하며 교통규제, 차선규제, 통행차량의 높이 제한에 대하여 현지교통의 원활하며 안전한 흐름을 확보하기 위해 규제 내용을 알리는 보안시설을 검토하여야 한다. 예를 들어 차선규제에서는 교통규제중의 “대기시간”을 확인할 수 있는 시설이나 규제용의 신호기 등을 설치하거나 통행차량의 높이 제한에 관해서는 높이 제한의 확인용 게이트나 감지 센서를 전후에 설치할 필요가 있다. 또한 특수차량 등의 공사 중에 통행제한을 받는 차량의 우회로에 관해서도 사전에 결정해서 공사중에는 우회로를 안내할 필요가 있다. 관련 그림들을 나타내었다.



그림 3.104 교통 규제중의 “대기시간” 표시전경



그림 3.105 교통규제용 신호기



그림 3.106 차량통행제한 확인용 게이트

나. 서울 시 주요터널의 교통량 분석

교통류 보존 터널 확대 공법은 도로를 폐쇄하는 것이 아니라 교통흐름이 유지되는 공법이므로 교통흐름을 최적화시키기 위해 공사착수시점, 발파 시간 등의 계획 수립이 중요하며 프로텍터의 경제적인 설계를 위해 통과 가능한 차량 크기 설정 등이 중요하다. 본 연구에서는 이중 공사착수시점, 발파시간 등의 계획수립을 위해 서울시의 일부 터널을 대상으로 시간대별, 일별, 월별 교통량을 분석하였다.

그림 3.107~3.116은 시간대별 터널별 교통량을 나타낸 것이다. 각 터널별 교통량의 차이는 발생하나 모두 유사하여 경향을 보이고 있는데 5시에 교통량이 최소가 되며 9시까지 급격히 증가하다가 13시까지 감소하고 13시부터 19시까지 큰 변화가 없다가 다시 5시까지 감소하는 것으로 나타났다. 오전에 급격히 증가하는 것은 출근차량, 17시까지는 업무차량과 퇴근차량, 17시부터 다음날 5시까지는 수면시간대이므로 급격히 감소하는 것으로 판단된다.

이러한 경향은 전술한 Shikishimanai 터널에서의 교통량과도 유사하며 이러한 경향은 인간의 삶의 패턴에 의한 것이므로 도심지뿐아니라 전국 어느 곳에서나 유사한 경향을 보일 것으로 판단된다. 따라서 교통을 완전히 차단하고 발파하는 경우 야간시간대를 이용하는 것이 합리적일 것으로 판단되며 특히 3시~6시 사이가 가장 효과적일 것으로 판단된다. 만약 하루에 2발파 이상을 하고자 할 경우에는 운전자의 마음이 급해지는 출근시간대를 피하고 오후 교통량이 급격히 떨어지는 17시부터 다음날 6시까지 작업계획을 수립하는 것이 교통 차단에 의한 위험과 불편을 최소화하는 방법일 것으로 판단된다.

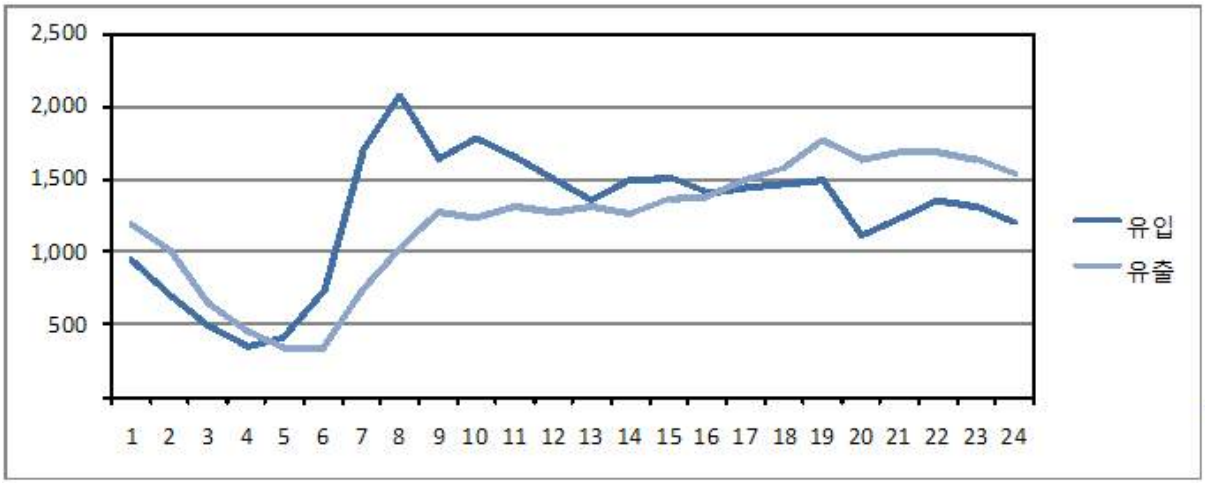


그림 3.107 상도터널 시간대별 통행량

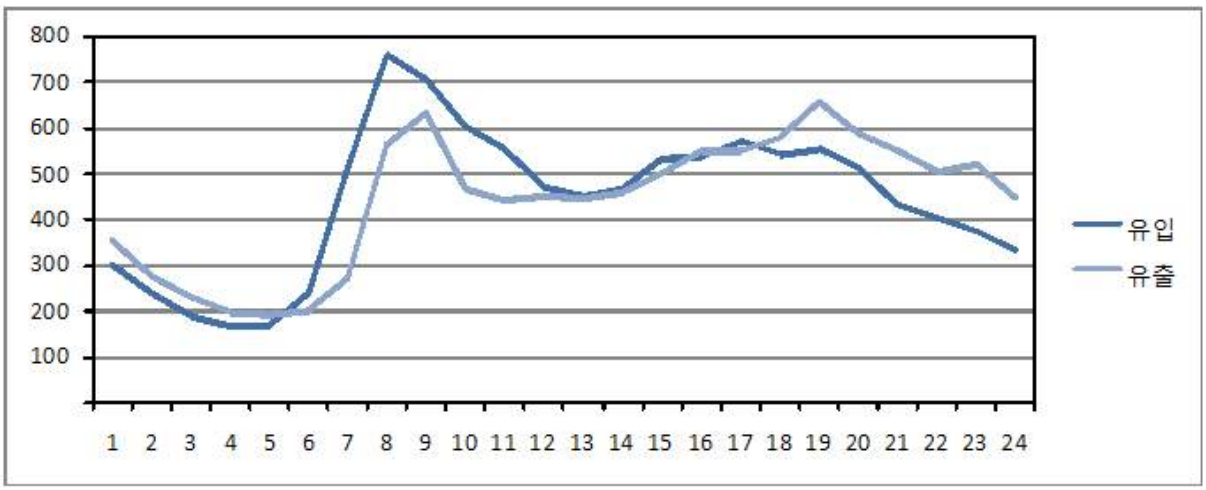


그림 3.108 문성터널 시간대별 통행량

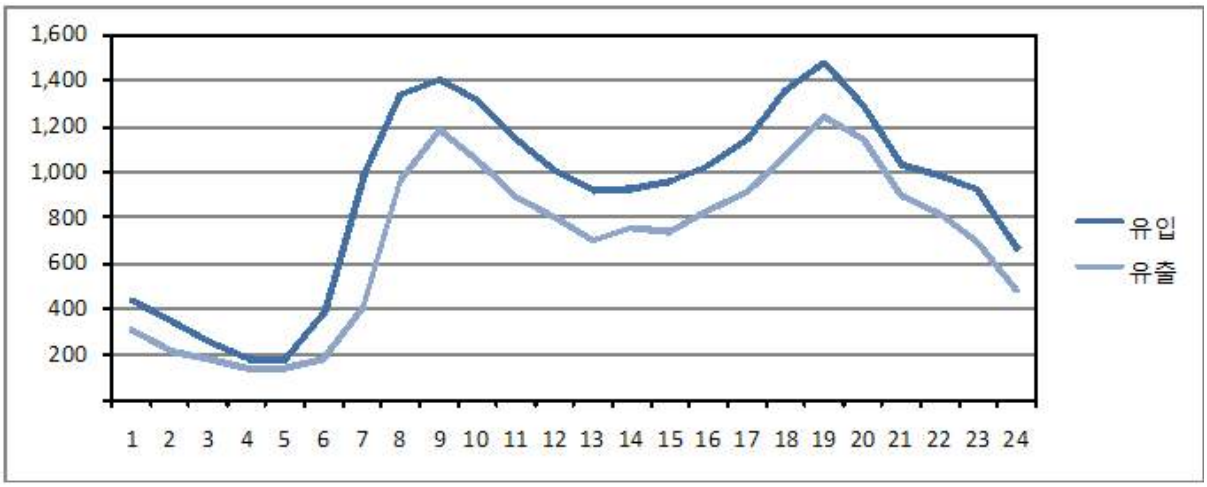


그림 3.109 북악터널 시간대별 통행량

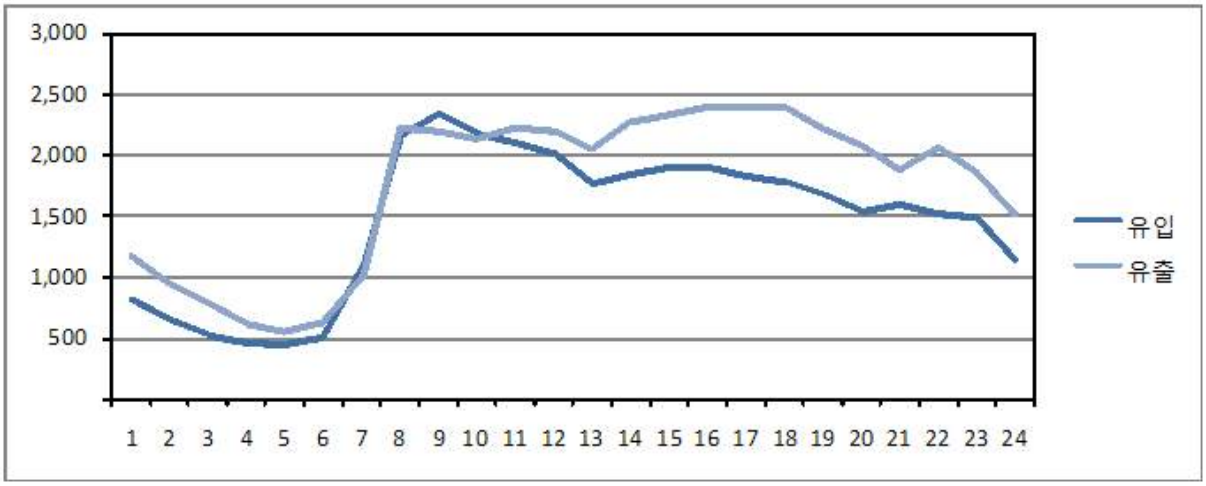


그림 3.110 금호터널 시간대별 통행량

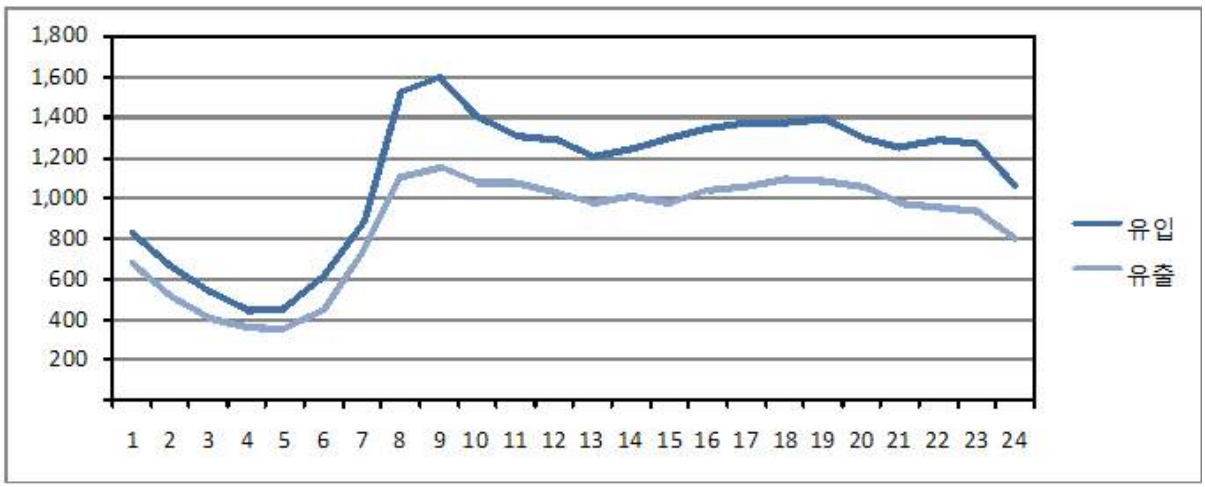


그림 3.111 화곡터널 시간대별 통행량

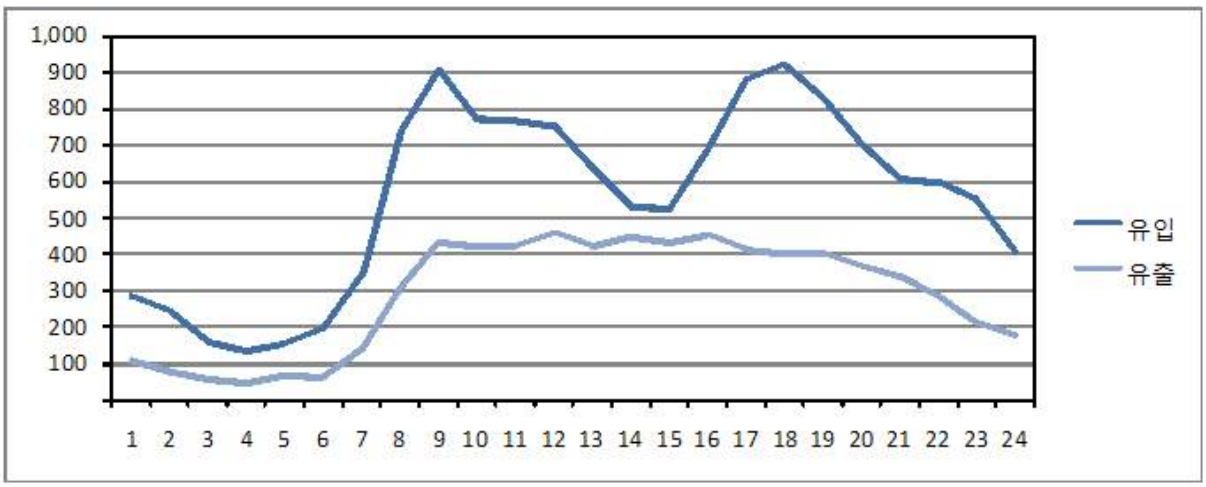


그림 3.112 남산2호터널 시간대별 통행량

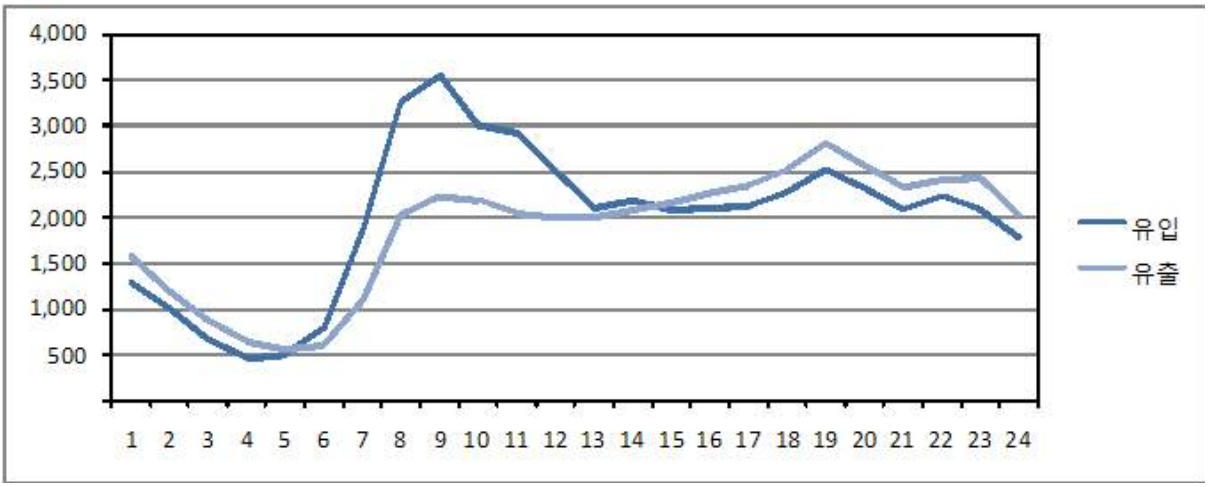


그림 3.113 사직터널 시간대별 통행량

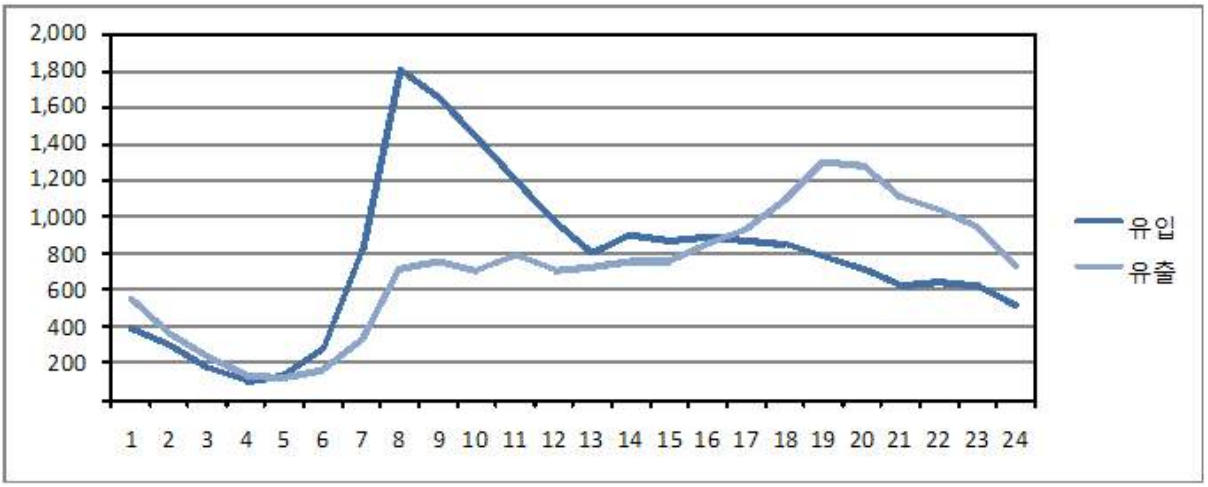


그림 3.114 자하문터널 시간대별 통행량

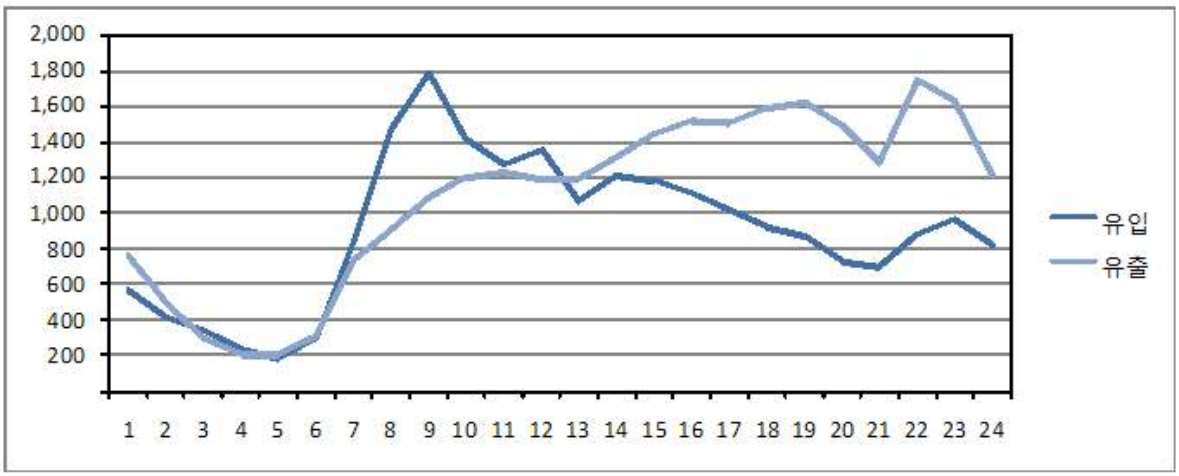


그림 3.115 남산3호터널 시간대별 통행량

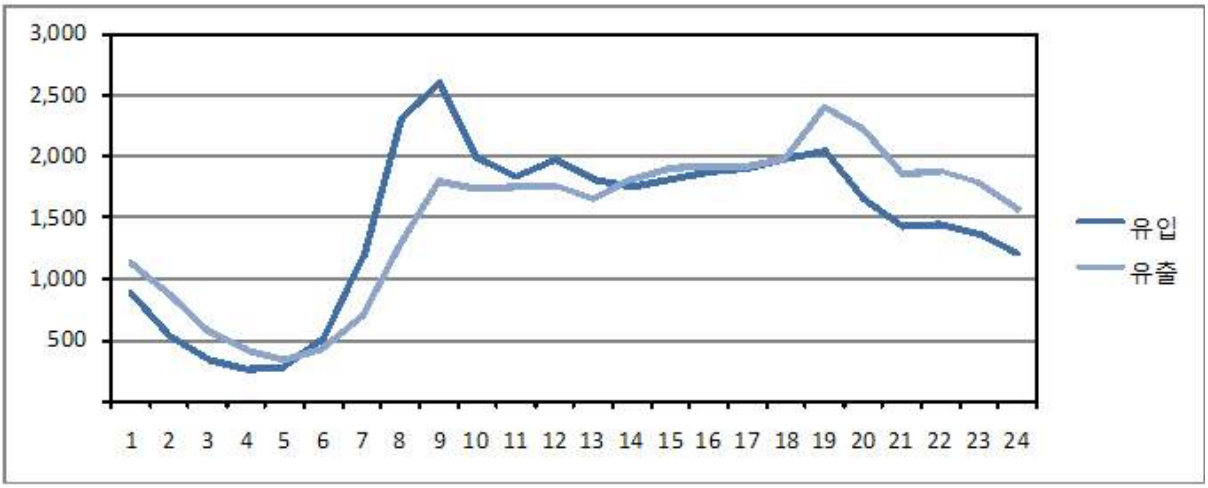


그림 3.116 금화터널 시간대별 통행량

그림 3.117은 요일별 교통량을 나타내었다. 월~금까지 주중의 교통량은 일정하다가 주말인 토요일과 일요일에 감소하는 경향을 나타내고 있다.

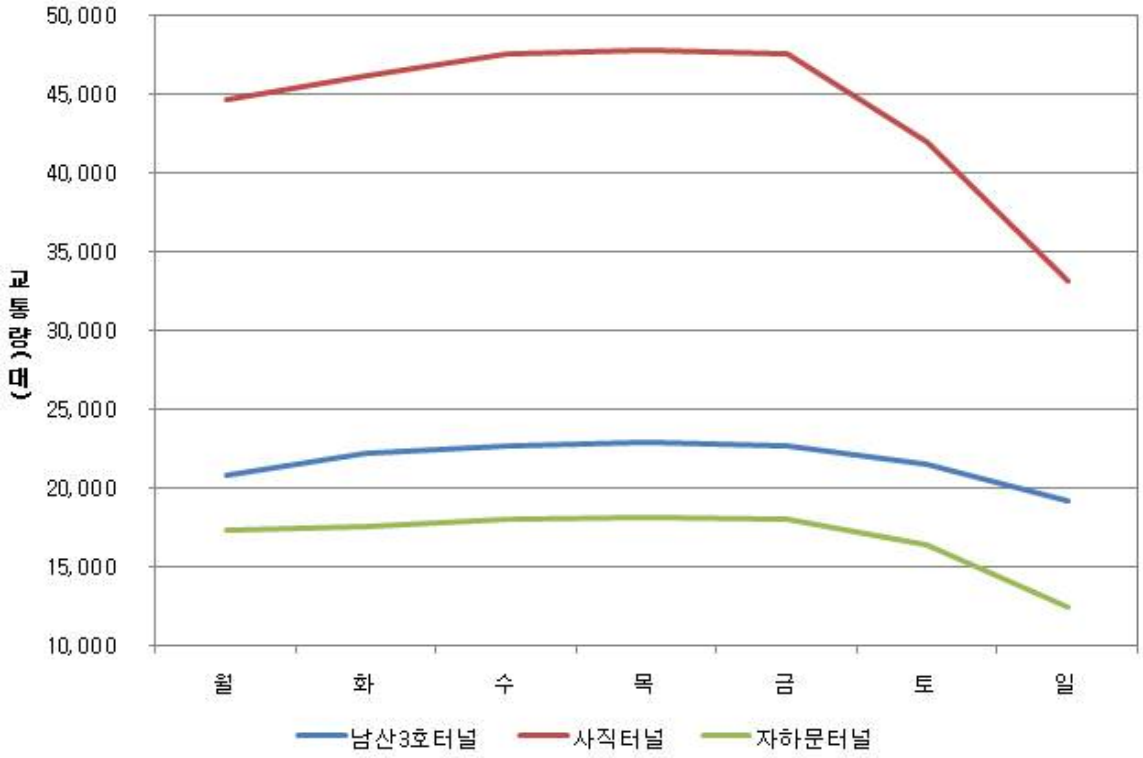


그림 3.117 요일별 교통량 분석

그림 3.118에는 월별 교통량을 나타내었다. 월별 교통량은 대체적으로 3월이 최대이며 3월을 기점으로 8월까지 감소하다가 다시 증가하는 추세를 보이고 있다. 이는 휴가철을 맞아 도시에서 지방으로 점차적으로 차량의 유출이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 발파에 의한 터널확대 시 각 지점별로 교통량의 조사가 필요할 것으로 판단되며 전체 공사기간을 고려하여 공사 착수 시점에 대한 검토도 필요할 것으로 판단된다.

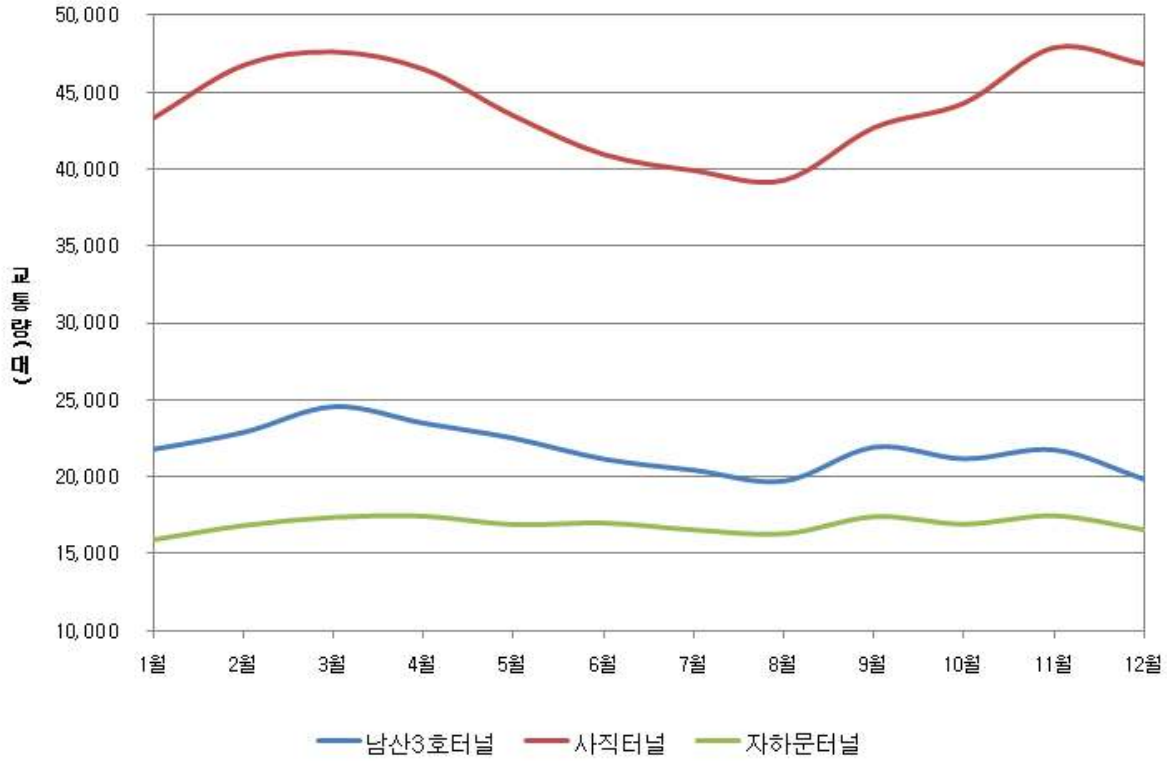


그림 3.118 월별 교통량 분석

이상의 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

○ 발파 확대굴착 된 Shikishimanai 터널사례 분석결과 터널의 교통량은 5,000대/일 정도, 야간 교통량(22:00~5:00)은 200대/일 정도이며 터널 발파는 주변이 관광지임을 고려하여 1일 1발파를 적용하였는데 교통량이 비교적 적은 심야시간대에(22:00~5:00) 실시함하였다. 이때 굴진장은 1발파당 1.0~1.2m 이다.

○ 기존터널을 활선시공으로 확대하는 경우에는 교통규제, 차선변경에 의해 터널 이용자의 통행에 영향을 미치게 된다. 그러므로 공사의 사전예고, 공사규제 등의 공사에 관한 정보를 제공하는 것으로 터널 이용자가 안심하고 통행하도록 하는 것이 필요하며 교통규제,

차선규제, 통행차량의 높이 제한에 대하여 현지교통의 원활하며 안전한 흐름을 확보하기 위해 규제 내용을 알리는 보안시설을 검토하여야 한다.

○ 서울시 주요터널의 교통량 분석결과 터널별 교통량의 차이는 발생하나 모두 유사하여 경향을 보이고 있는데 5시에 교통량이 최소가 되며 9시까지 급격히 증가하다가 13시까지 감소하고 13시부터 19시까지 큰 변화가 없다가 다시 5시까지 감소하는 것으로 나타났다. 오전에 급격히 증가하는 것은 출근차량, 17시까지는 업무차량과 퇴근차량, 17시부터 다음날 5시까지는 수면시간대이므로 급격히 감소하는 것으로 판단된다. 따라서 교통을 완전히 차단하고 발파하는 경우 야간시간대를 이용하는 것이 합리적일 것으로 판단되며 특히 3시~6시 사이가 가장 효과적일 것으로 판단된다. 만약 하루에 2발파 이상을 하고자 할 경우에는 운전자의 마음이 급해지는 출근시간대를 피하고 오후 교통량이 급격히 떨어지는 17시부터 다음날 6시까지 작업계획을 수립하는 것이 교통 차단에 의한 위험과 불편을 최소화하는 방법일 것으로 판단된다.

○ 월별 교통량은 대체적으로 3월이 최대이며 3월을 기점으로 8월까지 감소하다가 다시 증가하는 추세를 보이고 있다. 이는 휴가철을 맞아 도시에서 지방으로 점차적으로 차량의 유출이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 발파에 의한 터널확대 시 각 지점별로 교통량의 조사가 필요할 것으로 판단되며 전체 공사기간을 고려하여 공사 착수 시점에 대한 검토도 필요할 것으로 판단된다.

7. 협소공간 시공 및 경제성 분석

터널내 교통을 막고 터널을 확장하는 기존 공사방법과 달리, 프로텍터를 사용하여 공사기간동안 터널의 교통흐름을 전체 차단하지 않고 터널을 확대하는 공법을 이용하는 경우, 기존 공사방법과 비교하여 교통흐름을 차단하지 않는데서 발생하는 사회적비용을 간접비로 고려하여, 총 공사비를 비교하여 그 편익을 계산하고자 한다. 교통을 막고 터널을 확장하는 기존 공사방법의 총공사비와 교통차단으로 발생하는 터널 이용자의 불편함 비용 및 사회적 비용 등의 모든 발생 비용을 화폐 가치화하여 계산하고, 신공법에서 공기연장 및 프로텍터 사용으로 인하여 증가하는 직접비와 교통이 차단되지 않은 경우에 생기는 사회적비용의 차이를 비교하여, 기존 공법과 신공법의 차이를 경제적으로 비교·분석하고자 한다.

터널 공사기간 이후의 기간에 대해서는 동일한 효과를 가지고 있다고 말할 수 있으므로, 현재 과업에서 비교로 하고자하는 부분은 공사기간동안에 발생하는 직·간접비용에 대한 경제성 분석이다. 따라서 비용과 편익간의 이율을 계산하여 경제성을 평가하는 B/C ratio 또는 IRR방법은 본 과업에 적합하지 않으며, 약 3년~5년이 소요되는 공사기간동안 발생하는 비용과 편익을 각각 산출하여 각 항목별로 비교·분석하여 그 경제성을 평가하고자 한다.

① 기존의 터널 확장 공사방법과 프로텍터를 사용하여 교통흐름을 보존하는 신공법의 경우, 프로텍터를 제작하고 설치하는데 들어가는 비용뿐만 아니라 공사기간의 차이에 의해 발생하는 공사비 차이를 고려하여 총 공사비를 각각 계산하여 직접비를 비교한다.

② 공사기간을 고려하여, 교통차단에 의해 우회로로 통행할 때 발생하는 비용과, 새로운 공법을 적용하였을 때 간헐적인 터널통행차단으로 발생하는 간접비를 계산하기 위하여 기존의 간접비 산출 방식에 대하여 선행연구 조사 및 적용을 위한 간접비 산출방식을 정의한다.

③ 터널 확장공사의 특성상, 교통흐름을 완전 차단한 채 공사하는 기존 공법과 교통흐름을 유지시키는 신공법의 부분적 교통차단은 그 차단 기간 및 방법이 엄연히 다르기 때문에, 이를 고려하여 공사기간을 산출함은 물론 간접비의 계산에 있어서도 공사기간 차이 및 각 차단 형태 별로 간접비를 계산하여 비교하여야 한다. 이때, 터널 공사기간동안 교통을 차단한다면 당연히 우회로로 교통 혼잡이 발생하므로 교통혼잡비용이 발생하므로, 이 교통혼잡비용을 간접적인 비용으로 계산하여야 한다. (Robert I. 1998)

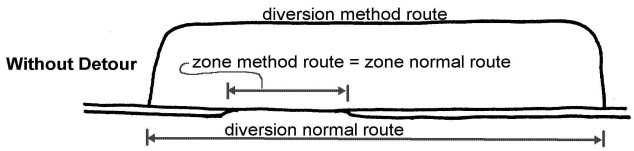


그림 3.119 우회로의 유무에 따른 도로 변화

④ 분석하고자 하는 대상 터널 별로 각각 기존공법을 이용하였을 경우와 신공법을 적용하였을 경우를 가정하여 이를 직접비, 간접비 항목으로 나누어 산출하고, 최종적으로 이를 비교하여 각 공법별 차이를 비교·분석한다. 이러한 직·간접비 산출에 대한 항목화는 다음 표 3.66에 제시되어 있다.

표 3.66 터널 확장공사에 대한 기존공법 및 신공법 비교를 위한 직·간접비용 항목화

기존공법	**(-) 비용항목 - 직접비**	
	• 직접 공사비	
	(-) 편익항목 - 간접비	
	• 교통 완전통제로 인한 우회로 이용에 따른 차량혼잡비용 (차량운행 항목만 고려 -유류비, 관리비.) • 우회로 이용에 따른 시간지연비용 (차량별로 업무통행가치 고려하여 계산) • 우회로 인한 운행거리 증가로 환경오염증가비용	• 우회로 산정 이후, 기존흐름과 차이를 혼잡비용으로 산정 • 우회로 통행에 따른 차량 통행시간 지연을 계산 • 우회로 증가된 거리만큼 환경비용 계산
신공법	**(-) 비용항목 - 직접비**	
	• 직접공사비 • 프로텍터 적용에 따른 재료비 및 제작, 설치비용	• 공기 증가로 인한 공사비 증가도 고려 • 프로텍터 재료비에 따라 비용결정
	(-) 편익항목 - 간접비	
	• 기본적 차량통행비용 • 부분 통제로 인한 차량 혼잡비용 • 부분 통제로 인한 시간 지연비용 (차량별로 계산) • 부분 통제로 인한 환경오염비용	• 교통통제 안하는 경우도 계산 • 각 통제 경우 별 차량혼잡비용 계산 • 각 통제 경우 별 시간지연비용 계산 • 각 통제 경우 별 환경오염비용 계산

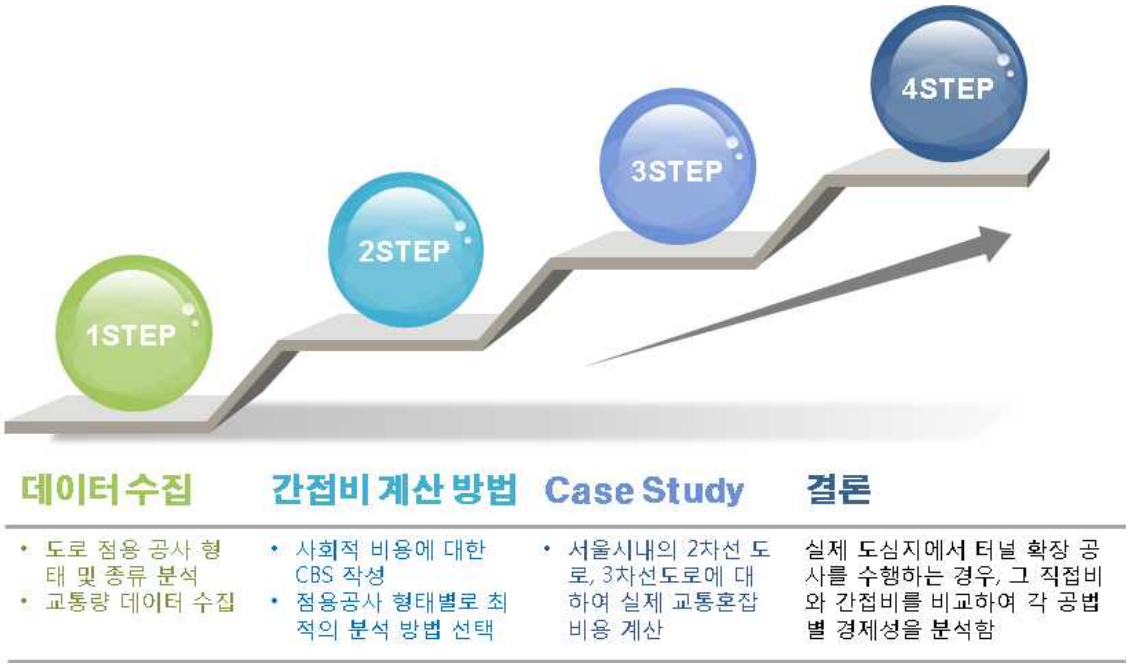


그림 3.120 과업수행 방법

가. 간접비 산출 방식의 선정

본 과업에서 구하고자 하는 간접비는, 교통 통제 여부에 따라 발생하는 사용자의 불편함, 시간지연 및 교통정체에 따른 사회 직·간접적 피해 등을 화폐가치로 환산한 가치이다. 즉, 터널 확장공사기간 동안 직접적으로 발생하는 총공사비를 직접비로 보았을 때, 실제 비용으로 지불되지는 않지만 발생하는 불편함, 사회적, 환경적 피해를 금액으로 환산한 값을 간접비로 정의한다. 따라서 본 과업에서 분석하고자 하는 신 공법을 적용했을 경우와 안했을 경우, 공사기간동안 발생한 피해비용도 합산하여 총 비용으로 계산하여 비교하고자 한다.

국내에서 이루어지는 연구 및 프로젝트에 대한 경제성분석은 대부분 한국개발연구원에서 제시하는 예비타당성조사 지침을 따라 이루어지나, 본 과업에서 대상으로 하는 간접비 항목은 교통이 통제된 상태에서 발생하는 사용자 피해 비용 및 사회적 비용이므로 적용성이 떨어진다. 또한 지금까지 터널 확장공사에 따른 교통 통제에 대한 간접비 산출 방식에 대한 연구는 뚜렷하게 제시된 방법이 없으므로, 도로 이용에 따른 사용자 비용 산출방법에 대한 선행연구 조사를 통하여 간접비 산출방식을 선정하였다.

교통이 통제된 상태에 대한 사용자 비용 및 사회적비용을 고려한 간접비 산출을 위해서는 일반적으로 대상 지역에 대한 차종별 교통량 데이터 통계 자료 및 분석 대상지역에 대한 터널 길이, 우회거리 길이, 통행 속도 등의 교통 통계 상세 자료가 필요하다. 그러나 현재 분석 대상 지역에 대하여 구할 수 있는 교통 통계자료는 한정적이므로, 간접비 산출 방식을 선정

하는 데 있어서 데이터 확보 가능 여부를 고려하여야 한다.

또한, 본 과업의 목적이 신 공법과 기존 공법을 비교하는 것이므로, 편익은 따로 산출하지 않는다. 이는 본 과업에서 고려하는 분석 기간은 터널 확장 공사기간, 즉 교통통제 기간에 대해서만 각 공법별 발생 비용을 고려하기 때문에, 공사 이후에 발생하는 교통흐름은 동일하게 보고, 이에 따라 발생하는 편익은 동일하다고 가정하여, 따로 계산하지 않는다.

선행연구 조사 결과는 다음과 같니 총 6 가지로 이루어져있다. 각각에 대한 선행연구 조사 내용에 대한 요약과, 본 과업에 적용에 있어서 문제점을 고려하면 다음과 같다.

(1) KOBMS모델을 적용한 사용자비용 산출 방법

건설교통부에서 국내 터널을 포함한 교량관리시스템에 적용하기 위한 사용자 비용 연구를 수행하였는데, 이 연구에서는 사용자비용에 적용할 수 있는 교량관리 시스템의 정보가 우회거리 밖에 없기 때문에 사용자비용을 연료소모비에 따른 차량운행비용과 우회로 인한 시간비용의 합으로 정의하였으며, 다음과 같이 수식화 하였다.

$$\text{총 사용자비용(원/일)} = \sum[\text{차량운행비용단가 } j(\text{원}/km) \times \text{우회거리}(km) + \text{시간} \\ \text{비용단가(원}/hr) \times \text{우회시간}(hr)] \times \text{평균 우회교통량(대/일)}$$

여기서 j: 차종

이 연구에서 고려한 가정은 다음과 같다. 교량의 사용자비용은 교량을 우회할 경우에만 발생하는 것으로 가정하며, 교량의 우회는 통행하중 제한으로 인하여 발생한다. 차량운행비용 중 고정비용은 차량의 운행여부와 관계가 없는 비용으로 우회로 인해서 변하하지 않으므로 교량관리시스템의 사용자비용에서는 고려하지 않았다. 가변비용 중 연료소모비 이외의 항목은 매우 작은 비중을 차지하고 있으므로 사용자비용의 항목에서 고려하지 않았다. 우회할 경우에 교통사고의 증감은 주변여건에 따라 매우 다를 수 있으므로, 고려하지 않았다.

KOBMS모델은 교량을 대상으로 하였지만, 사용자 비용을 구하는 과정에서 차량을 우회에 따라 발생하는 사용자의 피해비용을 계산하였기 때문에, 터널에서 우회에 따라 발생하는 사용자 비용과 동일하다고 볼 수 있다. 다만, 교량의 우회를 하중제한만으로 제한하였고, 사용자비용을 차량이 교량을 우회할 경우에만 발생하는 것으로 가정하였기 때문에 매우 제한적인 모형이라고 판단된다. 또한 우회가 발생하는 경우도 차량의 하중제한에 의해 발생하는 값이기 때문에, 전체 차량이 통행하지 못하여 모든 차량이 우회하는 경우에 발생하는 사용자비용은 그 성격이 다를 수 있다.

사용자 비용 산출로 오직 차량 운행비용 단가만을 적용하여 계산하여 매우 간단하다. KOBMS 모델 자체는 교량에 적용하기 위하여 만들어졌으나, 터널의 경우와 똑같이 차량 진입 통제에 따라 우회로를 선택하는 방법만을 가정하였기 때문에 활용이 가능할 것으로 보인다. 그러나 KOBMS 모델에서 고려하는 차량 통제가 차량의 하중에 의해 발생하는 값이기 때문에, 모든 차량이 우회하는 경우에 발생하는 사용자 비용은 그 성격이 다를 수 있으며, 사용자비용에서 다양한 사회 직·간접적 피해비용이 아닌, 차량운행비용만 고려하였다는 점에서, 매우 단순한 형태로 나타날 것으로 보인다. 따라서 본 과업에서의 간접비 산출에 적용하기 어려울 것으로 분석되었다.

(2) Ehlen/Marshall 함수를 활용한 사용자비용 산출방법

사용자 비용은 크게 다음과 같은 항목으로서 차량 운행비용, 시간지연비용, 사고비용 뿐만 아니라 도로이용에 불편함 및 환경영향에 의한 추가비용으로 구성되어 있으며, 통상 차량운행비용 (VOC) 시간지연비용(TDC) 사고비용(AC)로 사용자 비용이 산정된다.

$$Cu = VOC + TDC + AC$$

이를 Ehlen/Marshall (1996)의 함수 중 운행의 지연을 고려한 수정모델만을 산출하여 VOC 및 TDC를 산정하면 다음과 같이 계산할 수 있다.

① 공사작업으로 인한 차량의 운행 지연으로 발생되는 비용

$$VOC = \frac{L}{S} \times ADT \times N \times r - \frac{L_n}{S_n} \times ADT_n \times N \times r_n$$

여기서, L, L_n= 우회, 정상상태의 도로 길이

S, S_n= 우회, 정상상태의 교통속도

ADT, ADT_{n} = 우회, 정상상태의 평균 일일 교통량

N = 공사기간

r, r_n = 우회, 정상태에서의 차량운행비용의 가중평균

② 차량의 운행이 지연됨으로써 운전자의 시간에 대해 발생되는 비용

$$TDC = \frac{L}{S} \times ADT \times N \times \omega - \frac{L_n}{S_n} \times ADT_n \times N \times \omega_n$$

여기서, L, = 지연, 정상상태의 도로길이

S, = 지연, 정상상태의 교통속도

ADT, ADT_n= 지연, 정상상태의 평균 일일 교통량

N = 공사기간

ω, ω_n = 지연, 정상태에서의 시간지연비용의 가중평균

서울지역과 같이 교통망으로 형성된 복잡한 지역에서는 차량통제 시 교통의 흐름이 매우 복잡하므로 보다 엄밀한 사용자비용의 예측을 위해서는 별도의 광범위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 일반적으로 교량에 적용할 수 있는 방법을 NIST 모델과 교통개발연구원의 사용자비용 단가를 적용하여 추정할 수 있도록 하였다.

따라서 터널 점용공사 수행으로 인한 시간지연비용은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{TD} = (VOC + TDC) \cdot time \cdot \cdots$$

$C_{TD=}$ 시간지연비용

VOC=운행지연비용

TDC=시간지체비용

Time=공사 수행으로 인한 도로 점용시간

선행연구 분석 결과, 사용자비용 항목으로서 차량운행비용, 시간지연비용, 사고비용을 고려하고 있다. 이 중 사고비용에 대한 데이터의 확보가 어려움에 따라 사고비용은 제외되었으며, 차량운행비용과 시간지연비용 산출을 위해 Ehlen/Marshall 함수를 적용하였다. 이때 각각 차량운행비용, 시간지연비용에 대한 가중평균값이 필요하다. 이를 위해서는 충분한 양의 데이터가 필요하나, 본 과업에서 시간지연비용, 차량운행비용에 대하여 각각 일일 교통량에 따른 데이터만 구할 수 있어서, 적용할 수 없는 것으로 분류하였다.

(3) EMME/2 모델을 활용하여 Network 분석을 통해 사용자 비용 산출하는 방법

도로터널의 생애주기 비용을 구하는데 있어서, 지체비용을 구하기 위해서 활용한 방법이 EMME/2 프로그램을 활용하여 교통량을 분석하고, 이를 통해 교통지체 비용을 산정하는 것이다. 이러한 교통흐름에 대한 비용 산출과정은 그림 3.121에 나타나 있다.

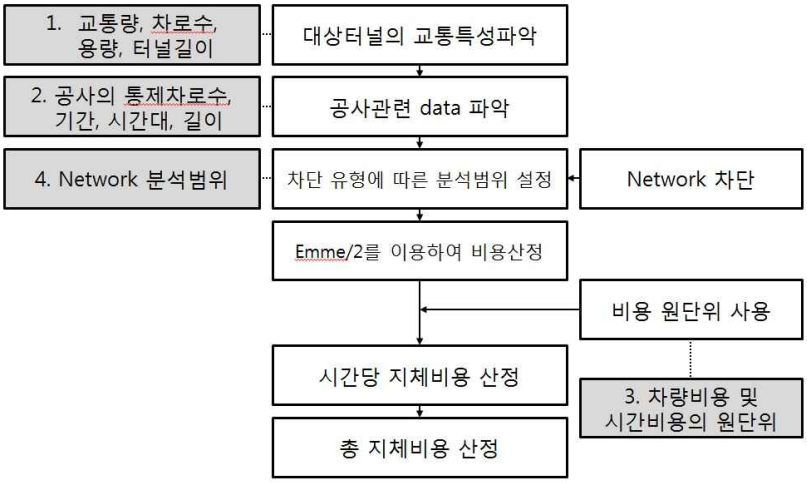


그림 3.121 지체비용 산정 흐름도(송윤섭, 2005)

여기서, EMME/2(Equilibre Multimodal, Multimodal Equilibrium)란 다수단도시교통계획시스템(Multi Modal Transportation Planning System)으로 교통수요예측시 사용되어지는 전통적인 4단계기법을 구현한 소프트웨어이다 (이창렬, 2003). EMME/2는 하나의 데이터뱅크(Data bank)안에서 자료를 저장 및 관리하고 교통계획모형을 실행시키는 구조를 가지고 있다. 사용자는 자신의 수행하는 작업에 적합한 데이터 뱅크를 만들고 이 안에서 작업을 수행해야 한다. EMME/2 데이터는 크게 링크자료와 노드자료로 구분되어지며, 교통수단에 따라 링크자료와 노드 자료의 형식이 구분되어 진다. 데이터뱅크는 시나리오별로 그림과 같이 네트워크(Network), 매트릭스(Matrix), 함수(Fuction)등의 세가지로 구성된다. 네트워크뱅크는 노드, 링크, 대준노선 등 네트워크와 관련된 정보를 저장하는 공간이며 매트릭스 뱅크는 사회경제지표, 기·종점 통행량 등을 저장하는 공간이다. 이외에도 네트워크 분석에 필요한 지체함수(Delay function), 회전저항(Turn penality) 등은 함수뱅크에 저장된다.

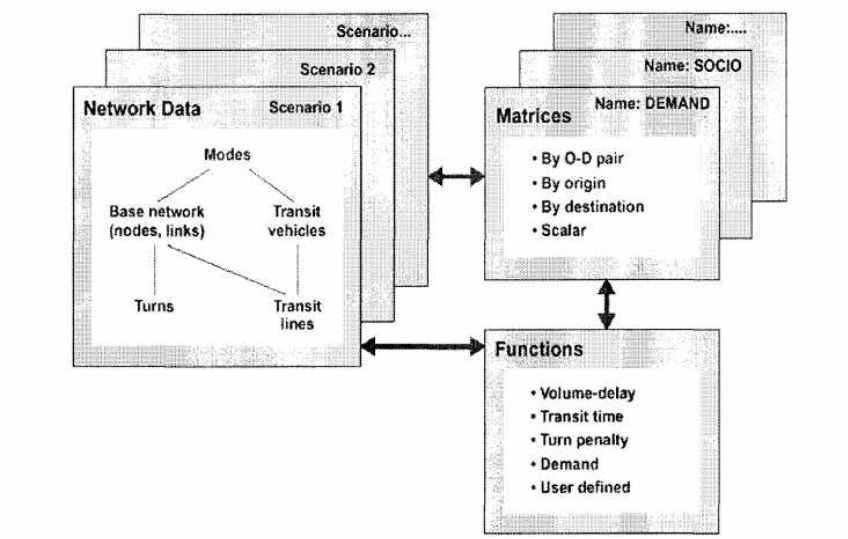


그림 3.122 EMME/2 데이터뱅크의 구성

이러한 EMME/2를 활용하여 분석범위를 설정하고, Network로 사용자 비용을 산출 하는 방법이 있다. 그러나 이러한 EMME/2를 활용한 분석을 위해서는 각 교통흐름 지점별 IO/D 값 및 교통량 데이터가 필요하며, 이러한 분석을 위해 걸리는 시간이 방대하므로 본 과업에서 필요로 하는 사용자비용 분석을 위해서는 Network로 분석이 굳이 필요하지 않다. 즉, 분석 범위를 우회도로를 포함한 대상 터널지역에 국한하여, 우회도로 개념으로 사용자 비용을 산정하는 경우, 훨씬 간편하고 직접적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

서울지역과 같이 교통망이 복잡한 곳에서는 Network 분석을 통해 교통량을 산출하고, 이에 따른 사용자 비용을 산출하는 방법이 가장 정확한 것으로 알려져 있다. 그러나 본 과업에서 분석한 결과, 이러한 EMME/2 모델을 사용하기 위해서는 전문 소프트웨어가 필요하며, 각각 대상 지역별 O/D 및 통제 상황에 대한 고려가 필요하다. 그러나 기존공법과 신공법의 적용에 따른 경제성을 비교하고자 하는 본 과업의 목적상, 단지 사회적 비용 분석뿐만 아니라 총공사비까지 계산해야하는 현실적 문제에 의하여 Network 차원에서 교통량을 분석할 필요는 없는 것으로 판단된다. 또한 현재 대상 터널 지역에 대한 충분한 교통 데이터를 확보할 수 없기 때문에, 사실상 Network차원의 교통량 분석에 따라 사용자 비용을 산출하는 것은 불가능하다.

(4) 수정된 QUEWZ모형을 활용하여 교통 차단으로 인한 지체비용 산정

QUEWZ(Queue and User Cost Evaluation of Work Zones)모형은 미국 텍사스에서 개발된 모형으로 연속류 구간에서 공사로 인한 지체를 분석하는 모형이다. 주요 내용은 용량과

속도를 추정하고, 이를 토대로 지체길이를 산정하며, 지체로 인한 차량운행비의 추가분을 산정하여 총 지체비용을 도출하는 과정을 거친다.

- 지체도 산정

교통지체비용을 산정하기 위해서는 공사 지점의 도로용량을 산정하고 교통량을 추정하여 교통량 대 용량비(V/C)를 산출하고, 이를 이용하여 공사전의 지·정체와 공사 중 차량의 지·정체를 산정하여 그 차이로 지체도를 산정한다.

점용공사로 인한 지체도 = (공사 중 지체도) - (공사 전 지체도)

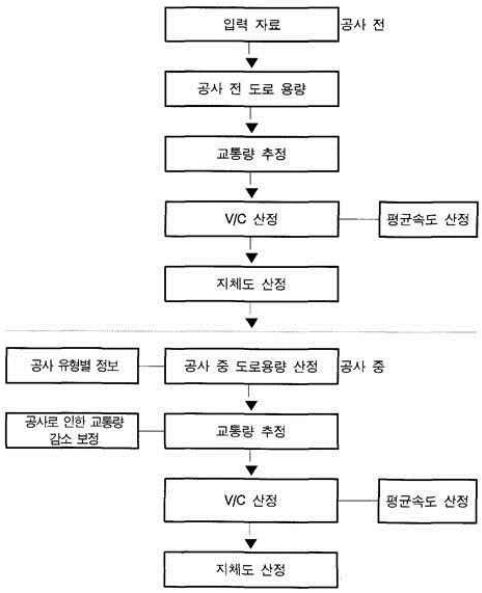


그림 3.123 지체도 산정 흐름도

점용공사로 발생하는 교통지체는 크게 보면 3가지로 나눌 수 있다. 첫째는 도로 및 터널의 점용공사로 인한 용량감소로 인하여 공사 지점의 상류부에서 발생하는 지체이다. 둘째는 공사구간에서 발생하는 지체이다. 공사구간에서 발생하는 지체란 대부분의 도로점용공사의 경우 일부분의 차로를 차단하게 되고, 많은 차량이 적은 용량의 공사구간을 이용함에 따른 속도저하로 인한 지체를 의미한다. 셋째는 공사구간을 빠져나와 정상속도로 회복되는 동안 발생하는 지체이다.

공사구간에서는 대부분의 경우 속도는 공사구간에의 용량상태에서의 속도 이상으로 올라가지 못한다. 공사구간이 끝나면 차량들의 속도는 다시 원래 상태로 돌아가게 된다. 즉, 공사가 없을 경우의 속도와 공사 중 속도의 차이가 공사로 인한 속도의 차이, 즉 지체라 할 수

있다.

① 공사구간 진입 지체 산정모형

공사구간 진입지체란 점용공사가 기존의 교통류에 영향을 미치게 되고 이로 인하여 공사구간 전 상류부에서 발생하게 되는 지체를 의미한다. 대부분의 경우 도로 및 터널을 점용하는 공사가 진행 중일 때에는 지체가 발생하게 되는데, 이는 교통량 및 점용공사의 유형에 따라 다르다. 일반적으로 공사구간에서는 공사구간에 진입하는 교통량에 따라 정체가 발생할 수도 있으며, 약간의 속도 저하만 일으킬 수도 있다.

② 공사구간 지체모형

공사구간 안에서 발생하는 지체는 속도저하에 따른 지체이다. 여기에서 속도저하란 공사가 없을 때 그 구간의 속도에 비하여 공사 중 일 때 공사로 인하여 속도가 감소하는 것을 의미한다. 공사구간 안에서의 차량의 속도는 크게 두 가지로 분류된다. 그 하나는 차량의 흐름이 용량상태일 때이고, 또 하나는 차량 흐름의 상태가 용량 이하일 경우이다.

③ 지체와해 모형

도로 및 터널 점용공사로 인하여 발생한 지체 및 대기행렬은 시간이 지남에 따라 와해되게 된다. 가장 대표적인 이유는 공사구간 상류부의 진입교통량의 감소에 의한 것이며, 또 다른 이유는 도로 및 터널 점용공사가 끝나서 용량이 원래대로 회복되어 대기행렬이 소멸되는 것이다.

- 지체비용 산정

교통지체비용이란 도로점용공사로 인하여 추가로 발생하는 교통지체에 대한 사회적 비용을 의미한다. 도로점용공사로 인하여 추가로 발생하는 교통지체란 공사전과 공사 중 공사 지점에서 발생하는 교통지체의 차이를 의미한다. 여기에서는 공사전의 차량 지·정체와 공사 중 차량의 지·정체를 정량적으로 산정하여 그 차이를 이용하여 교통지체비용을 산정한다. 즉, 교통량에 따른 지체도는 앞의 QUEWZ모형에 따라 산정하여, 다음 그림 3.34와 같은 방법으로 지체비용을 산정한다.

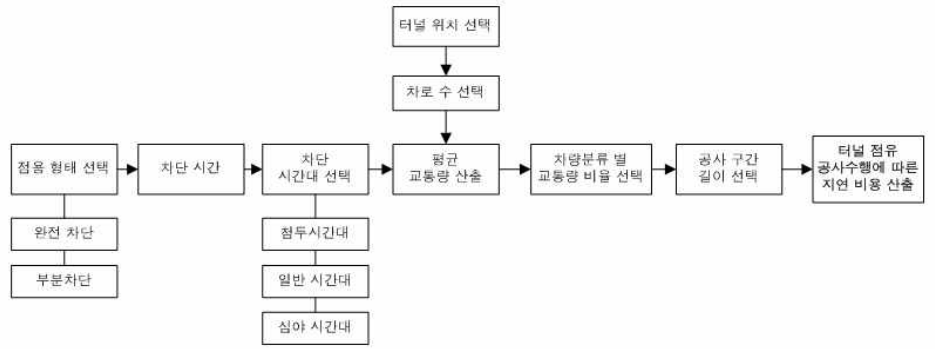


그림 3.124 비용 산정 FLOW

① 용량 산정

도로점용공사로 인한 교통 지체도를 산정하기 위해서는 교통량과 함께 그 도로의 용량 또한 중요한 요소이다. 도로의 용량은 도로의 여러 가지 물리적 변수에 따라 달라진다. 가장 영향력 있는 변수는 차로수이다. 이외에도 중차량 비율, 지형 및 차로폭 등에 따라 용량은 변화한다. 특별 및 광역시, 일반 도시부, 지방부의 용량산정방법은 고속국도와 같으며, 단지 설계속도에 따른 용량이 다를 뿐이다. 다차로 도로인 경우에는 2,000pcphpl, 2차로에 대해서는 3,200pcphpl 용량을 사용하도록 한다.

고속국도를 제외한 경우의 중차량 보정계수는 0.86을 적용하였다. 이를 이용하여 방향별 차로수에 따른 용량을 산출하면 다음과 같다.

표 3.67 다차로 도로의 방향별 용량

차로수(편도)	계산식	방향별 용량(대/시)
1차로 용량	2,000(pcphpl)×1×1.0×0.86	1,720
2차로 용량	2,000(pcphpl)×2×1.0×0.86	3,440
3차로 용량	2,000(pcphpl)×3×1.0×0.86	5,160
4차로 용량	2,000(pcphpl)×4×1.0×0.86	6,880
5차로 용량	2,000(pcphpl)×5×1.0×0.86	8,600
6차로 용량	2,000(pcphpl)×6×1.0×0.86	10,320

용량 산정 시 공사 지점 및 구간의 중차량 보정계수 및 지형적인 자료가 따로 있을 경우

에는 그 자료를 이용하도록 하고, 그렇지 않을 경우에는 중차량 비율은 33%, 지형은 평지 100%를 사용한다. 2차로에 대해서는 용량 산정 시에는 방향별 교통량 분포를 고려해야 하므로 양방향을 한꺼번에 고려하여 산정한다.

표 3.68 2차로 방향별 분포 보정계수

방향별 분포	50/50	60/40	70/30	80/20	90/10	100/0
보정계수	1.00	0.94	0.88	0.81	0.75	0.69

표 3.69 2차로 도로의 방향별 용량

차로수	계산식	용량(대/시)	
		양방향	방향별
2차로 용량	3,200(pcphpl)×0.88×0.86×0.94	2,276	1,138

② 시간당 교통지체비용 산정

대부분의 경우 터널상의 도로점용공사로 인한 교통지체는 공사 준비 시각, 즉 실질적으로 교통의 흐름에 영향을 주는 시각부터 발생하여 장시간에 걸쳐 이루어지게 된다. 이러한 교통지체는 시간별 교통량에 따라 변하게 된다.

이와 같은 조건을 고려한 교통지체비용의 최소산정시간은 1시간 단위로 하는 것을 원칙으로 한다. 공사시작 시각부터 교통지체를 고려하는 점용공사는 거의 모든 경우 1시간 이상의 소요시간을 요구하므로 최소산정시간을 1시간으로 정하는 것은 현실적으로 무리가 없는 것으로 판단된다.

③ 총 사용자 비용 산정

대부분의 경우 점용공사로 인한 교통지체는 공사 준비 시각, 즉 실질적으로 교통의 흐름에 영향을 주는 시각부터 발생하여 장시간에 걸쳐 이루어지게 된다. 이러한 교통지체는 시간별 교통량에 따라 변하게 된다.

이와 같은 조건을 고려한 교통지체비용의 최소산정시간은 1시간 단위로 하는 것을 원칙으로 한다. 공사시작 시각부터 교통지체를 고려하는 도로점용공사는 거의 모든 경우 1시간 이상의 소요시간을 요구하므로 최소산정시간을 1시간으로 정하였다. 시간대별 개념을 도입하여

하루 중 공사시간 전체에 대한 교통지체비용을 산출하며, 공사기간이 1일을 초과하는 경우는 시간대별 교통지체비용을 합하여 1일 교통지체비용을 산정하고 잔여시간에 대하여는 시간에 따라 산정한다.

$$24\text{시간교통지체비용} = \sum_{i=1}^{3}[(\text{시간대별시간당교통지체비용})i \times (\text{시간대별시간})i]$$

여기서, i = 시간대(첨두시, 비첨두시, 야간시)

이 3개의 시간당 교통지체비용에 각각의 시간대별 시간을 곱하면 시간대별 교통지체비용이 된다. 공사기간이 24시간 미만일 경우에는 해당 시간동안의 교통지체비용만 산정하면 된다. 만약 공사기간이 수일 수 시간 동안 지속될 경우에는 앞에서 설명한 방법으로 1일치를 산정하여 날짜수를 곱하여 수일치를 산정하고, 나머지 수 시간 동안의 교통지체비용을 산정하면 된다. 공사기간이 시간으로 정확히 떨어지지 않을 경우에는 30분미만은 무시하고, 30분 이상은 1시간으로 간주한다.

총 지체도 = [(1)×시간수] + [(2×시간수] + [(3)×시간수]

여기서, (1) : 야간시간대 지체비용(원)
(2) : 비첨두시간대 지체비용(원)
(3) : 첨두시간대 지체비용(원)

즉, 점용공사로 인한 교통지체는 크게 진입구간 지체, 공사구간 지체와 속도회복구간에서의 지체로 정의된다. 각각의 지체에 대하여 지체비용을 산정하여 합산 것을 시간당 총 지체비용으로 한다. 교통량이 교통용량을 초과하여 지체가 발생할 때의 비용과 교통용량 이하일 때 단지 속도가 감소되어 발생하는 비용을 산정하는 모형을 구축하였다. 점용공사로 인한 교통지체에 따른 발생비용은 다음 표 3.68과 같다.

표 3.70 점용공사로 인한 지체비용의 구성

구분	발생비용	
진입구간	시간손실비용	$CQV_{WZ}=(DQUE_i)\times(VLT)$
	차량운행비용	$CQO_{WZ}=(\frac{VL}{1000})\times(QUEL)\times(QVOC_c\times PTC\times QVOC_t\times PTT)$
공사구간	시간손실비용	$CSV_{WZ}=(CLL)\times(\frac{1}{SP_{WZ}}-\frac{1}{SP_{ap}})\times(VL)\times VLT)$
	차량운행비용	$CSO_{WZ}=(\frac{VL}{1000})\times(QUEL)\times(VOC_C\times PTC\times VOC_t\times PTT)$
회복구간	시간손실비용	$CV_R=(DSC)\times(\frac{2}{SP_{ap}+SP_{mn}}-\frac{1}{SP_{ap}})\times(VL)\times(VLT)$
	차량운행비용	$CQO_R=(\frac{VL}{1000})\times(3\times QUEL)\times(6.0223\times PTC+31.8151\times PTT)$ $CSO_R=(\frac{VL}{1000})\times(PTC\times SPCC+PTT\times SPCT)$

여기서, CQV_{WZ} = 진입구간에서의 시간손실비용(원/시)

DQUE_{i} = 시간당 평균지체(대/시)

VLT = 차량 1대당 시간가치(원/대)

CQO_{WZ} = 진입구간에서 차량운행비용(원/시)

QUEL = 평균 차로당 지체길이(km/시/차로)

QVOC_{C} = 지체발생시 진입구간에서 승용차 속도차로 인한 비용(원/시)

PTC = 전체 교통량 중 승용차의 비율(%)

QVOC_{t} = 지체발생시 진입구간에서 화물차 속도차로 인한 비용(원/시)

PTT = 전체 교통량 중 화물차 비율(%)

CSV = 공사구간에서의 시간손실비용(원/시)

CLL = 공사구간 길이(m)

SPwz = 공사구간에서의 지체가 형성되었을 때 평균속도(km/h)

SPap = 공사구간으로의 접근속도(km/h)

CSO_{WZ} = 공사구간에서의 차량운행비용(원/시)

VOC_{C} = 공사구간에서의 승용차의 속도차로 인한 비용(원/시)

VOC_{t} = 공사구간에서의 화물차의 속도차로 인한 비용(원/시)

CV_{R} = 회복구간에서의 시간손실비용(원/시)

DSC = 속도회복 구간길이(km)

SP_{mn} = 공사구간에서의 최소속도(km/h)

CQO_{R} = 회복구간에서의 속도감소로 인한 차량운행비용(원/시)

CSO_{R} = 회복구간에서의 지체발생으로 인한 차량운행비용(원/시)

SPCC = 회복구간에서 승용차의 속도감소로 인한 비용(원/시)

SPCT = 회복구간에서 화물차의 속도감소로 인한 비용(원/시)

일반 도시부와 지방부의 경우 QUEWZ모형의 지체비용 산정방법을 이용하여 산정하며, 부분차단일 경우에는 해당 터널 축만을 대상으로 하여 QUEWZ를 이용하여 지체비용을 산정한다. 완전차단의 경우에는 우회도로의 기존 교통량에 해당 터널의 우회하는 교통량의 증가분으로 인한 지체와 우회도로 인해 발생하는 추가거리로 인한 지체를 모두 합해서 비용을 산정해야 한다.

Network차원에서 교통지체를 산출할 수 없으므로, 축방향 모델로 산정한 일반 도로부 의 교통지체를 QUEWZ모형으로 적용하여 산출하는 방법에 대하여 분석하였다. 그러나 이러한 QUEWZ모형을 적용하기 위해서는 진입구간, 공사구간, 회복구간별로 지체비용을 나누어 산출하는 방법으로서, 각 구간별 속도, 길이에 대한 데이터 필요하다. 그러나 현재 분석 대상 터널이 실제 공사를 수행하는 지역이 아닐뿐더러, 진입구간, 회복구간을 결정하는 데 있어서, 구간 길이 뿐만 아니라 속도를 측정할 수 없기 때문에 적용 할 수 없는 것으로 분석되었다.

(5) 한국교통연구원의 교통혼잡비용 산출방법을 활용하여 사용자 비용을 계산하는 방법

한국교통연구원에서 제시하고 있는 교통혼잡비용은 크게 차량운행비용과 시간가치비용으로 구분되며, 차량운행비용은 다시 고정비와 변동비로 구분된다. 고정비에는 운전자의 인건비, 차량의 감가상각비, 보험료, 각종 제세공과금 등이 포함된다. 그리고 변동비에는 연료소모비, 차량의 유지정비비, 엔진오일비, 그리고 타이어마모비 등이 있지만, 실제로 계산하기 곤란하므로 연료소모비를 제외한 나머지 비용의 계산은 제외된다.

교통혼잡비용에서 가장 큰 부분을 차지하고 있는 시간가치비용은 교통 혼잡으로 인하여 발생되는 손실시간을 화폐단위화한 것이다. 즉, 차량의 운행속도가 정상속도에 비해 느리게 운행되어 지체된 시간만큼 승용차의 운전자가 가질 수 있는 시간에 대한 기회비용이다.



주: □부분은 실제 혼잡비용 계산에서 제외되는 항목임.

그림 3.125 교통혼잡비용의 구성 요소

차량 운행비용중 고정비는 다음과 같다

- 인건비 : 운전자 1인당 월 평균 급여로서 업무용 승용차, 소형 버스, 소형 화물차는 『2005년 건설교통 통계연보』(건설교통부, 2006)의 자료를 토대로 산출하였고, 대형버스와 화물차의 경우에는 버스조합 및 화물차 연합회를 통해 차종별 운전자의 평균 임금 및 시간당 인건비를 산출하였다.
- 감가상각비 : 차종별 감가상각비는 차종별 차량기준을 설정하고, 이에 대해 일반적으로 사용되는 정액법을 적용하여 산출하였다. 다음에서 제시되는 유류비와 마찬가지로 부가세를 제외한 가격으로 추정하고 있다.

보험료 : 각 차종, 연식, 운전자의 연령이나 경력 등 다양한 요소에 의해 보험료가 달라질 수 있으나, 한국교통연구원의 연구에서는 신차 기준으로 운전자의 연령은 26세 이상이며, 경력 5년의 무사고 운전자에 대한 보험료율을 적용하여 산출하였다.

- 제세공과금 : 감가상각비, 보험료와 같은 방법으로 기준차량을 대상으로 매년 부과되는 세금을 기준으로 산출하였다.

차량 운행비용중 변동비용은 교통 혼잡으로 인해 추가적으로 발생하는 연료비, 유지정비비, 엔진오일비, 타이어 마모비 등으로 구성된다. 그러나 연료비를 제외한 항복은 그 절대가액이 적을 뿐만 아니라 교통 혼잡에 따른 비용의 변화폭이 작으므로 제외하여 산출하고 있다. 교통 혼잡으로 인한 차량의 운행속도 감소로 인한 연료소모비 증가분을 산출하기 위해서는 유류가격과 차량통행 속도에 따른 차종별 연료소모량을 알아야 한다.

차종별·속도별 연료소모량의 산출에 있어 지금까지 대부분의 연구는 한국교통연구원에서 1987년에 수행한 연구와 에너지경제연구원에서 1991년 수행한 연구에서 도출된 연료소모에

대한 회귀방정식의 결과를 인용하여 차종별 운행속도별 연료소모량을 산출하고 있다.

$$G_A(S) = (4.0031 + 0.41167S - 0.002741S^2)^{-1}$$

$$G_B(S) = -0.000062 + \frac{7.539}{S} + 0.0000123S^2$$

$$G_T(S) = -0.000912 + \frac{4865}{S} + 0.00001602S^2$$

여기에서 $G_A(S), G_B(S), G_T(S)$는 각각 승용차, 버스, 화물차의 연료소모량을 S는 차량운행속도를 뜻한다.

시간가치비용에 대한 산정은 교통혼잡비용의 추정 중 가장 어려운 부분이다. 시간가치비용은 실제 눈에 보이지 않는 가치로서 개개인이 피부로는 느끼기 어렵지만, 교통 혼잡에 따른 경제활동의 손실분을 화폐 가치로 환산된 것이다. 이는 교통과 같은 공공부문의 공공시설투자에 대한 타당성 평가를 위한 경제성 분석에 있어 중요한 의미를 가지고 있다. 예를 들어, 도로를 신설 또는 확장으로 인해 교통시설용량이 증가하여 차량의 운행속도가 빨라지게 되었다면, 이는 시간가치 편익이 발생하는 것으로 간주한다. 즉, 시설이용자 개개인의 시간가치 비용의 감소는 시설투자에 대한 편익으로 계산되기 때문이다.

그러나 시간가치에 대한 편익의 계산은 계량화하기 어려울 뿐만 아니라 적용하는 방식과 변수에 따라 상당부분 차이가 나므로 논란의 여지가 많다. 한국교통연구원의 연구에서는 기획예산처에서 마련한 『도로부분사업의 예비타당성조사 표준지침』을 적용하여 시간가치를 산정하고 있다.

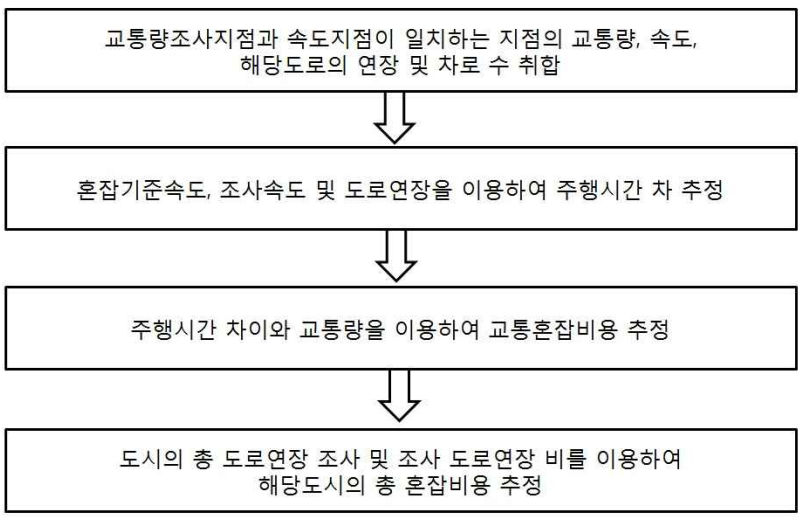


그림 3.126 도시부 도로 교통혼잡비용 추정 방법의 절차

한국교통연구원에서 제시한 교통혼잡비용 산출방법에서는 차량운행비용, 시간가치비용 두 가지를 구하여 사용자 비용으로 산출한다. 이를, 차량 통제로 인하여 우회도로 사용으로 인한 차량혼잡비용과 시간지연비용으로 고려하여 계산 하는 방법을 고려하였다. 또한, 대부분의 국내 교통 혼잡에 대한 비용 산출 근거, 또는 관련 연구를 위해서 한국교통연구원의 “교통혼잡비용 산출방법”이 널리 활용되고 있으므로, 이에 대한 신뢰도가 높은 것으로 판단된다. 다만, 현재 본 계산방법의 적용을 위해서는 차종별 교통량의 적용이 필요하므로, 이를 해결하기 위한 방법을 고려해야 한다.

(6) 한국개발연구원의 예비타당성 조사 표준지침(KDI)을 활용하여 사용자 비용을 계산하는 방법

한국개발연구원에서 제시한 도로·철도 부문 사업의 예비타당성 조사 표준지침 수정·보완 연구 보고서에 따르면, 도로이용에 따른 사용자 편익은 총 다섯 가지 항목이 제시되어 있다. 그러나 교통사고 절감편익, 주치비용 절감편익은 본 과업 대상과 적합하지 않으므로 제외하고 총 세 가지 도로 비용편익 계산 방법이 제시되어 있다.

차량운행비용 절감편익은 교통시설사업 시행 시 통행거리가 단축되고 통행속도가 증가함에 따라 차량운행비용이 감소되는 효과가 발생한다. 차량운행비용은 통상 고정비와 변동비로 구분된다. 고정비는 차량의 감가상각비, 보험료 및 제세공과금으로 구성되고, 변동비는 유류비, 엔진오일비, 타이어 마모비, 유지관리비 등으로 구성된다. 이 가운데 제세공과금은 단순한 이전지출로서 경제적 비용이 아니고, 보험료는 교통사고의 발생 가능성에 대비한 비용으로서 예비타당성조사에서는 교통사고비용을 별도로 산정하므로 차량운행비용 절감편익에서는 제외한다. 따라서 예비타당성조사의 차량운행비용 산정에는 유류비, 엔진오일비, 타이어 마모비, 유지관리비, 감가상각비만을 고려한다.

차량운행비용 절감편익 산정에서 차량운행비용은 분석대상 사업의 직·간접 영향권 내 링크를 대상으로 통행배정작업의 결과로 산출된 주행속도와 교통량을 이용하여 주행속도에 따른 차량운행비용 원단위를 적용하여 산정한다. 즉, 분석 도로망에 부하된 각 링크의 차종별 교통량과 길이를 곱한 결과를 링크 평균 속도에 기초한 차종별 차량운행비용 원단위와 곱하여 개별 링크의 차량운행비용을 산정한다. 다만, 이 경우 고속도로의 주행속도는 통행료를 제외한 순수한 통행시간을 토대로 다시 산정하여야 한다. 그리고 이러한 산정식을 분석 도로망 내에 있는 모든 링크를 대상으로 합한 뒤 사업 미시행 시와 사업 시행 시의 비교된 차액을 운행비용의 절감편익으로 산정한다. 이를 종합하면, 각 분석연도의 차량운행비용 절감편

익(The Valuation of Vehicle Operating Costs Savings: VOCS)은 다음과 같이 표현된다.

$$VOCS = VOC_{\text{사업미시행}} - VOC_{\text{사업시행}}$$

여기서, $VOC = \sum_{l}\sum_{k=1}^{3}(D_{lk} \times VT_k \times 365)$

D_{lk} = 링크별(l), 차종별(k) 대$-km$

VT_k = 차종별(k) 해당 링크 주행속도의 km당 차량운행비용

k = 차종(1 : 승용차, 2 : 버스, 3 : 화물차)

통행시간 절감편익은 교통시설사업을 시행하면 통행자의 교통수단, 통행경로, 통행속도 등 교통패턴의 변화가 발생한다. 이와 같은 통행패턴의 변화는 해당 교통시설을 통행하는 통행자는 물론 주변 교통 네트워크를 이용하는 통행자의 통행시간에도 영향을 미친다. 이러한 영향은 운전자뿐 아니라 함께 승차하고 있는 승객의 통행시간도 달라지는 변화를 가져온다. 즉, 차량속도가 향상되면서 운전자 및 승객의 통행시간이 절감되고, 통행자는 절감된 시간을 다른 목적에 활용할 수 있게 된다. 이처럼 통행시간 절감편익은 통행시간가치에 의하여 결정된다. 통행시간 절감편익 산정에서 통행자의 통행시간 절약에 따른 편익은 기·종점 간결과 또는 링크 교통량을 기준으로 산정할 수 있다. 예비타당성조사에서는 통행배정의 결과로 산출된 직접 영향권 내 링크의 통행시간과 차종별 교통량의 곱을 이용하여 통행시간 절감편익을 산정한다. 즉, 사업 미시행 시와 사업 시행 시에 대해 수단별로 산출된 총통행시간에 차종별 통행시간가치를 적용하여 총통행시간비용을 각각 산출한 후 양자의 차액을 통행시간 절감편익으로 산정한다. 각 분석연도의 통행시간 절감편익(The Valuation of Travel Time Savings: VOTS) 계산식은 다음과 같다.

$$VOT = \sum_{l}\sum_{k=1}^{4}(T_{kl} \times P_k \times Q_{kt} \times 365)$$

T_{kl} = 링크 l의 차종별, 인별 통행시간

P_k = 차종별, 인별 시간가치

Q_{kt} = 링크 l의 차종별, 인별 통행량

k = 차종(1 : 승용차, 2 : 버스, 3 : 화물차), 인(4 : 철도)

환경비용 절감편익은 교통부문 사업의 시행에 따른 환경영향으로는 대기오염, 수질오염, 소음, 진동, 지반침하, 식물 및 동물 등 생태계 영향, 경관 변화, 지구온난화 등을 들 수 있다. 그러나 이러한 다양한 환경의 변화요소에 대해 모두 환경가치를 산정하는 것은 용이한

작업이 아니다. 그 영향의 정도 자체를 파악하는 것이 힘든 경우도 있을 뿐만 아니라 설사 엄밀하게 영향을 파악한다고 해도 이를 경제적 가치로 환산하는 것은 보다 많은 불확실성을 내포하기 때문이다. 따라서 이 중에서도 비교적 영향의 정도가 크고, 환경영향에 대한 평가 및 가치화가 용이한 대기오염과 소음 발생에 초점을 맞추어 환경비용을 산정한다.

대기오염은 자동차와 디젤열차의 배출가스에 의해 발생한다. 대기오염 피해 원으로는 통상 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO2), 아황산가스(SO2), 탄화수소(HC), 질소산화물(NOX) 및 미세먼지(PM) 등이 포함된다. 이들 오염물질의 배출량은 차량의 종류와 성능, 주행상태, 정비 상태, 사용연료, 교통 및 도로 조건 등에 크게 영향을 받으므로 주행여건 개선 시 대기오염을 저감시킬 수 있다.

교통소음의 경우 대부분은 자동차에 의한 것으로서 차종, 차량구조, 주행속도 및 방법, 도로조건 등에 의해 달라진다. 그러나 교통소음은 시간 및 주행패턴에 따라 불규칙하게 변하기 때문에 단순한 물리량에 대한 평가에 큰 의미를 부여하기는 어렵다. 소음으로 인한 피해를 화폐가치화하기 위해서는 소음원별 특성을 파악하고, 시간대별 소음으로 인한 영향을 평가하여야 한다.

대기오염 절감편익 산정에서 대기오염비용은 분석대상 사업의 직·간접 영향권 내 링크를 대상으로 통행배정작업의 결과로 산출된 주행속도와 교통량을 이용하여 주행속도에 따른 대기오염비용 원단위를 적용하여 산정한다. 즉, 분석 도로망에 부하된 각 링크의 차종별 교통량과 길이를 곱한 결과를 링크 평균 속도에 기초한 차종별 대기오염비용 원단위와 곱하여 개별 링크의 대기오염비용을 산정한다. 다만, 이 경우 고속도로의 주행속도는 통행료를 제외한 순수한 통행시간을 토대로 다시 산정하여야 한다. 그리고 이러한 산정식을 분석 도로망 내에 있는 모든 링크를 대상으로 합한 뒤 사업 미시행 시와 사업 시행 시의 비교된 차액을 대기오염의 절감편익으로 산정한다. 이를 종합하면, 각 분석연도의 대기오염비용 절감편익(The Valuation of Pollution Costs Savings: VOPCS)은 다음과 같이 표현된다.

여기서, $VOPC = \sum_{l} \sum_{k=1}^{3} (D_{lk} \times VT_{k} \times 365)$

D_{lk} = 링크별(l), 차종별(k), 대$-km$

VT_{k} = 차종별(k) 해당 링크 주행속도의 km당 대기오염비용

k = 차종(1 : 승용차, 2 : 버스, 3 : 화물차)

한국교통연구원의 교통혼잡비용 산출방법과 마찬가지로, 한국개발연구원의 예비타당성 조

사 표준지침의 데이터가 가장 신뢰도 있는 것으로 판별되었다. 다만 한국개발연구원의 예비타당성 조사 표준지침에서 고려하고 있는 것은 신규 도로 편성에 대한 편익산정을 위한 방법이므로, 이를 수정한 모델을 활용해야 한다. 그러나 교통혼잡비용 산출방법과 마찬가지로 차종별 교통량에 따라 차량혼잡비용과 시간지연비용이 계산되기 때문에, 이에 대한 고려가 필요하다. 또한 한국개발연구원의 예비타당성 조사 표준지침에서는 환경오염에 대한 비용 산출 방법이 제시되어 있기 때문에, 이를 적용하는 방법을 고려할 필요가 있는 것으로 보인다.

표 3.71 선행연구 조사내용 분석

	선행연구 조사 내용	분석 내용 요약	적용 여부
1	KOBMS 모델 적용한 사용자 비용 산출 방법	사용자 비용 산출로 오직 차량 운행 비용 단가만을 적용하였음.	x
2	Ehlen/Marshall 함수를 적용한 사용자 비용 산출 방법	우회, 정상상태에서의 각 비용별 가중평균값이 시간대별로 필요함.	x
3	대상지역 Network 분석으로 EMME/2를 활용하여 교통량 산출하고, 사용자비용 산출	Network차원에서 대상지역의 교통흐름에 따라 사용자 비용을 산출하는 방법으로, 값비싼 소프트웨어 프로그램이 필요함	x
4	교통량 산출을 위하여 QUEWZ 모형 활용한 방법	진입구간, 공사구간, 회복구간별로 지체비용을 나누어 산출하는 방법으로서, 각 구간별 속도, 길이에 대한 데이터 필요함	x
5	한국교통연구원의 교통혼잡비용 추정방법에 의해 사용자비용 산출	차량 종류별로 지연으로 인한 혼잡비용, 시간지체비용을 고려하여 사용자 비용을 산출	o
6	한국개발연구원의 도로 예비타당성 조사 방법에 의해 사용자비용 산출	총 5가지의 사용자편익에 대한 식을 수정하여, 차량통행비용, 시간지연비용, 환경영향에 대해서 적용가능	o

앞 절의 선행연구 분석 결과에 따라, 도심지 터널 확장 공사에 따른 도로 점용에 의해 교통 혼잡이 발생할 경우에 대한 사회적 비용분석 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째

로 교통개발연구원에서 발표한 교통혼잡비용 예측방법을 이용한 방법과, 한국개발연구원에서 발표한 사용자 비용 계산 방법이다. 본 과업에서는 한국교통연구원에서 제시한 교통혼잡비용과 한국개발연구원의 비용편익 산정결과를 토대로 간접비 산출방법을 정리하여 적용하기로 하여, 이를 정리하면 그림 3.127과 같다.

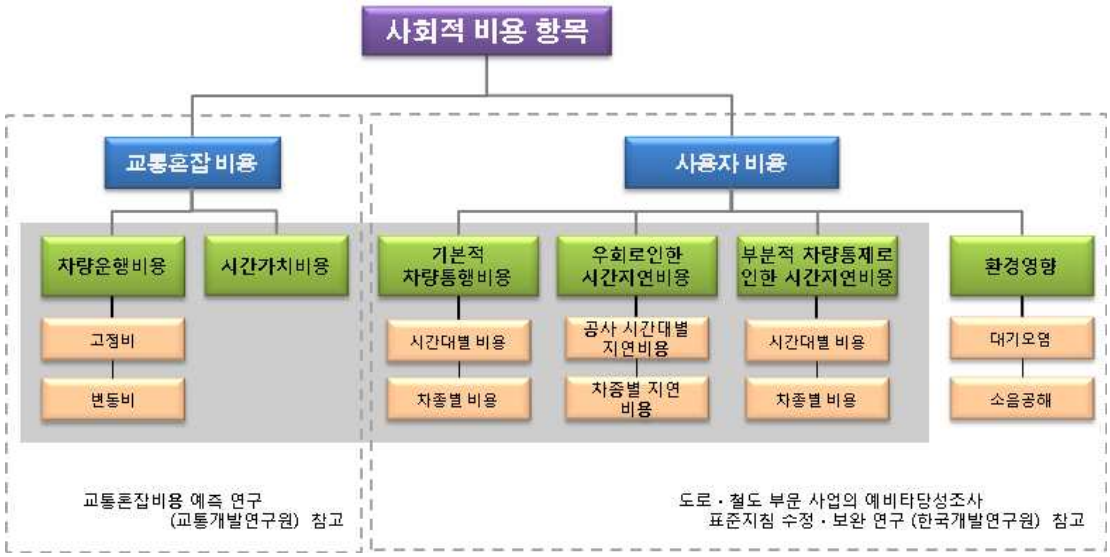


그림 3.127 간접비 산출 방법 분류

이중 회색으로 칠해져 있는 부분에 해당하는, 교통혼잡비용과 사용자 비용의 세부항목이 상당부분 겹치기 때문에 이를 고려하여 사용자 비용을 계산하는 방법을 정리하면, 그림 3.128과 같다.

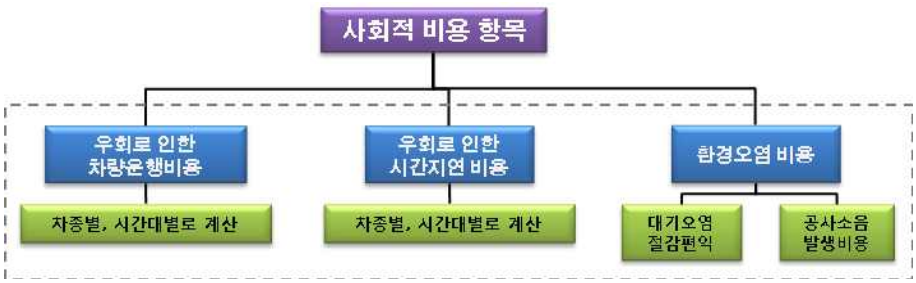


그림 3.128 최종 간접비 산출 방법 분류

앞선 분류방법에 따라서 최종적으로 본 연구에서 활용하게 되는 사회적 비용분석 항목은 크게 우회로 인해 발생하는 차량운행비용, 시간지연비용, 환경오염비용의 세 가지로 나누어 간접비를 산출 방법을 분류하였다. 이중 차량운행비용 및 시간지연비용 산출은 한국교통연구원의 교통혼잡비용 산출 방법을 따랐으며, 환경오염비용 산출을 위해서는 한국개발연구원의 환경오염 비용편익에 대한 식을 적용하였다.

교통 혼잡이 발생하는 시간은 순간마다 다르게 나타나고 있으나, 이를 계산하는 것은 불가능하므로 혼잡비용의 계산은 시간단위로 계산하는 것이 타당하다. 조사된 교통량을 1일 시간대별 분포에 따라 혼잡비용을 계산한 뒤 이를 다시 하루단위 또는 1년 단위의 혼잡비용으로 계산하여야 할 것이다.

도시부 도로의 1일 교통혼잡비용 (한국교통연구원)

$$\text{1일 교통 혼잡비용} = \sum i \sum j \sum k \text{ 차종별 구간별 시간대별 교통량} ijk \times [\text{차종별유류비} j \times \text{구간거리} j \times (\text{운행속도 연료소모량}/km_{ij} - \text{기준속도 연료 소모량}/km_{ij}) + (\text{시간당 운행비} i + \text{차종별 평균시간 가치비용} i) \times (\text{운행시간} j - \text{기준운행시간} j)]$$

i = 차종 , j = 구간 , k = 시간대

$$\text{1일 교통 혼잡비용} = \sum i \sum j \sum k \text{차량운행에 따른 비용} + \sum i \sum j \sum k \text{시간가치에 따른 비용}$$

기준속도의 결정은 한국교통연구원(2007)에 따라, 각각 매봉터널은 간선2급 서비스속도 D를 적용하여 25km/hr, 남산 3호 터널은 도시고속화 도로 서비스수준 D를 적용하여 60km/hr를 기준속도로 삼았다.

$$\text{차량운행에 따른1일 교통혼잡비} = \sum i \sum j \sum k \text{ 차종별 구간별 시간대별 교통량} ijk \times [\text{차종별유류비} j \times \text{구간거리} j \times (\text{운행속도 연료소모량}/km_{ij} - \text{기준속도 연료 소모량}/km_{ij}) + \text{시간당 운행비} i \times (\text{운행시간} j - \text{기준운행시간} j)]$$

승용차 $L_c=0.02882+0.910/V+0.000003828\times V^2$

소형버스 $L_{sb}=0.03336+1.153/V+0.000004312\times V^2$

대형버스 $L_{lb}=0.02476+3.492/V+0.00001277\times V^2$

소(중)형트럭 $L_{st}=0.01695+1.292/V+0.00001647\times V^2$

대형트럭 $L_{lt}=0.06639+4.158/V+0.00002525\times V^2$

(단, V= 주행속도)

비고 : 승합차 = 버스

표 3.72 서울특별시 2011 통계연보

구분	총계	승용	버스	화물차
합계	2,977,599	2,443,261	169,922	364,416
비율	100%	82%	5.7%	12.3%

표 3.73 연도별 고정비 종합비교표 (단위: 원/대*hr)

		2007	2008
인건비	승용차	14,242	15,804
	버스	12,491	12,491
	화물차	9,630	10,191
감가상각비	승용차	805	878
	버스	3,856	3,856
	화물차	3,178	3,281
보험	승용차	253	281
	버스	897	930
	화물차	350	374
제세공과금	승용차	93	98
	버스	52	52
	화물차	55	56
합계	승용차	15,393	17,061
	버스	17,296	17,329
	화물차	13,213	13,902

표 3.74 2011년 평균가격 (한국석유공사제공)

	휘발유	경유	비고
주유소판매가격	1,929.3 원/l	1,745.7원/l	
세금비율	46%	38%	자동차용 세금비율
세금	887.5 원/l	663.4원/l	(교통세 + 주행세 + 교육세 + 부가세)
실질가격	1,041.8 원/l	1,082.3	

시간지연비용 계산 방법에 대한 계산식은 한국교통연구원의 교통혼잡비용 추정방법에 따라 적용하였으며, 이에 대한 차량 1대당 평균 통행시간 가치비용에 해당하는 자료는 분석대상지역이 서울시로 한정되어 있으므로, 서울시정개발연구원에서 제시한 “2005년 서울시 교통지표 산출” 데이터를 적용하였다.

시간가치에 따른1일 교통혼잡비
$= \sum i \sum j \sum k$ 차종별 구간별 시간대별 교통량$ijk \times$차종별유류비$j \times$구간거리j
$\times$차종별 평균시간 가치비용$i \times$(운행시간$j -$기준운행시간j)

표 3.75 차량 1대당 평균 통행시간가치 (수도권: 2007년 기준)

구분	승용차		버스		화물차		철도(1인당)	
	업무	비업무	업무	비업무	업무	비업무	업무	비업무
재차인원(인)	0.22	1.09	1.46	11.49	1.00	0.00	0.08	0.92
시간가치(원)	18,626	6,091	10,228 (1인) 18,626 (0.466인)	3,036	16,571	-	18,626	3,729
시간가치 (원/대 · 시)	4,177	6,668	18,797	34,884	16,571		1,423	3,444
평균 시간가치 (원/대)	10,844		53,681		16,571		4,867	

자료: 서울시정개발연구원, 『2005년 서울시 교통지표 산출』, 2006.

한국교통연구원에서는 따로 차량통행으로 인해 발생하는 환경피해 비용계산방법을 제시하지 않았으므로, 한국개발연구원에서 제시한 환경오염비용에 대한 계산 방법을 적용하기로 하였다. 이때 소음이나, 기타 환경오염에 대한 비용을 제외하고, 차량통행에 의해 발생하는 대기오염비용만을 적용하였으며, 계산식은 다음과 같다.

$$VOPC = \sum_{l} \sum_{k=1}^{3} (D_{lk} \times VT_k \times 365)$$

D_{lk} = 링크별(l), 차종별(k) 대-km

VT_k = 차종별(k) 해당 링크 주행속도의 km당 대기오염비용

k = 차종 (1: 승용차, 2: 버스, 3: 화물차)

표 3.76 차종별 · 속도별 대기오염비용(2007년 기준) (단위: 원/km)

차종	속도	CO	NOX	HC	PM	CO2	합계
승용차	10	34.19	10.69	6.55	0.00	16.14	67.57
	20	15.09	6.13	2.25	0.00	10.91	34.38
	30	9.35	4.43	1.21	0.00	8.69	23.68
	40	6.65	3.52	0.77	0.00	7.39	18.32
	50	5.11	2.94	0.55	0.00	6.52	15.11
	60	4.13	2.53	0.41	0.00	5.88	12.96
	70	3.44	2.24	0.32	0.00	5.39	11.39
	80	2.94	2.01	0.27	0.00	5.00	10.21
	90	2.56	1.83	0.22	0.00	4.68	9.29
	100	2.25	1.69	0.19	0.00	4.41	8.54
대형버스	10	57.92	239.01	16.25	41.23	44.87	399.28
	20	40.69	180.62	10.18	29.90	34.95	296.34
	30	33.10	153.33	7.75	24.78	30.20	249.15
	40	28.58	136.50	6.38	21.68	27.23	220.38
	50	25.51	124.74	5.49	19.55	25.12	200.41
대형트럭	10	63.23	315.68	21.81	70.21	133.26	604.19
	20	37.83	242.86	14.73	52.49	101.71	449.63
	30	28.01	208.33	11.71	44.26	86.85	379.16
	40	22.63	186.85	9.59	39.23	77.63	335.93
	50	19.18	171.72	8.77	35.72	71.17	306.57
	60	16.76	160.28	7.91	33.09	66.28	284.32
	70	14.95	151.20	7.25	31.01	62.42	266.84
	80	13.54	143.75	6.72	29.32	59.25	252.57
	90	12.41	137.49	6.28	27.91	56.59	240.69
	100	11.47	132.11	5.93	26.69	54.32	230.52

가. 직·간접비용 산출

직·간접비 산출을 위하여 본 과업은 다음과 같은 순서로 진행된다. 첫 번째로 직·간접비를 산출하기에 앞서 정의해야하는 가정사항 등을 항목별로 정의한다. 두 번째로 단위 길이당 직접비 데이터를 바탕으로 기존공법을 이용하였을 때의 총 공사비를 산출하고, 프로텍터를 사용하는 경우에 고려해야 하는 사항들을 추가하여 “교통류 보존형 터널 확대 시공기술”에 대한 총공사비를 산출한다.

간접비 산출을 위해서는 앞에서 정리한 간접비 산출 방법대로 간접비를 산출하되, 간접비 산출에 있어서 기존공법을 적용하는 경우와, 새로운 공법을 적용하는 경우의 교통차단방법 차이에 따라 간접비 산출 방법이 달라져야 한다.

(1) 직·간접비 산출 가정 사항 및 분석 대상 터널 구간

(가) 기본 가정 사항

기준속도 : 기준속도의 결정은 한국교통연구원(2007)에 따라, 각각 매봉터널은 간선2급 서비스속도 D를 적용하여 25km/hr, 남산 3호 터널은 도시고속화 도로 서비스수준 D를 적용하여 60km/hr를 기준속도로 삼았다.

우회거리 : 우회도로란 해당 터널의 유지보수 공사 시 전면차단으로 인해 해당 터널을 이용할 수 없을 때 차량이 우회하여 공사 중인 터널 대신 이용할 수 있는 도로를 의미한다. 완전차단 시 우회도로를 이용하여 지체도를 산정하는 경우에는 직접 우회도로를 결정하거나, 다음 표 3.77의 기준 거리를 더하여 우회거리를 산정하는 2가지 방법이 있다.

표 3.77 추가 우회거리 산정기준 (시설안전공단, 2006)

분류	도로 종류	추가 우회거리 길이	분류	도로 종류	추가 우회거리 길이
일반도시부	시도	1.27 km	지방부	군도	3.87 km
	국도	3.22 km		국도	6.03 km
	지방도 (국지도 포함)	6.77 km		지방도 (국지도 포함)	9.45 km
	평균	3.75 km		평균	6.45 km

터널 통제 형태 : 모든 통제 형태는 터널에 대한 완전통제로 가정하며, 공법 적용 유무에 따라 공사기간 전체에 대한 완전통제, 또는 완전통제를 수행하지 않는 경우의 도로점용형태는 각 상황별로 24시간 완전통제, 일시적 통제, 야간통제 3가지 케이스로 나누어 분석한다.

(나) 공사기간 산정을 위한 가정 사항

굴착 공사기간: 기존 공사 방식의 경우 해뜨기 전, 해지기 전 한 번씩 하루 2번 발파를 기준으로 굴착이 이루어진다. 분석 대상 터널 모두, 한번 발파에 1m씩 굴착되는 것으로 가정한다. 즉, 기존 공법은 굴진장 1m로 1일 2cycle로 굴착이 진행된다.

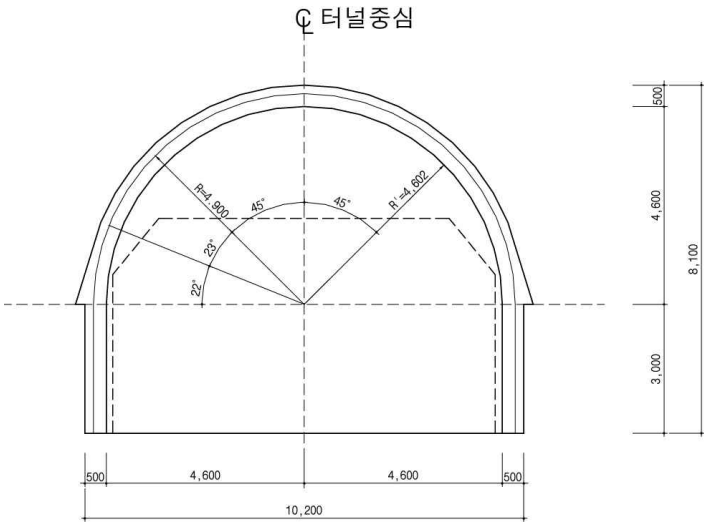
반면, 프로텍터를 사용한 새로운 공법의 경우, 굴착 전후로, 프로텍터를 움직이는 시간을 포함하여야 하며, 공사장 폭과 범위가 좁아지기 때문에 하루에 1번 발파하는 것으로 한다. 발파 전후로 하루 1시간씩 발파에 의한 차량 보호 및 터널 환기를 위하여 차량을 통제한다. 이는 차량통행이 가장 적은 해뜨기 전 1시간을 기준으로 이루어진다고 가정한다. 즉, 신공법은 굴진장 1m로 1일 1cycle로 굴착이 진행되며, 굴착공사 기간 동안 매일 하루 1시간씩 차량통제가 이루어진다.

프로텍터 설치 및 해체기간: 프로텍터 제작의 경우, 미리 이루어진다고 가정하여 공사기간에 포함하지 않지만, 강재 프로텍터를 이동하여 터널에 설치하는데 최소한 2주의 시간이 필요하다. 또한 공사 이후 해체하는 데에도 동일한 시간이 필요한 것으로 가정하며, 프로텍터 각 segment 의 이동 및 원활한 작업을 위해 야간 8시간동안 차량을 통제하고 작업이 이루어진다고 가정한다. 따라서 이에 따른 차량통제 시간은 총 30일간 야간 8시간씩 이루어진다.

프로텍터 이동시간: 방수 및 포장공사를 위해서는 프로텍터가 필요한데, 1일 10m씩 작업한다고 계산하였을 때, 작업이 이루어질 때마다 다음 구간으로 프로텍터의 이동이 필요하므로, 굴착과 동일하게 야간 1시간씩 통제한 상태에서 프로텍터의 이동이 이루어진다고 가정하여 차량통제기간을 산정한다.

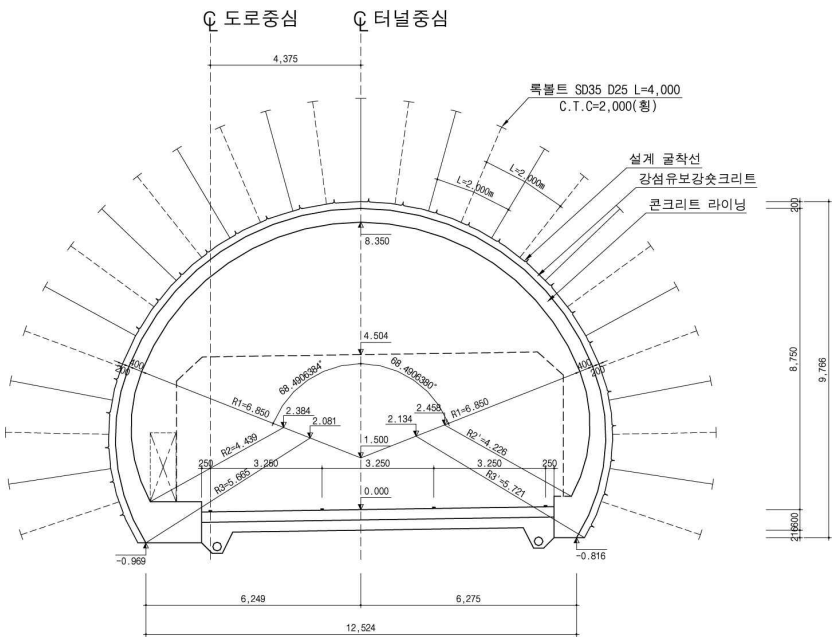
(다) 직접비 산출에서의 가정 사항

직접공사비 산출 근거: 직접공사비는 그림 3.128, 3.129 및 그림 3.130에서 보여주듯이 2차로 검토단면을 3차로 및 4차로 검토단면으로 확대할 경우와 3차로 검토단면을 4차로 검토단면으로 확대할 경우에 대하여 검토하여, 개략공사비를 적용하였다. 각 분석 case별 개략공사비를 산출하기 위한 굴진장 1m당 공사비는 표 3.78에 제시되어 있다.



지보패턴		P-5
굴진장		1.0m
라이닝	1차	200mm
	2차	300mm
록볼트	종	-
	횡	-
강지보		-
보조공법		-

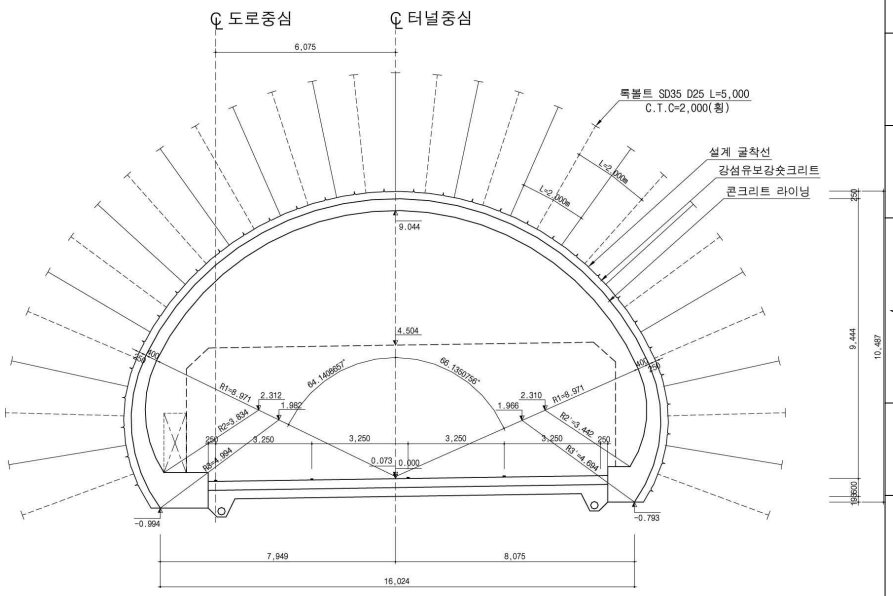
그림 3.129 2차로 검토단면(남산 3호터널)



지보패턴		P-5
굴진장		1.0m
숏크리트		200mm
록볼트	종	2.0m
	횡	1.0m
강지보		-
보조공법		-

그림 3.130 3차로 검토단면(매봉터널)

4차로 검토단면(단면가정)



지보패턴		P-5
굴진장		1.0m
숏크리트		250mm
록볼트	종	2.0m
	횡	1.0m
강지보		-
보조공법		-

그림 3.131 4차로 검토단면(단면 가정)

표 3.78 각 타입별 단면확대 직접시공비

번호	공 종	규 격	단위	TYPE-3(2차로 -> 3차로)			TYPE-3(2차로 -> 4차로)			TYPE-3(3차로 -> 4차로)		
				수량	단가	금액	수량	단가	금액	수량	단가	금액
6.01	3차로					-			-			-
6-03	굴 착					-			-			-
A-00	전단면 굴착		㎥		18,147	-		18,147	-		18,147	-
B-00	반단면 굴착					-			-			-
B-01-A	상부굴착		㎥	35.920	26,861	964,847	60.130	26,861	1,615,152	26.160	26,861	702,684
B-01-C	하부굴착		㎥	11.550	25,594	295,611	26.860	25,594	687,455	12.230	25,594	313,015
6-04	버력처리					-			-			-
A-00	전단면 버력처리		㎥		3,575	-		3,575	-		3,575	-
B-00	반단면 버력처리					-			-			-
B-01-A	상부 버력처리		㎥	39.017	3,010	117,441	63.720	3,010	191,797	29.750	3,010	89,548
B-01-C	하부 버력처리		㎥	12.190	3,374	41,129	27.600	3,374	93,122	12.970	3,374	43,761
C	숏크리트 버력처리		㎥	0.924	3,088	2,855	1.282	3,088	3,960	1.282	3,088	3,960

번호	공 종	규 격	단위	TYPE-3(2차로 -> 3차로)			TYPE-3(2차로 -> 4차로)			TYPE-3(3차로 -> 4차로)		
				수량	단가	금액	수량	단가	금액	수량	단가	금액
6-05	강지보공		SET	0.833	793,394	661,162	0.833	952,109	793,107	0.833	952,109	793,107
6-06	숏크리트공		㎥	5.239	195,267	1,022,906	7.267	195,267	1,419,005	7.267	195,267	1,419,005
6-07	ROCK BOLT공					-			-			-
A-01-A	형식-1(상부)		조	10.833	63,609	689,098	12.500	63,609	795,113	12.500	63,609	795,113
A-01-B	형식-2(측벽)		조	5.000	54,615	273,075	5.000	54,615	273,075	5.000	54,615	273,075
B-00	훠폴링					-			-			-
B-01-A	훠폴링	L=3m (공/개소)	개소			-			-			-
B-01-B	훠폴링	L=6m (공/개소)	개소			-			-			-
C-00	프리그라우팅		개소	0.017	2,460,247	41,824	0.017	2,460,247	41,824	0.017	2,460,247	41,824
6-08	선대구경 보링					-			-			-
A-00	토사		m			-			-			-
B-00	풍화암		m			-			-			-
C-00	연암		m			-			-			-
D-00	경암		m	1.000		-	1.000		-	1.000		-
6-10	라이닝 콘크리트					-			-			-
A-00	콘크리트	2종 32M/M				-			-			-
A-01-A	무근		㎥	-	77,824	-	-	77,824	-	-	77,824	-
A-01-B	철근		㎥	12.099	91,642	1,108,731	13.966	91,642	1,279,872	13.966	91,642	1,279,872
A-01-C	콘크리트(배수구 및 채움)	5종 50M/M	㎥	-	76,894	-	-	76,894	-	-	76,894	-
B-00	철근가공 및 조립	매우복잡	ton	1.451	1,286,979	1,867,407	1.670	1,286,979	2,149,255	1.670	1,286,979	2,149,255
	와이어 메쉬	4.8-100X100	㎡			-			-			-
	철근이음	D29이상	개			-			-			-
C-00	기존벽체 제거		㎥	10.800	18,124	195,739	10.800	18,124	195,739	17.359	18,124	314,615
E-00	배면 그라우팅		㎥	0.100	194,451	19,445	0.100	194,451	19,445	0.100	194,451	19,445
F-00	신축이음		m	0.895	7,388	6,612	1.030	7,388	7,610	1.030	7,388	7,610
G-00	시공이음		m	1.970	3,825	7,535	2.070	3,825	7,918	2.070	3,825	7,918
H-0	지수판		m	5.09	24,049	122,554	5.51	24,049	132,678	5.51	24,049	132,678

번호	공 종	규 격	단위	TYPE-3(2차로 -> 3차로)			TYPE-3(2차로 -> 4차로)			TYPE-3(3차로 -> 4차로)		
				수량	단가	금액	수량	단가	금액	수량	단가	금액
0				6			7			7		
I-00	철근앵커	방수쉬트 부착	개	1.670	26,250	43,838	1.670	26,250	43,838	1.670	26,250	43,838
6-11	방 수 공					-			-			-
A-00	필터 콘크리트		㎥	0.030	61,672	1,850	0.030	61,672	1,850	0.030	61,672	1,850
B-00	THP 유공관	Φ150	m	2.000	6,671	13,342	2.000	6,671	13,342	2.000	6,671	13,342
C-00	방수막 및 부직포 설치		㎡	27.865	24,932	694,730	31.654	24,932	789,198	31.654	24,932	789,198
D-00	폴리에틸렌단열재		㎡		2,294	-		2,294	-		2,294	-
E-00	비닐깔기		㎡	2.274	862	1,960	2.524	862	2,176	2.524	862	2,176
6-12	배 수 공					-			-			-
A-00	용수처리(유도배수공)		m	0.929	4,200	3,901	1.055	4,200	4,432	1.055	4,200	4,432
B-00	맹암거					-			-			-
B-01-A	아연도유공강관	Φ200	m	2.000	38,956	77,912	2.000	38,956	77,912	2.000	38,956	77,912
B-01-B	잡석채움	맹암거	㎥	0.247	18,525	4,576	0.247	18,525	4,576	0.247	18,525	4,576
C-00	PVC PIPE 설치					-			-			-
C-01-A	D50 M/M		m	0.313	2,501	783	0.313	2,501	783	0.313	2,501	783
C-01-B	D150 M/M	Y형소켓 포함	m	0.014	10,921	153	0.014	10,921	153	0.014	10,921	153
D-00	배수관					-			-			-
D-01-A	배수관 설치	스파이럴 씸덕트관 D300 M/M	m	2.000	15,487	30,974	2.000	15,487	30,974	2.000	15,487	30,974
F-00	거푸집	합판3회	㎡	4.000	18,122	72,488	4.037	18,122	73,159	4.037	18,122	73,159
G-00	콘크리트					-			-			-
G-01-A	콘크리트(기계타설)		㎥	3.770	81,309	306,535	4.190	81,309	340,685	4.190	81,309	340,685
G-01-B	콘크리트(인력타설)		㎥		91,642	-	-	91,642	-	-	91,642	-
H-00	콘크리트					-			-			-
H-0	공동구 뚜껑	600*500*	개	2.00	6,775	13,550	2.00	6,775	13,550	2.00	6,775	13,550

번호	공 종	규 격	단위	TYPE-3(2차로 -> 3차로)			TYPE-3(2차로 -> 4차로)			TYPE-3(3차로 -> 4차로)		
				수량	단가	금액	수량	단가	금액	수량	단가	금액
1-A		60		0			0			0		
H-01-B	공동구 뚜껑	950*500*60	개	2.000	8,990	17,980	2.000	8,990	17,980	2.000	8,990	17,980
I-00	그레이팅	430*480*75	개	0.133	39,947	5,313	0.133	39,947	5,313	0.133	39,947	5,313
j-00	터널타일붙임		㎡	6.000	45,261	271,566	6.000	45,261	271,566	6.000	45,261	271,566
합계(단위 m 공사비)					5,937,274	8,999,420		6,095,989	11,397,611		6,095,989	10,077,967

직접공사비 가정 사항: 직접공사비에서 1.4배를 한 비용을 총공사비로 적용한다. 즉, 제경비에 해당하는 간접공사비용은 직접공사비용의 40%로 가정한다. 또한 프로텍터 제작 노무비는 프로텍터 제작비의 40%로 가정하였다.

공기 연장에 따른 직접비 증가: 굴착~ 록볼트에 해당하는 공종을 굴착 1cycle로 가정하였을 때, 프로텍터를 사용하는 경우 그 공사기간이 2배로 늘어나게 된다. 이는 재료비는 기존 공법과 동일하지만, 노무비 및 기계경비의 경우 공사기간이 2배로 연장된 만큼 추가로 지불해야하는 금액이다. 따라서 “전체공사비 - 재료비 = 노무비+기계경비”로 계산하여, 필요한 강지보재, 숏크리트, 락볼트에 대한 재료비를 한국물가정보를 참고하여 산출하고, 이를 총 굴착기간 동안 발생하는 공사비에서 제하여 계산하고, 이를 공사기간 만큼 2배하여 적용하였다.

(라) 대상터널 및 Case Study

표 3.79에서 보여주듯이 Case Study에 사용되는 Case는 총 6가지로 이루어져 있다. 1,2번의 경우는 현재 2차로 터널인 남산 3호 터널을 3차로로 확대하는 경우이며, 3,4번의 경우는 남산 3호 터널을 2차로에서 4차로로 확대하는 경우이다. 또한 5,6번은 현재 3차로 터널인 매봉터널을 4차로 터널로 확장 공사하는 경우를 말한다.

각각 경우 별로, 기존공법을 사용하는 경우, 즉 프로텍터를 사용하지 않고 공사기간동안 교통흐름을 완전 차단하는 경우는 홀수번호인 1,3,5 번 Case이며, 2,4,6번 Case의 경우에는 “교통류 보존형 터널 확대 시공기술”을 적용하는 공법을 사용하여 프로텍터를 사용하여 교통을 부분적으로 차단하는 경우이다.

표 3.79 각 분석 Case 별 특징

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
대상 터널	남산3호	남산 3호	남산 3호	남산 3호	매봉터널	매봉터널
확대 단면	2→3	2→3	2→4	2→4	3→4	3→4
적용 공법	기존	New	기존	New	기존	New
프로텍터 사용	X	O	X	O	X	O

CASE 1, 2, 3, 4에 대한 대상지역은 남산 3호 터널로서, 혼잡통행료를 부과하는 도심지 2차로 도로이며, 평균 속도가 빠른 고속화 도로의 경우를 비교하기 위해 분석 대상으로 결정되었다.

남산 3호 터널은 2차로 터널로서, 총길이는 약 1.28km이기에 매봉터널보다 약 4배가량 더 길기에 공사기간 및 총공사비에 대한 차이 또한 상당히 클 것으로 예상된다. 간접비 분석을 위한 남산 3호 터널의 통행량에 대한 개략적인 데이터는 다음 표 3.80과 같다.

표 3.80 남산 3호 터널 개요

총 길이	차로수	일평균통행량	평균 속도	첨두시간	우회로
1280m	2차로	45,000대/hr	43km/hr	16:00~20:00	5.25km

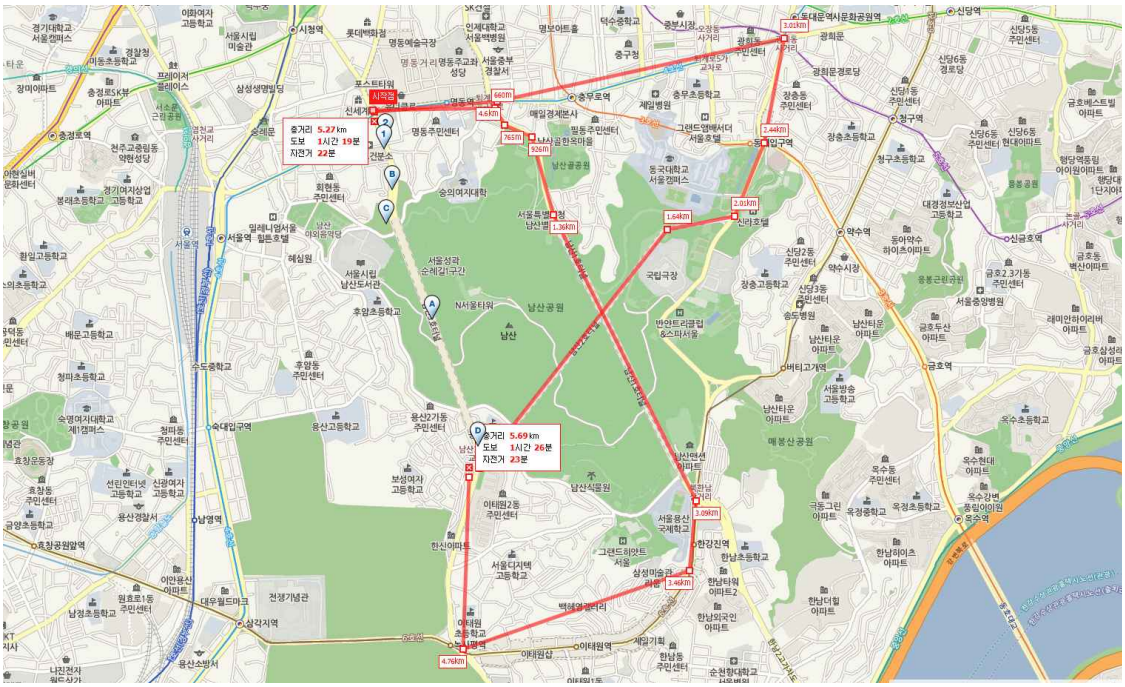


그림 3.132 남산 3호 터널 우회도로

일일 교통량 및 평균 속도 등의 교통 통계자료는 붙임 3에 제시되어 있다. 간접비 분석에 있어서, 기존공법을 적용했을 때 완전통제의 경우 우회도로에 대한 총 길이가 필요하다. 이를 위하여, 그림 3.131과 같이 남산 3호 터널을 시·종점을 연결하는 인근의 동일한 수준의 고속화 도로를 따라 우회도로를 산정하였다. 이는 각각 총거리 5.27 km, 5.69km 로서, 기존거리 1.5km (터널 길이가 아닌, 시·종점을 연결하는 거리)에 표 3.73의 일반도시부 평균 추가우회거리 길이를 더한 값과 거의 일치한다. 따라서 본 과업에서 우회로는 기존거리 1.5km에 3.75km를 더한 5.25km로 가정한다.

Case Study를 위한 두 번째 대상 지역은 교통량이 많은 도심지 3차로 터널인 매봉터널로서, 강남한복판에 있어서 교통량도 매우 많고 평균속도가 20km/hr에 불과한 지역이다. 따라서 매봉터널에 대한 간접비를 계산하였을 때 차량이 많은 경우의 간접비의 증가 추이를 쉽게 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

매봉터널도 남산 3호 터널과 마찬가지로, 완전 통제일 때 차량이 우회하는 우회로에 대한 우회거리가 필요하다. 실제 매봉터널 주변 도로에 대한 우회도로 길이에 대한 계산 결과는 그림 3.132에 나타나 있다. 이는 각각 2.14km, 1.83km 로서, 터널 진입구간부터 진출구간까지의 실제길이 0.715km에서 (우회도로 산정에서의 시·종점을 기준으로 한 길이와 같음) 표 3.74의 일반도시부인 경우 시도의 추가우회거리길이인 1.27km를 더한 길이에 해당하는 1.985km를 우회도로 길이로 가정하여 계산한다.

표 3.81 매봉터널 개요

총 길이	차로수	일평균통행량	평균 속도	첨두시간	우회로
700m	3차로	73,000대/hr	20km/hr	17:00~20:00	1.985km



그림 3.133 매봉터널 우회도로

(2) 직접비 산출

직접비 즉, 총 공사비를 산출하기 위해서 앞의 가정 사항에서 정의한 대로 개략공사비를 기준으로 한다. 각 분석 case별로 직접공사비를 산출하기 위해서는 붙임 2에 제시되어 있는 산출근거는 단위길이에 해당하는 굴진장 1m당 공사비에 각 터널 별 길이를 곱한다. 이 값은 기존의 프로텍터를 사용하지 않았을 경우에 해당하는 공사비로서, “교통류 보존형 터널 확대 시공기술”을 적용하는 경우에는 프로텍터 비용을 추가로 산출해야 하며, 공사기간 연장으로 인해 발생하는 노무비, 기계경비 또한 더해주어야 한다.

이러한 순서로 각 Case별로 공사기간을 우선 산출하고, 두 번째로 프로텍터 제작 및 설치 비용을 산출하며, 마지막으로 공기연장으로 인한 추가 공사비를 산출하여 각각을 1 굴진장(단위 길이당) 공사비용을 터널 연장으로 곱하여 구한 공사비에 더하면 총 공사비가 계산된다.

공기산출 기준은 앞선 공기산출 가정 사항에 따라 계산한다. 그리고 라이닝 및 방수공은 1

번에 10m씩 작업하나, 라이닝은 1번 콘크리트 타설한 이후, 4일 정도 양생 후 후속작업을 진행하는 것을 고려하여 공사기간을 산정해야한다. 포장의 경우 상, 하부를 따로 작업하며 기타 부대공 및 각각의 가정 사항은 표준품셈 및 실제 터널 확장 공사 작업에 근거하여 산정하였다. 이렇게 결정된 단위 시간당 작업량은 각각 터널의 총 연장 및 총 작업량 단위로 나누어 각 공종별 공사기간을 산정한다. 이를 합하면 총 공사기간이 산정된다.

이때, 프로텍터를 이용하는 경우에는 1일 발파 cycle이 1cycle임을 명시하여 공사기간을 산정해야하며, 프로텍터 설치·해체기간에 해당하는 약 2주간의 작업 기간을 추가적으로 계산해주어야 한다. 이에 따라 계산된 총 공사기간이 기존공법, 프로텍터 이용한 방법 별로 각각 표 3.82, 표 3.83에 제시되어 있다.

표 3.82 기존공법을 이용한 공기산출근거

공 종	단위	CASE 1 (2차로 -> 3차로)			CASE 3 (2차로 -> 4차로)			CASE 5 (3차로 -> 4차로)			비 고
		수량	단위시간	공기	수량	단위시간	공기	수량	단위시간	공기	
A. 터널 연장 (m)		1,280			1,280			250			
B. 1 cycle 당 굴진장		1m			1m			1m			
C. 1일당 발파 cycle		2m/day			2m/day			2m/day			
1 cycle		1,280	2m/day	640	1,280	2m/day	640	250	2m/day	125	굴착, 버럭처리, 강지보공, 숏크리트공, ROCK BOLT공 포함
콘크리트 라이닝	m^3	1,280	10m/4day	512	1,280	10m/4day	512	250	10m/4day	100	
기존벽체 제거	m^3	-		30	-		30	-		30	가설공 포함
방 수 공		1,280	10m/day	128	1,280	10m/day	128	250	10m/day	25	배수공과 동시진행
포 장 공	m^3			70			84			20	포장은 반씩 이루어지므로 2배
포장하부	m^3	16,000	500m^3/day	32	19,200	500m^3/day	38	3,750	500m^3/day	8	
포장상부	m^3	16,000	5000m^3/day	3	19,200	5000m^3/day	4	3,750	5000m^3/day	1	
기타 부대공	m			30			30			30	
합계		1,410			1,424			330			
		47개월 (3년 11개월)			48개월 (4년)			11개월			

표 3.83 프로텍터를 이용한 공기산출근거

공 종	단위	CASE 2 (2차로 -> 3차로)			CASE 4 (2차로 -> 4차로)			CASE 6 (3차로 -> 4차로)			비 고
		수량	단위시간	공기	수량	단위시간	공기	수량	단위시간	공기	
A. 터널 연장 (m)		1,280			1,280			250			
B. 1 cycle 당 굴진장		1m			1m			1m			
C. 1일당 발파 cycle		1m/day			1m/day			1m/day			
프로텍터 설치기간				15			15			15	
프로텍터 해체기간				15			15			15	
1 cycle		1,280	1m/day	1,280	1,280	1m/day	1,280	250	1m/day	250	
라이닝 콘크리트	m^3	1,280	10m/4day	512	1,280	10m/4day	512	250	10m/4day	100	
방 수 공		1,280	10m/day	128	1,280	10m/day	128	250	10m/day	25	
배 수 공											방수공과 동시진행
포 장 공	m^3			70			84			20	포장은 반씩 이루어지므로 2배 함
포장하부	m^3	16,000	500 m^3/day	32	19,200	500 m^3/day	38	3,750	500m^2/day	8	
포장상부	m^3	16,000	5000 m^3/day	3	19,200	5000 m^3/day	4	3,750	5000 m^3/day	1	
기타 부대공	m			30			30			30	
합계		2,050			2,064			455			
		68개월 (6년 8개월)			69개월 (6년 9개월)			15개월 (1년 3개월)			

공기 추가비용 산출 근거는 같은 터널에 대하여 공사를 하는 경우에 기존공법을 이용하였을 때와 프로텍터를 이용하여 공사를 하였을 때, 1cycle당 굴진장은 동일하나 기존공법의 경우 하루 2발파로 2cycle인데 비해 프로텍터를 사용하는 경우 하루 1발파로 1cycle로 굴진 cycle이 이루어진다. 따라서 굴착에서 Rock Bolt 공에 해당하는 굴착공사 기간은 같은 터널을 공사하는 경우에 각각 2배의 기간이 차이 나게 된다.

프로텍터를 이용하였을 때 굴착공사기간이 2배 증가한 만큼 노무비 및 기계경비는 똑같이 2배로 투입되어야 하나, 재료비는 동일한 터널에 대한 공사이므로 동일하다. 따라서 공기 증가에 대한 추가비용을 산출하기 위해서는 굴진 사이클에 해당하는 각각의 공종 (기존벽체 제거, 굴착, 버럭 처리, 강지보공, 숏크리트공, Rock Bolt공)의 기존공법에 대한 총 공사비에서, 총 물량에 대한 총 재료비를 빼서 노무비 및 기계경비에 해당하는 비용을 구하게 된다. 이때 각 공종에 대한 노무비 및 기계경비의 총 합을 프로텍터를 이용하였을 때, 공사기간 연장에 의해 발생하는 추가 공사비용으로서, 굴진장 1m당 개략공사비에 터널의 총연장을 곱한 값에 더해주면 된다. 즉, 굴착공기 연장으로 인해 추가적으로 발생하는 공사비용은 기존공법에서 굴착공정에 해당하는 총 공종의 노무비 + 기계경비 값을 2배 해 준 값과 같게 된다. 이렇게 구한 공사비가 각각 분석 대상 터널의 공사별로 표 3.84, 표 3.85, 표 3.86에 제시되어 있다.

표 3.84 프로텍터를 이용 시 공기추가비용 산출근거 (2차로→3차로)

공 종	규 격	단 위	CASE 1, 2 (2차로 -> 3차로)						
			단가	합계(원)	단위물량 (㎥/m)	총 물량 (㎥)	단가 (원/㎥)	재료비	노무비 + 기계경비
A. 터널 연장 (m)			1,280						
B. 기존공법 (프로텍터x) 굴착 공사기간 (일)			640일						
C. 프로텍터 사용시 굴착 공사 기간 (일)			1280일						
B. 기존공법 (프로텍터x) 굴착 공사기간 (일)			640일						
굴진 사이클	2 cycle								
기존벽체 제거			195,739	250,546,176					250,546,176
굴 착			1,260,458	1,613,386,010				0	1,613,386,010
버력처리			161,425	206,623,878				0	206,623,878
강지보공			661,162	846,286,933	0.833	1,067	470,000	501,333,333	344,953,600
숏크리트공			1,022,906	1,309,319,910	5.239	6,705	135,000	905,212,800	404,107,110
ROCK BOLT공			1,003,997	1,285,115,775	15.833	20,267	29,500	597,866,667	687,249,108
합계				5,260,732,505				2,004,412,800	3,506,865,881
공기증가에 의한 추가비용			3,506,865,881						

표 3.85 프로텍터를 이용 시 공기추가비용 산출근거 (2차로→4차로)

공 종	규 격	단 위	CASE 3, 4 (2차로 -> 4차로)						
			단가	합계(원)	단위물량 (㎥/m)	총 물량 (㎥)	단가 (원/㎥)	재료비	노무비 + 기계경비
A. 터널 연장 (m)			1,280						
B. 기존공법 (프로텍터x) 굴착 공사기간 (일)			640일						
C. 프로텍터 사용시 굴착 공사 기간 (일)			1280일						
B. 기존공법 (프로텍터x) 굴착 공사기간 (일)			640일						
굴진 사이클	2 cycle								
기존벽체 제거			195,739	250,546,176				0	250,546,176
굴 착			2,302,607	2,947,336,666				0	2,947,336,666
버력처리			288,880	369,766,000				0	369,766,000
강지보공			793,107	1,015,176,700	0.833	1,066	470,000	501,132,800	514,043,900
숏크리트공			1,419,005	1,816,326,770	7.267	9,302	135,000	1,255,737,600	560,589,170
ROCK BOLT공			1,110,012	1,420,814,975	17.500	22,400	29,500	660,800,000	760,014,975
합계				7,569,421,110				2,417,670,400	5,402,296,886
공기증가에 의한 추가비용			5,402,296,886						

표 3.86 프로텍터를 이용 시 공기추가비용 산출근거 (3차로→4차로)

공 종	규 격	단 위	CASE 5, 6 (2차로 -> 4차로)						
			단가	합계(원)	단위물량 (㎥/m)	총 물량 (㎥)	단가 (원/㎥)	재료비	노무비 + 기계경비
A. 터널 연장 (m)			250						
B. 기존공법 (프로텍터x) 굴착 공사기간 (일)			125일						
C. 프로텍터 사용 시 굴착 공사 기간 (일)			250일						
B. 기존공법 (프로텍터x) 굴착 공사기간 (일)			125일						
굴진 사이클	2 cycle								
기존벽체 제거			314,615	402,706,580				0	402,706,580
굴 착			1,015,698	253,924,595				0	253,924,595
버력처리			137,268	34,317,092				0	34,317,092
강지보공			793,107	198,276,699	0.833	208	470,000	97,877,500	100,399,199
숏크리트공			1,419,005	354,751,322	7.267	1,817	135,000	245,261,250	109,490,072
ROCK BOLT공			1,110,012	277,502,925	17.500	4,375	29,500	129,062,500	148,440,425
합계				1,118,772,633				472,201,250	1,049,277,964
공기증가에 의한 추가비용			1,049,277,964						

각각 자재비용은 한국물가정보 (www.kpi.or.kr) 참고

숏크리트 : 초속경시멘트 - 3시간에 1종시멘트 7일강도 발현(20kg)

ROCK BOLT : (단위: 1본) Φ15.2 × 4.5m(플레이트, 바렐, 웨지 포함)

“교통류 보존형 터널 확대 시공기술”에 직접공사비 산출을 위해서는 우선 프로텍터 비용의 산출이 필요하다. 프로텍터 비용의 산출을 위해서, 우선 강재 프로텍터에 대한 재료비 산출이 필요하였다. 다음 표 3.87에 있는 프로텍터 재료비 산출근거는 프로텍터의 부재를 단위길이당 개수와 단가로 분류되어 있다. 이때 각 부재의 단가는 한국물가정보를 참고하여 산출되었다. 표 3.88에 제시된 단위 길이당 프로텍터 비용은 구조해석을 통해 결정된 프로텍터의 기준 높이 및 폭에 따라 각 부재의 개수를 계산하여, 단위 길이당 프로텍터 비용으로 산출한 값이다.

표 3.87 프로텍터 재료비 산출근거

구분	강재	규격		단위	단가 (원)	단위길이	단위 길이당 개수
수직부재1	H-beam	350*350*12/19	137kg/m	ton	970,000	7.3m	H*10개/m
수직부재2	H-beam	350*350*12/19	137kg/m	ton	970,000	7.3m	
수평부재	H-beam	350*350*12/19	137kg/m	ton	970,000	7.3m	B*5개/m
연결부재	H-beam	350*350*12/19	137kg/m	ton	970,000	7.3m	0.5m*15개/m
측면plate1 (좌)	Plate	두께 : 25mm	196.25kg/㎥	ton	1,124,200	5m2	H*단위길이
측면plate1 (우)	Plate	두께 : 25mm	196.25kg/㎥	ton	1,124,200	5m2	H*단위길이
측면plate2	Plate	두께 : 25mm	196.25kg/㎥	ton	1,124,200	5m2	H*단위길이*2개
상부plate	Plate	두께 : 25mm	196.25kg/㎥	ton	1,124,200	5m2	단위길이*B
전후면plate	Plate	두께 : 25mm	196.25kg/㎥	ton	1,124,200	5m2	2개*350mm*B
Hbeam마무리면	Plate	두께 : 19mm	196.25kg/㎥	ton	1,110,000	6.7m2	4개*350mm*4.5m
하중계반력plate	Plate	두께 : 19mm	149.15kg/㎥	ton	1,110,000	6.7m2	
수평반력대	H-beam	350*350*12/19 300*300*10/15	137kg/m 94kg/m	ton	970,000	7.3m 10.6m	

표 3.88 단위길이 (3m*1m*4.5m)기준일 때 프로텍터 비용

구분	강재	규격	단위길이	단가 (원)	수량		총액 (원)
수직부재1	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000	10개*4.5m	45m	5,979,452
수직부재2	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000			
수평부재	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000	5개*3m	15m	1,993,151
연결부재	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000	15개*0.5m	7.5m	996,575
측면plate1 (좌)	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	1m*4.5m	4.5㎡	1,011,780
측면plate1 (우)	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	1m*4.5m	4.5㎡	1,011,780
측면plate2	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	2개*1m*4.5m	9.㎡	2,023,560
상부plate	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	1m*3m	3.㎡	674,520
전후면plate	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	2개*350mm*3m	2.1㎡	472,164
Hbeam마무리면	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=19mm	6.7㎡	1,110,000	4개*350mm*4.5m	6.3㎡	1,043,731
하중계반력plate	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=19mm	6.7m2	1,110,000			
수평반력대	H-beam	350*350*12/19 200*200*10/15	7.3m 10.6m	970,000			
총 액							15,206,713

실제 공사를 위해서는 대상 터널별로 그 길이가 다르게 산출된다. 이동식 프로텍터의 최소 길이는 기존터널 막장전방 최대 보호구간으로 기존터널 폭의 2배 길이와 기존터널 막장 후방 (확대 터널 구간) 최소 보호구간으로서 확대터널 폭을 2배 한 길이를 더하여 계산할 수 있다.

즉, 이동식프로텍터최소길이 = 기존터널막장전방최대보호구간($2D_1$)
+ 기존터널막장후방(확대터널)최소보호구간($2D_2$)

D_1: 기존터널폭
D_2: 확대터널폭

다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

이에 따라, 본 과업에서 대상 터널에 해당하는 2차선→3차선, 2차선→4차선, 3차선→4차선에 공사의 경우, 각각의 프로텍터 폭과 프로텍터 최소 길이는 달라진다. 각각의 경우에 대한 프로텍터의 폭, 최소길이, 높이에 해당하는 값을 계산하고, 이를 단위 길이당 프로텍터의 재료비에 해당하는 표 3.88를 참고하여 총 재료비를 구한 값이 표 3.89 ~ 표 3.91에 제시되어 있다.

총공사비를 산출하기 위해서는 표에 제시되어 있는 프로텍터의 재료비 총합에 40%에 해당하는 비용을 프로텍터의 제작에 대한 노무비용으로 가정한 가정 사항에 따라, 최종적으로 1.4배 한 값을 프로텍터를 사용하는 경우에 지불하는 프로텍터 비용으로 계산해야 한다.

표 3.89 2차선도로-> 3차선 터널 (7m*46m*4.5m)

구분	강재	규격	단위길이	단가 (원)	수량		총액 (원)
수직부재1	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000	460개*4.5m	2,070m	275,054,795
수직부재2	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000			
수평부재	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000	230개*3m	690m	91,684,932
연결부재	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000	690개*0.5m	35m	4,584,247
측면plate1 (좌)	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	46m*4.5m	207㎡	46,541,880
측면plate1 (우)	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	46m*4.5m	207㎡	46,541,880
측면plate2	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	2개*46m*4.5m	414㎡	93,083,760
상부plate	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	7m*46m	322㎡	72,398,480
전후면plate	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	2개*350mm*7m	4.9㎡	1,101,716
Hbeam마무리면	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=19mm	6.7㎡	1,110,000	4개*350mm*4.5m	6.3㎡	1,043,731
하중계반력plate	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=19mm	6.7m2	1,110,000			
수평반력대	H-beam	350*350*12/19 200*200*10/15	7.3m 10.6m	970,000			
총 액							632,035,420

표 3.90 2차선 -> 4차선 터널 (10.5m*54m*4.5m)

구분	강재	규격	단위길이	단가 (원)	수량		총액 (원)
수직부재1	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000	540개*4.5m	2,430m	322,890,411
수직부재2	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000			
수평부재	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000	270개*3m	810m	107,630,137
연결부재	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000	810개*0.5m	41m	5,381,507
측면plate1 (좌)	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	54m*4.5m	243㎡	54,636,120
측면plate1 (우)	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	54m*4.5m	243㎡	54,636,120
측면plate2	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	2개*54m*4.5m	486㎡	109,272,240
상부plate	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	10.5m*54m	567㎡	127,484,280
전후면plate	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	2개*350mm*10.5m	7.4㎡	1,652,574
Hbeam마무리면	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=19mm	6.7㎡	1,110,000	4개*350mm*4.5m	6.3㎡	1,043,731
하중계반력plate	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=19mm	6.7m2	1,110,000			
수평반력대	H-beam	350*350*12/19 200*200*10/15	7.3m 10.6m	970,000			
총 액							784,627,120

표 3.91 3차선 -> 4차선 터널 (10.5m*60m*4.5m)

구분	강재	규격	단위길이	단가 (원)	수량		총액 (원)
수직부재1	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000	600개*4.5m	2,700m	358,767,123
수직부재2	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000			
수평부재	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000	300개*3m	900m	119,589,041
연결부재	H-beam	350*350*12/19	7.3m	970,000	900개*0.5m	45m	5,979,452
측면plate1 (좌)	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	60m*4.5m	270㎡	60,706,800
측면plate1 (우)	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	60m*4.5m	270㎡	60,706,800
측면plate2	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	2개*60m*4.5m	540㎡	121,413,600
상부plate	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	10.5m*60m	630㎡	141,649,200
전후면plate	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=25mm	5㎡	1,124,200	2개*350mm*10.5m	7.4㎡	1,652,574
Hbeam마무리면	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=19mm	6.7㎡	1,110,000	4개*350mm*4.5m	6.3㎡	1,043,731
하중계반력plate	Plate	3,048 ×6,096㎜ t=19mm	6.7m2	1,110,000			
수평반력대	H-beam	350*350*12/19 200*200*10/15	7.3m 10.6m	970,000			
총 액							871,508,322

최종적으로, 직접비에 해당하는 총 공사비 산출방법은 앞서 설명한 방법에 따라 이루어진다. 기존공법을 적용하는 경우에는 붙임 2에 제시되어 있는 1굴진장 (1m 당) 개략공사비에 터널 연장을 곱하여 산출하면 된다. 이렇게 계산 된 값이 표 3.92에 제시되어 있다.

표 3.92 기존공법에 대한 총 공사비 산출 내역

구 분	2차로→3차로 확장		2차로→4차로확장		3차로→4차로		비고
	남산 3호 터널		남산 3호 터널		매봉터널		
A. 터널 연장 (m)	1,280		1,280		250		
B. 1일당 굴진장	2m/day		2m/day		2m/day		2cycle
c. 총 공사기간 (일)	46개월 (3년 10개월)		47개월 (3년 11개월)		10개월		
	단가	총액	단가	총액	단가	총액	
00. 기존벽체 제거	195,739	250,546,176	195,739	250,546,176	314,615	78,653,629	
01. 굴 착	1,260,458	1,613,386,010	2,302,607	2,947,336,666	1,015,698	253,924,595	발파 기준
02. 버력처리	161,425	206,623,878	288,880	369,766,000	137,268	34,317,092	
03. 강지보공	661,162	846,286,933	793,107	1,015,176,700	793,107	198,276,699	
04. 숏크리트공	1,022,906	1,309,319,910	1,419,005	1,816,326,770	1,419,005	354,751,322	
05. ROCK BOLT공	1,003,997	1,285,115,775	1,110,012	1,420,814,975	1,110,012	277,502,925	
06. 라이닝 콘크리트	3,176,121	4,065,434,982	3,640,615	4,659,987,744	3,640,615	910,153,856	자재포함
07. 방 수 공	711,883	911,209,636	806,565	1,032,403,681	806,565	201,641,344	
08. 배 수 공	805,730	1,031,334,865	841,081	1,076,583,830	841,081	210,270,279	
09. 부대공	1,349,913	1,727,888,725	1,709,642	2,188,341,381	1,511,695	377,923,761	
◎직접공사비	10,349,334	13,247,146,888	13,107,253	16,777,283,923	11,589,662	2,897,415,503	P-3 기준
◎ 간접공사비		5,298,858,755		6,710,913,569		1,158,966,201	직접공사비 40%
총공사비		18,546,005,644		23,488,197,492		4,056,381,704	

반면 “교통류 보존형 터널 확대 시공기술”을 적용하는 방법 즉, 프로텍터를 이용하는 경우에는 개략공사비에 터널 연장을 곱하여 나온 총 공사비에, 프로텍터 제작비용을 더하고, 총 굴착기간 증가에 따라 발생되는 추가 공사비에 해당하는 값, (표 3.85- 표 3.86)을 더해서 구해진다. 최종적으로 구해진 공사비는 표 3.93에 제시되어있다.

각각의 경우 모두 간접공사비는 직접공사비에 0.4배하여 계산하며, 직접공사비와 간접공사비의 합이 총공사비로서, 본 과업에서 비교하고자 하는 각 터널 공사 Case 별 직접비가 된

다.

표 3.93 프로텍터를 사용한 경우에 대한 총 공사비 산출 내역

구 분	2차로→3차로확장		2차로→4차로확장		3차로→4차로확장		비고
	남산 3호 터널		남산 3호 터널		매봉터널		
A. 터널 연장 (m)	1,280		1,280		250		
B. 1일당 굴진장	1m/day		1m/day		1m/day		1 cycle
c. 총 공사기간 (일)	68개월 (6년 8개월)		69개월 (6년 9개월)		15개월 (1년 3개월)		
	단가	총액	단가	총액	단가	총액	
프로텍터 비용 추가	-	884,849,588	-	1,098,477,968	-	1,220,111,650	프로텍터 제작비 +노무비 (40%)
00. 기존벽체 제거	391,478	501,092,352	391,478	501,092,352	629,229	157,307,258	공기지연에따른추가비용 (추가비용산출근거sheet 참고) [총액=재료비 총액 + 노무/기계경비 총액 *2] [단가계산=총액/총연장]
01. 굴 착	2,520,916	3,226,772,019	4,605,214	5,894,673,331	2,031,397	507,849,190	
02. 버력처리	322,850	413,247,755	577,759	739,532,000	274,537	68,634,184	
03. 강지보공	930,657	1,191,240,533	1,194,704	1,529,220,600	1,194,704	298,675,899	
04. 숏크리트공	1,338,615	1,713,427,020	1,856,966	2,376,915,940	1,856,966	464,241,395	
05. ROCK BOLT공	1,540,910	1,972,364,883	1,703,773	2,180,829,949	1,703,773	425,943,350	
06. 라이닝 콘크리트	3,176,121	4,065,434,982	3,640,615	4,659,987,744	3,640,615	910,153,856	자재 (철근, 콘크리트)포함
07. 방 수 공	711,883	911,209,636	806,565	1,032,403,681	806,565	201,641,344	
08. 배 수 공	805,730	1,031,334,865	841,081	1,076,583,830	841,081	210,270,279	
10. 부대공	1,349,913	1,727,888,725	1,709,642	2,188,341,381	1,511,695	377,923,761	
◎직접공사비	10,349,334	17,638,862,357	13,107,253	23,278,058,777	11,589,662	4,842,752,166	P-3 기준
◎ 간접공사비		7,055,544,943		9,311,223,511		1,937,100,866	직접공사비 40%
총공사비		24,694,407,300		32,589,282,288		6,779,853,032	

(3) 간접비 산출

간접비의 산출방법은 앞의 선행연구 분석에서 제시한 간접비 산출방법에 의거하여 계산된다. 우회도로의 평균속도는 인근 도로의 실제 평균속도로 가정하며, 기준속도는 가정 사항에서 제시한 것처럼 남산 3호 터널의 경우 서비스 수준 D의 도시고속화 도로의 기준속도를, 매봉터널의 경우 서비스 수준 D의 간선 2급도로의 기준속도를 적용한다. 이때, 주의해야하는 것은 기존공법을 사용하는 경우와 프로텍터를 사용하는 경우의 간접비 산출에 대한 계산 항목이 다르다는 점이다.

기존공법을 사용하는 경우에는 총 공사 기간에 걸쳐 교통이 전면적으로 완전 차단되는 경우이므로, 모든 차량이 우회한다고 가정하고 대상터널 분석에서 제시한 우회거리를 적용하여 간접비를 산출한다. 즉, 총 공사기간동안 모든 차량이 우회하므로 교통흐름은 공사기간 전체 동안 동일하다고 보고 1일 차량지체비용, 1일 시간가치비용, 1일 환경피해비용을 총 공사기간으로 곱하여 산출한다.

반면, 프로텍터를 사용하는 경우의 교통흐름은, 크게 3가지로 나누어진다. 첫 번째는 프로텍터를 설치·해체하는 총 30일에 해당하는 기간 동안, 공사구간은 야간 8시간동안 차량을 통제한다. 두 번째는 매일 1시간씩 심야시간에 차량을 통제하는 경우이다. 굴착 및 방수·배수공에 해당하는 공사기간동안 프로텍터 이동시간 및 발파에 따른 차량보호, 환기를 위하여 하루 1시간, 교통량이 가장 적은 해뜨기 전 시간에 차량을 통제하게 된다. 마지막은 공사기간 전체에 걸쳐 교통통제가 이루어지지 않는 기간을 고려하는 경우이다. 이는 총 공사기간동안 교통흐름은 계속 진행되지만, 교통흐름이 있는 경우에도 사용자 비용, 즉 간접비는 발생하게 되므로 이때의 간접비도 산출해야한다. 따라서 프로텍터를 사용하는 경우 간접비는 야간 8시간 통제하는 경우의 8시간동안의 차량지체비용, 시간가치비용, 환경피해비용을 산출하고 이를 각각 30일에 해당하는 기간으로 계산한 값과, 심야 1시간 통제 하는 경우의 간접비용을 총 통제 일수를 곱하여 계산한 값, 그리고 통제하지 않는 경우의 1일 간접비용을 총 공사기간으로 계산한 값의 총합을 말한다.

기존공법을 적용한 경우의 간접비 산출은 모든 차량이 우회도로로 우회한다고 가정하고, 이를 1일 차량지체비용, 1일 시간가치비용, 1일 환경피해비용을 교통량 데이터에 따라 계산하여 총 공사기간을 곱하여 총 간접비를 산출한다.

(가) 프로텍터 사용하지 않은 경우의 간접비 산출 근거

Case 1에 해당하는 터널 확장공사는 남산 3호 터널을 2차선 터널에서 3차선 터널로 확장하

는 공사이다. 이때 교통량은 붙임 3에 제시되어있는 남산 3호 터널의 교통량 데이터를 사용하되, 현재 교통량이 각 차종별로 나누어져 있지 않으므로, 서울시의 차량비율을 적용하여 각각 차종별 교통량을 적용하여야 한다. 간접비 산출방법에 의거하여 계산한 1일 차량운행에 의한 교통혼잡비, 시간가치비용, 환경 피해 비용은 표 3.94, 표 3.95, 표 3.96에 제시되어 있다. 각각의 1일 발생하는 간접비용을 Case 1에 해당하는 총 공사기간 47개월로 곱하여 총 간접비를 산출하면, 표 3.97과 같이 계산되며, 47개월 동안 2058억 원이라는 사회 직·간접적 피해비용을 산출 할 수 있다.

표 3.94 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	44,996			
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
유류비(원/l)	1041.8	1082.3	1082.3	휘발유/경유/경유
평균속도(㎞/hr)	43			
기준속도(㎞/hr)	60			도시고속화 도로, 서비스수준 D : 60km/hr
실제속도연료소모량(l/㎞)	0.0570607	0.1295810	0.2097749	승용차Lc=0.02882+0.910/V+0.000003828×V2 버스Llb=0.02476+3.492/V+0.00001277×V2 대형트럭Llt=0.06639+4.158/V+0.00002525×V2
기준속도연료소모량(l/㎞)	0.0577674	0.128932	0.22659	
연료소모량차이(l/㎞)	-0.0007067	0.0006490	-0.0168150	
시간당 운행비 (원/대hr)	17,061	17329	13902	
실제 운행시간 (hr)	0.1221			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0291			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0930			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	58,449,009	4,141,619	6,754,388	=1일교통량*[유류비*구간거리차이*(연료소모량차이) +시간당운행비*(운행시간차이)]
합계 (원)	69,345,016			

표 3.95 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	44,996			
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
평균속도(㎞/hr)	43			
기준속도(㎞/hr)	60			도시고속화 도로, 서비스수준 D : 60km/hr
평균시간가치비용(원/대*hr)	10,844	53681	16571	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.1221			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0291			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0930			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	37,219,352	12,807,398	8,531,380	=1일 교통량*평균시간가치비용*운행시간차이
합계 (원)	58,558,129			

표 3.96 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	44,996			
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
차량별 대기오염비용 (원/대*km)	34.38	296.34	449.63	건설교통부 2007년 기준
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	5,074,037	3,040,178	9,953,923	=1일 교통량*대기오염비용*우회거리차이
합계 (원)	18,068,138			

표 3.97 CASE 1의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
1일 차량혼잡비용	58,449,009	4,141,619	6,754,388	
1일 시간가치비용	37,219,352	12,807,398	8,531,380	
1일 환경오염증가비용	5,074,037	3,040,178	9,953,923	
계	100,742,398	19,989,195	25,239,691	
공사기간	47개월			(완전통제경우 - 기존공사방법)
	142,046,780,566	28,184,764,692	35,587,964,603	
합계 (원)	205,819,509,861			

Case 3에 해당하는 터널 확장공사는 남산 3호 터널을 2차선 터널에서 4차선 터널로 확장하는 공사이다. 이때 교통량은 붙임 3에 제시되어있는 남산 3호 터널의 교통량 데이터를 사용하되, 현재 교통량이 각 차종별로 나누어져 있지 않으므로, 서울시의 차량비율을 적용하여 각각 차종별 교통량을 적용하여야 한다. 간접비 산출방법에 의거하여 계산한 1일 차량운행에 의한 교통혼잡비, 시간가치비용, 환경 피해 비용은 표 3.98~ 표 3.100에 제시되어 있다. 표 3.98~3.100에 제시되어 있는 값은 앞서 계산한 Case 1의 1일 간접비용과 동일하며, 이는 같은 터널에 대하여 어떠한 확장공사를 진행하여도 1일 발생하는 교통흐름은 동일하기 때문이다.

이러한 1일 발생하는 간접비용을 Case 3에 해당하는 총 공사기간 48개월로 곱하여 총 간접비를 산출하면, 표 3.101과 같이 계산되며, 48개월 동안 2078억 원이라는 사회 직·간접적 피해비용을 산출 할 수 있다.

표 3.98 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)			44,996	
실제거리 (km)			1.5	
우회거리 (km)			5.25	일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
유류비(원/l)	1041.8	1082.3	1082.3	휘발유/경유/경유
평균속도(㎞/hr)			43	
기준속도(㎞/hr)			60	도시고속화 도로, 서비스수준 D : 60km/hr
실제속도연료소모량(l/㎞)	0.0570607	0.1295810	0.2097749	승용차Lc=0.02882+0.910/V+0.000003828×V2 버스Llb=0.02476+3.492/V+0.00001277×V2 대형트럭Llt=0.06639+4.158/V+0.00002525×V2
기준속도연료소모량(l/㎞)	0.0577674	0.128932	0.22659	
연료소모량차이(l/㎞)	-0.0007067	0.0006490	-0.0168150	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17329	13902	
실제 운행시간 (hr)			0.1221	=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)			0.0291	=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)			0.0930	
차량운행에 따른 교통혼잡비(원)	58,449,009	4,141,619	6,754,388	=1일교통량*[유류비*구간거리차이*(연료소모량차이) +시간당운행비*(운행시간차이)]
합계 (원)			69,345,016	

표 3.99 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)			44,996	
실제거리 (km)			1.5	
우회거리 (km)			5.25	일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
평균속도(㎞/hr)			43	
기준속도(㎞/hr)			60	도시고속화 도로, 서비스수준 D : 60km/hr
평균시간가치비용(원/대*hr)	10,844	53681	16571	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)			0.1221	=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)			0.0291	=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)			0.0930	
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	37,219,352	12,807,398	8,531,380	=1일 교통량*평균시간가치비용*운행시간차이
합계 (원)			58,558,129	

표 3.100 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)		44,996		
실제거리 (km)		1.5		
우회거리 (km)		5.25		일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
차량별 대기오염비용 (원/대*km)	34.38	296.34	449.63	건설교통부 2007년 기준
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	5,074,037	3,040,178	9,953,923	=1일교통량*대기오염비용*우회거리차이
합계 (원)			18,068,138	

표 3.101 CASE 3의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
1일 차량혼잡비용	58,449,009	4,141,619	6,754,388	
1일 시간가치비용	37,219,352	12,807,398	8,531,380	
1일 환경오염증가비용	5,074,037	3,040,178	9,953,923	
계	100,742,398	19,989,195	25,239,691	
공사기간			48개월	(완전통제경우 - 기존공사방법)
	143,457,174,132	28,464,613,419	35,941,320,280	
합계 (원)			207,863,107,832	

Case 5에 해당하는 터널 확장공사는 서울 도심지에 있는 3차로 터널인 매봉터널을 4차선 터널로 확장하는 공사이다. 이때 교통량은 매봉터널의 교통량 데이터를 사용하며, 앞서 계산한 방법과 동일한 방법으로 차종별 교통량을 적용한다. 이렇게 계산된 1일 차량운행에 의한 교통혼잡비, 시간가치비용, 환경 피해 비용은 표에 제시되어 있다.

이러한 1일 발생하는 간접비용을 Case 5에 해당하는 총 공사기간 11개월로 곱하여 총 간접비를 산출하면, 표 3.105와 같이 계산되며, 689억 원이라는 총 간접비용이 산출된다. 남산 3호 터널의 간접비와 매우 큰 차이가 나는 이유는, 매봉터널의 터널 길이가 700m로 짧기 때문에 총 공사기간도 이에 비례하여 11개월이라는 단기간에 공사가 이루어지는 것으로 계산하였기 때문이다.

표 3.102 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	73041			
실제거리 (km)	0.715			
우회거리 (km)	1.985			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
유류비(원/l)	1041.8	1082.3	1082.3	휘발유/경유/경유
평균속도(㎞/hr)	20			
기준속도(㎞/hr)	25			간선 2급 도로, 서비스수준 D : 25km/hr
실제속도연료소모량(l/㎞)	0.0758512	0.204468	0.28439	승용차Lc=0.02882+0.910/V+0.000003828×V2 버스Llb=0.02476+3.492/V+0.00001277×V2 대형트럭Llt=0.06639+4.158/V+0.00002525×V2
기준속도연료소모량(l/㎞)	0.0676125	0.17242125	0.24849125	
연료소모량차이(l/㎞)	0.0082387	0.03204675	0.03589875	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0993			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0125			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0868			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	89,536,972	6,509,243	11,440,360	=1일교통량*[유류비*구간거리차이*(연료소모량차이)+시간당운행비*(운행시간차이)]
합계 (원)	107,486,576			

표 3.103 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	73041			
실제거리 (km)	0.715			
우회거리 (km)	1.985			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
평균속도(㎞/hr)	20			
기준속도(㎞/hr)	25			간선 2급 도로, 서비스수준 D : 25km/hr
평균시간가치비용(원/대*hr)	10,844	53,681	16,571	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0993			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0125			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0868			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	56,342,947	19,387,939	12,914,870	=1일 교통량*평균시간가치비용*운행시간차이
합계 (원)	88,645,755			

표 3.104 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	73041			
실제거리 (km)	0.715			
우회거리 (km)	1.985			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
차량별 대기오염비용 (원/대*km)	34.38	296.34	449.63	건설교통부 2007년 기준
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	3,572,613	2,140,579	7,008,524	=1일 교통량*대기오염비용*우회거리차이
합계 (원)	12,721,716			

표 3.105 CASE 5의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
1일 차량혼잡비용	89,536,972	6,509,243	11,440,360	
1일 시간가치비용	56,342,947	19,387,939	12,914,870	
1일 환경오염증가비용	3,572,613	2,140,579	7,008,524	
계	149,452,531	28,037,762	31,363,753	
공사기간	11개월			(완전통제경우 - 기존공사방법)
	49,319,335,363	9,252,461,423	10,350,038,649	
합계 (원)	**68,921,835,436**			

(나) 프로텍터를 사용한 경우의 간접비 계산

앞서 설명한 대로 프로텍터를 사용하는 경우의 간접비 산출방법은 3가지 단계로 이루어진다. 야간 8시간 통제 경우와 1시간 통제하는 경우, 그리고 통제하지 않는 경우 3가지에 대한 1일 간접비용을 산출한다. 그리고 각각의 경우에 대한 기간을 곱하여 3가지 경우에 대한 간접비용 총합을 구하고, 최종적으로 이를 다 더한 값이 총 간접비가 된다. 3가지 경우에 대한 교통흐름은 붙임 3의 교통 통계 데이터를 참고로 하여 산출하면 되며, 기존공법을 적용하였을 때와 마찬가지로 차량별 교통량을 각각 계산하여야 한다.

남산 3호 터널을 2차선 터널에서 3차선 터널로 확장하는 공사에서 프로텍터를 적용하는 경우인 Case 2의 간접비를 산출하기 위해서는 야간통제 8시간, 부분통제 1시간, 통제안하는 경우 3가지로 나누어 간접비를 각각 산출하고 이를 더해야 한다.

프로텍터 설치 및 해체기간 각각 15일씩 적용하고 이를 위해 야간통제 8시간 하는 경우에도 1일 차량지체지용, 시간가치비용, 환경피해비용을 각각 계산하여야 하며, 그 결과는 표 3.106~ 표 3.109에 제시되어 있다.

표 3.106 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
야간 교통량 (대)	7,166			23:00 ~07:00 까지 교통량
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
유류비(원/l)	1041.8	1082.3	1082.3	휘발유/경유/경유
평균속도(㎞/hr)	53.9			
기준속도(㎞/hr)	60			도시고속화 도로, 자유속도 : 80km/hr
실제속도연료소모량(l/㎞)	0.056824261	0.1266461	0.216889	승용차Lc=0.02882+0.910/V+0.000003828×V2 버스Llb=0.02476+3.492/V+0.00001277×V2 대형트럭Llt=0.06639+4.158/V+0.00002525×V2
기준속도연료소모량(l/㎞)	0.057767467	0.128932	0.22659	
연료소모량차이(l/㎞)	-0.0009432	-0.0022858	-0.009700	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0974			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0232			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0742			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	7,416,791	521,245	872,333	=교통량*[유류비*구간거리차이*(연료소모량차이) +시간당운행비*(운행시간차이)]
합계 (원)	8,810,369			

표 3.107 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
야간 교통량 (대)	7,166			23:00 ~07:00 까지 교통량
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
평균속도(㎞/hr)	53.9			
기준속도(㎞/hr)	60			도시고속화 도로, 자유속도 : 80km/hr
평균시간가치비용(원/대*hr)	10,844	53681	16571	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0974			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0232			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0742			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	4,728,805	1,627,210	1,083,932	=1일교통량*평균시간가치비용*운행시간차이
합계 (원)	**7,439,946**			

표 3.108 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용

	승용차	버스	화물차	비고
야간 교통량 (대)	7,166			23:00 ~07:00 까지 교통량
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
차량별 대기오염비용 (원/대*km)	34	296	450	건설교통부 2007년 기준
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	808,084	484,175	1,585,248	=1일 교통량*대기오염비용*우회거리차이
합계 (원)	**2,877,506**			

표 3.109 CASE 2의 야간통제 30일간의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
1일 차량혼잡비용	7,416,791	521,245	872,333	
1일 시간가치비용	4,728,805	1,627,210	1,083,932	
1일 환경오염증가비용	808,084	484,175	1,585,248	
계	12,953,680	2,632,629	3,541,512	
공사기간	30일			프로텍터 설치 및 해체기간
	388,610,402	78,978,860	106,245,368	
합계 (원)	**573,834,630**			

발파를 위한 1일 1시간 부분 통제하는 경우에는, 교통량이 가장적은 심야시간대, 해뜨기 전에 발파하는 것을 기준으로 하여 교통량을 산출해야한다. 이에 따른 1시간 교통량을 각각 구하고, 이를 3가지 간접비 항목으로 계산하여 총 통제기간 1408일을 곱하여 계산 한 값이 표 3.110 ~ 표 3.113에 제시되어 있다.

표 3.110 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1시간 교통량 (대)	412			04:00 ~ 05:00 까지 교통량
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
유류비(원/l)	1041.8	1082.3	1082.3	휘발유/경유/경유
평균속도(㎞/hr)	53.9			
기준속도(㎞/hr)	60			도시고속화 도로, 자유속도 : 80km/hr
실제속도연료소모량(l/㎞)	0.0568242	0.1266461	0.216889	승용차Lc=0.02882+0.910/V+0.000003828×V2 버스Llb=0.02476+3.492/V+0.00001277×V2 대형트럭Llt=0.06639+4.158/V+0.00002525×V2
기준속도연료소모량(l/㎞)	0.0577674	0.128932	0.22659	
연료소모량차이(l/㎞)	-0.0009432	-0.0022858	-0.009700	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0974			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0232			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0742			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	426,419	29,968	50,154	=교통량*[유류비*구간거리차이*(연료소모량차이) +시간당운행비*(운행시간차이)]
합계 (원)	**506,541**			

표 3.111 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1시간 교통량 (대)	412			04:00 ~ 05:00 까지 교통량
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
평균속도(㎞/hr)	53.9			
기준속도(㎞/hr)	60			도시고속화 도로, 자유속도 : 80km/hr
평균시간가치비용(원/대*hr)	10,844	53681	16571	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0974			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0232			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0742			
차량운행에 따른 교통혼잡비(원)	271,877	93,554	62,319	=1일교통량*평균시간가치비용*운행시간차이
합계 (원)	**427,750**			

표 3.112 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용

	승용차	버스	화물차	비고
1시간 교통량 (대)	412			04:00 ~ 05:00 까지 교통량
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
차량별 대기오염비용 (원/대*km)	34	296	450	건설교통부 2007년 기준
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	46,460	27,837	91,142	=1일 교통량*대기오염비용*우회거리차이
합계 (원)	**165,439**			

표 3.113 CASE 2의 부분통제 1408일간의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
1일 차량혼잡비용	426,419	29,968	50,154	
1일 시간가치비용	271,877	93,554	62,319	
1일 환경오염증가비용	46,460	27,837	91,142	
계	744,755	151,360	203,615	
공사기간	1408일			굴착기간+라이닝공사기간
	1,048,615,404	213,114,341	286,689,519	
합계 (원)	1,548,419,264			

차량통제가 없는 경우에도 공사 전체 기간 동안 교통흐름에 의해 간접비가 발생하게 된다. 이를 계산하면 다음 표 3.114 ~ 3.117과 같다.

표 3.114 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	44,996			
실제거리 (km)	1.5			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
유류비(원/l)	1041.8	1082.3	1082.3	휘발유/경유/경유
평균속도(㎞/hr)	43			
실제속도연료소모량(l/㎞)	0.0570607	0.1295810	0.2097749	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0291			=실제거리/평균속도
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	21,040,970	1,292,004	2,236,649	=교통량*[유류비*구간거리차이*(연료소모량차이) +시간당 운행비*(운행시간차이)]
합계 (원)	24,569,623			

표 3.115 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	44,996			
실제거리 (km)	1.5			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
평균속도(㎞/hr)	43			
평균시간가치비용(원/대*hr)	10,844	53681	16571	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0291			=실제거리/평균속도
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	11,631,047	4,002,312	2,666,056	=1일 교통량*평균시간가치비용*운행시간차이
합계 (원)	**18,299,415**			

표 3.116 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	44,996			
실제거리 (km)	1.5			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
차량별 대기오염비용 (원/대*km)	34	296	450	건설교통부 2007년 기준
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	252,526	151,305	495,390	=1일 교통량*대기오염비용*우회거리차이
합계 (원)	**899,221**			

표 3.117 CASE 2의 총 공사기간 중 일반교통흐름에서의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
1일 차량혼잡비용	21,040,970	1,292,004	2,236,649	
1일 시간가치비용	11,631,047	4,002,312	2,666,056	
1일 환경오염증가비용	252,526	151,305	495,390	
계	32,924,544	5,445,620	5,398,095	
공사기간	68개월			(프로텍터 이용하는 경우 총공사기간)
	67,495,314,641	11,163,521,463	11,066,095,300	
합계 (원)	89,724,931,403			

앞서 구한 3가지 경우의 통제 방법에 대하여 산출된 간접비를 모두 더하면 다음 표 3.118과 같다. 계산 결과, 총 공사기간 68개월 동안 발생하는 간접비는 918억 원으로 예상된다.

표 3.118 CASE 2의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
8시간 야간통제	388,610,402	78,978,860	106,245,368	30일 적용
1시간 부분통제	1,048,615,404	213,114,341	286,689,519	1408일 적용
교통통제 없는 경우	67,495,314,641	11,163,521,463	11,066,095,300	68개월 적용
통제기간별 합계	68,932,540,447	11,455,614,664	11,459,030,187	(프로텍터 이용하는 경우 총공사기간)
합계 (원)	91,847,185,298			

남산 3호 터널을 2차선 터널에서 4차선 터널로 확장하는 공사에서 프로텍터를 적용하는 경우인 Case 4의 간접비를 산출하기 위해서는 야간통제 8시간, 부분통제 1시간, 통제안하는 경우 3가지로 나누어 간접비를 각각 산출하고 이를 더해야 한다.

프로텍터 설치 및 해체기간 각각 15일씩 적용하고 이를 위해 야간통제 8시간 하는 경우에도 1일 차량지체지용, 시간가치비용, 환경피해비용을 각각 계산하여야 하며, 그 결과는 표 3.119 ~ 표 3.122에 제시되어 있으며, 이는 앞서 계산한 Case 2의 야간통제 계산결과와 동일하다. Case 2와 Case 4의 경우 모두 남산 3호 터널로서, 교통흐름도 동일하며 통제기간 역시 30일로 동일하기 때문이다.

표 3.119 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
야간 교통량 (대)	7,166			23:00 ~07:00 까지 교통량
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
유류비(원/l)	1041.8	1082.3	1082.3	휘발유/경유/경유
평균속도(㎞/hr)	53.9			
기준속도(㎞/hr)	60			도시고속화 도로, 자유속도 : 80km/hr
실제속도연료소모량(l/㎞)	0.056824261	0.1266461	0.216889	승용차Lc=0.02882+0.910/V+0.000003828×V2 버스Llb=0.02476+3.492/V+0.00001277×V2 대형트럭Llt=0.06639+4.158/V+0.00002525×V2
기준속도연료소모량(l/㎞)	0.057767467	0.128932	0.22659	
연료소모량차이(l/㎞)	-0.0009432	-0.0022858	-0.009700	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0974			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0232			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0742			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	7,416,791	521,245	872,333	=교통량*[유류비*구간거리차이*(연료소모량차이) +시간당운행비*(운행시간차이)]
합계 (원)	8,810,369			

표 3.120 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
야간 교통량 (대)	7,166			23:00 ~07:00 까지 교통량
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
평균속도(㎞/hr)	53.9			
기준속도(㎞/hr)	60			도시고속화 도로, 자유속도 : 80km/hr
평균시간가치비용(원/대*hr)	10,844	53681	16571	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0974			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0232			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0742			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	4,728,805	1,627,210	1,083,932	=1일 교통량*평균시간가치비용*운행시간차이
합계 (원)	7,439,946			

표 3.121 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용

	승용차	버스	화물차	비고
야간 교통량 (대)	7,166			23:00 ~07:00 까지 교통량
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
차량별 대기오염비용 (원/대*km)	34	296	450	건설교통부 2007년 기준
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	808,084	484,175	1,585,248	=1일 교통량*대기오염비용*우회거리차이
합계 (원)	**2,877,506**			

표 3.122 CASE 2의 야간통제 30일간의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
1일 차량혼잡비용	7,416,791	521,245	872,333	
1일 시간가치비용	4,728,805	1,627,210	1,083,932	
1일 환경오염증가비용	808,084	484,175	1,585,248	
계	12,953,680	2,632,629	3,541,512	
공사기간	30일			프로텍터 설치 및 해체기간
	388,610,402	78,978,860	106,245,368	
합계 (원)	**573,834,630**			

발파를 위한 1일 1시간 부분 통제하는 경우에는, 교통량이 가장적은 심야시간대, 해뜨기 전에 발파하는 것을 기준으로 하여 교통량을 산출해야한다. 이에 따른 1시간 교통량을 각각 구하고, 이를 3가지 간접비 항목으로 계산하여 총 통제기간 1408일을 곱하여 계산 한 값이 표 3.123 ~ 표 3.126에 제시되어 있다.

표 3.123 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1시간 교통량 (대)	412			04:00 ~ 05:00 까지 교통량
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
유류비(원/l)	1041.8	1082.3	1082.3	휘발유/경유/경유
평균속도(㎞/hr)	53.9			
기준속도(㎞/hr)	60			도시고속화 도로, 자유속도 : 80km/hr
실제속도연료소모량(l/㎞)	0.0568242	0.1266461	0.216889	승용차Lc=0.02882+0.910/V+0.000003828×V2 버스Llb=0.02476+3.492/V+0.00001277×V2 대형트럭Llt=0.06639+4.158/V+0.00002525×V2
기준속도연료소모량(l/㎞)	0.0577674	0.128932	0.22659	
연료소모량차이(l/㎞)	-0.0009432	-0.0022858	-0.009700	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0974			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0232			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0742			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	426,419	29,968	50,154	=교통량*[유류비*구간거리차이*(연료소모량차이) +시간당 운행비*(운행시간차이)]
합계 (원)	**506,541**			

표 3.124 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1시간 교통량 (대)	412			04:00 ~ 05:00 까지 교통량
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
평균속도(㎞/hr)	53.9			
기준속도(㎞/hr)	60			도시고속화 도로, 자유속도 : 80km/hr
평균시간가치비용(원/대*hr)	10,844	53681	16571	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0974			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0232			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0742			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	271,877	93,554	62,319	=1일 교통량*평균시간가치비용*운행시간차이
합계 (원)	**427,750**			

표 3.125 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용

	승용차	버스	화물차	비고
1시간 교통량 (대)	412			04:00 ~ 05:00 까지 교통량
실제거리 (km)	1.5			
우회거리 (km)	5.25			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
차량별 대기오염비용 (원/대*km)	34	296	450	건설교통부 2007년 기준
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	46,460	27,837	91,142	=1일 교통량*대기오염비용*우회거리차이
합계 (원)	**165,439**			

표 3.126 CASE 2의 부분통제 1408일간의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
1일 차량혼잡비용	426,419	29,968	50,154	
1일 시간가치비용	271,877	93,554	62,319	
1일 환경오염증가비용	46,460	27,837	91,142	
계	744,755	151,360	203,615	
공사기간	1408일			굴착기간+라이닝공사기간
	1,048,615,404	213,114,341	286,689,519	
합계 (원)	1,548,419,264			

차량통제가 없는 경우에도 공사 전체 기간 동안 교통흐름에 의해 간접비가 발생하게 된다. 이를 계산하면 다음 표 3.127 ~ 3.130과 같다.

표 3.127 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	44,996			
실제거리 (km)	1.5			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
유류비(원/l)	1041.8	1082.3	1082.3	휘발유/경유/경유
평균속도(㎞/hr)	43			
실제속도연료소모량(l/㎞)	0.0570607	0.1295810	0.2097749	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0291			=실제거리/평균속도
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	21,040,970	1,292,004	2,236,649	=교통량*[유류비*구간거리차이*(연료소모량차이) +시간당운행비*(운행시간차이)]
합계 (원)	24,569,623			

표 3.128 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	44,996			
실제거리 (km)	1.5			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
평균속도(㎞/hr)	43			
평균시간가치비용(원/대*hr)	10,844	53681	16571	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0291			=실제거리/평균속도
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	11,631,047	4,002,312	2,666,056	=1일 교통량*평균시간가치비용*운행시간차이
합계 (원)	**18,299,415**			

표 3.129 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	44,996			
실제거리 (km)	1.5			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
차량별 대기오염비용 (원/대*km)	34	296	450	건설교통부 2007년 기준
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	252,526	151,305	495,390	=1일 교통량*대기오염비용*우회거리차이
합계 (원)	**899,221**			

표 3.130 CASE 4의 총 공사기간 중 일반교통흐름에서의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
1일 차량혼잡비용	21,040,970	1,292,004	2,236,649	
1일 시간가치비용	11,631,047	4,002,312	2,666,056	
1일 환경오염증가비용	252,526	151,305	495,390	
계	32,924,544	5,445,620	5,398,095	
공사기간	69개월			(프로텍터 이용하는 경우 총공사기간)
	67,956,258,253	11,239,760,146	11,141,668,633	
합계 (원)	**90,337,687,032**			

앞서 구한 3가지 경우의 통제 방법에 대하여 산출된 간접비를 모두 더하면 다음 표 3.131과 같다. 계산 결과, 총 공사기간 69개월 동안 발생하는 간접비는 924억 원으로 예상된다. 8시간 통제, 1시간 통제의 경우 적용하는 기간 또한 동일하기 때문에, Case 2와 동일한 계산 결과가 나오나, 교통통제가 없는 경우에 대해서는 총 69개월이라는 공사기간을 적용하기 때문에, 다른 계산 결과가 산출된다. 총 간접비용은 각 통제 경우의 간접비 총합으로 계산하여, 924억 원이라는 결과가 나오게 된다.

표 3.131 CASE 4의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
8시간 야간통제	388,610,402	78,978,860	106,245,368	30일 적용
1시간 부분통제	1,048,615,404	213,114,341	286,689,519	1408일 적용
교통통제 없는 경우	67,956,258,253	11,239,760,146	11,141,668,633	69개월 적용
통제기간별 합계	69,393,484,059	11,531,853,347	11,534,603,520	(프로텍터 이용하는 경우 총공사기간)
합계 (원)	92,459,940,926			

매봉터널 3차선 터널에서 4차선 터널로 확장하는 공사에서 프로텍터를 적용하는 경우인 Case 6의 간접비를 산출하기 위해서는 야간통제 8시간, 부분통제 1시간, 통제안하는 경우 3가지로 나누어 간접비를 각각 산출하고 이를 더해야 한다.

프로텍터 설치 및 해체기간 각각 15일씩 적용하고 이를 위해 야간통제 8시간 하는 경우에도 1일 차량지체지용, 시간가치비용, 환경피해비용을 각각 계산하여야 하며, 그 결과는 표 3.132 ~ 표 3.135에 제시되어 있다.

표 3.132 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
야간 교통량 (대)	11,369			22:00 ~06:00 까지 교통량
실제거리 (km)	0.715			
우회거리 (km)	1.985			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
유류비(원/l)	1041.8	1082.3	1082.3	휘발유/경유/경유
평균속도(㎞/hr)	50			
기준속도(㎞/hr)	70			간선 2급 도로, 자유속도 : 70km/hr
실제속도연료소모량(l/㎞)	0.05659	0.126525	0.212675	승용차Lc=0.02882+0.910/V+0.000003828×V2 버스Llb=0.02476+3.492/V+0.00001277×V2 대형트럭Llt=0.06639+4.158/V+0.00002525×V2
기준속도연료소모량(l/㎞)	0.0605772	0.1372187	0.249515	
연료소모량차이(l/㎞)	-0.0039872	-0.0106937	-0.03684	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0397			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0050			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0347			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	5,451,936	376,660	577,844	=교통량*[유류비*구간거리차이*(연료소모량차이) + 시간당운행비*(운행시간차이)]
합계 (원)	6,406,439			

표 3.133 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
야간 교통량 (대)	11,369			22:00 ~06:00 까지 교통량
실제거리 (km)	0.715			
우회거리 (km)	1.985			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
평균속도(㎞/hr)	50			
기준속도(㎞/hr)	70			간선 2급 도로, 자유속도 : 70km/hr
평균시간가치비용(원/대*hr)	10,844	53681	16571	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0397			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0050			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0347			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	3,507,964	1,207,111	804,092	=1일 교통량*평균시간가치비용*운행시간차이
합계 (원)	5,519,166			

표 3.134 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용

	승용차	버스	화물차	비고
야간 교통량 (대)	11,369			22:00 ~06:00 까지 교통량
실제거리 (km)	0.715			
우회거리 (km)	1.985			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
차량별 대기오염비용 (원/대*km)	34	296	450	건설교통부 2007년 기준
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	556,085	333,186	1,090,893	=1일 교통량*대기오염비용*우회거리차이
합계 (원)	**1,980,164**			

표 3.135 CASE 6의 야간통제 30일간의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
1일 차량혼잡비용	5,451,936	376,660	577,844	
1일 시간가치비용	3,507,964	1,207,111	804,092	
1일 환경오염증가비용	556,085	333,186	1,090,893	
계	9,515,985	1,916,957	2,472,828	
공사기간	30일			프로텍터 설치 및 해체기간
	285,479,544	57,508,710	74,184,850	
합계 (원)	417,173,105			

발파를 위한 1일 1시간 부분 통제하는 경우에는, 교통량이 가장적은 심야시간대, 해뜨기 전에 발파하는 것을 기준으로 하여 교통량을 산출해야한다. 이에 따른 1시간 교통량을 각각 구하고, 이를 3가지 간접비 항목으로 계산하여 총 통제기간 150일을 곱하여 계산 한 값이 표 3.136 ~ 표 3.139에 제시되어 있다.

표 3.136 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1시간 교통량 (대)	666			04:00 ~ 05:00 까지 교통량
실제거리 (km)	0.715			
우회거리 (km)	1.985			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
유류비(원/l)	1041.8	1082.3	1082.3	휘발유/경유/경유
평균속도(㎞/hr)	50			
기준속도(㎞/hr)	70			간선 2급 도로, 자유속도 : 70km/hr
실제속도연료소모량(l/㎞)	0.05659	0.126525	0.212675	승용차Lc=0.02882+0.910/V+0.000003828×V2 버스Llb=0.02476+3.492/V+0.00001277×V2 대형트럭Llt=0.06639+4.158/V+0.00002525×V2
기준속도연료소모량(l/㎞)	0.0605772	0.1372187	0.249515	
연료소모량차이(l/㎞)	-0.0039872	-0.0106937	-0.03684	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0397			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0050			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0347			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	319,376	22,065	33,850	=교통량*[유류비*구간거리차이*(연료소모량차이)+시간당운행비*(운행시간차이)]
합계 (원)	**375,291**			

표 3.137 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1시간 교통량 (대)	666			04:00 ~ 05:00 까지 교통량
실제거리 (km)	0.715			
우회거리 (km)	1.985			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
평균속도(㎞/hr)	50			
기준속도(㎞/hr)	70			간선 2급 도로, 자유속도 : 70km/hr
평균시간가치비용(원/대*hr)	10,844	53681	16571	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0397			=우회거리/평균속도
기준 운행시간 (hr)	0.0050			=실제거리/평균속도
운행시간 차이 (hr)	0.0347			
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	205,498	70,713	47,104	=1일 교통량*평균시간가치비용*운행시간차이
합계 (원)	323,315			

표 3.138 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용

	승용차	버스	화물차	비고
1시간 교통량 (대)	666			04:00 ~ 05:00 까지 교통량
실제거리 (km)	0.715			
우회거리 (km)	1.985			일반도시부 평균 추가우회거리길이 적용
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
차량별 대기오염비용 (원/대*km)	34	296	450	건설교통부 2007년 기준
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	32,576	19,518	63,905	=1일 교통량*대기오염비용*우회거리차이
합계 (원)	**115,999**			

표 3.139 CASE 6의 부분통제 150일간의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
1일 차량혼잡비용	319,376	22,065	33,850	
1일 시간가치비용	205,498	70,713	47,104	
1일 환경오염증가비용	32,576	19,518	63,905	
계	557,450	112,296	144,859	
공사기간	150일			굴착기간+라이닝공사기간
	83,617,458	16,844,402	21,728,873	
합계 (원)	122,190,733			

차량통제가 없는 경우에도 공사 전체 기간 동안 교통흐름에 의해 간접비가 발생하게 된다. 이를 계산하면 다음 표 3.140 ~ 3.141과 같다.

표 3.140 차량운행에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	73,041			
실제거리 (km)	0.715			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
유류비(원/l)	1041.8	1082.3	1082.3	휘발유/경유/경유
평균속도(㎞/hr)	20			
실제속도연료소모량(l/㎞)	0.0758512	0.204468	0.28439	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0125			=실제거리/평균속도
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	13,956,288	901,831	1,561,202	=교통량*[유류비*구간거리차이*(연료소모량차이) +시간당운행비*(운행시간차이)]
합계 (원)	16,419,321			

표 3.141 시간가치에 따른 1일 교통혼잡비

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	73,041			
실제거리 (km)	0.715			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
평균속도(㎞/hr)	20			
평균시간가치비용(원/대*hr)	10,844	53681	16571	
시간당 운행비 (원/대*hr)	17,061	17,329	13,902	
실제 운행시간 (hr)	0.0125			=실제거리/평균속도
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	8,118,580	2,793,651	1,860,932	=1일 교통량*평균시간가치비용*운행시간차이
합계 (원)	**12,773,164**			

표 3.142 우회로 인한 1일 환경오염 증가비용

	승용차	버스	화물차	비고
1일 교통량 (대)	73,041			
실제거리 (km)	0.715			
서울시 차량비율 (%)	82	5.7	12.3	
차량별 대기오염비용 (원/대*km)	34	296	450	건설교통부 2007년 기준
차량운행에 따른 교통혼잡비 (원)	80,128	48,010	157,189	=1일 교통량*대기오염비용*우회거리차이
합계 (원)	**285,326**			

표 3.143 CASE 6의 총 공사기간 중 일반교통흐름에서의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
1일 차량혼잡비용	13,956,288	901,831	1,561,202	
1일 시간가치비용	8,118,580	2,793,651	1,860,932	
1일 환경오염증가비용	80,128	48,010	157,189	
계	22,154,996	3,743,492	3,579,323	
공사기간	15개월			(프로텍터 이용하는 경우 총공사기간)
	10,080,523,189	1,703,288,646	1,628,592,177	
합계 (원)	13,412,404,012			

앞서 구한 3가지 경우의 통제 방법에 대하여 산출된 간접비를 모두 더하면 다음 표 3.144과 같다. 총 공사기간 15개월 동안 발생하는 총 간접비는 8시간 통제의 경우 30일 적용한 총합과, 1시간 통제하는 경우 150일을 적용하여 계산한 결과, 그리고 교통통제가 없는 경우 발생하는 간접비에 대하여 총 공사기간인 15개월을 적용하여 나온 결과를 모두 더하여 계산한다. 계산 결과, 총 간접비용은 각 통제 경우의 간접비 총합으로 계산하여, 15개월 동안 139억원이라는 사회 직·간접적 비용이 예상된다.

표 3.144 CASE 6의 간접비 총액

	승용차	버스	화물차	비고
8시간 야간통제	285,479,544	57,508,710	74,184,850	30일 적용
1시간 부분통제	83,617,458	16,844,402	21,728,873	150일 적용
교통통제 없는 경우	10,080,523,189	1,703,288,646	1,628,592,177	15개월 적용
통제기간별 합계	10,449,620,191	1,777,641,758	1,724,505,900	(프로텍터 이용하는 경우 총공사기간)
합계 (원)	13,951,767,849			

다. 직·간접비용 산출 결과 분석

앞에서 계산한 직·간접비용을 각 분석 대상별로 정리한 결과를 표 3.145, 그림 3.132에 제시하였다. 직접비의 경우 동일한 공사에 있어서 공법 적용 유무에 따라, 약 1.5배의 차이가 발생한다. 즉, 본 과업에서 분석하고자 한 “교통류 보존형 터널 확대 시공기술”의 경우 프로텍터를 적용하는 경우로서 기존 방법에 비해 직접비는 약 1.5배 정도 더 크게 발생한다. 그러나 간접비의 경우 프로텍터를 사용하는 경우, 기존방법에 비해 50%이상 절약하는 효과가 있으며, 사회·직 간접적 비용에 해당하는 간접비의 경우, 공사기간이 길기 때문에 그 비용도 매우 크게 계산된다. 따라서 직접비와 간접비의 총액을 놓고 비교하였을 때에도 그 결과는 프로텍터를 사용하는 경우에 발생하는 직·간접비용의 총액이 더 경제적으로 분석되었다.

따라서 본 과업에서 분석한 “교통류 보존형 터널 확대 시공기술”의 이동식 프로텍터를 사용하여 완전교통차단을 하지 않고, 터널을 확장하는 공법을 적용하는 경우 사회적 간접비까지 고려하였을 때, 공법을 적용하지 않는 경우에 비해 그 비용 절감 효과가 약 2배가량 발생하는 것으로 예상된다. 또한, 분석결과 발생한 간접비가 직접비에 비해 매우 크게 발생하는 것으로 나타났으므로, 터널 공사기간 증가로 인하여 공사비용이 더 증가하는 경우에도 그 간접적 비용까지 고려하였을 때, 직·간접적 비용의 절감 효과는 계속 발생할 것으로 예상된다.

표 3.145 각 분석대상 별 직·간접비용 총액 계산 결과 (단위: 원)

	터널 유형	프로텍터 유무	직접비 A	간접비 B	NPV (A+B)
case 1	남산3호 2→3	X (완전통제)	18,546,005,644	201,440,371,354	219,986,376,997
case 2	남산3호 2→3	O (부분통제)	24,694,407,300	91,847,185,297	116,541,592,598
case 3	남산3호 2→4	X (완전통제)	23,488,197,492	203,483,969,324	226,972,166,816
case 4	남산3호 2→4	O (부분통제)	32,589,282,288	92,459,940,926	125,049,223,215
case 5	매봉 3→4	X (완전통제)	4,056,381,704	62,656,214,033	66,712,595,737
case 6	매봉 3→4	O (부분통제)	6,779,853,032	13,951,767,849	20,731,620,881

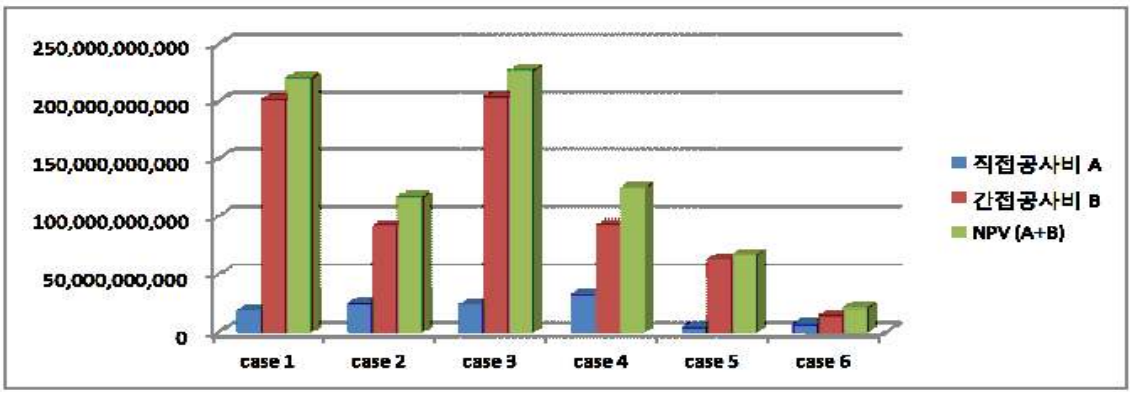


그림 3.134 각 분석대상 별 직·간접비용 총액 계산 결과

제3절 교통흐름을 유지 터널 확대 보강기술 개발

1. 터널 단면 확대시 보강공법 조사 및 분석

가. 굴착에 따른 터널과 지반의 역학적 거동 특성

굴착시 터널과 지반의 역학적 거동 특성에 관계되는 요소로 굴진면, 코어, 숏크리트 등이 있으며 선행변위, 막장변위, 내공변위의 형태로 나타난다. 이러한 역학적 거동은 다음 그림과 같이 굴진면 전방에서 발생하는 굴진면 변위와 선행변위는 굴진면 주변의 초기 안정성에 영향을 미치고 굴진면 후방에서의 천단 및 내공변위 발생은 중·장기적인 터널의 안정성에 영향을 미친다.

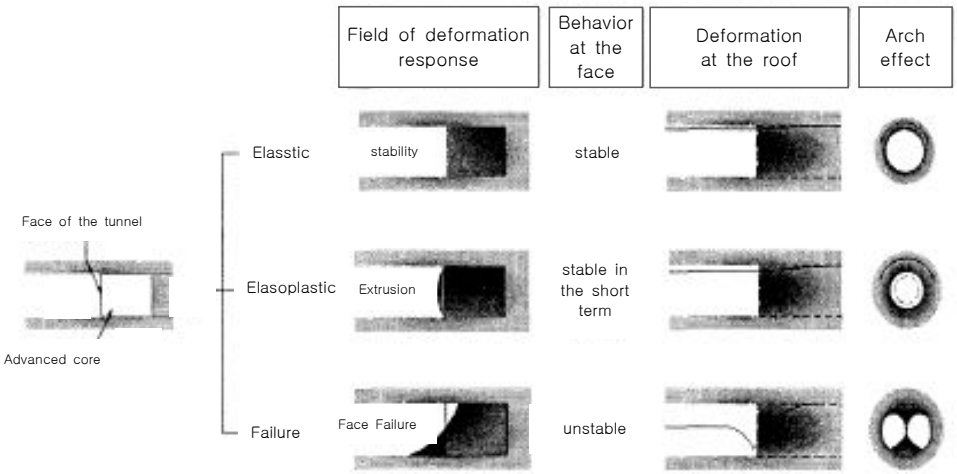


그림 3.135 터널 굴착에 의한 변형 거동

선행변위가 발생되는 코어(Core)부분은 굴진면 전방에 위치하며 터널 직경과 같은 원통형의 기하학적인 형태를 가진다. 굴진면 변위는 굴착시 전방 코어 내부에서 발달한 변형거동으로 인해 발생하며 코어의 강도, 변형, 초기응력상태와 관계가 있다. 그리고 터널의 내공변위는 선행변위와 굴진면 변위의 관계가 지배적이며 굴진면 후방에서 발생하는 변위거동를 말한다.

즉 터널에서 전방 코어의 변형은 전체 터널의 변형과정에 영향을 미치고 변형의 구성요소인 굴진면 변위, 선행변위, 내공변위가 발생하는 원인이 되므로 전방 코어의 강성은 장·단기

적으로 터널 안정성을 유지하는데 매우 중요하다.

다음 그림과 같이 터널 굴착과정에서 삼축응력상태가 평면응력상태로 바뀌는 과정 중에 응력이 탄성범위 내에서 점진적으로 감소된다면 굴착에 의하여 개방된 벽체는 미세한 변형이 일어나 안정상태로 존재하게 된다. 따라서 터널주변에서 응력의 아칭효과는 굴착단면에 인접하여 자연스럽게 형성된다.

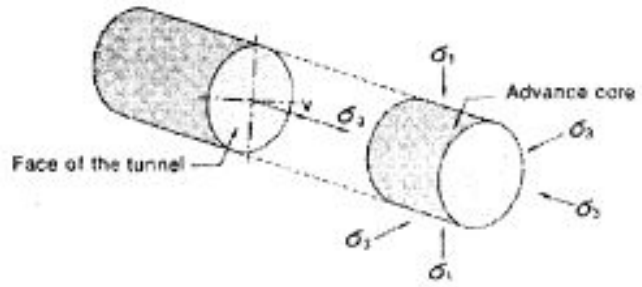


그림 3.136 터널 주변 응력장 변화

굴진면의 응력상태는 시간흐름에 따라 점진적으로 감소하며 굴진면 응력상태가 허용응력 범위를 초과하면 파괴변형거동이 발생하게 된다. 따라서 파괴변형거동은 굴진면 전방을 불안정한 상태로 야기하므로 아칭효과 형성이 불가능해 진다. 이러한 현상은 비점성토나 느슨한 지반에서 많이 일어나며, 아칭효과는 자연 으로 형성되지 않고 인위적인 보강 등에 의해서만 생성된다. 결과적으로 아칭효과의 형성과 터널의 장·단기적 안정에 따른 아칭효과의 발생 위치는 굴착에 따른 변형거동의 크기에 의해서 결정된다.

(1) 굴착으로 인한 터널의 변위-구속압 변화

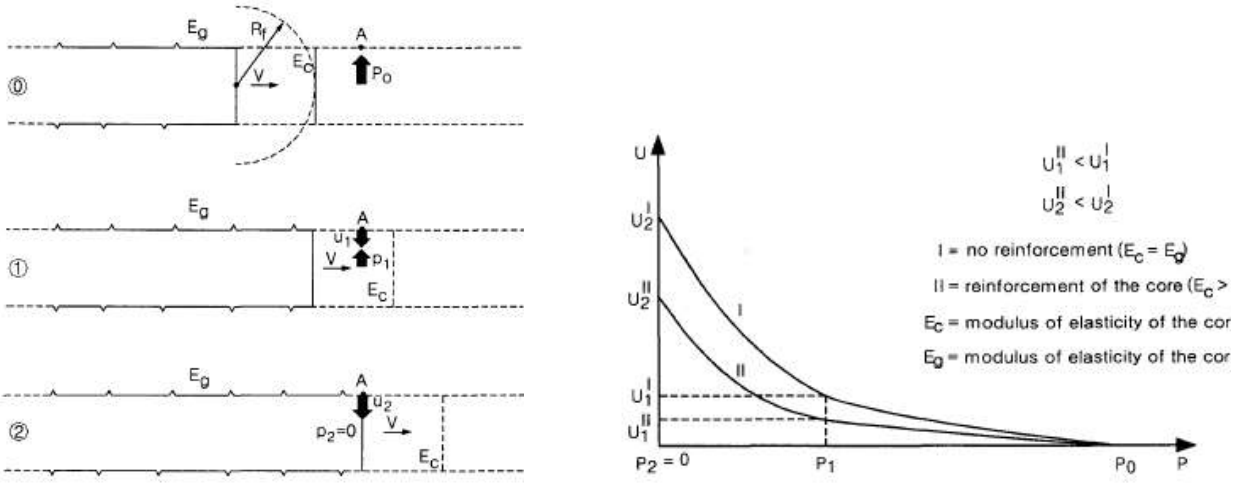
다음 그림은 전방 코어의 강성이 반경방향 변위에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 단계 0에서는 터널 굴진면이 천단 A점에 도달하지 않은 상태이므로 터널주변의 지반과 평형상태를 이루고 있다. 즉 전방 코어의 강성에 따른 반경방향 변위는 A점이 굴진면 영향반경(R_f)보다 멀리 떨어져 있으므로 A점의 응력조건은 변하지 않고 반경방향 구속응력은 초기응력(P_0)과 같다. 여기서 P_0는 A점에 반경방향으로 작용하는 구속 응력이며 터널의 내부지반을 지지하고 있는 지보압이다.

단계 1에서는 굴진면이 A점에 접근할수록 지보압은 결과적으로 감소하고 A점은 굴착 터널에서 반경방향 내부로 움직이기 시작한다. 이러한 이동은 초기응력(P_0)과 주변지반의 역학적 특성 및 평형상태를 결정하는 코어의 변형 특성에 따라 변한다.

단계 2에서 터널 굴진면이 A점을 통과하면 그 지점의 지반구속력은 감소하며 터널의 내부 지반을 지지하고 있던 지보압(P_2)은 증가하게 된다. 그러나 터널이 파괴되지 않는 것은 아칭 효과에 의하여 반경방향의 변위(u_2)가 구속되기 때문이다. 또한 굴진면이 A점을 통과하여도 반경방향 변위는 탄성 또는 탄소성 범위에서는 이미 존재하는 응력 상태이며 라이닝 후방부의 지반특성과 A점의 평형상태에 따라 초기 라이닝이나 최종라이닝과 같은 지보력에 의하여 반경방향 변형의 구속력이 지속된다. A점에 대한 변형과정을 나타내고 있으며 보강이 이루워지지 않는 전방 코어(곡선 1)와 보강이 이루어진 전방 코어(곡선2)의 관계로 구분되어 있다. 굴진면이 A점을 통과하기까지 반경방향 구속압력의 감소에 따라 A점의 반경방향 변형은 보강이 이루어진 코어보다 크게 나타나며 이때 A점의 변위는 응력-변형 이력(Stress-Strain history)에 의하여 결정된다.

그러므로 코어에서 일어나는 굴진면 선행변위와 굴진면 통과 후에 터널주변에서 발생하는 내공변위와 밀접한 관계가 있으므로 굴진면 전방 코어의 막장변위 구속과 같은 변형특성을 조절함으로서 터널의 변형을 감소시킬 수 있다.

구속압이 불안정한 응력상태의 지반 강도와 변형 특성을 조절하기 위해서는 굴진면과 코어 사이에 적절한 보강이 이루어지면 응력-변형의 균형을 이루 수 있다. 지반이 탄·소성 범위에서 받는 응력상태가 지반 강도보다 작으면 전방 코어에 수평방향 보강을 하지 않더라도 반경방향 보강만으로 터널이 자립할 수 있고, 반대로 응력수준이 크다면 터널굴착 전에 반경방향 보강과 전방 코어에 수평방향 보강이 필요하다. 지반이 파괴 범위의 응력을 받으면 굴착하려는 터널의 선행구속력을 가하여 전방 코어를 보강해야 하며 굴진면에서는 적합한 구속작용에 의한 추가적인 보강이 필요하다. 이러한 경우 터널주변에 지반을 개량할 수 있도록 천단부에 보강을 실시하여 전방 코어의 형태와 크기를 유지하도록 하고, 이러한 보강대책이 불충분하면 전방 코어가 독립적으로 지지하지 못하므로 잔류내공변형을 적절히 제어 할 수 있는 충분한 지반보강을 터널주변에 반경방향으로 실시하여야 한다.



(a) 굴진에 의한 지반응력상태 (b)구속압과 변위 곡선

그림 3.137 터널 굴착에 의한 전방 코어의 구속압 변화

(2) 굴진면 안정에 따른 거동 특성

굴진면의 안정성에 관련된 거동은 안정, 단기적 안정, 불안정으로 구분되며 다음 그림과 같다. 굴진면의 거동이 안정적이면 터널의 전반적인 안정성은 특별한 보강을 실시하지 않아도 유지될 수 있다. B, C영역에서는 굴진면의 불안정을 방지하고 A영역과 같은 안정된 굴진면 상태가 유지되도록 지반강도와 변형특성에 관계된 실제 응력상태에 적절한 강도의 선행구속력이 필요하다.

A영역은 굴진면 안정거동으로 정의하며 굴착면 주변에서 지반의 강도가 지반의 응력상태를 충분히 지지하며 터널 굴착단면이 이론단면에 가까워질수록 아칭현상은 터널벽체에 가까워진다. 굴진면은 전반적으로 안정하며 국부적으로 암반의 절리 형상에 따라 분리된 조각이 떨어지는 불안정한 상태가 발생한다. 이 경우에는 지반의 비등방 응력-변형 상태가 발생한다.

B영역은 굴진면 단기 안정 거동으로 정의하며 굴착 중에 터널주변의 지반에서 응력상태가 탄성범위의 지반강도로 충분하게 지지되는 경우이며 아칭효과가 굴착면 주변에서 즉시 생성되지 않고 지반의 소성 영역에 따라 굴진면과 이격되어 생성된다. 정상적인 굴진속도에서 발생되는 변형은 탄소성상태이고 단기간 안정을 유지하며 안정성은 굴진속도에 따라 결정된다. 전방코어의 변형은 지반이 충분하게 잔류강도를 유지하고 있으므로 터널안정에 영향을 미치지 않는다. 그러나 허용범위 내에서 변형을 제어하기 위하여 굴진면과 터널 주변에 안정성을 유지시키는 굴진면 선행구속력의 적용이 필요하다.

C영역은 굴진면의 불안정한 거동으로 정의하며 굴착 중에 터널주변의 지반에서 발생한 응

력이 지반의 강도보다 큰 경우이다. 그리고 지반이 충분하게 잔류강도를 유지할 수 없으므로 아칭효과가 굴진면과 굴착 터널 주변에서 생성되지 않는다. 터널을 굴진후 반경방향의 보강을 하는데 충분한 시간적 여유가 없어서 굴진면의 파괴나 터널의 붕괴와 같은 불안정한 상태가 굴착과 동시에 발생한다. 인위적으로 아칭효과를 형성시켜서 선행 구속작용이 발생되도록 전방 코어에 적절한 보강을 실시하는 대책이 필요하다.

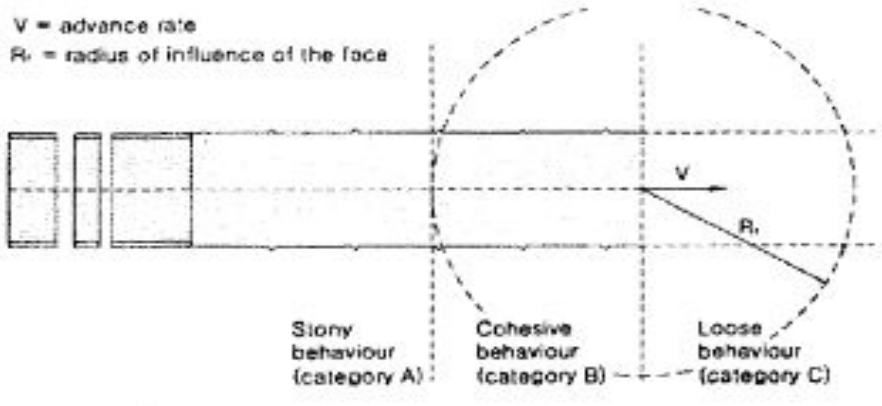


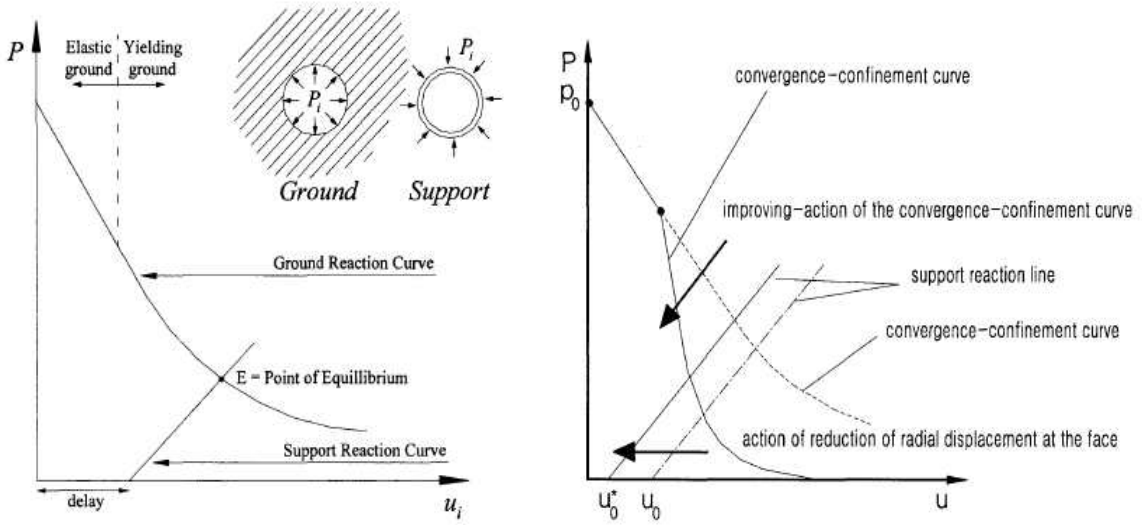
그림 3.138 안정성과 관련된 굴진면의 거동

(3) 지보재와 지반의 거동관계

굴착중이나 굴착 후에 터널 주변과 굴진면 전방에 실시한 보강공법은 응력-변형 조절범위에서 보강 형태에 따라 각기 다른 역할을 수행한다. 실제로 터널 굴진면이나 무보강 구간의 안정성을 변화시켜 내공변위-구속압의 거동(Convergence- Confinement method) 법칙에 영향을 미친다.

굴진면 보강효과에 의한 터널의 거동변화와 반경방향 변위의 감소는 개념적으로 대심도 원형 터널의 등방응력 조건과 균질한 지반에만 적용한다는 가정에서 Panet(1995)이 제시한 내공변위-구속법을 적용할 수 있다.

내공변위-구속법은 지보와 주변지반의 상호작용으로 고찰하는데 중요한 역할을 한다. 이 방법은 지반정수, 지보특성, 지보의 설치 형태에 따라 지보선정방법의 적합성을 나타낼 수 있다. 지반거동은 지반반응곡선(GRC, Ground reaction curve)으로 라이닝은 지보반응곡선(SRC, Support reaction curve)으로 나타낸다. 지반반응곡선은 지반에 작용한 구속압력에 의하여 내공변위를 나타내고, 지보반응곡선은 터널변형에 따라 라이닝에 작용하는 구속응력으로 나타낸다. 지보반응곡선은 탄성이론에 근거하여 라이닝의 강성, 하중 부담 능력과 라이닝 거동이 일어나기 전의 변형에 의하여 결정된다.



(a) 지반-구조물의 응력평형상태 (b) 터널보강시 응력상태

그림 3.139 지반-구조물의 상호작용에 의한 내공변위-구속력 곡선

터널을 구성하는 2가지 요소인 변형하려는 지반과 변형을 억제하려는 지보 복합체의 물리적 거동관계를 나타내며 지반반응곡선과 지보반응곡선의 교점(E)에서 평형을 이루고 있다.

내공변위-구속법으로 분석하여 보강이 이루어진 터널에서의 작용력을 나타낸다. 터널의 내공변위-구속 곡선은 터널주변에 작용하는 반경방향 압력(P)과 반경방향 변위(U)의 관계를 나타내며 P_0에서 시작된 압력의 점진적인 감소에 따라 반경방향 변위는 증가한다. 이러한 내공변위-구속 곡선은 지반의 물리적, 역학적 지반정수와 굴착심도에서의 응력상태 및 터널 직경의 함수이다.

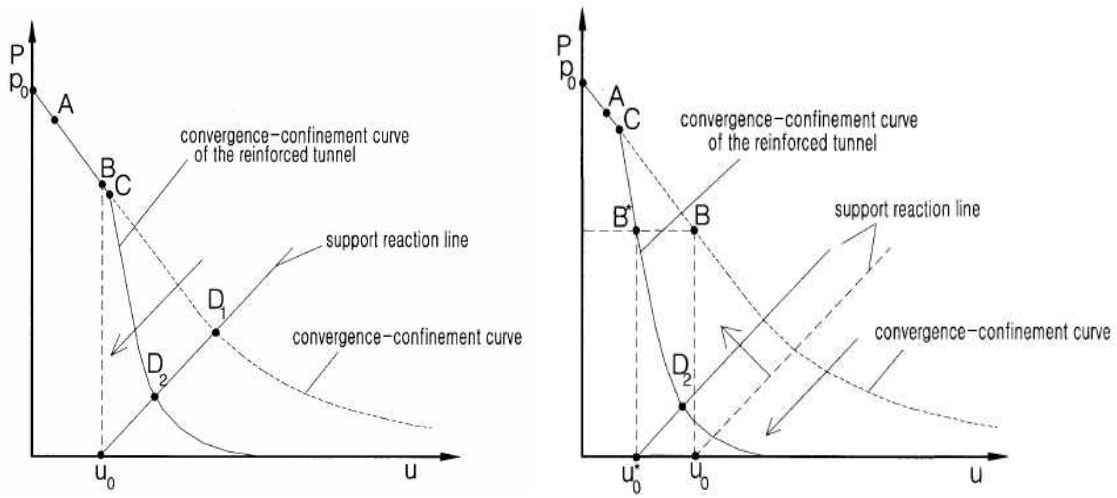
보강영역에 반경방향으로 보강을 실시하면 지반정수가 개선되어 터널 주변의 변위가 감소하여 지보 반응곡선은 좌측으로 이동한다. 보강된 터널의 내공변위-구속 곡선은 비교란 상태의 지반에서 다양한 거동을 나타내며 지보력에 의한 변위의 감소로 지보응답곡선은 좌측으로 이동하여 변위는 U_0에서 U_0^*로 변하게 하고 이로 인하여 터널 안정성이 향상된다.

굴진면의 선행 보강방법은 반경방향 보강과 굴진면 보강이 있으며 <그림 4.5(b)>와 같이 보강범위는 터널의 내공변위-구속력을 변하게 하며, 굴착 초기에 지보재가 설치되면 터널벽체 및 굴진면에서 반경방향 변형량을 변화시킨다.

다음 그림은 굴진면에서 반경방향 보강을 실시한 내공변위-구속 곡선으로 구속압(P_0)는 터널 심도에서의 초기응력을 나타내고 A점은 보강이 이루어지지 않는 굴진면의 전방 단면에서 내공변위-구속 곡선의 한점을 나타내고 있다. B점은 1차 지보 설치 후 굴진면 후방의 한 점이고, C점은 굴진면 반경방향 보강 후 후방의 한 점이다. U_0는 1차 지보가 설치된 단면에

서 터널의 반경방향 변위를 나타내고 있다. D_1과 D_2는 각각 반경방향 보강이 안 된 상태와 보강이 이루어진 상태의 평형점을 나타내고 있다.

굴진면에 반경방향 보강을 실시한 경우이며 A점은 보강이 이루어지지 않은 단면에서의 내공변위-구속 곡선의 한 점을 나타내고 있다. C점은 반경방향 보강이 이루어진 굴진면 전방 한 점을 나타내고 B와 $B*$는 1차 지보가 설치된 직후방의 한 점이며 D_2는 반경방향 보강이 이루어진 상태의 평형점이다.

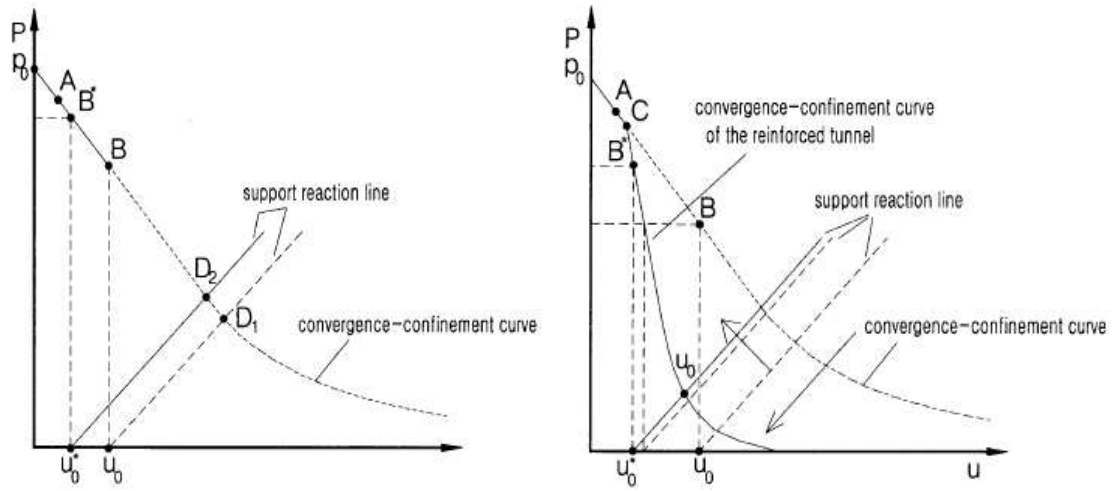


(a) 굴진면 후방 보강시 (b) 굴진면 전방 보강시

그림 3.140 터널보강시 막장면 반경방향에 대한 내공변위-구속 곡선

다음 그림은 종방향 보강만을 실시한 경우이며 A점은 굴진면 전방의 한 점을 나타낸다. B, B^*는 굴진면 보강의 유무에 따른 1차지보가 설치된 굴진면 직후방의 한 점이며 D_1, D_2는 굴진면 보강의 유무에 따른 각각의 평행점이다. 이때 U_0, U_0^*는 1차지보가 설치된 단면에서 굴진면 보강의 유무에 따른 각각의 터널의 반경방향 변위를 나타낸다.

터널 굴진면에서 종방향 보강과 반경방향 보강을 함께 실시한 경우이며 A점은 보강이 이루어지지 않은 굴진면 전방 단면에서 내공변위-구속 곡선의 한 점을 나타내고 있다. C점은 반경방향 보강이 이루어진 굴진면 전방의 한 점이고 B, B^*는 굴진면 보강의 여부에 따른 1차 지보가 설치된 터널 직후방의 한 점이며 D_2는 평행점이다. U_0, U_0^*는 굴진면 보강 여부에 따른 1차 지보가 설치된 터널 단면의 각각의 반경방향 변위이다.



(a) 종방향 보강 (b)굴진면 보강 및 종방향 보강

그림 3.141 굴진면 종방향 보강만 실시한 내공변위-구속 곡선

나. 터널 보강의 개념

연약한 지반이나 풍화와 절리가 발달된 암반에서 안정한 터널굴착을 위하여 적용하는 보강방법은 굴착중인 터널 주변지반의 응력 및 변형상태를 안정한 상태로 변화시켜 터널의 안정성을 유지하기 위하여 사용된다. 보강공법은 크게 지반변위를 억제하고 지반강성을 증가시켜 터널 안정성을 향상하는 공법과 지하수 유입을 억제하여 지반강도와 시공성을 향상시키는 공법으로 구분할 수 있으며 최근에는 두 가지 효과를 동시에 얻을 수 있는 공법들이 많이 적용되고 있다.

터널 안정성을 확보하기 위한 터널 굴진면의 보강방법을 선정하기 위해서 굴진면 거동을 판단하고 분류하여 거동에 따른 선행구속과 같은 적절한 보강대책이 필요하다. 따라서, 터널에서 굴진면과 전방코어의 안정은 굴착시 지반의 변형 응답에서 중요한 역할을 하고 장·단기적으로 굴착터널의 안정성을 확보하게 한다.

적절한 보강방법을 선정하기 위해서는 굴진면과 터널의 응력-변형거동에 관한 전방 코어의 강성을 확보하는 것이 터널 안정을 위하여 고려되어야 하며 터널 거동에 따라 보강형태를 선정한다. 이러한 터널거동의 범주에 따라 터널의 변형 현상을 조절하며 터널 안정성을 높이기 위하여 적용하는 선행구속력, 구속력 또는 선행 지보의 보강작용 형태를 결정한다.

터널 보강방법은 굴진면 전방의 지반 강성을 증가시키는 효과와 우산망 형태의 지반보강으로 상부하중을 재분배하여 터널 주변의 구속력과 지표침하에 효과적이다. 굴진면 보강공법은 느슨하거나 점성이 있는 지반이나 파쇄되거나 풍화된 연약한 암반의 굴착과 같은 불량한 지반의 터널 굴착에서 지반의 물성과 거동을 향상시키는데 매우 유효한 방안으로 제시되고 있

다.

일반적으로 굴진면 보강은 전방코어의 자연강도와 변형거동을 유지하거나 개선하여 변형거동을 조절하며 보강방법은 전방 코어에 미치는 역할에 따라 보호공법(Protective intervention)과 보강공법(Reinforcement intervention)의 두가지로 구분 할 수 있으며 대표적으로 보강방법은 아래 그림들과 같다.

지반이 매우 불량하여 터널을 형성시키기에 지반조건이 매우 불리한 응력-변형 조건에서는 굴진면 전방코어의 보호와 보강작용이 혼합된 효과를 얻기 위하여 2가지 또는 그 이상의 보강대책을 조합하여 사용하기도 한다. 굴진면 보강방법 중에서 굴진면 전방코어의 보호와 보강작용을 하는 우산망 보강공법과 굴진면 수평보강공법은 다음과 같다.

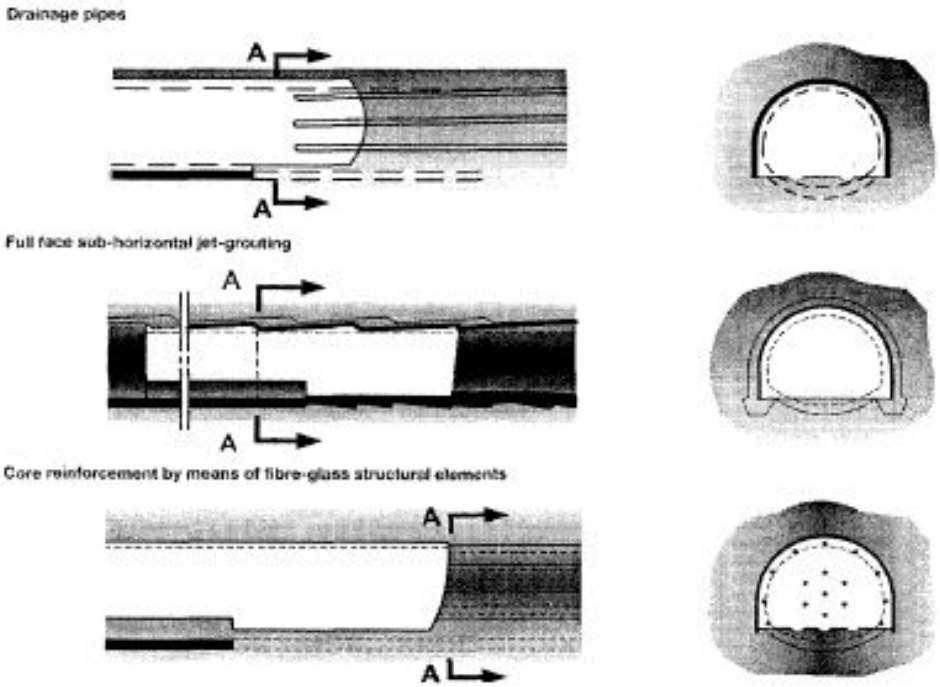


그림 3.142 굴진면 수평보강공법

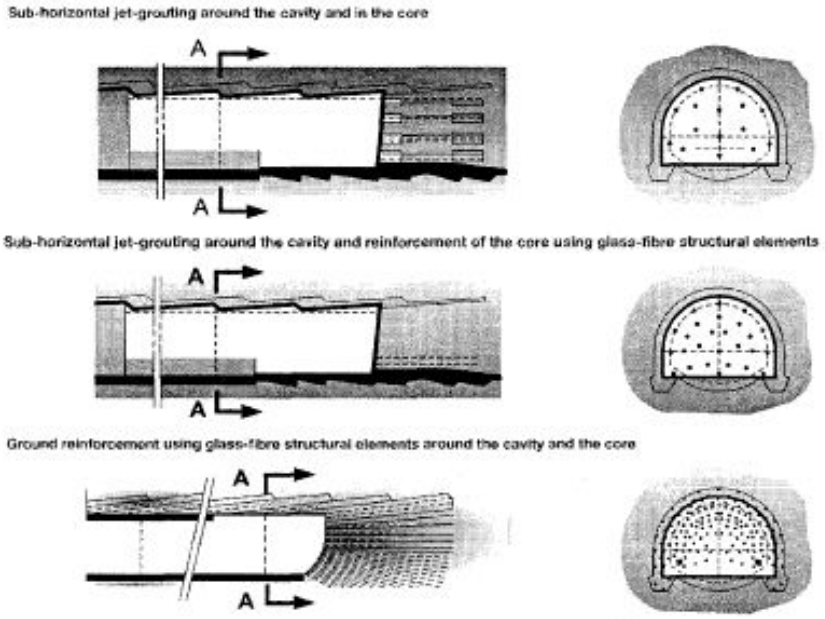


그림 3.143 우산망 보강공법과 굴진면 수평보강방법

(1) 우산망 보강공법

이탈리아에서는 Lunardi, Pelizza, Pelia 등에 의하면 1970년대에 중반부터 터널굴착 전에 굴진면 전방을 터널 천단부를 따라 소구경 강관을 일정한 간격으로 삽입하고 강관내부에 그라우팅을 하여 터널의 보강과 차수효과를 발휘하는 우산망 보강공법을 적용하여 터널의 안정성을 확보하여 왔다.

우산망 보강공법은 굴착터널 주변을 보강하여 굴진면 전방을 보호하는 공법으로 굴진면 부근에서의 일시적인 무보강 상태를 피하여 굴진면 전방에 대한 보강 효과와 횡방향의 연속성에 의한 아칭형태의 지보효과를 동시에 발휘한다. 우산망 보강공법의 주요 효과는 굴진면의 안정성 향상, 굴착주변 지반의 이완방지, 지표 침하의 억제효과가 있으며 이러한 효과들은 서로 유기적인 관계를 가지고 밀접하게 연관되어 있다.

다음 그림은 우산망 보강공법에 의해 설치된 강지보재와 굴진면 사이와 인접한 보강재의 형상을 나타내고 있다. 우산망 보강공법은 터널 굴착전에 굴착예정 단면 주변에 보강재을 적절한 형상으로 배열 설치하고 그 보강재의 내측에서 그라우트를 주입함으로써 그라우트에 의한 지반 고려로 인하여 보강재와 지반을 일체화시키고 보강재 및 주변지반의 경감효과를 얻는다.

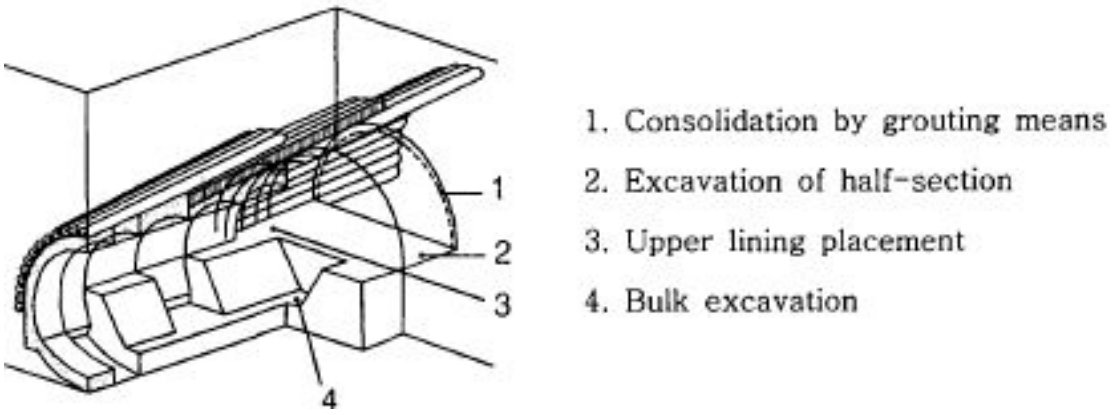


그림 3.144 우산망 보강공법의 형상

(2) 굴진면 수평보강공법

굴진면 안정을 유지하는데 전방 코어가 존재하면 유리한 영향이 있는 것은 이미 보고된바 있으며 그 영향에 대한 연구도 정량적, 정성적으로 많이 이루어지고 있다.

터널 굴진면 수평보강공법의 적용 사례에 관련된 논문과 수치 모델링에 의한 연구논문은 유럽지역을 중심으로 발표되고 있다. Mastropietro(1979)는 파쇄된 이회토(marl)지반에서 5 m의 강봉으로 굴진면 수평 보강한 사례를 보고하였다. Barbacci등(1990)은 팽창성 점토지반의 수로터널에서 3.0 m 길이의 Swellex 볼트와 12 m길이의 마이크로 파일을 이용한 굴진면 보강 사례를 보고하였다. Lunardi 등(1992)은 복합섬유 관을 이용하여 수평보강공법을 적용하고 현장에서 보강재의 응력을 측정하여 얻어진 터널 거동을 보고하였다.

최근에는 Grasso 등(1993)이 축대칭 유한요소해석을 수행하여 수평보강재의 보강효과를 정성·정량적으로 평가하였으며, 보강효과를 정량화하는 방법으로서 등가 점착력(c^*) 개념을 아래 식과 같이 제시하였다. 여기서 c와 는 지반의 점착력과 내부마찰각이며, 3는 보강재로 인한 최소주응력 증가량으로 나타난다.

$$c^* = \left(c + \frac{1+\sin}{2\,c\cos} \right) \quad 3$$

한편, Peila(1994)와 Peila 등(1996)은 각각 유한요소법 및 유한차분법을 이용하여 매개변수 연구를 수행하고 그 결과를 토대로 아래 식으로 정의되는 굴진면 등가압력을 이용하여 굴진면 수평보강 효과를 정량화하는 방법을 제안하였다.

$$p_{face} = \min \left\{ \frac{n\,A}{S}\ ,\ \frac{n\,S_l}{S} \right\}$$

σ

τ

여기서, n은 보강재의 개수, A는 보강재의 단면적, $_a$는 보강재의 항복강도, S는 굴진면 단면적, S_l은 보강재의 주면 면적, 그리고 $_a$는 지반과 보강재사이의 마찰응력으로 정의된다.

굴진면 수평 보강에 의한 효과는 보강재에 의한 저항효과와 그라우트에 의한 지반물성 개선 효과로 대별된다. 이러한 보강 효과는 지반의 전단저항각의 증가, 구속압력유지, 국부적인 아칭효과 등으로 나타나게 된다.

다음 그림에서와 같이 복합섬유 등으로 굴진면 전방코어를 수평방향으로 보강을 하면 터널 주변 지반에서 소성화 현상의 발달을 제어하는 데 효과적인 기능을 가지고 있다.

그라우팅을 실시하면 인위적인 지반의 시멘트화 고결현상에 의하여 전단저항이 증가하며 지반의 투수성이 충분히 크면 주입재의 침투가 용이하다. 따라서 그라우트 주입영역의 확장이 가능하므로 불량한 지반의 역학적 특성을 개선할 수 있다.

다. 협소공간에서의 국외 지반보강 사례 조사

(1) 확대터널 시공사례 조사

확대터널의 보조공법에 관해서는 훠폴링과 록볼트가 주로 사용되고 있으며, 극히 연약한 지반에서는 신설터널과 마찬가지로 측벽 혹은 상부에서 선진도갱 공법이 이루어지는 경우가 많다. 이외에는 신설터널과 비슷하나 아래 표의 F, H터널은 프로텍터를 설치하기 전에 기존 터널의 라이닝에서 배면 지반쪽으로 록볼트를 타설해서 선행보강을 해 놓은 상태에서 확대한 것이 특징이다. 또한 G터널의 경우처럼 특별한 보강없이 주변을 확대하는 경우도 있다. 각 터널의 지반조건, 보강공법 및 보조공법의 주요 제원은 아래 표와 같다.

표 3.146 지보구조 및 보조공법

터널명	연장(m)	최대 토피고(m)	신설 단면적(㎡)	암종	시공	지보상태	보조공법
A 터널	34.5	-	75.0	화산각력암, 화산쇄설암	NATM (상부선진)	표준지보(CⅠ해당)	지반개량공 (천단부)
B 터널	40.0	9	56.8	중생대 변성대의 강풍화 화강암(마사토화 됨)	재래공법 (중단도갱, 상반선진)	숏크리트 t=20cm, 강지보 H150	
C 터널	55.0	20	54.9~58.8	녹색편암	NATM (상부선진)	표준지보(CⅡ, DⅢ), 측벽부만 록볼트 시공	포아폴링(부분적으로 우레탄 주입)
D 터널	56.0	23	75.3	제3기퇴적암인 이암	NATM (상부선진)	표준지보(DⅢ), 단 록볼트는 수평으로 한쪽에 2본 설치	포아폴링
E 터널	80.0	15	56.0	응회질사암, 역암의 호층	NATM (3분할시공)	표준지보, DⅠ~DⅢ의 패턴볼트(인력시공+연결볼트)	갱구부 포아폴링
F 터널	97.0	40	66.0	애추퇴적암, 응회암	NATM (-)	표준지보, 록볼트는 천단부 L=3.0m, 40°의 경사타설	선행볼트(천단부)
G 터널	97.5	50	74.9	제3기 퇴적암, 사암(qu=10MPa)	재래공법(상반선진, 링컷)	표준지보(재래지보 때문에 볼트 없음), 강지보(H150@0.75~1.0m)	특별히 없음
H 터널	107.5	30	60.8	안산암질응회각력암(qu=13.5MPa) 안산암력(qu=60~80MPa)	NATM(상반선진)	표준지보(CⅡ, DⅠ, E), 강지보(H125@1.0m), 숏크리트 t=15~20cm, 록볼트(패턴볼트)L=4.0m(인력시공+연결볼트)	선행볼트(천단부)
I 터널	124.0	30	105.0	제3기 사암, 이암의 호층(qu=40MPa)	NATM(측벽도갱선진)	표준지보(DⅠ), 강지보(H200@0.75m)	측벽도갱선진, 전구간 포아폴링
J 터널	142.0	20	66.33	제3기 신선세 세류사암	NATM(측벽도갱선진)	강지보(H200), 숏크리트 t=25cm	측벽도갱선진 전구간 포아폴링
K 터널	181.0	-	56.0	제3기 신선세의 응회암(qu=0.3~0.8MPa)	NATM(상반선진)	강지보 없음, 숏크리트와 록볼트만으로 지보	
L 터널	225.0	-	38.3	사암	NATM(-)	지보불명확(C, D), 인력시공+레그에 의한 연결볼트	
M 터널	265.0	-	65.2	점판암을 기반암으로 하며 상부에 화산역층, 용결응회암, 단구퇴적물	NATM(상반선진)	강지보(H200), 숏크리트 t=30cm 보강볼트 L=6.0m@1.0m	분기부에 록볼트 보강
N 터널	283.8	-	88.1~187.6	화강섬록암	NATM(상반선진)	숏크리트 t=15~20cm, 록볼트 L=4.0m(@1.2~1.5m)	
O 터널	1,440	-	-	사암·이암호층, 혈암	NATM(상반선진)	강지보(H200@1.0), 숏크리트 t=25cm, 록볼트 L=4.0m, 서쪽은 지반개량으로 록볼트 생략	주입식포아폴링

(2) 주요 시공사례

(가) 록볼트를 주 보조공법으로 사용한 시공사례

다음 그림에는 록볼트를 주 보조공법으로 사용한 확대터널의 지보패턴을 나타내었다. 확대터널의 제원은 다음과 같다.

- 기존터널 시공년도 : 1950~1953
- 확대터널 시공년도 : 1989~1989
- 지보공 : CⅡ, DⅢ
- 숏크리트 : t=10cm(CⅡ), 20cm(DⅢ)
- 록볼트 : L 3.0m×8본/단면
- 보조공법 : 기존터널의 배면에 주입한 모르타르, 사전보강 볼트 L 3.0m×@0.6m, ctc 1.5m

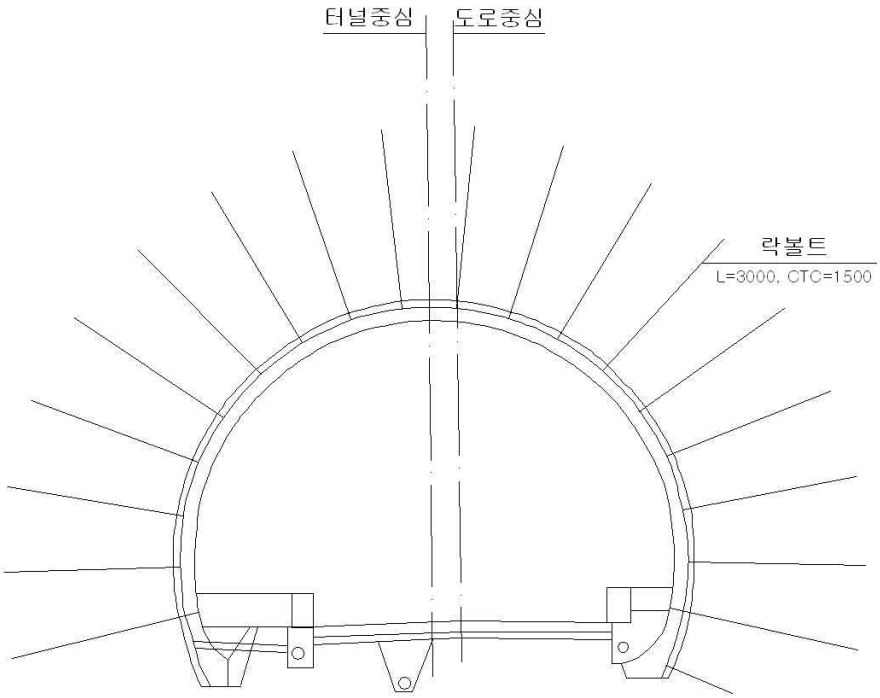


그림 3.145 록볼트를 주 보조공법으로 한 신설터널 표준패턴도

(나) 휘폴링을 주 보조공법으로 사용한 시공사례

다음 그림에는 휘폴링을 주 보조공법으로 사용한 확대터널의 지보패턴을 나타내었다. 확대터널의 제원은 다음과 같다.

- 기존터널 시공년도 : 1939

- 확대터널 시공년도 : 1998.03~1999.08
- 지보공 : H-200@1.0m
- 숏크리트 : t=25cm
- 록볼트 : L 4.0m×4본/단면, ctc 1.0m
- 보조공법 : 포어폴링 L 3.0m×@0.6m, 17본/단면, ctc 1.0m

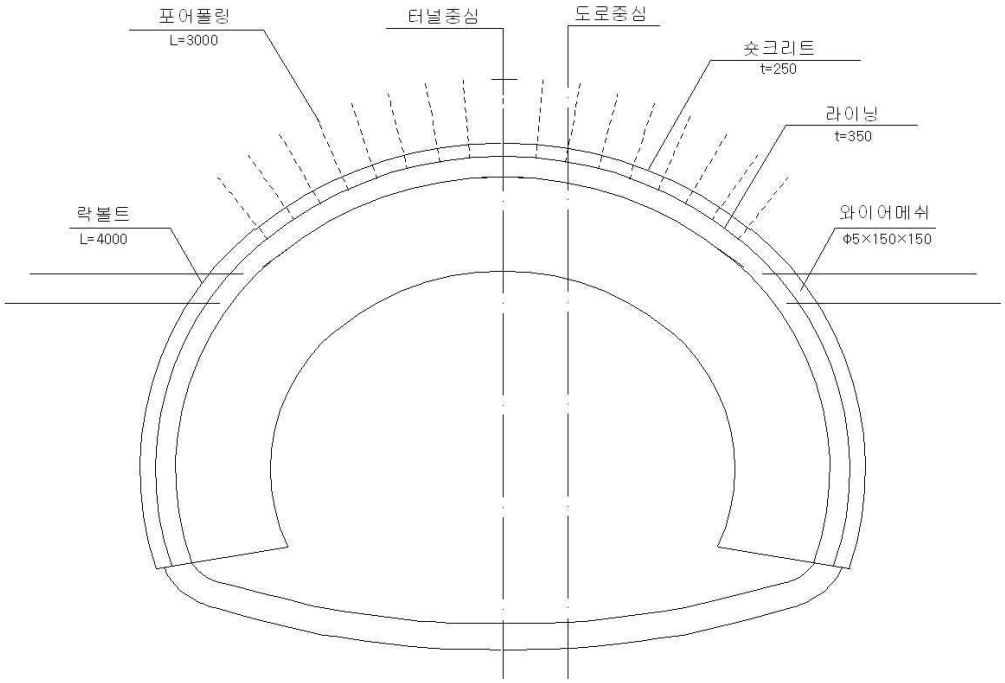


그림 3.146 휘폴링을 주 보조공법으로 한 터널

(3) 보강공법 분석

확대터널 보강공법은 기존 신설터널에 적용되는 보강공법인 록볼트, 휘폴링, 파이프루프, 강관그라우팅 등이 적용되고 있는 것으로 분석되었다. 또한, 록볼트는 확대터널에서도 주지보재로서의 역할이 크며, 시공은 좁은 공간에서 작업이 이루어지므로 경사볼트를 채용하고 있는 곳도 있으며 길이가 짧은 것을 연결하여 시공하는 경우도 있는 것으로 나타났다.

또한, 국내 터널시공에 주로 사용되는 장비제원을 분석한 결과 막장천단 안정성을 확보하기 위한 보조공법 및 발파를 위한 천공은 가능한 것으로 판단되나, 굴진면과 직각방향을 설치되는 록볼트는 측벽부에서 불가능한 것으로 판단되었다.

표 3.147 보강공법 비교표

공법 / 내용	우산망 보강공법	Pipe Roof 공법	Fore Poling 공법
공법 개요	터널 굴착전에 강관 등의 보강재를 적절한 형상으로 배열 설치하고 주입재를 주입함으로써 주입재에 의한 지반고결로 강관과 주변 지반을 일체화 시켜 Beam Arch를 형성하여 차수 및 보강 효과를 동시에 얻는 공법이다.	터널단면에 일정한 간격으로 컷터가 부착된 오거로 굴착하면서 지중에 강관을 압입하여 터널형상에 맞춰 루프를 형성하는 공법으로 지반하중을 지지하고 초기 이완을 최소화 하는 터널 보조공법이다.	불량한 지반 조건의 구간에서 터널을 굴착하기전에 굴착 자유면의 길이를 감소시키고 지반변형을 방지하여 국부적인 막장 붕락을 막기 위하여 강관 또는 철근을 터널 막장에 관입하는 보조공법이다.
주입 재료	시멘트 + 규산소다 + 벤토나이트		시멘트 + 혼화제
주입 방법	Air Packer System을 이용한 다단주입		1.0Shot 방식의 단관 주입
적용 목적	· 여굴 및 붕락방지 · 차수 및 지반보강	· 여굴 및 붕락방지 · 기존터널 하부 횡단시	여굴 및 붕락방지
적용 토질	SC이상의 토질 풍화암, 연암, 파쇄대 및 단층대	모든지반 가능	풍화암 및 연암
장 점	1. 시공실적 및 경험이 많다.	1. 막장의 안정성 확보 우수 2. 강관 압입 후 토사굴착 작업 용이 3. 대형장비 굴착 사용 가능 4. 무진동 무소음 가능	1. 시공이 용이함 2. 공정이 간단함 3. 소규모 붕락방지에 효과적 4. 경제성 우수함
단 점	1. 강관 삽입시 주입구 밴딩부의 파손으로 Seal재 및 천공 슬라임이 강관 내부로 유입되어 팩커 설치가 곤란하여 주입이 불가능한 경우 발생. 2. 강관자체의 중량이 커서 시공성 저하 3. 강관연결부의 취약함.	1. 대구경 강관 압입시 지반침하 예상 2. 암반층 강관 추진 난이 (공기지연 문제) 3. 수평보링에 따른 시공길이 증가시 시공편차 큼 4. 공사비 고가	1. 막장면지지 효과 미비 2. 막장 굴착깊이 증가할수록 지지효과 감소 3. 지하수 누출부나 천단부 보강효과 떨어짐

2. 터널 단면 확대 보강 프로세서

국내 및 일본의 경우 보강공법(록볼트, 강지보 및 숏크리트) 및 보조공법(강관다단그라우팅, 파이프루프 및 훠폴링)은 기존의 터널시공 기술에 사용되는 공법이 적용되며, 프로텍터, 기존 터널의 단면형상 및 시공여유 등을 고려할 경우 터널의 좌·우 측면부에서는 장비 운용면적이 매우 협소하게 형성되는 것으로 나타났다.

국내 터널시공에 주로 사용되는 장비제원을 분석한 결과 막장천단 안정성을 확보하기 위한 보조공법 및 발파를 위한 천공은 가능한 것으로 판단되나, 굴진면과 직각방향을 설치되는 록볼트는 측벽부에서 불가능한 것으로 판단되었다.

따라서 보강공법은 협소한 공간에서 장비 운영의 효율성, 장비의 운반 및 운용동선, 보강재의 운반성 등을 고려하여 터널의 장단기적인 안정성을 안정을 확보할 수 있는 공법 및 시공법을 선정하여야 한다. 또한, 보강공법 시공 중 방생할 수 있는 소음 및 분진 등에 대한 방지대책을 충분히 수립하여 프로텍터에 내부 공간에 공용 중에 차량의 주행 및 운전자의 심리적 안정을 도모할 수 있을 것으로 판단되어 다음과 같은 보강공법 시공 프로세서(안)을 수립하였다.

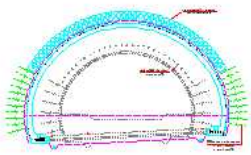
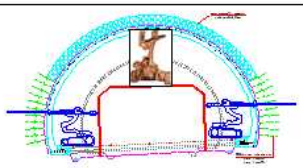
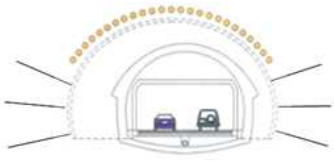
시공순서	시공개요도	주요사항
① 보강공법 및 장비선정		• 기존 터널 보강공법 현황분석 (보강공법 시공 중 간섭여부 판단) • 보강공법 종류 및 설치범위 결정 (경사볼트, 훠폴링, 강관그라우팅 등) • 시공장비 선정
② 장비 운반 및 설치		• 협소 공간에서의 시공장비 운반방안 수립 (천공장비, 그라우팅 장비, 보강재 운반 등) • 시공장비의 운용방안 (천공장비 등의 운용동선 수립)
③ 보강공법 시공		• 시공 중 소음 및 분진 방지대책 수립
④ 시공완료		• 확대단면 터널의 안정성 확보

그림 3.147 보강 공법 시공 프로세서(안)

3. 터널 천단보강법의 보강효과 검증을 위한 수치해석

연약한 지반조건이나 주변 구조물이 있는 경우에 터널 굴착에 따른 주변지반의 변형을 억제하여 터널의 안정성 및 주변 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 적용되는 보조공법 중 국내에서 주로 적용되고 있는 강관다단그라우팅 공법의 보강재에 의한 보강효과를 파악하기 위하기 위하여 토피고, 보강재의 횡방향 및 종방향 설치 조건을 변화시키면서 토사 및 풍화암 지반조건에 대해 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서는 그라우팅에 의한 지반개량 효과는 고려하지 않았다.

가. 해석모델 및 조건

수치해석에 의한 매개변수 연구 결과의 신뢰도를 높이기 위해 현장의 실제 시공 방법 및 순서를 최대한 고려하여 터널 굴착시 적용되는 상하단면 분할굴착공법의 시공순서와 보강과정을 모델링하였으며, 지반은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였다.

터널 굴착 단면은 국내 터널 시공에 적용하고 있는 2차선 도로 표준단면을 적용하였으며, 폭과 높이가 각각 12m와 9m로서 터널의 원형 환산직경은 약 10.6m이다. 터널 주변을 구성하고 있는 지반조건은 토사 및 풍화암으로 구성된 단일 지층으로 고려하여 지반조건에 따른 거동을 파악하였다.

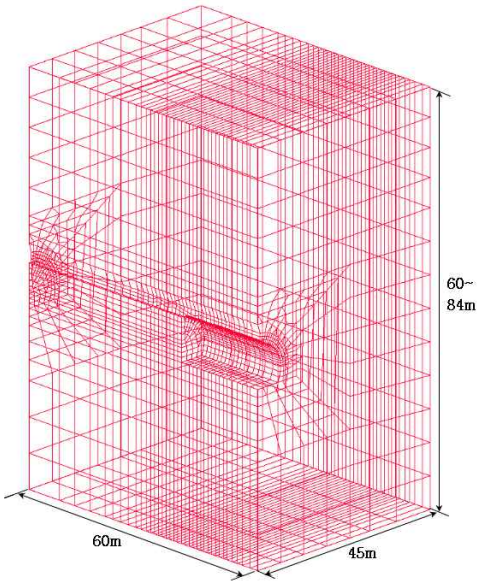
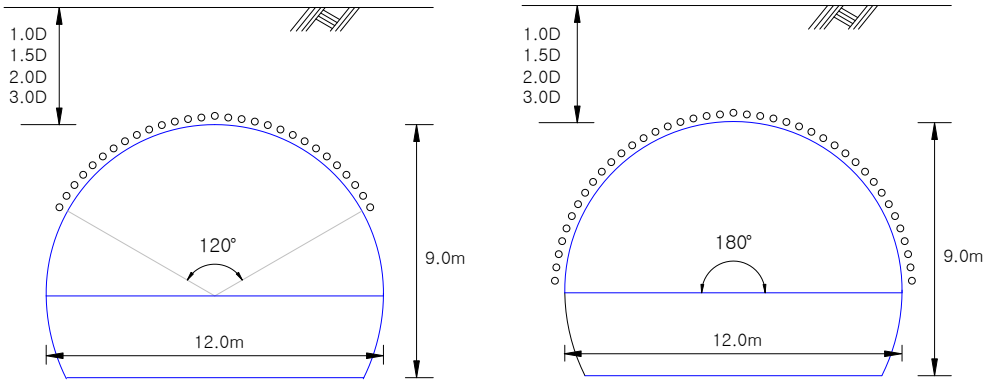


그림 3.148 3차원 수치해석 모델

모델링은 터널 직경(D)의 1.0D, 1.5D, 2.0D, 3.0D에 따라 토피고를 달리하여 3차원 유한요소망으로 작성하였다. 총 절점수는 19,008~21,168개를 이용하여 지반을 구성하였고, 숏크리트의 모델링은 4절점의 shell 요소, 보강재(강관)의 모델링은 frame 요소를 각각 이용하여 모델링하였다. 요소망은 터널의 단면형상, 지층, 시공순서, 보강재 등을 고려하여 형성하였다.

보강재의 횡방향 설치간격, 보강범위 및 종방향 중첩길이에 대한 국내 설계 및 시공사례를 조사하여 보강재는 직경 114mm, 두께 6mm의 강관(L=12.0m)을 적용하여 모형화 하였다.

굴착 및 보강과정의 해석순서는 현장의 시공 여건 등을 고려하여 「강관다단그라우팅 공법 보강재 모형화 → 터널 굴착 → 1차 숏크리트 → 2차 숏크리트 → 터널 굴착(보강재의 중첩길이에 따른 보강재 모형화) 」 순으로 설정하였으며, 총 48가지 경우에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석수행시간을 단축하기 위해 각 해석 케이스별로 초기 굴착 길이(보강재의 중첩길이에 따라 4m의 경우 16m, 6m의 경우 12m, 8m의 경우 12m까지)를 설정하였으며, 초기 굴착 길이까지의 시공과정은 하중분담률(40%, 30%, 30%)을 적용한 상하반 분할굴착 과정을 모델링하였다. 그 이후는 일반적인 터널의 시공과정을 고려하여 터널 상반굴착은 1.0m으로 설정하여 굴진이 이루어지는 것으로 모델링하였으며, 하반굴착은 숏벤치를 적용하였다.



(a) 120° reinforcing (b) 180° reinforcing

그림 3.149 보강범위 따른 모형화 횡단면도

표 3.148 3차원 수치해석 수행 Case

Ground type	Range of reinforcement(°)	Overlap length (m)	Ground cover	Analyses case No.	Ground Type	Range of reinforcement(°)	Overlap length (m)	Ground cover	Analyses case No.
Soil	120	4.0	1.0D	Case 1	Weathered rock	120	4.0	1.0D	Case 25
			1.5D	Case 2				1.5D	Case 26
			2.0D	Case 3				2.0D	Case 27
			3.0D	Case 4				3.0D	Case 28
		6.0	1.0D	Case 5			6.0	1.0D	Case 29
			1.5D	Case 6				1.5D	Case 30
			2.0D	Case 7				2.0D	Case 31
			3.0D	Case 8				3.0D	Case 32
		8.0	1.0D	Case 9			8.0	1.0D	Case 33
			1.5D	Case 10				1.5D	Case 34
			2.0D	Case 11				2.0D	Case 35
			3.0D	Case 12				3.0D	Case 36
	180	4.0	1.0D	Case 13		180	4.0	1.0D	Case 37
			1.5D	Case 14				1.5D	Case 38
			2.0D	Case 15				2.0D	Case 39
			3.0D	Case 16				3.0D	Case 40
		6.0	1.0D	Case 17			6.0	1.0D	Case 41
			1.5D	Case 18				1.5D	Case 42
			2.0D	Case 19				2.0D	Case 43
			3.0D	Case 20				3.0D	Case 44
		8.0	1.0D	Case 21			8.0	1.0D	Case 45
			1.5D	Case 22				1.5D	Case 46
			2.0D	Case 23				2.0D	Case 47
			3.0D	Case 24				3.0D	Case 48

표 3.149 3차원 수치해석에 적용한 지반 물성치

Properties / Ground Type	Deformation modulus E (MPa)	Poisson's ratio (ν)	Cohesion (kPa)	Friction angle (ϕ, degree)	Unit weight (kN/m^3)
Soil	30.0	0.33	15.0	30.0	19.0
Weathered Rock	500.0	0.30	50.0	32.0	21.0

나. 해석결과

(1) 토사터널

횡방향 보강영역 120°의 토사층에 대한 수치해석 결과는 다음과 같다. 종방향 중첩길이 4m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 11.1mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 61.3mm로 약 5.5배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 중첩길이 6m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 9.8mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 50.1mm로 약 5.1배정도 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 중첩길이 8m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 10.1mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 마찬가지로 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 46.8mm로 약 4.6배정도 침하량이 증가하는 것으로 나타났다.

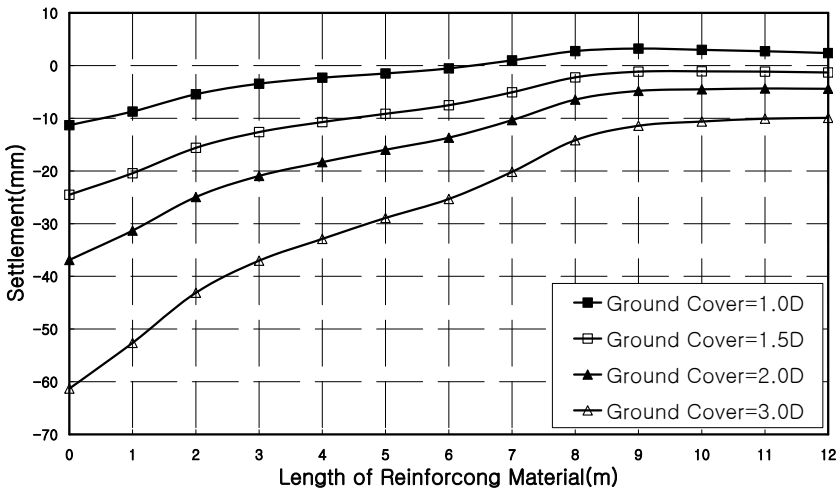


그림 3.150 토사터널 120° 보강범위 중첩길이 4.0m 에서의 침하량

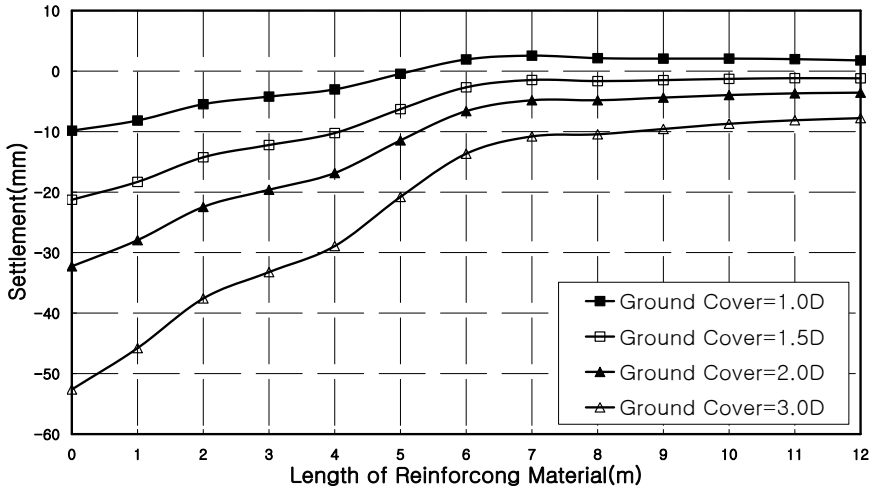


그림 3.151 토사터널 120° 보강범위 중첩길이 6.0m 에서의 침하량

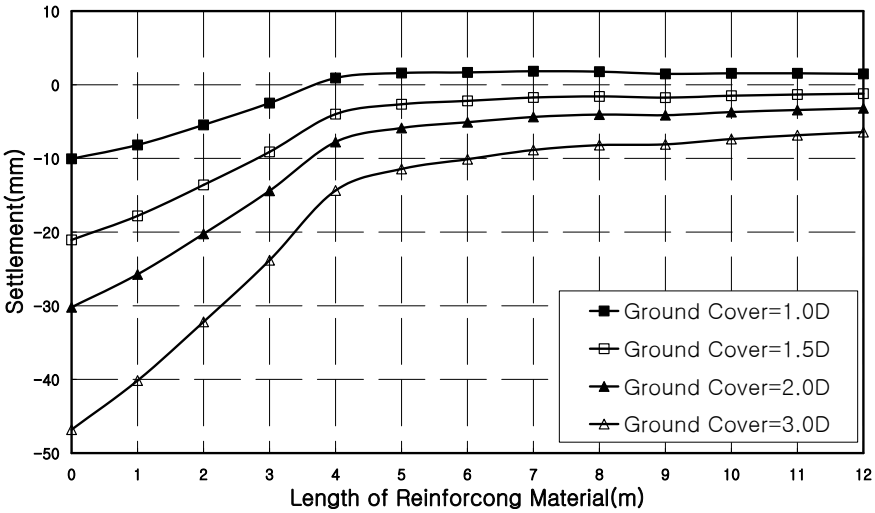


그림 3.152 토사터널 120° 보강범위 중첩길이 8.0m 에서의 침하량

횡방향 보강영역 180°의 토사층에 대한 수치해석 결과는 다음과 같다. 종방향 중첩장 4m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 11.7mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 62.1mm로 약 5.3배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 중첩길이 6m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 10.2mm의 침하가 나타났으며, 토피고 3.0D의 경우 최대 54.6mm로 약 5.3배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 중첩길이 8m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 10.3mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 50.9mm로 약 4.9배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다.

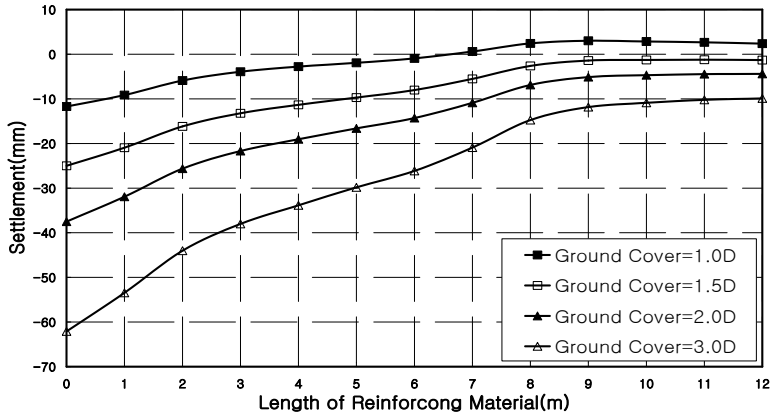


그림 3.153 토사터널 180° 보강범위 중첩길이 4.0m 에서의 침하량

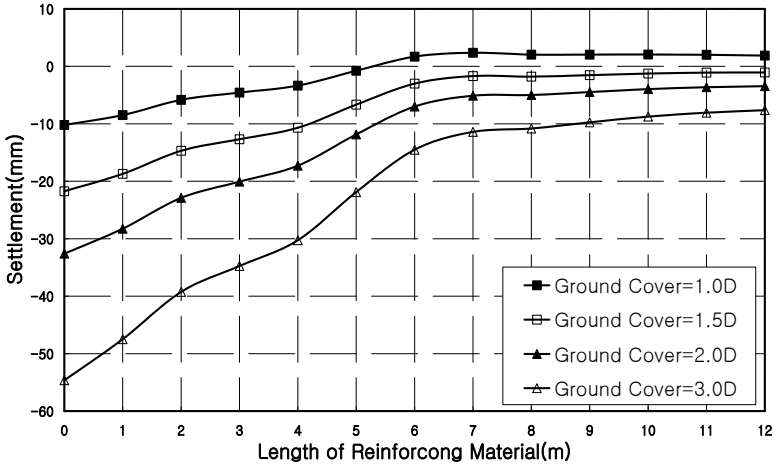


그림 3.154 토사터널 180° 보강범위 중첩길이 6.0m 에서의 침하량

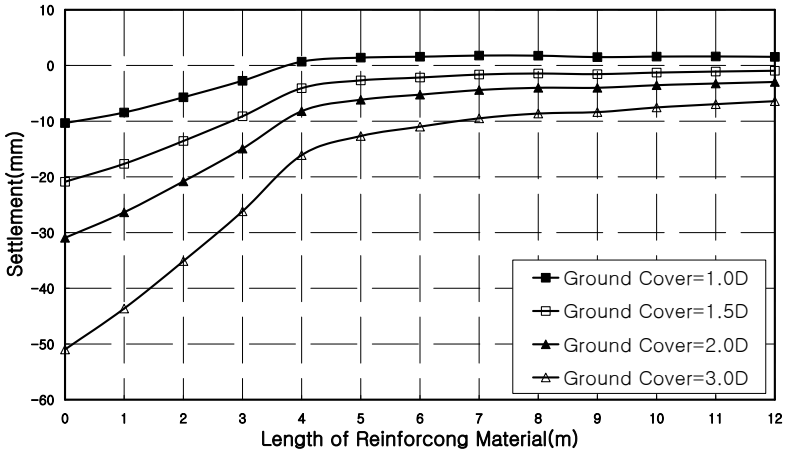


그림 3.155 토사터널 180° 보강범위 중첩길이 8.0m 에서의 침하량

(2) 풍화암 터널

풍화암 지반에서 횡방향 보강영역 120°인 경우에 대한 수치해석결과는 다음과 같다. 횡방향 보강영역 120°의 중첩길이 4m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 2.5mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 7.3mm로 약 2.9배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 중첩길이 6m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 2.4mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 6.7mm로 약 2.8배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 중첩길이 8m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 2.2mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 토피고 3.0D의 경우 최대 7.7mm로 약 3.5배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다.

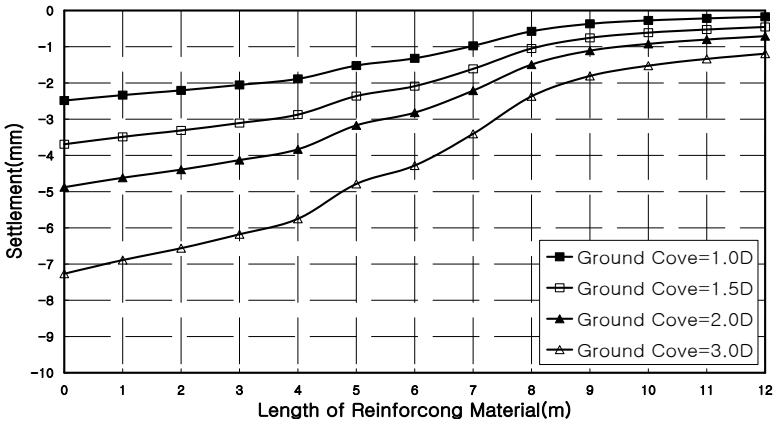


그림 3.156 풍화암터널 120° 보강범위 중첩길이 4.0m 에서의 침하량

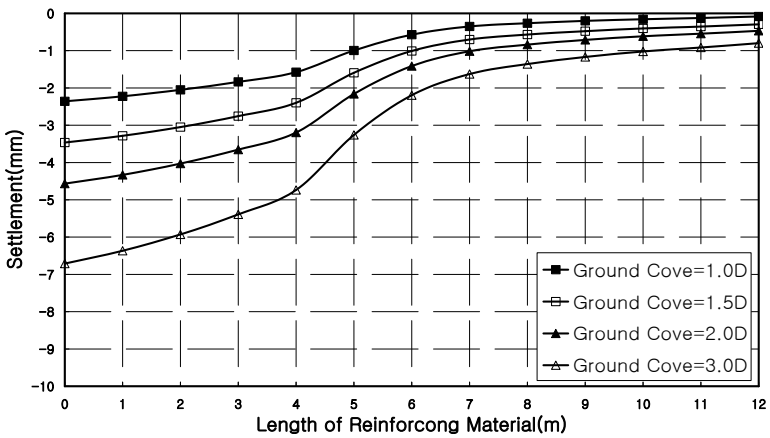


그림 3.157 풍화암터널 120° 보강범위 중첩길이 6.0m 에서의 침하량

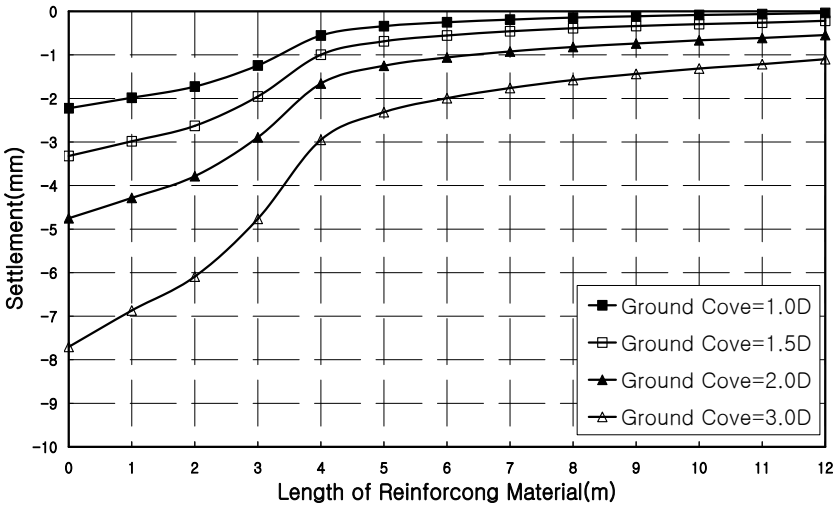


그림 3.158 풍화암터널 120° 보강범위 중첩길이 8.0m 에서의 침하량

풍화암 지반에서 횡방향 보강영역 180°인 경우에 대한 수치해석결과는 다음과 같다. 종방향 중첩길이 4m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 2.5mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 7.3mm로 약 2.9배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 중첩길이 6m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 2.4mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 6.8mm로 약 2.8배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 중첩길이 8m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 2.2mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 토피고 3.0D의 경우 최대 6.4mm로 약 3.0배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다.

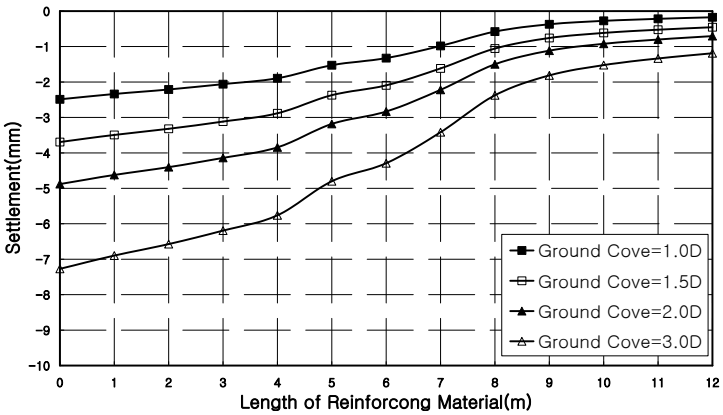


그림 3.159 풍화암터널 180° 보강범위 중첩길이 4.0m 에서의 침하량

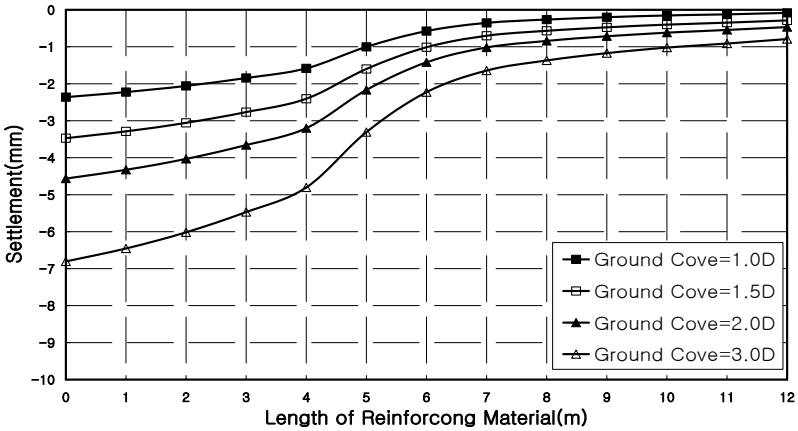


그림 3.160 풍화암터널 180° 보강범위 중첩길이 6.0m 에서의 침하량

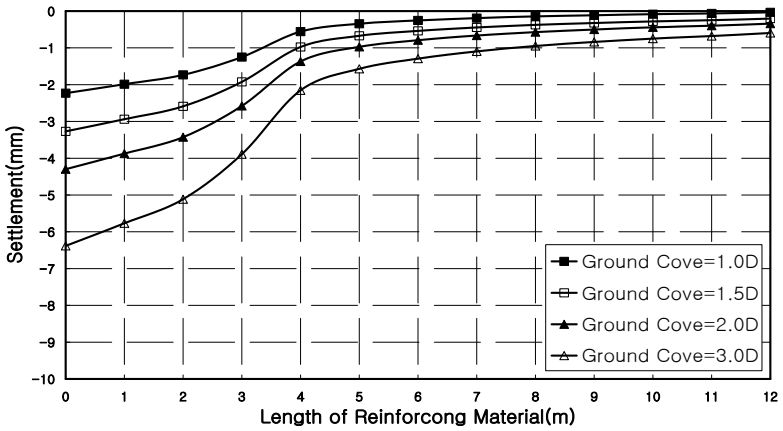
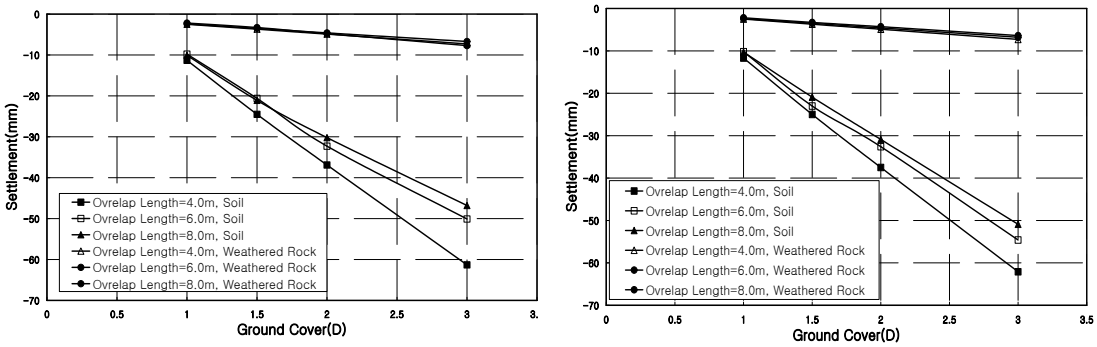


그림 3.161 풍화암터널 180° 보강범위 중첩길이 8.0m 에서의 침하량

(3) 해석결과 분석

터널 굴착시에 발생하는 최대 천단 침하량은 지반물성치가 공학적으로 불리한 토사 터널의 침하량이 같은 조건의 풍화암 터널보다 약 75~88% 정도 침하가 더 발생하는 것으로 나타났으며, 토피고 증가에 따라 선형적으로 변화하는 것으로 나타났다. 횡방향 보강범위에 따른 천단침하 결과를 보면 120° 보강과 180° 보강이 유사하게 나타난 것으로 보아 120° 이상 보강되면 횡방향 보강범위는 천단침하와 무관한 것으로 나타났다. 종방향 중첩길이에 대한 해석결과는 중첩길이가 증가할수록, 즉 보강이 증대될수록 천단침하는 감소하는 것으로 나타났다.



(a) 120° reinforcing (b) 180° reinforcing

그림 3.162 토피고에 따른 침하량

(4) 막장면 이완영역 해석결과 분석

(가) 이완영역 및 거동각도 산정방법

해석조건별 천단침하량과 관련하여 강관다단그라우팅 공법으로 보강된 터널 막장전방 이완영역을 분석하기 위하여 다음 그림과 같이 천단 침하량 발생 경향을 토대로 굴착에 따른 터널의 천단 변위가 수렴되는 지점을 이완영역으로 결정하였으며, 결정된 이완영역을 토대로 거동각도를 계산하였다.

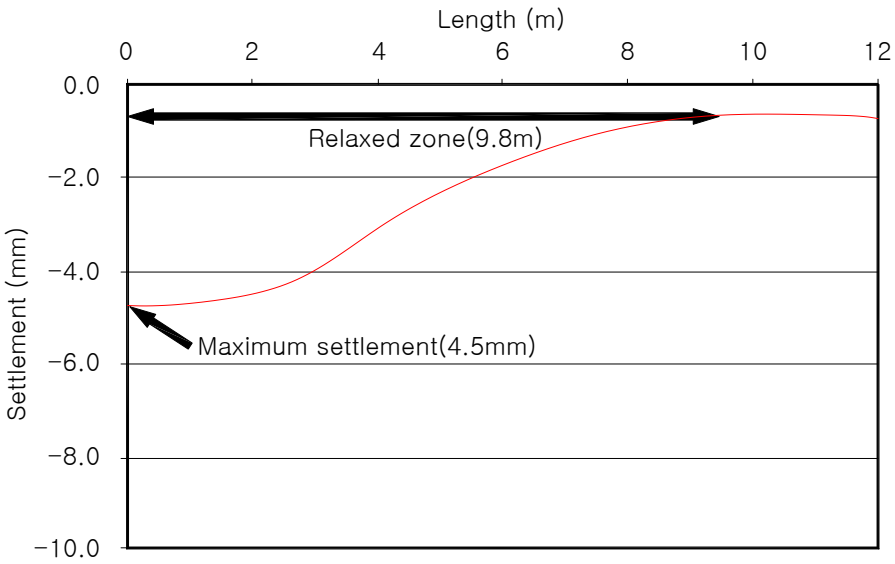


그림 3.163 터널 굴착에 의한 이완영역 계산방법

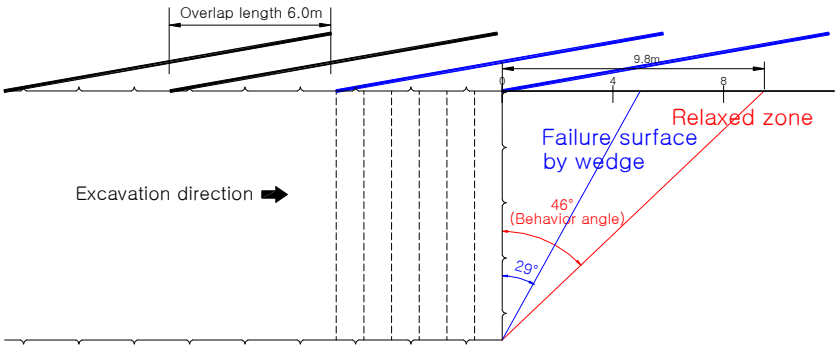


그림 3.164 막장면 거동각도 계산방법

(나) 분석결과

수치해석 결과에 의하여 산정한 이완영역 범위를 쐐기형태로 가정하였을 때의 거동각도가 횡방향 보강범위 120° 토사층일 경우 토피고(1.0D~3.0D)에 따라서 중첩길이 4m에서 48°~53°, 중첩길이 6m에서 34°~52°, 중첩길이 8m에서 23°~42°로 나타났으며, 횡방향 보강범위 180° 토사층일 경우 토피고(1.0D~3.0D)에 따라서 중첩길이 4m에서 48°~53°, 중첩길이 6m에서 34°~48°, 중첩길이 8m에서 24°~43°로 나타났다. 한편 풍화암층일 경우 횡방향 보강범위 120° 중첩길이 4m에서 50°~53°, 중첩길이 6m에서 42°~47°, 중첩길이 8m에서 27°~42°로 나타났으며, 횡방향 보강범위 180° 풍화암층일 경우 중첩길이 4m에서 51°~53°, 중첩길이 6m에서 42°~48°, 중첩길이 8m에서 27°~42°로 나타났다.

횡방향 보강범위와 지층조건에 따른 거동각도는 1°~4°의 차이 발생하는 것으로 나타나 120°이상의 보강에서는 터널 막장면 거동각도는 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 토피고가 낮을수록 보강재 중첩에 의한 보강효과가 더욱 크게 나타났다.

토피고 1.0D인 경우와 비교하여 토피고 2.0D인 경우에는 거동각도는 0°~11° 증가(토사터널에서 보강재의 중첩길이 8.0m에서 11° 증가량이 나타났으나 이 결과를 제외하면 0°~4° 증가량이 나타남)하였으며, 토피고 2D인 경우와 비교하여 토피고 3D인 경우에는 거동각도는 3°~12° 정도 증가하는 것으로 나타났다.

$$\beta = 45^\circ - \phi/2$$

위의 식에 의하여 지반의 내부마찰각(ϕ)에 따른 막장예상 파괴면(β)을 산정한 결과(토사의 경우, β=30°, 풍화암층의 경우, β=29°)와 이완영역에 의한 산정된 거동각도의 차이를 비교하였다. 보강재의 중첩길이가 4.0m인 경우에는 토피고 변화에 따라 발생하는 거동각도의 변화

는 미소하게 나타났으나 그 차이가 토사터널 및 풍화암터널에서 약 20° 정도 발생하여 보강효과가 감소되는 것으로 나타났다. 중첩길이가 8.0m인 경우 토피고 3.0D에서 토피고 2.0D의 결과와 비교하여 예상 파괴각도와 거동각도의 차이의 증가가 8°~11°로 급격히 증가하여 토피고 증가에 따라서 거동각도도 증가하는 것으로 나타났다. 토피고 3.0D에서 각각의 중첩길이에 따른 차이는 12°~24° 범위이며, 거동각도는 42° 이상인 것으로 나타났다.

표 3.150 보강범위 120°에서 이완범위 및 거동각도

Division \ Ground Cover			1.0D	1.5D	2.0D	3.0D
Soil	Overlap Length=4.0m	Relaxed zone(m)	10.0	10.8	12.0	Over 12.0
		Behavior Angle(°)	48	50	53	Over 53
	Overlap Length=6.0m	Relaxed zone(m)	6.0	6.3	7.5	11.5
		Behavior Angle(°)	34	35	40	52
	Overlap Length=8.0m	Relaxed zone(m)	3.8	5.0	6.0	8.0
		Behavior Angle(°)	23	29	34	42
Weathered Rock	Overlap Length=4.0m	Relaxed zone(m)	11.0	11.0	11.0	12
		Behavior Angle(°)	50	50	50	53
	Overlap Length=6.0m	Relaxed zone(m)	8.0	8.5	9.8	10.0
		Behavior Angle(°)	42	43	46	47
	Overlap Length=8.0m	Relaxed zone(m)	4.5	4.5	5.5	8.0
		Behavior Angle(°)	27	27	34	42

표 3.151 보강범위 180°에서 이완범위 및 거동각도

Division \ Ground Cover			1.0D	1.5D	2.0D	3.0D
Soil	Overlap Length=4.0m	Relaxed zone(m)	10.0	10.5	11.5	Over 12.0
		Behavior Angle(°)	48	49	51	Over 53
	Overlap Length=6.0m	Relaxed zone(m)	6.5	7.0	7.0	10.0
		Behavior Angle(°)	34	38	38	48
	Overlap Length=8.0m	Relaxed zone(m)	4.0	5.0	6.2	8.5
		Behavior Angle(°)	24	29	35	43
Weathered Rock	Overlap Length=4.0m	Relaxed zone(m)	11.0	11.0	11.0	Over 12.0
		Behavior Angle(°)	50	50	50	Over 53
	Overlap Length=6.0m	Relaxed zone(m)	8.0	8.5	9.8	10.0
		Behavior Angle(°)	42	43	47	48
	Overlap Length=8.0m	Relaxed zone(m)	4.5	4.5	5.5	8.0
		Behavior Angle(°)	27	27	31	42

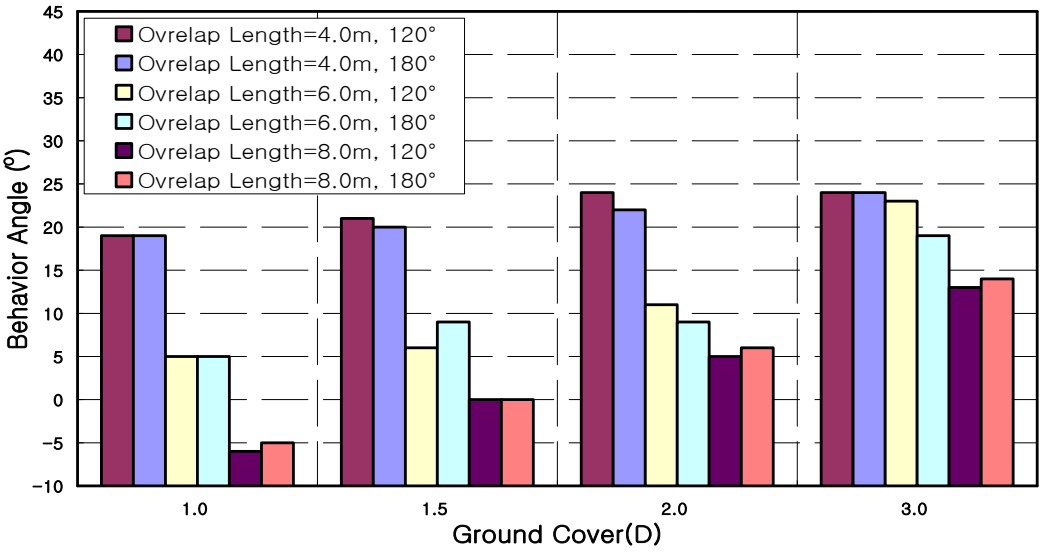


그림 3.165 토사터널에서의 예상파괴면과 거동각도의 차이

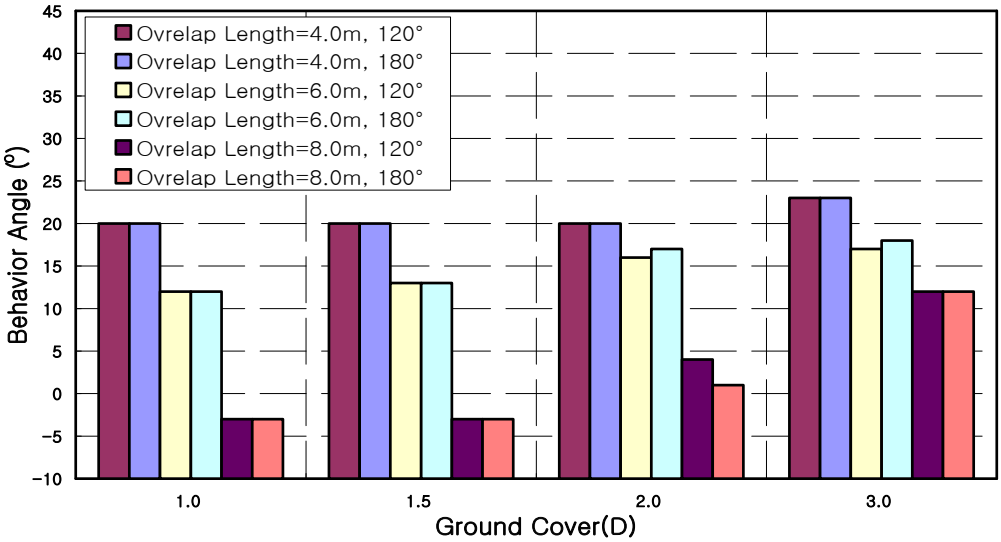


그림 3.166 풍화암터널에서의 예상파괴면과 거동각도의 차이

4. 경사 록볼트 보강효과 확인을 위한 모형시험

가. 록볼트에 대한 이론적인 고찰

(1) 록볼트의 보강효과 및 거동특성

록볼트는 굴착단면의 형상에 대하여 제한을 받지 않고 설치가 용이하여 타 공법에 비하여 저비용이며 전체 공정이 기계화 시공이 가능하므로 19세기 말애 도입되어 광범위하에 사용되고 있다. 터널에서는 발파 및 기계굴착시 발생되는 주변 원지반의 소성영역을 확대를 억제하고 원지반의 안정성을 증가시키므로 굴착면 개방에 따른 취약점을 보완하여 2차 변형을 억제하는 주 지보재 역활을 하고 있으며, 록볼트의 보강효과는 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 이완 암괴를 원지반에 고정시키는 매달음 효과
- 전단력 전달을 가능하게 하는 합성보 효과
- 직간접 프리스트레스에 의하여 일정구간에 압축효과를 만드는 내압효과
- 항복이후의 잔류강도를 증가시키는 지반보강효과

경암 이상의 암반조건에서는 암석의 강도가 크므로 응력에 의한 문제는 적게 나타나나, 불연속면이 발달한 암반에서는 암반의 붕락 등의 불안정 문제가 발생할 수 있다. 이런 경우 록볼트는 암괴의 붕락을 억제하고 암반을 일체화시키는 봉합작용 및 지반보강작용 등의 효과를 발현한다. 한편, 강도가 작은 연암 이하의 지반에서는 굴착에 의해 주변지반의 응력이 지반의 한계응력을 초과하여 넓은 영역까지 소성화되어 비교적 큰 변형이 발생하게 되므로 록볼트 보강에 의하여 지반 변형을 억제하고 소성영역의 확대를 억제함으로써 지반의 안정성을 증진시킬 수 있다. 이 경우에는 아치형성, 내압효과 등이 발현되는 것이다.

록볼트는 숏크리트와 비교하여 변형을 억제하는 능력은 적지만 변형이 매우 커져도 강성저하가 적고 전체적으로 같은 모양을 유지하면서 변형하기 때문에, 록볼트로 보강된 원지반 지지링은 변형이 진행되더라도 내하력이 부분적으로 저하되는 일이 거의 없다. 따라서 매우 큰 토압을 받더라도 터널의 형상을 유지한 채 안쪽으로 밀려 나오게 되므로 취성파괴 혹은 급격한 파괴를 방지할 수 있다.

이와 같은 록볼트의 작용효과는 암반의 종류에 따라 다르기 때문에 그 설계시에는 충분한 지반조사를 통하여 적절한 암반평가를 하고,록볼트의 사용성에 대하여 명확하게 규명해야 할 필요가 있다. 역학적인 불연속면을 보강하고 암반을 일체화하여 터널의 안정을 도모하는 경우, 록볼트 설계는 암반의 균열상태에 따라 다르지만 일반적으로 작은 균열이 많이 존재하는

경우 록볼트를 촘촘히 배치하고 그 반면에 균열이 적고 개개 암반이 크기가 비교적 큰 경우 록볼트 간격을 넓게 배치하는 것이 좋다. 터널의 안전성을 지배하는 암반의 불연속면을 알고 있는 경우나 암반의 강도-변형 특성의 이방성이 현저하다고 생각되는 경우에는 Random 볼팅에 의해 암반 보강을 하는 것도 좋지만 통상은 Pattern볼팅하는 것이 일반적이다. 이것에 대하여 터널거동이 암반강도에 지배되는 연암지반에서의 록볼트 작용효과로는 일반적으로 항복후까지의 암반강도를 유효하게 이용할 것, 암반의변형 능력을 높이는 것, 즉 암반의 일체성을 유지한 채 큰 변위를 가능하게 하는 것들이 인정되고 있다.

따라서 록볼트 설계 시에는 다음과 같은 사항을 고려하여야 설계되어야 한다.

- 록볼트 자체의 항복하중과 정착방법 및 시공성(시공시간 등)
- 숏크리트, 강지보재 등 기타 지보재와 병용하는 경우에는 각각의 지보효과를 고려하는 종합적인 지보성능 평가에 의한 록볼트 설계
- 장기적인 지보능력을 확보하기 위한 부식 등의 내구성 확보
- 록볼트의 재질, 지압판, 정착형식 및 정착재료의 선정 등에 대한 시공성과 성능검토

(2) 록볼트의 재질 및 정착방법

(가) 록볼트의 재질

록볼트의 재질은 이형강봉으로 제작하는 것을 원칙으로 하나, 강관, 팽창성 강관 또는 이와 동등한 강도와 기능을 가지는 섬유보강 플라스틱 등 기타소재를 사용할 수 있다. 일반적으로 터널에 사용되는 강재는 SD 350 이상으로서 인장강도와 연신율이 큰 것이야 한다.

록볼트 직경은 1본의 록볼트가 지탱하는 암괴의 중량 또는 지반에 필요한 전단보강력에 의해 결정할 수 있다. 일반적으로 D22~D29 정도가 사용되고 있으며, 도로터널의 경우에는 D25의 규격이 대부분 사용되고 있다. 그러나 지반의 변형이 클 것으로 예상되는 경우에는 록볼트의 내하력을 증가시킬 필요가 있으므로 단면적이 크고 인장강도가 큰 재료를 사용하거나 사용 개수를 증가시키는 방법을 고려하여야 한다.

한편, 막장면 안정성을 확보하기 위한 막장 볼트나 확폭 예정구간에 있어서 굴착 중 안정성을 위해 사용되는 볼트 등은 시공성을 고려하여 섬유보강 플라스틱 등을 재료로 한 볼트를 사용하는 경우도 있다. 또한 영구지보재로 적용되는 록볼트의 인발내력과 내부식성 향상을 위해서도 섬유보강 플라스틱을 사용할 수 있다.

지압판은 록볼트와 숏크리트를 일체화 시키는 중요한 부재이므로 예상되는 응력에 대하여 충분한 면적, 두께 및 강도를 가져야 한다. 일반적으로 평판을 사용하는 경우 지압판의 면적

은 150×150mm 정도의 규격이 적당하며, 두께는 6mm를 표준으로 하되 팽창성 지반의 경우에는 9mm 이상을 사용하여야 한다. 그러나 지반의 변형이 큰 경우에는 록볼트가 파단되는 정도의 축력이 발생되는 경우도 있으므로 이 경우에는 지압판의 두께와 강도에 대하여 별도의 검토가 필요하다.

(나) 록볼트의 정착방법

선단정착형은 록볼트의 선단을 원지반에 정착시킨 후 터널 벽면과 볼트의 선단에 축력을 작용시켜 지반에 압축영역을 형성시킴으로서 지반의 안정성을 향상시킴과 동시에 암괴를 봉합하는 목적으로 사용하고 있다. 이 방식은 선단의 정착이 충분하지 않으면 효과가 발휘되지 않기 때문에 비교적 견고한 지반에서 사용되는 경우가 많다.

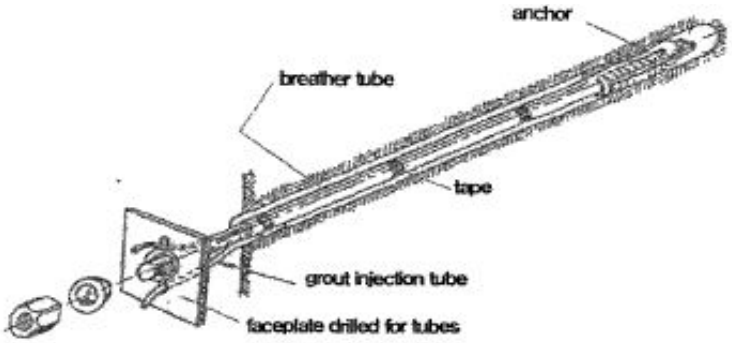


그림 3.167 선단정착 록볼트

전면정착형은 정착재나 기계적인 마찰에 의하여 볼트 전장이 지반과 접착되기 때문에 적용되는 지반의 범위가 넓다. 전면정착형은 시멘트 모르타르, 수지(레진) 등과 같은 정착재를 활용하는 방법과 팽창형 강관과 같이 마찰식으로 구분할 수 있다.

일부 외국문헌에서는 전면정착형 록볼트를 도웰(Dowel)로 정의하여 일반적인 록볼트와 구분하고 있다. 즉, 록볼트에는 반드시 인장력을 가하는 반면, 도웰은 시공 시에 인저 ㅏ ㅇ력을 가하지 않는 대신 지반의 변형에 따라 인장력이 발현되는 것으로 정의하고 있다. 하지만 국내에서는 록볼트와 도웰을 구분하지 않고 있다.

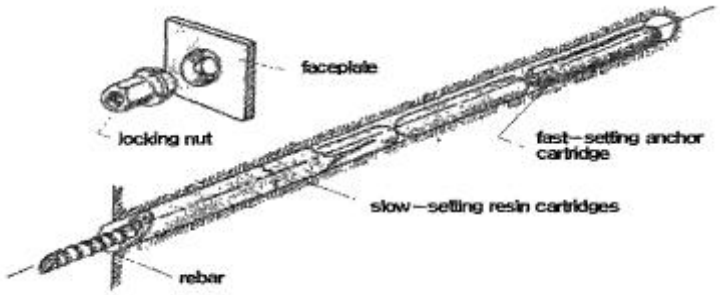


그림 3.168 수지형 전면정착 록볼트

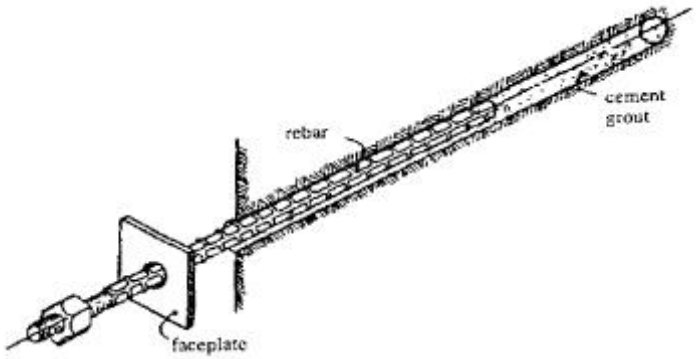


그림 3.169 시멘트 모르타르형 전면정착 록볼트

(다) 록볼트의 정착방법에 따른 거동

선단정착형은 선단을 정착시킨 후 프리스트레스를 가하여 지보재에 먼저 지보압이 가해져서 록볼트에 변위가 발생한다. 이에 반하여 전면접착형은 터널주변지반의 변형으로 인하여 하중이 록볼트에 전달되는 거동을 나타낸다. 선단정착형 록볼트의 선단 정착부는 소성영역 바깥쪽에 위치하여야 하며 소성영역에서의 변위에 저항하여 지보재에 p_s의 지보압이 발생되고 이 지보압은 주로 선단정착부의 인발저항력으로 저항하게 된다.

선단정착형 록볼트에서는 초기긴장력을 가하면 록볼트 두부와 정착부의 비선형반응이 배제되며, 정착부가 저항한도를 초과하면 미끄러짐 등으로 갑작스러운 파괴가 발생한다.

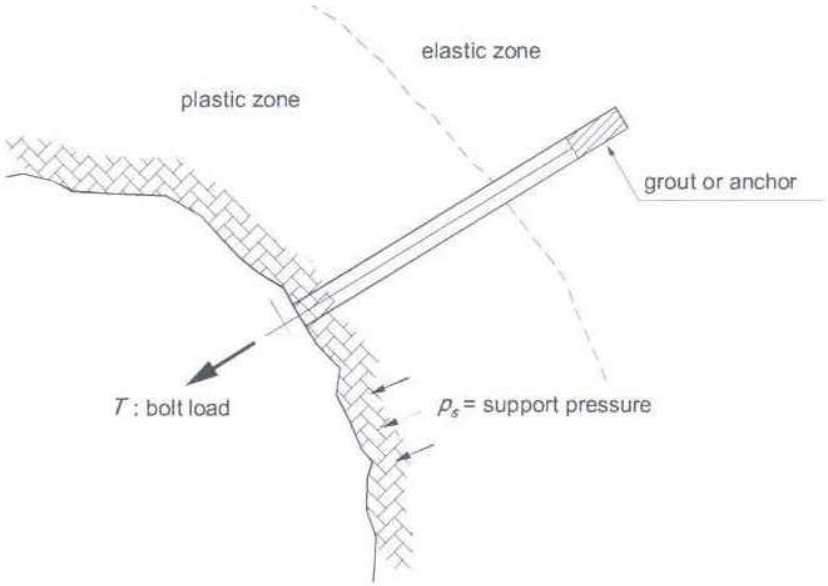


그림 3.170 선단정착 록볼트의 거동

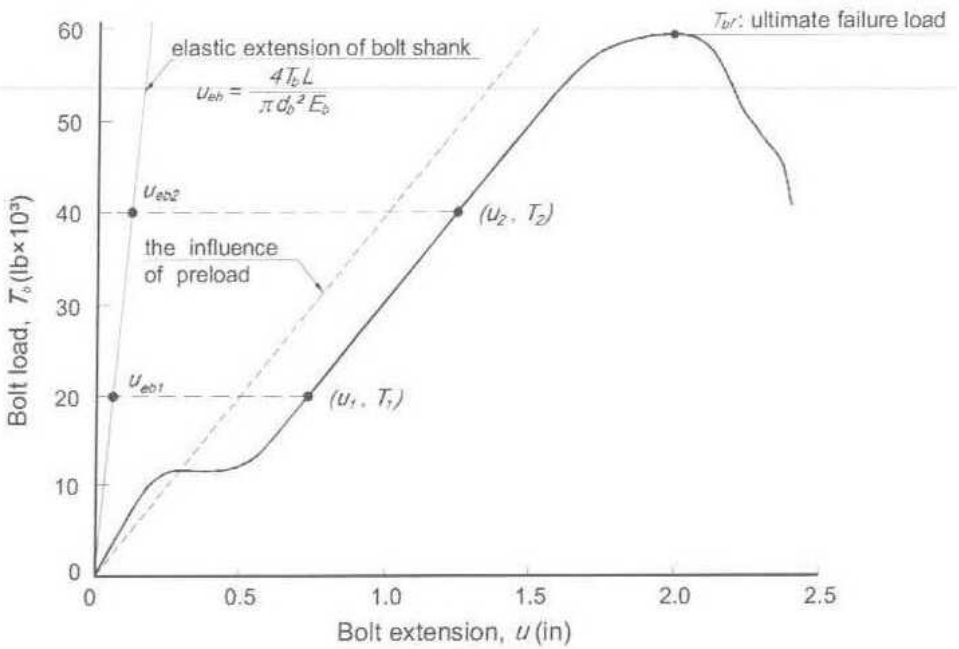


그림 3.171 선단정착 록볼트의 인발거동 특성

전면접착형 록볼트는 볼트의 전 길이가 지반과 접착되어 있기 때문에, 지반의 변형이 발생하면 지반과 볼트의 상대변위로 인하여 하중이 전달되게 된다.

전면접착형 록볼트에 작용되는 힘의 메커니즘을 좀 더 상세하게 서술하면 다음 그림 3.172와 같다. (a)에서와 같이 추가 굴착으로 인하여 지반에 변형이 발생하게 되면, 지반과 록볼트에는 상대적인 변위가 발생하게 되어 (c)와 같이 중립점(Neutral Point, 지반의 변형과 볼트

의 변형이 같인 지점)을 중심으로 오른쪽에서는 지반 자체의 변위가 볼트보다 더 크며, 왼쪽에서는 오히려 볼트의 변위가 더 크게 된다. 따라서, 볼트에 발생되는 전단력 분포는 (d)에서와 같이 -에서 출발하여 +로 증가하게 된다.

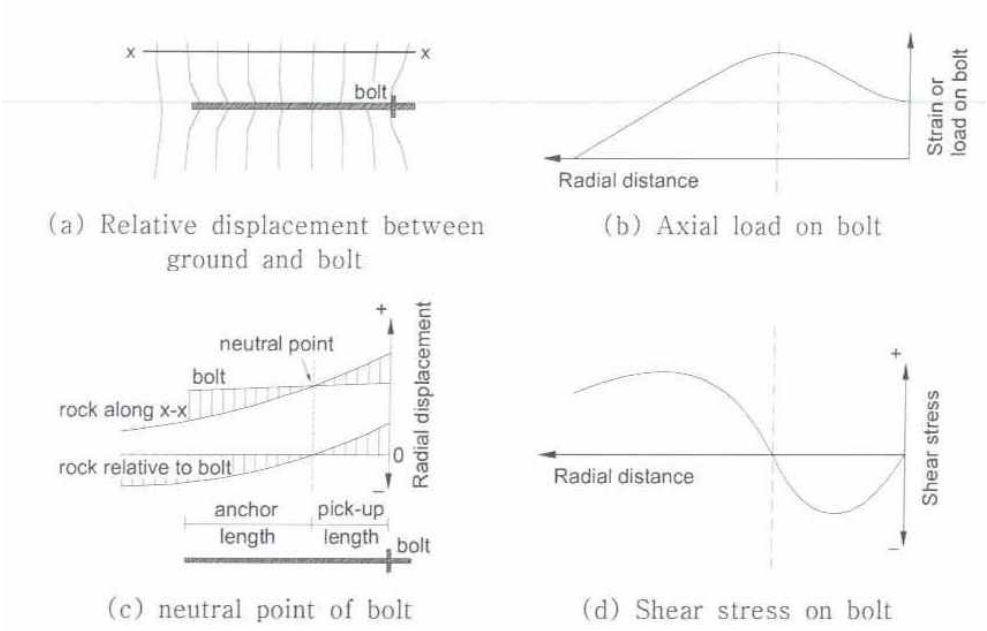
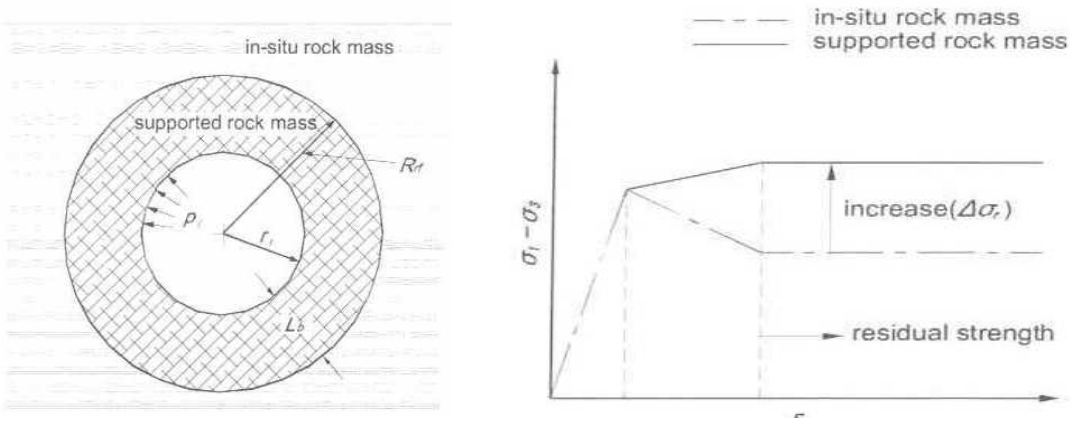


그림 3.172 전면정착 록볼트의 거동

록볼트는 역학적인 관점에서 보면 지보재로 보기보다는 지반자체의 보강재로 보는 것이 더 합리적일 수 있다. 일반적으로 록볼트의 설치로 인하여 록볼트의 길이(L_b) 만큼인 $r=R_{rf}$ 까지 지반의 강도가 증대되는 것으로 본다. 강도증진 효과의 가장 중요한 원리는 볼트의 설치로 인하여 취성(brittle)현상을 보이던 암반이 소성(ductile)현상을 보여 파괴점에 이른 후에도 강도가 저하되지 않는다. 또한 록볼트에 작용되는 축력으로 인하여 지반에 $\Delta\sigma r$의 구속압을 증가시켜 주는 효과도 발생한다.



(a) 록볼트로 보강된 지반 (b) 강도 증가효과

그림 3.173 전면정착 록볼트에 의한 강도 증가효과

(라) 록볼트와 숏크리트의 복합효과

다음 그림은 록볼트와 숏크리트의 복합효과를 나타낸다. 숏크리트는 주요 지보재로서 굴착면의 굴곡에 영향이 적으며, 터널 막장면에 지장을 주지않아 굴진율을 증가시키는 장점이 있으며, 암반면의 불연속면 틈을 재출 수 있어 암반 블록의 움직임을 초기에 방지할 수 있는 기능이 있다.

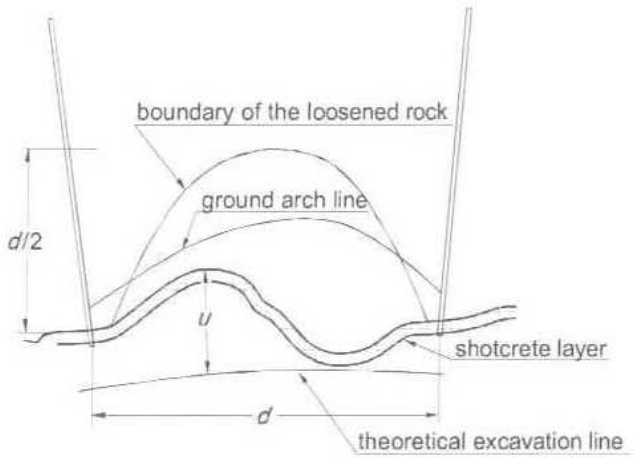


그림 3.174 록볼트와 숏크리트의 지지효과

다음 그림은 록볼트에 의하여 형성된 원지반 아치의 형성 모형이다. 좌측은 록볼트만 설치한 경우이며, 우측은 록볼트와 숏크리트에 의하여 형성되는 원지반 아치의 모형이다. 그림에서 알 수 있듯이 록볼트는 숏크리트와 동시에 설치되는 경우에 원지반 아치가 보다 효과적으로 형성되고 있음을 알 수 있다.

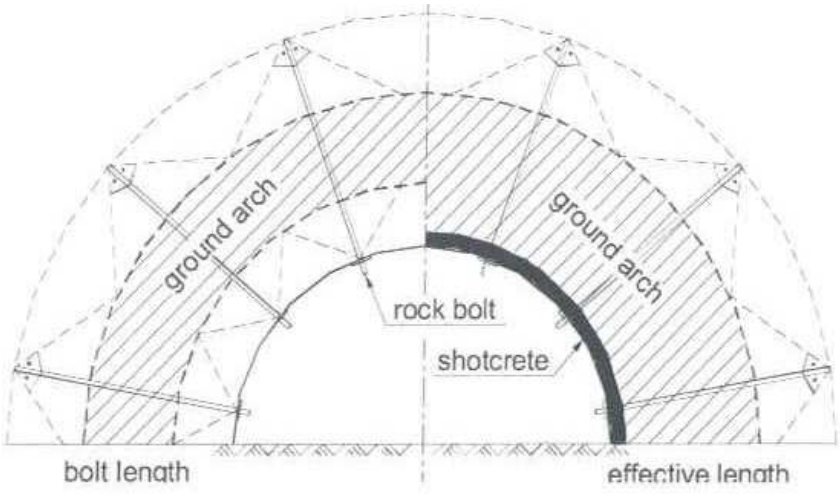


그림 3.175 터널에서 록볼트에 의한 원지반 아치 형성모형

나. 경사 록볼트 시스템에 대한 모형실험

(1) 모형실험 개요

확대터널 시공 시 발생하는 협소공간에 의하여 록볼트 시공은 기존에 주로 시공되도 있는 굴착면에 수직한 방향으로 설치하는 것이 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 따라서 터널의 안정성을 확보하기 위한 록볼트 시공 시 경사 록볼트의 시공이 발생할 것으로 예상되며, 해외의 시공사례에서도 경사록볼트가 시공된 사례를 확인할 수 있었다. 그러나 현재까지의 국내외 연구결과를 조사한 결과 경사 록볼트에 대한 연구결과는 아직 미비한 실정인 것으로 확인되었다.

따라서 전술한 록볼트 보강효과에 대한 이론적인 검토를 통하여 경사록볼트로 보강된 지반의 보강효과를 분석하기 위하여 경사록볼트로 보강된 지반을 단순보로 가정한 휨이론에 근거한 실내모형실험을 실시하였다. 경사록볼트의 설치각도 및 토피 등을 변화시켜 단순보로 조성된 모형지반의 토피하중에 의한 처짐량을 측정하여 경사록볼트 보강지반의 보강효과를 검증하였다.

모형실험은 모형지반의 조건 및 규모를 실제와 가깝게 할수록 치수에 의한 영향이 적제 발생하나, 모형실험의 제반조건을 고려하여 실험에 취급이 용이하한 재료 및 모델을 사용하고 있다. 본 모형실험에서는 대상지반을 주문진표준사를 이용하여 구현하였으며, 일정한 상대밀도를 조성할 수 있도록 강사장치를 이용하여 조성하였다. 모형 록볼트는 전면접착형 록볼트를 모형화 하기 위하여 시멘트 모르타르를 이용하여 사전 제작한 모형볼트를 사용하였으며,

숏크리트는 강판을 사용하여 모형화 하였다.

(2) 모형시험 개요

Rabcewicz(1964)는 아치이론은 원지반이 굴착으로 인하여 1회 굴진장의 1/2 높이만큼 이완되어 터널의 종방향과 횡방향으로 지반아치가 형성되는 것이다. Rabcewicz의 아치이론과 경험식을 바탕으로 모형볼트의 설치길이 및 간격을 결정하였으며, 모형볼트와 모형지반간의 상재적인 변위에 차이에 때문에 발생하는 마찰 저항력에 의하여 발생할 수 있는 응력콘이 중복되는 높이를 아치영역으로 고려하였다. 모형볼트의 기준 설치간격은 10.0×10.0cm, 설치각도는 90도인 것으로 결정하였으며, 모형볼트의 설치길이는 지반아치 높이가 모형볼트 기준 설치간격의 1/2이상(5.0cm 이상)이 확보되는 12.0cm($L_b(12cm) \geq t(10cm)$이며 응력콘이 중복되는 높이는 약 6.0cm)로 결정하였다.

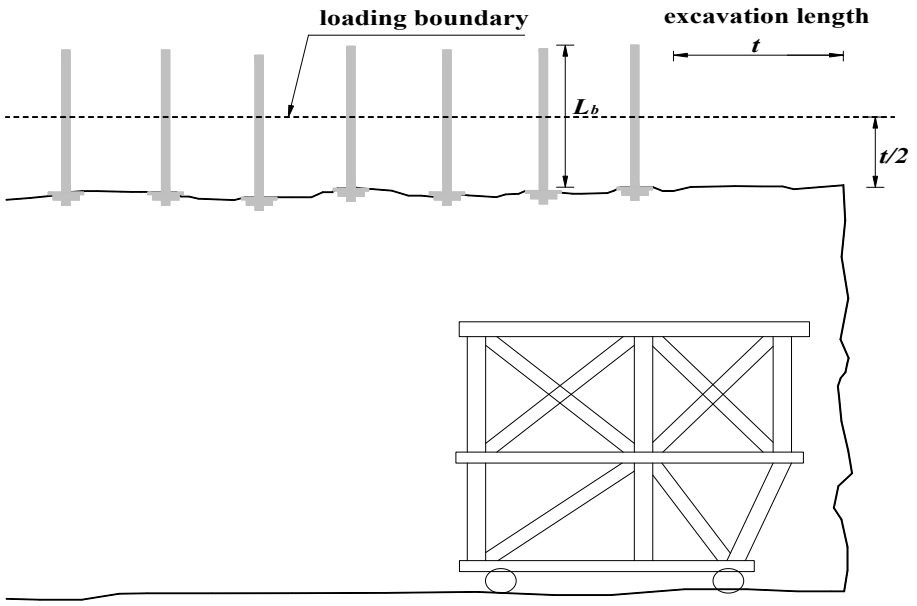


그림 3.176 록볼트 설치로 형성된 원지반 아치(Rabcewicz, 1964)

모형볼트의 종방향(4case) 및 횡방향(2case) 설치간격, 모형볼트의 설치각도(4case), 모형볼트의 설치길이(3case) 및 모형지반의 높이(3case) 등을 변수로 하였으며, 시험토조의 내부 공간은 1,200×700×200mm(길이×높이×폭)이며, 강재로 제작하였다.

경사볼트의 보강효과를 분석하기 위하여 모형볼트 보강효과에 의하여 형성되는 지반아치 및 강판은 합성보로 고려한 모형시험을 실시하였으며, 모형볼트 상부에 균일한 밀도로 조성되는

모형지반의 자중은 합성보에 등분포하중으로 작용하는 것으로 고려하였다. 이 합성보의 지점 구조는 단순보로 형성하였으며, 합성보의 처짐량 및 모형볼트에 의하여 형성되는 지반아치에 대한 연직토압을 측정하여 시스템 경사볼트에 대한 보강효과를 확인하였다.

(3) 시험에 사용된 재료 및 장비

(가) 모형실험에 사용한 흙

① 물리적 특성

모형실험은 다수의 시험이 반복하여 진행되는 점을 고려하여 주문진 표준사를 사용하여 일정한 상대밀도가 형성되도록 하였다. 실험에 사용한 주문진 표준사의 비중은 2.62이며, 통일분류법상 SP로 분류되었다. 상대밀도시험(KS F 2308) 결과 최대건조단위중량($\gamma_{d_{max}}$)은 16.79 kN/m^3, 최소건조단위중량($\gamma_{d_{min}}$)은 13.96kN/m^{3}으로 나타났으며, 모형지반 조성 시 강사장치를 이용하여 상대밀도(D_r) 80%를 만족하는 건조단위중량(γ_d) 16.14kN/m^{3}의 모형지반을 형성하였다.

표 3.152 시험에 사용된 주문진 표준사의 물리적 특성

	비중, G_s	아터버그한계		최대 건조단위중량, $\gamma_{d\,max}$(kN/m^3)	최소 건조단위중량, $\gamma_{d\,min}$(kN/m^3)	USCS
		LL(%)	PI(%)			
주문진 표준사	2.62	-	-	16.79	13.96	SP

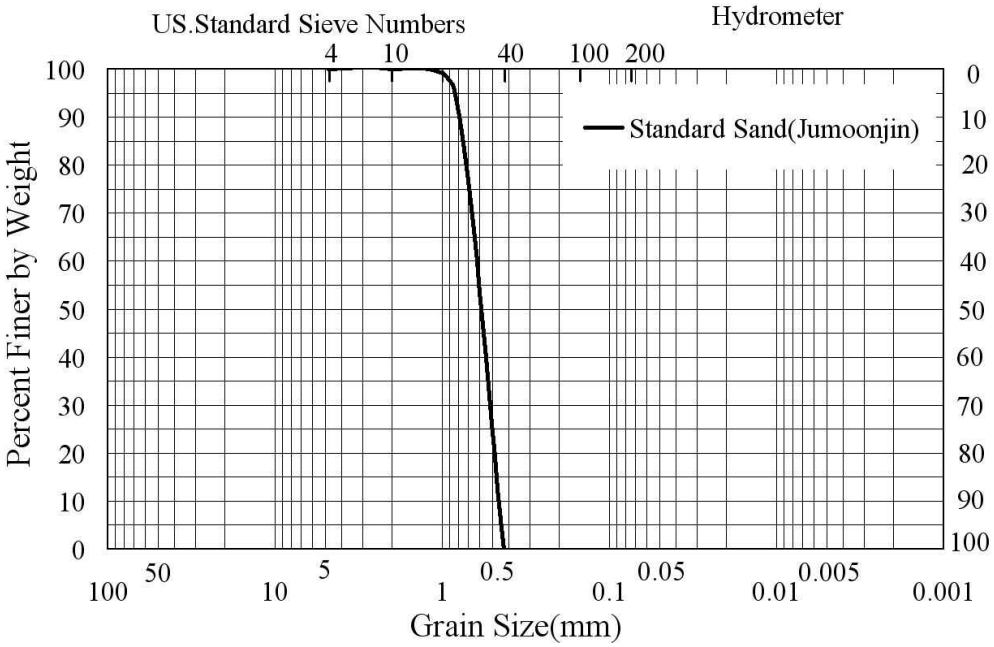


그림 3.177 주문진 표준사의 입도분포곡선

② 주문진 표준사의 역학적 특성

실험에 사용된 주문진 표준사의 전단거동특성을 파악하기 위하여 직접전단시험과 압밀-배수 삼축압축시험(CD Test)을 병행하여 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 삼축압축시험결과

실험에 사용된 주문진 표준사의 전단거동특성을 파악하기 위하여 압밀-배수 삼축압축시험(CD test)를 실시하였으며, 다음의 표와 그림은 그 결과를 정리하여 나타낸 것이다.

표 3.153 주문진 표준사에 대한 삼축압축시험 결과

구속압력 (kPa)	점착절편 (kPa)	전단저항각 (°)	최대 축차응력, $\sigma_{d\max}$(kPa)	파괴시 변형률, ϵ_f(%)	$\sigma_{d\max}/2$ (kPa)	E_{50} (kPa)
	c'	ϕ'				
100	0	40.1	382.0	4.32	191.0	298.6
200			704.4	4.54	352.2	422.2
300			1067.3	6.02	533.7	731.9

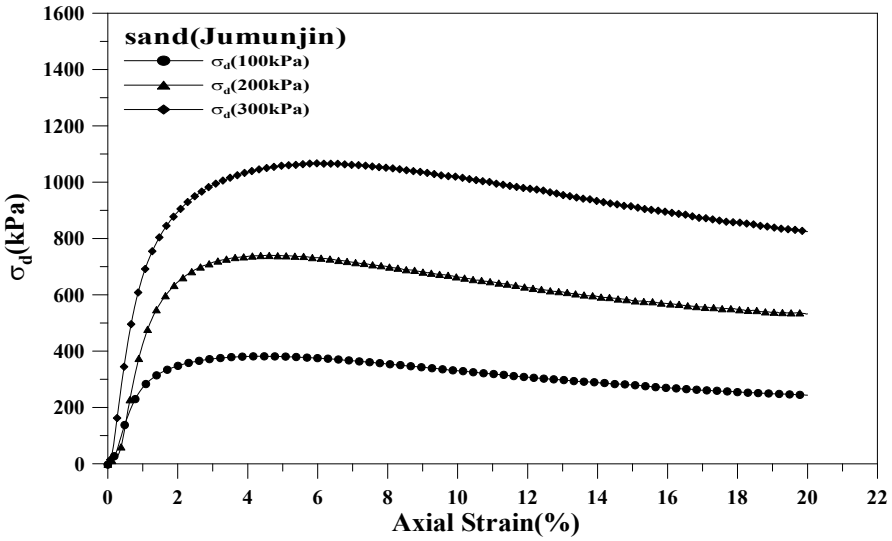


그림 3.178주문진 표준사의 축차응력-변형률 관계

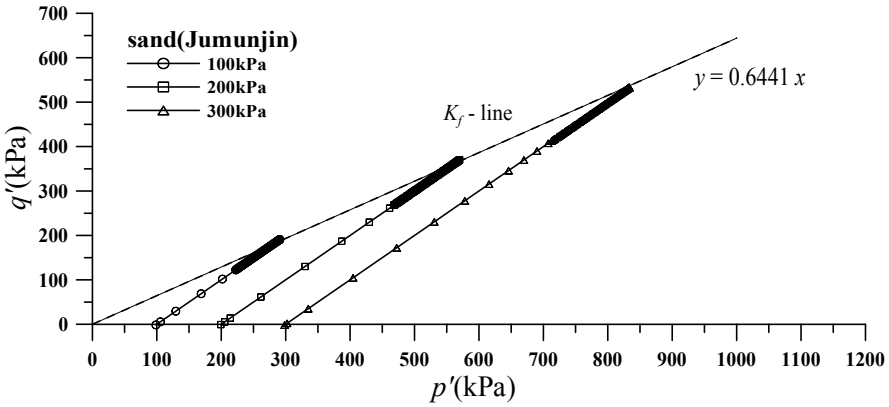


그림 3.179 주문진 표준사의 응력경로

- 직접전단시험

주문진 표준사를 이용하여 직접전단시험을 하였으며, 그 결과과 강도정수는 $c=0$, $\phi=39.3°$로 결정되었으며, 그 결과는 삼축압축시험 결과와 유사한 것으로 나타났다.

표 3.154 주문진 표준사의 직접전단시험결과

수직응력, σ_n(kPa)	파괴시 전단응력, τ_f(kPa)	점착절편 ,c(kPa)	전단저항각 ,ϕ(°)
100	81.4	0	39.3
200	164.3		
300	245.2		

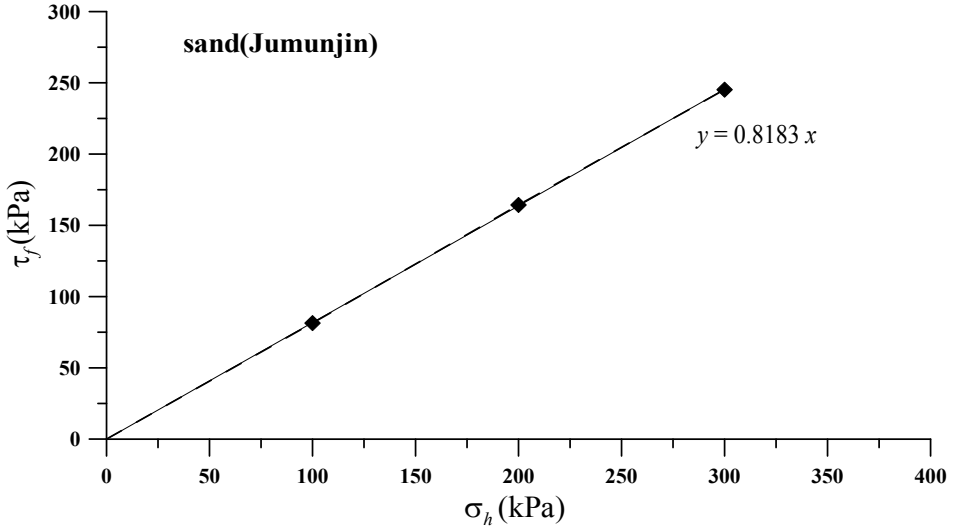


그림 3.180 주문진 표준사 직접전단시 수직응력-파괴시 전단응력 관계

(나) 모형볼트 및 그라우트

터널 시공 중 주로 적용되고 있는 전면접착형 록볼트를 모형화하였다. 모형볼트의 재질은 그라우트와 볼트간의 마찰력이 충분히 발현될 수 있도록 한국산업 표준규격 KS B 1037에 제시된 직경 10mm의 전산볼트(stud bolt)를 사용하였다.

표 3.155 모형시험에 사용된 전산볼트의 물리적 성질

최소인장강도 (N/mm^2)	최소인장하중 (N)	파단연신율 (Min.)	단면수축률 (Min.)
800	46,400	12	52

전면접착형 록볼트의 그라우트(정착재료)는 시멘트 모르타르, 시멘트 페이스트, 수지 등이 사용되고 있으며, 모형시험에서는 실제 터널 시공현장에서 주로 사용되고 있는 레진(Resin)을 사용하지 않고 실험실에서 제작 및 사용이 편리한 시멘트 페이스트를 사용하였다. 터널표준시방서에 의하면 시멘트를 그라우트로 사용하는 경우 물-시멘트비를 40~50%로 제시하고 있으며, 모형시험에는 물-시멘트비 45%의 시멘트 페이스를 그라우트로 사용하였다.

실험조건상 모형지반에서 그라우트 타설에 어려움(삽입홀의 붕괴)이 있었으며, 정착재료의 경화에 많은 시간이 소요(최소 재령강도 7일)되는 관계로 모형볼트를 사전 제작하여 사용하는 것으로 계획하였다. 또한, 터널표준시방서에서는 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하나 조기 접착력의 발현이 필요한 경우 급결제 등을 혼합하거나 조강 시멘트를 사용하도록 제

시되어 있으나, 모형볼트를 사전 제작하여 사용하는 점을 고려하여 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 제작된 모형볼트의 직경은 14mm, 그라우팅 길이는 120mm이다.



그림 3.181 모형시험에 사용된 모형볼트

(다) 철판

모형숏크리트는 철판을 사용하여 모사하였고 영구변형이 발생하지 않는 조건에서 강판의 변형이 충분히 발생하도록 예비시험을 수행하여 길이, 너비, 두께를 각각 150cm, 20cm, 0.8cm로 결정하여 제작하였다. 또한, 철판은 각 시험조건별 종방향(11.5cm, 10.0cm, 8.5cm, 7.0cm)에 따라 볼트삽입 홀을 가공하여 제작하였다.

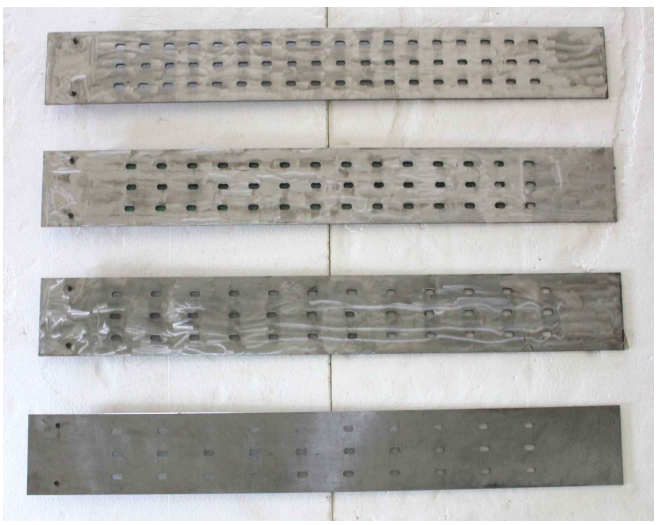


그림 3.182 가공된 철판 전경

(라) 모형토조 및 강사장치

모형시험에서는 120cm×50cm×90cm(길이×너비×높이)의 크기로 강재를 이용하여 제작하였다. 모형토조 하부에서부터 20cm되는 곳의 양단에 롤러 및 강판 삽입홀을 가공하였으며, 모형시험에 사용한 내부공간은 120cm×20cm×70cm(길이×너비×높이)이다. 또한 시험과정 중에서 모형지반의 조성상태, 강판의 변형 등을 확인할 수 있도록 토조의 전면은 아크릴판으로 제작하였다. 모형시험 시 동일한 상대밀도의 지반조건을 형성하기 위하여 강사장치를 이용하였다. 강사장치는 레일 및 체인 블록을 이용하여 자유로운 이동이 가능하도록 하였다.

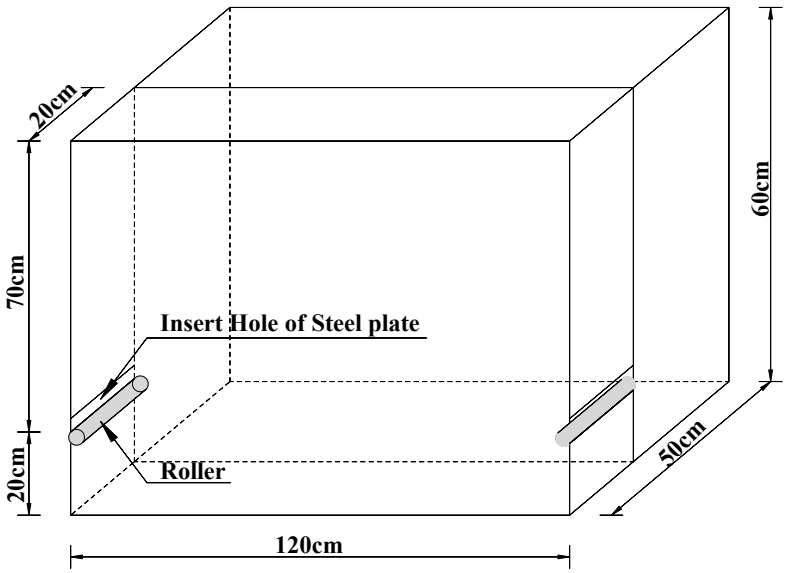


그림 3.183 시험에 사용한 모형토조의 제원



(a) 강사장치 전경 (b)강사장치 레일 및 체인 블록 전경

그림 3.184 시험에 사용한 강사장치

(마) 측정장비

모형볼트에 의하여 보강된 모형지반의 변형을 측정 및 모형볼트로 보강된 지반의 토압변화를 측정하기 위하여 각각 2개의 변위계 및 2개의 토압계를 사용하였으며, 측정자료 수집에는 30개의 채널까지 사용이 가능한 일본 Tokyo Sokki사의 TDS-303 데이터로거(Data logger)를 사용하였다.

표 3.156 모형시험에 사용된 변위계 및 토압계의 제원

구 분	변위계		토압계	
Type	SDP-300D	SDP-300D	FSP-2	FSP-2
Capacity	300mm	300mm	200kPa	200kPa
Rated Output (mV/V)	5	5	0.5345	0.5395
Non-linearity (%/RO)	0.3	0.3	0.5	0.5
Input/Output resistance(Ω)	349.2	349.5	350	350

다. 모형시험 변수 및 방법

(1) 모형시험 변수

모형볼트의 종방향(4case) 및 횡방향(2case) 설치간격, 모형볼트의 설치각도(4case), 모형볼트의 접착길이(3case) 및 모형지반의 높이(3case) 등을 변수로 하여 총 108회의 모형시험을 실시하였으며, 무보강 지반에 대하여 모형지반의 높이를 변화시켜 3회 실시하여 총 111회의 시험을 실시하였다.

표 3.157 설치 간격에 따른 모형볼트 설치개수

구 분	종방향 간격(cm)							
	11.5		10.0		8.5		7.0	
횡방향 간격(cm)	2열	1열	2열	1열	2열	1열	2열	1열
	10	20	10	20	10	20	10	20
모형볼트 설치개수	18	9	20	10	24	12	32	16

표 3.158 모형볼트 보강지반에 대한 시험 Case-1

볼트길이(cm)	볼트 간격(cm)		설치각도(°)	토피고(cm)	표기방법
	종방향	횡방향			
12.0	11.5	2열	90	24	B12-L11.5-2Line-A90-24
				36	B12-L11.5-2Line-A90-36
				60	B12-L11.5-2Line-A90-60
			75	24	B12-L11.5-2Line-A75-24
				36	B12-L11.5-2Line-A75-36
				60	B12-L11.5-2Line-A75-60
			60	24	B12-L11.5-2Line-A60-24
				36	B12-L11.5-2Line-A60-36
				60	B12-L11.5-2Line-A60-60
			45	24	B12-L11.5-2Line-A45-24
				36	B12-L11.5-2Line-A45-36
				60	B12-L11.5-2Line-A45-60
		1열	90	24	B12-L11.5-1Line-A90-24
				36	B12-L11.5-1Line-A90-36
				60	B12-L11.5-1Line-A90-60
			75	24	B12-L11.5-1Line-A75-24
				36	B12-L11.5-1Line-A75-36
				60	B12-L11.5-1Line-A75-60
			60	24	B12-L11.5-1Line-A60-24
				36	B12-L11.5-1Line-A60-36
				60	B12-L11.5-1Line-A60-60
			45	24	B12-L11.5-1Line-A45-24
				36	B12-L11.5-1Line-A45-36
				60	B12-L11.5-1Line-A45-60
	10.0	2열	90	24	B12-L10.0-2Line-A90-24
				36	B12-L10.0-2Line-A90-36
				60	B12-L10.0-2Line-A90-60
			75	24	B12-L10.0-2Line-A75-24
				36	B12-L10.0-2Line-A75-36
				60	B12-L10.0-2Line-A75-60
			60	24	B12-L10.0-2Line-A60-24
				36	B12-L10.0-2Line-A60-36
				60	B12-L10.0-2Line-A60-60
			45	24	B12-L10.0-2Line-A45-24
				36	B12-L10.0-2Line-A45-36
				60	B12-L10.0-2Line-A45-60

표 3.159 모형볼트 보강지반에 대한 시험 Case-2

볼트길이(cm)	볼트 간격(cm)		설치각도(°)	토피고(cm)	표기방법
	종방향	횡방향			
12.0	10.0	1열	90	24	B12-L10.0-1Line-A90-24
				36	B12-L10.0-1Line-A90-36
				60	B12-L10.0-1Line-A90-60
			75	24	B12-L10.0-1Line-A75-24
				36	B12-L10.0-1Line-A75-36
				60	B12-L10.0-1Line-A75-60
			60	24	B12-L10.0-1Line-A60-24
				36	B12-L10.0-1Line-A60-36
				60	B12-L10.0-1Line-A60-60
			45	24	B12-L10.0-1Line-A45-24
				36	B12-L10.0-1Line-A45-36
				60	B12-L10.0-1Line-A45-60
	8.5	2열	90	24	B12-L8.5-2Line-A90-24
				36	B12-L8.5-2Line-A90-36
				60	B12-L8.5-2Line-A90-60
			75	24	B12-L8.5-2Line-A75-24
				36	B12-L8.5-2Line-A75-36
				60	B12-L8.5-2Line-A75-60
			60	24	B12-L8.5-2Line-A60-24
				36	B12-L8.5-2Line-A60-36
				60	B12-L8.5-2Line-A60-60
			45	24	B12-L8.5-2Line-A45-24
				36	B12-L8.5-2Line-A45-36
				60	B12-L8.5-2Line-A45-60
		1열	90	24	B12-L8.5-1Line-A90-24
				36	B12-L8.5-1Line-A90-36
				60	B12-L8.5-1Line-A90-60
			75	24	B12-L8.5-1Line-A75-24
				36	B12-L8.5-1Line-A75-36
				60	B12-L8.5-1Line-A75-60
			60	24	B12-L8.5-1Line-A60-24
				36	B12-L8.5-1Line-A60-36
				60	B12-L8.5-1Line-A60-60
			45	24	B12-L8.5-1Line-A45-24
				36	B12-L8.5-1Line-A45-36
				60	B12-L8.5-1Line-A45-60

표 3.160 모형볼트 보강지반에 대한 시험 Case-3

볼트길이(cm)	볼트 간격(cm)		설치각도(°)	토피고(cm)	표기방법
	종방향	횡방향			
12.0	7.0	2열	90	24	B12-L7.0-2Line-A90-24
				36	B12-L7.0-2Line-A90-36
				60	B12-L7.0-2Line-A90-60
			75	24	B12-L7.0-2Line-A75-24
				36	B12-L7.0-2Line-A75-36
				60	B12-L7.0-2Line-A75-60
			60	24	B12-L7.0-2Line-A60-24
				36	B12-L7.0-2Line-A60-36
				60	B12-L7.0-2Line-A60-60
			45	24	B12-L7.0-2Line-A45-24
				36	B12-L7.0-2Line-A45-36
				60	B12-L7.0-2Line-A45-60
		1열	90	24	B12-L7.0-1Line-A90-24
				36	B12-L7.0-1Line-A90-36
				60	B12-L7.0-1Line-A90-60
			75	24	B12-L7.0-1Line-A75-24
				36	B12-L7.0-1Line-A75-36
				60	B12-L7.0-1Line-A75-60
			60	24	B12-L7.0-1Line-A60-24
				36	B12-L7.0-1Line-A60-36
				60	B12-L7.0-1Line-A60-60
			45	24	B12-L7.0-1Line-A45-24
				36	B12-L7.0-1Line-A45-36
				60	B12-L7.0-1Line-A45-60
14.0	10.0	2열	75	60	B14-L10.0-2Line-A75-60
				60	B14-L10.0-2Line-A60-60
	8.5	2열	75	60	B14-L8.5-2Line-A75-60
				60	B14-L8.5-2Line-A60-60
	7.0	2열	75	60	B14-L7.0-2Line-A75-60
				60	B14-L7.0-2Line-A60-60
16.0	10.0	2열	75	60	B16-L10.0-2Line-A75-60
				60	B16-L10.0-2Line-A60-60
	8.5	2열	75	60	B16-L8.5-2Line-A75-60
				60	B16-L8.5-2Line-A60-60
	7.0	2열	75	60	B16-L7.0-2Line-A75-60
				60	B16-L7.0-2Line-A60-60

(2) 모형시험 방법

모형볼트 보강효과에 의하여 형성되는 지반아치 및 강판은 합성보로 고려하였으며, 합성보의 지점구조는 단순보로 형성하였다. 합성보의 처짐량 및 모형볼트에 의하여 형성되는 지반아치에 대한 연직토압을 측정하여 시스템 경사볼트에 대한 보강효과를 확인하였다.

측정장치로 토조의 중앙 하부에 변위계를 설치하였으며, 모형지반에 작용하는 연직토압의 변화를 측정하기 위하여 모형지반 조성 중 2개소(A지점 및 B지점)에 측정용량 200kPa인 토압계를 설치하여 모형지반의 변형 전/후의 연직토압을 측정하였다.

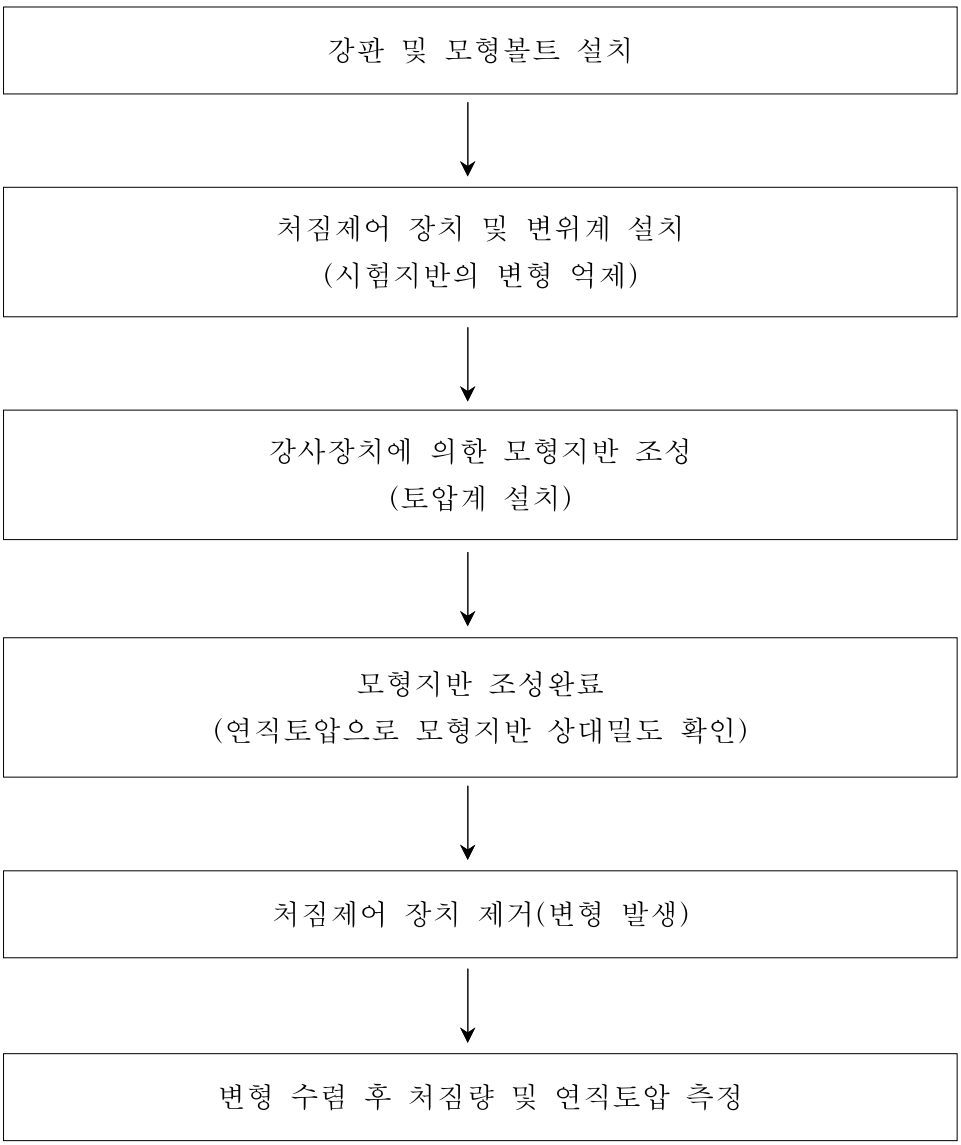


그림 3.185 모형시험 순서

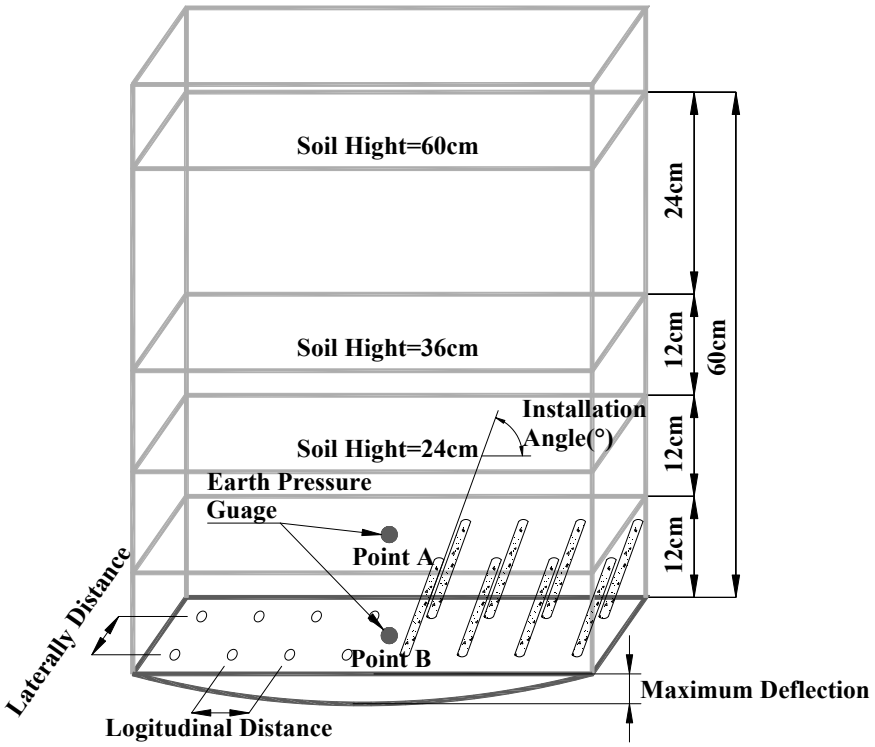


그림 3.186 모형시험에서의 계측기 설치위치

① 각 실험Case의 모형볼트 설치에 대한 시험변수에 따라서 철판 및 모형볼트를 설치한다.



그림 3.187 모형볼트 및 강판 설치 전경

② 철판 및 모형볼트 설치완료 후 처짐제어 장치 및 변위계를 설치한다.



그림 3.188 처짐제어 장치 및 변위계 설치 전경

③ 모형지반의 바닥부의 중앙부분에에 토압계를 설치한 후 계측을 시작한다.

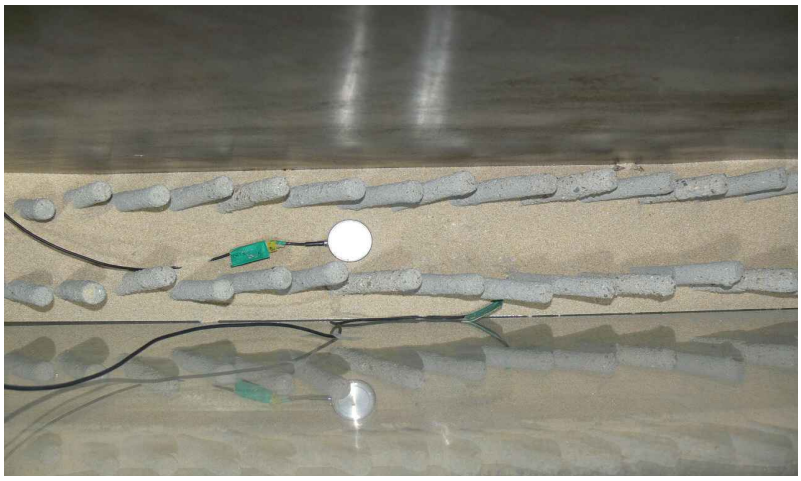


그림 3.189 토압계 설치전경

④ 강사장치를 이용하여 각 실험Case의 토피고에 따하 모형지반을 조성한다. 이때 모형지반을 12cm 조성 후 토압계를 추가로 설치한다.



그림 3.190 강사장치를 이용한 모형지반 조성전경

⑤ 모형지반조성 후 처짐제어 장치를 제거하여 처짐을 유도하며, 변형 발생에 의한 처짐량 및 토압변화를 측정한다.

라. 모형시험 결과분석

(1) 연직토압변화

다음 그림은 모형볼트가 설치된 모형지반의 연직토압의 감소량(모형볼트를 설치하지 않은 지반 연직토압과 모형볼트가 설치된 지반의 연직토압의 차)을 연직토압의 측정지점에 따라서 모형볼트의 종방향 설치간격에 따라서 도시한 것이며, 같은 시험 조건에 대해 B지점의 연직토압 감소가 A지점에 비해서 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

연직토압 측정지점에 따라 연직토압의 감소량이 다르게 나타난 이유는 모형지반에 변형이 발생하는 경우에 모형볼트와 모형지반 사이의 상대적 변형량의 차이가 때문인 것으로 판단된다. 모형볼트와 모형지반의 상대적인 변형량 차이로 인하여 모형볼트, 그라우트 및 지반 사이에서는 주면마찰력이 발현되며, 이때 발현되는 주면마찰력에 의하여 연직토압의 일부가 볼트로 전이되는 아칭효과가 발생하게 된다. 즉, 모형지반과 모형볼트에서 발생하는 아칭효과에 의하여 모형볼트로 보강된 모형지반의 연직토압 감소가 발생되는 것이다.

이런 아칭효과의 발현은 모형볼트를 횡방향 간격 20cm(1열 설치)로 설치한 조건보다는 횡방향 간격 10cm(2열 설치)로 설치한 조건에서 크게 나타났으며, 이러한 결과는 토피고가 60cm인 조건에서 가장 크게 나타났다. 이 결과는 변형발생 전 원지반이 아칭효과 발현에 적합한 토피하중이 확보되는 경우에 시스템볼트에 의한 보강효과가 극대화되며, 시스템볼트

의 보강효과가 효과적으로 나타나는 토피고는 볼트길이의 약 5배인 것으로 판단된다.

모형볼트의 설치각도에 따른 연직토압 감소효과에 대한 영향을 비교해 볼 때 설치각도가 작아질수록 연직토압 감소량도 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, B지점에 대한 연직토압의 감소량에서 나타나듯이 동일한 조건에서 모형볼트 설치각도가 75°에서 60°로 작아질 때 토압 감소량의 변화가 비교적 큰 것으로 나타났다. 따라서 연직토압 측정결과를 비교해 볼 때 시스템 경사볼트에 의한 보강효과는 90~75도의 설치각도에서 가장 효과적으로 발생한 것으로 판단된다. 또한, 모형볼트의 횡방향 간격 10cm(2열 설치)로 설치된 경우 종방향 설치간격이 11.5cm가 되는 경우 이전의 종방향 설치간격과 비교하여 연직토압의 감소량이 급격히 감소하고 있는 것으로 나타났다.

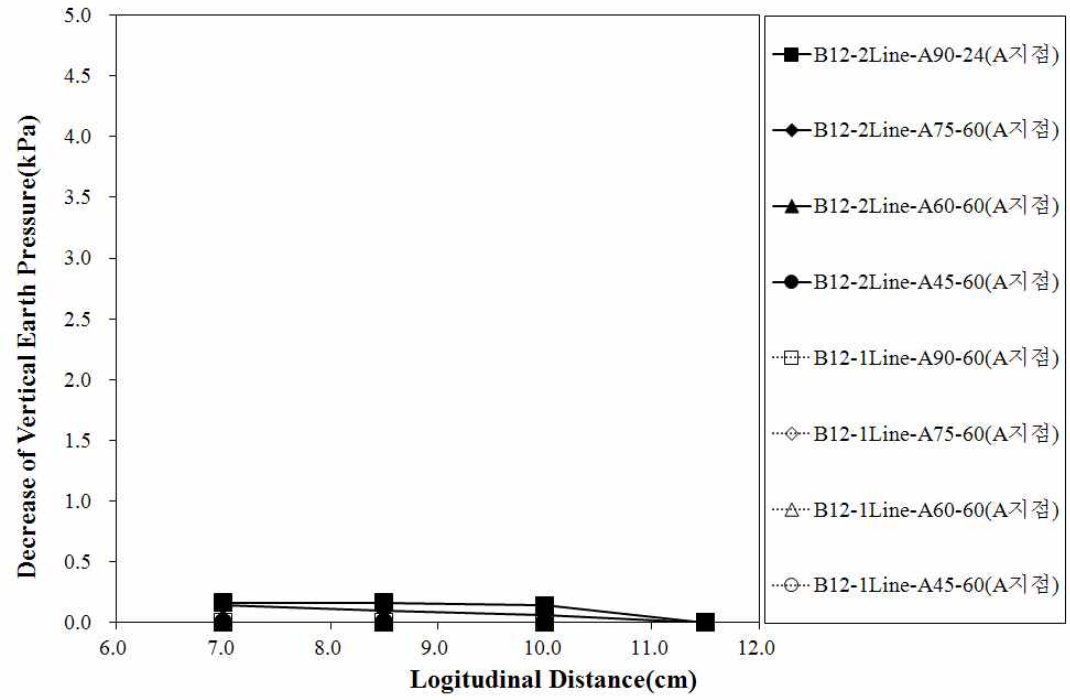


그림 3.191 토피고 24cm A지점에서 종방향 설치간격에 따른 연직토압 변화량

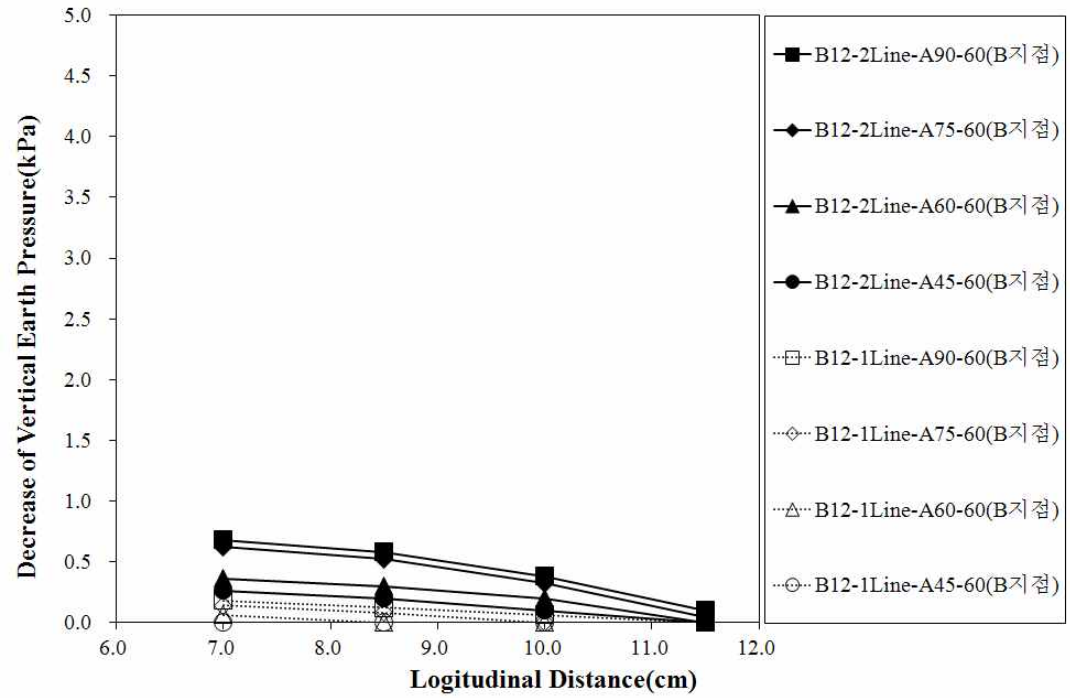


그림 3.192 토피고 24cm B지점에서 종방향 설치간격에 따른 연직토압 변화량

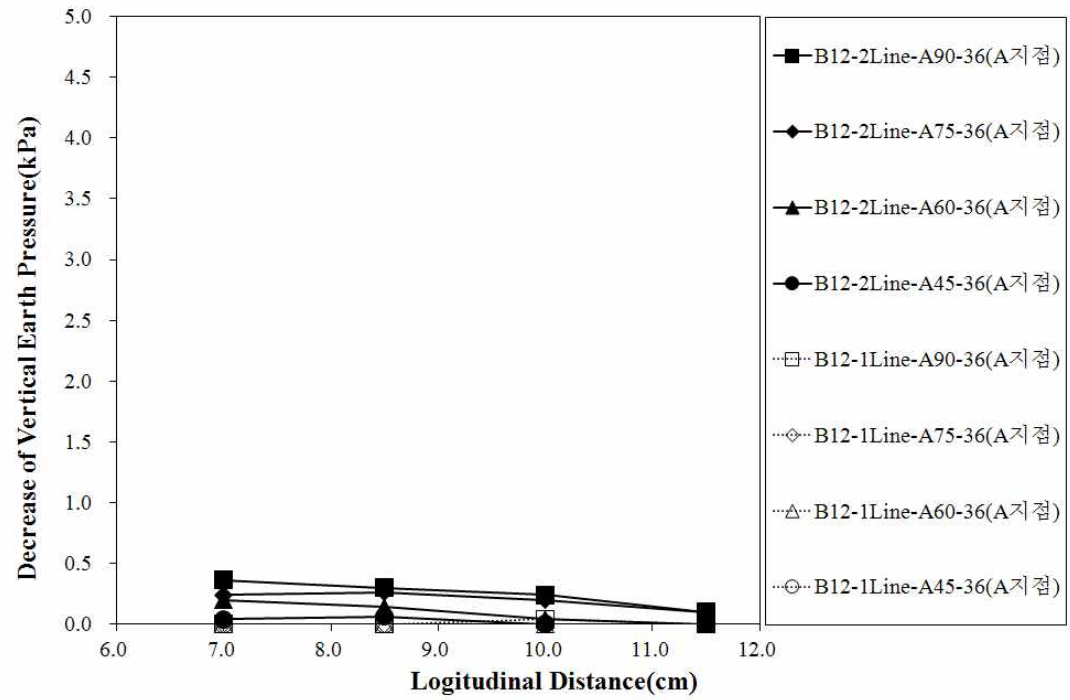


그림 3.193 토피고 36cm A지점에서 종방향 설치간격에 따른 연직토압 변화량

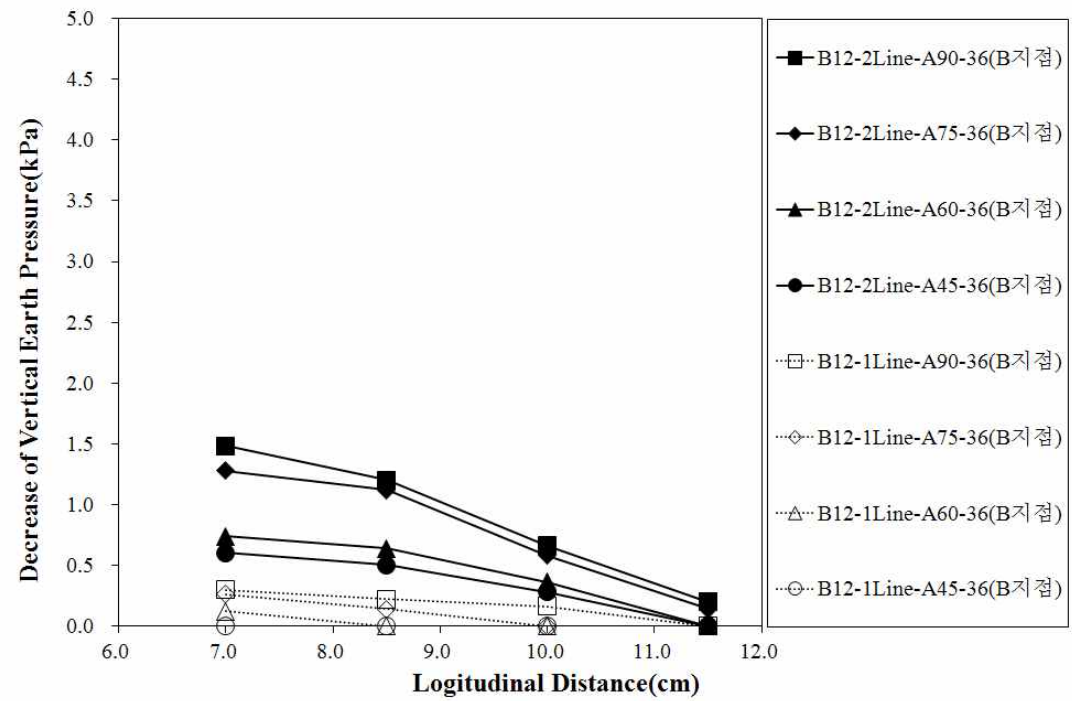


그림 3.194 토피고 36cm B지점에서 종방향 설치간격에 따른 연직토압 변화량

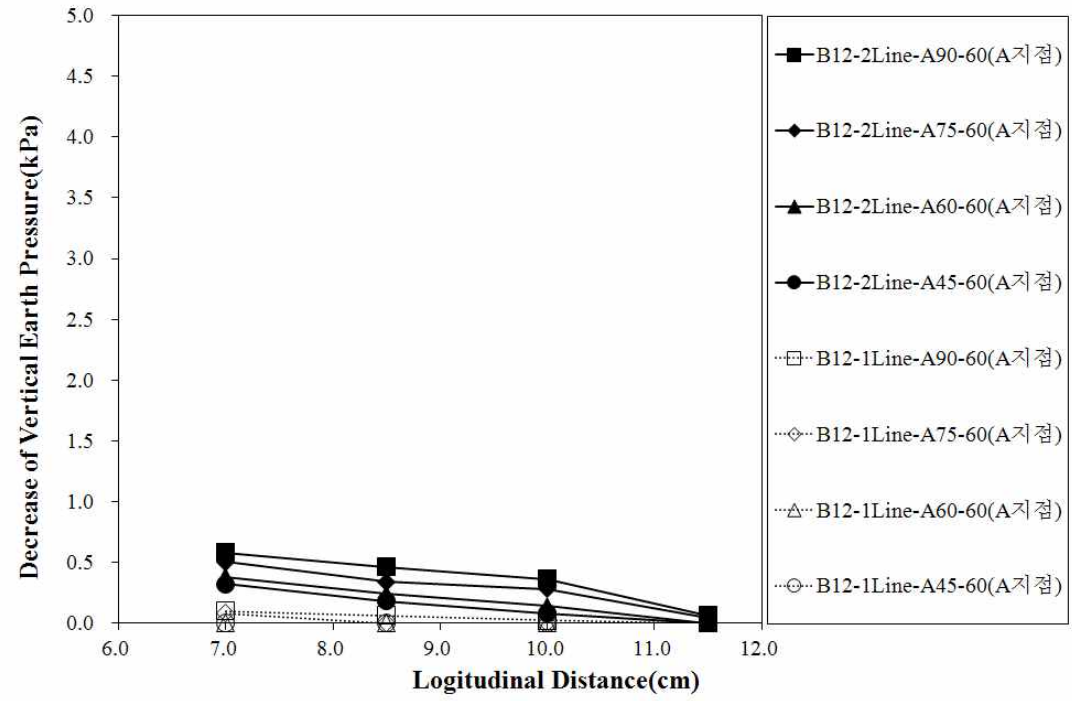


그림 3.195 토피고 60cm A지점에서 종방향 설치간격에 따른 연직토압 변화량

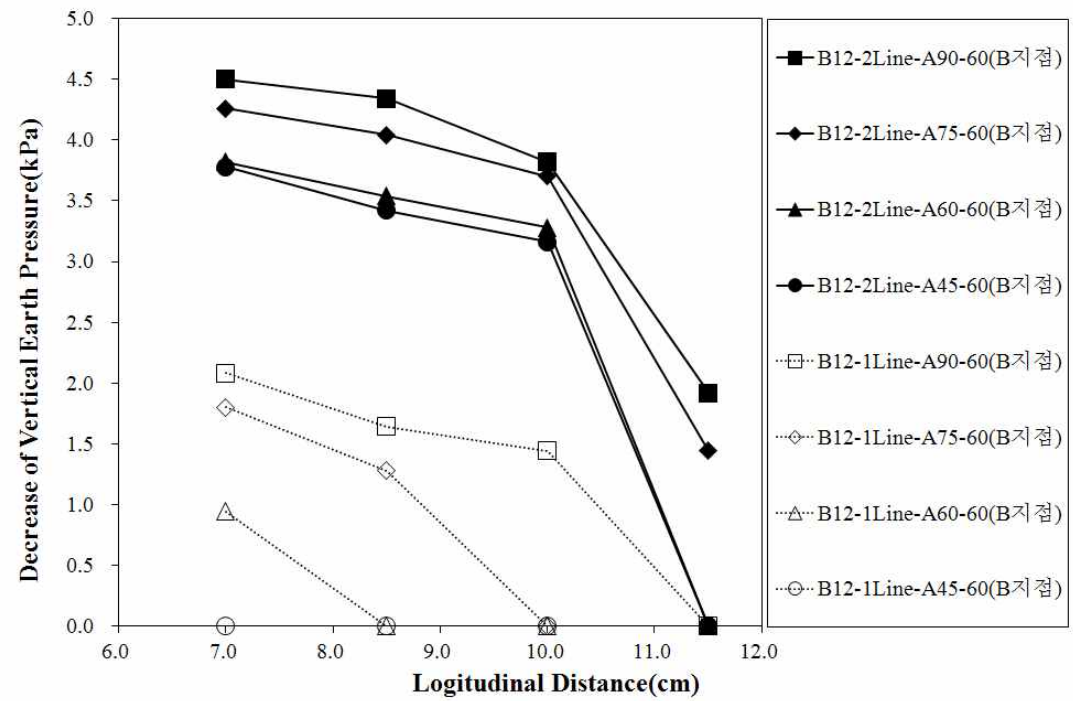


그림 3.196 토피고 60cm B지점에서 종방향 설치간격에 따른 연직토압 변화량

(2) 처짐량 변화

다음 그림은 모형볼트의 설치각도에 따른 최대 처짐 감소량을 모형볼트의 횡방향 1열 설치 시 시험결과와 횡방향 2열에 설치 시 시험결과로 구분하여 도시한 것이다.

시험case B12-L11.5-1Line-60의 보강효과가 상대적으로 우수한 것으로 나타났으며, 대체적으로 최대 처짐 감소량이 1.0mm 이하인 것으로 나타났다. 또한, 그림 3.66에서 보는 바와 같이 모형볼트의 설치각도가 75°에서 60°로 변화되는 경우에 처짐 감소량 변화가 가장 크게 발생하고 있으며, 설치각도가 90°에서 75°로 변화되는 경우 및 60°에서 45°로 변화하는 경우에는 상대적으로 처짐 감소량 변화가 작은 것으로 나타났다.

모형볼트 설치각도에 따른 최대 처짐 감소량을 분석한 결과 볼트의 설치각도는 90°에서 70° 도 범위인 경우에 최상의 보강효과가 나타나는 것으로 나타났으며, 볼트의 설치각도가 60° 이하인 경우에는 효과적인 보강효과가 나타나지 않을 것으로 판단되었다.

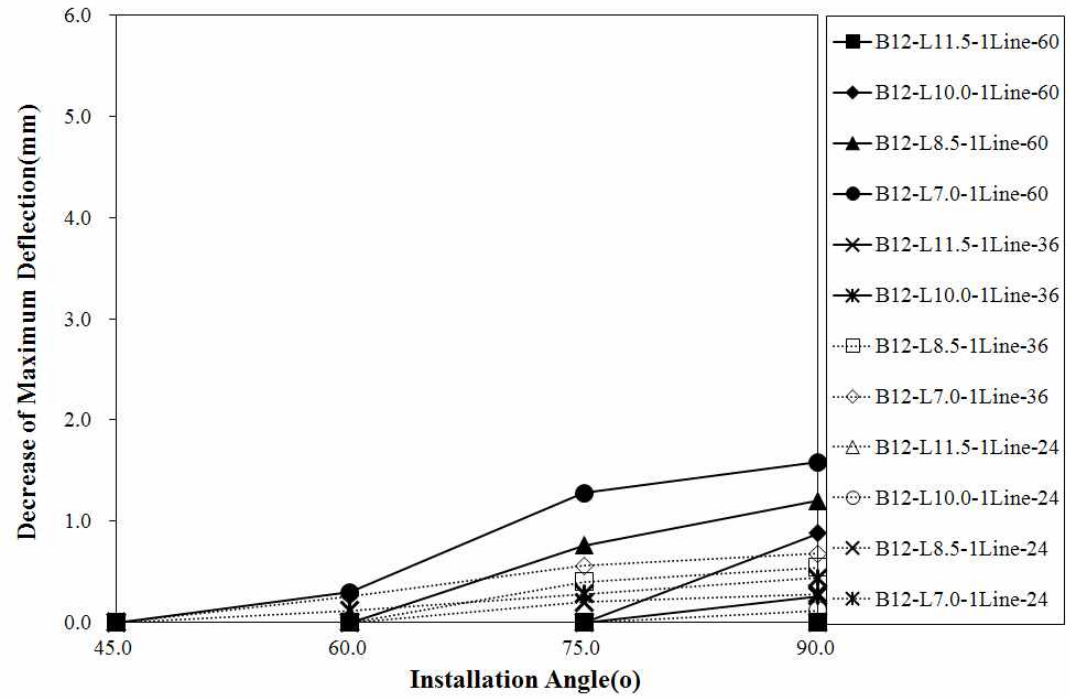


그림 3.197 모형볼트 횡방향 1열 설치 시 설치각도에 따른 처짐 감소량

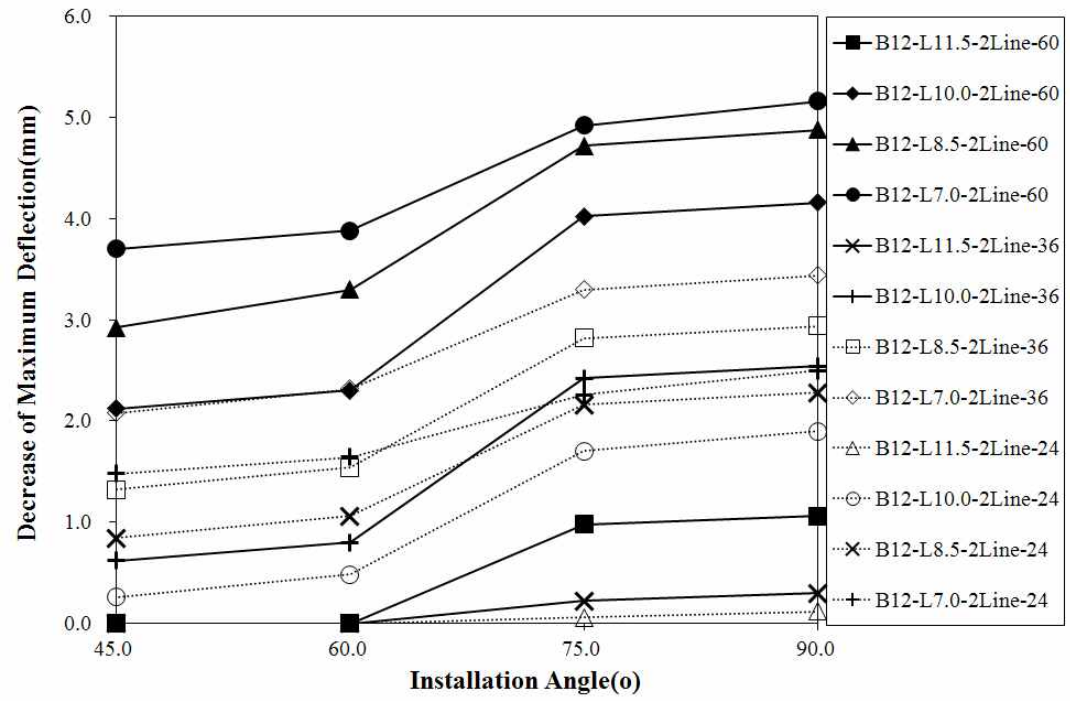


그림 3.198 모형볼트 횡방향 2열 설치 시 설치각도에 따른 처짐 감소량

(3) 이완하중 발생률

모형볼트를 설치한 실험에서 확인된 연직토압의 감소량은 모형지반의 변형에 따라 발생한

아칭효과에 의하여 모형볼트에 전이되어 있는 것으로 고려할 수 있으며, 실험지반의 변형에 의한 발생한 이완하중은 보강조건에 따라서 연직토압의 감소량이 상의한 것으로 나타났다.

변형 전 연직토압(σ_1, 초기 연직토압)에 대한 변형 후 하중(σ_2, 이완하중)의 크기는 이완하중 발생률로 다음 식과 같이 산정할 수 있으며, 이완하중 발생률이 작을수록 보강효과는 우수한 것으로 평가할 수 있다.

$$R(\%) = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \times 100$$

여기서, R : 이완하중 발생률

σ_1 : 변형 전 연직토압(초기 연직토압)

σ_2 : 변형 후 연직토압(이완하중)

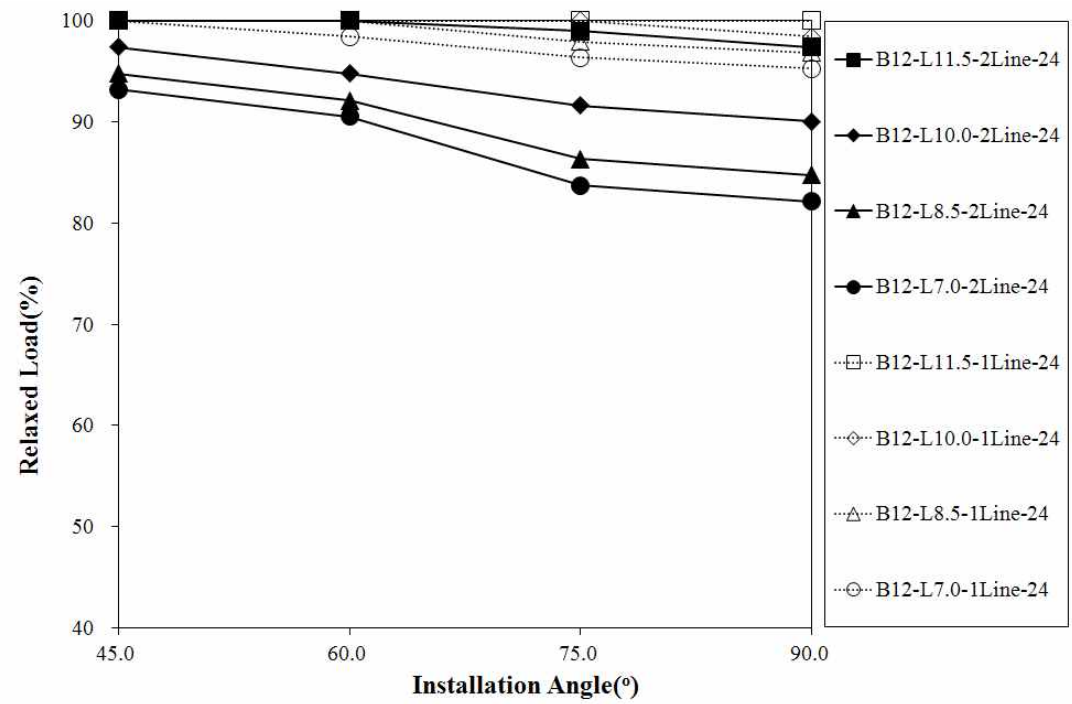


그림 3.199 토피고 24cm에서 모형볼트 설치각도에 따른 이완하중 발생률

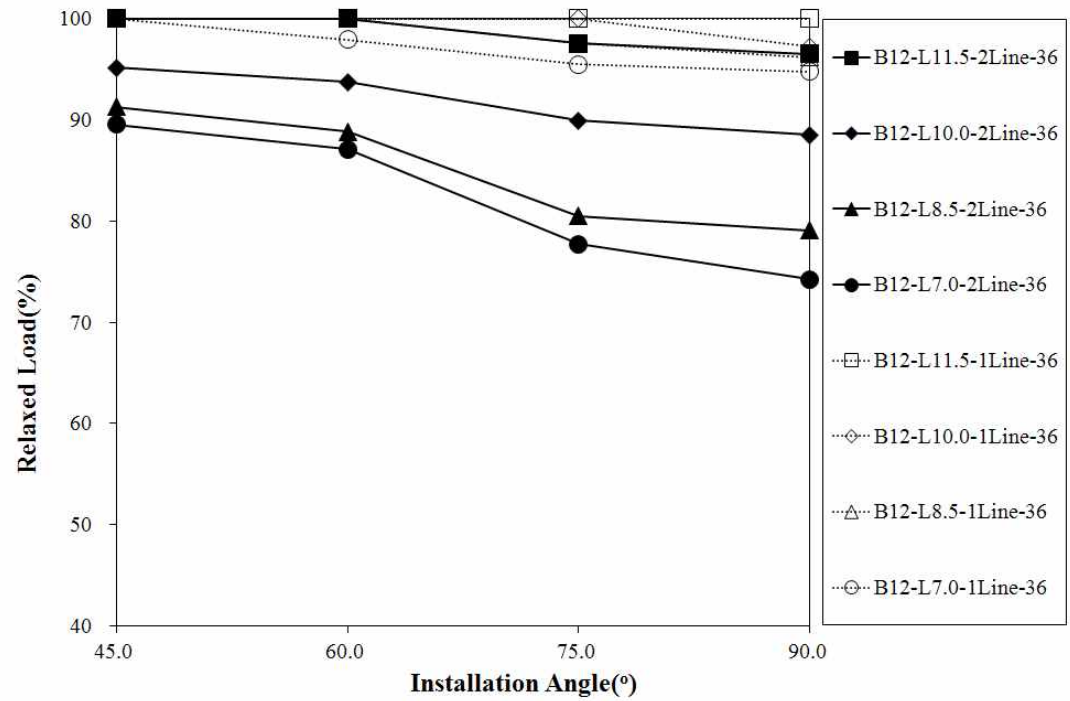


그림 3.200 토피고 36cm에서 모형볼트 설치각도에 따른 이완하중 발생률

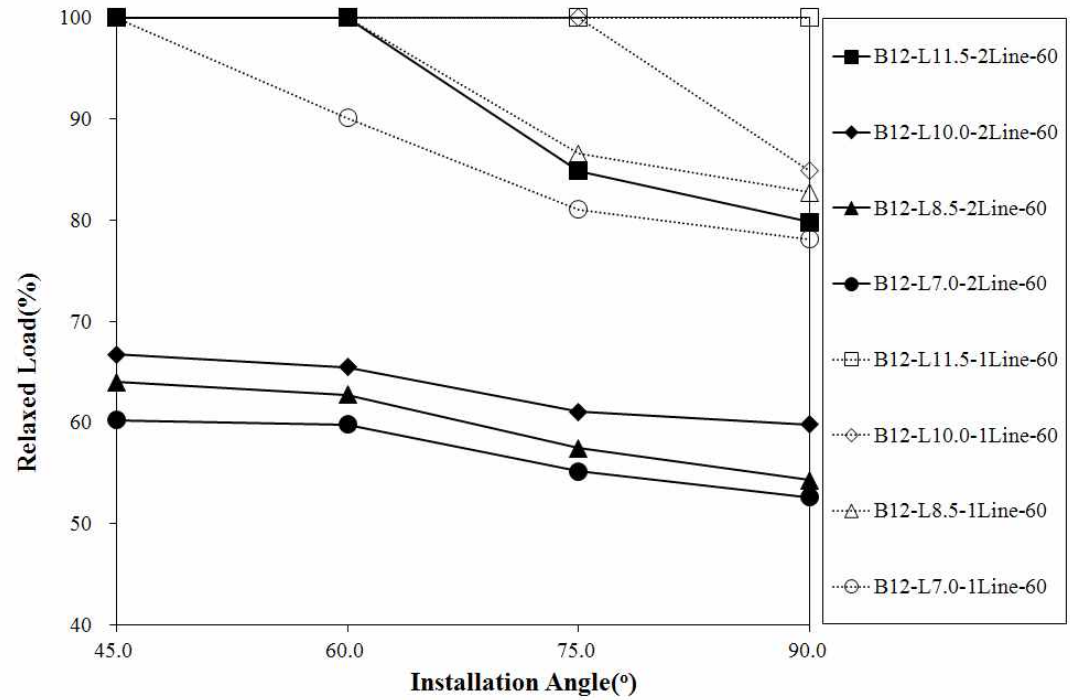


그림 3.201 토피고 60cm에서 모형볼트 설치각도에 따른 이완하중 발생률

횡방향 설치간격 20cm(1열 배열조건, 점선)에서 토피고가 36cm 및 24cm인 경우의 실험 Case에서는 이완하중 발생률이 95% 이상으로 나타나 모형볼트 보강효과가 미소하게 발생하

거나 보강효과가 없는 것으로 나타났으며, 토피고 60cm와 횡방향 1열 배열을 적용한 조건(점선)에서는 최소 이완하중 발생률이 77.8%로 2열 배열 조건(실선)에 비해서 보강효과가 작은 것으로 나타났다.

11.5cm의 종방향 설치간격을 적용한 경우에는 B12-L11.5-2Line-A90-60과 B12-L11.5-2Line-A75-60의 시험 Case를 제외하고 이완하중 발생률이 모두 95% 이상으로 보강효과가 매우 작은 것으로 나타났다. 또한, 설치각도에 따른 이완하중 발생률을 분석하면 설치각도 75~60도 사이의 이완하중 발생률 변화경향이 90~75도 및 60~45도 사이의 변화경향보다 크게 나타났다.

다음 그림은 모형볼트 1개당 부담하는 면적(모형볼트의 종방향 간격×횡방향 간격, ㎠)에 대한 이완하중 발생률을 도시한 것이다. 부담면적 115cm2(11.5×10.0cm)에서 인접한 부담면적인 140㎠(7.0×20.0cm) 및 100㎠(10.0×10.0cm)과 비교하여 이완하중이 크게 발생하여 보강효과가 상대적으로 작아지는 것으로 나타났다. 이 결과는 모형볼트의 종방향 설치간격이 넓어짐에 따라 모형볼트와 지반간의 아칭효과에 의한 원지반 아치(원지반 지지링) 두께의 감소에 의한 영향으로 판단되며, 모형볼트에 의한 보강효과 발현에서는 횡방향 원지반 아치 형성보다는 종방향 원지반 아치 형성이 더 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

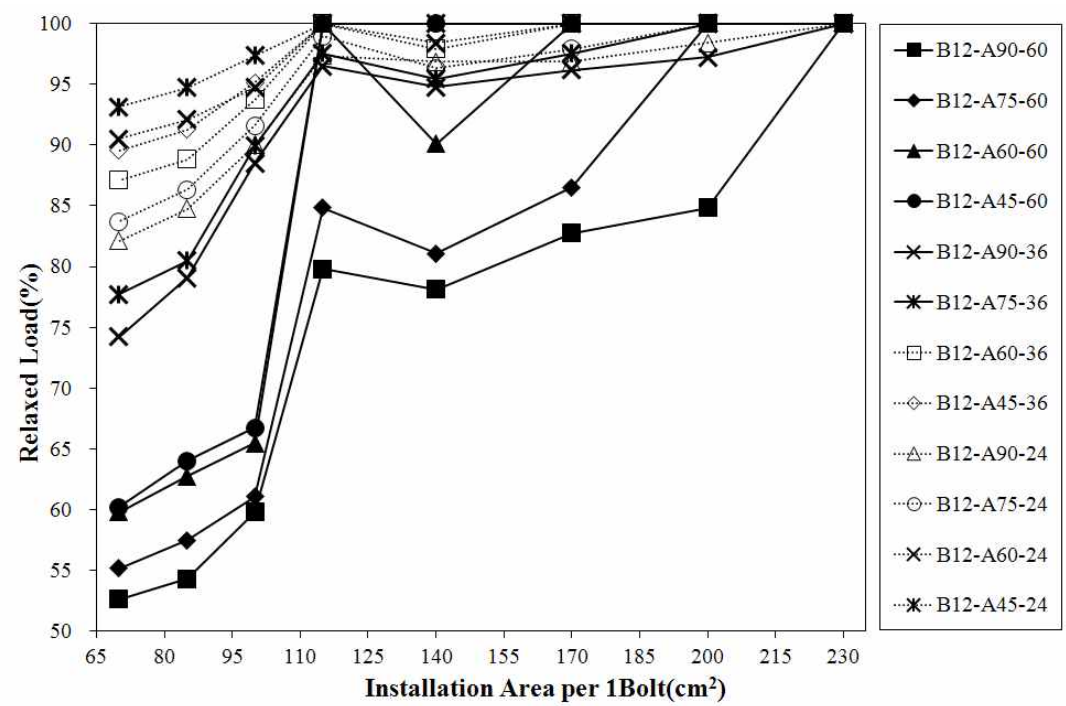


그림 3.202 모형볼트 1개당 부담면적에 따른 이완하중 발생률

(4) 설치각도에 따른 부담면적 감소율

B12-2Line-60의 시험에서의 설치각도에 대한 모형볼트 부담면적에 따른 이완하중 발생률은 다음 그림과 같으며, 각각의 설치각도에서 선형 방정식이 성립되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이 선형 방정식을 이용하여 B12-L10.0-2Line-A90-60 시험에서 나타난 이완하중 발생률이 발현되기 위한 모형볼트 1개 당 부담면적을 산정할 수 있으며, 산정결과는 다음 표와 같다.

표 3.161 설치각도에 따른 모형볼트 부담면적 감소율

구 분	설치각도(°)			
	90	75	60	45
부담면적 감소율(%)	0.00	5.55	29.95	32.53

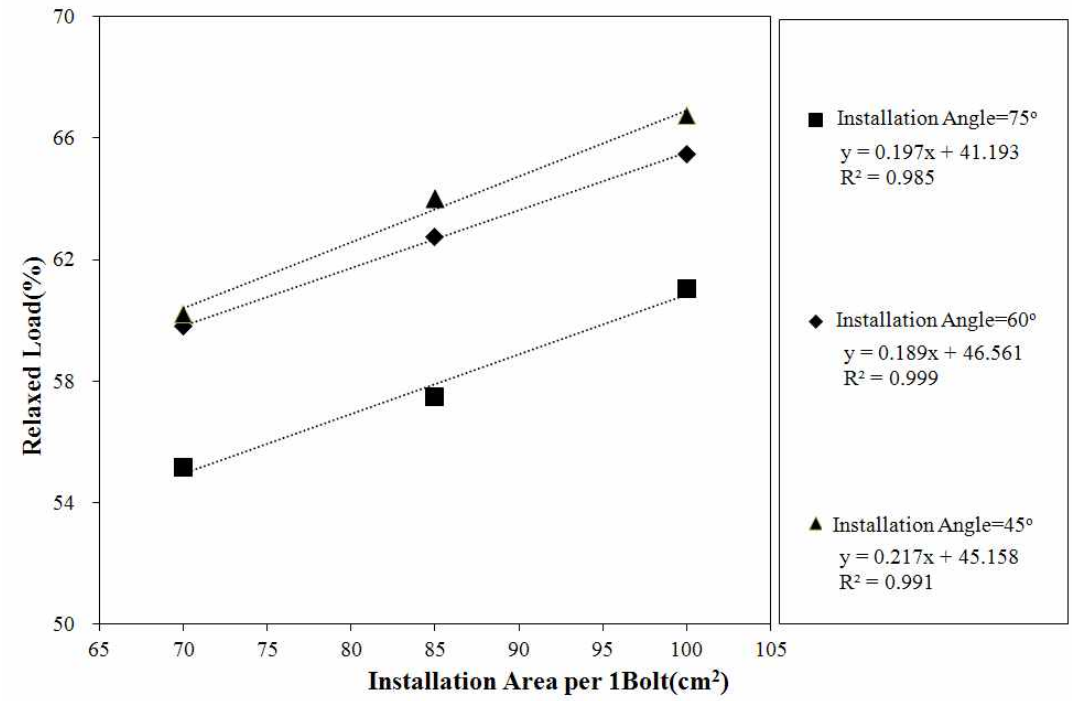


그림 3.203 모형볼트 부담면적 변화에 따른 이완하중 발생률

위 그림에서 나타난 것과 같이 B12-L10.0-2Line-A90-60 시험결과와 대비하여 비교적선형적 관계를 나타내는 것으로 확인되었으며, 이 관계를 통하여 구해지는 설치각도 변화에 따른 부담면적 감소율은 다음 식과 같다.

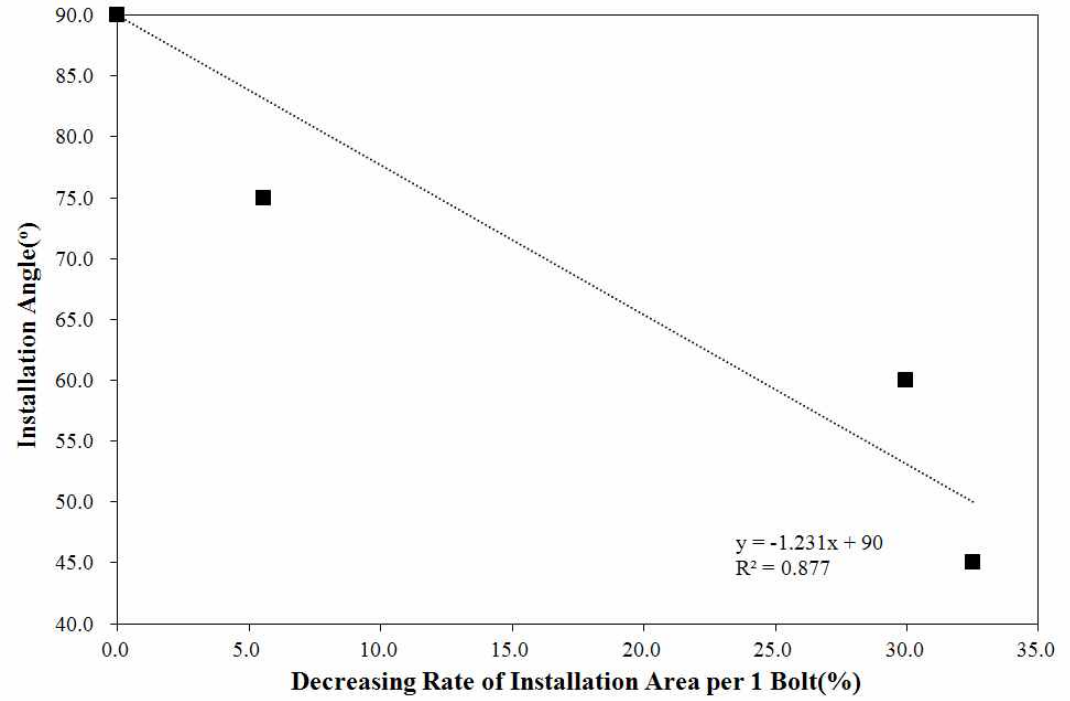


그림 3.204 모형볼트 부담면적 감소율에 따른 설치각도

$$A_{decrement}(\%) = 73.111 - 0.812 \times A$$

여기서, $A_{decrement}$: 볼트 부담면적 감소율(%)

A : 볼트의 설치각도(°)

(5) 정착길이 변화에 따른 모형시험결과

모형볼트 설치각도 90°에서 기준 설치간격(10×10cm)에 대한 보강효과에 대비하여 모형볼트 정착 길이가 증가된 경사볼트의 보강효과를 비교하기 위하여 수행하였으며, 모형볼트 정착 길이는 14cm 및 16cm로 증가시켰다. 모형시험의 변수는 모형볼트 정착 길이 12cm의 시험결과 분석을 통하여 모형볼트 설치에 의한 보강효과가 가장 크게 나타나는 토피고 60cm인 지반에서 실시하였으며, 모형시험의 변수는 모형볼트 설치각도 75°와 60°, 횡방향 설차간격은 10cm(2열)에 대하여 수행(12case)하였다.

모형볼트 정착 길이를 증가시킨 시험case(B16-2Line-60, B14-2Line- 60 및 B12-2Line-60)에 대하여 B지점에서 측정된 연직토압 감소량을 도시한 것이다. 연직토압의 감소량은 볼트의 정착 길이가 증가 할수록 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 볼트의 정착 길이가 16cm(33.3% 증가)인 경우에 B16-L10.0-2Line-A75-60(감소량=4.02kPa) 및 B16-L10.0-2Line-

A60-60(감소량=3.84kPa)의 시험에서 기준 시험인 B12-L10.0-2Line-A90-60(감소량=3.82kPa)의 연직토압 감소량보다 더 큰 연직토압 감소량이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, B16-2Line-A75-60과 B16-2Line-A60-60의 시험결과에서는 비교대상인 시험case(B12-2Line-60)와는 상이하게 종방향 설치간격 10.0cm과 8.5cm간의 연직토압 감소량의 차이가 상대적으로 작게 나타났다.

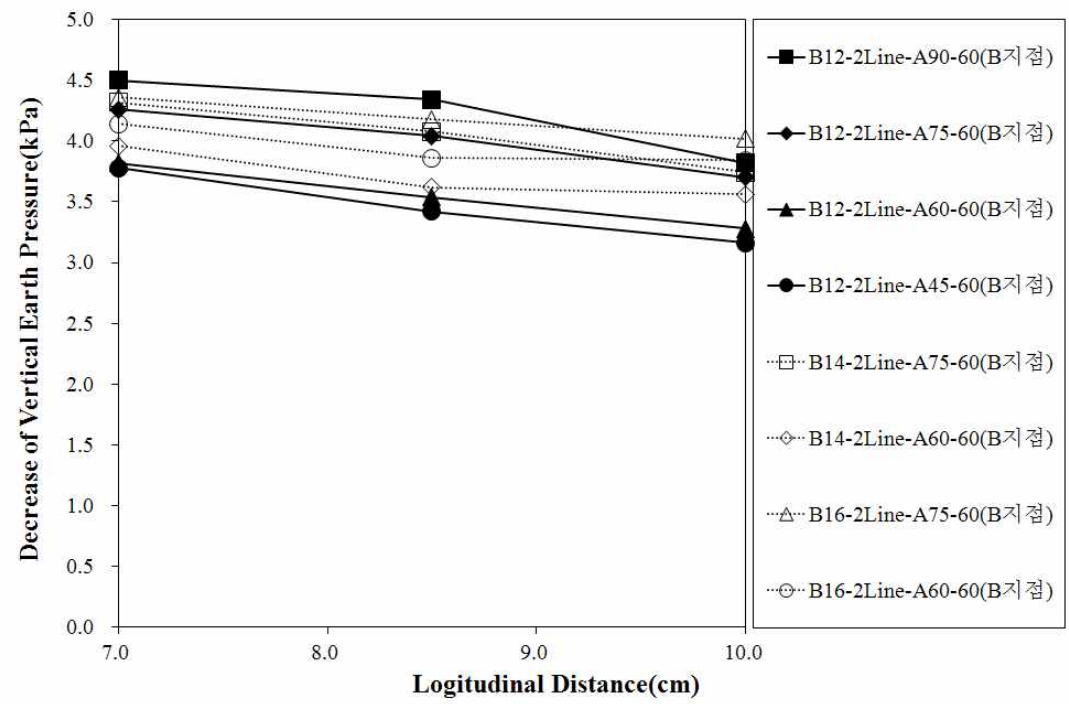


그림 3.205 종방향 설치간격에 따른 B지점의 연직토압의 변화량

다음 그림은 모형볼트 정착 길이를 14cm(16.7% 증가)로 증가시킨 시험case(B14- 2Line-60) 및 모형볼트 정착 길이를 16cm로 증가시킨 시험case(B16-2Line-60)에 대한최대 침하 감소량을 도시한 것이다. 모형볼트 정착 길이의 증가에 따라 최대 침하 감소량은 발생경향은 유사하게 증가하는 것으로 나타났으나, 상대적으로 설치각도가 75°에 종향향 설치간격이 7.0cm인 B14-L7.0-2Line-A75-60 및 B16-L7.0-2Line-A75-60에서는 다소 작게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 B16-L10.0-2Line-A75-60의 1개의 시험에서만 침하 감소량은 4.26mm로서 기준 시험인 B12- L10.0-2Line-A90-60의 침하 감소량(4.16mm)보다 0.1mm 더 증가한 것으로 나타났다.

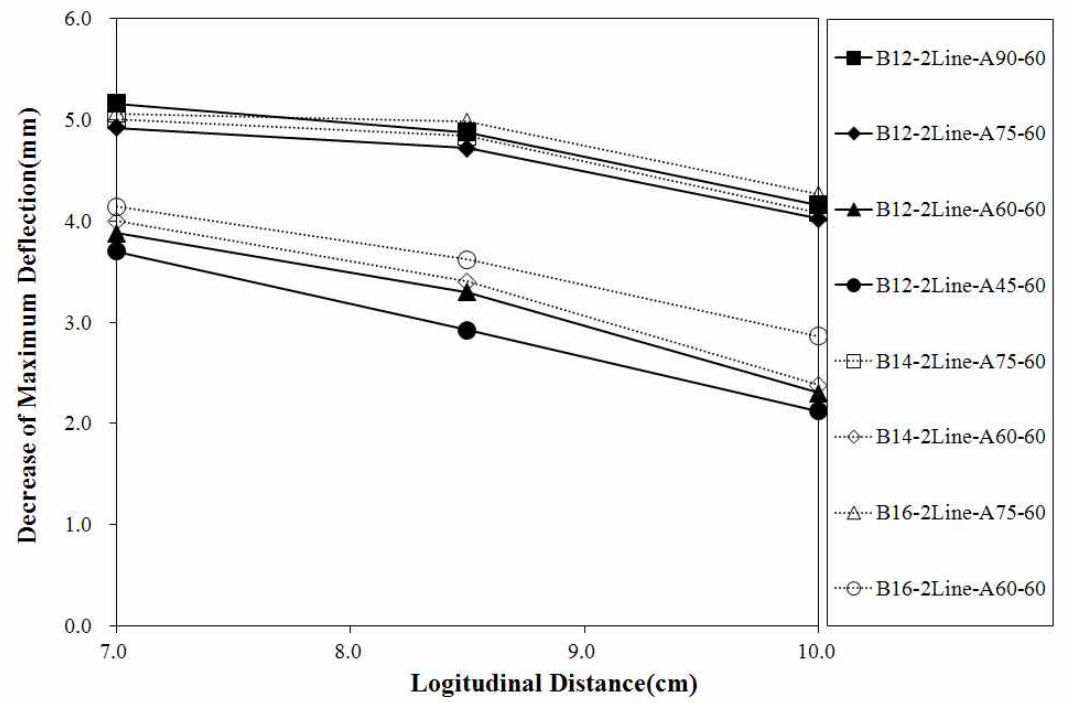


그림 3.206 종방향 설치간격에 따른 최대 침하량 감소량

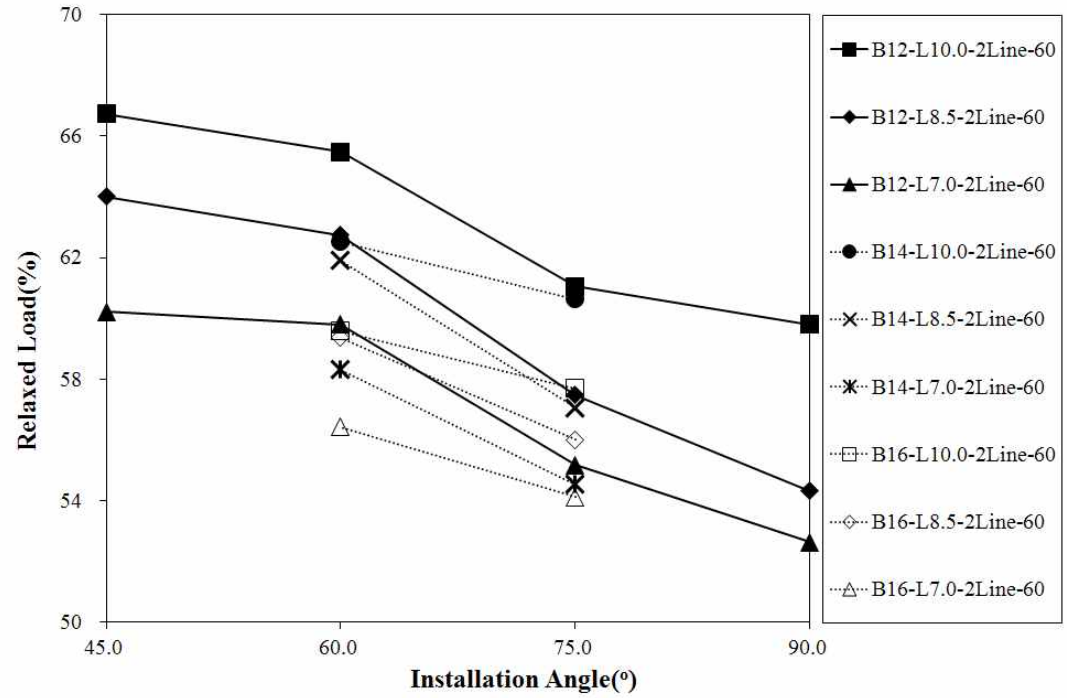


그림 3.207 설치각도에 따른 이완하중 발생률

모형볼트 정착 길이를 증가시킨 시험case(B14-2Line-60 및 B16- 2Line-60)에 대한 이완하중 발생률을 도시한 결과 최대 침하 감소량과 동일하게 B14-L7.0- 2Line-A75-60 및

B16-L7.0-2Line-A75-60의 시험에서 이완하중 발생율이 다른 시험결과와 상이하게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 B16-L10.0- 2Line-A75-60(이완하중 발생율=57.7%) 및 B16-L10.0-2Line-A60- 60(이완하중 발생율=59.6%)기준 시험인 B12-L10.0-2Line-A90-60(이완하중 발생율=59.8%)의 이완하중 발생율 보다 작게 나타나 보강효과가 더 큰 것으로 나타났다.

(6) 정착길이 변화에 대한 제안식

위 결과를 토대로 설치각도 75°(L10.0-2Line-A75-60) 및 60°(L10.0-2Line-A60 -60)에서의 이완하중 발생률을 모형볼트 정착 길이에 대하여 다음 그림과 같이 도시할 수 있으며, 모형볼트 설치각도에 따라 이완하중 발생률과 볼트 정착 길이는 선형 방정식으로 표현할 수 있다. 이 선형 방정식을 이용하여 B12-L10.0-2Line- A90-60의 시험결과와 동일한 이완하중 발생률이 발현되기 위한 설치각도별 모형볼트 정착 길이를 산정한 결과 설치각도 75°에서는 14.2cm, 60°에서는 15.9cm인 것으로 나타났다.

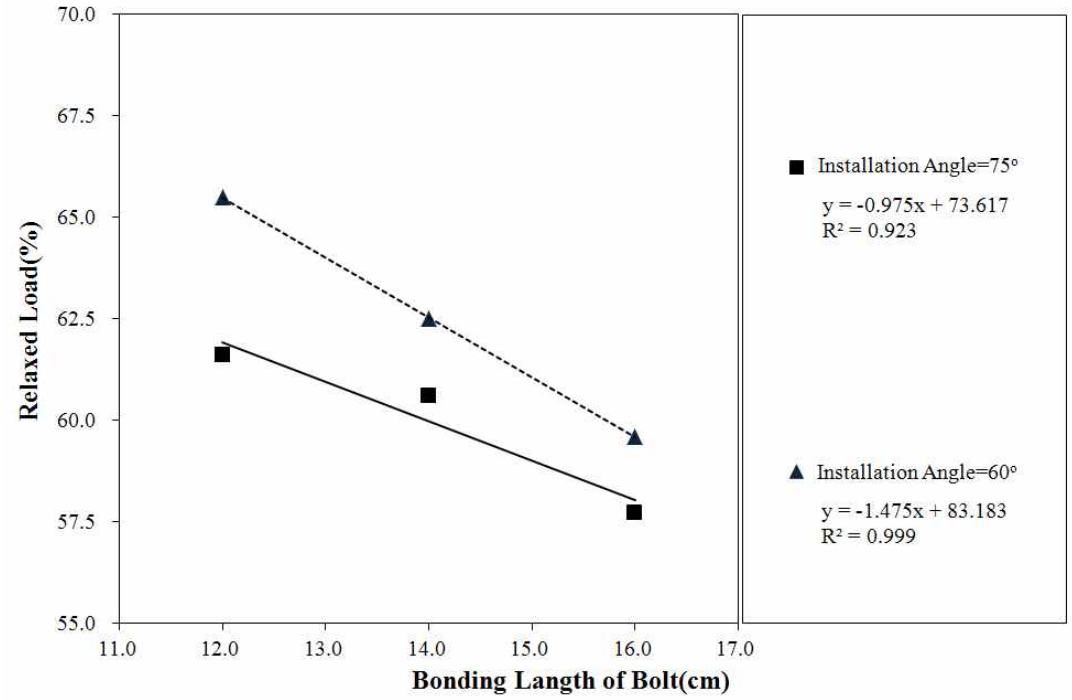


그림 3.208 모형볼트 정착 길이 변화에 따른 이완하중 발생률

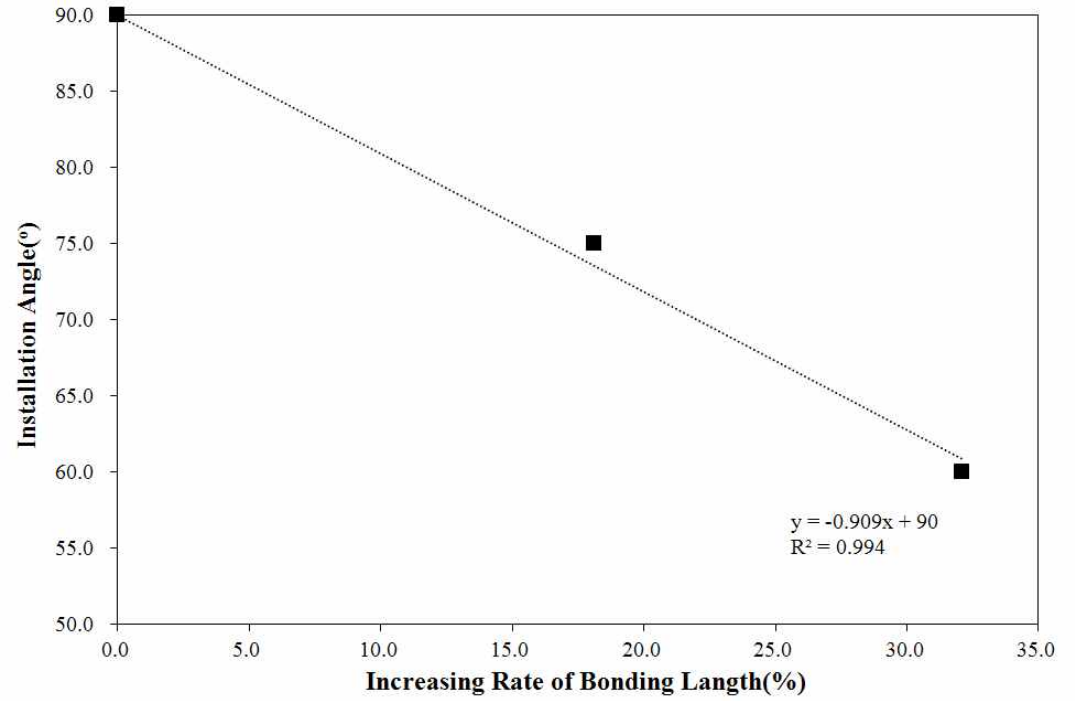


그림 3.209 볼트 장착 길이 증가율에 대한 설치각도

B12-L10.0-2Line-A90-60의 시험결과와 대비하여 모형볼트의 정착 길이증가율에 대한 설치각도 변화를 도시한 결과 선형적 관계를 나타내는 것으로 확인되었으며, 설치각도에 따른 볼트 길이는 다음 식과 같이 산정된다.

$$B_{increment}(\%) = 100.245 - 1.114 \times A$$

여기서, $B_{increment}$: 볼트의 정착 길이 증가량(%)

5. 모형시험 결과 검증을 위한 2차원 수치해석

가. 모형시험의 보강지반 변형계수 산정

모형시험은 모형볼트에 의하여 보강되는 지반 및 숏트리트를 모형화한 강판이 합성보로서 역할을 수행하는 것으로 고려하였다. 단순보의 최대 처짐량은 등분포 하중이 제하되는 경우 다음 식을 이용하여 계산될 수 있다.

$$\delta_{\max} = \frac{5 \times w \times l^4}{384 \times E \times I}$$

여기서, $\delta_{\max}$: 최대 처짐량

w : 등분포하중

l : 단순보의 지간거리

E : 보의 탄성계수

I : 보의 단면이차 모멘트

강판 상부 12cm지점까지를 합성보 부재로 고려하고 모형지반 및 강판의 자중이 등분포 하중으로 작용하는 것으로 가정하는 경우, 변형계수는 다음 식으로 산정된다.

$$E_{com} = \frac{5 \times w_{test} \times l^4}{384 \times \delta_{test} \times I_{com}}$$

여기서, δ_{test} : 각 모형시험에서 최대 침하량

w_{test} : 각 모형시험 변수에 의한 자중

E_{com} : 합성보의 변형계수

I_{com} : 합성보의 단면이차모멘트

B12-L10.0-2Line-A90-60 시험에 대하여 산정된 변형계수를 기준 변형계수로 하여 B12-2Line-60 시험에서의 설치각도에 대한 변형계수 증가율을 도시하면 그림 3.79와 같다. 종방향 설치간격이 11.5cm에서의 변형계수 증가율은 설치각도가 45°에서 90°로 변화되는 경우에 4.1%의 증가량이 발생하는 것으로 모형볼트의 보강효과가 매우 작게 나타나는 것으로 나났다.

보강효과가 작게 발생한 종방향 설치간격이 11.5cm의 시험 결과를 제외하면, 각 설치각도에서 종방향 설치간격(부담면적)에 따라 변형계수 증가율은 선형적인 관계를 나타낸다.

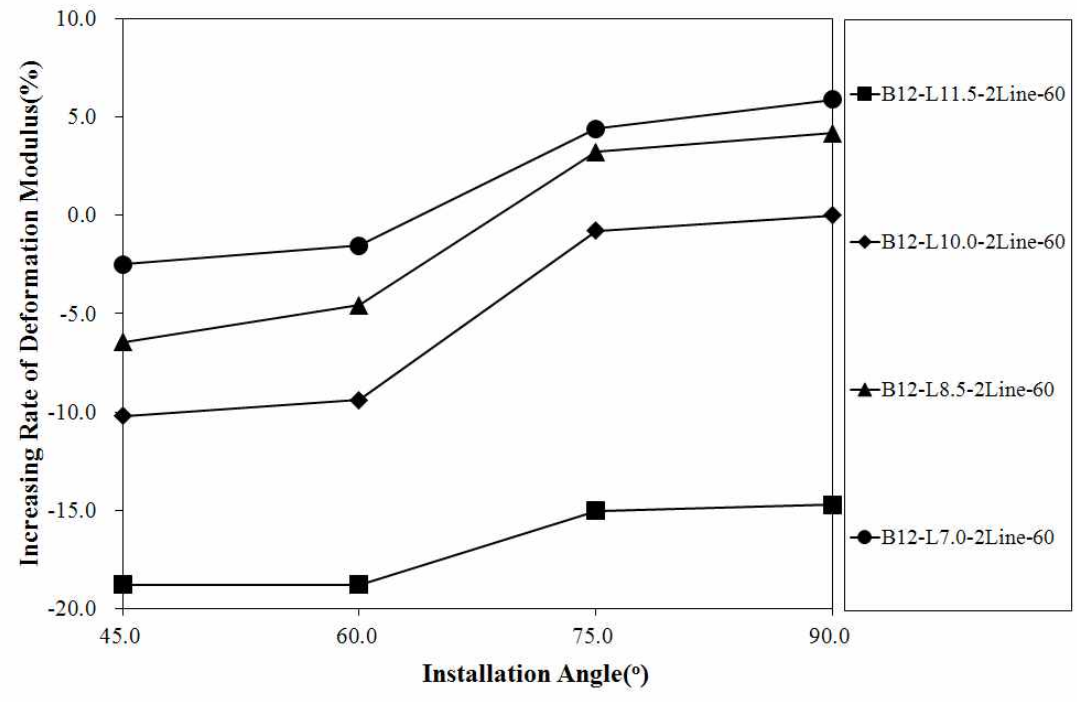


그림 3.210 토피고 60cm에서 설치각도에 따른 변형계수 증가율

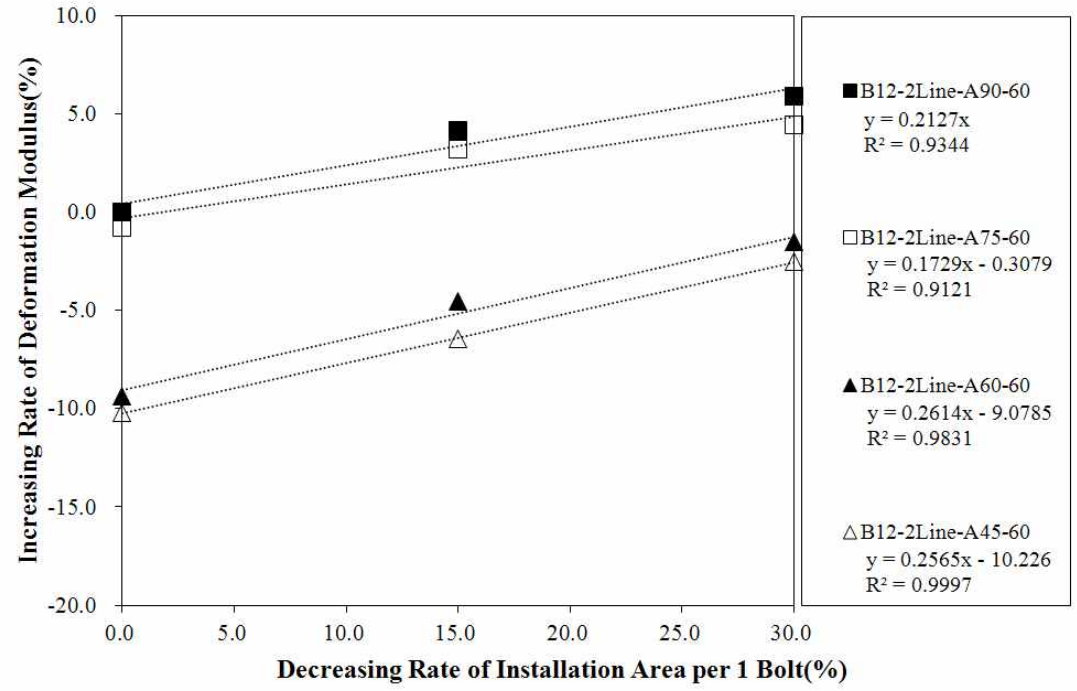


그림 3.211 부담면적(종방향 간격) 감소율에 따른 변형계수 증가율

나. 2차원 수치해석 개요 및 방법

(1) 수치해석 개요

2차원 수치해석은 본 연구에서 수행된 모형시험 결과를 토대로 제안된 변형계수 증가량을 이용한 수치해석을 수행하였다. 이 연구에서는 한국도로공사에서 제시한 2차선 도로터널의 표준지보패턴 및 RMR 분류에 의한 굴착 및 지보패턴(도로설계편람 제6편 터널, 2010)을 참조하여 터널의 천단 및 측면에 시스템 볼팅이 적용되는 표준 지보패턴 3, 4 및 5타입을 선정하였다. 각 표준 지보패턴에서 록볼트 설치각도는 4 케이스인 90°, 75°, 60° 및 45°로 변화하여 적용하다.

(2) 수치해석 방법

록볼트는 통상적으로 터널 굴착 횡단면의 수직방향(90°)으로 설치된다. 수치해석에서는 각 표준 지보패턴에서 통상적인 록볼트 설치 기준에 대한 2차원 수치해석을 수행한 후, 록볼트를 모형화 하지 않은 수치해석 모델에 대하여 시행착오법(Trial and Error)으로 동일한 보강효과가 발현되는 변형계수를 산정한다. 이후 설치각도 변화에 따른 변형계수를 적용한 수치해석을 수행하였다. 상세한 수치해석 과정, 적용한 해석 단면 모식도 및 수치해석 순서는 다음 그림과 같다.

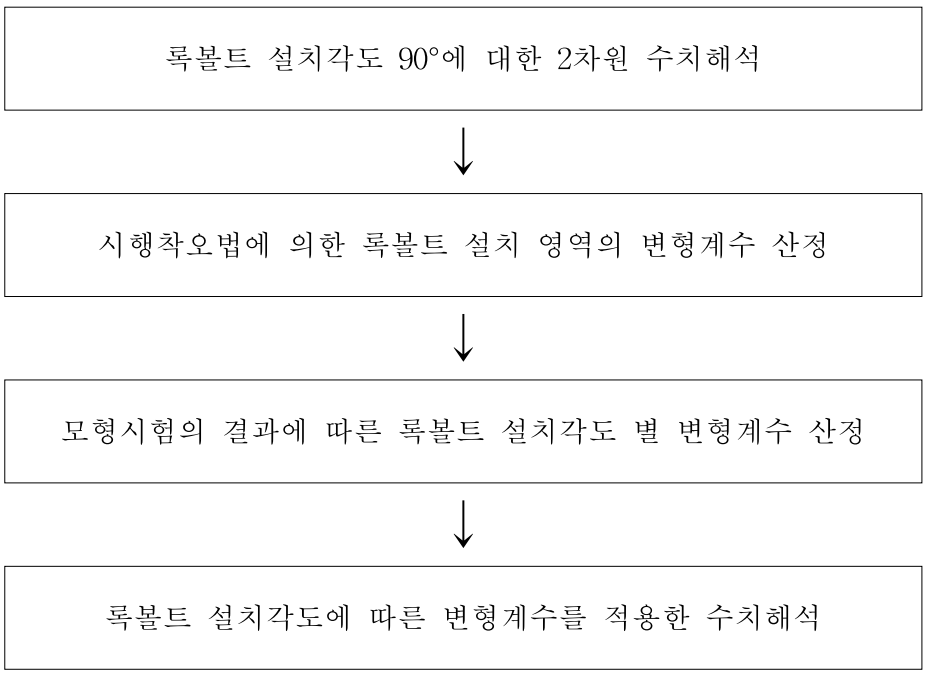


그림 3.212 2차원 수치해석 과정

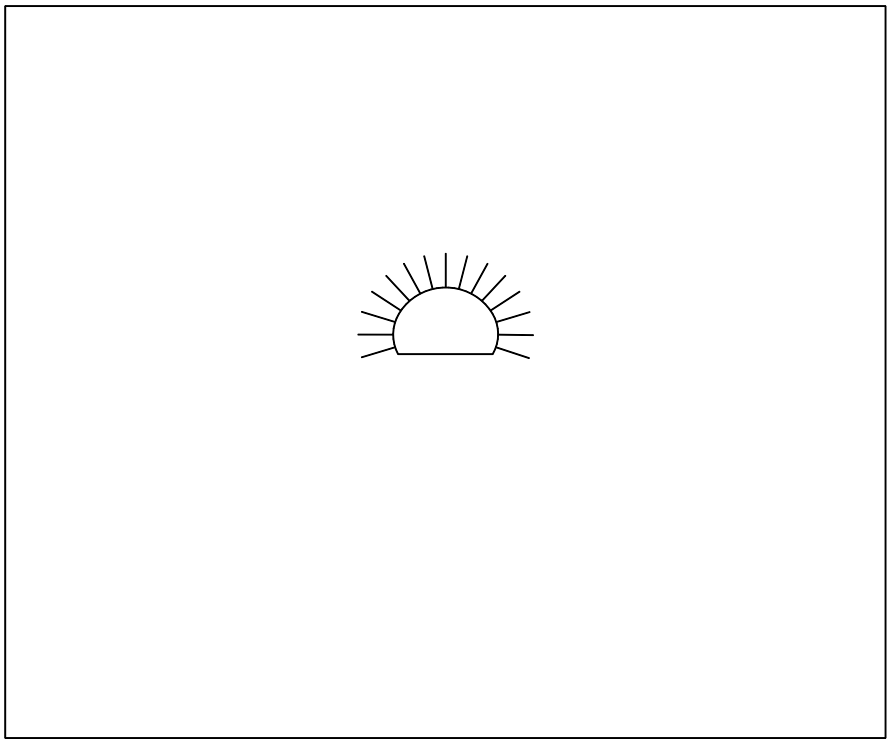


그림 3.213 록볼트 모형화에 대한 2차원 수치해석 단면 모식도

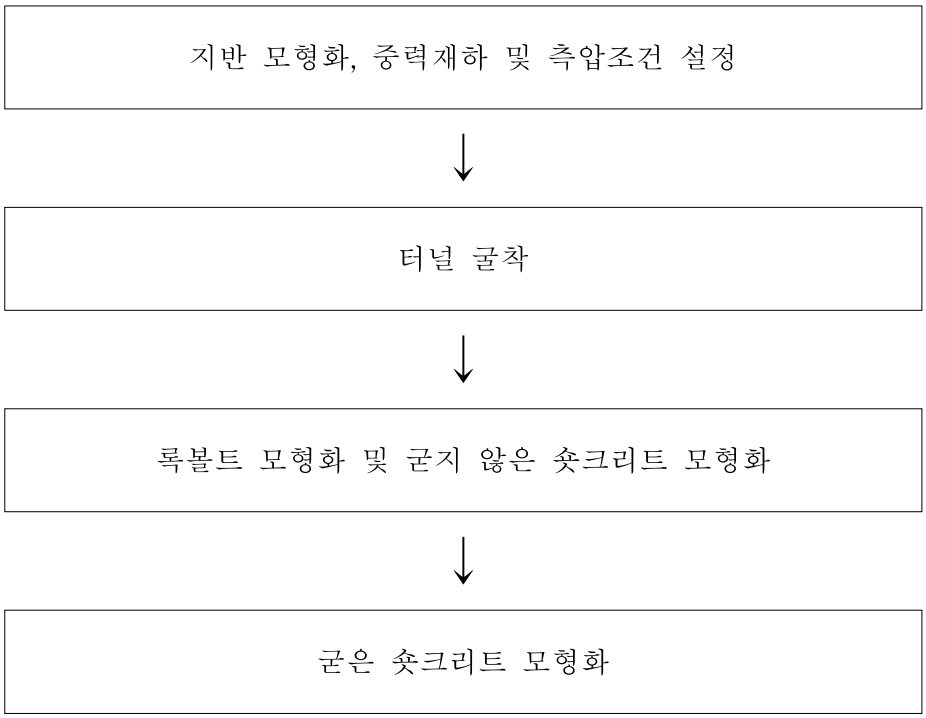


그림 3.214 록볼트 모형화한 경우에 대한 2차원 수치해석 순서

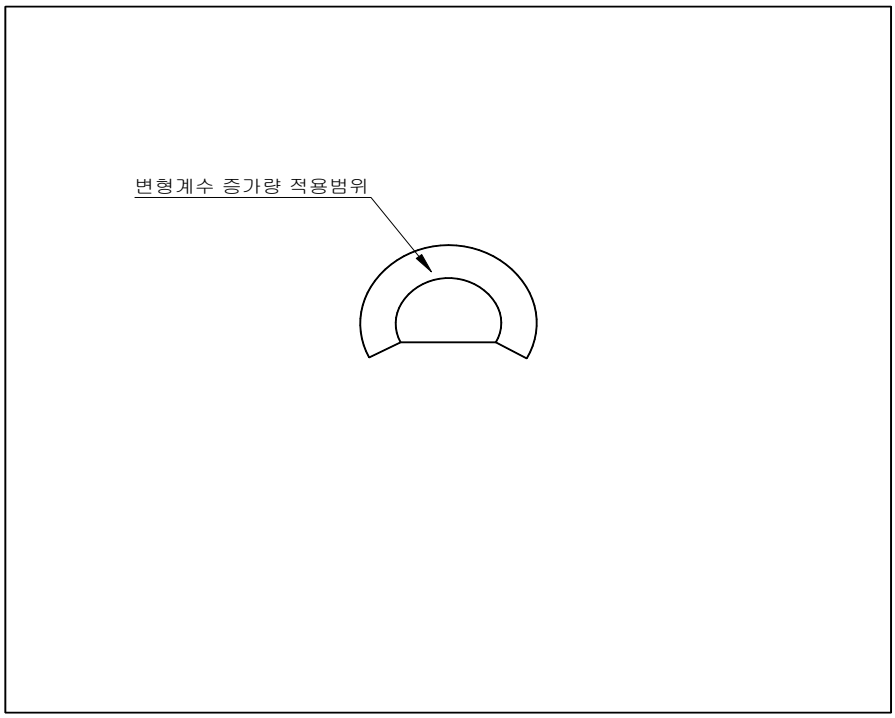


그림 3.215 록볼트와 숏크리트를 모형화 하지 않은 경우에 대한
2차원 수치해석 단면 모식도

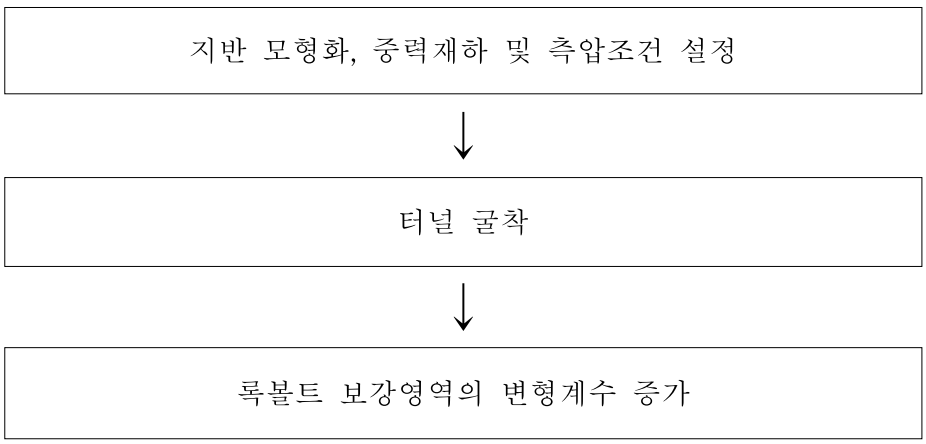


그림 3.216 록볼트와 숏크리트를 모형화 하지 않은 경우에 대한 2차원 수치해석 순서

(3) 단면 및 적용 물성값

해석영역을 지반의 경계가 해석결과에 영향을 미치지 않도록 터널좌우 및 하부는 4.5D(D : 환산직경) 이상으로 지정하였다. 선정한 표준 지보패턴 3, 4 및 5타입에 대하여 각각 토피고는 3D, 2D 및 1D로 선정하였다.

각 지보패턴에 대한 대상지반은 각 지보패턴에 따른 암반분류에 따라 3타입은 연암, 4타입은 풍화암 및 5타입은 풍화암 및 풍화토로 가정하였으며, 각 지반에 따른 물성값은 도로설계편람 제6편 터널(2010)에 제시된 국내 터널실적에 의한 암반의 대표 물성값을 참조하여 다음 결정하였다.

표 3.162 표준지보패턴 3타입 및 적용 지보패턴

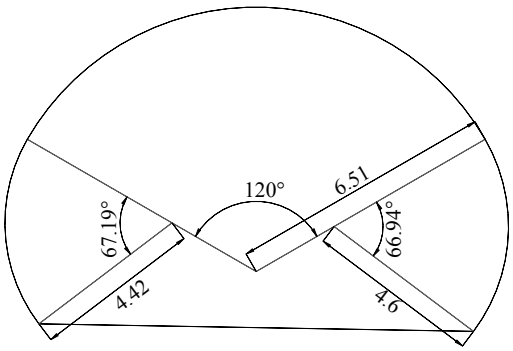
굴착		전단면	표준단면
굴진장(m)		2.0	
록볼트	설치개수(ea)	15~16	
	설치길이(m)	4.0	
	종방향 CTC(m)	2.0	
	횡방향 CTC(m)	1.5	
숏크리트두께(m)		0.08	

표 3.163 표준지보패턴 4타입 및 적용 지보패턴

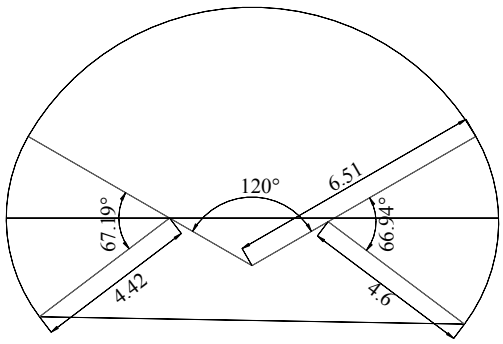
굴착		상, 하반 분활	표준단면
굴진장(m)		1.5	
록볼트	설치개수(ea)	15~16	
	설치길이(m)	4.0	
	종방향 CTC(m)	1.5	
	횡방향 CTC(m)	1.5	
숏크리트두께(m)		0.12	

표 3.164 표준지보패턴 5타입 및 적용 지보패턴

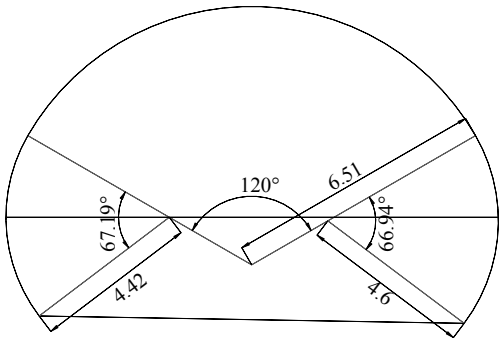
굴착		상, 하반 분할	표준단면
굴진장(m)		1.2	
록볼트	설치개수(ea)	15~16	
	설치길이(m)	4.0	
	종방향 CTC(m)	1.2	
	횡방향 CTC(m)	1.5	
숏크리트두께(m)		0.16	

표 3.165 지보패턴에 따른 지반 물성값

구 분	단위중량 (kN/m^3)	점착절편 (kPa)	내부마찰각 (°)	변형계수 (MPa)	포아송비 (ν)	측압계수 (K_0)
TYPE 3	25.0	700	45.0	500	0.23	1.0
TYPE 4	23.0	300	40.0	250	0.25	1.0
TYPE 5	21.0	100	35.0	100	0.30	1.0

표 3.166 숏크리트 물성값

구 분	단위중량 (kN/m^3)	변형계수 (kPa)	포아송비 (ν)
굳지 않은	24.0	15,000,000	0.2
굳은	24.0	5,000,000	0.2

표 3.167 록볼트 물성값

구 분	단위중량 (kN/m^3)	변형계수 (kPa)	포아송비 (ν)
SD25 D25	78.5	210,000,000	0.3

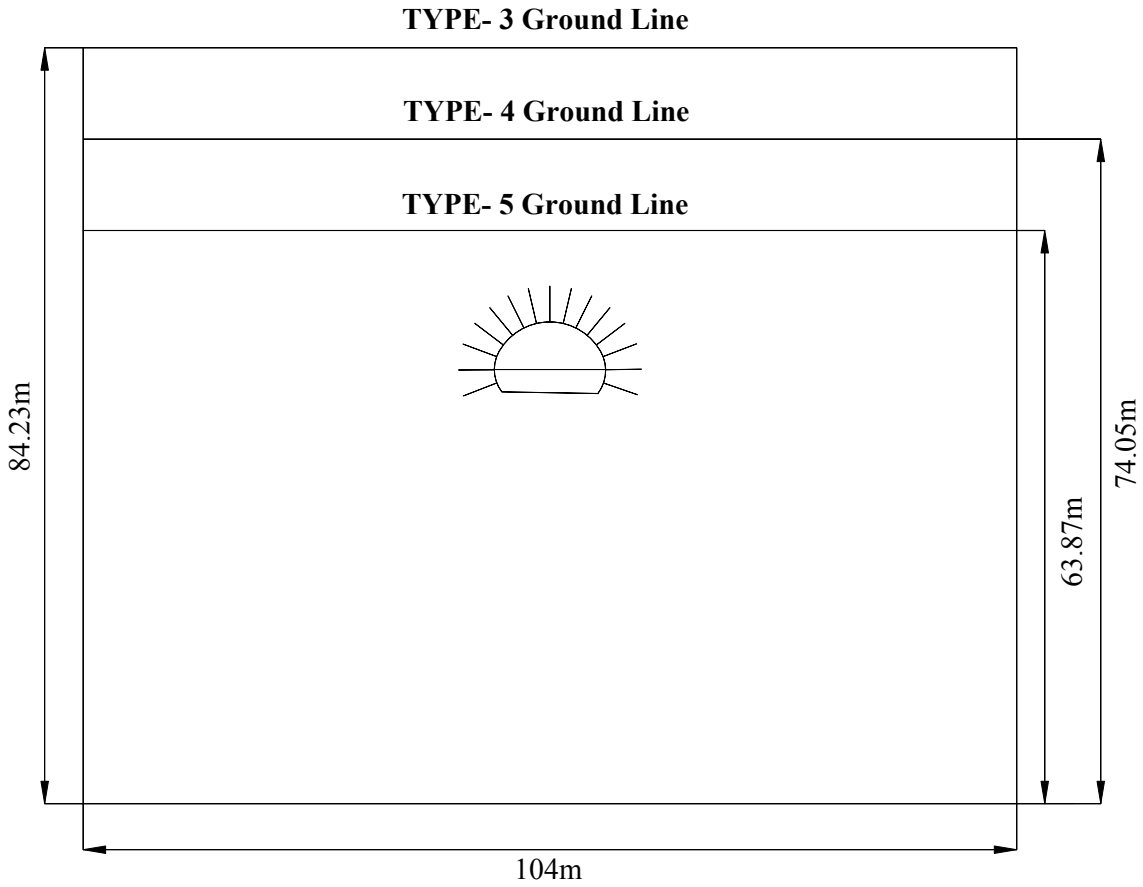


그림 3.217 표준 지보패턴에 대한 2차원 해석 단면

표 3.168 지보패턴에 따른 하중분담율

구 분	굴착	굳지않은 숏크리트	굳은 숏크리트
TYPE 3	50%	25%	25%
TYPE 4	40%	30%	30%
TYPE 5	40%	30%	30%

(4) 터널 지보재 모형화 방법

일반적으로 터널 지보재로 사용되는 록볼트, 숏크리트 등을 수치해석에서 모형화 하는 방법은 연속체 요소로 모형화하는 방법, 구조부재로 모형화하는 방법 및 주변 지반을 공학적 특성을 변화시키는 방법이 있다. 2차원 수치해석에서는 록볼트와 숏크리트를 구조부재로 모형화하는 지보재 모형화 방법과 록볼트와 숏크리트의 설치효과를 주변 지반의 공학적 특성 변

화로 지보재를 모형하는 방법을 같이 사용하였다.

다. 2차원 수치해석 결과

(1) 록볼트 설치각도 90°에 대한 수치해석 결과

표준 지보패턴 3, 4 및 5타입에 해당하는 지보재 설치제원에 따라 2차원 수치해석을 수행하였다. 각각의 지보패턴에서 록볼트를 모형화 한 경우와 모형화 하지 않은 경우로 구분하였으며, 록볼트 모형화 유/무에 따른 터널의 거동 및 숏크리트 부재력 변화를 살펴보았다.

전단면 굴착인 지보패턴 3타입에서 록볼트 모형화 유/무에 따른 천단 침하량 발생량은 굳은 숏크리트를 모형화한 수치해석 단계에서 록볼트를 모형화 하지 않은 경우에 0.13mm 더 발생하는 것으로 나타났으며, 숏크리트 응력은 굳은 숏크리트를 모형화한 수치해석 단계에서 5.64MPa로 록볼트를 모형화 하지 않은 경우와 비교하여 0.03MPa 더 작게 발생하는 것으로 나타났다.

터널의 굴착방법이 상반 및 하반 분할굴착인 지보패턴 4, 5타입에서 록볼트 모형화 유/무에 따른 최대 천단 침하량은 상반 굴착 후 굳은 숏크리트 모형화되는 수치해석 단계에서 발생하는 것으로 나타났으며, 록볼트 모형화 유/무에 따른 최대 천단 침하량의 차이는 0.26mm 및 0.28mm인 것으로 나타났다. 숏크리트 응력의 최대값은 4타입에서는 상반 굴착 후 굳은 숏크리트 모형화되는 수치해석 단계에서 발생하였고 5타입에서는 최종 수치해석 단계에서 발생하고 있으며, 각 지보패턴에서의 차이는 0.04MPa 및 0.37MPa인 것으로 나타났다.

표 3.169 지보패턴 3타입에서 록볼트 모형화 유/무에 따른 수치해석결과

구 분		천단 침하량 (mm)	숏크리트 응력 (MPa)	록볼트 축력 (kN)
록볼트 모형화	굴착	6.94	-	-
	굳지 않은 숏크리트+록볼트	10.04	2.49	19.36
	굳은 숏크리트	13.00	5.64	37.69
록볼트 미 모형화	굴착	6.94	-	-
	굳지 않은 숏크리트	10.10	2.51	-
	굳은 숏크리트	13.13	5.67	-

표 3.170 지보패턴 4타입에서 록볼트 모형화 유/무에 따른 수치해석결과

구 분		천단침하량 (mm)	숏크리트 응력 (MPa)	록볼트 축력 (kN)
록볼트 모형화	상반 굴착	7.65	-	-
	굳지 않은 숏크리트+록볼트	12.06	3.15	28.75
	굳은 숏크리트	16.20	6.81	55.42
	하반 굴착	15.81	4.90	56.46
	굳지 않은 숏크리트+록볼트	15.18	5.30	58.40
	굳은 숏크리트	14.75	5.97	74.28
록볼트 미 모형화	상반 굴착	7.65	-	-
	굳지 않은 숏크리트	12.18	3.17	-
	굳은 숏크리트	16.46	6.85	-
	하반 굴착	16.09	4.64	-
	굳지 않은 숏크리트	15.48	4.87	-
	굳은 숏크리트	14.81	6.54	-

표 3.171 지보패턴 5타입에서 록볼트 모형화 유/무에 따른 수치해석결과

구 분		천단침하량 (mm)	숏크리트 응력 (MPa)	록볼트 축력 (kN)
록볼트 모형화	상반 굴착	10.45	-	-
	굳지 않은 숏크리트+록볼트	13.97	2.38	27.01
	굳은 숏크리트	17.45	4.43	52.11
	하반 굴착	16.00	4.25	54.25
	굳지 않은 숏크리트+록볼트	14.29	4.48	57.11
	굳은 숏크리트	12.6	4.71	67.5
록볼트 미 모형화	상반 굴착	10.45	-	-
	굳지 않은 숏크리트	14.14	2.38	-
	굳은 숏크리트	17.73	4.39	-
	하반 굴착	16.30	3.68	-
	굳지 않은 숏크리트	14.47	4.00	-
	굳은 숏크리트	12.67	5.08	-

(2) 지보재 설치 효과를 지반의 공학적 특성 변화로 고려한 수치해석 결과

2차원 수치해석에서 터널 지보재 모형화에 대한 방법 중 하나인 주변 지반의 공학적 특성을 변화시키는 방법은 지보재 설치에 의한 효과를 터널 주변 지반의 공학적 특성의 증가로 고려하는 방법이다. 록볼트와 숏크리트의 복합적인 지보효과 숏크리트를 구조부재로 모형화 하지 않고 록볼트로 보강되는 지반의 변형계수가 증가하는 것으로 고려하였다.

또한 지보패턴 3타입과 5타입에서는 최대 천단침하량과 최대 숏크리트 응력이 발생하는 해석단계가 동일한 것으로 나타났으나, 지보패턴 4타입에서는 동일한 해석단계에서 발하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 지보재 설치에 의한 주변 지반의 공학적 특성 증가량을 각 표준 지보패턴에 대한 수치해석 결과 중 천단침하량을 기준으로 선정하였다.

그림에 나타난 것과 같이 주변지반의 변형계수와 최대 천단침하량의 관계는 변형계수가 증가함에 따라 최대 천단 침하량이 감소하는 것으로 타나났으며, 변형계수 증가에 따른 상관관계가 좋은 것으로 나타났다.

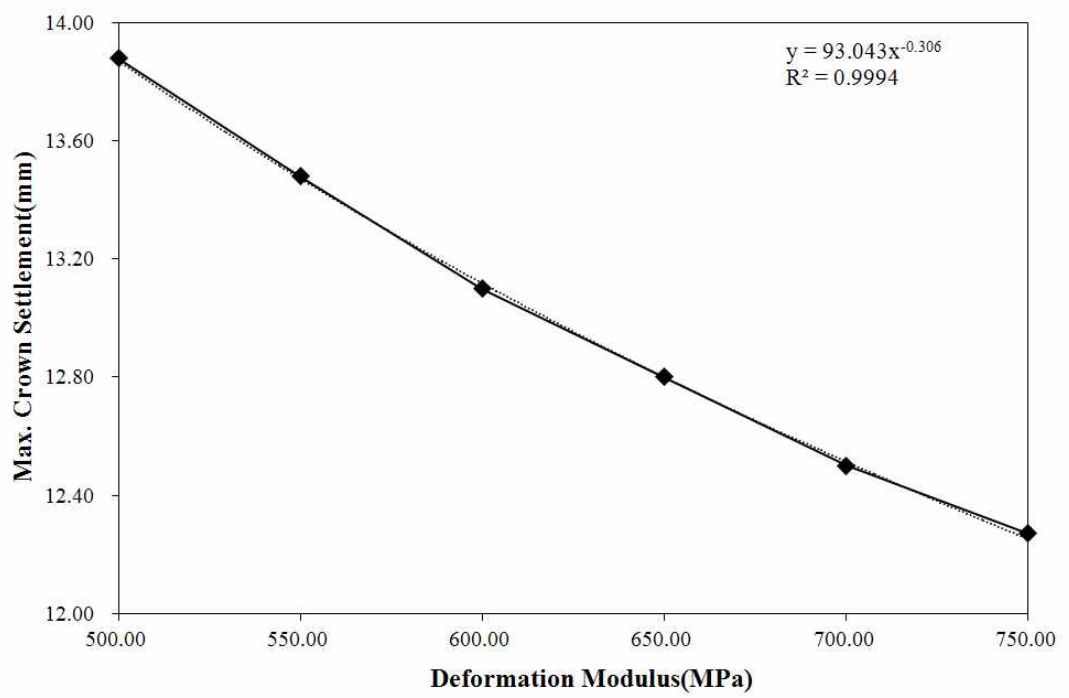


그림 3.218 지보패턴 3타입에서 주변지반 변형계수에 따른 최대 천단침하량의 관계

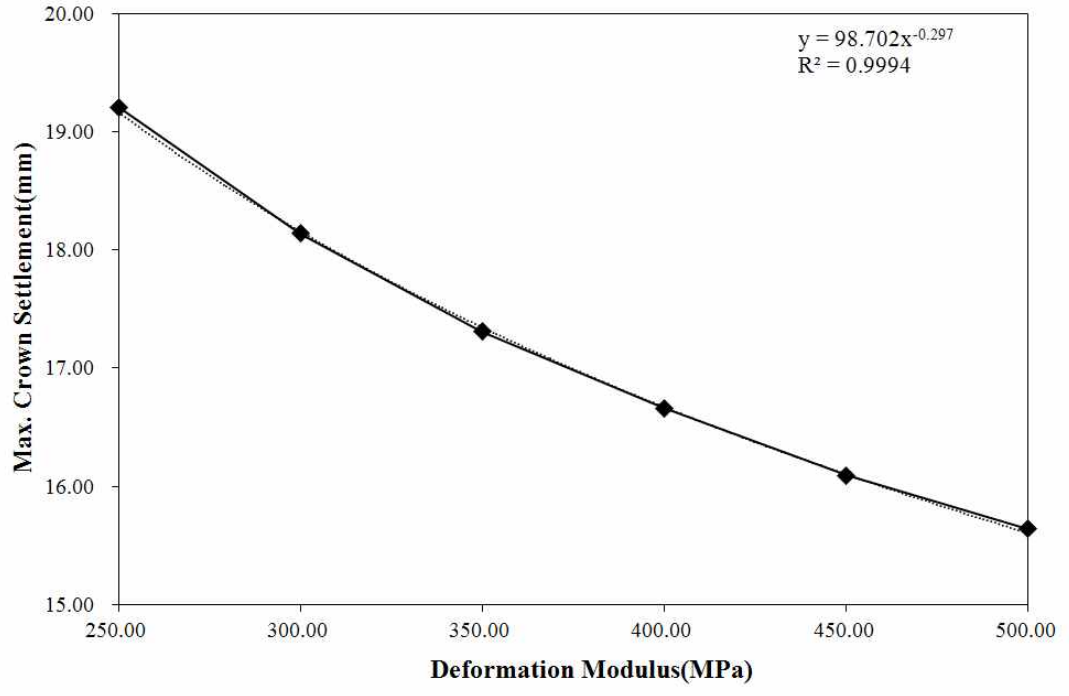


그림 3.219 지보패턴 4타입에서 주변지반 변형계수에 따른 최대 천단침하량의 관계

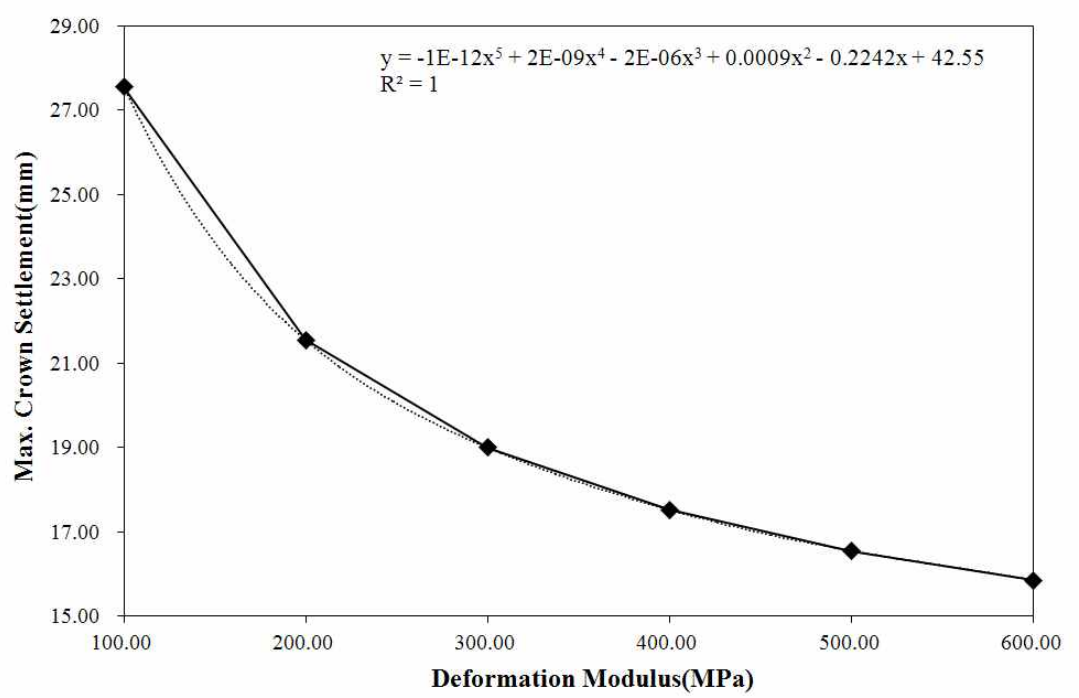


그림 3.220 지보패턴 5타입에서 주변지반 변형계수에 따른 최대 천단침하량의 관계

변형계수와 천단 침하량의 관계에서 각 표준 지보패턴에서 록볼트 설치각도 90°에 대응하는 변형계수를 산정결과는 다음 표와 같다.

표 3.172 각 지보패턴에서 록볼트 설치각도 90°에 대응하는 변형계수

구 분	최대 천단침하량 (mm)	원지반 변형계수 (MPa)	주변지반 변형계수 (MPa)
TYPE 3	13.00	500	611.27
TYPE 4	16.20	250	434.82
TYPE 5	17.48	100	406.24

(3) 록볼트와 숏크리트의 지보효과에 의한 천단 침하량 변화

모형시험에 발생한 처짐 발생량을 이용하여 각 모형시험 Case에 대하여 강판(모형 숏크리트), 모형볼트와 모형볼트로 보강지반을 합성보로 고려 변형계수를 산정하였으며, 산정결과를 이용하여 기준 모형볼트 설치간격에 대비한 변형계수 증가율을 산정하였다. 따라서 각 지보

패턴에서 터널 지보재인 록볼트와 숏크리트의 보강효과에 대비되는 주변지반의 변형계수 산정값에 시험결과 산정된 변형계수 증가율을 적용하면 각 지보패턴에서의 록볼트 설치각도 및 부담면적 변화에 따른 주변지반의 변형계수를 산정할 수 있으며, 변형계수의 산정결과는 다음과 같다.

표 3.173 록볼트의 부담면적 감소율과 설치각도에 따른 변형계수 증가율

구 분		록볼트 설치각도(°)			
		90	75	60	45
부담면적 감소율(%)	0	0.00	-0.77	-9.38	-10.19
	15	4.17	3.21	-4.56	-6.45
	30	5.89	4.41	-1.53	-2.49

표 3.1743타입에서 록볼트의 부담면적 감소율과 설치각도에 따른 변형계수(MPa)

구 분		록볼트 설치각도(°)			
		90	75	60	45
부담면적 감소율(%)	0	611.27	606.56	553.93	548.98
	15	636.76	630.89	583.39	571.84
	30	647.27	636.39	601.73	596.05

표 3.175 4타입에서 록볼트의 부담면적 감소율과 설치각도에 따른 변형계수(MPa)

구 분		록볼트 설치각도(°)			
		90	75	60	45
부담면적 감소율(%)	0	434.82	431.48	394.04	390.52
	15	452.96	448.78	415.00	409.78
	30	460.44	452.70	428.04	424.00

표 3.176 5타입에서 록볼트의 부담면적 감소율과 설치각도에 따른 변형계수(MPa)

구 분		록볼트 설치각도(°)			
		90	75	60	45
부담면적 감소율(%)	0	406.22	403.11	368.13	364.84
	15	423.18	419.28	387.71	380.03
	30	430.16	422.93	399.90	396.12

산정된 변형계수를 변형계수와 천단 침하량의 관계에 대입하면 터널의 천단 침하량을 산정할 수 있다. 그 결과를 설치각도에 대한 천단 침하 증가량으로 도시하면 다음 그림과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 록볼트와 숏크리트의 보강효과에 대비되는 주변지반의 변형계수 산정값을 이용하여 록볼트의 설치각도 및 부담면적 감소율 변화에 따른 천단 침하량 차는 지보패턴 3타입이 지보패턴 4타입 및 5타입 보다 다소 작은 것으로 나타났으나, 그 발생경향은 유사한 것으로 나타났다. 그리고 모형시험의 기준 설치간격에 대한 설치각도 및 부담면적 감소율에 따른 처짐 증가량의 발생 경향도 수치해석 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 록볼트 설치각도 및 부담면적 변화에 따른 변형계수 증가율을 터널 수치해석에 적용해도 터널 거동을 잘 예측할 수 있어 경사로 설치되는 시스템 록볼트에 대한 예비해석 단계에서 충분히 사용 가능한 것으로 판단된다.

모형시험에서 나타난 설치각도와 부담면적에 따른 처짐량이 수치해석보다 크게 발생한 이유는 모형시험에서 숏크리트 및 록볼트를 모형화하기 위하여 사용한 재료의 강도특성이 터널

수치해석에서 모형화한 재료의 강도특성과 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

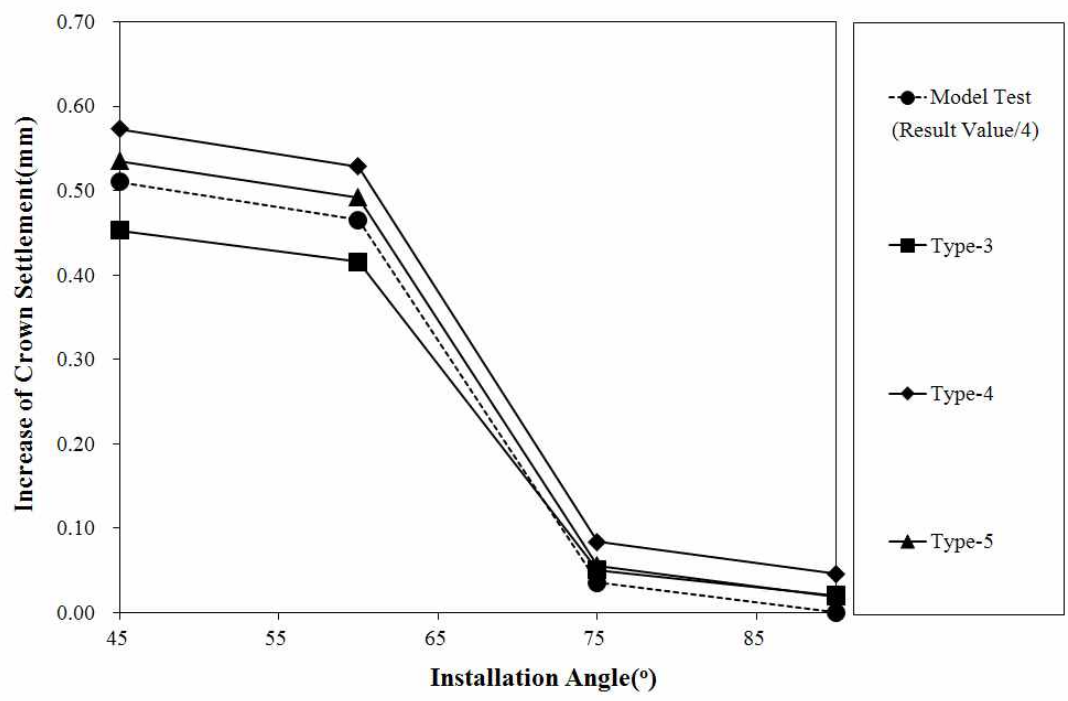


그림 3.221 록볼트 부담면적 감소율 0%에서 천단 침하량 증가량

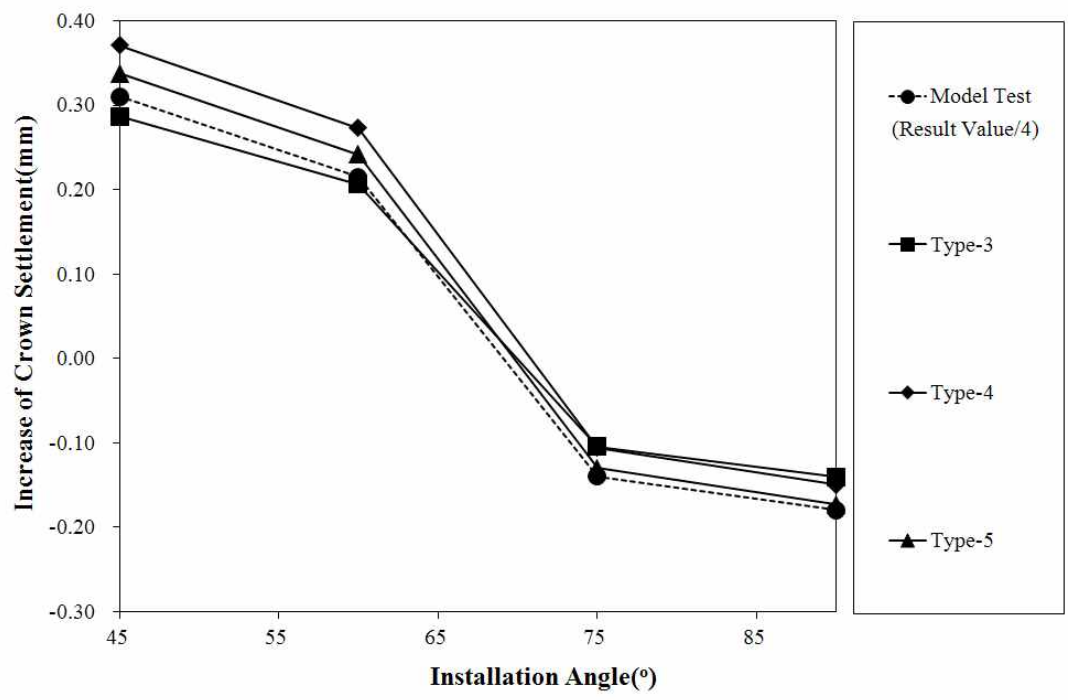


그림 3.222 록볼트 부담면적 감소율 15%에서 천단 침하량 증가량

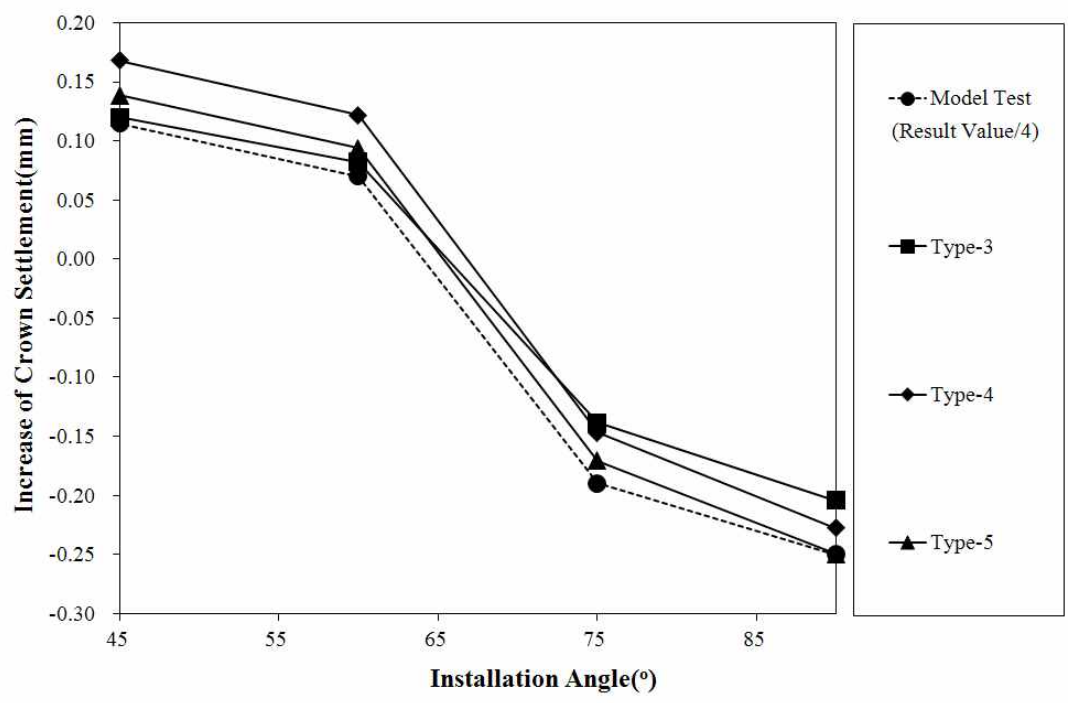


그림 3.223 록볼트 부담면적 감소율 30%에서 천단 침하량 증가량

제4장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

목 표		달 성 도 (%)	내 용
1차년도	실제 시공사례를 통한 터널 단면 확대시 지반안정성 분석	100	- 국내외 문헌 및 사례조사 - 실제 시공사례 및 계측자료를 활용한 확대단면 지반안정성 분석
	터널 단면 확대형식 및 규모에 따른 지반 안정성 해석 (I)	100	사례분석, 수치해석을 통한 지반안정성 분석 수행
	터널 지보재 및 라이닝의 역학적 특성 조사	100	-
	국내외 터널 단면 확대 시공기술 적용 현황 조사 및 분석	100	- 국내외 문헌 및 사례조사 - 터널 시공장비 제원 수집 - 실제 확대단면 분석을 통한 터널 시공장비 운용공간 분석
	국외 프로텍터 설계 및 제작기술 분석	100	-국외 실제 설계 사례분석을 통한 프로텍터 설계 및 제작기술 분석
	터널 단면 확대 시공 프로세서 Portotype 정립 및 시뮬레이션 검증	100	-기술 특허조사 및 적용현황 사례조사, 시공시 계측사례분석, 국외 실제 설계 사례분석을 통한 프로텍터 설계 및 제작기술 분석에 의한 시공 프로세서 정립
	협소공간 및 프로텍터를 고려한 시공장비 분석 및 개념 정립	100	- 해외 터널 확대단면 전용 시공장비 조사 - 터널 확대단면 시공 시 공사장비 운용성 분석 - 보강 및 보조공법에 대한 소요 시공장비 분석
	터널 단면 확대 시 보강공법 조사 및 분석	100	보강공법 사례분석 및 수치해석을 통한 보강효과 분석, 보강 프로세서 정립
	터널 단면 확대 보강 프로세서 정립	100	보강공법 사례분석 및 수치해석을 통한 보강 프로세서 정립

목 표		달 성 도 (%)	내 용
2차년도	터널 단면 확대형식 및 규모에 따른 지반 안정성 해석(II)	100	-국내 대표지반에 대한 확대형식 및 규모별 수치해석 -터널확대 굴착 시 지반종단변형특성 분석
	프로텍터 시작품 제작 및 실대형 실험에 의한 검증 및 보완	100	-프로텍터 실험체 제작 -프로텍터 실대형 실험에 의한 성능평가 -실대형 실험 계측데이터 분석 -계측결과를 반영한 보완
	터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석기법 및 설계기법 제시	100	-터널 단면 2차로->3차로, 2차로->3차로, 3차로->4차로 확대시 터널하반부 록볼트 미설치 및 숏트리 보강에 따른 안정성 검토 및 경제성 검토
	터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 프로텍터 충격하중 및 안정성 해석	100	-발파 시 버력의 입도 및 비산속도 분석 -버력의 재료거동에 따른 충격하중 평가 -충격저감재에 대한 물성 시험 및 충격해석을 통한 안정성 평가
	발파시 교통제어를 위한 교통량 평가기법 제시	100	-기존 사례를 통한 발파 시 교통대책 검토 -서울 시 터널의 일, 월, 년별 교통특성 분석
	프로텍터 설계제작 기술	100	-프로텍터에 작용하는 하중평가 (충격하중, 차량충돌하중 등) -충격하중저감장치 및 운용법 제안 -프로텍터 이동방법 수립 -터널단면대응형 가변형 프로텍터 제안
	터널 단면 확대 시공법 prototype 제시 및 시뮬레이션 검증	100	- 국내 터널 주요 시공장비 운용성 확인을 위한 모형 시뮬레이션. - 시뮬레이션을 통한 협소공간 공법의 시공성 확인.
	협소 공간 보강기술 제시 및 시공성 시뮬레이션(Ⅰ)	100	- 터널 시공에 주로 사용되는 장비 조사 - 시뮬레이션을 통한 보강공법의 시공성 검증
	경사 록볼트 시스템에 대한 안정성 분석	100	- 경사 록볼트에 대한 성능 평가를 위한 모형시험.

목 표		달 성 도 (%)	내 용
3차년도	터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석 기법 및 설계기법의 검증 및 완성	100	- 실제 터널확대 시 계측사례분석 - 계측사례분석을 통한 기존 지반변형곡선 제안식 검증 - 프로텍터 전방보호범위 산정식 제안
	터널단면 확대 실물 실대형 실험 (Ⅱ)	100	- 발파버력의 충돌 시 프로텍터의 거동특성 분석 - 실대형 실험을 통한 구조적 안정성 검증 - 프로텍터 설치 및 해체시간 분석을 통한 시공성 분석
	프로텍터 시작품 제작 및 검증	100	- 협소공간에서 효율적으로 계측을 수행하기 위해 계측기능을 구비하는 프로텍터 특허출원 - 프로텍터 시작품 도면 확보 - 경제적인 탄성매트를 이용하여 발파버력의 충돌하중을 효율적으로 저감
	협소 공간 시공 시뮬레이션	100	- 기존 2차로 도로터널->3&4차로 도로터널 확대 및 기존 3차로 도로터널->4차로 도로터널 확대시 직접공사비 분석 - 확대터널내 교통흐름을 완전히 차단한 경우와 프로텍터를 사용하여 어느정도 터널내 교통흐름을 허용하는 경우에 대한 사회손실 간접지 비용 분석 - 이동식 프로텍터를 사용하여 어느정도 교통흐름을 유지한 경우가 이동식 프로텍터를 적용하지 않는 경우에 비해 그 비용 절감 효과가 약 2배가량 발생함
	협소공간 보강공법 검증 및 완성	100	-다경관 보강재를 연결방법 및 이를 이용한 보공공법의 특허출원 및 등록 -시스템 경사 록볼트 추가 모형시험 실시 - 수치해석을 통한 모형시험 검증 - 시스템 경사 록볼트 설계를 위한 제안식 제시
	터널 단면 확대 설계 및 시공 지침 (안) 작성	100	- 도심지내에서 프로텍터를 활용하여 터널내 교통흐름을 어느정도 허용하면서 기존 터널 단면 확대에 대한 설계 및 시공 지침 및 매뉴얼을 작성

제5장 연구개발결과의 활용계획

가. 활용방안

- 현재 국내의 노후터널 확폭은 차량운행을 전면 중지시키고 신축하거나 기존 노선의 인근에 새로운 터널을 신설하는 방향으로 진행되고 있다. 그러나 본 연구를 통해 기존 노후터널의 차량 운행을 유지하면서 확대하는 기술 개발을 통해 사회적 비용을 크게 줄일 수 있으며 전국의 노후화된 터널의 확대 및 확장하는 경우에 적용할 수 있을 것으로 판단됨.
- 본 연구에서 개발되는 기술에 대한 지속적인 홍보로 도심지내 교통량 증가에 의한 교통정체가 심한 도로터널을 중심으로 적용할 예정임
- 본 연구에서 개발된 좁은 공간에서의 지반보강 기술 중 경사 록볼트에 대한 기술은 터널 단면 확대시 뿐만아니라 소형 공동구, 수직구 및 피난연락갱의 협소한 공간에서 록볼트 시공을 위한 보강기술의 지침으로 활용이 기대됨.
- 본 연구에서 제안된 좁은 공간에서의 지반보강 기술(라이닝 배면 그라우팅 공법과 단경관 보강재 연결 시공공법)은 단면 확대시 뿐만아니라 일반적인 터널 시공에서도 공기단축 및 공사비 절감을 도모할 수 있으므로 추가적인 연구를 통하여 현장 적용을 추진할 예정임.
- 기존 터널의 단면확대 공법은 노후터널의 개축뿐만 아니라 터널내에서의 분기확폭, 노후터널의 보강공법으로서도 활용될 수 있을 것으로 기대됨

나. 기대효과

○ 기술적 측면

- 교통 흐름이 확보된 급속 단면 확대 기술과 보수/보강 기술 개발로 인해 공사비 단축
- 교통 흐름이 확보된 터널 단면 확대 신기술을 통해 기존 개축/확폭 공법 대비 약 40%이상 직간접적인 공사비 단축 효과 기대
- 근미래에 대두될 터널 노후화에 대비하기 위한 핵심기술 확보를 통해 적극적인 공사비 단축 효과 유도
- 기존 노후 터널의 성능향상과 내공단면 확보로 인한 신설 터널 대체 효과

○ 경제·산업적 측면

- 교통 흐름이 확보된 급속 단면 확대 기술과 보수/보강 기술 개발로 인해 공사비 단축
- 교통량 통제로 인한 사회간접적인 피해 절감
- 근래에 대두될 터널 노후화에 대비하기 위한 핵심기술 확보를 통해 적극적인 공사비 단축 효과 유도
- 기존 노후 터널의 성능향상과 내공단면 확보로 인한 신설 터널 대체 효과
- 교통 흐름이 확보된 터널 단면 확대 신기술을 통해 기존 개축·확폭 공법 및 시설터널 건설 대비 20%이상의 직접적인 공기·공비 단축 효과 기대 (일본 토목연구소, 2002)
- 기존 터널 확폭 시공으로 신설터널 건설을 위한 용지매입 비용의 절감 및 자연환경 파괴를 최소화

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

※ 주요 내용은 제2장 및 제3장에 포함함

제 7 장 참고문헌

(1) 건교부(1996), 도로를 점용하는 공사구간의 교통처리 방안, pp.53-156, 1996

(2) 김동규, 정호섭, 공용중인 터널 확대에 의한 기능향상, 한국지반공학회지, Vol.23, No.3, pp.14-20, 2007

(3) 김웅구, 백기현, 서경원, 김동규, 우상백, 교통류 보존형 터널 확대시 경사록볼트 보강효과에 대한 수치해석적 분석, 한국암반공학회 봄학술발표회, 2010

(4) 김하근, 오진균, 발파 파쇄암 입도 예측에 관한 현장 적용 사례 연구, 주택도시연구 제93호, pp. 1-8, 2007

(5) 대우건설기술연구원, 일본 동경도립대 및 하자마건설, 사토공업 자문 보고서, 2007

(6) 대한토지개발공사 기술연구처, 암발파시 설계 방법에 관한 연구, pp.315~326, 1993

(7) 박경호 (2004) 건설 VE를 위한 터널의 LCC분석 시스템 개발, 조선대학교 박사학위 논문

(8) 박찬운 (2012) 외부비용을 반영한 도시내 도로의 혼잡통행료 추정에 관한 연구 : 서울시를 대상으로, 서울대학교 환경대학원

(9) 백기현, 노종륜, 공영중인 터널의 확폭 시공사례(오쿠라터널), 대한토목학회정기학술대회, 2007

(10) 서경원, 배규진, Nishimura Kazuo, Tsuyoshi Domon, 터널 안정화를 위한 페이스볼트의 효율적 배치에 관한 수치해석적 연구, 터널기술, Vol.8, No.2, pp.141-149, 2006

(11) 서경원, 백기현, 김웅구, 운영 중인 터널의 확폭굴착에 관한 해외사례 분석(Ⅱ), 한국터널공학회지, Vol. 10, No.2, pp.71~79, 2008

(12) 서경원, 백기현, 노종륜, 운영 중인 터널의 확폭굴착에 관한 해외사례 분석(Ⅰ), 한국터널공학회지, Vol. 10, No.1, pp.40~50, 2008

(13) 서경원, Nishimura Kazuo, 김창용, 실내실험 및 수치해석을 이용한 막장볼트의 최적 타설 개수에 관한 연구, 터널과 지하공간, 제16권, 제6호, pp.467-475, 2006

(14) 서울시정개발연구원 (2008) 2007년 서울시 교통지표 산출

(15) 서울특별시 (2011) 서울특별시 2011 통계연보

(16) 송윤섭, 이종우, 전귀현 (2005) 도로터널의 LCC 분석을 위한 도로 사용자 비용 산정, 대한토목학회 정기학술대회 pp.5575-5578

(17) 안명석, 류창하, 김수석, 터널발파에서 파쇄암의 입도예측에 관한 사례연구, 한국터널공학회논문집 제3권 제1호, pp. 3-9, 2001

(18) 이두화, 암반 터널에서의 시공단계를 고려한 암반-지보 거동특성 곡선적용에 관한 연

구, 한국터널공학회논문집, 제4권 제2호, pp. 143-153, 2002

(19) 이인모, 터널의 지반공학적 원리, 도서출판 새론, pp.60-64, 2004

(20) 이창렬 (2003) 교통수치지도와 EMME/2의 비교를 통한 교통 분석용 네트워크 추출/변환 시스템 개발, 인하대학교 석사학위 논문

(21) 일본지반공학회, 지반기술자를 위한 입상체 역학, 2010\

(22) 임홍석, 유홍희, Hertz 접촉이론을 이용한 탄성체의 충돌 해석을 위한 효율적 모델링에 관한 연구,

(23) 토목연구소(일), 기존 터널의 단면확대 공법 개발에 관한 공동연구보고서, 2003.

(24) 후지다 기술연구소, 국도7호선 운영 중 터널 단면 확대시공, pp.19-24, 2009

(25) 한국교통연구원 (2007) 교통혼잡비용 추정방법의 개선, 연구총서

(26) 한국개발연구원 (2008) 제5판_도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구, 연구보고서

(27) 한국개발연구원, (2008) 도로·철도 부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구 (제 5 판)

(28) 한국시설안전공단(2006) 지하도로시설물의 LCC 예측모델 및 시스템 개발

(29) 한국석유공사 (2011) 국내 석유제품 가격동향

(30) 한국교통연구원 (2007) 교통혼잡비용 추정방법 개선

(31) 한국교통연구원 (2008) 2008년 전국 교통혼잡비용 추정과 추이분석

(32) Kihyun Baek, Kyoungwon Seo, Woongku Kim, Jisun Yoon, ITA-AITES, 2010

(33) B.N.J.Persson, Elastic contact between randomly rough surfaces : comparison of theory with numerical results, The American Physical Society, 184106-1～7, 2002

(34) Carranza, T.C. and Fairhurst, C., Application of the convergence-confinement of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-brown failure criterion, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.15, No.2, pp.187-204, 2000

(35) Cunningham, C, The Kuz-Ram Model for Prediction of Fragmentation from Blasting Symposium of Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, 1983

(36) Johnson, K. L, Contact Mechanics (Cambridge University Press, Cambridge), Prediction of impact forces using Hertzian contact theory and measured modal structural data Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 4, Issue 4, Pages 287-294, 1985

(37) Johnson, K.L., Prediction of impact forces using Hertzian contact theory and measured modal structural data Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 4, Issue 4, pp. 287～294, 1985

(38) Ehlen, M. A & Marshall, H. E. (1996) “The Economic of New Technology Naterials: A Case Study of FRP Bridge Decking”, Building and Fire Research Labatory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg

(39) Kitada Masashito, 재래공법으로 건설된 터널의 확폭시 변형거동과 그라운드 링에 관한 고찰, (일)토목학회논문집, Vol.65, No.2, pp.119-127, 2009.04

(40) Kobayashi, Y., Imaoka, H., Ito, K., Yamamoto, T. and Saito, K., Enlargement of Live Line Tunnel by Drilling and Blasting, ITA2002, 2002

(41) Larsson, B, Fragmentation from Production Blasting Rock Blasting Committee, 1974

(42) Masayuki SUZUKI, 활선개축에 의한 도로터널의 시공, 터널공학 보고집 제15권, pp.153-160, 2005.12

(43) Lundborg, N, Computer programme for charge calculations in Bench Blasting, SveDeFo report, 1971

(44) Pelia,D., A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face, Geotechnical and Geological Engineering, 12;145-168, 1994

(45) Pietro Lunardi, The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils, T&T International ADECO-RS Approach May, pp.3-30, 2000

(46) R. Rangel, R. Thornhill, C. Smith, Richard G. Budynas, "Advanced Strength and Applied Stress Analysis", McGRAW-HILL Book Company, 1977, pp. 151 - 160

(47) Seskin, S. N. (1990) "Comprehensive framework for highway economic impact assessment methods and result" , Transportation Research Record 1274 pp.24-34

(48) Y.Kobayashi, Enlargement of line tunnel by drilling and blasting, ITA-AITES, 2009

(49) Yamamoto, T., 발파에 의한 터널활선공법-일반국도 229호(sikisimanai터널), 터널과 지하공간, 제34권 5호, pp.25-34, 2003鈴木雅行, 공영중 터널의 개축에 의한 도로터널의 시공, 터널공학 보고집, Vol.15, pp.153-160, 2005

(50) 山本　徹、發破によるトンネル活線擴幅ー一般國道２２９号　敷島内トンネル、トンネルと地下、５月号、pp.25-34, 2003.

(51) 勝間田 直乙, 공용터널을 단선에서 복선으로 확대, 터널과 지하, 제25권2호 pp.15-21, 1994

(52) 原田 利文, 활선터널 확대공사, 제52회 시공체험 발표회(산악), pp.57-64, 2003

(53) 佐藤工業、發破によるトンネルの活線擴幅工法ーエルトン、パンフ

(54) 佐藤工業、トンネルリニューアル、パンフ

(55) 池田憲二、落石による衝撃力の評価式、開發土木研究所月報、No.558,　1999년　11월,

pp.17-19

(56) 櫻澤　雅志, 확대터널의 발파진동에 관한 연구, 토목학회 제57회 연차강연회, 2002

(57) 眞下英人, 石村利明, 기존 터널의 단면확대 기술 개발, 터널과 지하, Vol. 34, No. 9, pp.41～48, 2003

부 록 - 1

교통류 보존형 도심지 도로터널단면 확대 설계/시공 지침 및 메뉴얼

목 차

1. 총칙 ····· 1
1.1 목적 ····· 1
1.2 적용범위 ····· 2
1.3 용어의 정의 ····· 2
1.4 관련법규, 규정 및 기준 ····· 5

2. 계획 ····· 7
2.1 계획일반 ····· 7
2.2 기본조사 ····· 9
2.3 터널확대의 유효성 검토 ····· 9
2.4 교통처리대책 검토 ····· 11

3. 조사 ····· 15
3.1 조사일반 ····· 15
3.2 조사흐름 및 조사계획 ····· 15
3.3 기존 자료조사 ····· 16
3.4 상세조사 ····· 17
3.5 시공 중 조사 ····· 18

4. 설계 ····· 19
4.1 설계일반 ····· 19
4.2 지반분류 ····· 21
4.3 확대단면 및 확대공법의 선정 ····· 21
4.4 굴착방법의 선정 ····· 24
4.5 교통보호공(Protector) ····· 25
4.6 지보시스템 ····· 35
4.7 굴착보조공법 ····· 36
4.8 갱구의 설계 ····· 37
4.9 환기, 방재 및 조명설비 ····· 39
4.10 안전시설 ····· 40

5. 시공 ····· 41
5.1 시공일반 ····· 41

5.2 시공계획 ····· 41
5.3 굴착 ····· 44
5.4 교통보호공 ····· 48
5.5 지보재 설치 ····· 49
5.6 굴착보조공법 설치 ····· 50
5.7 환기, 조명 및 배수설비 ····· 50
5.8 안전시설 ····· 51
5.9 계측 ····· 52

부 록 ····· 54

표 목차

표 1.3.1 터널확폭의 종류 ····· 4
표 2.2.1 비교검토의 항목(예) ····· 10
표 3.2.1 운용 중 터널의 확대 건설의 단계와 조사목적 ····· 16
표 3.4.1 남산2호터널 개보수 사례에서 확인된 배면공동 ····· 17
표 5.3.1 터널 확대공법 시공순서 ····· 45

그림 목차

그림 1.2.1 본 지침(안)의 적용범위 ····· 2
그림 1.3.1 양측확대공법 ····· 4
그림 2.1.1 년도별 교통혼잡비용 발생 추이(한국도로교통연구원) ····· 7
그림 2.1.2 교통류 보존형 터널확대 계획, 조사 및 시공 흐름도(예) ····· 8
그림 2.4.1 교통처리대책 검토 흐름도 예 ····· 11
그림 2.4.2 국외 교통보호공의 종류별 적용건수 ····· 12
그림 3.4.1 확대터널 굴착에 의하여 발생 가능한 여굴 ····· 18
그림 4.1.1 확대 터널의 설계와 시공의 흐름 ····· 20
그림 4.3.1 하부확대공법의 개념도 ····· 22
그림 4.3.2 상부확대공법의 개념도 ····· 23
그림 4.3.3 편측확대공법의 개념도 ····· 23
그림 4.3.3 양측확대 공법의 개념도 ····· 24
그림 4.4.1 암반강도별 터널확대연장별 적용굴착방법(F.Tonon, 2010) ····· 25
그림 4.5.1 이동식프로텍터 설계 흐름 예 ····· 26
그림 4.5.2 프로텍터의 규격 결정 시 고려사항 ····· 27
그림 4.5.3 프로텍터 보호범위 산정 ····· 28
그림 4.5.4 프로텍터에 작용하는 하중 ····· 29
그림 4.5.5 이동식 프로텍터의 예(Shikishima tunnel) ····· 30
그림 4.5.6 Olson 모델에서의 기호 ····· 32
그림 4.5.7 프로텍터 충돌해석 예 ····· 33
그림 4.5.8 오쿠라터널 가드레일 기초 예 ····· 34
그림 4.6.1 경사 록볼트 시스템 ····· 36
그림 4.7.1 기존터널 확대 시 노출된 배면공동 사례 ····· 37
그림 4.8.1 표준적인 갱구부의 범위 ····· 38
그림 4.10.1 체크바 설치 예 ····· 40
그림 5.3.1 오쿠라 터널(하자마 건설) 시공순서 전경 ····· 46
그림 5.8.1 교통규제중의 “대기시간”의 표시 ····· 51
그림 5.8.2 교통규제용의 신호기 ····· 52
그림 5.8.3 차량통행제한 확인용 게이트 ····· 52

1. 총칙

1.1 목적

본 지침(안)은 차량의 대형화, 교통혼잡, 노후화 대책 등으로 도심지내 도로터널이 개축이 필요할 경우 터널의 단면확대에 대한 합리적 계획, 조사, 설계, 시공을 위한 지침(안)의 제공을 목적으로 한다.

최근 준공된 지가 오래된 도로터널 가운데는 단면이 좁아 운행 차량의 대형화나 교통량의 증가로 인한 교통장애가 발생하는 곳이나 노후화등으로 인해 콘크리트 라이닝의 변상이 나타나고 터널 구조의 안전에 문제가 발생하는 등 정체대책·안전대책이 필요한 터널이 나타나고 있다. 이러한 대응책으로는 신설터널 건설에 의한 도로 개량공사를 하거나 우회 노선의 설정이 곤란한 경우에는 기존터널의 단면확대에 의한 공사가 이루어 질 수가 있다.

기존의 노후터널을 단면 확대할 경우 다음과 같은 원인에 의해 신설터널 건설에 비해 공사비가 높아지는 등 문제점으로서 지적되고 있다.

① 터널 전구간 또는 필요로 하는 구간에 프로텍터를 설치할 필요가 있다.
② 좁은 작업공간 속에서 일반 터너공사에 사용되는 장비를 사용하기 때문에 장비의 교차나 버력의 반출 등 시공성이 나쁘고 공사기간도 길어진다.
③ 보통 굴착지반이 단단한 경우에는 발파굴착으로 시공하는 것이 일반적이지만 운영중인 터널 확대에서는 적용이 제한된다. 도심지내 주변환경 및 민원 등에 따라 기계굴착 및 무소음 무진동 발파를 적용하기도 한다.
④ 교통규제를 필요로 하는 경우가 많고 거리가 길어질수록 적용이 곤란해진다.

그러나 용지취득이나 자연환경에 미치는 영향 등에 대한 사회적 제약이나 기존 시설물의 유용한 활용 등의 관점에서 향후 기존터널에서 교통정체대책, 안전대책으로서 단면확대에 의한 개축의 필요성이 높아질 것으로 기대한다.

본 지침(안)은 기존터널의 단면확대를 위해 효율적이며 경제적인 조사, 설계, 시공이 가능하도록 하는 일반적인 지침을 나타낸 것이다.

그러나, 국외사례를 보면 기존터널의 단면확대에서는 대상 터널의 지반조건, 보수보강이력, 점검 및 진단이력, 등 확대 공사에 중요한 영향을 미치는 요소가 많으며, 이러한 요소들에 대하여 정확한 파악이 어렵고, 기술적으로 불분명한 점도 많아서 과거 실적이나 경험 등에 근거하여 판단하는 경우가 많다.

그러므로 터널 단면 확대 공사에서는 획일적인 판단이 적합하지 않은 경우도 있으며 본 지침(안) 및 이의 해석의 적용에 있어서는 내용을 충분히 이해하고 종합적으로 검토함과 동시에 적절한 판단을 하는 것이 중요하다.

1.2 적용범위

본 지침(안)은 주로 재래식 공법(조적식 라이닝, 콘크리트 라이닝), ASSM 공법, NATM 공법으로 지반을 개착하지 않고 지중에 건설된 도심지내 도로터널에서 차량흐름을 유지하면서 터널 단면을 확대하는 경우의 터널 구조에 적용한다.

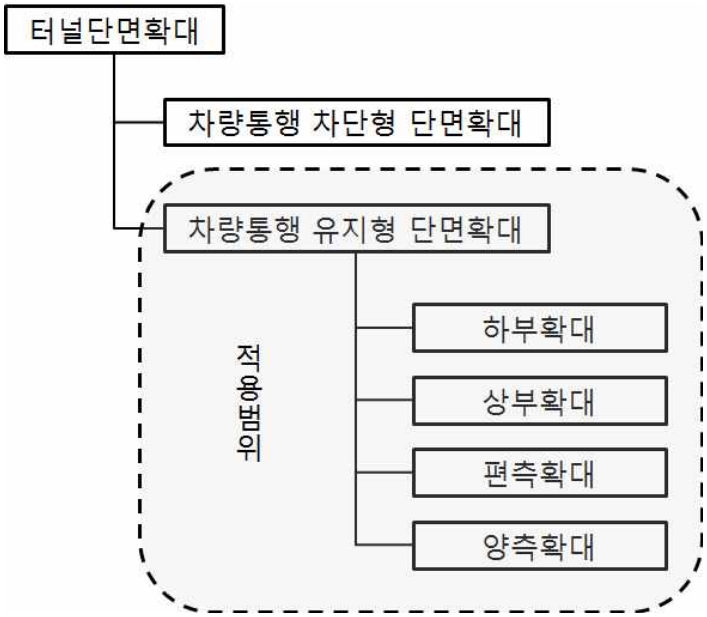


그림 1.2.1 본 지침(안)의 적용범위

도로터널의 설계 및 시공을 위한 기술적인 기준으로서는 국내의 터널설계기준(2007) 및 터널표시방서(2009) 등을 참조한다. 본 지침(안)의 작성에서는 상기기준을 기본으로 하며 본 지침(안)에 기재되어 있지 않은 범위에 관해서는 위의 기준을 적용하기로 한다.

1.3 용어의 정의

본 지침(안)에서의 용어정의는 아래와 같이 정한다. 이외에 용어정의는 터널설계기준과 터널표준시방서를 따른다

(1) 경사 록볼트 : 터널의 연직방향과 일정한 각도를 가지고 설치되는 록볼트.

(2) 교통보호시설(protector) : 기존터널을 확대 할 때 터널 이용자의 안전보호를 목적으로 설치하는 것을 말한다. 방호시설의 형식에는 강재로 제작된 것(프로텍터) 및 기존 터널의 라이닝을 이용하는 것이 있다.

(3) 교통혼잡비용: 도로상을 주행하는 차량들이 교통혼잡으로 인하여 정상속도(교통혼잡비용 추정의 기준속도)이하로 운행하게 됨으로 발생되는 시간가치의 손실, 차량운행비의

증가와 같이 추가적으로 발생하는 총체적인 비용

(4) 상부확대공법 : 기존터널의 폭원을 변경하지 않고 아치부의 일부 혹은 전면을 넓혀 내공 높이만을 확대하는 공법을 말한다.

(5) 시간가치비용: 수단별(승용차,버스), 목적별(업무, 비업무) 재차인원의 시간가치 비용 적용

(6) 양측확대공법 : 기존터널의 터널 중심선에 확대터널의 중심선을 그대로 두고 양측으로 기존터널의 폭원이나 내공 높이를 변경하기 위해 단면전체를 확대하는 공법을 말한다.

(7) 차량운행비용: 고정비(인건비,감가상각비, 보험료, 제세공과금 등),변동비(연료소모비, 유지정비비, 엔진오일비 등)

(8) 차량통행 유지형 시공법 : 터널내 교통보호시설을 설치한 후 기존터널의 양방향통행 혹은 일방통행으로 교통보호시설 내부로 차량흐름을 유지시키면서 터널 단면을 확대하는 것을 말한다.

(9) 차량통행 차단형 시공법: 기존터널의 차량흐름을 완전 차단한 후 터널 단면을 확대하는 것을 말한다.

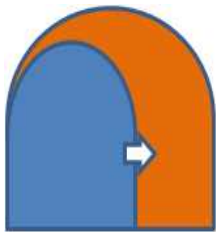
(10) 편측확대공법 : 기존터널의 터널 중심선을 기준으로 확대터널의 중심선을 편측으로 이동하여 기존터널의 폭원이나 내공 높이를 변경하기 위해 단면전체를 확대하는 공법을 말한다.

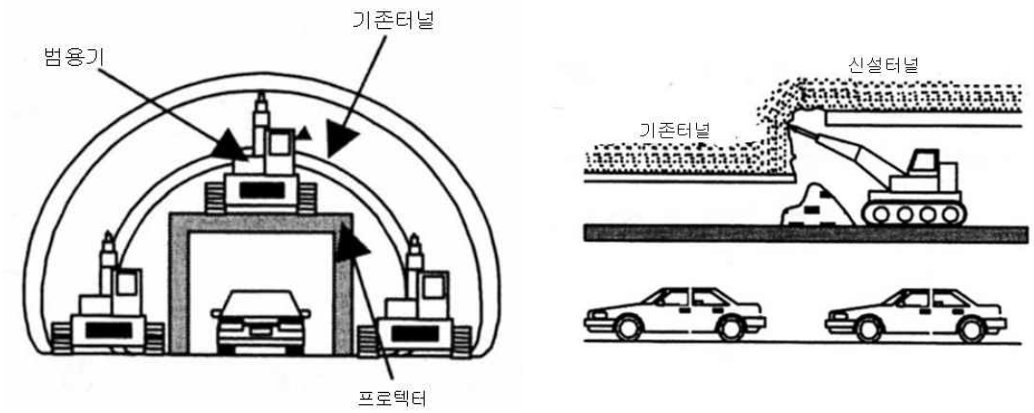
(11) 하부확대공법 : 기존터널의 폭원을 변경하지 않고 포장 두께의 축소나 노면상승 등에 의해 내공 높이만을 확대하는 공법을 말한다.

(12) 확대공법 : 기존터널의 단면확대 기술로서, 하부확대공법, 상부확대공법, 편측확대공법, 양측확대공법으로 구분하며 이러한 공법을 확대 공법이라 한다.

위에서 언급한 공법에 대한 내용은 표 1.3.1과 그림 1.3.1에 도식하였다.

표 1.3.1 터널확폭의 종류

확폭 종류	하부부분 확대공법	상부부분 확대공법	편측확대 공법	양측확대 공법
개념도				



단면도 측면도

그림 1.3.1 양측확대공법

1.4 관련법규, 규정 및 기준

터널 단면확대 설계 및 시공과 관련된 법규, 규정 및 기준은 다음과 같이 국내의 터널설계기준(2007) 및 터널표시방서(2009)에 규정된 내용을 기본으로 한다 터널 단면확대 설계 및 시공시 준수하여야 하는 관련 법규 및 기준을 모두 검토하여 해당 내용에 위배되지 않도록 설계 및 시공하여야 한다. 조사대상이 되는 주된 법규 및 관련 지침 등은 다음과 같다.

(1) 환경오염 방지 및 환경보전 관계 : 대기환경보전법, 자연환경보전법, 자연공원법, 산림법, 조수보호및수렵에관한법률, 소음・진동규제법, 수질환경보전법, 해양오염방지법, 수도법, 하수도법, 광업법, 지하수법, 철도건설법, 폐기물관리법, 토양환경보전법, 환경정책기본법, 환경・교통・재해 등에 관한 영향평가법 등

(2) 재해방지 관계 : 사방사업법, 택지개발촉진법, 농어업재해대책법, 자연재해대책법 등

(3) 국토개발 관계 : 국토기본법, 국토의 계획 및 이용에 관한 법률 등

(4) 하천 관계 : 하천법, 공유수면관리법, 지하수법, 온천법 등

(5) 도시계획 관계 : 도시계획법, 도시공원법 등

(6) 도로 및 교통 관계 : 도로법, 철도건설법, 도시철도법 등

(7) 군사 관계 : 군사기밀보호법, 군사시설보호법 등

(8) 문화재 관계 : 문화재보호법 등

(9) 안전 관계 : 시설물의 안전관리에 관한 특별법, 건설기술관리법, 산업안전보건법, 철도안전법 등

(10) 총포・도검・화약류 등 단속법 등

(11) 관련 기준 및 지침 : 건설공사 비탈면설계기준 및 유지관리지침, 도로설계기준, 도로안전시설 설치 및 관리지침, 도로포장설계 시공지침, 도로터널 방재시설 설치지침, 도로터널 조명시설 설계기준, 도시철도 건설규칙, 시설물 유지관리지침, 철도건설규칙, 철도설계기준, 고속철도설계기준, 철도시설 안전기준에 관한 규칙, 철도시설안전 세부 기준, 콘크리트구조설계기준, 토목공사 설계기준, 도로의 구조・시설에 관한 규칙 등

(12) 관련 시방서 : 가설공사 표준시방서, 건설공사 비탈면 표준시방서, 고속도로공사 전문

시방서, 도로공사 표준시방서, 도시철도(지하철)공사 표준시방서, 콘크리트 표준시방서 등

2. 계획

2.1 계획일반

2002년 OECD 서울지역 정책보고서에 의하면 우리나라는 서울 및 수도권에서 교통집중과 정체로 인해 한해 약 12조 5000억원의 경제적 손실이 발생하고 있으며 한국도로교통연구원 통계자료에 의하면 서울시의 교통혼잡비용은 매년 약 5.88%씩 증가해 2031년에는 약 16조원의 교통혼잡비용이 발생할 것으로 예상된다. 특히 도시부의 경우 한국도로교통연구원에서 제공하는 통계자료를 보면 2008년까지 전체 혼잡비용의 63.27%를 차지하게 되는데 이는 도심지 인구집중에 의한 영향으로 보인다. 이러한 경제적 손실이외에도 극심한 정체에 따른 이산화탄소 배출량의 증가는 도심지 생활환경을 열악하게 만들고 스트레스는 국민 삶의 질 또한 저하시키고 있다.

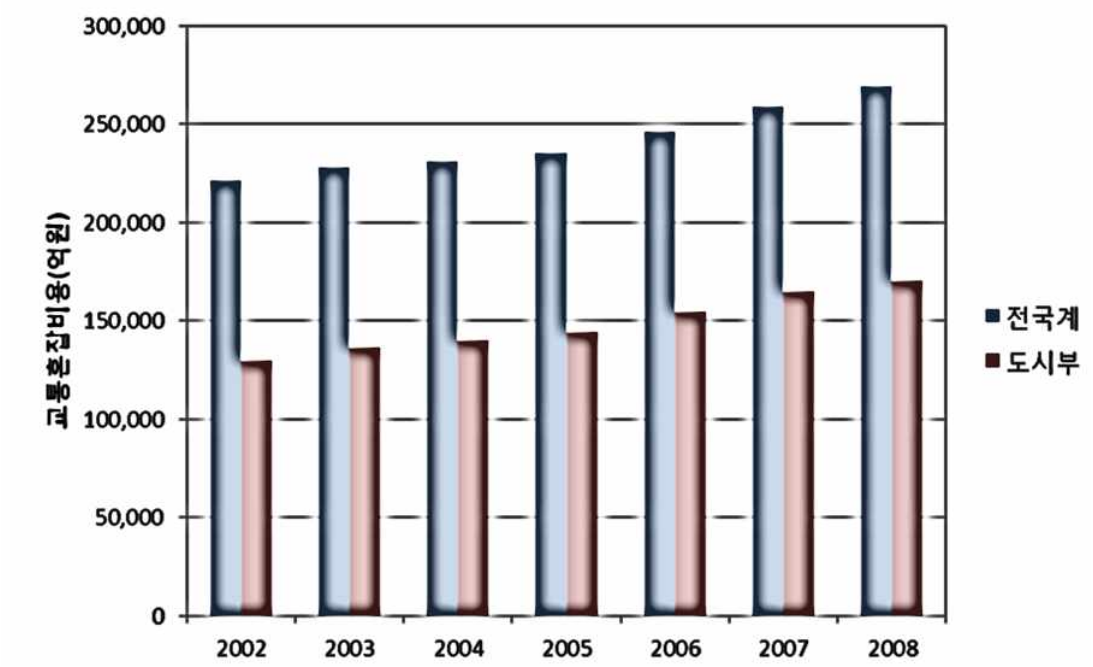


그림 2.1.1 년도별 교통혼잡비용 발생 추이(한국도로교통연구원)

이를 개선하기 위해 국토해양부에서는 2006년에 『제1차 대도시권 교통혼잡도로 개선사업 기본계획('06~'10)』을 고시하고, 그간 15개 사업을 추진 해왔으며 『제2차 대도시권 교통혼잡도로 개선사업계획('11~'15)』을 확정하여 계속적으로 도시부내 정체구간에 대해 교통혼잡을 개선해나갈 계획이다.

터널의 경우 교통용량을 확충하기 위해 지금까지 기존터널 주위에 신규터널을 건설하는 방법이 적용되어 왔다. 하지만 도심지의 경우 용지비가 과다해지고 극심한 반발로 용지매입 자체가 불가능한 경우가 발생될 수 있어 대안으로 최근에는 우회도로를 확보한 상태에서 기존터널을 확대하는 방법이 일부적용되고 있으나, 도심지에서는 주변에 밀집된 건물과 자연훼손

에 대한 반발, 주변 도로의 정체로 인해 우회도로를 확보하는 것 자체가 매우 어려운 상황이다. 이러한 상황에서는 교통을 보존한 상태에서 기존터널을 확대하는 방법이 적용될 수 있다.

교통을 보존한 상태에서 기존터널을 확대하고자 계획할 때는 터널확대의 목적 및 기능의 적합성과 공사의 안정성, 경제성 및 주변 환경을 고려함과 동시에 터널에 접속되는 도로부의 확대를 포함하여 종합적으로 검토하여야 한다. 즉, 터널 전후에 교량이 접속되는 경우 개개의 터널이 아닌 교량의 증축까지 포함한 노선 전체적인 관점에서 계획하여야 한다. 또한 교통을 보존하기 위한 교통보호공의 경제성확보를 위해 이동식으로 고려하는 경우 이를 이동시킬 때 곡선부를 최소화하는 노선계획이 필요하며 터널의 부속설비(안전, 조명, 환기등) 및 지해매설물의 관련성도 고려할 필요가 있다.

교통을 보존한 상태에서 기존터널을 확대하고자 할 경우 일반적으로 그림 2.1.2와 같은 흐름에 따라 과업을 진행하게 된다.

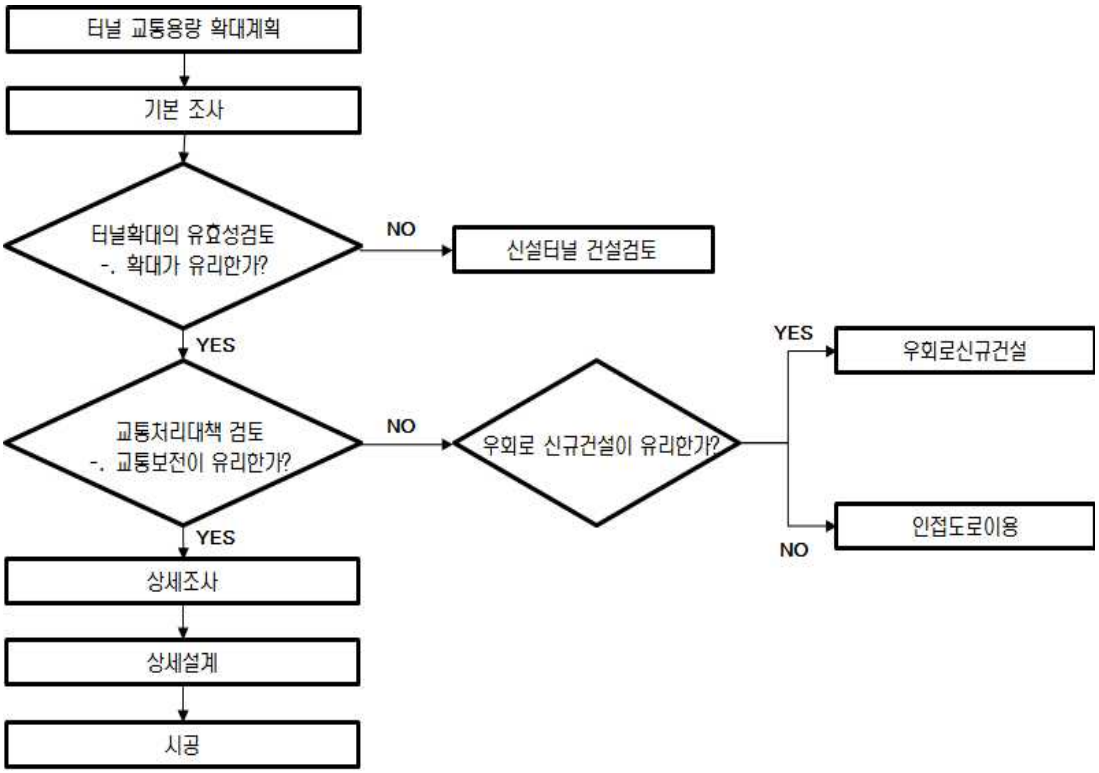


그림 2.1.2 교통류 보존형 터널확대 계획, 조사 및 시공 흐름도(예)

이 중 상세조사 이전의 단계를 계획단계로 볼 수 있으며 다음에 각각에 대해 설명하도록 한다.

2.2 기본조사

기본조사는 터널확대의 유효성 검토 및 교통처리대책의 검토 단계에서 설정된 판정기준에 대한 판단근거를 제공하기 위해 필요한 자료를 기존문헌이나 현지조사로 수집하는 조사이며

주된 조사항목은 다음과 같다.

① 기존터널 설계 및 시공현황 : 노선, 단면, 지질, 적용공법, 특이사항 등
② 터널 내 교통특성 : 차량의 종류(크기), 교통량 특성 등
③ 주변현황
- 터널 전후의 진입도로 현황(접속도로부의 차로, 도로부의 종류(교량 혹은 도로))
- 터널 전후 진입도로와 연결된 도로의 현황 및 교통상태
- 건물현황 : 건물의 종류, 규모 및 터널과의 이격거리 등
- 터널갱구부 주변 여유공간확보 가능 여부
④ 터널 주변의 입지·지형·지질
⑤ 터널 부속시설
⑥ 관련 법령

2.3 터널확대의 유효성 검토

터널확대의 유효성 검토에서는 기존터널을 확대하는 경우와 신규터널을 건설하는 경우를 비교하여 판정하지만 공사비와 용지비 등 노선전체의 사업비에 의한 경제성 평가뿐만아니라 표 2.2.1에서 나타내는 바와 같이 환경보전효과, 공공시설 유지 및 조성비용 절감, 보수보강을 통한 서비스 및 안정성 향상, 주민의 편의성 등 종합적으로 고려하여야 한다.

표 2.2.1 비교검토의 항목(예)

검토항목	
도로이용	기존터널 활용으로 인한 공공시설 조성비용 절감효과
	장기유지관리비용 절감효과
	교통용량확보를 통한 교통사고 감소효과
	주행의 안전성·쾌적성의 향상
환경	경관의 보존·창출, 문화재보호
	생태계의 보호
	환경보존효과
주민생활	용지매입에 따른 이주비용 절감
	이주불필요에 따른 주민편의증대
	지역간 교류확대
	공공서비스의 향상
사회적 변화	인구변화추이
	녹색성장 등

이러한 평가요인들 중 터널의 입지조건이나 전후의 도로조건이 터널확대의 유효성을 평가하는 가장 중요한 요인인 경우가 많다.

2.3.1 터널 입지조건

터널의 입지조건은 터널이 건설된 위치에서 신규터널을 건설하기 어려운 경우 터널확대가 매우 유효한 방법이 되며 다음과 같은 조건을 들 수 있다.

① 해안이나 하천에 있는 터널로 신규터널에 대한 별도의 루트의 설정이 곤란한 경우
② 지형여건상 신규터널 시공이 불가능한 경우
③ 주변에 건물이 밀집되어 용지매입자체가 불가능할 경우

터널확대가 유효한 터널입지조건에 대한 자세한 설명과 사례를 부록에 나타내었다.

2.3.2 터널 전후의 접속도로 검토

터널 전후의 접속도로 여건 상 다음과 같은 조건에서는 기존터널의 확대가 유효한 방법이 될 수 있다.

① 부분 확대만으로도 큰 효과를 기대할 수 있는 경우
② 터널전후 진입도로 차로보다 터널의 차로가 적어 터널이 병목현상을 일으키는 경우

터널확대가 유효한 터널전후 접속도로의 조건에 대한 자세한 설명과 사례를 부록에 나타내었다.

2.4 교통처리대책 검토

일반적인 교통처리대책 검토 예를 그림 2.4.1에 나내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 교통처리대책검토에서 가장 먼저 해야될 것은 터널내 교통흐름의 유지여부의 판단이며 교통흐름을 전면차단하고 확대하고자 하는 경우에는 현재의 교통을 우회할 수 있는 방법을 강구해야 한다. 터널내 교통의 흐름을 유지하는 것이 유리한 경우에는 굴착방법이나 기존터널 여건 등을 고려하여 교통보호공에 대한 검토가 필요하다.

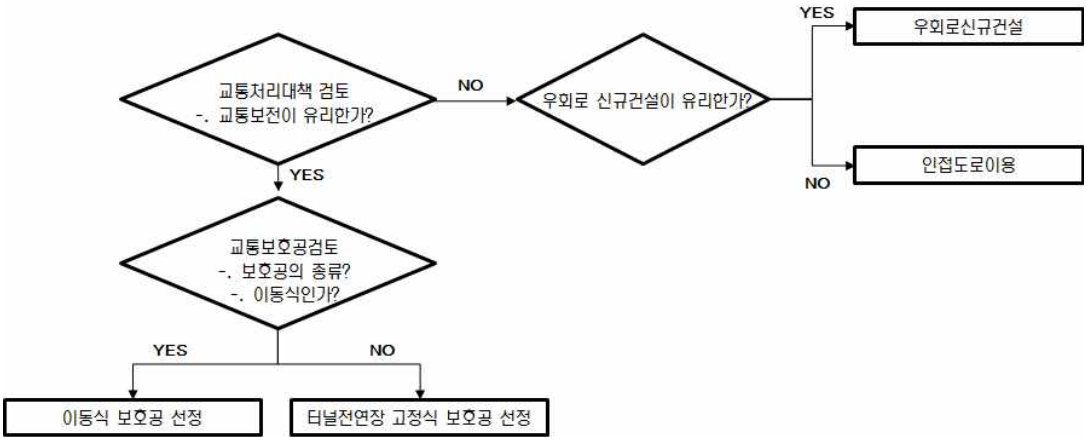


그림 2.4.1 교통처리대책 검토 흐름도 예

2.4.1 교통보전의 유효성 판정

터널을 확대하는 경우, 신규터널 건설과크게 다른 조건으로서 현지교통의 확보가 있다. 현지 교통의 확보 방법에는 통행규제 등을 실시하여 차량을 통과 시키면서 시공하는 교통류 보존형 확대와 우회로를 확보해서 전면통행금지에 의한 시공이 있지만 이러한 선택은 이하에 나타낸 바와 같이 터널의 입지조건 등에 의해 결정한다.

① 현지의 교통서비스를 그다지 저하시키지 않는 정도의 우회로의 확보가 가능한가?
② 우회로 건설 시 자연훼손 및 주민의 반발은 크지 않은가?
③ 우회로 건설에 따른 용지매입이 용이하며 용지비용이 크지 않은가?
④ 통행금지가 가능한가?

2.4.2 우회로확보방안검토

우회로를 확보하는 방법에는 신규로 건설하는 방법과 주변도로를 이용하는 방법이 있는데 비용상의 문제, 주민의 편의문제, 기존도로의 서비스 저하문제등 종합적으로 검토하여야 한다.

2.4.3 교통보호공 검토

교통흐름을 보존할 경우 교통을 안전하게 보호할 수 있도록 교통보호공에 대해 검토하여한다. 교통보호의 종류에는 크게 강재프로텍터와 기존터널라이닝을 이용하는 방법이 있는데 교통보호공의 경우 터널내부에 설치되므로 시공에 큰 영향을 주게 된다. 따라서 유효한 방법을 선정하기 위해서는 작용하중에 대한 기존라이닝의 안정성, 굴착방법, 버력의 처리, 지보재의 설치 등 관련 조건을 종합적으로 검토하여 선정하여야 한다. 국외 교통보호공의 종류별 시공건수를 그림 2.4.2에 나타내었다.

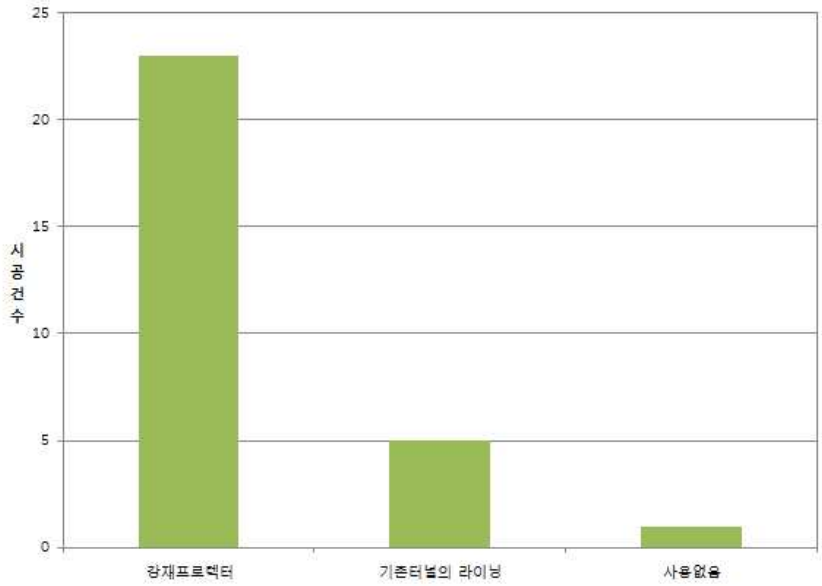


그림 2.4.2 국외 교통보호공의 종류별 적용건수

교통보호공으로서 강재프로텍터를 이용하고자 하는 경우에는 이동식으로 적용할 것인지 아니면 터널 전연장에 걸쳐 고정식으로 적용할 것인지 선정해야 한다. 이를 위해 이하의 항목 등에 대해 검토하여 결정한다.

① 확대터널의 연장
② 터널내 곡선부와 곡선반경
③ 터널의 지질조건

강재프로텍터를 이동식으로 하고자하는 경우 프로텍터의 규격, 보호범위, 작용하중, 하중저감방안, 이동방법 등에 대한 검토를 하여야 한다.

1) 보호공의 규격

보호공의 규격은 기존터널의 건축한계를 만족하도록 해야 한다.

2) 보호범위 검토

터널을 굴착할 경우 터널막장 전후로 굴착에 의한 영향범위가 발생되며 이로 인해 기존터널의 지보재의 안정성과 신규터널의 안정성 등을 종합적으로 고려하여 보호범위를 검토하여야 한다. 계획단계에서는 개략검토를 위해 기존터널의 설계자료를 이용하여 수치해석을 실시하여 판단하거나 유사 지반에서의 시공사례 및 다음의 확대터널에 대한 종단변형곡선식에 의해 개략적으로 산정할 수 있다.

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/(\sqrt{R_{enlarge}^2 - R_{old}^2})}{a}\right)\right]^b \qquad (2.4.1)$$

여기서, x : 굴착면으로 부터의 거리(후방은 '+', 전방은 '−')

u_r : 터널 임의의 지점 x에서 중심방향의 변위

u_r^M : 중심방향 최대 수렴변위

$R_{enlarge}$: 확대터널의 반경

R_{old} : 기존터널의 반경

a, b : 회귀상수

$x \geq 0$인 경우(굴착면 후방 확대터널) : a=0.958, b=−1.171.

$x < 0$인 경우(굴착면 전방 기존터널) : a=0.02158, b=−0.01491

3) 작용하중 검토

터널확대 시 강재프로텍터는 내부 통행차량을 보호하는 것이므로 안정성을 최우선적으로 고려하여야 하며 모든 작용하중에 대해 확대건설기간 내 안정성을 유지할 수 있어야 한다. 강재프로텍터 작용하는 하중은 크게 사하중과 동하중으로 나눌 수 있으며 동하중은 장비의 이동하중, 발파버력에 의한 충돌하중을 들 수 있고 사하중으로는 장비하중, 버력적재하중이 있으며 그 외에 내부차량의 충돌이나 프로텍터 외부 작업장비의 충돌 등에 의한 하중이 있을 수있다. 작용하중에 대한 자세한 사항은 4장의 설계편을 참조하도록 한다.

4) 하중저감방안 검토

발파굴착이 적용되는 경우 발파버력의 충격하중이 크게 작용하기 때문에 이에 대한 저감방안을 강구하는 것이 경제적일 수 있다. 하중 저감방안으로는 발파 전과 후에 대응하는 방법이 있는데 발파 전 대응할 수 있는 방안으로는 발파버력의 입도조절과 비산속도를 조절할 수 있는 방안이 있을 수 있다. 발파 후 저감방안으로는 발파버력의 충돌이 예상되는 곳에 충돌하중을 흡수할 수 있는 장치를 두는 방법이 있을 수 있다. 이에 대한 자세한 사항은 4장의

설계편을 참조하도록 한다.

5) 이동방법 검토

강재프로텍터를 이동식으로 하고자 하는 경우에 이동방법에 대한 검토를 하여야 한다. 이동방법에 대한 고려사항으로는 레일식, 바퀴식, 설계하중, 동력장치, 운용법 등에 대한 검토가 필요하며 자세한 내용은 4장의 설계편을 참조하도록 한다.

3. 조사

3.1 조사일반

조사는 운용중인 터널의 확대시 안전하고 경제적인 설계, 시공 및 완공 후 유지관리에 중대한 영향을 미치는 사항이므로 입지조건, 주변지역 및 터널의 교통량 통계, 운용중인 터널의 안정성, 지형, 지질, 환경 등에 관한 조사를 실시하여야 한다.

운용중인 터널의 확대를 위한 조사는 운용중인 터널의 입지조건, 주변지역 및 터널의 교통량 통계, 운용중인 터널의 라이닝, 지보재, 지반을 포함한 전체적인 터널의 안정 상태, 지질조건 등 운용중인 터널의 전체적인 상황을 파악하기 위하여 실시되어야 한다. 특히 터널의 입지조건, 주변지역 및 터널의 교통량 통계와 운용중인 터널의 안정성 조사는 운용중인 터널의 확대시공의 필요성 및 경제성을 결정하는 중요한 기초자료이므로 충분한 기초자료를 얻을 수 있도록 실시되어야 한다.

또한, 운용중인 터널의 정밀안전진단 보고서, 보수/보강 기록, 과거 시공기록 및 관련법규 등은 터널의 안정성 및 시공성에 영향을 미치는 요인이므로 가능한 명확하게 수행하여 설계, 시공 및 유지관리의 기초자료로 활용하여야 한다.

3.2 조사흐름 및 조사계획

조사는 계획단계, 상세설계 단계 및 시공단계에 따라 기존 자료조사, 상세조사 및 시공 중 조사로 구분되어 각 단계별로 수행되어야 하며, 일관된 설계기준이 적용되어야 한다. 조사는 계획부터 시공/유지관리까지 각 단계마다 실시되며, 표 3.2.1과 같이 각 단계에서 유용한 조사가 수행되어 동일한 기준으로 검토되어야 한다.

표 3.2.1 운용 중 터널의 확대 건설의 단계와 조사목적

건설단계		조사목적			비고(검토내용)
구분	시기	목적	범위	내용	
기본 조사	사업의 구체적인 계획 및 비교노선에 대한 검토까지 (개략 및 예비설계)	사업의 타당성 검토	비교노선을 포함한 광범위	- 각종 기존자료 조사 및 분석 - 지표답사 - 지형 및 지질에 대한 개략조사 - 주변환경 및 입지조건에 대한 광역조사 등	기존터널의 안정성, 터널의 위치, 연장, 개략의 구조, 확대터널 시공법, 시공계획, 신설터널 및 확대터널의 건설비 등의 비교검토
상세 조사	운용 중 터널 확대결정 후 공사착공까지 (상세설계)	운용 중 터널 확대에 대한 설계 및 시공계획 수립	터널 건설 관련 개소 및 주변	- 상세한 지질 및 지반조사 - 정밀 라이닝 배면 공동 조사 - 주변 환경 - 교통체계 및 관련법규 - 공사용 설비 및 시공장비 조사 등	터널의 확대방법, 시공 중 확대터널의 안정성 및 기존터널의 안정성, 시공방안 및 탄력적인 교통량 통제방법 등에 대한 비교검토
시공중 조사	시공 중	시공 관리, 공사통제 및 유지관리를 위한 자료 확보	터널내부 및 시공에 의해 영향을 받을 우려가 있는 범위	- 기존 라이닝 변상 조사 및 막정면 조사 - 터널 및 인접 구조물에 대한 계측 등	시공을 실시함과 동시에 상세설계, 시공법, 환경보전대책 등의 당위성 및 설계변경의 필요성을 검토함

3.3 기존 자료조사

운용 중 터널에 대한 기존 자료조사는 터널의 설계자료, 시공 자료 및 유지관리과정 중 안전진단보고서 및 보수/보강이력, 주변지역 및 운용 중 터널의 교통량 및 주변의 교통체계 등이며, 가능한 모든 자료를 확보하여 분석하여야 한다. 기존 자료의 조사에 의한 터널의 안정성 평가는 터널 확대의 경제성을 평가하기 위한 기준이 되는 자료이므로 수집이 가능한 모든 자료를 확보하여야 한다. 특히, 건설한지 오래된 터널의 경우 시공 자료, 안전진단보고서 및 보수/보강이력은 터널 주변지반에 대한 지질조건 및 주변 지반의 상태를 파악할 수 있으며, 확대터널 시공 시 터널의 안정성을 판단하고 터널의 시공공법 선정 및 시공성을 판정하는 중

요한 자료로 사용될 수 있다.

주변지반의 지형·지질 및 용수에 관한 조건, 이른바 지반조건 및 시공시의 교통규제 조건에 대해서는 터널 설계 및 시공을 현저하게 좌우하는 것이며 적절한 공법의 선정이 없으면 공비의 증대, 공정의 연장뿐만 아니라 불예측의 사태를 초래하는 경우도 있다. 특히 운용중인 터널을 확대시공으로 하는 경우에는 터널 이용자의 안전확보 면에서 교통 보호공의 상황관찰과 동시에 교통규제에 의한 정체상황 등에 대해서도 파악해두는 것이 중요하다.

3.4 상세조사

상세조사는 상세한 지반조사 및 기존 터널의 안정성 조사가 해당된다. 지반조사는 터널 주변의 환경적인 요인을 고려하여 계획하여 실시하여 하며, 기존 자료 분석을 통하여 정밀조사를 계획하여야 한다. 특히, 건축년도가 오래 경과된 터널의 경우에는 라이닝 배면공동(여굴)이 형성되어 있는 사례가 보고되어 있으며, 배면공동부에서는 기존 터널 굴착에 의하여 형성된 이완영역의 발달로 인하여 확대터널 굴착 시 대규모 여굴 발생을 유발할 수 있으므로 최대한 정밀한 공동조사를 통하여 터널의 안정성 확보 및 시공계획을 수립하여 한다. 지반조사 및 시험은 "관련기준 및 시방서"를 따른다.

표 3.4.1 남산2호터널 개보수 사례에서 확인된 배면공동

구분	정밀안전진단(1996)	기본설계(1998)	현장실측(1999~2000)
조사내용	·탐사방법 : 타격음, Hole 조사. 지반탐사(GPR) ·터널 전체 주면면적의 7%(터널아치부 총 길이의 50%) ·최대 공동 깊이 : 113cm ·공동채움물량 : 약 1,830 m^3	·탐사방법 : 타격음, Hole 조사. 지반탐사(GPR) ·터널 총 길이의 약 61.5% ·최대 공동 깊이 : 34cm ·공동채움물량 : 약 1,470 m^3	·탐사방법 : 측량에 의한 직접조사(라이닝 철거 후) ·터널 총 길이의 약 85% ·최대 공동 깊이 : 440cm ·공동채움물량 : 약 17,76 m^3

* 이영남외 2명(2001) 운용중인 도로터널의 개수사례(남산 2호 터널), 한국터널지하공간학회 논문집, Vol. 3, No. 4, 한국터널지하공간학회 pp. 80~98- 별첨 11

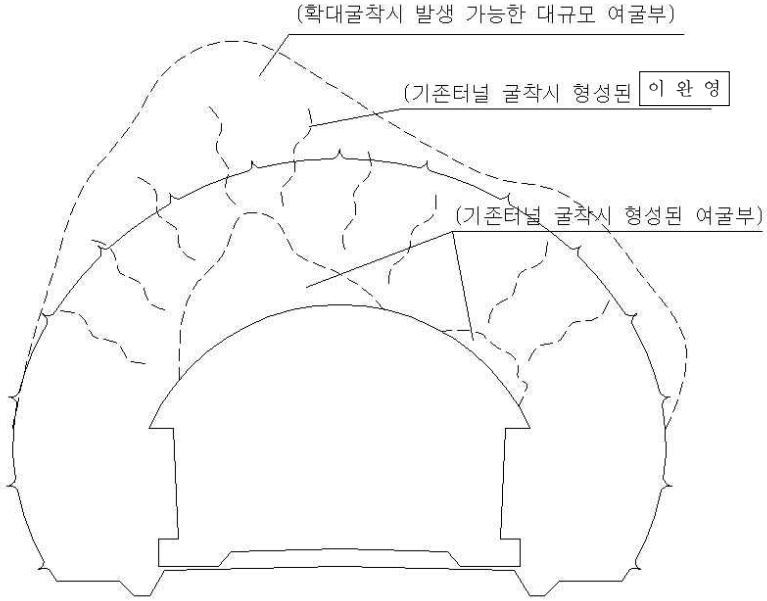


그림 3.4.1 확대터널 굴착에 의하여 발생 가능한 여굴

(석진호 외 3명(2006) 기존터널 확대굴착시 기 발생된 과다여굴부에 대한 보강공법 시공사례, 제6회 터널 시공기술 향상 대토론회 논문집, 대한토목학회- 별첨 12)

3.5 시공 중 조사

시공 중 조사는 시공전의 조사결과에 기초하여 지반의 문제점이나 불명확한 점에 대하여 대응하기 위한 조사 및 시공 중 발생한 문제점에 대한 해결방법을 도모하기 위한 조사로 필요한 경우 신속하게 수행할 수 있도록 계획되어야한다. 시공 중에는 공사를 안전하며 합리적으로 행하는 것 이외에 막장이나 주변지반 및 지보구조 등에 있어 관찰・계측・시험・등의 필요한 조사를 실시하고, 이 결과는 빨리 설계・시공에 반영하도록 한다.

특히 터널의 확대시공에서 배면공동에 의한 대규모 여굴이 발생한 사례에 대한 보고사례(석진호 등, 2006)가 있어 운영중인 터널의 확대시공에서는 라이닝 철거 등의 시공과정에서 가능한 정밀한 공동의 규모를 확인하여야 안전한 터널 시공을 도모할 수 있도록 하여야 한다.

4. 설계

4.1 설계일반

기존터널의 단면확대 설계는 터널 이용자, 공사중의 안전성 및 경제성을 고려하여야 한다.

시공중 터널 이용자의 안전성 확보에 있어서는 다음과 같은 점에 주의하여 설계하여야 한다.

① 신설 우회로를 확보할 수 있는 경우에는 신설 우회로 주변의 비탈면 및 도로구조물의 안정성을 확보한다.

② 방호시설을 설치하는 경우에는 기존터널의 건축한계, 교통량 분석, 방호시설의 연장 등을 검토한다.

③ 교통흐름을 유지하면서 터널 단면확대 시공으로 하는 경우에는 협소한 공간에서 작업, 차량의 통행이 있는 점 등에 대한 작업원의 안전확보에 대해서도 검토하여야 한다.

터널 설계에서는 그림 4.1.1에 나타낸 바와 같이 기본요소 결정후의 조사 및 현장에서의 관찰, 계측결과가 당초 설계조건에 적합하지 않는 경우 공사의 안전성 및 경제성을 확보하기 위해 필요에 따라 확대의 구조, 지반 등급을 변경하는 것이 중요하다.

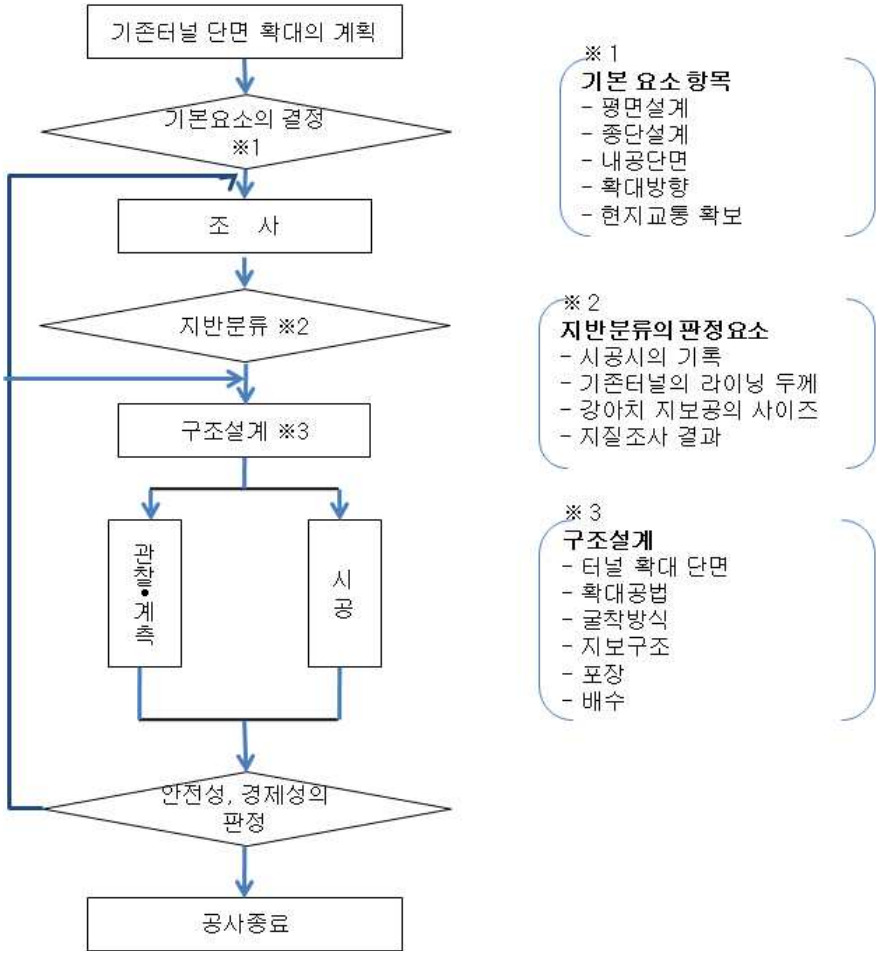


그림 4.1.1 확대 터널의 설계와 시공의 흐름

*2 조사: 기존 터널의 지보시스템, 보조공법, 지반조사결과, 점검 및 진단 결과,
*3 확대터널 설계

4.2 지반분류

기존터널의 확대 설계·시공에 있어서는 지반조사, 실내 및 현장시험, 시공중 보완조사 등의 결과에 기술적 판단을 추가하여 지보재설계를 위한 지반분류를 행하여야 한다.

기존터널의 확대 설계·시공시에는 신설터널과 마찬가지로 터널설계기준, 터널표준시방서 및 도로설계편람에 나타낸 지반분류에 근거하여 기존터널의 시공시의 기록(배면공동의 여부 및 규모, 과다여굴의 여부 및 규모 등등), 지표지질답사·보링 조사 및 물리탐사 등의 조사결과에 따라 지반을 판정을 하기로 한다.

또한 터널의 설계 또는 시공시기별로 활용된 설계기준이나 표준시방서를 바탕으로 지반판정을 얻을 수도 있다.

4.3 확대단면 및 확대공법의 선정

4.3.1 확대단면 및 확대공법

본 기술지침(안)에서 언급하는 확대공법에 의한 내공단면은 확대의 요구성능으로 결정되는 단면과 시공조건을 고려한 단면과의 비교에 의해 결정하는 것으로 한다. 단면확대 공법에서는 도로규격에 의한 건축한계로 내공단면이 결정될 경우(설계상 직접비만 고려) 굴착기 등의 시공장비가 효율적으로 가동하기 위해 필요한 공간 확보하여야 하므로 내공단면이 좁은 경우가 있다. 시공조건에 의해 내공단면이 결정되는 경우(직접비와 간접비, 현장 실행등등) 내공단면이 넓은 확대터널 쪽이 시공성이 좋기 때문에 공사기간 단축 및 공사비 감소로 경제적으로 되는 경우도 있다.

이를 위해 확대 터널의 단면규격은 건축한계의 내공단면과 시공효율을 고려한 내공단면과의 비교를 통해 결정되어야 한다.

기존터널의 단면확대에는 요구성능에 따라 공법을 선정할 필요가 있다.

기존터널의 단면확대는 요구성능에 따라 부분확대 또는 전체확대를 결정할 필요가 있다. 단면 확대 공법의 일반적인 흐름은 그림 4.1.1에 나타낸 바와 같다.

기존터널의 확대단면은 요구성능에 의해 1) 높이의 확대, 2) 폭과 높이의 확대로 분류된다.

높이 확대는 터널 전후의 도로 구조, 종단구배를 고려하여 종단선형을 낮출 수 있는 경우에는 하부부분 확대공법, 종단선형을 낮출 수 없는 경우에는 상부부분 확대공법을 적용한다.

폭과 높이의 확대는 도로중심선을 크게 이동할 수 있는 경우에는 편측확대공법, 이동할 수 없는 경우에는 양측확대공법을 적용한다.

(1) 하부부분 확대공법

하부부분 확대공법은 터널 전후의 도로 높이를 낮추는 것이 가능하거나 공사중 교대교통이 가능한 조건의 경우에 적용하는 공법이다. 이 공법의 개념도를 그림 4.3.1에 나타내었다.

본 공법은 기존 터널의 폭원을 변경하지 않고 포장두께의 축소나 지반고의 낮춤에 의해 내

공 높이만을 확대하는 공법이다. 전후의 도로의 접속부 연결에 필요한 점과 터널이 상대적으로 낮아지는 점이 있어 배수구배, 시설을 검토할 필요가 있다.

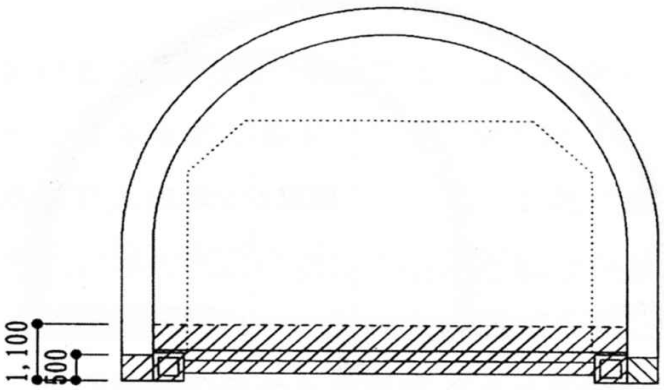


그림 4.3.1 하부확대공법의 개념도

(2) 상부부분 확대 공법

상부확대공법은 터널 전후의 도로 높이의 낮춤이 불가능하거나 터널 연장의 일부가 확대에 장애가 되는 적용하는 공법이다. 이 공법의 개념도를 그림 4.3.2에 나타내었다.

본 공법은 기존터널의 폭원을 변경하지 않고 아치부의 일부 혹은 전면의 내공 높이만을 확대하는 공법이다. 작업 공간이 좁고 비효율적이기 때문에 전체 확대공법과 비교해서 공사비가 높아지므로 비교적 시공연장이 짧은 경우에 적용 가능하다.

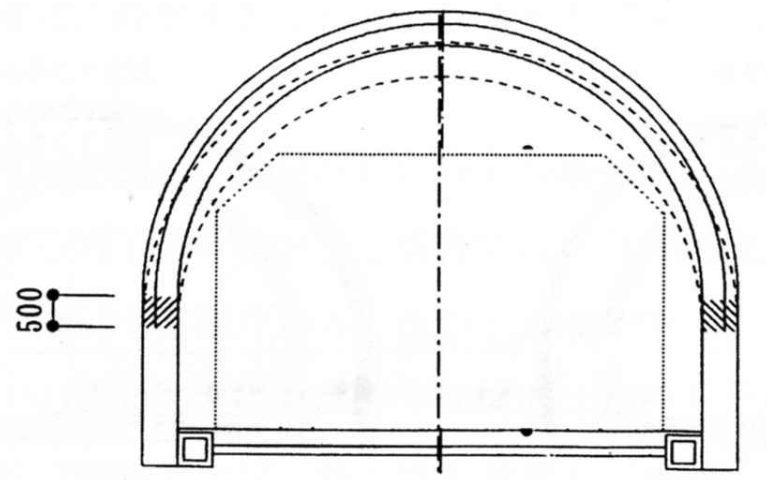


그림-4.3.2 상부확대공법의 개념도

(3) 편측확대 공법

편측확대 공법은 터널 전후의 도로선형을 변경하거나 터널 중심의 이동을 크게 할 수 있는

조건에 적용하는 공법이다. 이 공법의 개념도를 그림 4.3.3에 나타내었다.

본 공법은 기존터널의 편측에 확대단면을 확보하는 공법이며 대형기계의 이용이 가능하기 때문에 시공성은 좋다. 단, 기존 터널라이닝을 지보재의 일부로서 이용하기 때문에 기존 터널라이닝의 건전도, 접속부에 대해 구조 및 안정성의 검토가 필요하다.

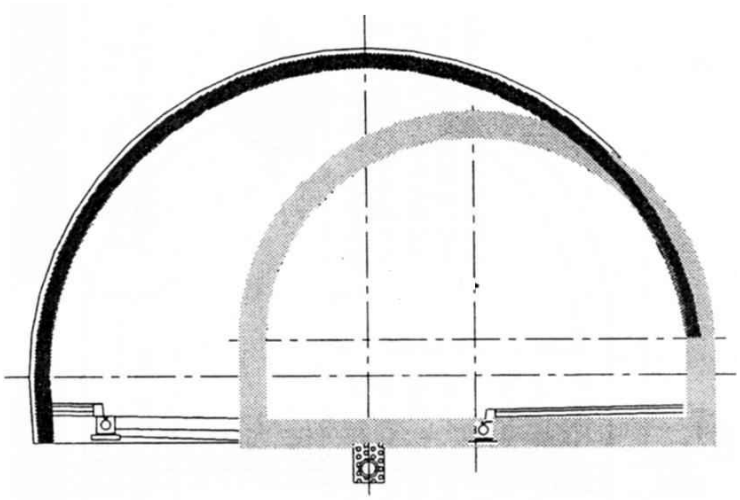


그림 4.3.3 편측확대공법의 개념도

(4) 양측확대 공법

양측확대 공법은 터널 중심을 크게 이동할 수 없는 경우에 적용하는 공법이다. 이 공법의 개념도를 그림 4.3.4에 나타내었다.

본 공법은 기존 터널을 중심으로 동심원상으로 좌우균등하게 확대하는 공법(동심원확대형)과 터널 중심을 조금 이동하여 양측으로 확대하는 공법(센터이동형)이 있다. 시공을 용이하게 하기 위해 편측의 확대폭은 굴착기를 사용할 수 있는 폭으로 하는 것이 바람직하다.

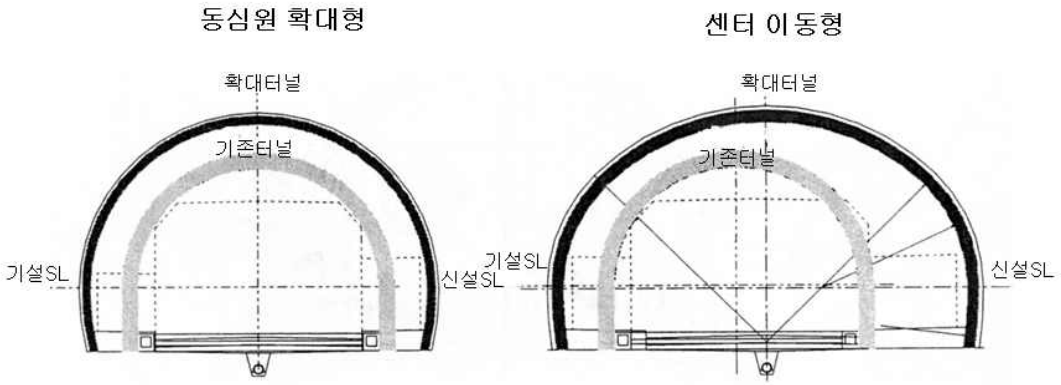


그림 4.3.4 양측확대 공법의 개념도

4.4 굴착방법의 선정

굴착방법에는 인력굴착, 기계굴착, 발파굴착, 파쇄굴착 등이 있으며 설계에서 정한 확대공법(하부확대공법, 상부확대공법, 편측확대공법, 양측확대 공법)에 따라 지반조건, 기존터널의 크기·거리, 시공환경, 공기 등을 충분히 고려한 검토가 필요가 있다. 또한 교통을 보존한 상태에서 기존터널을 확대하고자 하는 경우에는 반드시 기존터널 내부에 교통보호공을 설치해야하기 때문에 작업공간이 협소하게 되므로 이에 대한 충분한 검토가 필요하다. 일반적으로 터널확대 시 굴착방법 선정 시에는 다음 사항 등을 고려하여야 한다.

① 원지반의 지보능력을 최대한 활용할 수 있으며 안정성, 경제성 및 시공성이 우수한 굴착방법
② 작업공간, 지반조건, 지하수 유입정도, 굴착단면의 크기와 단면형상, 터널 연장, 근접구조물 유무와 주변 환경영향(진동, 소음 및 지표침하 등)

그림 4.4.1에 국외 터널확대 시 적용된 굴착방법을 터널연장과 암반의 강도에 따라 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 암반의 강도가 큰 경우에는 터널연장과 상관없이 발파굴착 적용되고 있으며 암반강도가 낮고 터널확대 굴착연장이 작을수록 범용굴착기를, 터널확대 굴착연장이 길어질수록 전용굴착기를 적용하는 것을 알 수 있다. 이는 암반강도가 클 경우 기계굴착 시 굴착시간이 길어져 경제성이 저하되고, 암반강도가 낮은 경우에는 터널연장이 길어질수록 범용장비에 비해 굴착효율이 좋은 전용장비를 지속적으로 사용하므로 초기 전용장비 투입비용이 크지만 범용장비를 적용하는 경우에 비해 경제성을 확보할 수 있기 때문으로 볼 수 있다.

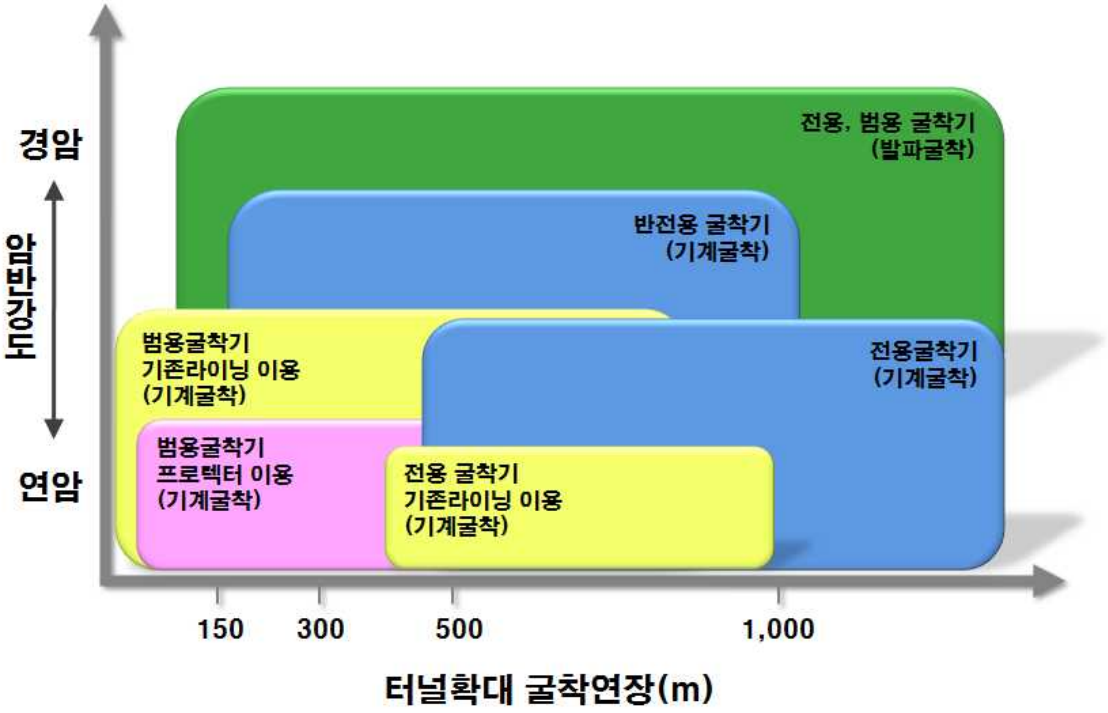


그림 4.4.1 암반강도별 터널확대연장별 적용굴착방법(F.Tonon, 2010)

4.5 교통보호공(Protector)

4.5.1 일반사항

교통의 흐름을 유지하는 상태에서 기존터널을 확대 하는 경우에는 내부 통행차량의 안전을 최우선으로 고려하여야 하며 이를 위해 교통보호공(이하 프로텍터라함)을 설치하고 터널 이용자의 안전을 확보할 필요가 있다.

프로텍터는 기존터널의 상태에 의해 설치연장, 규모 등이 다르기 때문에 기존터널의 상황을 충분히 파악한 후에 방호공의 연장, 규모를 검토할 필요가 있다. 프로텍터에는 강재를 이용하는 경우와 기존터널 라이닝을 이용하는 경우가 있으며 강재프로텍터를 이용하는 경우에는 고정식과 이동식으로 구분할 수 있다.

이동식 프로텍터를 고려할 경우에는 다음의 사항 등을 검토하여 적용성을 종합적으로 검토하여야 한다.

① 기존터널의 노선 배치상 확대 시 곡선부가 발생되지 않는가?
② 발생된 곡선부에서 이동식 프로텍터의 이동이 가능한가?
③ 확대터널의 노선계획을 변경할 수 있는가?
④ 프로텍터를 곡선부 이동이 가능하도록 변경할 수 있는가?

일반적으로 이동식 프로텍터는 고정식에 이동가능한 수단을 접합한 형태이므로 고정식 설계 시 고려사항을 모두 포함하게 된다. 따라서 다음에 설명할 프로텍터의 설계와 관련된 내

용에서는 별도의 언급이 없는 이상 이동식 프로텍터를 대상으로 한다. 이동식 프로텍터의 설계흐름의 예를 그림 4.5.1에 나타내었다.

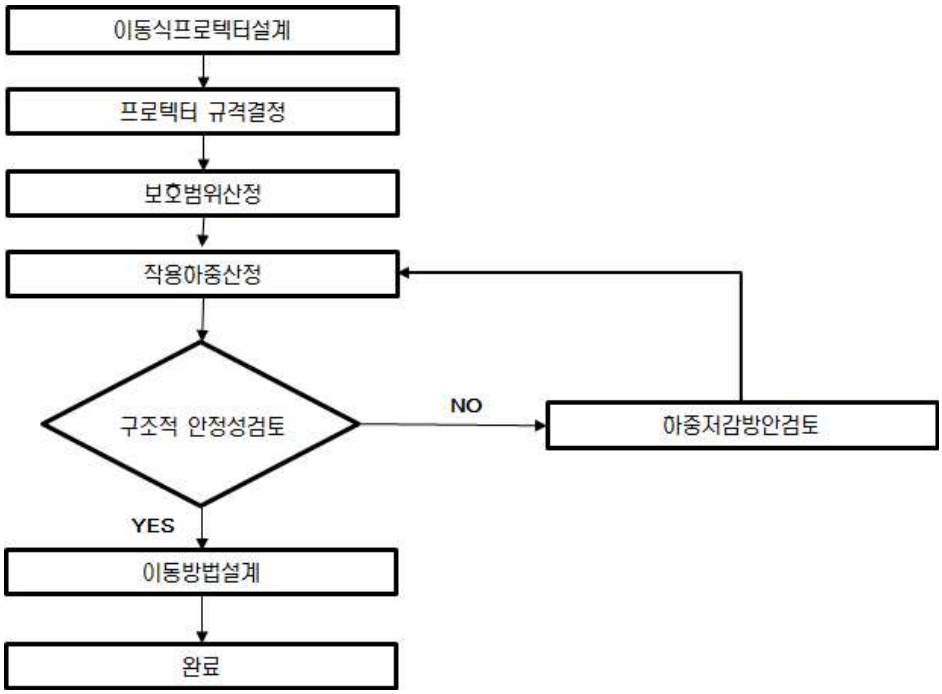


그림 4.5.1 이동식프로텍터 설계 흐름 예

4.5.2 프로텍터의 규격

프로텍터의 규격은 차량이 통행되는 내부와 굴착작업이 진행되는 외부조건으로 구분할 수 있다. 그림 4.5.2에 프로텍터 규격 결정 시 고려사항을 나타내었는데 프로텍터의 내부조건은 내부폭과 높이로 볼 수 있으며 대상 터널에 적용되는 건축한계와 통행차량의 규모 및 특성 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 한다. 또한 굴착, 보강 및 버력처리에 사용될 장비의 제원으로부터 장비의 운용 등 작업공간의 확보를 위해 필요한 최소 공간 등을 종합적으로 고려하여 프로텍터의 규격을 설정하여야 한다.

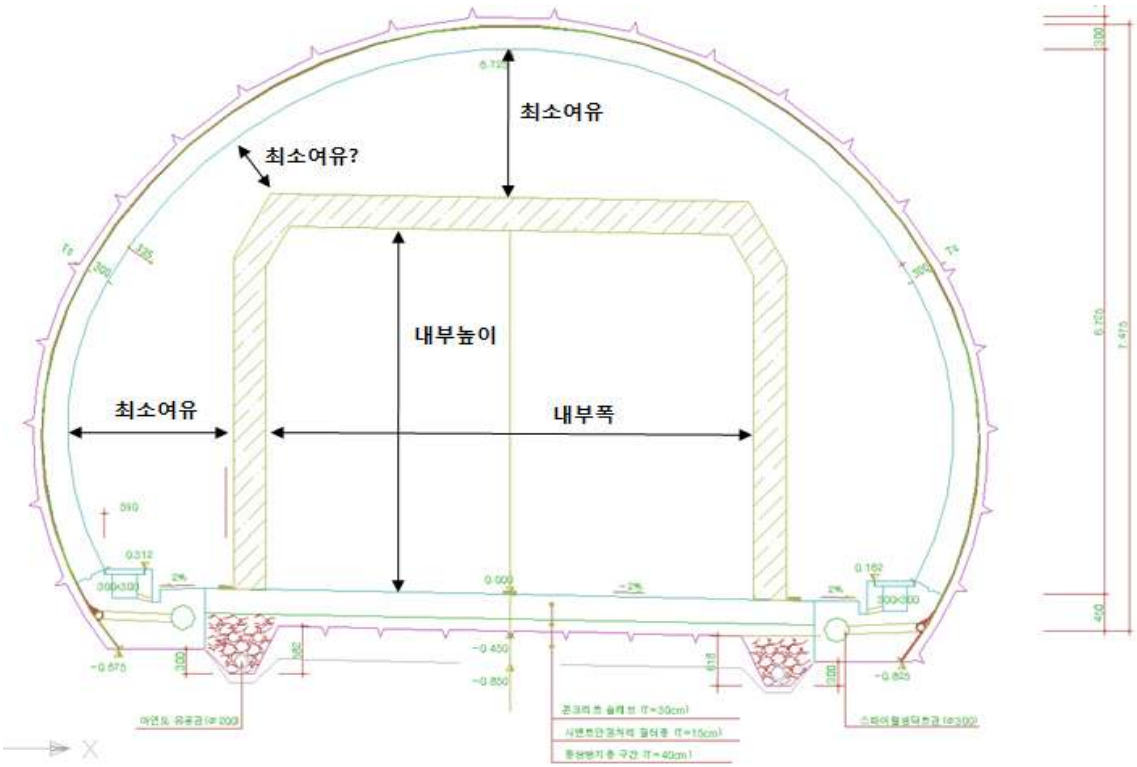


그림 4.5.2 프로텍터의 규격 결정 시 고려사항

4.5.3 보호범위산정

프로텍터를 이동식으로 하는 경우에는 통행차량의 안전을 확보하기 위해 그림 4.5.3과 같이 프로텍터의 보호범위를 산정하고 이를 고려하여 프로텍터의 길이를 산정하여야 한다. 터널 확대 시에는 굴착된 지반과 지보재가 분담하던 응력이 주위의 지반으로 재분배되므로 기존터널의 지반과 지보재에 추가적인 응력이 작용하게 된다. 이로 인해 막장에 인접한 기존터널의 안정성이 저하되므로 굴착에 의한 영향범위를 합리적으로 산출하여 프로텍터로 보호해야하며 필요 시 사전보강을 적용하여야 한다.

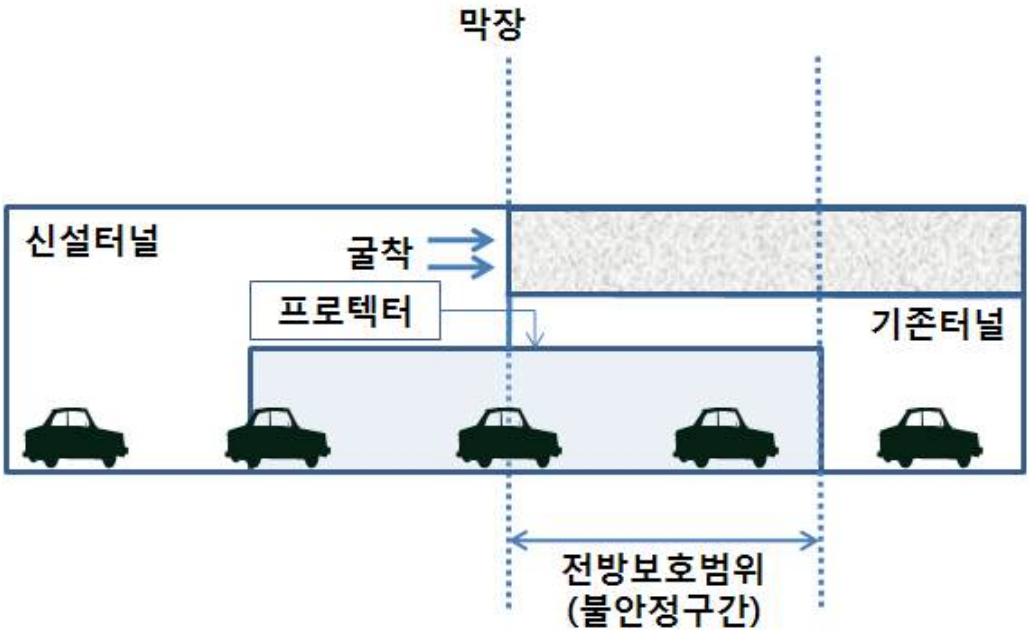


그림 4.5.3 프로텍터 보호범위 산정

굴착에 의한 영향범위는 수치해석에 의해 산정할 수 있는데 이 경우 다음의 사항 등을 고려하여야 한다.

① 3D 모델링을 통한 3차원적 접근필요(2D는 한계가 있음)
② 기존터널 설계 및 시공자료
③ 기존터널 시공 시 발생된 지반공학적 문제점
④ 현재의 지반상태(이완구간, 지하수 등)
⑤ 현재의 지보상태(숏크리트, 록볼트, 콘크리트라이닝 등)

프로텍터의 설치연장은 지반상태를 검토하고 결정하는 것이 필요하지만 굴착에 의한 기존라이닝에의 영향범위는 기시공 사례에서는 막장전방에 최대 1.5D~2D(D:터널직경)정도, 수치해석 결과에서는 막장전방에 0.5D 정도의 결과를 보이고 있다. 또한 지금까지의 실적에서는 2차로를 3차로로 확대할 때에 고정식 프로텍터를 채용한 경우 확대 단부부터 1D의 범위까지 방호를 행한 예, 터널폭 약 4.5m를 약 10m의 터널로 확대할 때에 이동식 프로텍터를 채용한 경우에서는 막장면의 전후에 0.4D 정도 길이의 프로텍터를 이용한 예가 있다.

4.5.4 구조적 안정성검토

1) 설계하중

프로텍터에 작용하는 하중은 그림 4.5.4와 같이 크게 굴착, 버력처리 및 천공 장비에 의한 장비하중과 굴착된 버력에 의해 발생되는 하중 및 발파시 버력의 충격에 의한 충돌하중과 충돌완화 장치 등 기타 구조물의 설치에 의한 하중으로 분류할 수 있다. 각 하중은 지반 조건, 굴착방법 및 장비의 조합 등에 따라 달라질 수 있으므로 각 케이스별로 가장 큰 하중조합을

산정하여 프로텍터를 설계하여야 한다.



그림 4.5.4 프로텍터에 작용하는 하중

프로텍터를 이동식으로 하는 경우에는 그림 4.5.5와 같이 크게 장비의 반출입구간과 장비운용구간, 전방보호구간으로 구분할 수 있다. 장비의 반출입구간은 장비운용을 편리하게 하고 장비를 변경시킬 때 작업시간의 손실을 최소화하기 위한 구간으로 여러 가지 방법을 적용할 수 있으며 장비의 운용구간은 막장천공, 숏크리트 타설과 같은 굴착 사이클에 따라 장비를 대시시키는 구간이다. 전방호호구간의 경우 굴착에 의한 버력의 낙하나 기존터널 라이닝의 탈락으로부터 내부 통행차량을 보호하기 위한 구간이 된다. 따라서 각 구간의 특성에 맞게 설계하중을 적용하여야 경제적인 설계가 될 수 있다.

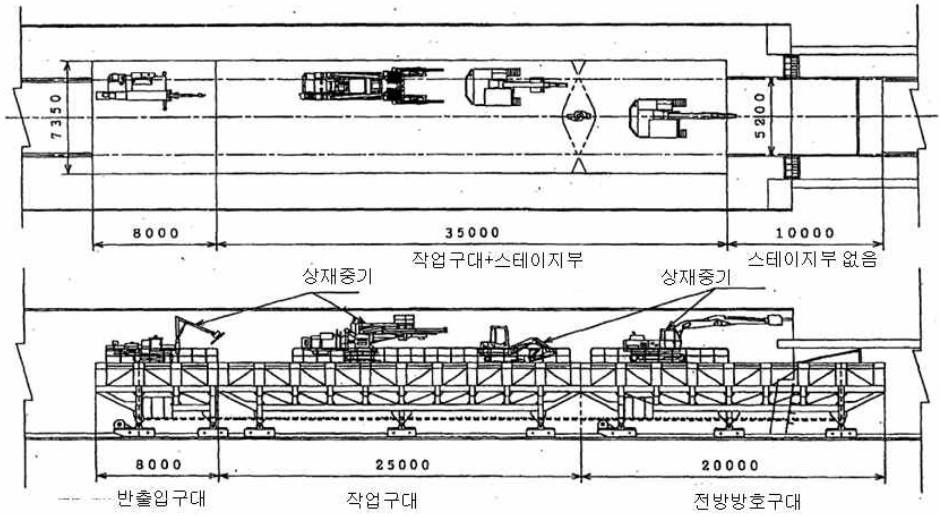


그림 4.5.5 이동식 프로텍터의 예(Shikishima tunnel)

장비하중, 버력하중 및 기타 구조물에 의한 하중은 장비의 제원과 1회 굴진장 및 굴착단면 등에 의해 쉽게 산정이 가능하다. 장비반출입 구간의 경우 프로텍터의 설치연장은 작용하는 중기에 적합한 연장으로 한다. 또한 작용하는 중기가 안전하게 승강할 수 있는 구조로 한다. 장비를 운용하는 구간의 경우 프로텍터는 터널의 굴착기, 쇼벨카, 록볼트 타설기, 숏크리트 기계 가운데 이의 최대 하중을 방호공의 황단방향의 스팬 중앙에 작용시켜 설정한다. 단, 시공방법에 따라서는 각각의 중기가 동시에 프로텍터 위에서 작업하는 경우나 기계동작에 의한 동적인 하중이 작용하는 경우 등도 고려되기 때문에 각 시공방법의 상황에 따라 프로텍터의 구조 안정성에 대하여 확인할 필요가 있다. 프로텍터의 설치연장은 공법에 의해 시공이 원활하도록 연장하도록 한다.

국내 노후터널의 경우 대부분 3등급 이상의 암반에 건설되었으므로 기계식 굴착보다는 발파식 굴착이 될 것으로 예상된다. 암석을 발파할 때에는 발파에 의한 충격압과 가스압에 의해 발파된 버력이 큰 속도로 프로텍터에 충돌하게 되는데 이로 인해 큰 충돌하중이 발생되게 된다. 따라서 전방보호구간에 대한 프로텍터 설계 시 충돌하중을 정량적으로 산정하는 것이 안정성과 경제성면에서 매우 중요하며, 충돌하중은 발파된 버력의 크기와 탄성특성 및 충돌속도에 의해 좌우되는데 다음의 식에 의해 산정이 가능하다.

$$F_{max} = 1.7672(E^*)^{2/5}(\gamma)^{-1/15}(W)^{2/3}(H)^{3/5} \qquad (4.5.1)$$

여기서, E_1, E_2 : 프로텍터와 버력의 탄성계수(N/m^2)

ν_1, ν_2 : 프로텍터와 버력의 Poisson's ratio

γ: 버력의 단위중량(N/m^3)

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$$

W: 버력의 중량(N)

H: 낙하높이(m)

발파시 버력은 충격압과 가스압에 의해 초기 속도를 가지게 되며 충격압과 가스압에 의한 초기속도를 버력의 높이로 환산하면 에너지 보존법칙에 의해 다음과 같다.

$$H_s = \frac{v_s^2}{2g} \qquad (4.5.2)$$

여기서, H_s: 발파시 충격압에 의한 버력의 환산 높이

$$H_g = \frac{v_g^2}{2g} \qquad (4.5.3)$$

여기서, H_g: 발파시 가스압에 의한 버력의 환산 높이

따라서 버력의 초기높이가 H_o일 때 버력의 낙하에 의한 충돌하중은 최종적으로 다음과 같다.

① 기계식 굴착시 버력의 자유낙하에 의한 충돌하중

$$F_{\max} = 1.7672(E^*)^{2/5}(\gamma)^{-1/15}(W)^{2/3}(H_o)^{3/5} \qquad (4.5.4)$$

② 발파에 의해 충격압과 가스압을 받은 버력 충돌하중

$$F_{\max} = 1.7672(E^*)^{2/5}(\gamma)^{-1/15}(W)^{2/3}(H_o + H_s + H_g)^{3/5} \qquad (4.5.5)$$

버력의 중량은 굴착에 의해 파쇄되는 암괴의 크기로 결정되기 때문에 지반조건이나 시공방법을 고려해서 굴착시에 발생하는 암괴의 입도 분포특성을 고려하여 설정할 필요가 있다. 발파굴착을 하는 경우에는 발파 충격하중에 견딜 수 있는 구조로 할 필요가 있다. 이 경우 발파의 충격압·가스압에 의한 암괴속도를 상정한 후에 충격하중을 산정한 예가 있다. 기존의 연구결과에 의하면 정상규모의 발파에서 비산석의 초기속도는 10~30m/s이다(대한주택공사 연구처, 1993).

교통을 유지하더라도 프로텍터 내부에서는 차량이 빠르게 이동하지 못하기 때문에 차량에 의한 충돌하중이 발생할 가능성은 매우 희박 혹은 매우 적을 것으로 판된되나 프로텍터의 안정성은 운전자의 생명과 직결되는 중요한 문제이기 때문에 차량 충돌하중에 대해 검토할 필요가 있다. NCHRP Report 86(1970)에는 차량 충돌하중 산정 시 자주 인용되는 다음 식과

같은 Olson 모델이 제시되어 있다.

$$\max F_{lat} = \frac{\pi}{2}\left(\frac{V_I^2 \sin^2\theta}{2g[A\sin\theta - 0.5B(1-\cos\theta) + D]}\right)W \qquad (4.5.6)$$

여기에서, $\max F_{lat}$: 최대 충돌하중, V_I: 충돌 전의 차량 속도, A: 차량 앞면으로부터 무게 중심까지의 거리, B: 차량 폭, θ: 충돌각도, D: 방호울타리의 횡방향 변위, W: 차량 중량.

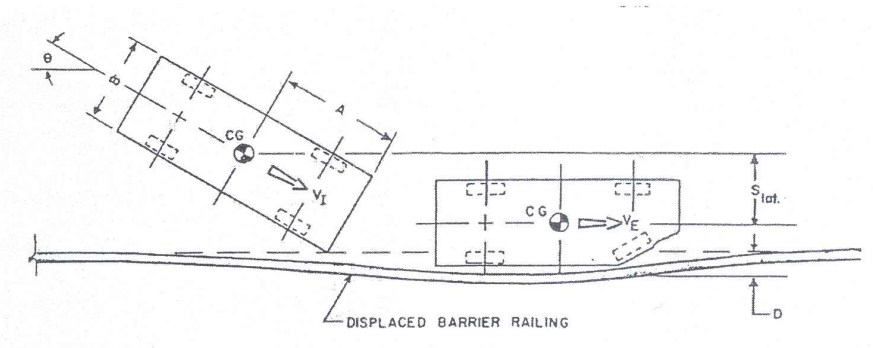


그림 4.5.6 Olson 모델에서의 기호

2) 안정성검토

프로텍터의 안정성을 검토하는 방법으로 수치해석적인 방법과 실험에 의한 방법이 있다. 장비와 버력의 적재하중을 검토하는 경우에는 사하중으로 고려하여 정적 구조해석을 통해 안정성을 평가할 수 있지만 버력의 충돌에 대해 안정성을 평가하기 위해서는 그림 4.5.7과 같이 충돌상황을 모사할 수 있는 동적해석 프로그램이 필요하며 이때 버력의 경우 탄성체로 가정하는 것이 안전측 설계가 된다.

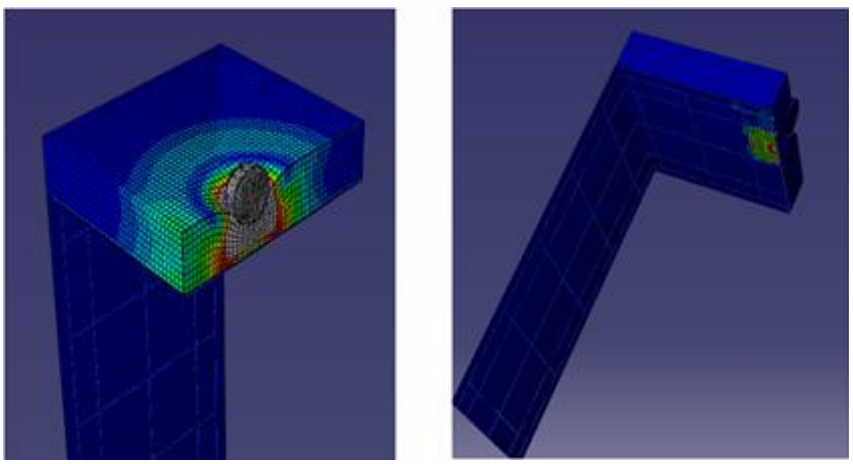


그림 4.5.7 프로텍터 충돌해석 예

3) 하중저감방안

발파 버력의 충돌하중은 매우 클 수 있으므로 하중을 저감할 경우 프로텍터의 비용을 경제적으로 할 수 있다. 충돌하중을 저감하는 방법은 발파 전에 저감하는 방법과 발파 후에 저감하는 방법으로 나눌 수 있다.

발파 전 하중을 저감하는 방법에는 상기의 충돌하중 산정식에서 볼 수 있듯이 버력의 크기를 조절하는 방법과 충격압과 가스압에 의한 초기속도를 조절하는 방법을 들 수 있다. 버력의 크기를 조절하기 위해서는 발파 설계 시 다음의 사항 등을 고려할 필요가 있다.

① 장약공 천공패턴 : 터널축과 직각방향 천공이 비산영향에 유리
② 전색장의 최소화
③ 정확한 기폭시차의 유지가 중요(국내 DS 전기뇌관의 경우 시차번호가 높아질수록 기폭초시차 오차가 증개) : 전기뇌관 등을 고려
④ 비산방향을 가급적 프로텍터가 없는 방향으로 제어
⑤ 굴진장 저하

비산속도를 감소시키기 위해서는 다음의 사항 등을 고려할 필요가 있다.

① 저폭속 폭약의 사용
② 적정한 최소저항선 산정필요 : 사용폭약 및 대상암반에 대한 이자유면 시험발파 필요
③ R/B가 있을 경우 비산속도 감소에 더 좋을 수가 있음

발파 후 하중을 저감할 수 있는 방법으로는 상기의 충돌하중 산정식에 나타낸 것과 같이 피충돌체의 탄성특성을 변경함으로서 가능하게 된다.

4.5.5 이동방법검토

이동식 프로텍터를 사용할 경우 공기의 단축, 공사비 절감, 그리고 작업시 차량 통행이 가능하여, 차량 정체 등의 교통체증을 줄일 수 있는 이점이 있으며 이동방법을 검토하기 위해서는 다음의 사항 등을 고려하여야 한다.

① 프로텍터의 이동을 용이하게 하기 위해 프로텍터의 폭만큼 레일 부설 : 좌우 상·하부 터널 확대 굴착을 위해 세그멘트의 제원 및 수량을 결정하고, 각 세그멘트의 이동을 용이하게 하기 위해 철제차륜(steel wheel) 등을 설계, 적용함.
② 프로텍터의 이동을 위한 추진장치 또는 견인장치가 필요함.
③ 고무차륜(tire wheel)의 경우 단일 세그먼트일 경우에는 가능하지만, 여러 개의 세그먼트로 구성되어 있을 경우 이동 또는 작업시 충격, 진동 등으로 발생될 수 있는 센터링(centering) 문제가 발생될 수 있음
④ 레일 간격(폭)은 프로텍터의 폭에 따라 결정되며, 레일의 형상은 프로텍터에 설치되는 철제차륜의 형태에 따라 달라짐. 따라서 레일의 형상이 결정될 경우 그에 따른 레일 기

초의 설계 및 부설이 이루어짐

⑤ 레일이 철도레일과 같은 형상인 경우 레일을 기초에 고정시키는 방법에 대한 검토가 필요함

⑥ 일본의 오쿠라 터널 예(아래 그림 참조)와 같이 레일의 상단면이 편평할 경우 프로텍터의 폭이 고정된 상태이기 때문에 가드레일 형태의 레일기초도 가능할 수 있음



그림 4.5.8 오쿠라터널 가드레일 기초 예

4.6 지보시스템

4.6.1 지보시스템의 구성

공용중인 터널의 확대에서 지보시스템은 터널의 형상, 규모, 시공여건 등을 종합적으로 판단하여 결정되어야 하며, 터널의 지보재로는 강지보재, 록볼트, 숏크리트 등으로 구성된다.

지보재의 주요 기능은 굴착면 주변 지반으로 하여금 역학적인 지반아치 기능을 발휘할 수 있도록 하는 것이므로 지보재는 터널 주변지반의 특성에 부합하도록 결정하여야 하며, 시공중이나 완공 후에도 터널의 안정성을 유지할 수 있어야 한다. 특히 운용 중인 터널의 확대는 기존 터널 시공에 의한 터널 주변의 응력이완이 이미 발생하였으며, 공동(여굴)의 존재 및 협소한 작업공간이 신설터널 건설과는 다른 점이라 할 수 있다.

4.6.2 숏크리트

운용 중인 터널의 확대시공에서는 운용 중인 차량 보호를 위한 보호공(프로텍터)가 이용되어 터널의 어깨 및 측벽부에 협소한 작업공간이 형성될 수 있으며, 록볼트 설치가 어려운 경

우에는 숏크리트 두께를 증가시켜 터널의 안정성을 확보할 수 있다.

확대터널의 측벽부에 록볼트 설치가 어려운 경우에 대한 수치해석 결과에 의하면 측벽부에 대한 숏크리트의 두께를 증가시키는 경우 변위제어효과는 미소하나 숏크리트 응력은 숏크리트의 두께 증가에 따라 작용력이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 적절한 숏크리트 두께의 증가로 터널 안정성을 확보할 수 있으며, 기타 내용은 "관련기준 및 시방서"를 따른다.

4.6.3 록볼트

운용 중인 터널의 확대시공에서는 운용 중인 차량 보호를 위한 프로텍터가 이용되어 터널의 어깨 및 측벽부에 협소한 작업공간이 형성될 수 있으며, 이런 경우 시공성을 고려하여 경사 록볼트 및 짧은 볼트를 연결하여 설치할 수 있다. 다음 2가지 조건을 고려하여 한다.

① 록볼트의 길이 및 배치간격 등은 "관련기준 및 시방서"를에 제시된 기준을 따르며, 확대터널의 거동 및 시공조건을 고려하여 한다.
② 경사 록볼트를 설치하는 경우 록볼트의 설치각도는 터널의 안정성을 고려하여 설치각도, 설치간격 및 록볼트의 길이를 결정하여야 한다.

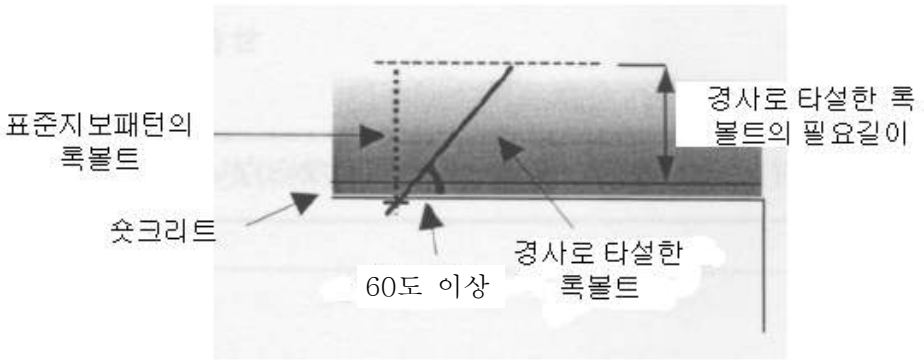


그림 4.6.1 경사 록볼트 시스템

운용 중인 터널의 확대 굴착에 따른 록볼트의 효과 및 거동에 대한 모형실험, 수치해석 등에 의하면 다음과 같다.

① 록볼트의 설치각도는 90~75° 범위가 가장 좋은 효과를 발현하나, 불가피한 경우에는 설치각도 60°이하까지 가능하다.
② 표준 록볼트의 보강효과와 동등한 보강효과를 확보하기 위해서는 경사 록볼트의 설치간격 및 록볼트의 길이를 변경할 수 있다. 록볼트의 설치간격으로 종방향 설치각격은 15%정도 감소하는 경우에 동등 이상의 보강효과를 발현할 수 있으며, 록볼트 길이는 30%정도 증가되는 경우에 동등 이상의 보강효과를 발현할 수 있다.

4.6.4 강지보재

강지보재에 대한 내용은 "관련기준 및 시방서"를 따른다.

4.6.5 라이닝

라이닝에 대한 내용은 "관련기준 및 시방서"를 따른다.

4.7 굴착보조공법

굴착보조공법은 지보공법으로 대처할 수 없는 경우 터널 및 인접 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 터널 주변지반의 전단강도 증가, 지표면 침하방지, 지반의 투수성 감소 등을 목적으로 한다. 운용 중인 터널 확대의 경우에 터널 주변지반이 연약하여 터널의 안정성 및 인접 구조물의 안정성을 확보하기 위한 보조공법은 "관련기준 및 시방서"를 따른다.

건축년도가 오래된 터널의 경우 배면공동(여굴)이 존재 할 수 있으며, 배면공동은 확대터널 시공 시 기존 라이닝 안정성 및 확대터널의 안정성에 영향을 미치므로 적절한 사전 보강대책을 수립하여한다. 보강대책은 공동의 규모 및 지반상태에 따라서 결정되어야 하며, 보강대책으로는 다음과 같은 방법을 고려할 수 있다.

① 사전 록볼트(확대터널 시공에 지장이 없도록 섬유강화플라스틱 제질의 보강재 사용 검토) 보강,

② 사전 공동 채움 그라우팅(채움 그라우팅은 공동의 연장 및 규모를 고려하여 그라우트를 선택하여야 하며, 공동의 규모가 크거나 연장되어 있는 경우에는 적절한 구간에 차단벽을 형성하여 효율적인 그라우팅 작업을 도모하여야 한다.)



그림 4.7.1 기존터널 확대 시 노출된 배면공동 사례

4.8 갱구의 설계

4.8.1 갱구부 설계의 일반사항

기존터널을 확대하는 경우 갱구부의 설계는 안전성, 경제성, 시공성, 경관 등을 고려하여 결정하여야 한다. 갱구위치는 횡단방향으로는 크게 변경할 수 없지만 종단방향으로는 갱구부의 안전성, 경제성, 시공성, 경관 등을 아래 사항에 대하여 고려하여 검토를 하고 최적 위치를 결정하여야 한다.

① 갱구부로 시공되는 범위
② 터널 중심 간격 변화
③ 갱구 비탈면의 안정
④ 갱구부의 지보구조와 보조공법
⑤ 갱구부 접속 구조물과의 배수처리 연계방안
⑥ 터널 연결부의 접속

4.8.2 갱구부로 시공되는 범위

기존 터널을 확대하여 시공하는 경우 기존터널 보다 단면의 폭이 현저하게 증가하게 되므로 기존 설계에서 고려한 갱구부의 범위는 아래의 그림 4.8.1의 개념에 따라 갱구부가 확장된

다. 따라서 설계 단계에서 갱구부의 3차원 거동과 구조적인 취약성을 고려하여 갱구부의 확장된 범위까지의 보강대책을 고려하여야 한다.

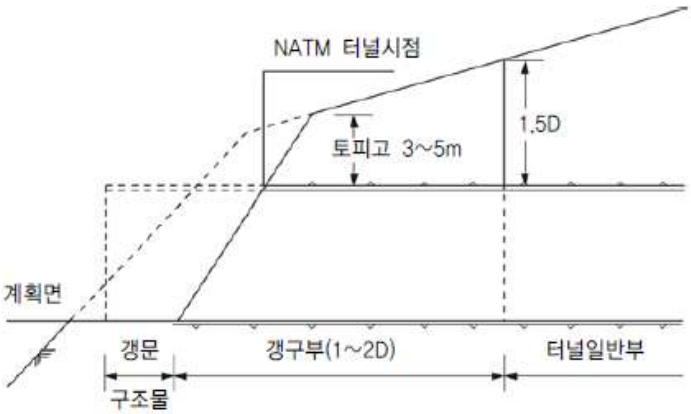


그림 4.8.1 표준적인 갱구부의 범위

4.8.3 터널 중심 간격의 변화

터널을 2개 이상 병렬 또는 인접하여 계획하는 경우에는 터널단면의 크기, 굴착대상 지반의 공학적 특성, 발파진동 영향, 터널 전·후 구간의 용지보상 규모, 지장물 및 민원물건 등을 감안하여 터널굴착공사로 인한 주변 지반거동 및 발파진동이 인접터널에 나쁜 영향을 미치지 않도록 상호 충분히 이격시켜야 한다. 터널 확대에 따라 병설터널의 중심 간격 변화가 불가피 하므로 이에 따른 안정성을 확보할 수 있도록 굴착방법, 굴착공법 및 보강공법 등 적절한 대책을 수립하여야 한다.

터널 상호의 영향에 대해서는 지반 조건이나 시공법에 따라 다르지만 지반이 완전 탄성체라는 가정 하에 중심 간격을 굴착 폭의 2배정도, 연약한 지반일 경우 5배를 확보하면 거의 상호 영향이 없는 것으로 알려져 있으며 최근에는 풍화암 정도의 지반상태에서 터널의 구조적 안정성과 용지편입, 터널 보강공사비 등의 경제적 상관관계를 검토한 결과에 따라 터널 순간격(pillar width)을 굴착 폭의 1.5배 정도로 적용하고 있다. 터널 확대가 터널 필라부에서 계획되는 경우 필라폭의 감소로 필라부 안정성의 검토가 필요하며 때에 따라 적절한 보강대책 등을 수립하여야 한다. 우측 길어깨부를 확대하는 경우 터널의 최대 폭이 증가하므로 병설터널 상호간 이격거리 축소에 따른 터널의 영향을 확인하여야 한다.

4.8.4 갱구 비탈면의 안정

터널 단면의 확대에 따라 기존 갱구부의 비탈면의 형상 변경은 불가피하다. 기존 터널 설계시 갱구 비탈면은 공사비와 발생토의 최소화를 위하여 통상적으로 필요한 안전율이 확보되는 최소공사비로 처리가 가능한 갱구 비탈면의 설계를 적용한다. 따라서 터널 확대시에는 갱구부의 추가적인 비탈면 절취에 따른 안전율의 변화가 때로는 비탈면의 안정성에 심각한 영

향을 미칠 수 있으므로 비탈면 절취 상황 변화에 따른 안정성을 면밀히 검토하여야 한다.

갱구부 시공 시 지반이완과 비탈면 붕괴가 발생할 위험이 있는 경우에는 터널굴착에 앞서 낙석가능성 및 깎기 비탈면 안정검토를 수행하여 필요 시 대책을 수립하여야 한다. 갱구 설치 시 토피는 최소 3~5m 정도를 확보한다. 또 깎기면은 필요에 따라 숏크리트나 록볼트에 의한 보강을 하여 충분한 경사면의 안정성을 확보한다.

하지만 터널을 확대함으로서 비탈면 안정에 큰 영향을 미치거나 보강을 위해 과다한 비용이 소요되는 경우에는 갱구의 앞쪽으로 라이닝을 축조하여 주변을 복토함으로서 불필요한 절토를 하지 않는 방법도 있다.

4.9 환기, 방재 및 조명설비

기존터널을 확대하는 경우에는 공사가 완료되고 새로운 시설이 기능을 유지하기까지 터널의 시설기능을 유지시키는 방법을 검토하도록 한다. 터널 단면 내에는 부속시설 이외에 매설관이 설치되어 있는 경우도 있기 때문에 이를 포함한 시설이설 계획이 필요하다.

환기시설에는 운영 중 교통에 필요한 환기시설과 시공 중 필요한 공사용 환기시설은 나누어 검토하도록 한다.

기존 터널의 단면을 확대할 때에는 기존터널의 연장이 길어질수록 현재의 부속시설의 공사중의 기능유지에는 과대한 비용이 소요된다. 그러므로 시설단계에서 기능유지에 대하여 충분히 검토하도록 한다.

교통보호공 내에서의 환기, 방재 및 조명설비도 원래의 기능이 유지될 수 있도록 계획하여야 하며 교통보호공의 적용에 따라 터널위험도 지수의 변화가 발생할 수 있으므로 방재등급의 재평가를 시행하며, 방재등급의 변화에 따른 시설물의 추가 설치도 고려하여야 한다.

기타 검토사항에 대해서는 관련 규정을 따른다.

4.10 안전시설

4.10.1 안전시설 일반

기존터널을 운영 중 확대하는 경우에는 현지교통의 원활한 흐름과 안전을 확보하기 위해 필요한 보전설비를 설치하여야 한다. 작업원의 작업환경을 쾌적하게 유지하고 안전을 확보하기 위한 시공 중 안전시설을 갖추도록 하여야 한다.

4.10.2 공사 사전 예고

터널 공사에 착수하기 전에 통행차량 및 주변주민에게 공사착수를 알리는 광고를 하여야 한다. 설계단계에서는 공사 중에 높이 제한 등으로 기존터널에 설치하는 프로텍터 내부를 주행할 수 없도록 특수차량 등의 우회로를 검토하고 필요에 따라서는 사전 예고 시 우회로를 명시한 지도 등의 광고를 하도록 한다. 필요 시 그림 4.10.1과 같이 높이 제한을 경고하는 체

크바를 운용할 수도 있다.



그림 4.10.1 체크바 설치 예

4.10.3 교통규제 및 유도

기존터널을 운영 중 확대하는 경우에는 차로규제 및 차로변경 등의 교통규제가 발생한다. 설계단계에서는 교통규제 및 교통유도의 방법에 대해서 현지교통의 원활한 흐름과 안전 확보에 주안을 두고 검토하도록 한다.

5. 시공

5.1 시공일반

기존터널의 단면 확대 공사도 일반적인 토목공사와 마찬가지로 설계서, 시방서, 도면 등의 설계도서에 근거하여 시공하여야 한다. 특히 기존터널의 단면 확대를 하는 경우에는 터널 내에 방호공 등을 설치하여 터널 이용자의 안전 확보를 충분히 고려한 후에 시공하여야 한다.

터널은 연장방향으로 긴 지중구조물이며, 지질·용수 등의 지반조건을 전 구간에 걸쳐 정확히 예상하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 일반적으로 불확실성을 많이 남긴 채 시공을 하는 특수성을 갖고 있으며, 기존터널의 단면 확대시에는 작업공간에 제한을 받으므로 시공계획의 입안 시 작업의 안전성, 효율성에 대해서도 충분히 검토하여야 한다.

5.2 시공계획

5.2.1 일반사항

시공계획은 공사규모와 공사기간, 지반조건과 주변여건, 공사용 기계와 각종 설비 및 시공법과 시공순서 등을 포함하여 안전하고 경제적으로 계획되도록 하여야 한다. 공사 중 문제발생 시에는 시공계획의 수정과 변경이 가능하도록 하여야 한다. 시공계획은 터널 확대 공사의 공사규모와 기간, 지반조건과 주변 환경 등을 고려하여 안전성과 시공성을 우선적으로 고려하여 안전하고 경제적인 계획이 되도록 하여야 한다. 터널확대공사의 시공계획서에는 다음의 사항이 포함되어야 한다.

① 공정계획
② 시공방법
③ 시공 장비의 사양 및 장비 사용계획
④ 작업장 배치도

공사구간을 분할하여 시공 및 관리할 필요가 있을 경우에는 공사규모, 공사기간, 작업장여건, 확대공사의 규모 등을 고려하여 효율적인 시공과 안전한 시공이 가능하도록 분할하여야 한다.

5.2.2 시공계획

시공계획은 설계 도서를 기준으로 하여 현장 조건에 적합하도록 수립하여야 한다. 터널의 시공 시에는 현지의 특수성 등을 충분히 감안하여 아래의 각 항목에 대하여 상세한 시공계획을 세우도록 한다.

1) 시공법
① 사전보강(배면주입공, 록볼트공 등)
② 굴착방식(폭파굴착, 기계굴착 등)
③ 확대공법(하부확대공법, 상부확대공법, 편측확대 공법, 양측확대 공법)
④ 방호공 설비(프로텍터, 기존터널의 라이닝 이용)
⑤ 갱내운반방식(타이어 방식, 벨트콘베이어 방식), 굴착암 처리계획
⑥ 지보구조(숏크리트, 록볼트, 강지보공, 라이닝 등)
⑦ 인버트
⑧ 기타(방수공, 배수공, 포장공, 부대공)

2) 공사용 설비
① 급기설비(컴프레셔 용량, 대수)
② 급배수설비(수원, 급수, 배수, 오탁수 처리 등)
③ 급기설비(환기방식, 송풍기 등)
④ 방호공(이동식 작업대차, 프로텍터)
⑤ 전기설비(수배관, 조명 등)
⑥ 기타(콘크리트 플랜트, 재료보관소, 창고 등)

3) 환경 영향 저감계획
① 작업장 환경 및 안전관리 계획
② 소음 및 진동 예방계획
③ 폐수처획리 계획
④ 건설 폐기물 처리계

공기, 작업내용 등을 감안하여 적절한 인원배치 계획을 수립한다. 또한 법령 등에 정해진 책임자 선임을 한다.

5.2.3 공정계획

공정계획은 공사 기간 내 시공을 완료할 수 있도록 수립하고 유사한 공사의 실적 통계를 근거로 자원투입 및 배분계획과 연계하여 수립되어야 한다. 공정계획에는 공사착공을 위한 사전 행정처리 기간과 작업장 및 공사장용 용지확보를 위한 보상기간 등의 준비 일정이 포함되어야 한다. 공정계획은 공사규모, 순서, 시공방법 및 환경영향을 고려하고 전산화된 상용의 공정관리기법에 의한 작업수행이 가능하도록 하며 수립된 공정계획의 정당성과 일정계획, 진도계획, 자원계획, 예산 및 비용분석 평가의 기초자료가 될 수 있도록 수립하여야 한다. 각 작업별로 사이클 타임을 산정하여 공기 공정표를 작성한다.

5.2.4 시공 중 조사

터널확대 공사를 시행하기 전에 먼저 기본설계 및 실시설계 단계에서 실시한 상세 지반조사 결과를 검토하고 확인하여야 한다. 상세지반조사 결과가 부족한 경우, 추가로 지반조사를 실시하여야 하며 추가지반조사 내용에는 지표지질조사·시추조사·물리탐사, 현장 및 실내시험 등을 포함한다. 추가지반조사 결과가 설계도서와 상이한 경우 별도의 대책을 수립하여야 한다.

시공 중에는 설계당시 조사가 불충분했던 부분까지 상세히 조사를 실시하고, 이를 설계조건과 비교·분석하여 공사에 반영하여야 한다. 시공 중에도 지질, 자연환경, 주변 환경변화 등의 조사를 상시 실시하여 설계 조건과 대비함으로써 공사에 만전을 기하도록 하여야 한다.

용수, 온도, 환기문제 등의 제반사항에 대해서도 정기적인 조사를 실시하여야 한다.

공사 중 지반 또는 지질 기술자에 의한 막장 지질조사(face mapping)를 항상 실시하여야 하며 필요한 경우에는 감지공(probe hole), 선진수평시추, 물리탐사 등의 지반조사를 실시하여야 한다. 또한, 일반터널과 달리 측벽부에 대한 매핑을 실시하며 과거 건설되었을 당시의 여굴 및 배면 파악을 위한 측량 및 탐사를 실시토록 한다.

5.2.5 작업장 계획

작업장 및 작업터널 계획은 확대 터널의 선형, 토피, 확대터널 형상, 연장 및 지반조건, 주변 도로현황, 프로텍터의 조립 및 설치, 해체를 종합적으로 고려하고 주변 지역의 지형, 토지이용 현황, 환경조건 등을 고려한다. 작업장의 위치 및 규모는 공사용 설비의 배치와 사무실, 창고, 가공장, 작업원의 숙소 등을 고려하고, 차량의 운행에 지장을 초래하지 않도록 면밀히 검토하여야 한다.

안전관리 책임자는 공사 중 작업자 및 통행차량에게 발생 가능한 위험요인을 사전에 분석하여 안전한 작업공간이 확보되도록 하여야 한다. 작업장과 사토장 등의 공사 부지는 해당공사 완료 시 배수공, 조경 및 비탈면 보호공 등의 복원대책을 마련하고 시행하여야 한다.

5.2.6 사토장 계획

사토장 규모는 계획 사토량을 일괄 처리할 수 있는 충분한 면적이 되도록 계획하여야 하며, 계획 사토량에는 확대 굴착 시 발생한 버력량과 기타 토공 잔여량이 포함되어야 한다. 기존터널 해체 과정에서 발생한 콘크리트 폐기물 등은 환경처리가 필요하므로 별도의 공간을 확보한 후 임시 적치할 수 있도록 하여야 한다. 발생버력은 골재 또는 유용토로써 활용하여 사토량을 줄일 수 있도록 계획하여야 한다. 사토장의 입지는 현장주변의 토지이용 현황 및 도로상황을 사전 조사하여 대상용지의 확보가능성과 운반거리, 환경대책 등을 감안하여 선정되어야 한다.

사토장은 사전 배수계획이나 기존 수로에 대한 대책을 수립하여 강우 시 지역 침수나 토사유출, 오염물 유출이 발생하지 않도록 계획되어야 한다.

5.2.7 환경보전

터널확대 공사시 주변의 환경에 영향을 미치는 요인으로서는 소음. 진동, 지하수위의 변동, 오수, 수질오탁, 지표면의 침하 등이 있다. 공사에 선행하여 이러한 현상이 예측되는 경우에는 사전에 조사를 하고 대응책을 검토해둘 필요가 있다. 기존 터널 해체시 발생하는 숏크리트 및 콘크리트라이닝 잔재는 폐기물 처리를 위하여 별도의 처리가 필요하므로 확대 굴착 시 발생하는 암버력 등과 혼합되지 않도록 분리 시공, 분리 반출 등의 적절한 조치를 하도록 한다.

확대터널 공사에서는 시공 중 발생하는 버력, 분진, 공사용 차량으로부터의 배기가스 등에 의해 터널 갱내 환경의 악화가 예상되기 때문에 일반차량의 원활한 교통흐름이나 공사에 방해가 되지 않도록 적절한 조치를 강구하도록 한다.

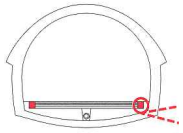
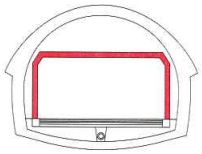
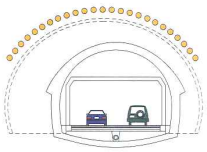
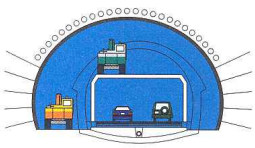
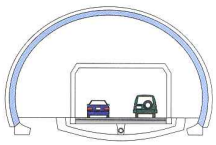
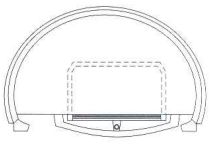
5.3 굴착

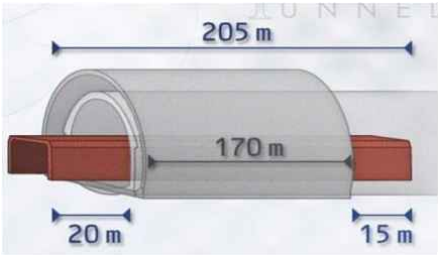
5.3.1 굴착일반

굴착 시에는 설계에서 정한 확대공법에 따라 지반조건, 입지조건, 공기 등을 충분히 고려하여 굴착방식, 분할, 시공기계 등에 대하여 선정하도록 한다. 굴착방식(기계굴착, 폭파굴착 등), 분할굴착, 시공기계(범용기, 전용기)의 선정에는 설계에서 제시된 확대공법(하부확대공법, 상부확대공법, 편측확대공법, 양측확대 공법)에 따라 지반조건, 기존터널의 크기·거리, 시공환경, 공기 등을 충분히 고려한 검토가 필요하다.

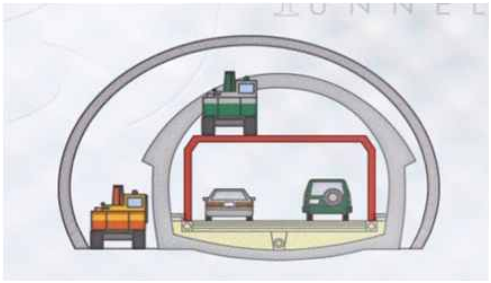
표 5.3.1에는 일반적인 터널 확대 공법의 시공순서를 나타내었으며 그림 5.3.1에는 해당 그림을 나타내었다.

표 5.3.1 터널 확대공법 시공순서

시공순서	시공 개요도	주요사항
① 기초공법		- 프로텍터 연결 기초부 시공
② 프로텍터 설치		- 강재 프로텍터 설치 - 야간 교통통제 후 설치
③ 사전보강		- 터널 확대에 따른 사전 보강작업 (필요시)
④ 굴착 및 지보재 설치		- 발파천공 - 발파 및 환기(20분간 교통통제) - 기존 라이닝 및 지보재, 버럭처리 - 지보재 시공
⑤ 방수막, 공동구, 가포장 및 조명설치		- 방수막, 공동구 설치 - 가포장 시공 - 확대터널 구간 조명설치
⑥ 프로텍터 이동		- 프로텍터 이동(야간통행 금지)
⑦ 콘크리트 라이닝 설치		- 콘크리트 라이닝 타설 (확대굴착이 완료후)
⑧ 프로텍터 제거 및 포장		- 프로텍터 제거 - 배수공 및 포장 완료 - 부대시설 설치



<터널 확대 개요(측면)>



<터널 확대 개요(단면)>



①프로텍터 제작



②프로텍터 설치



③사전보강



④기존 라이닝 제거



⑤굴 착



⑥인버트 타설 및 포장

그림 5.3.1 오쿠라 터널(하자마 건설) 시공순서 전경

5.3.2 버력처리

터널 확대공사가 이루어지는 공간은 작업공간이 협소하여 신설되는 터널굴착 공사에 비하여 버력처리 시간이 많이 걸리기 때문에 버력처리를 효율적으로 하는 것이 공사기간과 비용에 직결된다. 따라서 발생되는 버력의 크기와 버력량을 고려하여 버력상차장비, 버력운반기계, 기타설비 등이 전체적인 균형이 맞도록 계획한다.

버력 상차 장비는 단면크기, 1회당 굴착량 등을 고려하여 운반기계와 균형을 맞추어 선정하도록 한다. 버력 상차 장비의 기종은 막장의 크기에 따라 다르며 또한 타이어방식과 레일방식에 의해도 다르다. 확대 시공에서는 작업 공간의 확보가 어렵고 대형차량의 사용이 곤란하므로 기계 선정 시 시공성을 고려할 필요가 있다.

버력운반방식은 굴착공법・굴착단면・구배・굴착연장 등을 고려하여 원활하며 효율적이 되도록 한다. 단면 확대 터널의 시공에서는 작업 공간의 제약 때문에 작은 덤프나 벨트 콘베이어 등의 사용을 검토할 필요가 있다.

신설터널로부터의 버력은 타이어방식으로 사토장이 비교적 근거리인 경우는 직접 운반하는 경우가 있지만 단면 확대 터널의 경우는 대형차량의 사용이 곤란하기 때문에 갱구부근에 임시 적치장을 두는 것을 검토한다. 임시 적치장의 규모는 긴급의 경우에 대비하여 적치량에 여유가 있도록 할 필요가 있다. 발생하는 버력은 기존터널의 라이닝 콘크리트, 지보공 등의 산업 부산물이 포함되어 있으므로 반출 전에 분별이나 2차처리가 필요하므로 가능한 굴착단계에서 분리 굴착할 수 있는 방법을 고려할 필요가 있다.

5.3.3 인버트

인버트를 시공해야할 경우에는 일반차량의 교통에 지장을 미치지 않도록 적절한 방법으로 확실하게 시공을 하여야 한다. 신설터널에서 인버트 시공은 라이닝 타설 전에 선행하여 실시되는 것이 일반적이나 터널 확대 공법을 적용하기 위해서는 터널 단면을 확대하고 프로텍터를 철거하기 전에 운행 중인 차량의 안전 확보를 위하여 콘크리트라이닝 타설을 선행하게 됨에 따라 콘크리트라이닝 타설 후 인버트 시공이 될 경우도 있다. 이 경우에는 인버트로서의 기능이 충분히 발휘될 수 있도록 콘크리트라이닝 타설 전에 바닥 콘크리트 타설을 선행하여 시공을 하는 등 콘크리트 라이닝으로 부터 축력이 확실히 전달되도록 하고, 공동이 발생하지 않도록 확실히 타설해야 한다. 또한 일반차량을 운행시키면서 인버트를 시공하기 때문에 인버트의 시공은 한쪽 차로씩 하든지 이동식 가교를 이용한 시공방법이 가능하지만 이러한 방법 모두 일반차량의 교통에 대한 배려를 검토할 필요가 있다.

5.4 교통보호공

5.4.1 교통보호공 일반

차량의 통행을 차단하지 않고 기존터널 단면 확대 공사를 시공에 있어 터널 이용자의 안전을 확보하기 위해서는 교통보호공을 설치하여야 한다. 교통보호공에는 강재로 제작된 형태의 프로텍터를 설치하는 방법과 기존터널의 라이닝을 이용하는 방법이 있으며 확대 공사 시 선정공법에 대한 심도 있는 검토가 필요하다. 교통보호공은 다음의 기능을 가지고 있다.

① 터널 이용자의 안전 확보
② 시공 장비의 대차 또는 지지대
③ 시공기계, 자재 등의 승강설비 기능

하부확대 공법에 있어서는 터널 보행자의 보도부 확보를 위하여 이동식 가교의 설치도 검토할 필요가 있으며 교통보호공을 설치하는 경우 최소건축한계의 확보 여부를 검토한다.

5.4.2 프로텍터

프로텍터 설치 시 다음의 사항을 유의하여야 한다.

① 프로텍터의 조립·해체는 사용 중인 도로와 인접하여 확보되는 조립·해체 장에서 이루어지기 때문에 확대공법에 따라 필요한 공간을 조립, 해체 장으로 예상해 둘 필요가 있다.
② 조립・해체 장은 1블록씩 조립한 프로텍터를 기존터널까지 운반하기 때문에 가능한 한 터널 갱구에서 가까운 장소를 확보하는 것이 바람직하다.
③ 프로텍터의 이동・설치는 1블록씩 공용도로를 이용하여 갱내로 운반하는 경우가 많기 때문에 작업은 야간・통행금지에 따라 이루어져야 한다. 그러므로 사전에 규제에 대해 관계기관과의 협의가 필요하다.
④ 프로텍터는 차량통행의 안전 및 작업자의 안전을 위한 필수장치이며 발파시 버력의 충격을 연속적으로 받는 장치이므로 변형 등에 대한 계측을 실시하도록 한다.
⑤ 갱외에서 제작한 프로텍터의 갱내 설치시에는 일정시간 교통을 통제할 수밖에 없으므로 이때의 교통통제 대책에 대한 계획을 수립해야 한다.
⑥ 장대터널의 경우 신설터널과 마찬가지로 환기, 방재, 조명설비, 통신 등의 설비 계획을 수립해야 한다.

5.5 지보재 설치

운용 중인 터널의 확대 시공에서 지보재 설치에서는 시공 장비 운용 공간이 차량 보호공 상부와 측면 확장부에서는 매우 협소하므로 장비의 운용 중에서는 안전관리원이 상주하여 작업원의 안전을 확보할 수 있도록 하여야 하며, 시공 장비의 운용으로 발생하는 소음, 분진 및

매연이 공용 중인 차량 및 보행자에게 영향을 미치지 않도록 주의하여 시공하여야 한다.

또한, 자재의 운반 및 장비의 이동에서도 운용 중인 차량 통행량을 고려하여 주변 교통흐름에 최소의 영향이 미치도록 계획을 수립하여야 하며, 시공 장비도 실제 확보되는 작업 공간, 장비 제원 등을 면밀히 검토하여 선정하여 공기의 지연 및 기 설치된 시설물의 파손을 방지하여야 한다.

운용 중인 터널 확대시공에서는 계획된 보호공 상부와 운용중인 차로 측면에서 장비의 운영 및 시공이 진행되어야 하므로 장비의 선정 및 운영방법을 결정하는 것이 매우 중요한 항목이다. 통상적인 2차로 터널에서 3차로 터널로 확대하는 경우에는 통상적으로 터널 시공에 적용되는 장비의 적용에는 문제가 없으나 굴착기의 경우에는 원활한 작업공간 확보에 어려움이 있을 것으로 예상되었으므로 실제 시공조건에서 적용가능한 시공장비를 선정하여야 한다. 지보재 설치를 위한 시공장비 선정을 위해서는 다음의 사항들을 주로 검토하여야 한다.

① 장비이동 : 기존 터널내 차로를 규재하면서 환경공해 및 교통장해요인을 최소화하여 시공설비 기계 및 작업원을 방호벽등으로 격리하고 상호 안전을 확보하여 가설 지정된 진입로를 이용해 장비를 이동한다.

② 시공 장비 운용 : 작업 공간이 기존 터널에 비해 협소하여 지정된 장비 조정원 외에는 장비 작동을 금지하고, 협착 및 충돌 등 안전 사고발생 우려가 있기 때문에 작업 반경내 접근하지 못하게 작업 안전 휀스 철치 및 신호수등 안전원을 배치시킨다. 강지보공 설치 위치 지반이 취약하여 침하가 발생될 가능성이 있을 경우에는 취약지반을 제거하고 콘크리트나 강재를 깔고 시공하여 지반 침하로 인한 지보재의 침하를 방지한다.

③ 환기계획 : 공사 중 터널내에서의 필요 환기량은 터널연장, 굴착단면적, 사용화약량, 공사용기계의 시공방법에 따라 달라지며, 공용중인 터널의 확대에서는 공용중인 차량에서 발생하는 매연까지고 고려하여 적용한다.

④ 배수계획 : 현장에서 발생할 수 있는 폐수는 크게 터널 굴착 중 유출되는 지하수, 점보드릴 천공수, 배치플랜트에서 발생하는 폐수로 구분할 수 있다. 폐수 처리는 유도관 또는 유도로를 설치(역구배시 양수기설치) 후 1차 간이 집수정에 집수하여 수중pump로 폐수처리시설까지 압송시켜 약품처리 후 PH를 5.5~8.5 이내로 만든 후 방류시켜며 슬러지는 건조시킨 뒤 폐기물 처리업체에 위탁 처리한다.

⑤ 소음 및 진동처리 방안 : 시공 중에는 지보재 설치에 의한 천공소음 및 장비 운영에 의한 소음이 발생하므로 공용중인 차량에 대한 안내문을 설치하여 소음 및 분진에 의한 사고를 예방하여야하며, 일정한 관리기준을 설정하여 관리하여야 한다.

⑥ 자재운반 : 운용 중인 터널의 확대에서는 터널 내부의 작업공간이 협소하고, 자재의 운반도 운용 중인 차량의 흐름을 최대한 유지할 수 있도록 적절한 자재의 운반계획을 수립하여야 한다.

5.6 굴착보조공법 설치

운용 중인 터널의 확대 시공에서 굴착보조공법의 시공에서는 운용 중인 차량흐름을 최대한

유지할 수 있는 장비의 이동계획을 수립하여 한다. 또한, 연약한 지반조건에 수행되는 차수 그라우팅 및 천단보강공법 시공에서는 기존 라이닝으로 가압 그라우팅에 의한 그라우트 유출이 발생 할 수 있으므로 감시원을 배치하여 감시하여한다.

굴착보조공법을 시공하기 위해서는 다음의 사항들을 검토할 필요가 있다.

① 시공 장비 운용 : 작업 공간이 기존 터널에 비해 협소하여 지정된 장비조정원 외엔 장비 작동을 금지하고, 협착 및 충돌 등 안전 사고발생 우려가 있기 때문에 작업 반경내 접근하지 못하게 작업 안전 휀스 철치 및 신호수등 안전원을 배치시킨다.

② 천공시 분진 및 소음 : 천공 작업중 발생 되는 비산 먼지 및 분진등이 발생할수 있으므로 천공 장비에 집진기를 설치하거나, 천공홀에 물을 분무하여 비산먼지 및 분진발생을 억제시킨다. 천공 작업시 발생하는 소음은 외부에서 측청하여 관리기준을 초과할 경우에는 반드시 방음벽을 설치하여 기존 터널 통행 차량에 피해가 없도록한다.

③ 용수 출현에 대한 대처방법 : 천공이나 주입 작업중 발생되는 용수, 천공수 및 주입액누출로 의하여 기존 터널 통행 차량에 사고 유발요인이 될 수 있기 때문에 가설막을 별도 설치하고, 누출된 용수 및 오폐수들은 유도배수로를 설치하여 집수정으로 유도 배수한다.

④ 주입 작업시 고소작업으로 안전한 작업대나 이동용 승강 장비를 사용하여 시공한다.

⑤ 자재 보관 및 운반 : 터널내 작업 공간이 매우 협소한 관계로 터널 외부에 별도의 자재 야적장을 만든 후 부식 및 훼손이 되지 않도록 포장하여 별도 관리를 하고, 보조공법 시공에 필요한 자재만 작업장에 반입시킨다.

5.7 환기, 조명 및 배수설비

터널설계기준, 시방서 등 관련 규정을 따른다.

5.8 안전시설

5.8.1 작업원의 안전확보

작업원의 통행을 위하여 안전한 통로를 확보하여야 한다. 통로는 작업차량 통행으로부터 안전을 보장 받을 수 있는 곳에 설치하여야 하며 항상 평탄한 노면과 소요의 조도를 유지하여야 하며 자세한 사항은 터널설계기준, 시방서 등 관련 규정에 따른다.

5.8.2 터널이용자의 안전 확보

기존터널의 자동차의 통행을 허용하면서 터널 확대를 하는 경우에는 터널이용자의 안전을 확보함과 동시에 공사의 안전과 원활한 진척을 위해 다음의 보전설비를 검토하도록 한다. 기존터널의 통행을 허용하면서 터널 확대를 하는 경우에는 교통규제, 차로변경에 의해 터널 이용자의 통행에 영향을 미친다. 그러므로 공사의 사전예고, 공사규제 등의 공사에 관한 정보를

제공하는 것으로 터널 이용자가 안심하고 통행하도록 하는 것이 필요하다. 교통규제, 차로규제, 통행차량의 높이 제한에 대하여 현지교통의 원활하며 안전한 흐름을 확보하기 위해 규제내용을 알리는 안전시설의 설치를 검토하여야 한다. 이러한 안전시설로는 다음과 같은 것이 있다.

① 교통 통제중의 대기 시간 확인이 가능한 안내 간판(그림 5.8.1)
② 교통 통제용 신호기(그림 5.8.2)
③ 높이 제한의 확인용 게이트나 감지 센서(그림 5.8.3)



그림 5.8.1 교통규제중의 “대기시간”의 표시



그림 5.8.2 교통규제용의 신호기



그림 5.8.3 차량통행제한 확인용 게이트

특수차량 등의 공사 중에 통행제한을 받는 차량의 우회로에 관해서도 사전에 결정해서 공사 중에는 우회로를 안내할 필요가 있다.

5.9 계측

교통을 보존하면서 터널을 확대할 경우 터널은 단면이 확대된 부분과 프로텍터가 설치된 부분, 기존터널로 나뉘어지게 된다. 단면이 확대된 부분의 경우 계측은 신설터널과 유사하다. 기존의 시공실적 등에서는 터널확대 굴착에 따른 영향 범위는 막장전후방 2D구간이므로 아래의 계측빈도를 참고로 하여 변위의 수렴이 확인될 때까지 적절히 조정한다.

① 막장 전방 3D～막장 전방 2D 구간 : 1회/2일
② 막장 전방 2D～막장 후방 1D 구간 : 1회/1일
③ 막장 후방 1D～막장 후방 3D 구간 : 1회/2일
④ 막장 후방 3D～변위 수렴 시까지 : 1회/3일

프로텍터가 설치된 부분은 프로텍터로 인해 공간이 협소하여 기존의 계측방법으로는 계측의 분석이 어려울 수 있으므로 계측 계획 시 이를 고려하여야 한다. 또한 프로텍터는 통행중인 교통과 작업자의 안전과 직결되는 중요 구조물이므로 시공 중 지속적으로 안정성을 평가할 수 있도록 적절한 계측계획을 수립하여야 한다.

프로텍터를 이동식으로 하는 경우 기존터널 중 보호되지 못하는 부득이 생기게 된다. 이 경우 굴착에 의한 영향 등을 고려하여 기존터널의 지보재의 거동에 대한 계측계획을 수립하여야 한다.

부록에 기존터널확대 시 계측사례를 나타내었다.

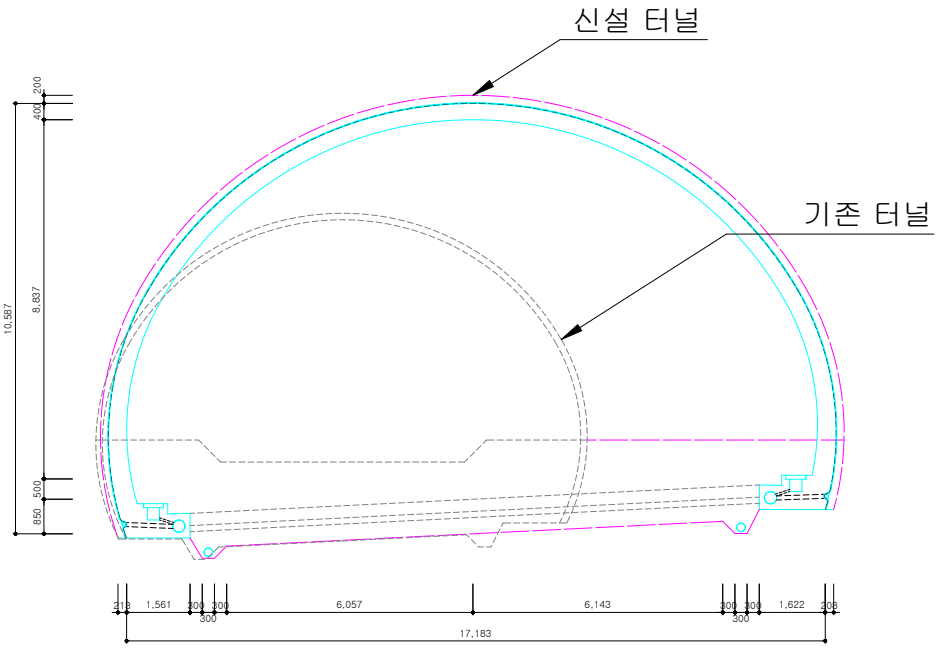
부 록

● 국내외 단면확대 시공사례

1) 국내

“방화대교 남단 접속도로 건설공사” 중 방화터널은 터널 굴착도중 노선변경으로 인해 일부 구간을 확대 시공하였다. NATM으로 건설된 기존 터널은 폭원 3.05m의 2차선 터널(폭 10.67m, 높이 7.7m)이였다. 굴착 및 지보설치(강지보재, 록볼트 및 숏크리트)가 완료된후 주변 교통여건의 변화로 폭원 3.05m의 3차선 터널(폭 17.18m, 높이 10.59m)로 변경 설계를 실시하여 터널단면을 확대한 경우이다.

터널의 제원은 아래 그림과 같다.



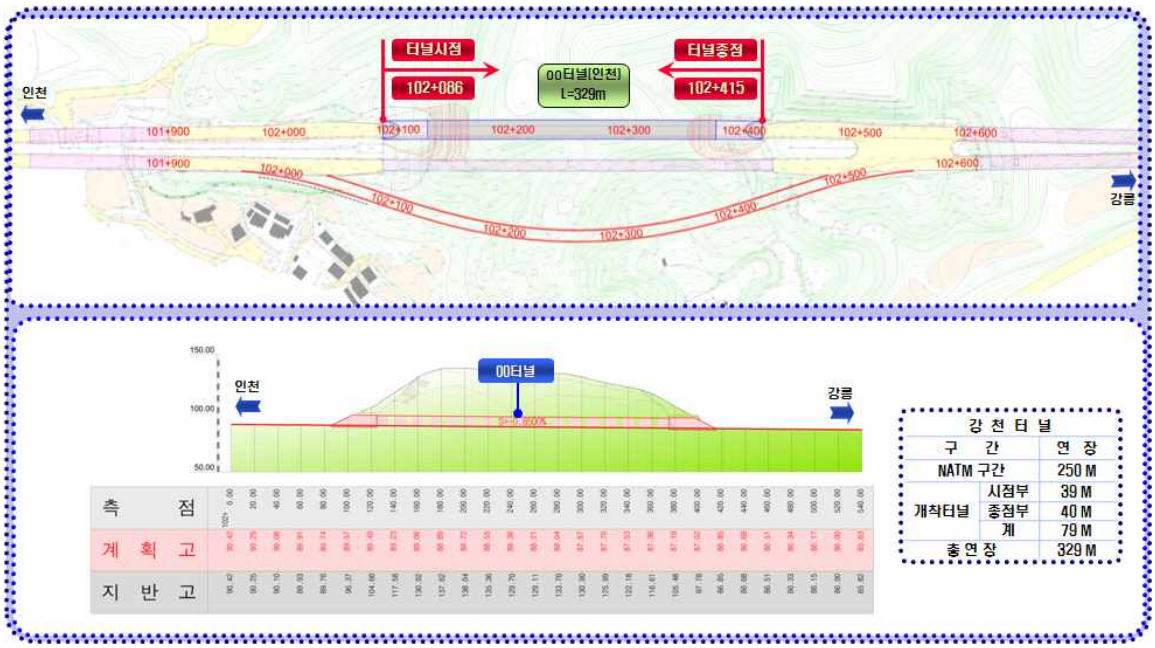
<방화터널의 기존 터널 단면 및 확대 터널단면>

본 터널의 확대는 모두 기존 노선의 교통 흐름을 완전히 차단한 후 신규터널과 같이 NATM으로 굴착한 사례로서 운영중 터널단면확대 시공과는 분명한 차이점이 있다.

- 강천터널

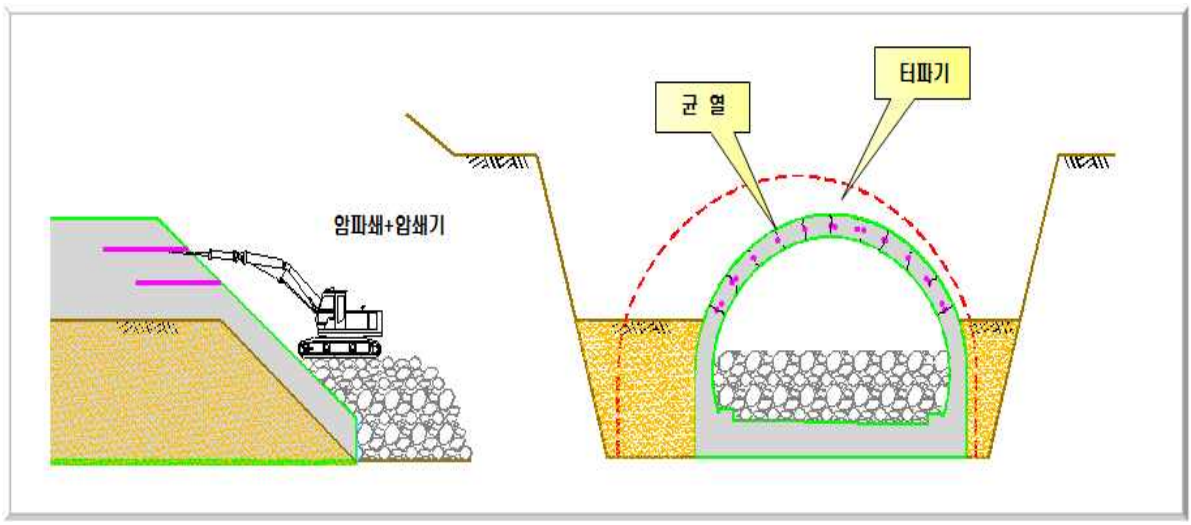
최근에는 최근 영동고속도로의 ○○터널과 남해고속도로의 ○○터널 등에서 우회도로를 만들고 기존터널을 확대하려는 계획이 수립되고 있다.

이중 영동고속도로 ○○터널은 1994년 일방향 2차선 터널로 준공되었으나 교통정체 등으로 확대할 필요가 있어 우회노선을 만들고 기존터널을 확대할 계획이다.



<영동고속도로 ○○터널 확대 계획>

다음 그림에는 영동고속도로 ○○터널의 기존터널 철거방안에 대해 나타내었다.



<기존터널 철거방안>

철거순서는

①개척터널 복토부 터파기

②상부드릴천공

③상부 1차파쇄(암패쇄 공법)

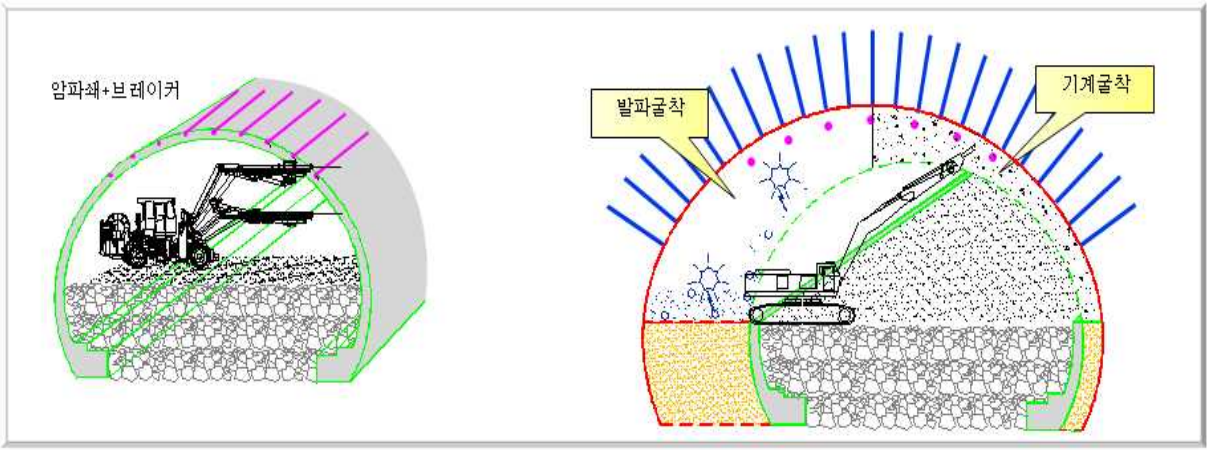
④상부2차파쇄(압쇄기)

⑤ 하부1~4단계의 반복

⑥ 갱구부 보강 및 가설 갱문 설치의 순으로 진행될 예정이다.

신설터널의 확대 방안은 다음 그림과 같이 계획되었다.

① 상부라이닝 전구간 철거
② 기존터널 지보재 철거 및 확장 상단부 보강(필요시)
③ 상부 굴착 및 버력처리
④ 상부 지보재 시공- 숏크리트, 록볼트
⑤ 하부 라이닝 및 지보재 철거
⑥ 하부 확장 발파 및 버력처리
⑦ 하부 지보재 시공 - 숏크리트, 록볼트



<신설터널 확대방안>

- 화약터널

교통을 통제한 후 단면 확대를 실시한 “화악~도계간 확·포장공사(지방도 341호선)” 중 화악터널에 대한 시공도면에 단면 분석하여 가상의 프로텍터 설치 후 가능한 장비운영 공간 분석하였다.

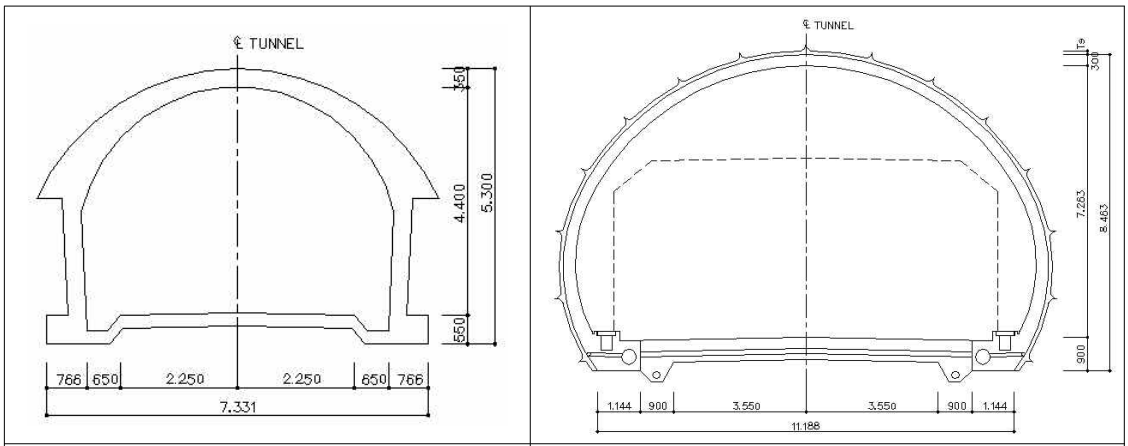
본 터널은 경기도 가평군과 강원도 화천군을 잇는 화악산 일대에 위치한 터널이다. 터널 연장은 680m이며 동절기 온도는 영하 10~25℃까지 내려가는 해발 880m의 고지대에 위치하고 있으며, 국내사례가 거의 없는 기존 1차선 터널을 확대 굴착하여 왕복 2차선의 대면교통 터널을 건설하는 공사였다. 평면선형은 확장터널과 기존터널의 단면 중심선을 일치시키고, 종단선형은 확장터널과 기존터널의 도로노면 바닥부를 동일하게 계획되었다.



<화악터널 시공전경>

기존터널은 1974년에 준공된 군도로서 도로 폭원 2.250m의 1차선 대면교통 터널이다. 규모는 폭 5.8m, 높이 4.3m로서 비교적 소단면 터널이다. 확·포장 공사시 지방도로 승격되어 도로폭원 및 규모가 확대되어 도로폭원 3.500m의 2차선 대면교통이며 터널규모는 폭 12.0m, 높이 7.3m이다.

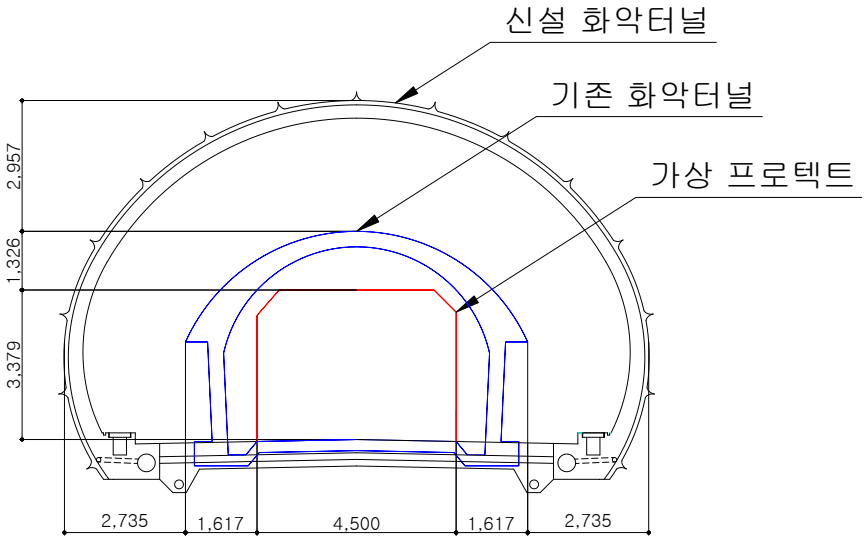
약 4.5m의 폭을 형성하는 가상의 프로텍터를 설치하는 경우



기존 터널단면	확대 터널단면

<화악터널의 기존 터널 단면 및 확대 터널단면>

약 4.5m의 폭을 형성하는 가상의 프로텍터를 설치하는 경우 측면 최대 폭은 4.35m이며, 천단 최대 높이는 4.28m로 나타났다.



<화악터널에 대한 장비운영공간 분석결과>

2) 국외

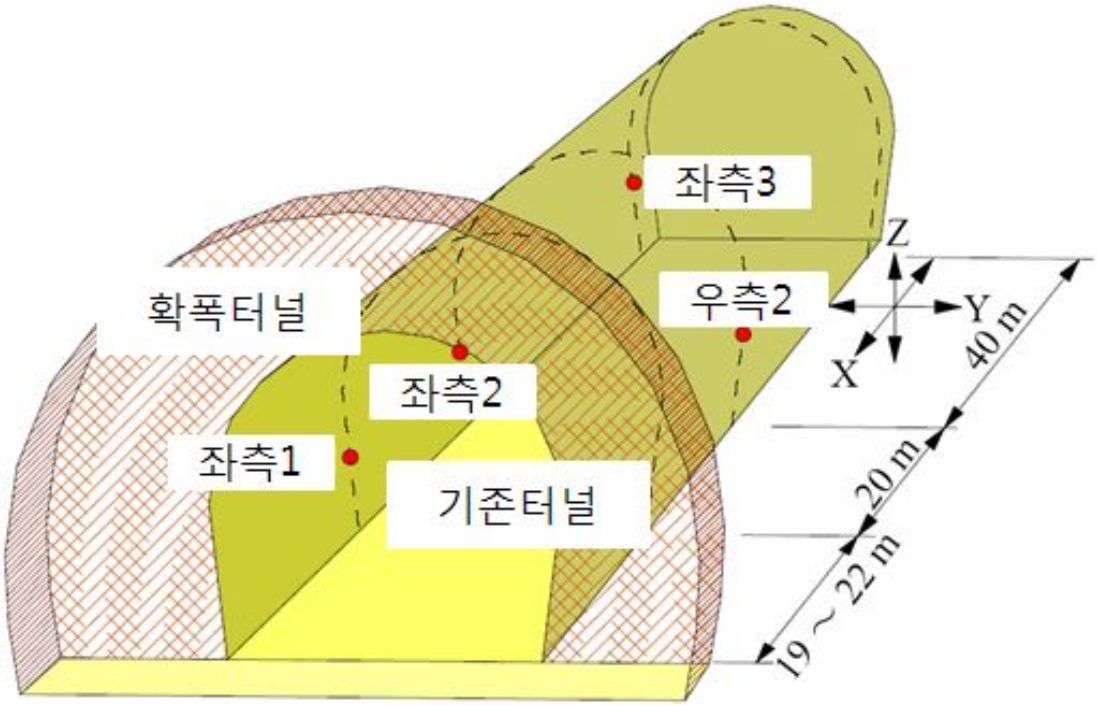
가. Isai 터널 확대 공사(일본, 발파 확대굴착 시 진동 계측사례)

(1) 터널 기본 정보

Isai터널은 연장 416m, 폭 4.1m로서 터널 내에서 교차통행이 불가능하여 연장 401m, 폭 8.0m로 확장한 사례이다. 확대시공은 주변에 광역임도가 있어 기존 교통을 우회시키고 발파에 의해 확대하여 2004년 공사를 완료하였다. 터널 지반은 중생대 및 그 이전의 화강섬록암이 주체이며 풍화 및 균열이 발달하였고 일축압축강도는 50~100MPa 정도이다. 터널 확대는 그림3-1.1의 개념도와 같이 기존터널을 중앙부에 두고 양측을 확대하는 방식을 취하였다.

(2) 발파진동의 측정

발파진동은 확대터널 막장에서 약 20m, 40m, 80m 떨어진 3개소에 측정하였다. 이때 측정위치를 고정하고 있기 때문에 측정지점까지의 거리는 굴착이 이루어짐에 따라 점점 짧아지게 된다. 측정은 터널 축방향(X), 수평종단방향(Y), 연직방향(Z)의 3 방향 변위속도이다. 최소 측정거리를 비석 및 풍속으로 인한 케이블 등의 손상을 막기 위해 막장에서 20m 이격된 지점으로 설정하였지만 실제 발파시에는 5m 정도의 위치에서도 측정 가능하였다. 계측은 3회 발파에 대하여 실시하였다.



<발파진동 계측 위치도>

(3) 발파진동의 검토

발파진동의 계측결과 일례를 아래표에 나타내었다. 보통의 신설터널에서는 막장의 자유면이 하나이기 때문에 심빼기에 많은 장약을 사용하고 저항도 크기 때문에 발파진동이 커지지만, 확대를 위한 발파에서는 장약량이 적고 막장에 이미 자유면(기존 터널)이 있어 발파진동은 표와 같이 크지 않은 것으로 나타났다.

발파진동의 예측식은 일반적으로 다음과 같이 표현되는 경우가 많다.

$$V = K \cdot W^{\alpha} \cdot D^{\beta} \quad \text{혹은} \quad \log V = \log K + \alpha \cdot \log W + \beta \cdot \log D$$

여기서, V : 발파진동속도(cm/sec=kine),

K : 발파나 지반의 조건 등에 의한 계수(40~1,000),

W : 지발당 장약량(kg),

D : 폭파점부터의 거리(m),

α : 폭약량에 대한 지수(0.5~1),

β : 거리감쇄지수(-1~-2)

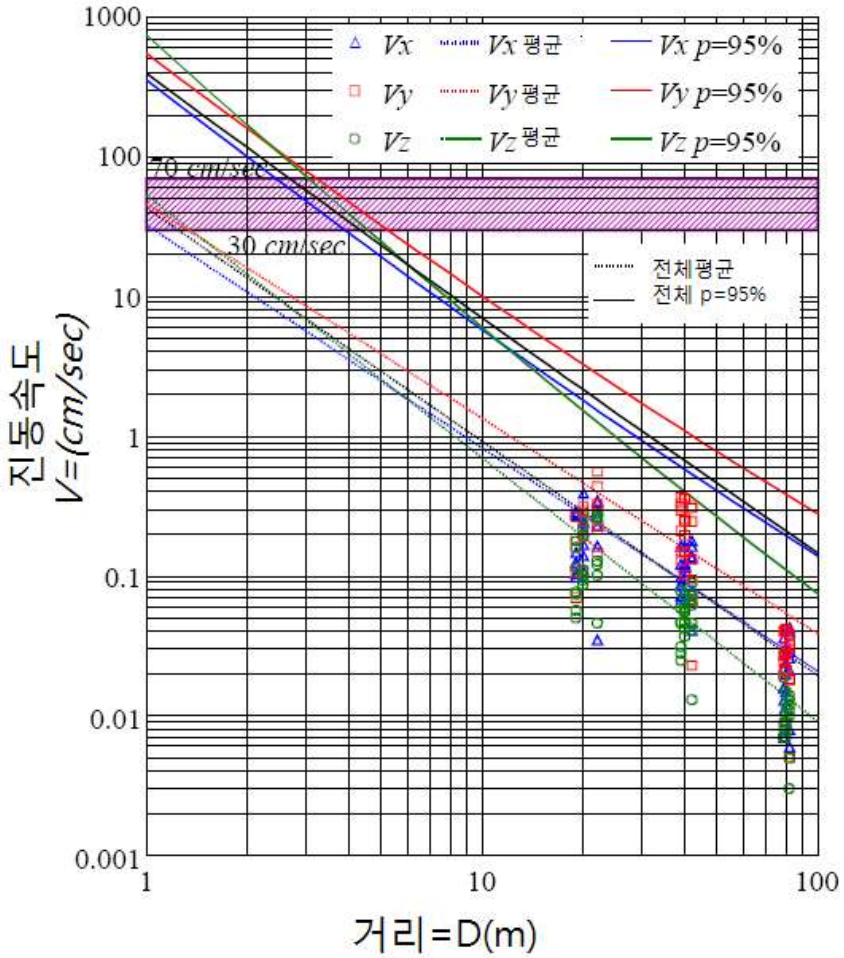
<확대터널 발파시 진동 계측 결과 사례>

		측선좌측									측선우측		
		측점1			측점2			측점3			측점2		
		진동속도 V(kine=cm/s)			진동속도 V(kine=cm/s)			진동속도 V(kine=cm/s)			진동속도 V(kine=cm/s)		
뇌관 단수	거리(m)	20.0			40.0			80.0			40.0		
	지발당장약량 (kg)	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
순발	1.8	0.391	0.296	0.110	0.164	0.358	0.073	0.042	0.031	0.015	0.066	0.110	0.124
DS2	2.4	0.240	0.283	0.278	0.116	0.257	0.057	0.024	0.028	0.012	0.107	0.128	0.064
DS3	2.2	0.169	0.110	0.101	0.098	0.248	0.059	0.028	0.042	0.010	0.069	0.098	0.072
DS4	1.8	0.140	0.193	0.087	0.069	0.248	0.046	0.015	0.041	0.008	0.077	0.110	0.050
DS5	0.8	0.251	0.316	0.223	0.124	0.146	0.042	0.020	0.041	0.009	0.097	0.059	0.058
DS6	1.8	0.109	0.195	0.094	0.117	0.196	0.037	0.024	0.022	0.009	0.048	0.042	0.059
DS9	0.6	0.213	0.243	0.196	0.119	0.101	0.055	0.031	0.021	0.007	0.094	0.047	0.062

아래 표는 발파진동속도의 계측과 회귀분석에 의해 구해진 계수 K, α, β를 나타내었고 아래 그림은 회귀 그래프를 나타내었다.

<회귀분석 결과>

	X	Y	Z	전체
K	25	28	37	30
a	0.157	0.316	0.225	0.233
β	-1.598	-1.540	-1.884	-1.674



<발파진동의 예측>

회귀분석결과로부터 발파나 지반의 조건 등에 의한 계수 K는 일반적인 값보다도 작고 발생하는 진동도 작은 것을 알 수 있다. 또한 거리감쇄 지수 β는 지금까지 사용되어온 -1.5~-2.0의 범위에 있지만 연직방향(Z방향)의 감쇄가 다른 2방향보다 크고 발생하는 진동도 작다. 한편, 장약량에 대한 지수 α는 일반적인 값보다도 작고 진동속도에의 영향은 거의 없다. 이것은 장약량이 적고 지반이나 발파에 의한 편차에 비하여 영향이 작고 명료한 차이가 없기 때문으로 생각된다. 또한 터널 축방향(X방향)의 K와 α가 다른 2방향에 비하여 작다. 이것은 진동의 방향이 장약공의 방향과 일치하기 때문에 발생하는 진동이 작고 장약량의 영향도 작아지는 것으로 생각된다.

회귀분석 그래프로부터 보통의 범위(수 m이상)에서는 수평횡단방향(Y방향)의 진동이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 발파가 터널 중심을 향하여 이루어지기 때문에 기존 터널의 벽면에 직각방향의 진동이 커지기 때문으로 판단된다.

새롭게 관측된 값의 95%를 포함하는(이의 진동속도를 넘을 확률이 5%) 범위의 상한값을 그림에 나타내었다. 한편, 콘크리트에 균열을 발생시키는 발파진동속도는 지금까지의 실험으로 보아 30~70cm/sec로 평가되고 있다. 이 한계값보다 막장후방 3~5m의 범위에서는 콘크리트에 균열이 발생할 가능성이 있다. 그러나 균열이 발생하여도 경미하고 기설터널의 안정

을 해치지 않는다면 이 후에 굴착되므로 아무런 문제도 되지 않을 것으로 판단된다.

(4) 발파진동이 기존터널에 미치는 영향

① 발파 및 지반조건 등에 의한 계수(K값)가 작고 발생하는 발파진동도 작다

② 확대터널에서는 기존 터널이 자유면이 되어 순발과 단발의 차이가 거의 없다.

③ 장약량이 작기 때문에 지반이나 발파조건 등에 의한 편차가 작아지고 장약량이 발파진동에 미치는 영향은 명확하지 않다.

④ 거리감쇄 지수는 -1.5~-1.9이며 특히 연직방향의 감쇄가 크다

⑤ 발파에 의한 진동이 기존 라이닝 콘크리트에 미치는 영향은 작고 균열이 발행하여도 막장에서 3~5m의 좁은 범위이며 기존 터널이 불안정하게 되는 큰 손상을 받는 범위는 더욱 작다고 생각한다.

이상 발파에 의해 발생하는 진동은 작고 기존 라이닝이 순차적으로 제거되는 확대 터널에서는 거의 문제가 되지 않는다고 생각한다. 단 라이닝 콘크리트의 노후화 등에 의해 이미 어떤 손상이 있는 경우에는 보다 넓은 범위에 영향을 미칠 수도 있다고 생각한다.

나. Tonomie터널 확대공사(일본, 굴착기계에 의한 확대 굴착시의 계측사례)

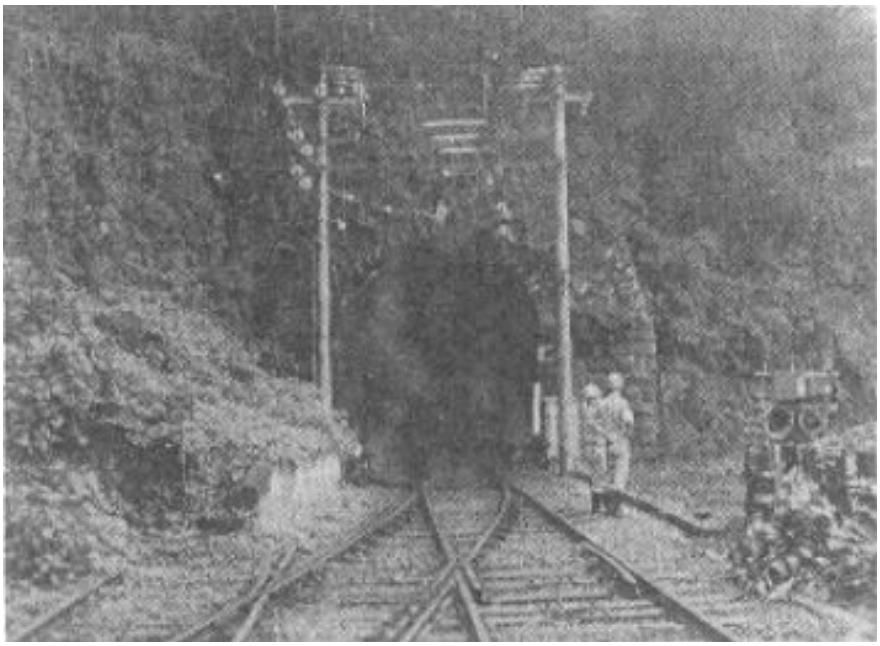
(1) 지형 및 지질

Tonomie 터널은 가나가와현(일) 하코네에 위치하고 있으며 화산활동으로 생성된 1,000m내외의 산들과 중앙화구들로 이루어졌다. 지층은 화산의 일차퇴적물로 이루어졌으며 상부는 화산력응회암층, 하부는 응회각력암층으로 이루어졌다. 터널(철도터널) 구간은 상부의 화산력응회암층을 관통하고 있다.

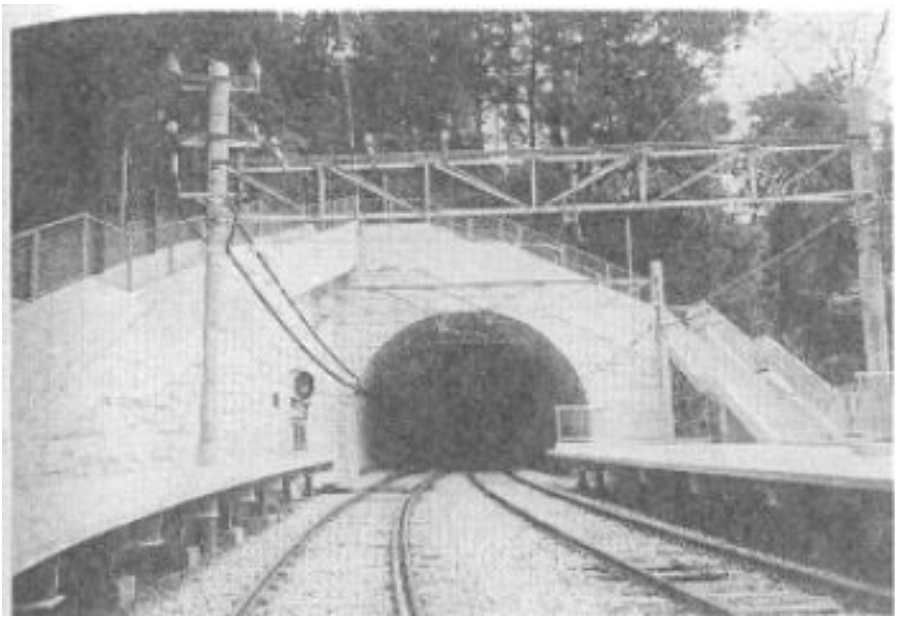
(2) 확대계획

- 확대구간 : 25m
- 내공단면 : 20m2→50m2
- 굴착공법 : 상부반단면 선진공법
- 공법 : NATM
- 공사기간 : 1990.03~1994.07

다음 그림들은 확대 전후의 터널 전경을 나타내었다.



<토노미에 터널 전경(확대전)>



<토노미에 터널 전경(확대후)>

(3) 시공순서

확대터널의 시공순서는 아래 표1-1.3과 같이

① 기존터널의 방호공 설치

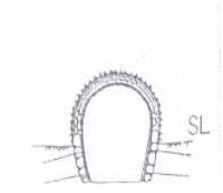
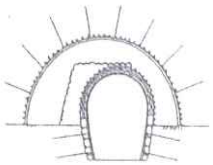
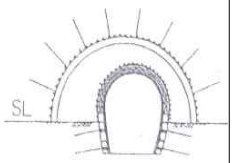
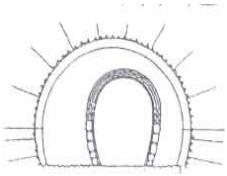
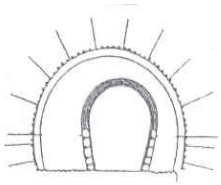
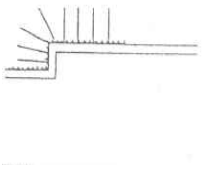
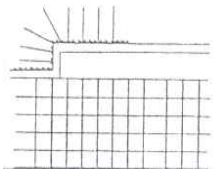
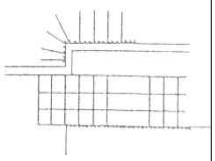
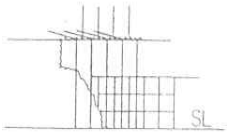
② 상반굴착+지보공

③ 상반라이닝 콘크리트

④ 상반굴착+지보공+하반 라이닝 콘크리트

⑤ 방호공 철거 및 해체의 순으로 이루어졌다.

<확대터널의 시공순서>

①방호공 설비	②상반굴착공	③상반 라이닝 콘크리트	④하반굴착 및 측벽콘크리트	⑤방호공 철거
				
				

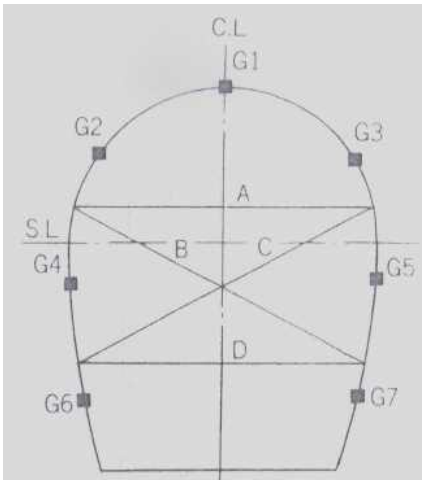
(4) 계측계획

다음 그림에 확대구간의 계측공 배치도와 변위계측을 위한 배치도를 나타내었다. 계측 구간 30m에서 막장관찰은 매 막장 실시하며, 내공변위는 5개소, 응력은 2개소에서 측정하였다.

거리(m)	6	12	18	24	30
측점위치	A	B	C	D	E
갱내관측	전 구 간				
내공변위	*	*	*	*	*
응력측정		*			*

확 폭 구 간 | 추정영향구간

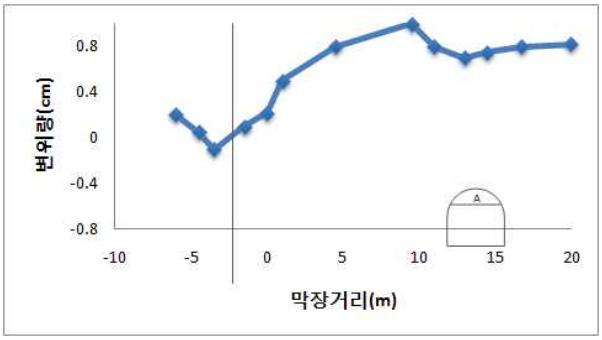
서쪽갱구



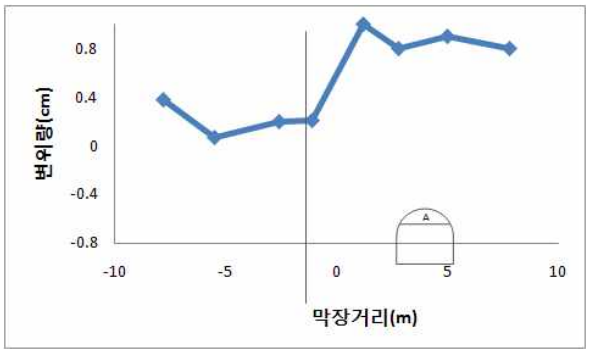
<터널 계측단면 및 계획>

(5) 계측결과

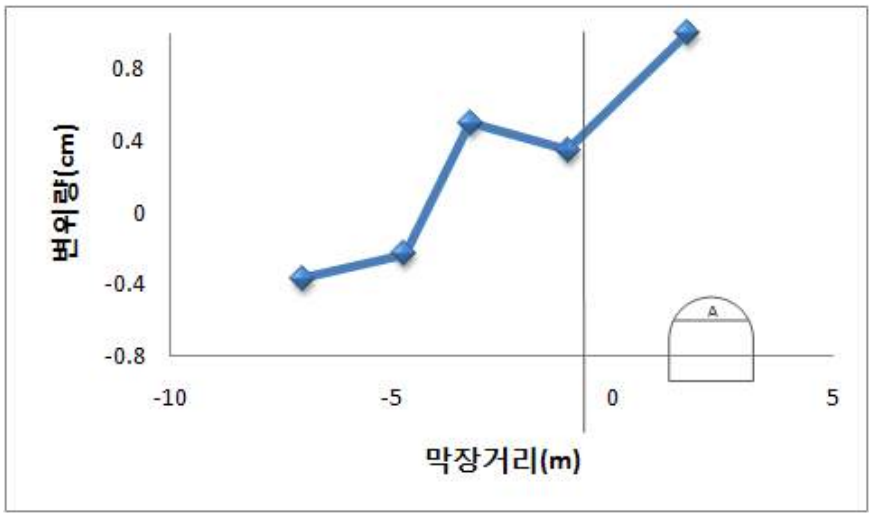
다음 그림에는 터널확대와 동시에 계측된 기존터널 천단부의 수평변위를 나타내었다. 막장 전방에서는 융기가 발생하고 있으며 후방에서는 침하를 나타내고 전체적으로 10mm 이내의 범위에서 발생하고 있다. 이는 보통 국내 신규터널 건설현장에서 관리기준 값으로 설정하고 있는 50mm에 비하면 상당히 작은 값을 보이고 있다.



(a) 확대 단계별 변위량



(b) 확대 단계별 변위량



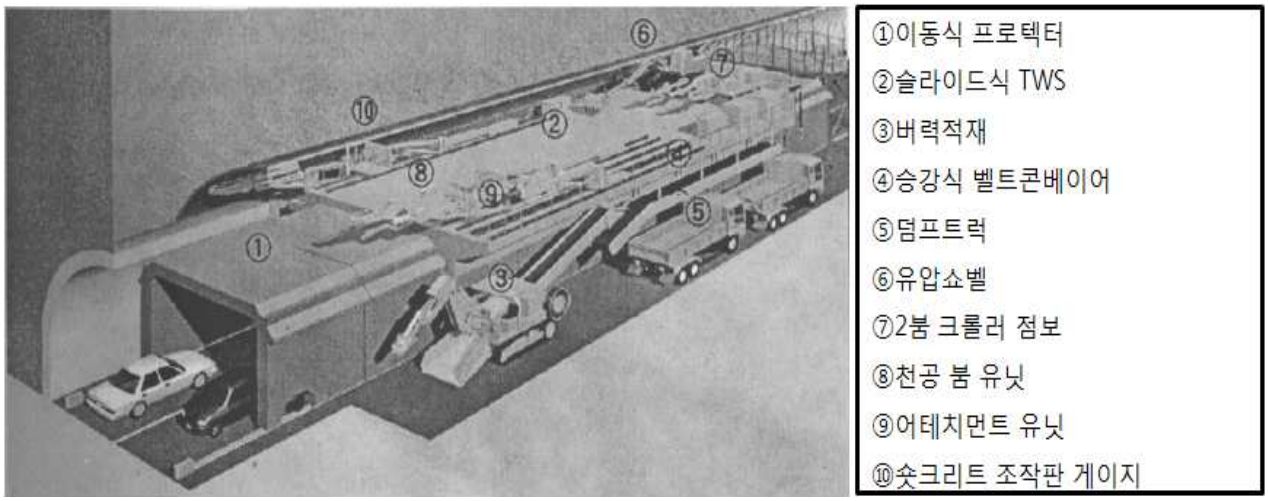
(c) 확대 단계별 변위량

확대단계별 변위량(+ : 융기, - : 침하)

<계측데이터 분석>

다. Sikisima터널 확대공사(일본, 발파굴착에 의한 확대 사례)

앞에서 분석하였듯이 해외시공 사례의 경우 대부분 브레커, 백호우 등을 이용한 기계식 굴착을 수행하고 있다. 그러나, 국내의 경우 확대공법이 수행된다면 지반 및 장비 수급 특성상 발파식 굴착으로 이루어질 가능성이 크므로 발파 굴착으로 확대된 시공사례의 계측데이터를 분석해 보고자 한다. 이 사례는 후절에서 설명하는 나폴레온 햇형 스테이지 공법을 이용한 것으로 1건의 시공 사례가 있다. 다음 그림에는 이의 개념도를 나타냈다. 이 방식은 이동식 프로텍터 위에 슬라이드식 TWS(Tunnel Work Station)을 탑재한 형태이다.



<발파형 굴착방식인 나폴레온 헷드 형 스테이지 개념도>

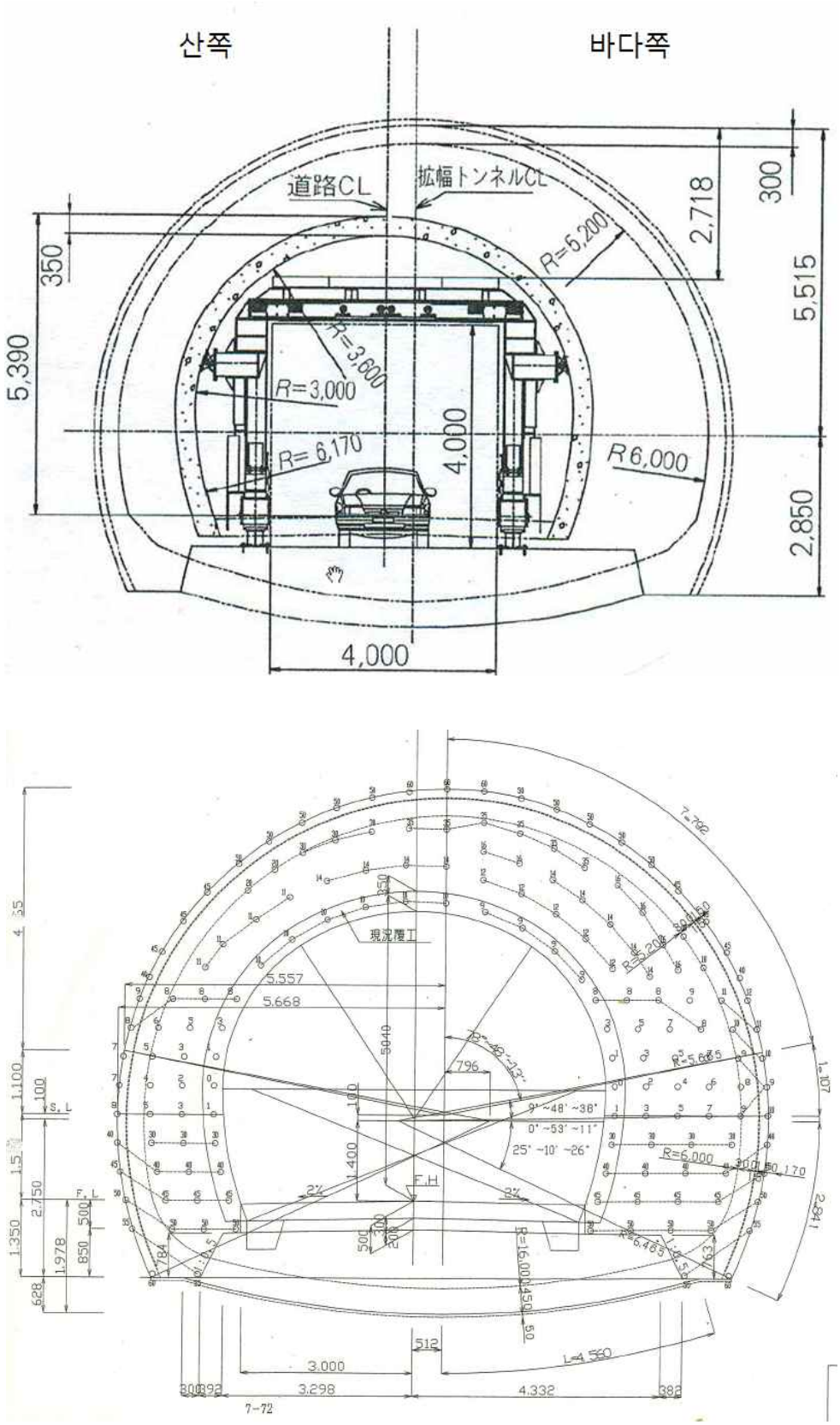
이의 시공사례를 간략히 소개키로 한다.

(1) Sikisimanai(시키시마)터널의 개요
- 소재 : 일본 홋가이도 일반국도 229호선
- 확대개요 : 내공단면적 31.0m2, 폭원 6.0m → 내공단면적 62.9m2, 폭원 9.75m로 확대
- 지반개요 : 기반암은 안산암으로 평균 일축압축강도는 1,500kg/cm2, 최대 일축압축강도는 2,600kg/cm2이며 130kg/cm2의 파쇄대 및 풍화대가 혼재되어 있다.

(2) 발파시스템
발파시스템은 아래와 같은 이유로 인해 비전기식 뇌관을 사용한 제어발파를 하였다.

① 일반차량을 통행시키면서 장약작업을 하기 때문에 누전전류, 정전기 등에 민감하지 않은 비전기식 뇌관을 사용하였다.
② 기존 라이닝에 발파진동의 영향을 고려하여 1단의 장약량을 줄이고 단수를 많이 두어 발파진동을 경감시켰다.
③ 버력의 크기를 가능한 작게(직경 40cm 정도)하고 시간적으로 분산시켜 프로텍터에 충돌하도록 발파설계를 통해 프로텍터에 대한 설계하중을 저감시켰다.

다음 그림에는 터널표준단면 및 발파패턴도를 나타내었다.



<터널표준단면 및 발파 패턴도>



<발파 직후의 막장모습>

(3) 발파진동 측정

막장에서 7.5~12m 떨어진 A 지점, 측정 A에서 5m 떨어진 B, 측정 B로부터 5m 떨어진 C의 3 지점에서 발파진동을 측정하였다.

다음표와 같이 실제로 사용한 1단의 최대 장약량은 0.6~2.2kg의 범위였기 때문에 계획 최대 장약양(3.0kg)에 미치지 못하지만 진동속도는 막장에서 7.5m~12.5m에서 측정한 측점 A에서 최대 3.55cm/s, 측점 B 및 측점 C에서는 1cm/s에 미치지 못하였다.

<발파진동 속도 측정 결과>

회수	지발당 장약량(kg)	항목	측점 A			측점 B			측점 C		
1	0.6	막장에서의 거리(m)	10.5			15.5			20.5		
		방향*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		진동속도(cm/s)	0.30	0.10	0.20	0.16	0.12	0.30	0.07	0.10	-
2	1.0	막장에서의 거리(m)	7.5			12.5			17.5		
		방향*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		진동속도(cm/s)	3.55	1.43	0.70	-	-	-	0.13	0.18	-
3	2.0	막장에서의 거리(m)	10.5			15.5			20.5		
		방향*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		진동속도(cm/s)	1.13	0.78	2.33	0.65	0.38	0.56	0.35	0.20	-
4	2.2	막장에서의 거리(m)	12.5			17.5			22.5		
		방향*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		진동속도(cm/s)	1.13	0.88	2.18	0.45	0.40	0.75	0.25	0.13	-

(4) 전파계수 K 값의 산정

위의 표와 같이 측정결과를 바탕으로 나타낸 진동속도 예측식을 이용하여 전파계수 K값을 구하였다.

$$\nu = K\frac{W^n}{r^m}$$

여기서, υ:진동가속도 값(cm/s),

W : 장약량(kg),

r: 거리(m),

K : 전파계수,

m,n : 계수(m=2, n=2/3)

K값은 31～201(평균 71)정도이며 지금까지의 실적에 의한 K값의 범위(200～700)과 비교하면 작은 값이다. 이는 발파진동이 커지는 심빼기 발파가 없기 때문으로 생각된다.

(5) 발파진동의 평가

기존 터널에 프로텍터 삽입길이인 5m 지점에서의 발파진동이 기존 라이닝에의 영향을 평가하면 최대 K값(201), 계획 최대 지발당 장약량 3.0kg의 조건에서 이용하여 막장에서 5m 지점의 진동속도를 산출하면 16.8cm/s가 된다. 이는 산요신간선에서 시험한 미세균열이 생기기 시작하는 진동치가 33.8cm/s인 것과 비교하면 반 정도로 작은 값이다.

라. 4개소 터널의 계측데이터 분석

- 기존터널 확대 시 계측사례

해외에서 이루어진 기존의 터널 확대사례(4개소)의 계측데이터를 보면 아래와 같은 특징이 있다. 각 터널의 확대 제원은 표 1과 같다.

<분석터널의 제원>

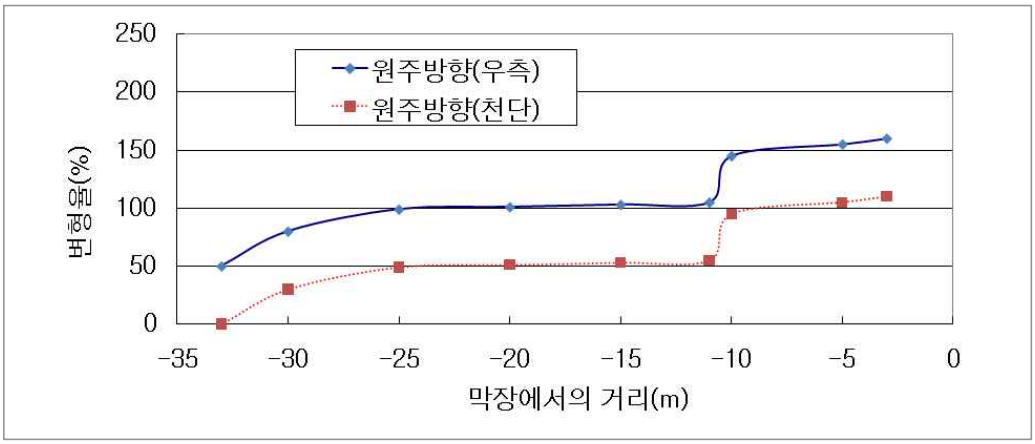
구 분		A터널	B터널	C터널	D터널
기존 터널 굴착공법		재래공법 1973년 완공	재래공법 1950년 완공	재래공법 1962년 완공	재래공법 1983년 완공
연장(m)		975.0	115.5	146.0	81.9
내공폭(m)		9.8	6.0	6.0	6.0
내공높이(m)		6.3	4.9	5.0	5.1
라이닝 두께(cm)		50~70	30	35	30
확대터널공법		NATM	NATM	NATM	NATM
연장(m)		170	120	146	102
내공폭(m)		15.6	12.5	9.75	12.5
내공높이(m)		8.0	7.0	7.1	7.0
라이닝 두께(cm)		45.4	30.3	30	30.5
주요지반		사암, 혈암, 응회암 호층	이암	안산암	실트질이암
지반강도 (N/mm^2)		16~30	1~9	13~150	4~10
최대토피고(m)		약 38	약 38	약 42	약 30
굴착방식		기계굴착	기계굴착	발파굴착	기계굴착
계측항목	기존라이닝의 계측	라이닝 변형율 천단침하 내공변위	천단침하 내공변위	-	-
	신설라이닝의 계측	강지보응력, 숏크리트 응력, 록볼트 축력	강지보 응력, 숏크리트 응력, 록볼트 축력	-	-
	사전 록볼트 계측	-	-	록볼트 축력	록볼트 축력

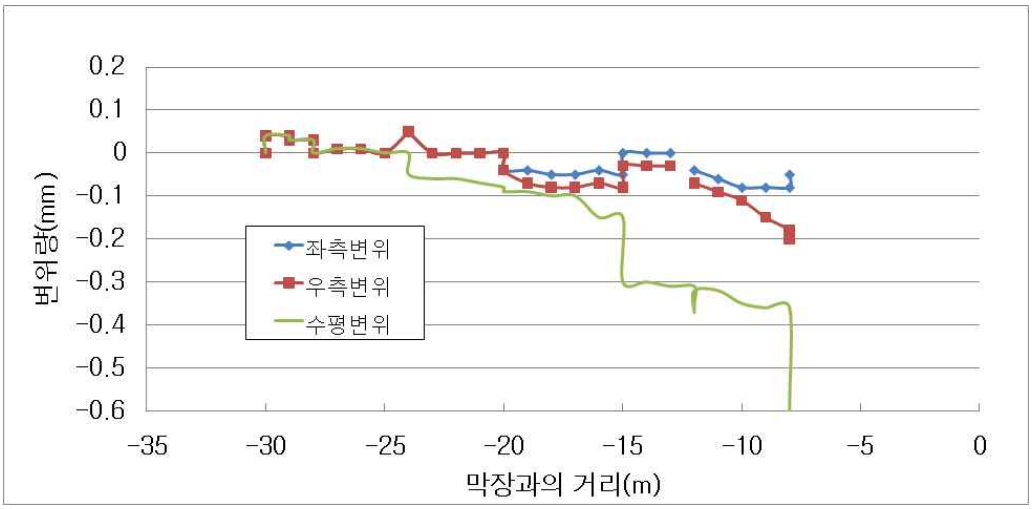
(1) 기존 터널의 라이닝 계측결과

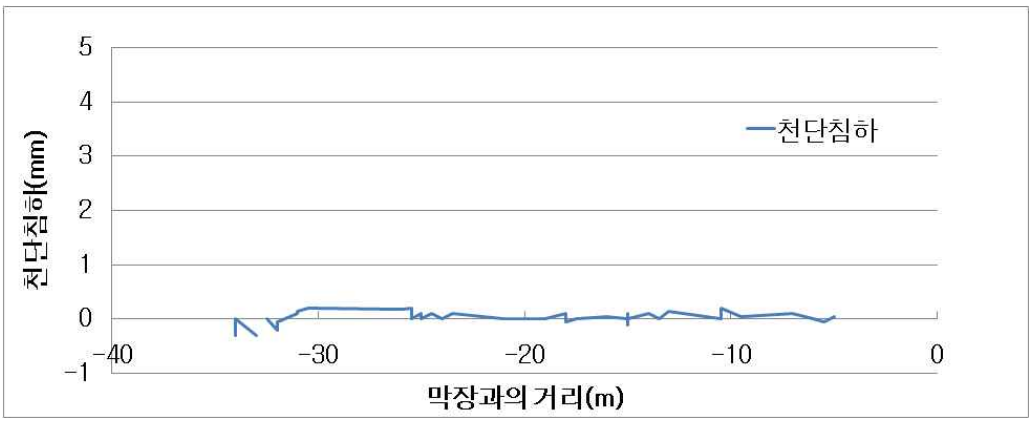
그림 2에는 표 1의 A터널의 기존 터널 라이닝의 변위 계측결과를 나타내었다. 계측단면4에서는 콘크리트 라이닝의 원주방향 변형율은 막장이 30m(2D)정도에서 일단 증가하고 15m(1D)까지 근접하면 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 내공변위는 25m(1.5D)정도까지 막장이 근접하면 수평계측선 및 좌우계측선의 변위가 원주방향의 변형률 변화에 대응하여 변화하고 막장이 15m(1D)정도 까지 근접하면 지금까지 확대 경향이었던 내공변위가 전체적으로 수축방향으로 변화하고 있어 굴착에 의한 영향을 볼 수 있다. 단, 천단침하의 변화는 보이지 않고 있다. 계측단면5에서는 콘크리트 라이닝의 원주방향 변형률은 막장이 25m(1.5D)정도까지 근접하면 현저한 증가경향을 보이고 있고 막장이 3m까지 근접하면 급격한 증가를 보이고 있다. 내공변위는 25m정도까지 막장이 근접하면 수평측선 및 좌우측선의 변위가 축소 방향으로 변하고 막장이 10m(0.6D)정고 근접하면 천단침하가 지반쪽으로 융기하는 방향으로 변하고 있다.

그림 3과 그림 4에는 A터널의 강지보 및 숏크리트 응력의 경시변화를 나타내었다.

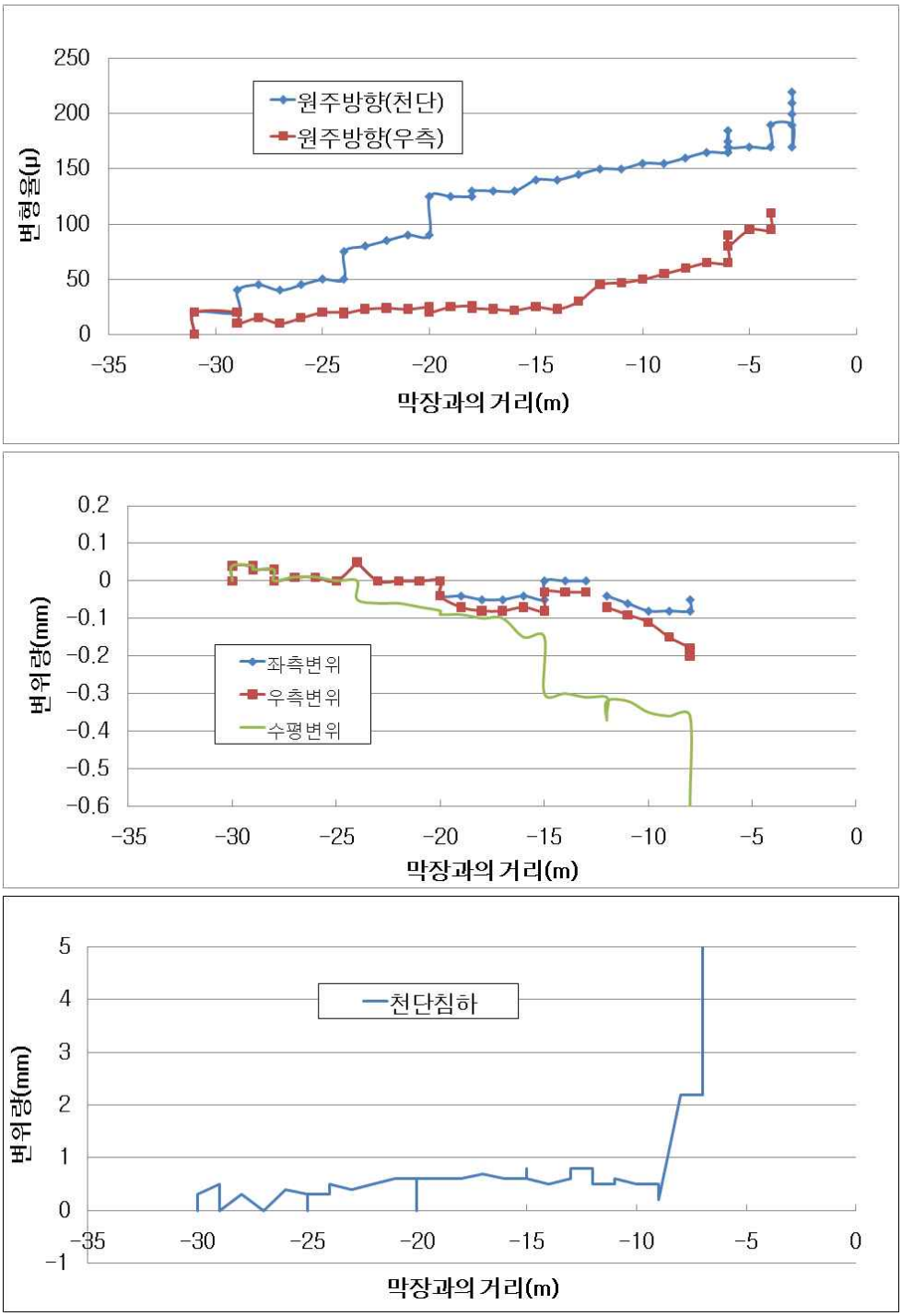
각각 천단의 측점을 제외하고 지보설치 후 서서히 응력이 감소하지만 하반굴착의 영향으로 일단 저하하고 이후 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 단, 증가 후 각각의 지보에 발생하는 응력은 모두 작다. 다른 계측단면에서도 경시변화의 거동은 거의 같은 양상이었다. 그림 5에는 각 지보가 수렴되었다고 생각하는 최종값을 나타내었다. 강지보응력은 토피고가 20m로 저토피 계측단면 1, 2의 일부 측점에서는 약 240N/mm2 정도로 비교적 큰 응력을 보이고 있다. 토피고가 30m 이상의 계측단면 3, 4에서는 지보패턴은 모두 ＤＩ이지만 일부 측점에서 최대 약 60N/mm2의 응력을 보이고 있지만 전체적으로 보면 20～30N/mm2으로 비교적 작다. 숏크리트 응력도 토피고가 얕은 지점에서 약 10N/mm2을 넘는 부분이 있지만 대부분 4N/mm2으로 작음을 알 수 있다.



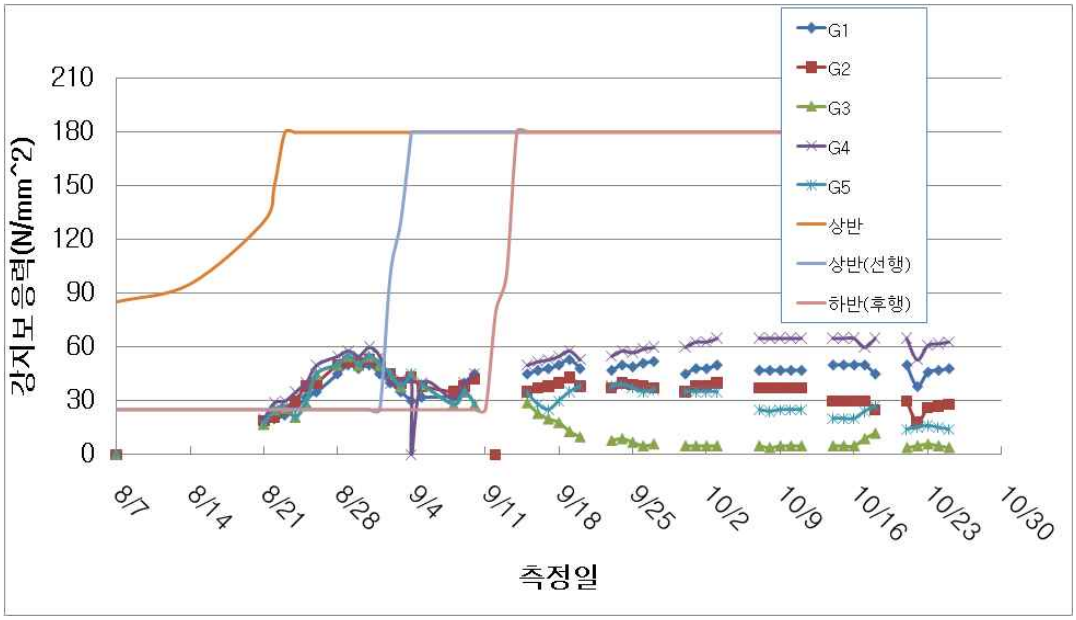




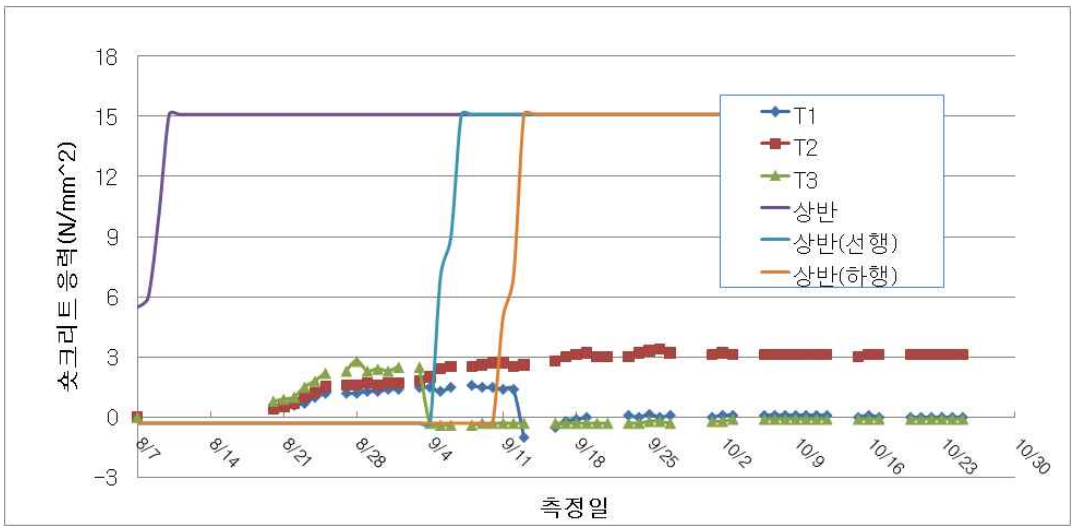
<기존 터널 라이닝의 계측결과(계측단면A, 필자수정)>



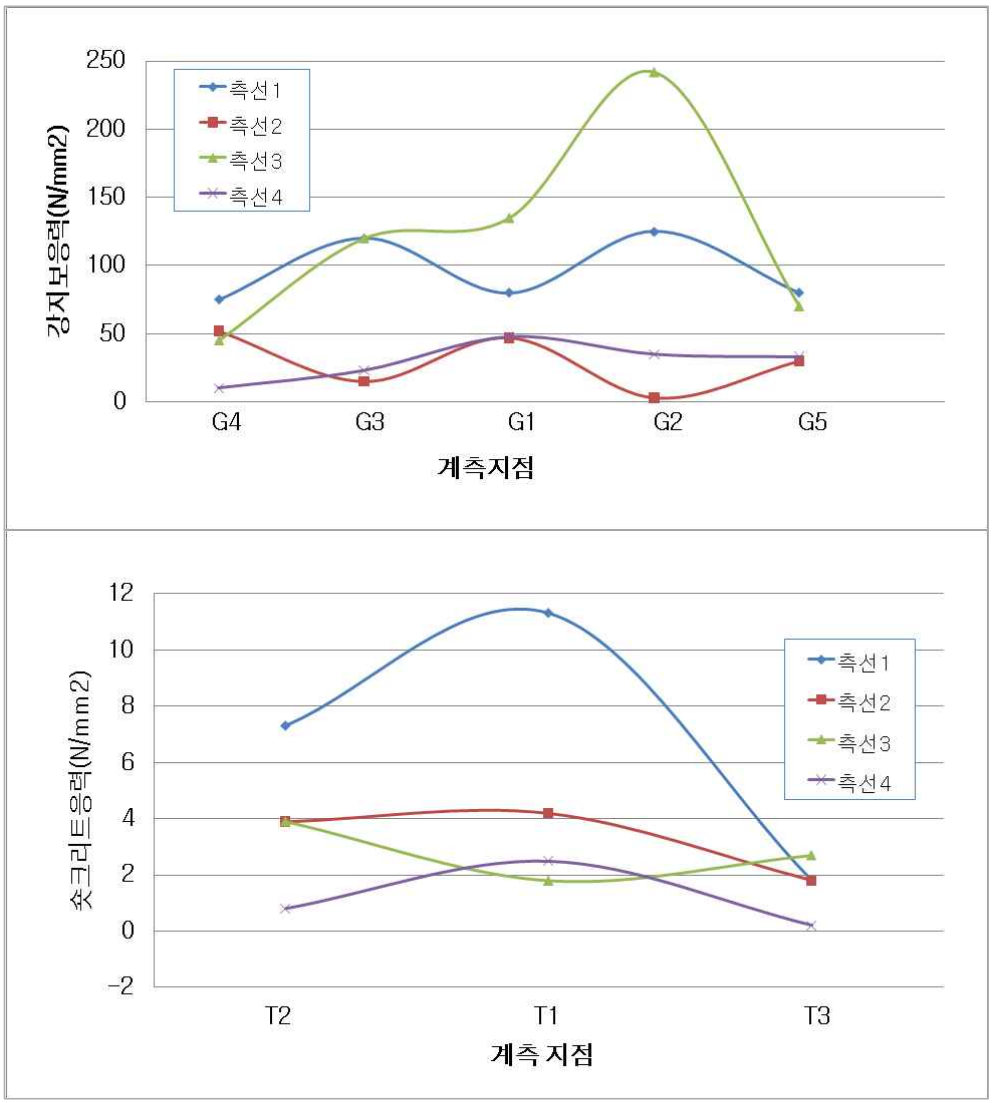
<기존 터널 라이닝의 계측결과(계측단면B, 필자수정)>



<강지보 응력 경시변화(필자수정)>

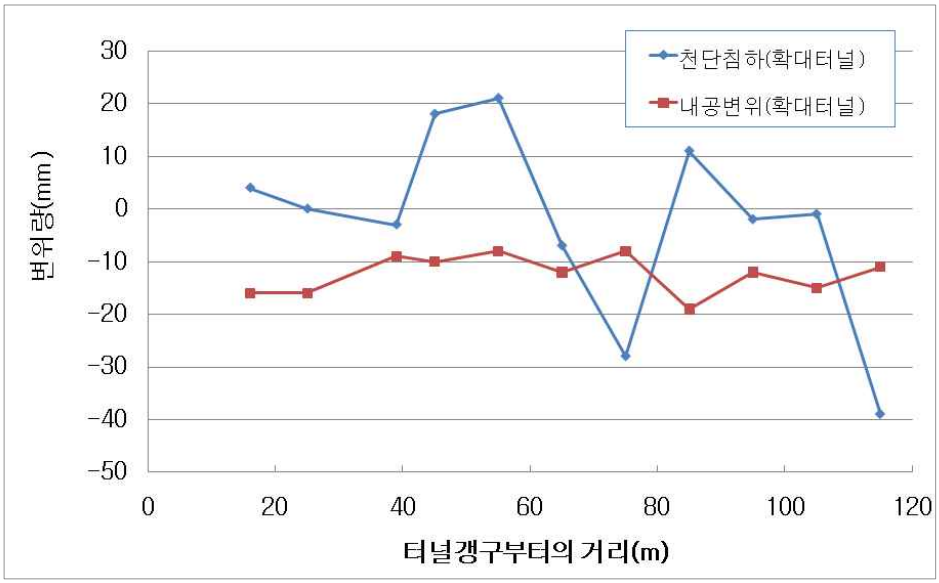


<숏크리트 응력 경시변화 (필자수정)>



<각 지보부재의 최종값(필자수정)>

그림 7에는 표 1의 B터널의 천단침하 및 내공변위를 나타내었다. 천단침하량은 갱구부 DⅢa 및 터널 중앙부근의 DⅠ구간에서도 최대 약 20mm 이내로 작다. 내공변위는 계측위치에 따라 다르며 계측단면 1에서는 거의 0, 계측단면 2에서 지반쪽으로, 계측단면 3에서 내공측으로 각각 변화하고 있다.



<천단침하 및 내공변위(필자수정)>

● 터널확대가 유효한 터널입지조건

1. 해안이나 하천에 있는 터널로 신규터널에 대한 별도의 루트의 설정이 곤란한 경우

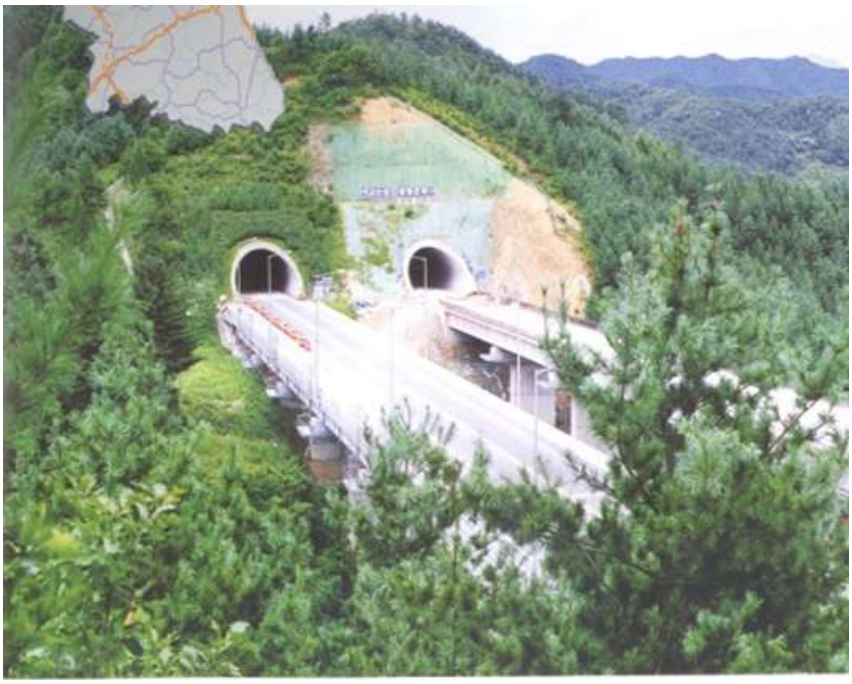
이 경우 대표적인 사례가 일본의 스키시마나이터널이다. 스키시마나이터널은 교통정체를 해소하기 위해 터널을 확대하였으며 그림에서 보는 바와 같이 터널을 확대할 경우 터널연장이 기존터널과 동일하게 146m에 불과하지만 신규로 터널을 건설할 경우 2km이상의 연장이 필요하여 터널을 확대한 사례이다. 또한 해안가에 위치하여 우회로의 확보가 불가하므로 교통흐름을 유지한 상태에서 터널을 확대한 사례이다.



<신규터널 루트설정이 곤란한 경우(예:스키시마나이터널, 일본)>

2. 지형여건상 신규터널 시공이 불가능한 경우

그림은 본 조건에 해당하는 산악터널의 일례를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 산지가 낮아 기존터널 좌우로 신규터널을 건설할 경우 토피고가 낮고 터널 측면으로 경사져 있기때문에 편토압, 사면안정문제 등이 발생될 수 있어 신규터널의 노선을 계획하기 힘든 것을 알 수 있다. 이 경우 터널을 확대하는 것이 유효한 방법이 될 수 있다.



<지형여건상 신규터널 시공이 불가능한 경우(예)>

3. 주변에 건물이 밀집되어 용지매입자체가 불가능할 경우

주변에 건물이 밀집되어 있는 경우는 도심지에 건설된 대부분의 터널이 이에 해당된다고 볼 수 있다. 국내의 경우 1970년대부터 급속한 성장을 이루면서 도심지를 중심으로 인구가 집중되기 시작하여 현재는 도심지와 그 외 지역간 인구밀도 격차가 매우 심화되어 있다. 이러한 도심지 인구의 집중은 수많은 건물의 건설로 이어졌고 그림에서 보는 바와 같이 국내 주요 도심지의 경우 터널 주변에 대부분 건물이 밀집되어 있는 형태이다. 이 경우 신규터널을 건설하기 위해서는 기존터널 주위의 용지를 매입하여야 하는데 도심지 특성상 용지비가 고가이고 주변에 건물이 밀집하여 이에 대한 이주문제, 신규터널 건설로 인한 자연환경 훼손과 소음, 진동, 분진등 생활환경 저하 등에 대한 주민의 극심한 반발로 용지매입자체가 불가할 수 있다. 이 경우 기존터널을 확대하면 용지매입이 완료된 기존터널을 재활용할 수 있고 신규터널 건설에 따른 갱구부 조성과 이로 인한 자연훼손 및 공해의 발생이 적어 유효한 방법이 될 수 있다.

대표적인 사례로 방화터널을 들 수 있다. 방화터널은 당초 2차로로 계획되어 시공 중 미래의 교통량 증가가 예상되어 3차로로 확대한 사례이다. 신규터널 건설과 터널확대 두가지 방법에 대한 비교가 이루어졌으며 용지보상, 민원발생 등 여러 조건상 터널확대가 유효하다 판단되어 시공 중 확대가 이루어진 사례이다.



<방화터널>



<상도터널>

<주변에 건물이 밀집되어 용지매입자체가 불가능할 경우(예)>

그림에 방화터널의 확대터널단면을 나타내었다. 그림에서 보듯이 터널 좌측에 위치한 건물의 영향을 최소화하는 동시에 용지경계를 고려하여 측면으로 편측확대한 것을 볼 수 있다.



<확대터널단면선정 예(방화터널)>

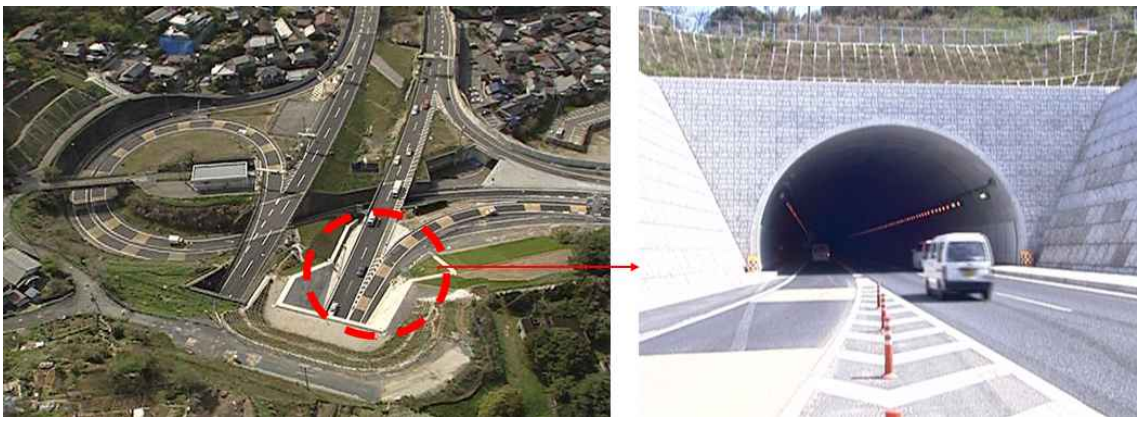
● 터널확대가 유효한 접속도로조건

1. 부분 확대만으로도 큰 효과를 기대할 수 있는 경우

부분확대로 큰 효과를 기대할 수 있는 사례로는 일본의 오쿠라터널 확대 사례가 대표적인 예이다. 그림에 부분확대 전후의 모습을 나타내었는데 부분확대 전의 전경을 보면 터널진입부에 두 개의 도로가 합류되어 터널로 진입하게 되어 있는데 오쿠라터널의 경우 고속도로터널이므로 차량의 운행속도가 빨라 교통사고의 위험이 매우 높은 상태이며 이를 해결하기 위해 신호등의 설치 또한 고속도로 이용목적에 비춰어 보았을 때 비현실적인 해결책이다. 이를 해결하기 위해 그림 2와 같이 터널 갱구부의 일부구간 약 170m를 2차로에서 3차로로 부분적으로 확대하여 합류되는 차량이 자연스럽게 합류될 수 있도록 개선하였다. 또한 입지여건상 우회도로의 확보가 불가하여 교통흐름을 유지한 상태에서 터널을 확대한 사례이다.



<오쿠라터널 부분확대 전>



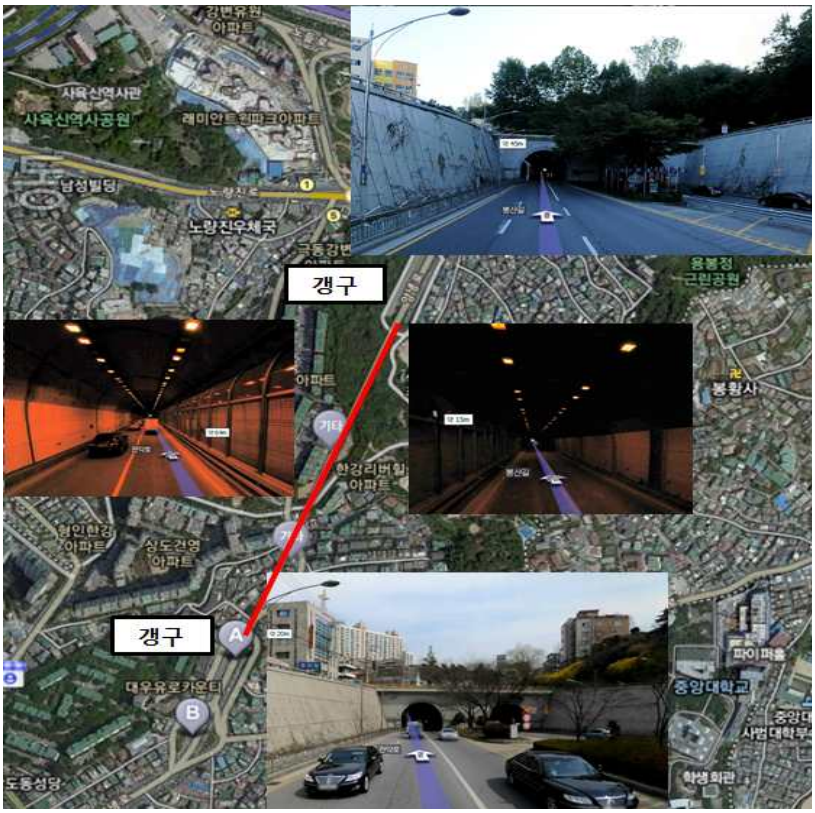
<오쿠라터널 부분확대 후>

2. 터널전후 진입도로 차로보다 터널의 차로가 적어 터널이 병목현상을 일으키는 경우

국내에서 1990년대 이전에 건설된 터널을 경우 대부분 2차로 이하의 터널로 당시의 인구증가를 고려하여 건설되었지만 도심지의 경우 인구집중이 심화되면서 도로는 크게 증가되었으나 터널의 확충은 이루어지지 않아 터널이 병목현상을 일으키는 주요원인이 되는 경우가 많다. 다음은 국내 병목현상을 일으킬 수 있는 터널의 예를 몇가지 나타낸 것이다.

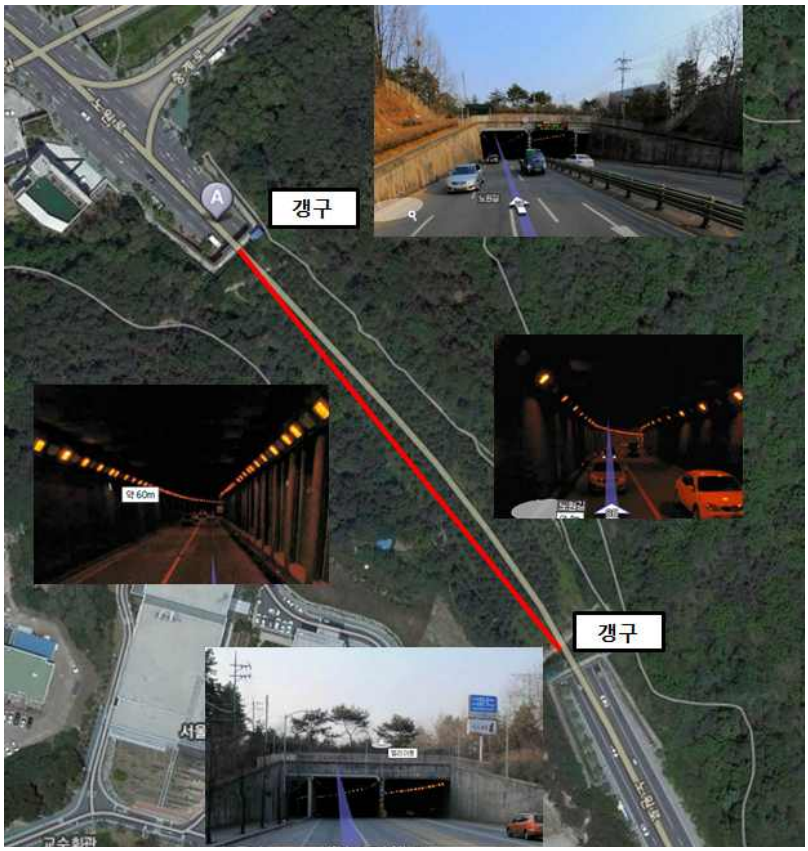
그림은 서울시 상도터널을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 터널 전후의 진입도로는

3차로인데 비해 터널은 2차로가 되어 터널 전후로 교통정체를 일으킬 수 있다.



<병목현상을 일으키는 원인이 되는 터널 예(상도터널)>

그림에 서울시 공릉터널을 나타내었다. 공릉터널은 Cut&Cover 방식으로 건설된 터널로서 그림에서 보듯이 상도터널과 마찬가지로 진입도로는 3차로인데 비해 터널은 2차로로 병목현상을 유발할 수 있다.



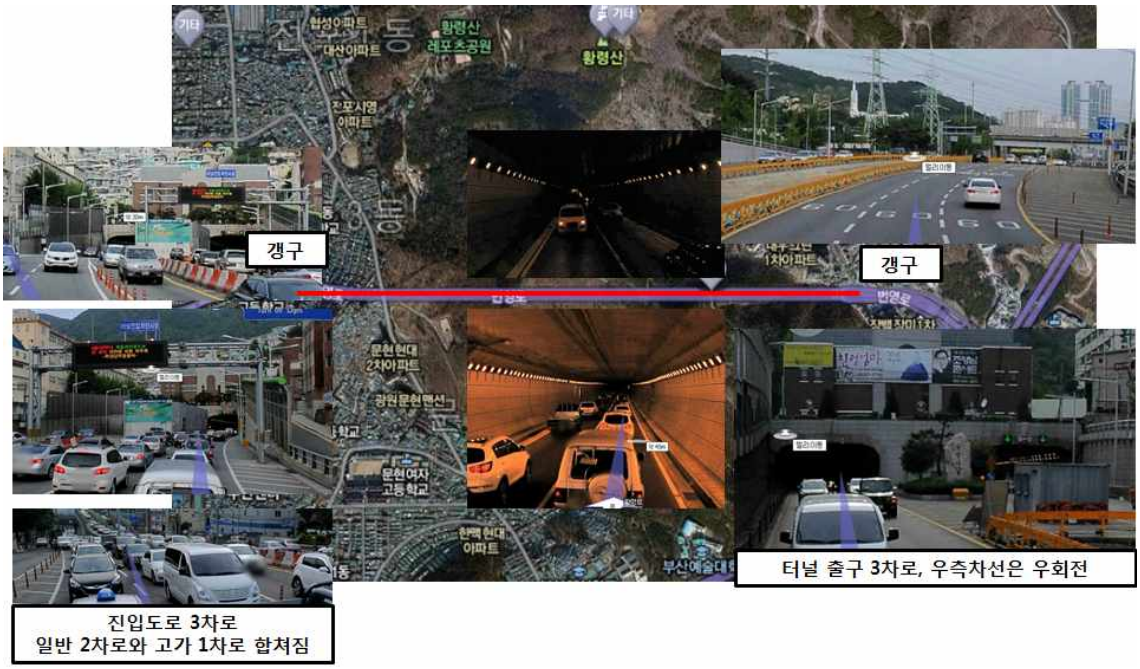
<병목현상을 일으키는 원인이 되는 터널 예(공릉터널)>

아래 그림에 서울시 남산2초터널을 나타내었다. 본 터널의 경우 진입도로는 2차로인대 비해 터널은 양방향단선터널로 건설되었다.



<병목현상을 일으키는 원인이 되는 터널 예(남산2호터널)>

그림에 부산시 황려안터널을 나타내었다. 본 터널의 경우 정체가 심한 곳으로 진입도로는 3차로 도로가 2차로로 감소하면서 고가 1차로와 합류되어 최종적으로 터널로 진입되는 차로는 3차로인데 비해 터널 내부는 2차로로 건설된 경우이다.

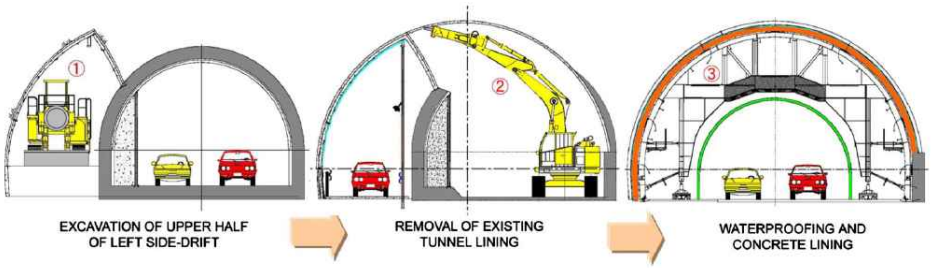


<병목현상을 일으키는 원인이 되는 터널 예(황령산터널)>

● 프로텍터의 종류 및 특징

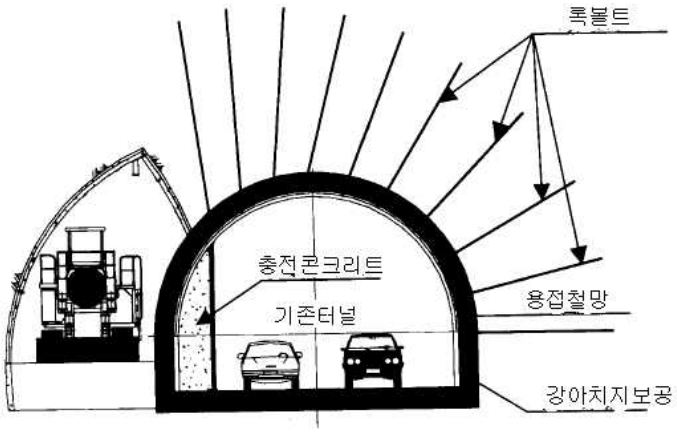
1. 기존터널의 라이닝을 프로텍터로 이용하는 방법

그림은 기존터널의 라이닝을 이용하는 경우의 한 예로 터널 측벽을 굴착한 후 굴착된 부분으로 교통을 통행시키고 기존터널을 유압햄머를 이용하여 확대굴착 한 후에 이동식 콘크리트 거푸집을 이용하여 콘크리트 라이닝을 타설함으로서 확대터널을 완성하게 된다.



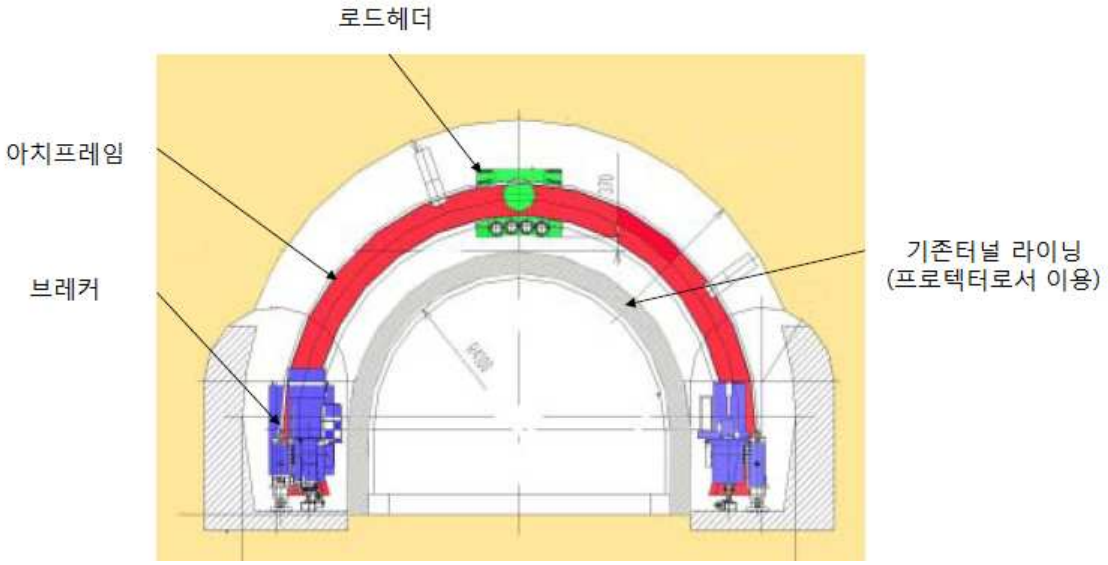
<기존터널 라이닝을 이용한 보호공: 1 - 굴착면, 2-유압햄머, 3-이동식 거푸집>
(F.Tonon, 2010)

본 방법은 그림과 같이 측벽 굴착 시 기존터널 라이닝의 안정성에 영향을 주게 되므로 기존터널 라이닝의 상태와 굴착면적, 굴착방법 등에 따라 충전콘크리트, 록볼트, 용접철망, 강아치 지보공 등으로 사전보강할 필요가 있다.



<기존터널라이닝을 이용하는 경우 사전보강>
(F.Tonon, 2010)

그림은 기존터널 라이닝을 이용한 또 하나의 경우로서 아치컷(arch cut)공법이다. 본 공법의 특징은 기존터널 라이닝을 이용하면서 다기능형의 아치형 전용기에 의해 일련의 시공이 가능하다. 전용기의 경우 연암지반까지 굴착이 가능하며 중거리에서 장거리(1,000m)의 터널 연장에 적용가능하다. 본 방법을 적용하고자 할 경우에는 전용장비가 있어야 하는 단점이 있다.



<아치컷공법(F.Tonon, 2010)>

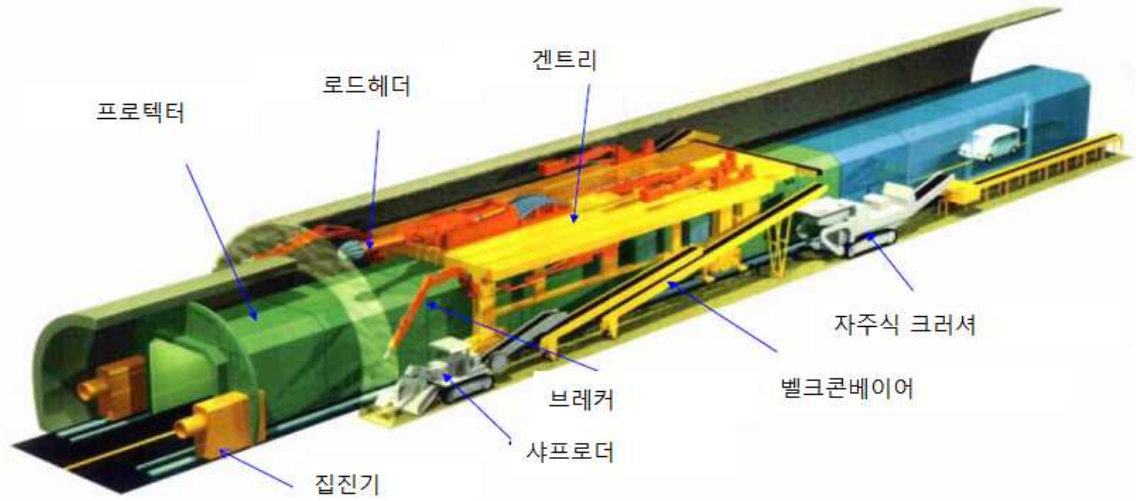
2. 별로로 제작된 강재프로텍터를 이용하는 방법

별도로 제작된 강재프로텍터를 이용하는 방법에는 고정식으로 터널 전 연장에 걸쳐 프로텍터를 설치하는 방법과 이동식으로하여 프로텍터 제작 및 설치비용을 최소화하는 방법이 있다. 최근에 개발된 확대공법을 표에 나타내었는데 표에서 볼 수 있듯이 이동식 프로텍터가 주로 적용되고 있는 것을 알 수 있다.

<최근 개발된 터널 단면 확대공법의 종류 및 특징(일본)>

개발공법명	프로텍터 구조	대상지반
Hybrid TWS공법	이동식 프로텍터	연암~중경암
Napoleon hat type staged 공법	이동식 프로텍터	토사~경암
Cresent moon형 공법	이동식 프로텍터	중경암까지
π-deck 공법	고정식 프로텍터	연암
Flat deck 공법	고정식 프로텍터	연암

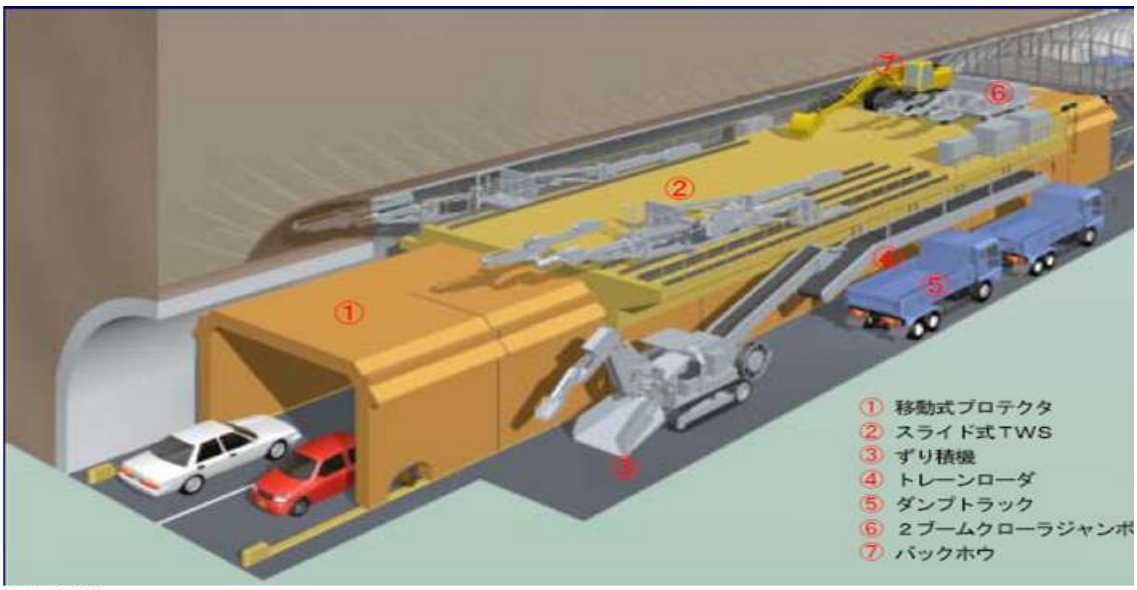
아래 그림에는 최근에 개발된 공법의 개요와 특징을 나타내었다.



[특징]

- 문형굴착기와 이동식 프로텍터를 조합한 Total Work Station
- 경암부터 중경암까지를 대상으로 함
- 장거리(1,000m)의 터널 연장에서 적용 가능
- 1차선 규제가 필요

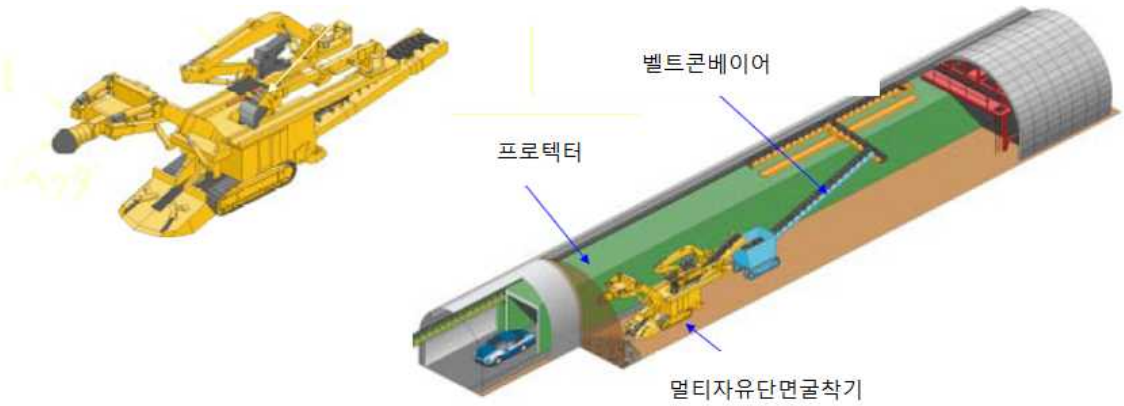
<Hybrid TWS공법의 개요도와 특징(F.Tonon, 2010)>



[특징]

- 이동식 프로텍터위를 움직이는 작업가대
- 발파굴착
- 토사부터 경암까지를 대상
- 장거리(1,000km)의 터널 연장에서도 적용 가능
- 2차선을 확보한 상태에서 시공이 가능(기존 터널이 큰 경우)

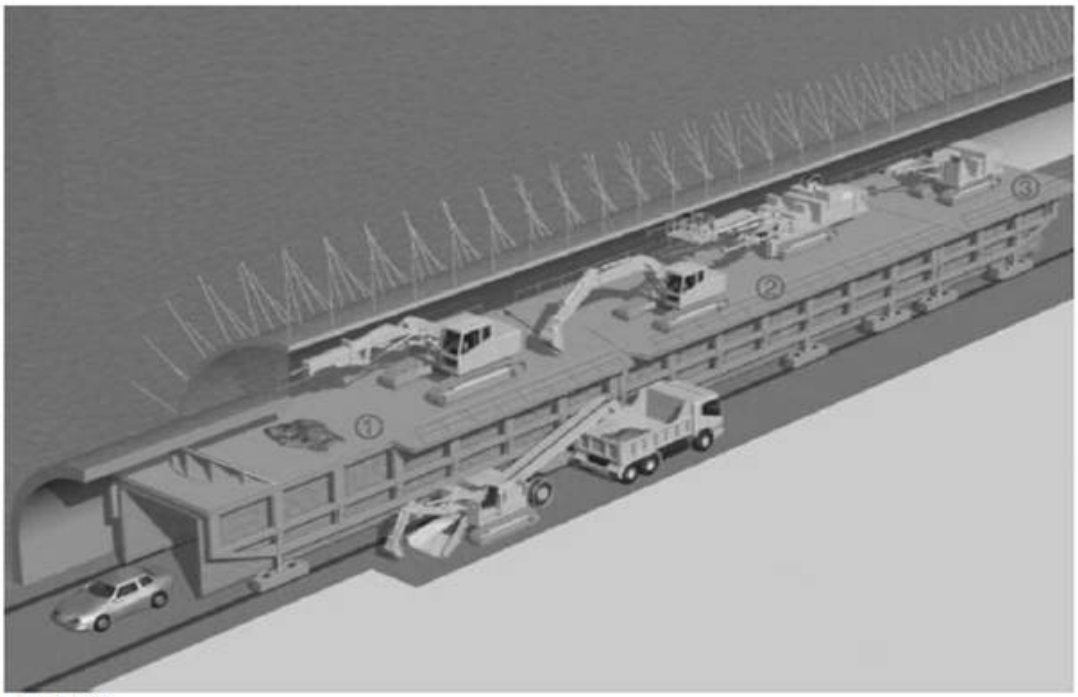
<나폴레온 햇형 스테이지 공법의 개요도와 특징(F.Tonon, 2010)>



[특징]

- 편측확대에 의한 넓은 작업공간 확보 가능
- 대형 멀티 굴착기(반전용자유단면굴착기)에 의한 효율적인 작업 가능
- 중경암까지를 대상으로 함
- 단거리에서 장거리(1,000m)의 터널 연장에 적용 가능
- 1차선 규제가 필요

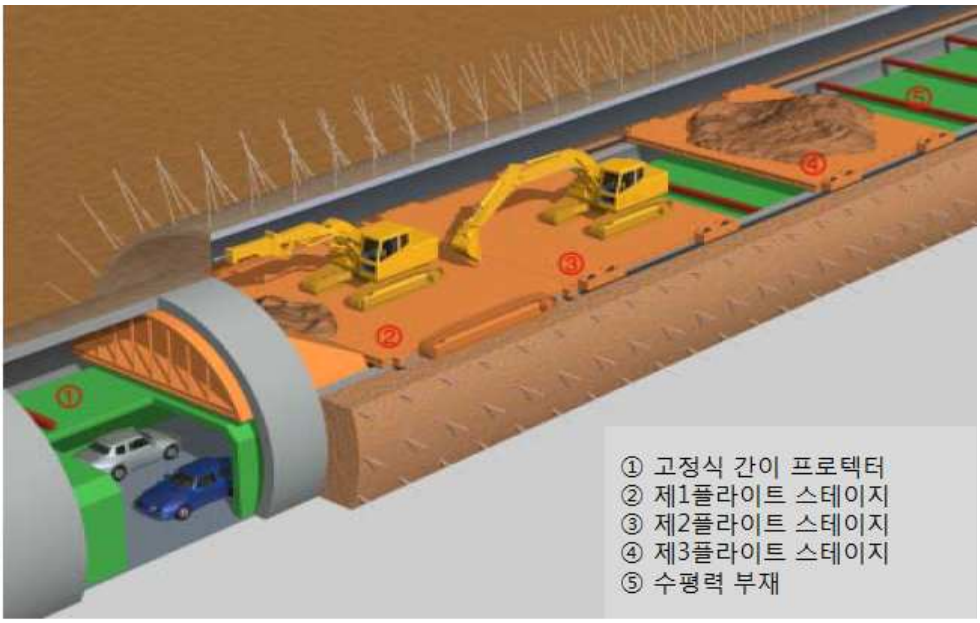
<Cresent moon형 공법의 개요도와 특징(F.Tonon, 2010)>



[특징]

- 범용장비 이용
- 연암까지를 대상
- 장비운용에 시간손실이 없음
- 굴착 공정과 보호공의 구조가 간단하므로 쉽게 적용가능

<π-deck 공법의 개요도와 특징(F.Tonon, 2010)>



[특징]

- 기존 라이닝의 일부를 이용한 평판형 이동식 작업 가대
- 작업대위의 범용굴착기에 의한 확대 굴착
- 연암을 대상
- 단거리에서 중거리까지의 터널 연장에 적용 가능
- 2차선을 확보한 상태에서 시공 가능(기존터널이 큰 경우)

<Flat deck 공법의 개요도와 특징(F.Tonon, 2010)>

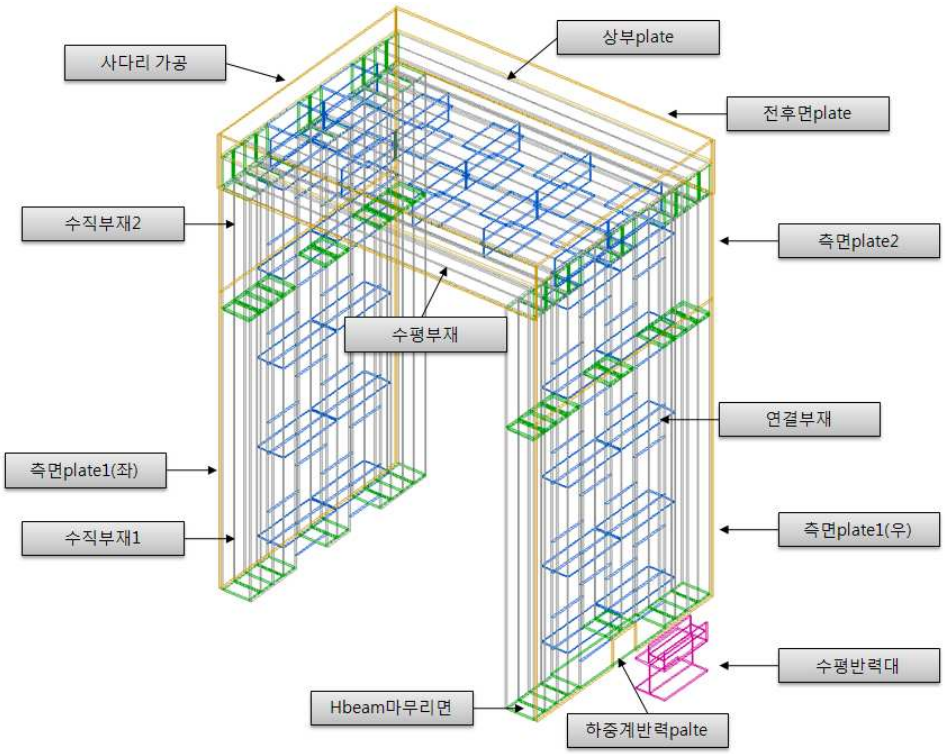
● 프로텍터의 이동 및 고정방법

1. 실대형실험에 의한 버력충돌 시 발생되는 프로텍터 기초부의 수직 및 수평반력 분석

프로텍터의 이동 및 고정방법을 개발하기 위해서는 우선, 프로텍터 운용 중 작용하는 하중에 의해 프로텍터의 기초부에서 발생되는 반력을 분석하여야 하며 이러한 반력의 분석결과를 토대로 기초부 보강 및 이동방안에 대한 상세한 설계가 이루어질 수 있다. 따라서 아래의 표와 그림과 같이 실대형 버력충돌시험 시 프로텍터 하부에 수직 및 수평의 반력을 계측하였다.

<실험 이력 및 조건>

Test Case	측정 시간	타격 위치(cm)	낙하 추의 낙하 높이	탄성 매트
TC 1	2011-05-02 13:24	Beam-W16S10	3m	3 layer (22.5cm)
TC 2	2011-05-02 13:36	Beam	3m	3 layer (22.5cm)
TC 3	2011-05-02 13:50	Beam-W15S7	6m	3 layer (22.5cm)
TC 4	2011-05-02 14:09	Beam	6m	3 layer (22.5cm)
TC 5	2011-05-02 14:28	Plate-W27S13	3m	3 layer (22.5cm)
TC 6	2011-05-02 14:46	Plate-W16S13	3m	3 layer (22.5cm)
TC 7	2011-05-02 15:00	Plate-W2N7	6m	3 layer (22.5cm)
TC 8	2011-05-02 15:19	Plate-W2N7	6m	3 layer (22.5cm)
TC 9	2011-05-03 10:56	Beam-E23N10	6m	-
TC 10	2011-05-03 11:12	Beam-E27N4	6m	-
TC 11	2011-05-03 11:25	Beam-W16	6m	-
TC 12	2011-05-03 11:51	Plate-E30N13	6m	-
TC 13	2011-05-03 13:18	Plate-E7N10	3m	-
TC 14	2011-05-03 13:35	Beam-E10N12	3m	-
TC 15	2011-09-02 16:01	Beam-E13N5	3m	2 layer (15cm)
TC 16	2011-09-02 16:13	Beam-E13N5	6m	2 layer (15cm)
TC 17	2011-09-02 17:03	Beam	1m	-
TC 18	2011-09-03 10:25	Beam-E5N8	1m	-
TC 19	2011-09-03 14:10	측면 타격	수평 4.1m 수직 1.4m	-



<프로텍터 실험체 하부반력 측정>

계측된 수직 및 수평반력을 다음 표에 나타내었다. 계측결과 최대 수직반력은 충격저감재인 탄성매트를 포설하지 않은 상태에서 최대 낙하높이 6m에서 Plate에 낙하시킨 TC12에서 약 13.2kN으로 측정되었으며, 최대 수평반력은 탄성매트를 포설하지 않은 상태에서 최대 낙하높이 6m에서 Beam에 낙하시킨 TC10과 TC11에서 약 14kN으로 측정되었다. 이는 프로텍터 상부에서 운용될 시공 장비의 사하중보다 낮은 수준의 하중으로 버력의 충돌이 기초부에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

<수직 및 수평반력 계측결과>

위치		TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC9	TC10	TC11	TC12	TC13	TC14	TC15	TC16	TC17	TC18	TC19
하중(kN)	VER	1.355	1.355	1.694	3.049	1.355	1.694	2.033	11.860	6.777	8.810	13.216	8.472	9.827	2.711	3.727	5.083	5.422	5.422
	HOR	1.165	1.398	3.497	3.730	1.398	1.398	2.564	9.325	13.988	13.988	7.926	5.595	6.061	3.263	5.828	6.994	9.092	3.030

2. 해외 시공사례

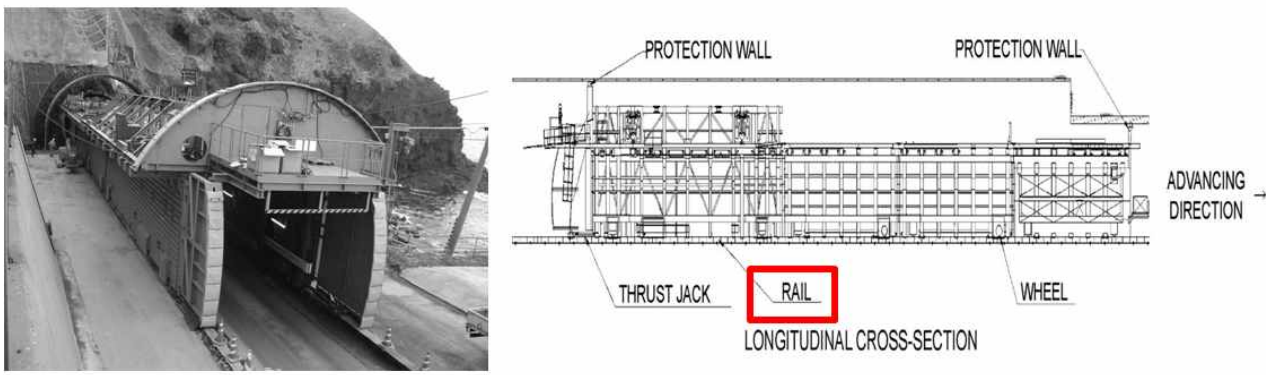
다음 그림은 가치간터널과 오쿠라터널의 시공사례로서 터널 전체를 프로텍터로 보호한 상태에서 터널 확대 시 프로텍터의 기초부를 설치한 사례이다. 두 터널 모두 기초부로서 H형강을 설치하고 H형강과 지면을 앵커볼트로 고정한 후 프로텍터를 갱외에서 조립하여 갱내 반입 후 이미 설치된 기초부 위에 설치하고 기초부와 체결하는 방식으로 프로텍터를 고정하였다.



<가치간 터널>　　<오쿠라 터널>

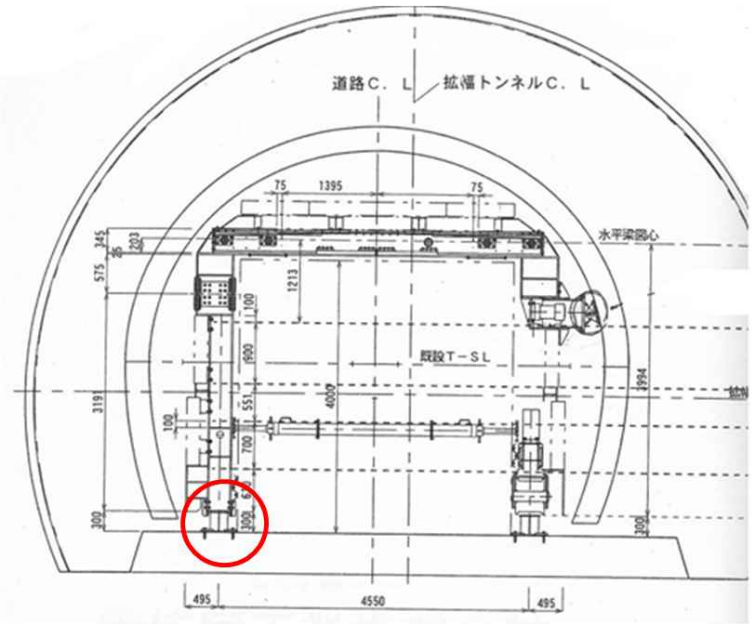
<프로텍터 기초부 설치(터널 전체 프로텍터 보호 시)>

다음 그림은 일본의 터널확대 사례 중 유일하게 이동식 프로텍터가 적용된 사례로 스키시마나이 터널확대 사례이다. 그림의 종단면도를 보면 프로텍터를 이동시키기 위해 터널 전체에 걸쳐 레일을 설치하였으며 유압잭을 이용하여 이동시킨 것을 알 수 있다.



<이동식 프로텍터 전경 및 종단면도(스키시마나이터널확대(사토공업))>

다음 그림은 횡단면도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 이동식 프로텍터를 적용한 경우에도 기초부 레일로서 H형강을 사용하였으며 기초부를 고정시키기 위해 앵커볼트를 사용한 것으로 판단된다.



<횡단면도(스키시마나이터널확대(사토공업))>

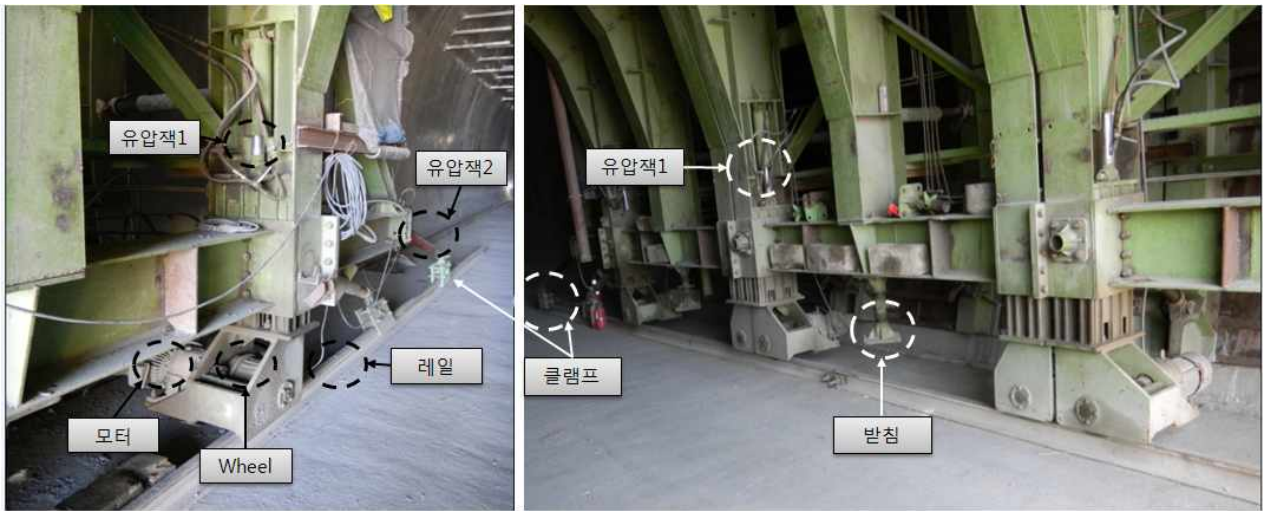
3. 국내 유사기술 검토

프로텍터의 이동과 관련하여 참조할 수 있는 유사기술로는 터널 콘크리트 라이닝 타설을 위한 이동식 거푸집을 들 수 있다. 다음 그림은 국내 OO현장에서 적용된 이동식 거푸집의 전경을 나타낸 것이다.



<이동식 거푸집 전경(OO현장)>

다음 그림은 이동식 거푸집 각 부위의 상세전경을 나타낸 것이다. 이 경우 거푸집을 이동시키기 위해 레일을 설치하였으며 레일은 별도로 고정하지 않은 경우이다. 이동식 거푸집의 이동과 고정은 다음과 같다. 이동식 거푸집을 이동할 경우에는 유압잭1을 밀어내어 Wheel을 레일과 접촉시킨 후 유압잭2와 모터를 이용하여 거푸집을 소정의 위치까지 이동시킨다. 거푸집을 원하는 위치까지 이동한 경우에는 유압잭1의 유압을 감소시켜 거푸집을 내리고 받침을 레일까지 펼쳐 고정되게 하며 유압잭2에 부착된 클램프를 통하여 거푸집이 전후로 이동하지 않도록 고정시킨다. 상황에 따라 거푸집을 내리지 않고 그대로 사용하기도 한다.



<이동식 거푸집 각 부위의 상세전경>

부 록 - 2

연구과제 설명자료

-교통류 보존형 터널단면 확대 시공기술 개발-

2012. 12.

주관연구기관	한국건설기술연구원
연구책임자	김동규

목 차

Ⅰ. 과제 개요 ····· 1

Ⅱ. 연구개발 결과 ····· 11

Ⅲ. 연구성과 활용방안 ····· 58

Ⅳ. 기대효과 ····· 62

첨부 1. 시제품 개발 실적 ····· 63

2. 지식재산권 실적 ····· 64

3. 논문 실적 ····· 65

4. 연구비 세부 현황 ····· 66

Ⅰ 과제 개요

□ 개 요

○ 과 제 명 : 교통류 보존형 터널단면 확대 시공기술 개발

○ 연구기관 : 한국건설기술연구원, ㈜대우건설, 대원토질(주)

○ 연구기간 : '09.10.26～'12.10.25(3년)

○ 연 구 비 : 총 871백만원(정부 414백만원, 기업 457백만원)

(단위 : 백만원)

구분	'09	'10	'11	계
정부	80	152	182	414
기업	95	167	195	457
계	175	319	377	871

○ 과제수행체계

구분	연구과제명	총연구기간	연구기관	연구책임자
주관	터널 단면 확대 안정성 분석 및 설계기술 개발	'09.10～'12.10	한국건설기술연구원	김동규
공동	터널 단면 확대 시공기술 개발	'09.10～'12.10	㈜대우건설	백기현
공동	터널 단면 확대 보강기술	'09.10～'12.10	대원토질(주)	이재덕

□ 개발 배경

○ 도심지내 교통량 증가 및 도로차선 확대 필요

- 도심지내 교통정체 심화로 도로차선 확대 필요
- 신설도로터널 또는 우회도로 건설 필요
- 신설도로터널 또는 우회도로 건설시 도심지내 녹색공간 훼손 또는 추가 공간 부족

○ 기존터널 단면확대 요구

- 도심지내 도로터널 단면확대시 터널내 교통흐름 차단으로 주변 교통정체 가속화
- 프로텍터를 활용한 터널내 교통흐름 유지 터널단면 확대 설계/시공 기술 부재
- 터널 성능개선 및 공용기간 연장
- 터널단면 확대 후 병목현상 해소 및 교통정체 감소

□ 기술 동향

○ 터널 단면 확대 시공사례

- 국내의 경우 수 곳에서 기존터널의 리뉴얼 시공이 이루어졌으나 모두 터널내 도로를 폐쇄한 상태에서 개축
- 각 발주처(도로, 철도)에서 하나의 대안으로 거론되고 있지만 실제적용을 위한 기반기술이 매우 부족한 실정하여 현재까지 국내에서 교통흐름을 보존한 상태에서 터널확대 시공 실적은 전무
- 일본 교토성 도로국에서는 1998년에 “신도로기술 5개년 계획”을 수립하여, 물류의 국제화・다양화 및 차량의 대형화에 대응하기 위하여 도로 공간을 유효하게 활용하기 위한 기술개발을 5년간 실시함. 주요 내용은 “터널의 단면 확대 기술”, “교량의 차량 대형화 대응 기술” 및 “이론적 포장 구조 설계법의 개발”로 구성. 특히 “터널의 단면 확대 기술” 연구에서 1차선~2차선 차량 통행이 가능한 노후 터널의 확대・개축 기술 개발 수행
- 일본 토목연구소에서는 2004년 민관 19개 기관이 공동으로 터널확폭 공법에 대한 연구를 수행하여 8개의 공법을 개발하였음. 기술의 주요내용은 발파 굴착형·기계 굴착형의 프로텍터 설계 및 시공법이며 이에 대한 시공 매뉴얼을 작성

- 일본의 경우 약 40여 개소에서 터널내 교통 흐름을 유지하면서 터널 확폭 시공이 이루어졌음. 대상지반도 토사~경암 등 모든 지반에서 적용가능한 공법이 개발되었음. 프로텍터 내로 교통흐름을 유지한 채 외곽에서 발파 굴착하는 공법도 개발되었음. 특히 지반조건, 차선규제 방식, 프로텍터 종류, 굴착방식 등에 대한 다양한 시공사례를 바탕으로 설계·시공 메뉴얼이 제정되는 등 기존 노후터널의 교통흐름을 유지한 상태에서 확폭하는 공법이 보편적인 공법으로 자리를 잡음. 이를 통해 차선 통제로 인한 각종 사회직간접 비용을 최소화 시키고 있음



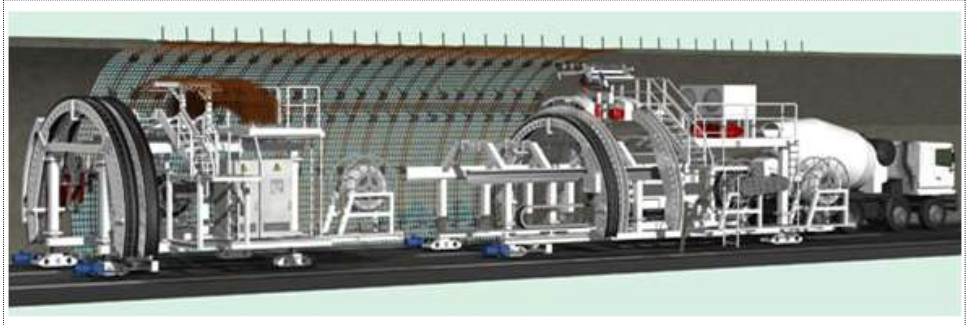
< 일본의 터널 단면 확대 시공사례 >

- 유럽의 경우 19세기 중반부터 Twin-track 철도터널이 사용되었으나 운행 기차의 속도가 빨라짐에 따라 안정성 기준이 증대되어 확대가 요구됨. 독일 GTA사에서 운용 중 철도터널 확대를 위한 전용장비를 개발하였으며 2건의 시공실적을 보유하고 있음



< 철도터널 확대 장비(GTA, 독일) >

- 쉴드 TBM제조사인 Herrenknecht에서도 도로와 철도의 리뉴얼 및 확대를 위한 장비개발 연구를 수행 중이며 전용 확대 장비 개념도 제시



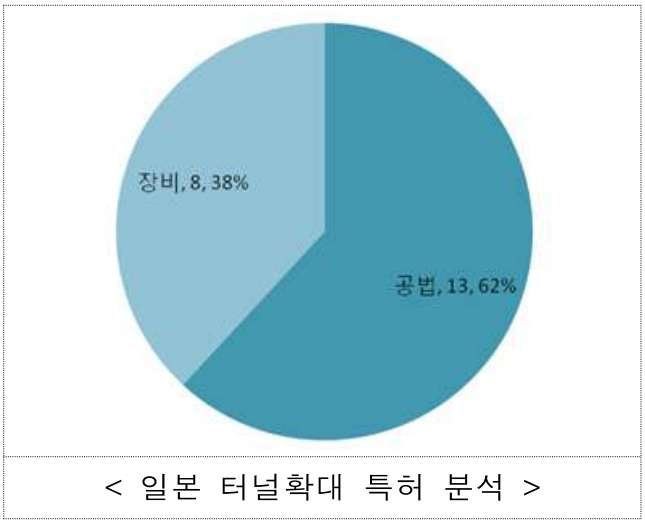
< 도로터널 확대 장비(Herrenknecht 개념도, 독일) >



< 철도터널 확대 장비(Herrenknecht 개념도, 독일) >

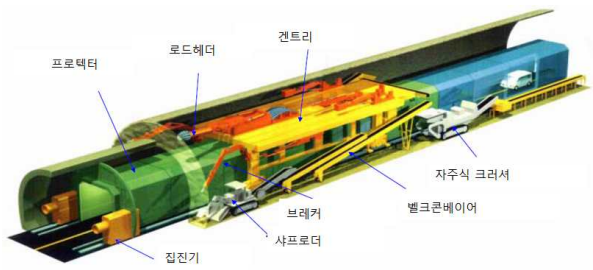
○ 특허 및 장비개발 동향

- 일본은 대형건설사 및 연구기관을 중심으로 보행자 안전을 위한 프로텍터 및 이를 이용한 공정으로 다수의 특허 출원
- 일본 특허를 분석하면 공법특허가 62%, 장비특허가 38%를 차지함



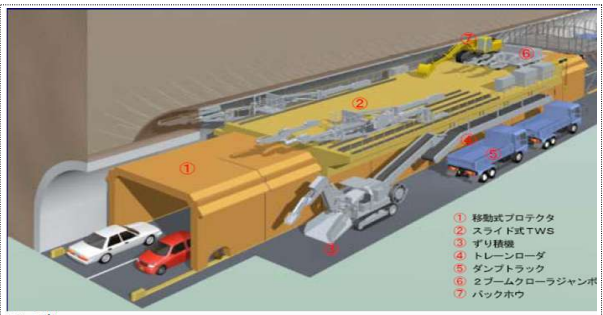
< 일본 터널확대 특허 분석 >

- 일본에서 개발된 장비는 협소공간에서의 장비의 운용성을 증진시켜 시공속도를 향상시키는데 목적이 있음.



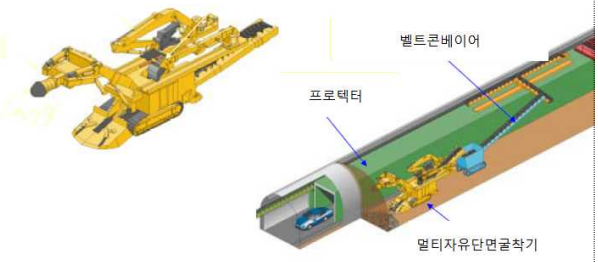
[특징]
- 문형굴착기와 이동식 프로텍터를 조합한 Total Work Station
- 경암부터 중경암까지를 대상으로 함
- 장거리(1,000m)의 터널 연장에서 적용 가능
- 1차선 규제가 필요

< Hybrid TWS공법의 개요도(일본) >



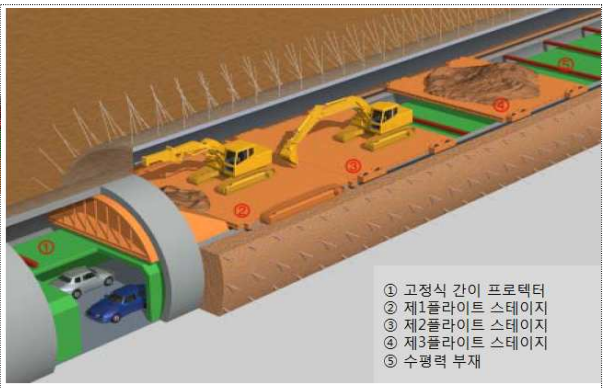
[특징]
- 이동식 프로텍터위를 움직이는 작업가대
- 발파굴착
- 토사부터 경암까지를 대상
- 장거리(1,000km)의 터널 연장에서도 적용 가능
- 2차선을 확보한 상태에서 시공이 가능(기존 터널이 큰 경우)

< 나폴레온 헷형 스테이지 공법의 개요도(일본) >



[특징]
- 편측확대에 의한 넓은 작업공간 확보 가능
- 대형 멀티 굴착기(반전용자유단면굴착기)에 의한 효율적인 작업 가능
- 중경암까지를 대상으로 함
- 단거리에서 장거리(1,000m)의 터널 연장에 적용 가능
- 1차선 규제가 필요

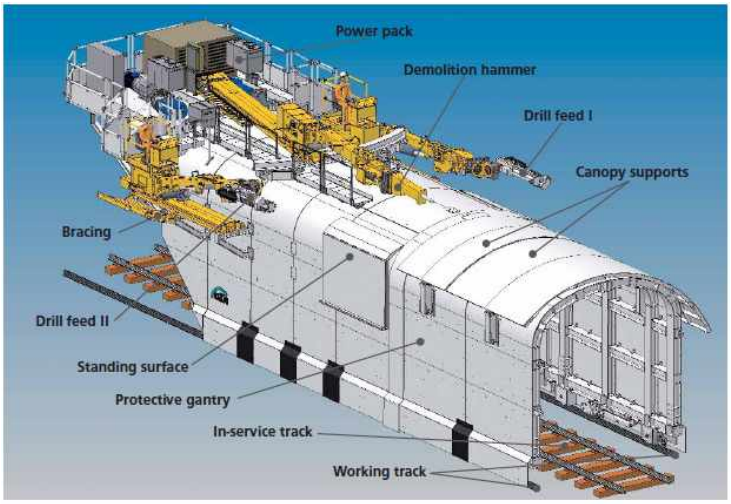
<Cresent moon형 공법의 개요도(일본)>

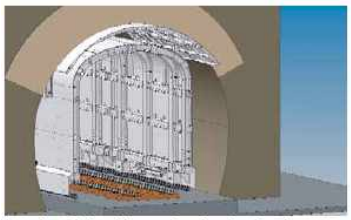


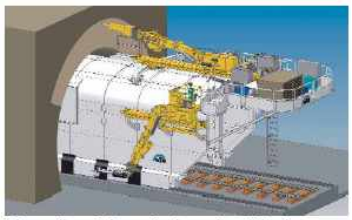
[특징]
- 기존 라이닝의 일부를 이용한 평판형 이동식 작업 가대
- 작업대위의 범용굴착기에 의한 확대 굴착
- 연암을 대상
- 단거리에서 중거리까지의 터널 연장에 적용 가능
- 2차선을 확보한 상태에서 시공 가능(기존터널이 큰 경우)

< Flat deck 공법의 개요도(일본) >

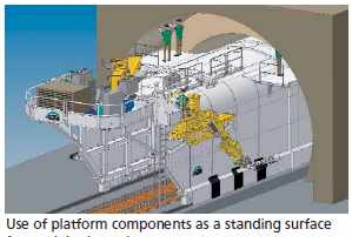
- 유럽에서는 철도터널에 특화된 시공 장비 개발




Securing of the old tunnel roof arch using the two canopy supports


Dismantling of the roof using a demolition hammer


Drilling of blastholes


Use of platform components as a standing surface for work in the arch area

< 유럽에서 개발된 터널 단면 확대 시공장비(독일) >

- 국내의 경우 관련 특허로 6건이 있으며 공법특허가 2건, 장비 특허가 4건으로 국외에 비해 매우 적음

□ 시장 및 정책 동향

○ **시장 동향**

- 국내 도심지 터널의 현황
  - 도심지 터널 중 공용기간이 30년 이상인 터널이 26%임
  - 도심지 터널 폭 15m 이하의 터널은 66%임
  - 2000년도 이전 건설된 도심지 터널의 경우 대부분 2차로 터널로 진입차로(3차로 혹은 4차로)보다 터널내부 차로가 적어 병목현상 발생
- 국내 터널 단면확대 실적
  - 국내는 교통흐름을 유지한 터널 단면 확대 시공실적은 전무
  - 교통량 증가에 의한 터널 단면 확대요구가 증가됨
- 노후터널의 리뉴얼 필요성 증대
  - 일본 사사고 터널의 붕괴로 인해 노후터널에 대한 안정성 증대 및 리뉴얼 요구 증가

○ **정책 동향**

- 탄소를 줄여가는 사회구현 및 저탄소 그린 한반도 구현
- 녹색국토·교통의 조성
- 지속가능국가 실현
  - 환경과 개발의 조화를 통한 지속가능국가 실현
  - 깨끗한 환경, 에너지자립강화, 생태친화적 국토관리로 국민 삶의 질이 보장되는 쾌적한 환경을 향유
- 국가재난관리시스템 강화
  - 화재 및 붕괴, 폭발, 환경오염사고 등으로 인한 피해 예방
- 저탄소, 환경보전 및 삶의 질 향상에 대한 정부 정책기조 유지 및 붕괴사고에 대한 재난대비 강화

□ 연구 목적

○ 본 연구는 도심지내 교통량 증대에 따른 차선확대에 대응하기 위해 기존 도로터널의 교통흐름이 확보된 터널 단면 확대 기술을 개발하는 것으로써 최종목표는 **'교통흐름을 확보한 터널 단면 확대 시공기술 개발'**임. 본 연구에서 제시될 기술은 주로 도심지내에서 포화된 교통량을 해결하기 위한 도로 차선 확대시 신설터널 건설이 어려운 구간에 주목표로 하고 있으며, 다음과 같은 세부목표기술들이 상호 연계성을 갖는 기술개발을 목표로 둠

■ 터널 확대 안정성 분석 및 설계 기술 개발
■ 교통흐름 유지 터널 확대 시공 기술 개발
■ 교통흐름 유지 터널 확대 시공 기술 개발

□ 주요 연구내용

○ 터널 확대 안정성 분석 및 설계 기술 개발
- 실제 시공사례를 통한 터널 단면 확대시 지반안정성 분석
- 터널 단면 확대형식 및 규모에 따른 지반 안정성 해석
- 터널 지보재 및 라이닝의 역학적 특성 조사
- 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석기법 및 설계기법 제시
- 터널 단면 확대 설계 및 시공 지침(안)작성

○ 교통흐름 유지 터널 확대 시공 기술 개발
- 국내외 터널 단면 확대 시공기술 적용 현황 조사 및 분석
- 국외 프로텍터 설계 및 제작기술 분석
- 협소공간 및 프로텍터를 고려한 시공장비 분석, 개념 정립

및 제작기술제시
- 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 프로텍터 충격하중 및 안정성 해석
- 발파시 교통제어를 위한 교통량 평가기법 제시
- 프로텍터 시작품 제작 및 실대형 성능평가에 의한 프로텍터 설계제작 기술제시
- 터널 단면 확대 시공 프로세서 및 시공법 제시

○ 교통흐름 유지 터널 확대 보강 기술 개발
- 터널 단면 확대시 보강공법 조사 및 분석
- 경사 록볼트 시스템에 대한 안정성 분석
- 터널 단면 확대 보강 프로세서 제시
- 협소 공간 보강공법 시뮬레이션 및 기술 제시

□ 연차별 주요 연구내용

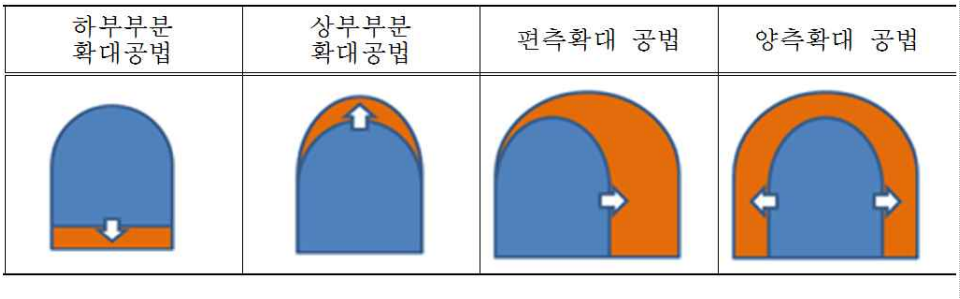
연차	주요 연구내용	연구수행기관
1차년도 ('09.10.26 ~'11.6.25)	✓ 실제 시공사례를 통한 터널 단면 확대 시 지반안정성 분석	한국건설기술연구원
	✓ 터널 지보재 및 라이닝의 역학적 특성 조사	한국건설기술연구원
	✓ 터널 단면 확대형식 및 규모에 따른 지반안정성 해석(Ⅰ)	한국건설기술연구원 (주)대우건설
	✓ 국내외 터널 단면 확대 시공기술 적용현황 조사 및 분석	㈜대우건설
	✓ 국외 프로텍터 설계 및 제작기술 분석	㈜대우건설
	✓ 국내외 터널 단면 확대 시 보강공법 조사 및 분석	대원토질(주)
	✓ 협소공간 및 프로텍터를 고려한 시공장비 분석 및 개념 정립	대원토질(주)
	✓ 터널 단면 확대 시공 및 보강 프로세스 정립	한국건설기술연구원 ㈜대우건설 대원토질(주)
2차년도 ('10.6.26 ~'11.6.25)	✓ 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 지반 안정성 해석(Ⅱ)	한국건설기술연구원
	✓ 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석기법 및 설계기법 제시	한국건설기술연구원
	✓ 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 프로텍터 충격하중 및 안정성 해석	㈜대우건설
	✓ 발파시 교통제어를 위한 교통량 평가기법 제시	㈜대우건설
	✓ 프로텍터 시작품 제작 및 실대형 실험에 의한 검증 및 보완	한국건설기술연구원 ㈜대우건설
	✓ 프로텍터 설계제작 기술	한국건설기술연구원 ㈜대우건설
	✓ 터널 단면 확대 시공법 prototype 제시 및 시뮬레이션 검증	한국건설기술연구원 ㈜대우건설
	✓ 협소 공간 보강기술 제시 및 시공성 시뮬레이션(Ⅰ)	대원토질(주)
	✓ 경사 록볼트 시스템에 대한 안정성 분석	대원토질(주)
3차년도 ('11.6.26 ~'12.10.25)	✓ 터널단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석기법 및 설계기법 완성	한국건설기술연구원 ㈜대우건설
	✓ 터널단면 확대 실물 실대형 실험(Ⅱ)	한국건설기술연구원 ㈜대우건설
	✓ 프로텍터 시작품 제작 및 검증	한국건설기술연구원 ㈜대우건설
	✓ 협소공간 시공 시뮬레이션	한국건설기술연구원
	✓ 협소공간 보강공법 검증 및 완성	대원토질(주)
	✓ 터널 단면 확대 설계 및 시공 지침(안) 작성	한국건설기술연구원, ㈜대우건설, 대원토질(주)

Ⅱ 연구개발 결과

□ 국내외 터널 단면 확대 시공기술 적용 현황 조사 및 분석

○ 터널확대 종류 및 방법

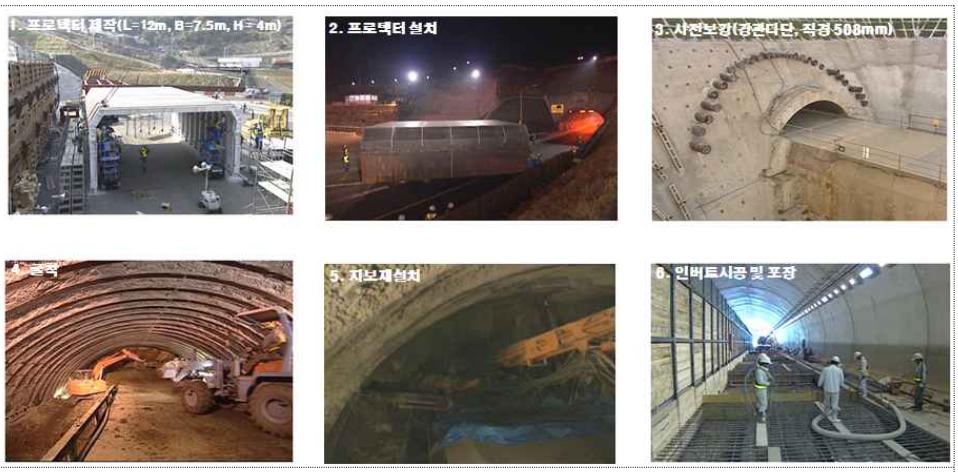
- 터널확대는 확대방향에 따라 하부부분, 상부부분, 편측 및 양측확대로 분류할 수 있음
- 하부부분과 상부부분은 내공폭의 변화는 없이 내공높이만 확대하는 것으로 작업공간이 협소하여 작업효율이 나쁘며 결과적으로 전단면확대에 비해 비용이 높게 되는 경우가 많음
- 편측확대는 터널의 중심선을 이동하여 한쪽 방향으로 집중하여 확대하는 방법으로 큰 작업공간을 확보할 수 있으며 양측확대방법은 터널중심의 이동량이 크지 않으며 시공사례가 가장 많은 방법임



< 터널 단면 확대 분류 >

○ 터널확대 시공순서 분석

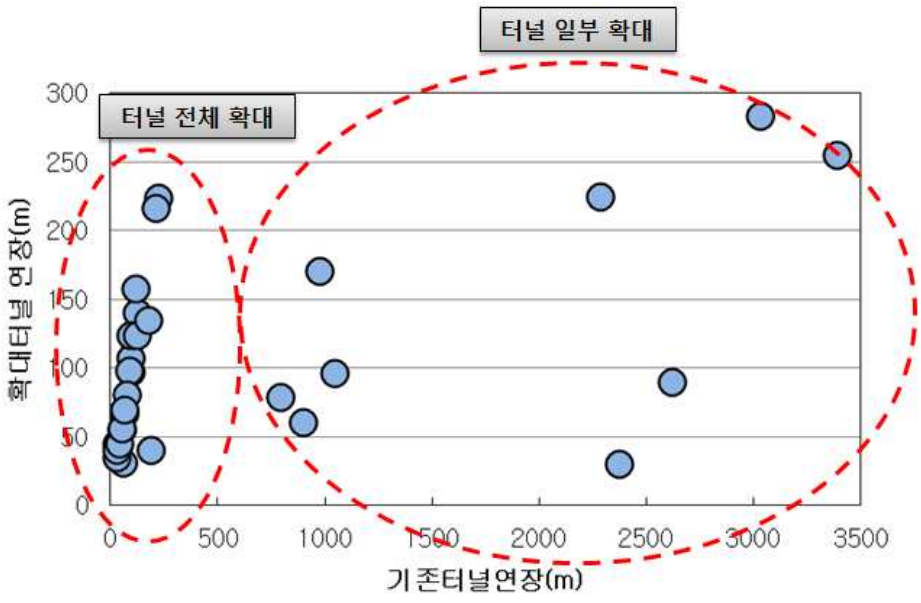
- 터널의 확대 시공순서는 확대방법에 따라 차이가 있지만 일반적으로 확대순서는 프로텍터 설치 -> 사전보강 -> 굴착공 -> 지보재설치 -> 인버트시공 및 포장임



< 터널 확대 시공전경(오쿠라터널, 일본) >

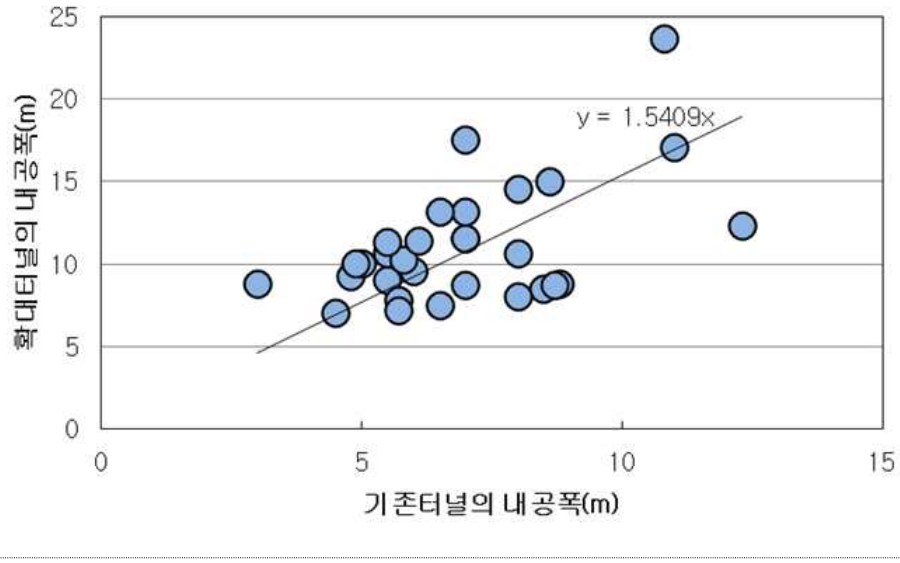
○ 터널확대 제원 및 확대의 목적

- 기존터널의 연장과 확대터널의 연장을 살펴보면 기존터널 연장이 250m 이하일 경우에는 전체터널을 확대하였지만 1000m 이상일 경우에는 분기부나 갱구부의 일부를 확대하는 것으로 나타남. 확대터널의 연장은 모두 300m 이내인 것으로 나타났으며 대부분 확대부 전체를 프로텍터를 설치하고 확대한 것으로 보았을 때 300m 이내에서 경제성이 확보될 수 있는 것으로 판단됨



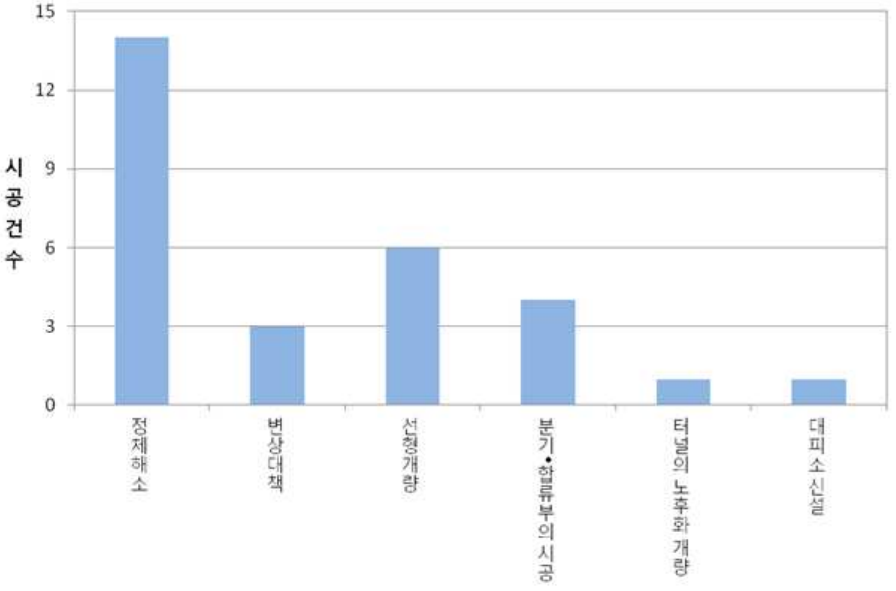
< 기존터널과 확대터널의 연장 비교 >

- 기존터널의 내공폭과 확대터널의 내공폭을 비교해보면 기존터널의 내공폭이 5~10m인 것을 확대한 경우가 많으며 이를 1.2~2.0배 확대하는 경우가 많은 것으로 나타남. 1.54배 이상 확대하는 사례가 많음.



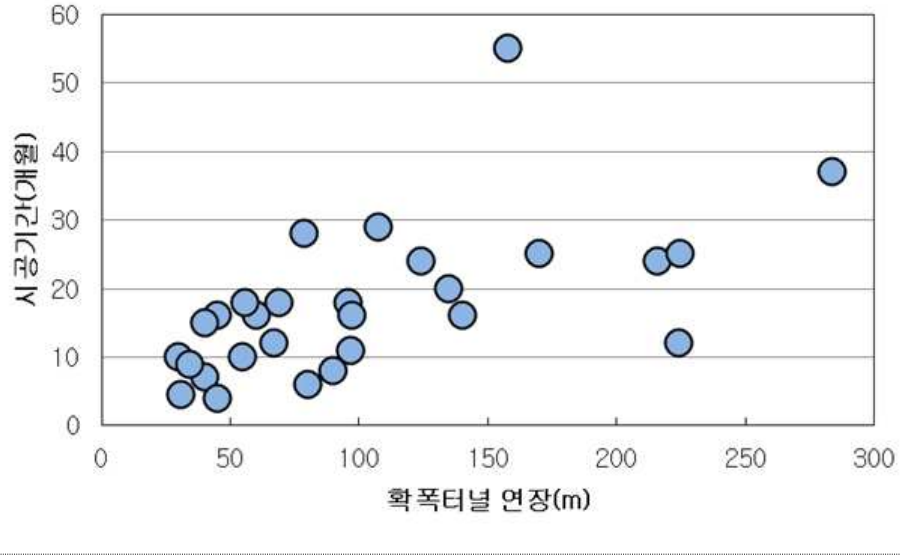
< 기존터널과 확대터널의 내공폭 비교 >

- 터널의 확대목적를 살펴보면 교통정체해소가 가장 많은 14건이었으며 다음으로 선형개량, 인도설치, 분기합류부 시공순이었음



< 터널확대 목적 >

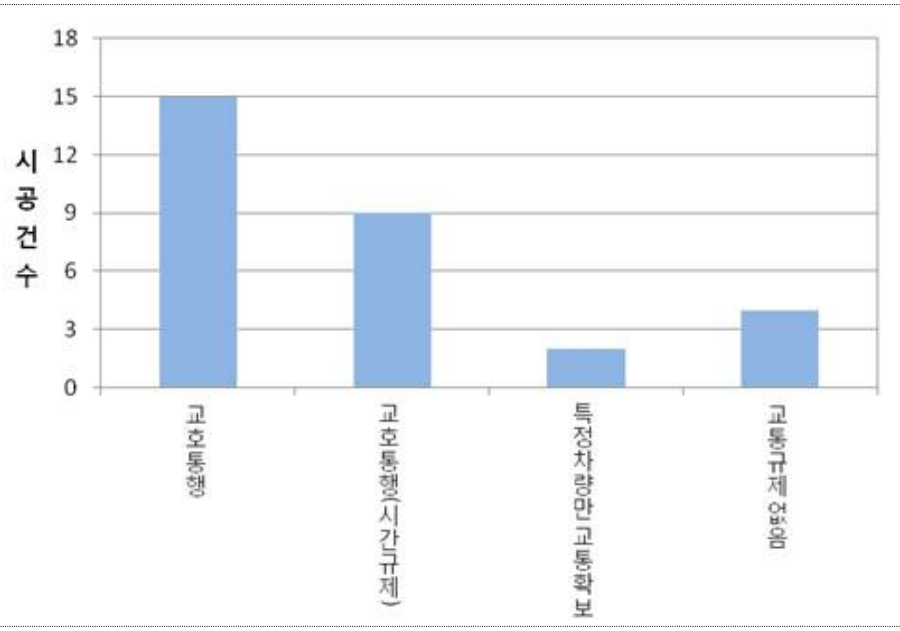
- 터널 확대연장과 시공기간을 살펴보면 교통을 보존한 상태에서 터널을 확대할 경우 교통통제, 지형적 여건, 작업공간 협소 등으로 신규터널을 건설하는 것보다 더 많은 시간이 소요됨



< 확대터널 연장과 시공기간 비교 >

○ 터널확대 시 교통규제 방식

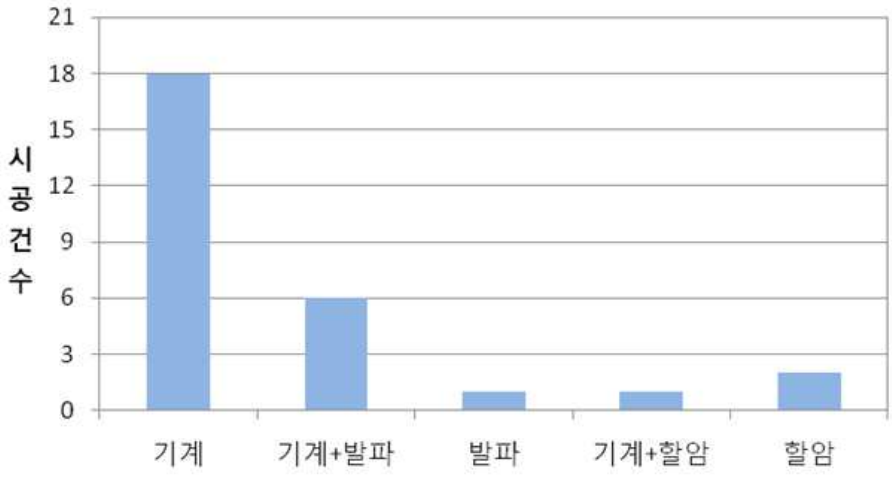
- 교통규제방식은 교호통행이 15건으로 가장 많으며 다음으로 시간규제를 행한 교호통행이 9건임



< 터널확대 시 교통규제 방식 >

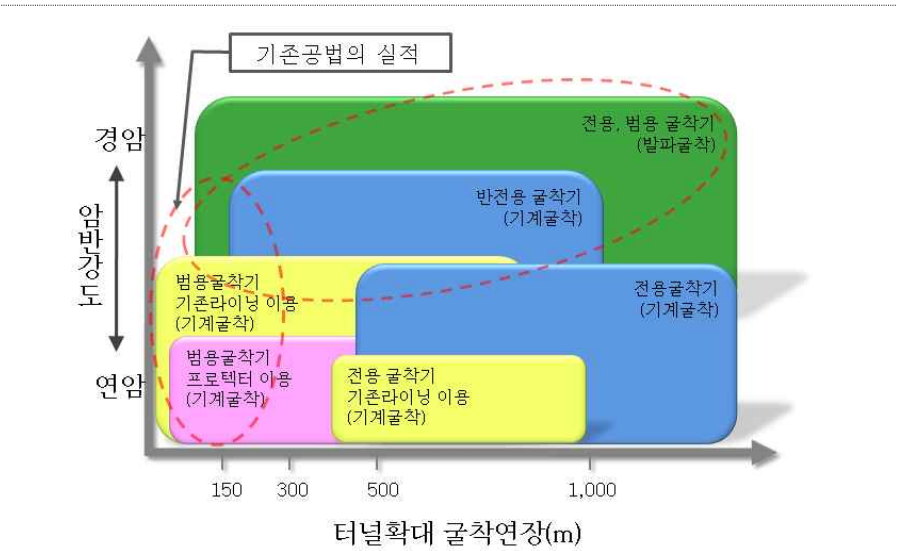
○ 터널확대 시 굴착방법

- 굴착방법은 로드헤더 및 자유단면형상기와 같은 기계굴착이 대부분을 차지하고 있으며 발파굴착을 병용한 경우가 6건이지만 이는 대부분 기계굴착을 하고 발파를 일부 병요한 것임. 순수한 발파에 의한 경우는 1건임



< 터널확대 시 굴착방법 >

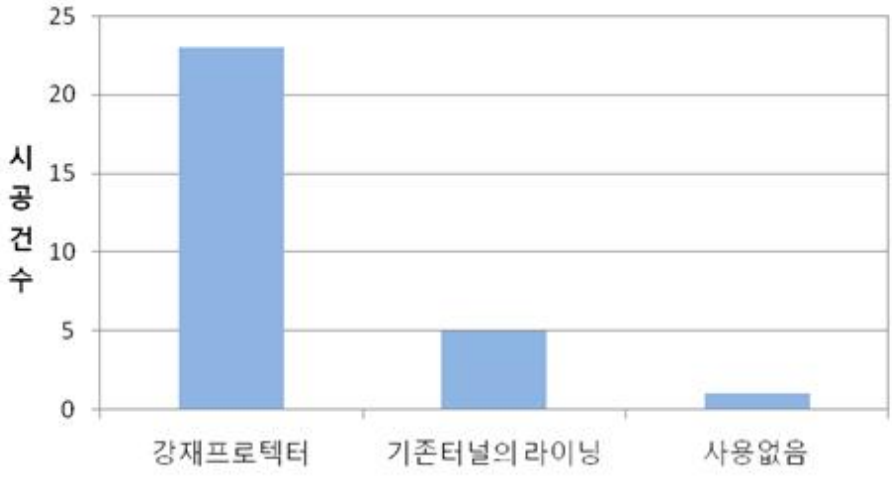
- 확대터널연장과 암반의 강도별 효율적인 굴착방법을 보면 기존의 공법은 주로 연장이 짧고 암반의 강도가 작은 지반에 적용된 것을 알 수 있음. 국내의 경우에는 터널연장과 암반강도를 고려했을 때 발파굴착이 효율적일 것으로 판단됨



< 터널확대 연장 및 암반강도에 따른 굴착방법 >

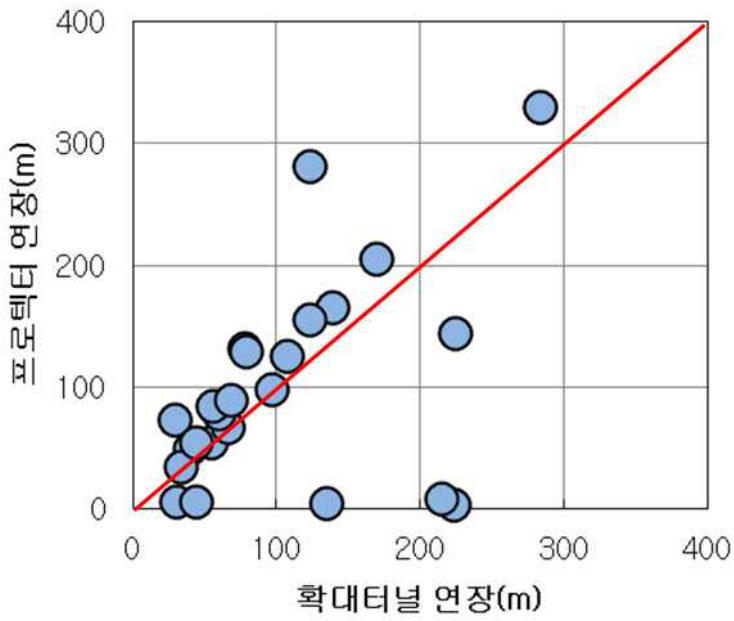
○ 터널확대 시 적용된 프로텍터의 구조 및 제원

- 프로텍터의 종류는 강재프로텍터가 23건으로 가장 많았으며 강재프로텍터를 사용한 이유는 작업자 및 운전자의 안전확보가 가장 중요하기 때문으로 판단됨



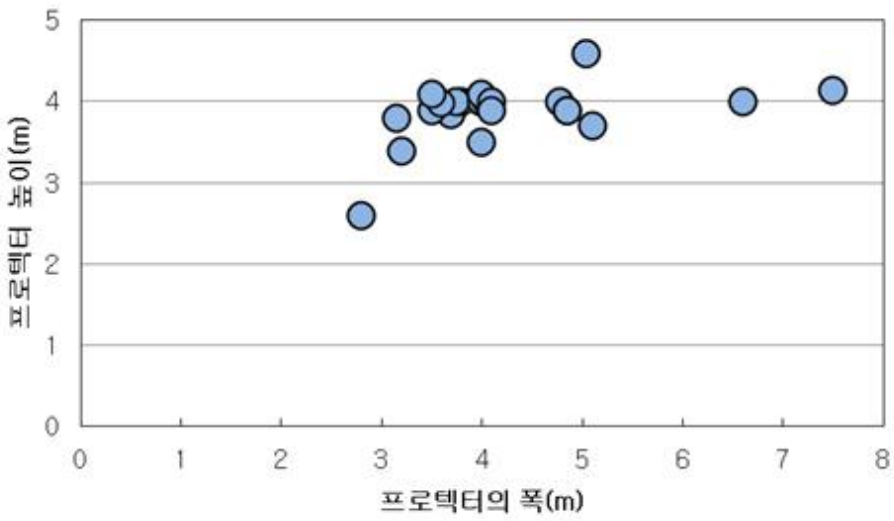
< 프로텍터의 종류 >

- 확대터널 연장과 프로텍터의 연장을 살펴보면 대부분 확대터널의 연장보다 프로텍터의 연장이 긴 것으로 나타남.



<확대터널과 프로텍터의 연장 비교 >

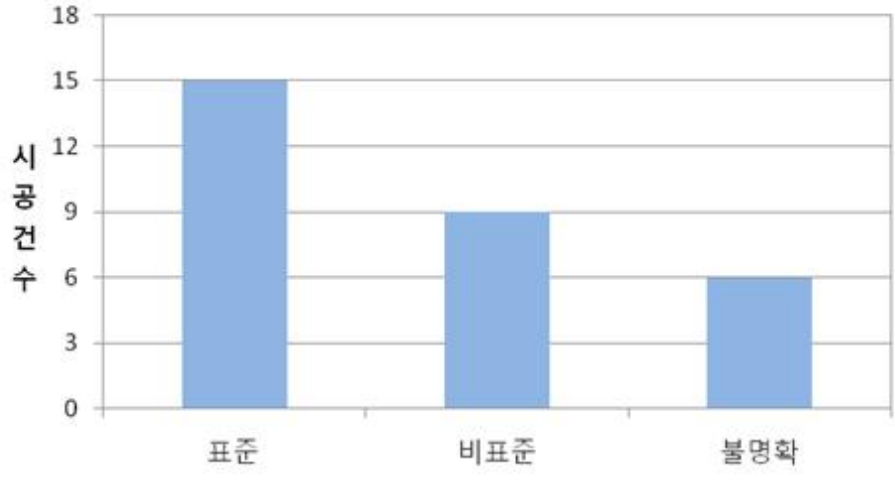
- 프로텍터의 높이는 약 4m가 가장 많고, 폭은 확대차로에 따라 상이하지만 최소 3m이상 확보하는 것을 알 수 있음



< 프로텍터의 폭과 프로텍터의 높이>

○ 터널확대 시 적용된 지보시스템 및 보조공법

- 확대터널의 지보구조는 신설터널에서 이용하는 표준지보패턴을 적용하는 경우가 15건으로 가장 많았고 현장 상황에 맞게 지보구조를 변경적용하는 경우도 9건 있음. 록볼트의 경우 작업공간이 협소하여 경사볼트를 적용하는 곳도 있음



< 확대터널의 지보시스템 >

□ 터널단면 확대 시공프로세서 정립

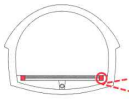
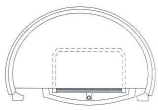
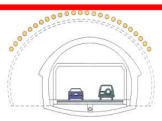
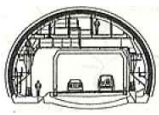
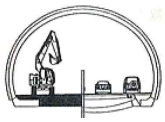
○ 터널단면 확대 시공프로세서 정립

- 시공사례 분석에 의하면 프로텍터를 고정식으로 확대터널 전체에 걸쳐 설치하는 경우에는 시공연장 300m 이내에서 경제성을 확보할 수 있음. 국내 도심지내에 있는 터널의 경우 연장 300m 이상이 70%정도를 차지하고 있으므로 프로텍터를 이동식으로 적용해야 할 것으로 판단됨

터널 연장	300m미만	300~500m	500~1km	1km 이상	계
서울특별시	26	12	8	13	59
부산광역시	2	13	8	12	35
대구광역시	2	0	2	0	4
대전광역시	1	4	0	0	5
인천광역시	1	2	0	2	5
광주광역시	7	7	6	0	20
합 계	39	38	24	27	128

< 국내 도심지내 기존 터널 현황 >

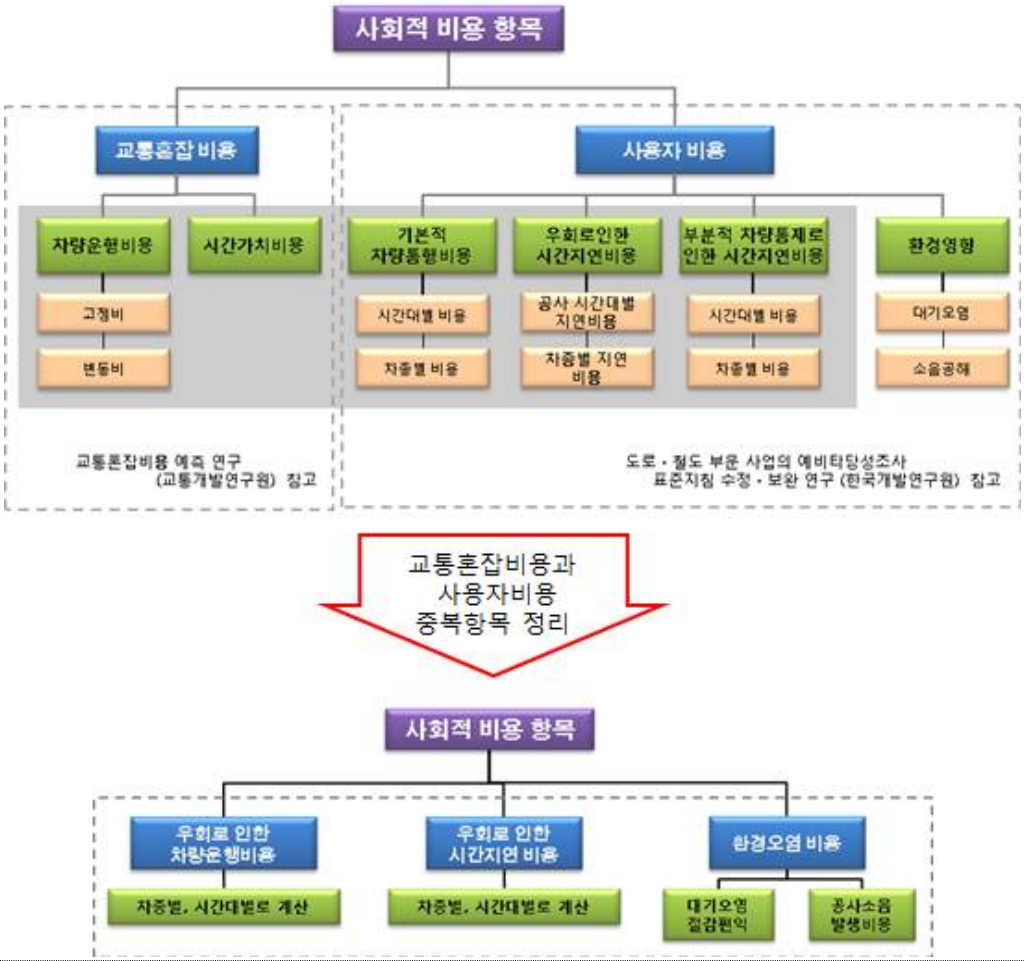
- 터널내 교통흐름을 유지하면서 기존터널을 확대하는 방법이 신규터널을 건설하는 방법과 가장 구별되는 가장 큰 특징은 운행중인 차량을 보호하고 작업공간을 확보하기 위해 설치되는 프로텍터, 프로텍터 설치로 협소해진 작업공간, 및 기존터널의 지보재을 제거한다는 것임
- 도심지내 장대터널이 많은 국내실정에 적합한 이동식 프로텍터를 적용한 터널단면 확대공법의 시공프로세서는 다음과 같음.

시공순서	시공개요도	주요사항	시공순서	시공개요도	주요사항
① 기초 공법		• 프로텍터 연결 기초부 시공	⑤ 공동구		• 방수막, 공동구 설치 • 가포장 시공 • 확대터널 구간 조명설치
② 프로텍터 설치		• 강재프로텍터 설치 • 야간 교통통제후 설치	⑥ 프로텍터 이동		•프로텍터 이동(야간통행 금지)
③ 사전 보강		• 불안정 지반 사전 보강 작업	⑦ 라이닝 설치		• 콘크리트 라이닝 타설 (확대굴착이 완료후)
④ 굴착 및 지보재 설치		• 발파천공 • 발파 및 환기(20분간 교통통제) • 기존 라이닝 및 지보재, 버럭처리 • 지보재 시공	⑧ 프로텍터 제거 및 포장		• 프로텍터 제거 • 배수공 및 포장 완료 • 부대시설 설치

< 터널단면 확대시공 프로세서>

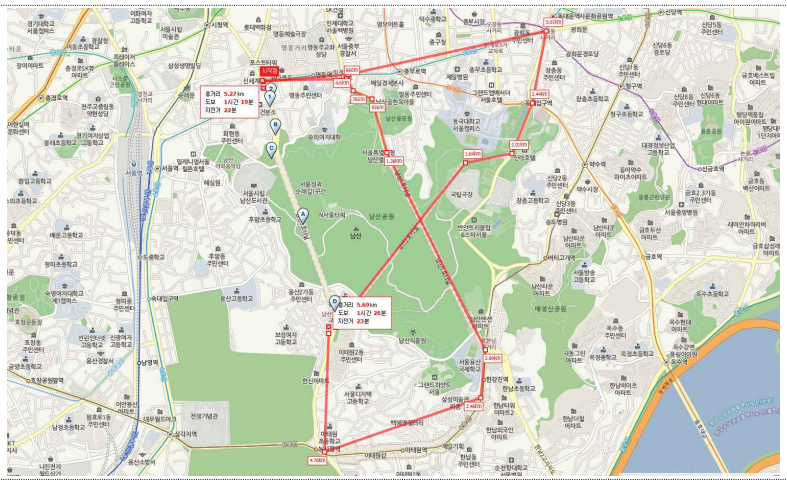
○ 터널단면 확대 시 터널내 교통흐름 유무에 따른 경제성 비교

- 도심지내 터널단면 확대시 터널내 교통흐름을 차단한 경우와 프로텍터를 이용하여 터널내 교통흐름을 허용하는 경우에 대하여 경제성 비교를 수행함
- 경제성 비교는 터널단면 확대시 소요되는 직접공사비와 터널내 교통흐름 유무에 따른 터널 주변의 교통정체로 발생하는 사회간접 손실비용을 계산하여 비교함
- 직접공사비는 일반적인 터널설계 및 시공시 계산되는 방식을 채택하였음. 터널내 교통흐름을 유지하는 경우 이동식 프로텍터 제작비용 및 공사기간 증가에 따른 비용을 추가함. 사회간접 손실비용은 다음과 같이 한국교통개발연구원과 한국개발연구원에 제시한 내용을 바탕으로 분석함
- 2차선 도로터널인 남산 3호 터널을 3차선 및 4차선 도로터널로 확대하는 경우와 3차선 도로터널인 매봉터널을 4차선 도로터널로 확대하는 경우에 대하여 비교함.

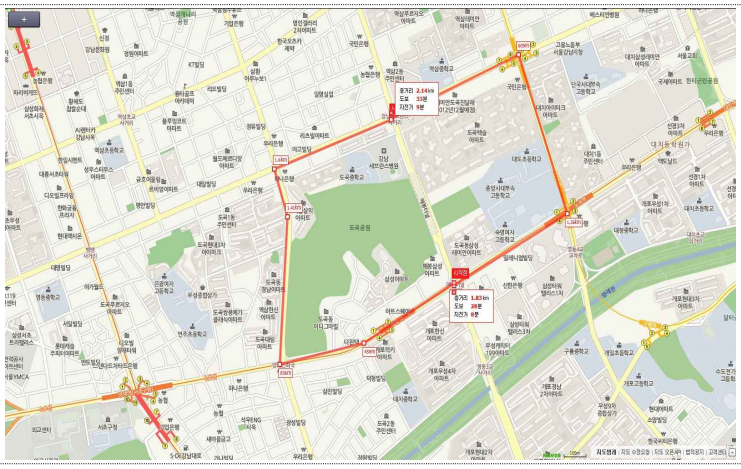


< 사회 간접 손실비용 산출방법 >

- 터널내 교통흐름을 완전히 차단하고 터널단면을 확대시공할 경우 터널 주변의 우회도로는 다음과 같이 선정함



< 남산 3호 터널 우회도로 >

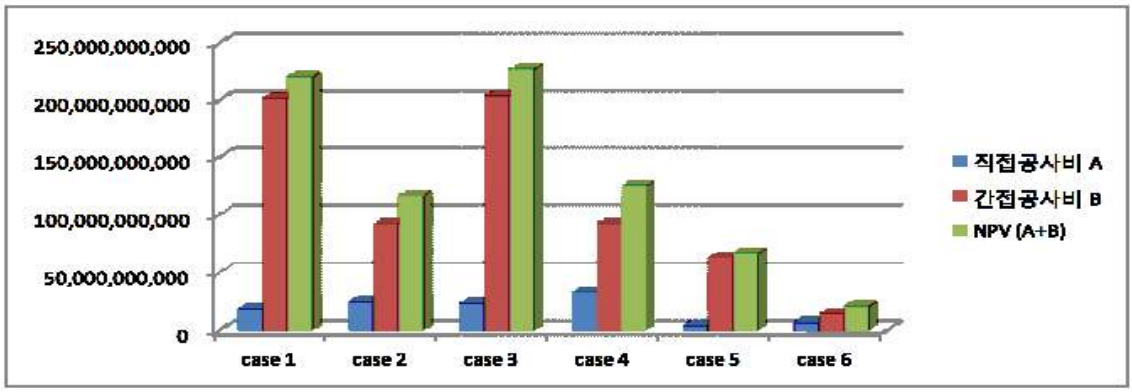


< 매봉 터널 우회도로 >

- 직접공사비는 프로텍터를 이용한 터널내 교통흐름을 유지한 방식이 프로텍터 제작비용과 공사기간의 장기화로 터널내 교통흐름을 차단한 방식보다 33% ~ 67%정도 증가함
- 사회간접 손실비용은 터널내 교통흐름을 유지한 방식이 터널내 교통흐름을 차단한 방식보다 54% ~ 78%정도 절감됨
- 직접공사비와 사회간접 손실비용의 총액에서도 터널내 교통흐름을 유지한 방식이 터널내 교통흐름을 차단한 방식보다 45% ~ 69%정도 절감됨

	터널 유형	프로텍터 유무	직접비 A	간접비 B	NPV (A+B)
case 1	남산3호 2→3	X (완전통제)	18,546,005,644	201,440,371,354	219,986,376,997
case 2	남산3호 2→3	O (부분통제)	24,694,407,300	91,847,185,297	116,541,592,598
case 3	남산3호 2→4	X (완전통제)	23,488,197,492	203,483,969,324	226,972,166,816
case 4	남산3호 2→4	O (부분통제)	32,589,282,288	92,459,940,926	125,049,223,215
case 5	매봉 3→4	X (완전통제)	4,056,381,704	62,656,214,033	66,712,595,737
case 6	매봉 3→4	O (부분통제)	6,779,853,032	13,951,767,849	20,731,620,881

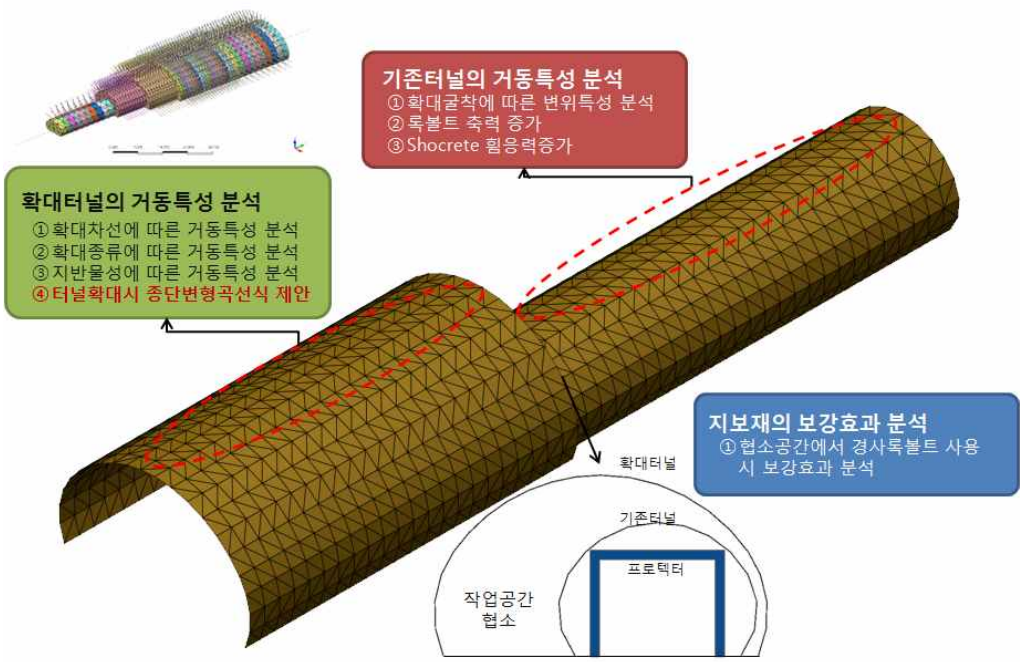
< 각 분석대상 별 직·간접비용 총액 계산 결과 (단위: 원) >



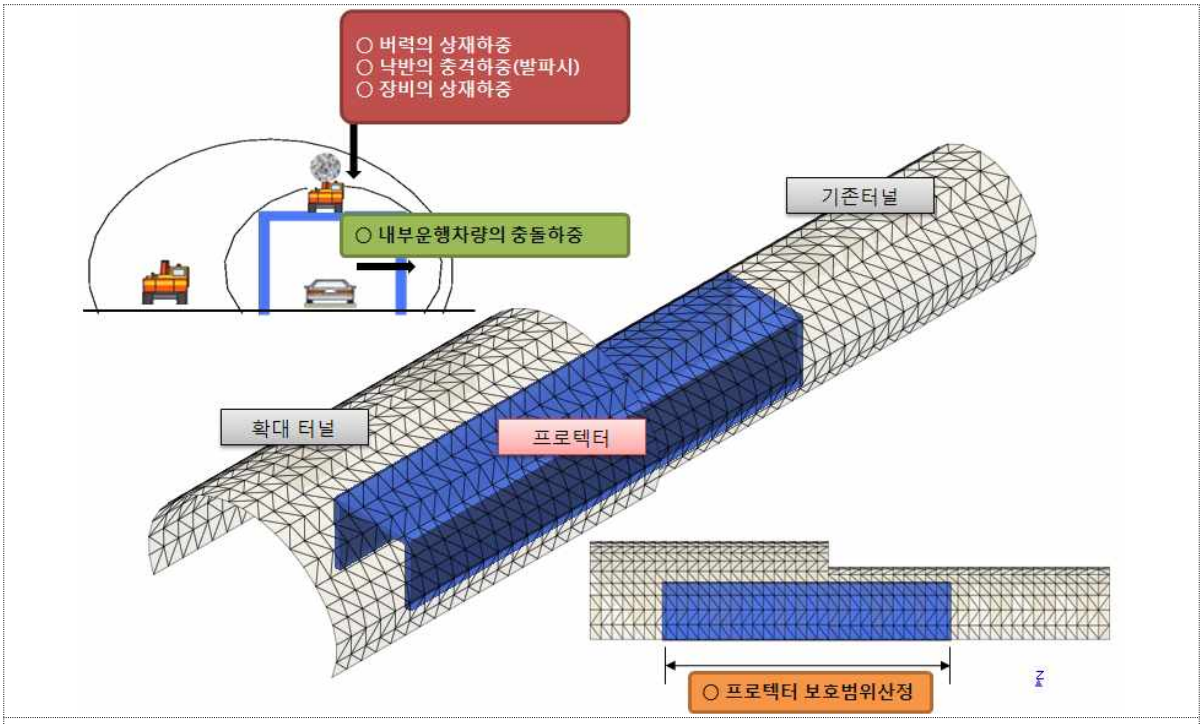
< 각 분석대상 별 직·간접비용 총액 계산 결과 (단위: 원) >

○ 터널확대 시 핵심기술 도출

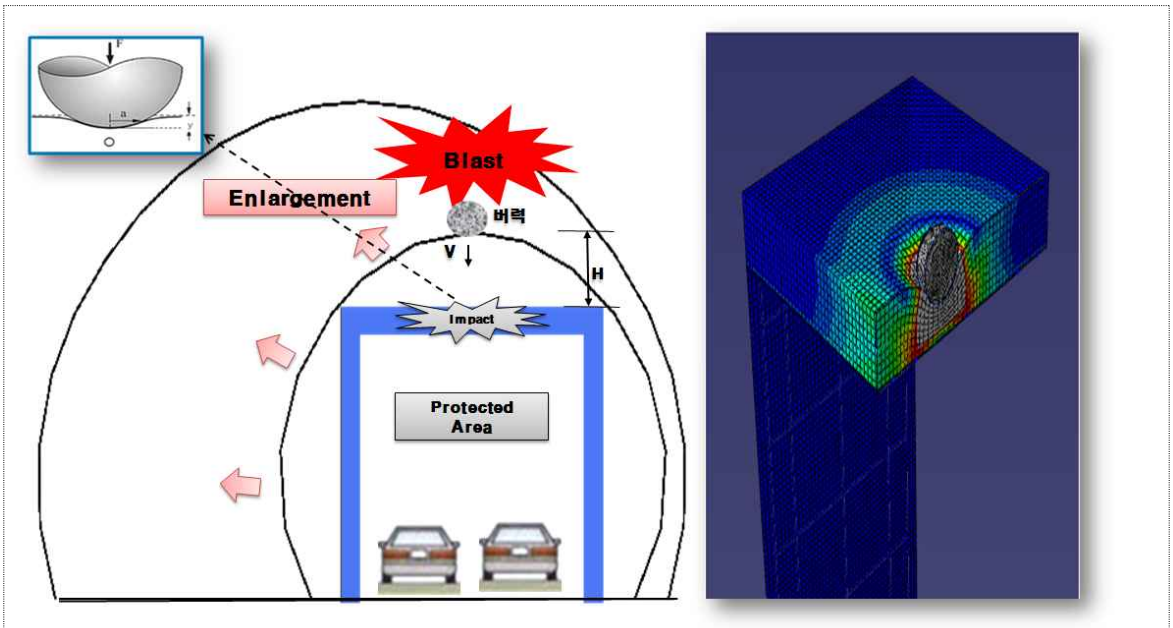
- 터널을 확대하는 경우는 신규터널 건설과는 달리 기존터널이 있는 상태에서 터널을 건설하므로 **터널확대에 맞는 안정성 분석 및 설계기술의 정립이 필요**
- 국내 터널의 연장과 암반강도를 고려하였을 때 발파굴착 및 이동식 프로텍터가 적용될 것으로 판단되므로 **발파굴착에 대응가능한 이동식 프로텍터의 설계 및 제작기술이 필요**



< 터널단면 확대 시 안정성 분석 및 설계기술 개발 >



< 이동식 프로텍터의 보호범위 산정 >



< 발파굴착 대응형 프로텍터의 설계 >

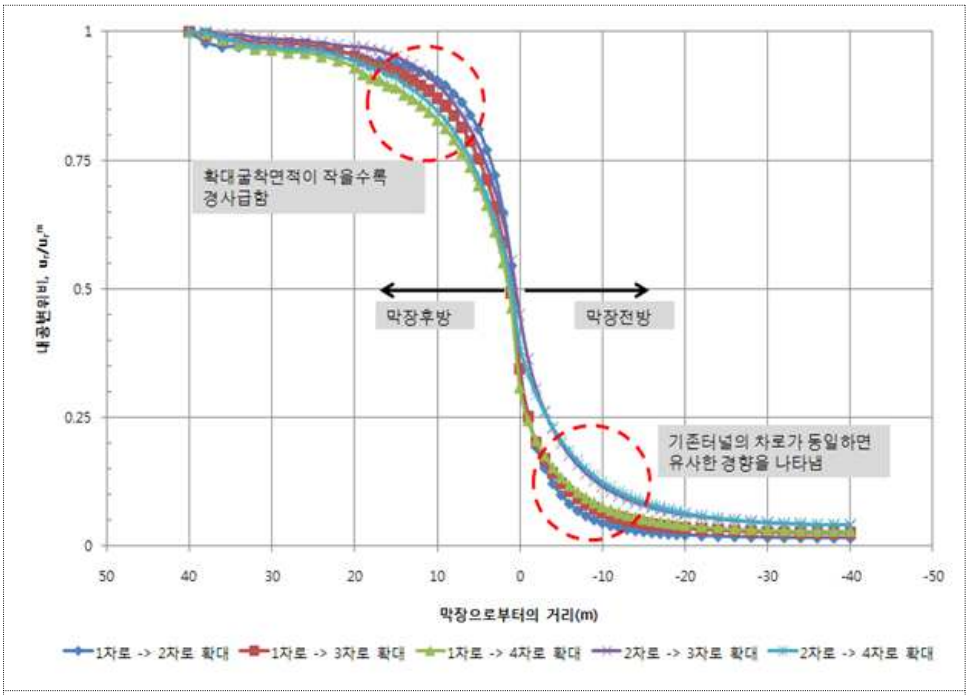
□ 터널단면 확대 시 안정성 분석 및 설계기술 개발

○ 터널확대 방식 및 형상에 따른 지반 변형 특성 분석

- 터널의 종단변형곡선은 막장후방(확대터널)에서는 확대굴착

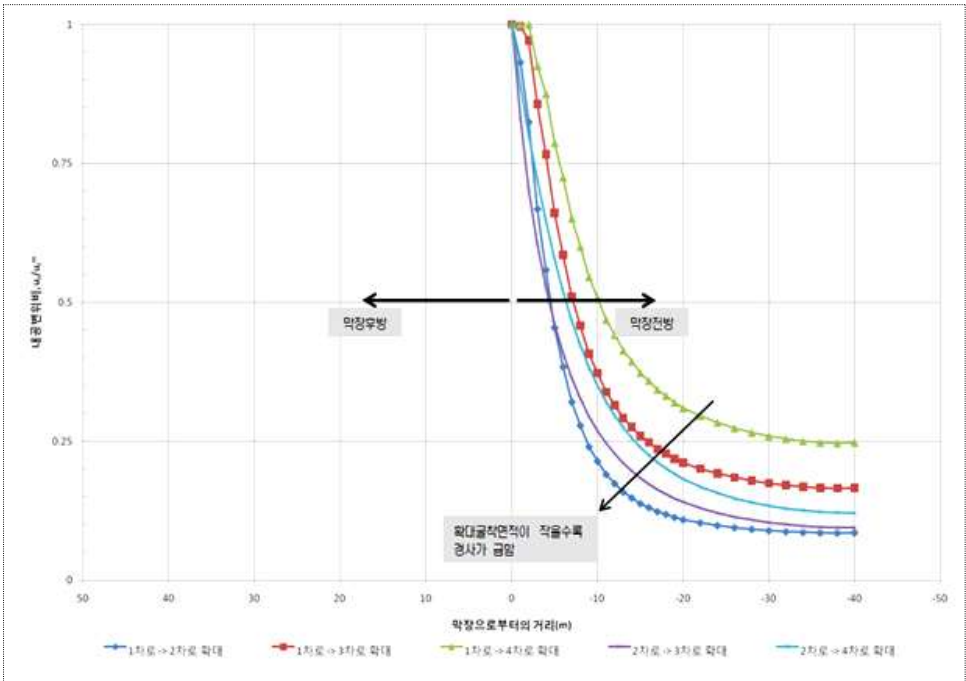
면적이 적을수록 경사가 급하게 나타났으며 막장전방(기존터널)에서는 확대굴착면적보다는 기존차로가 동일할 경우 유사한 경향을 나타냄. 즉, 확대된 부분의 변형은 굴착면적이 적을수록 영향범위가 적게 발생되나 기존터널 부분에서는 기존차로에 영향을 받는 것으로 판단됨

- 변위는 터널 단면폭에 상관없이 막장전후방 20m 구간에서 수렴되는 것으로 나타남



< 확대차로별 확대터널의 종단변형곡선 >

- 기존터널의 종단변형곡선은 확대부분과 유사하게 확대굴착면적이 적을수록 영향범위가 적은 것을 알 수 있음. 대체적으로 막장전방 20~30m 구간에서 변위가 수렴되는 것으로 나타남



< 확대차로별 기존터널의 종단변형곡선 >

○ 터널확대 시 굴착영향권 산정식 개발 및 검증

- 터널확대 시 지반종단변형특성을 분석하여 굴착영향권을 산정한 결과 확대터널과 기존터널이 종단변형곡선을 제안 및 검증함
- 제안된 확대터널의 지반종단변형곡선은 다음과 같음

$x \geq 0$인 경우(굴착면 후방의 경우)

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/(\sqrt{R_{enlarge}^2 - R_{old}^2})}{0.958}\right)\right]^{-1.171}$$

$x < 0$인 경우(굴착면 전방의 경우)

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/R_{old}}{0.958}\right)\right]^{-1.171}$$

여기서, x : 굴착면으로 부터의 거리

(후방은 '+', 전방은 '–')

u_r : 터널 임의의 지점 x에서 중심방향의 변위

u_r^M : 중심방향 최대 수렴변위

$R_{enlarge}$: 확대터널의 반경

R_{old} : 기존터널의 반경

- 제안된 기존터널의 지반종단변형곡선은 다음과 같음

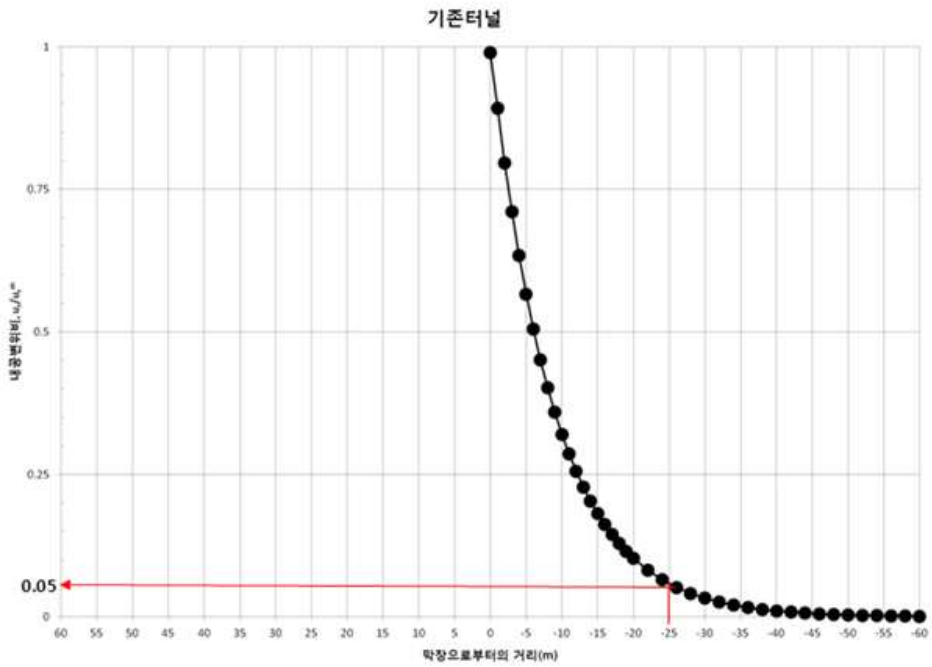
$x<0$인 경우(굴착면 전방의 경우)

$$\frac{u_r}{u_r^M}\left(=\frac{u_r^x-u_r^{\min}}{u_r^{\max}-u_r^{\min}}\right)=\left[1+\exp\left(\frac{-x/(\sqrt{R_{enlarge}^2-R_{old}^2})}{0.02158}\right)\right]^{-0.01491}$$

여기서, $u_r^{\min}$: 중심방향 최하 수렴변위(=선행변위)

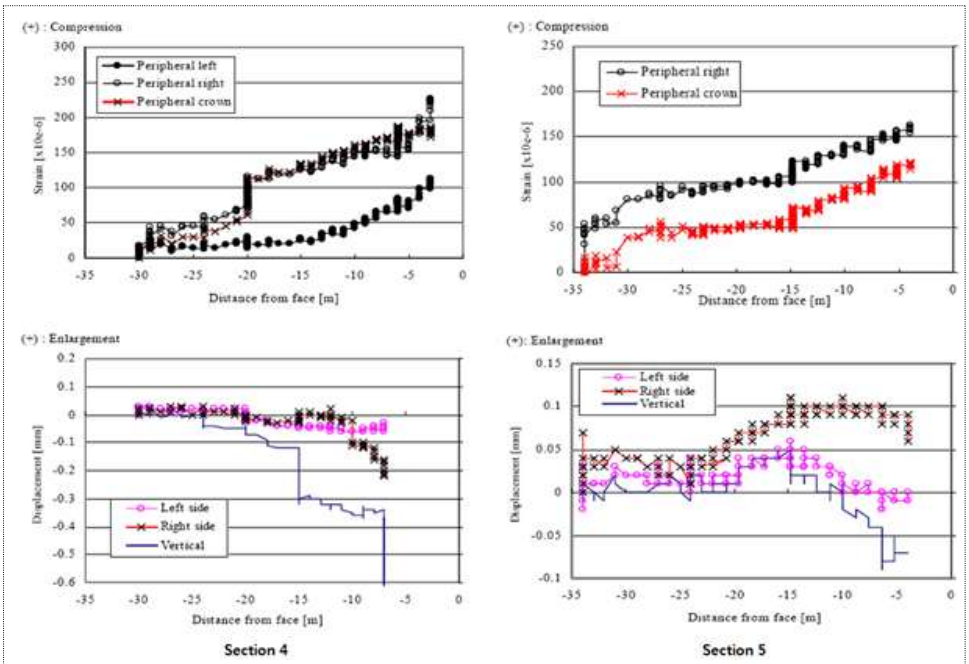
$u_r^{\max}$: 중심방향 최대 수렴변위

- 제안된 예측식과 실제 터널 확대 시 계측데이터를 비교분석하여 검증을 실시하였으며 변위가 계측된 터널 A와 터널 B의 2개 계측데이터를 이용함
- 터널 A에서는 기존터널에서 변위 및 변형률이 계측되었으며 제안된 예측식에 의하면 터널 확대굴착 시 기존터널의 변위가 발생되는 범위는 막장전방 약 35m 이내로 라이닝 변형률 계측결과를 보면 막장이 계측지점에서 30m(Section 4), 35m(Section 5)에 접근할 때 변형률이 발생되기 시작되는 것으로 보았을 때 제안된 예측식이 잘 예측하고 있는 것으로 판단됨. 변위계측결과를 보면 Section 4와 Section 5 모두 막장이 25m에 접근했을 때 발생되는 것으로 나타나는데 이를 제안된 예측식에 적용하면 내공변위가 총 변위의 약 5%가 발생되는 지점임. 이상의 결과를 보았을 때 내공변위가 총변위의 5%까지 발생될 때는 라이닝에서 응력을 담당하다가 5%이상이 될 경우 지반의 변위가 발생되는 것으로 판단됨



< 제안된 예측식에 의한 기존터널A의 지반종단변형곡선 >

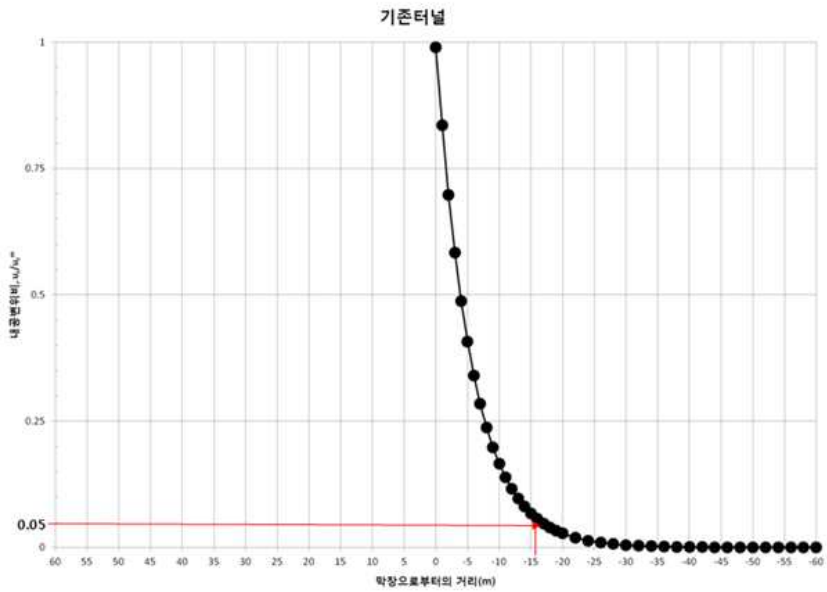
(확대터널반경: 7.8m, 기존터널의 반경: 4.9m)



< 터널 A의 라이닝 및 변위 계측결과(F.Tonon,2010) >

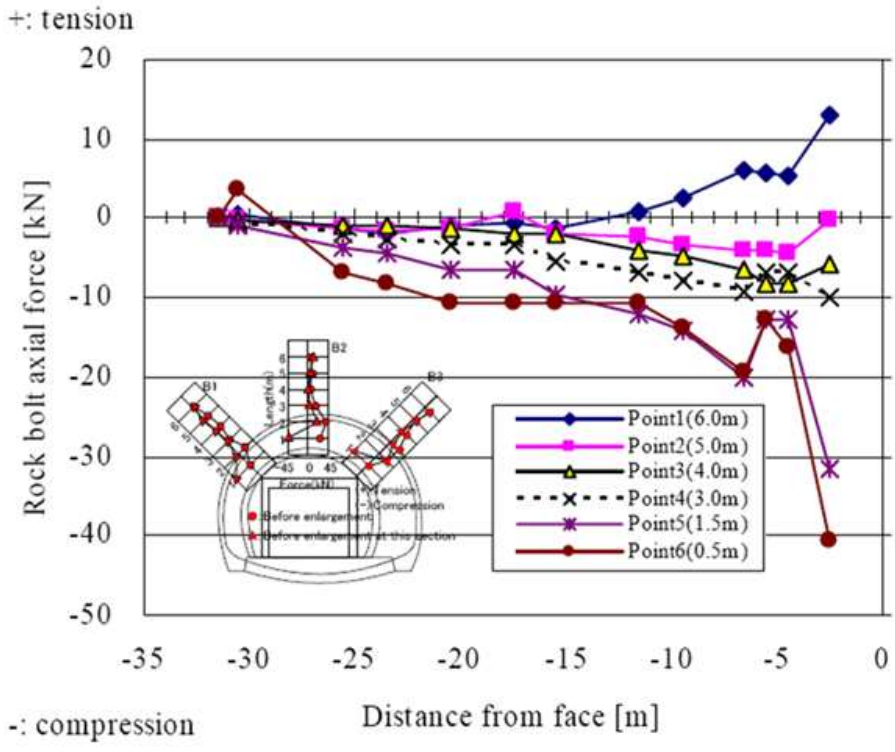
- 터널 B의 경우 터널 A에 비해 확대반경이 작기 때문에 굴착에 의한 영향범위가 작게 나타나며 막장 전방 25m 이내에서 지반변위가 수렴되는 것으로 나타남. 이는 계측결과 록볼트

축력이 발생되는 시점과 매우 유사한 결과한 결과이며 따라서 제안된 예측식으로 영향범위를 잘 예측할 수 있을 것으로 판단됨



< 제안된 예측식에 의한 기존터널B의 지반종단변형곡선 >

(확대터널반경: 4.875m, 기존터널의 반경: 3.0m)

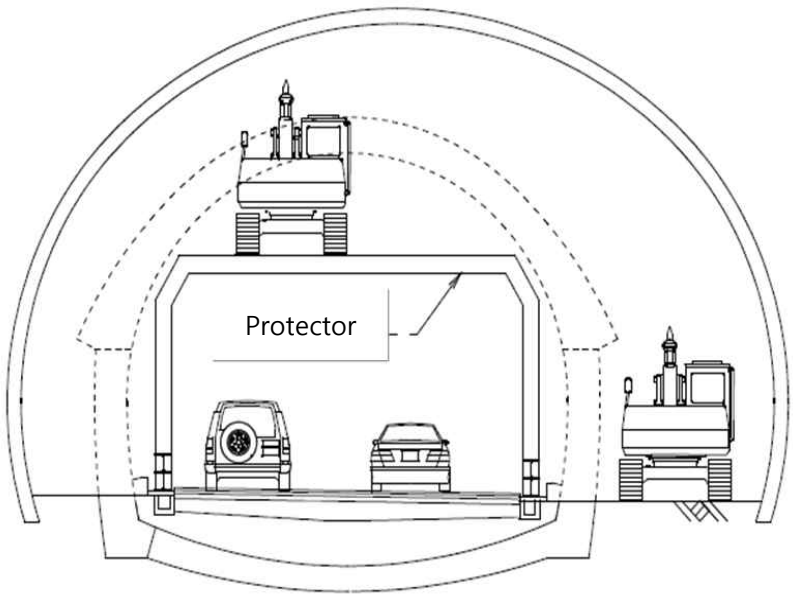


< 터널 B의 록볼트 축력 계측결과(F.Tonon,2010) >

- 제안된 터널확대 시 종단변형곡선을 통해 프로텍터의 보호범위 산정에 이용 가능할 것으로 판단됨

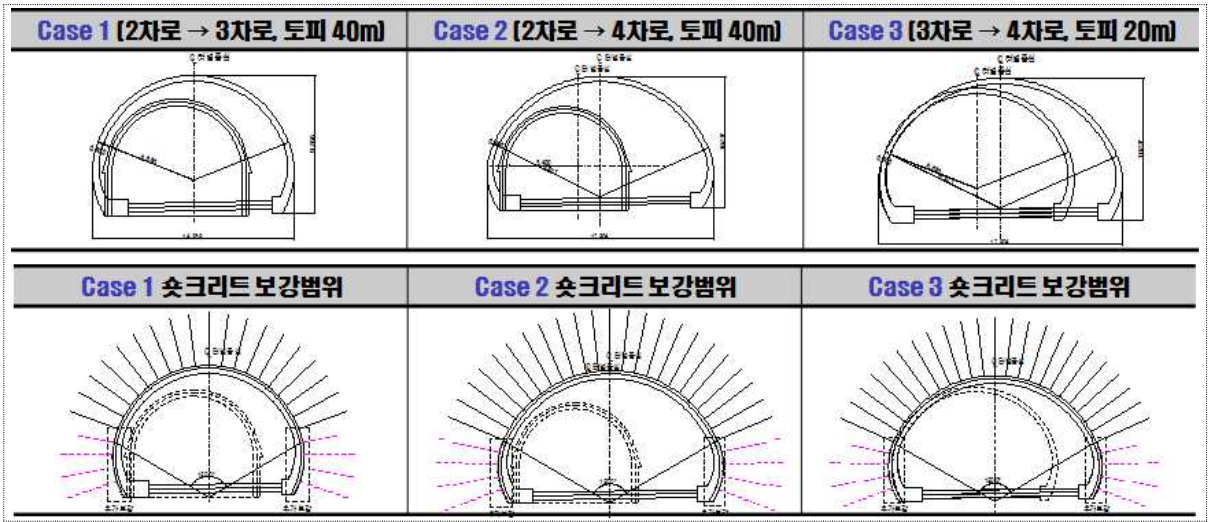
○ 터널측벽 록볼트 미시공에 따른 숏크리트 최적 보강두께 제시

- 터널단면 확대시 다음 그림과 같이 터널 좌측하부에서는 확대된 터널 굴착면과 프로텍터 측벽사이가 협소함. 이러한 협소공간에서는 록볼트(길이 4m이상) 설치를 위한 천공 및 록볼트 시공이 불가능함.



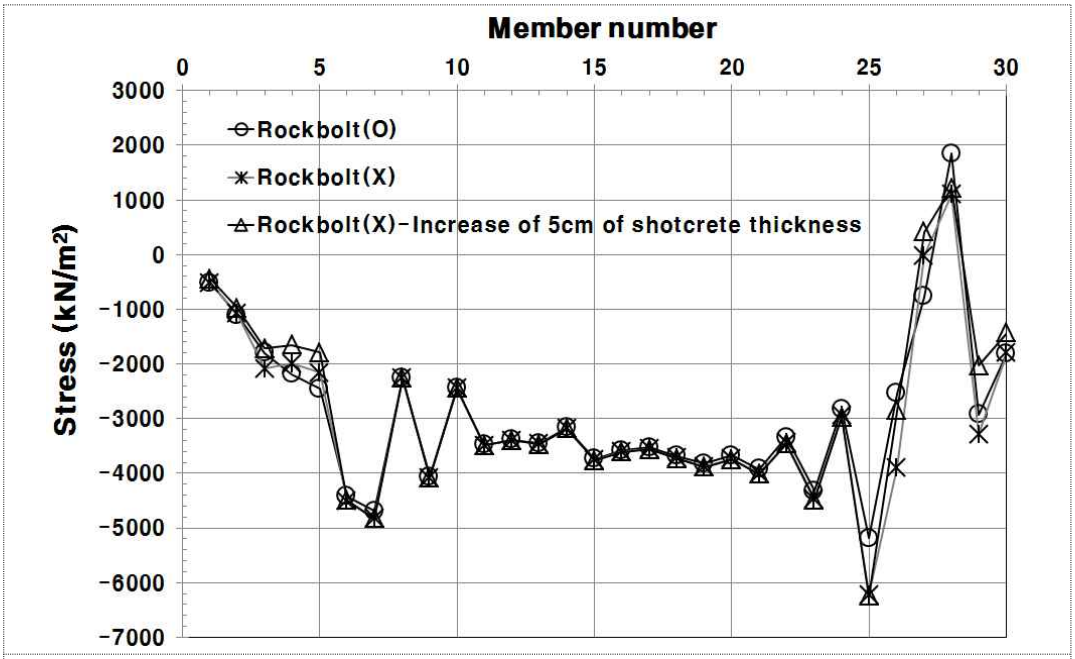
< 터널 단면 확대 시공 >

- 이러한 협소공간에서 터널측벽하부에 록볼트를 시공하지 않고 숏크리트 두께를 증가시켜 터널의 안정성을 확보함
- 현재 국내 도심지에서 공용중인 2차로 도로터널을 3차로(Case 1) 및 4차로(Case 2) 도로터널로 확대하는 경우와 3차로 도로터널을 4차로 도로터널(Case 3)로 확대하는 경우에 대하여 터널 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않고 숏크리트로만 시공할 경우 최적 보강 숏크리트 두께를 제시함

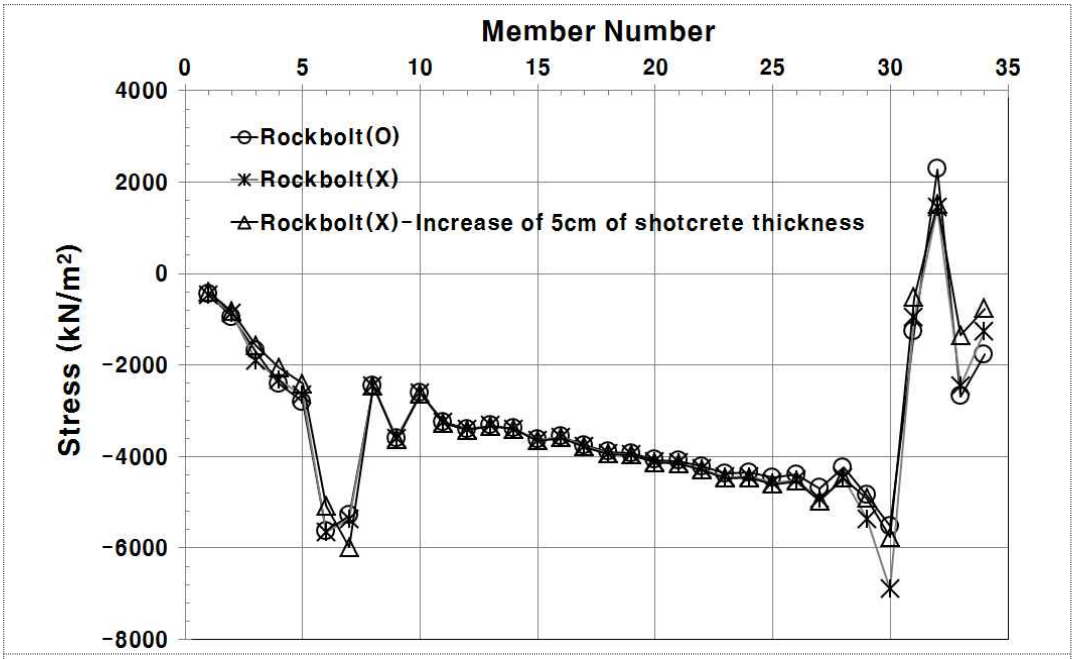


< 터널 단면 확대 및 숏크리트 보강범위 >

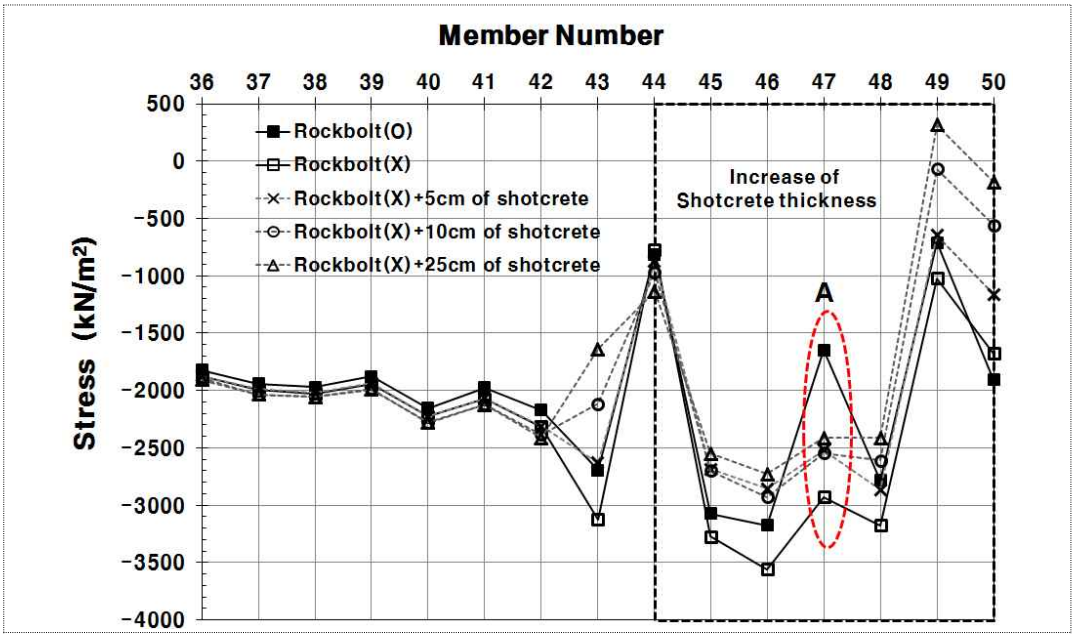
- 2차로 도로터널 -> 3차로 도로터널(Case 1), 2차로 도로터널 -> 4차로 도로터널(Case 2) 및 3차로 도로터널 -> 4차로 도로터널(Case 3)로 확대하는 3가지 경우 터널 측벽하부에서 숏크리트 두께를 5cm만 증가시켜도 록볼트를 시공한 경우와 거의 동일한 터널 안정정을 확보함



< 2차로 도로터널 -> 3차로 도로터널(Case 1)에서 숏크리트 응력 >



< 2차로 도로터널 -> 4차로 도로터널(Case 2)에서 숏크리트 응력 >



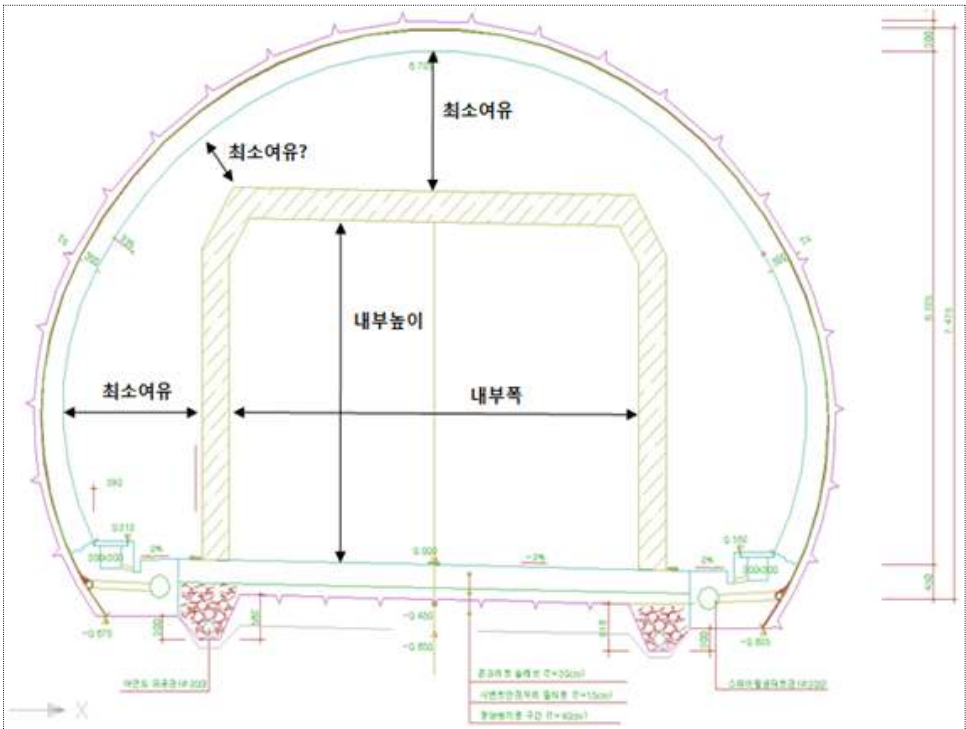
< 3차로 도로터널 -> 4차로 도로터널(Case 3)에서 숏크리트 응력 >

□ 프로텍터 설계 및 제작기술 개발

○ 국내 적용을 위한 프로텍터 최소 단면 도출

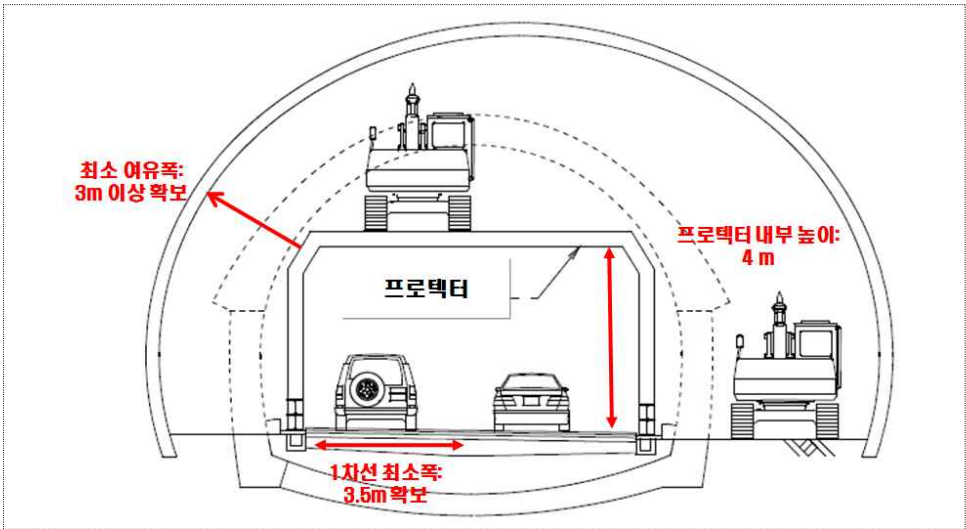
- 프로텍터의 규격은 차량이 통행되는 내부와 굴착작업이 진행되는 외부조건으로 구분할 수 있음. 다음 그림은 프로텍터 규격 결정 시 고려하여야 할 사항을 나타냄. 프로텍터의 내

부조건은 내부폭과 높이로 볼 수 있으며 대상 터널에 적용되는 건축한계와 통행차량의 규모 및 특성 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 함. 또한 굴착, 보강 및 버력처리에 사용될 장비의 제원으로부터 장비의 운용 등 작업공간의 확보를 위해 필요한 최소 공간 등을 종합적으로 고려하여 프로텍터의 규격을 설정하여야 함.



< 프로텍터 단면설정 시 고려사항 >

- 다음그림은 국내 설계속도 80km/hr이상(차로 최소폭 3.5m, 건축한계 4.8m)인 2차선 도로터널의 최소내공단면의 일례를 나타냄. 프로텍터 내부의 최소높이는 4.0m이고 1개 차선 최소폭은 3.5m이여야 함. 확대되는 터널의 측벽과 프로텍터 측벽사이의 최소 작업공간 확보를 위하여 최소 여유폭은 3.0m 이상 확보되어야 함



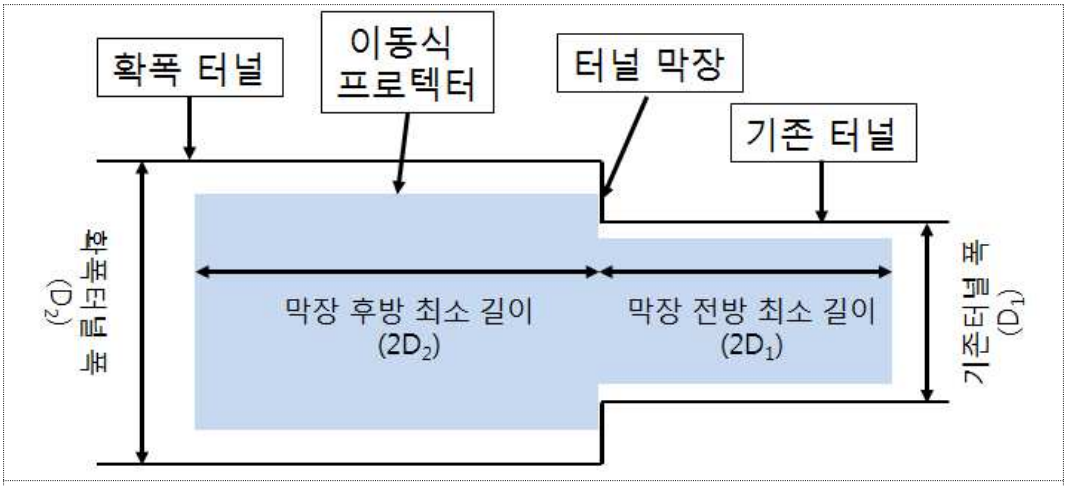
< 최소내공단면의 예 >

○ 국내 적용을 위한 이동식 프로텍터의 최소길이 제원

- 이동식 프로텍터는 기존터널과 확대되는 터널의 일정구간을 보호하여야 함. 기존 확대터널 시공사례 및 수치해석 결과 터널 폭의 최소 2배에 해당하는 길이에서 지반변위가 수렴되므로 이동식 프로텍터의 최소길이를 다음과 같이 제시함

이동식 프로텍터 최소길이 = 기존터널 최소 보호구간($2D_1$)+확대터널 최소 보호구간($2D_2$)

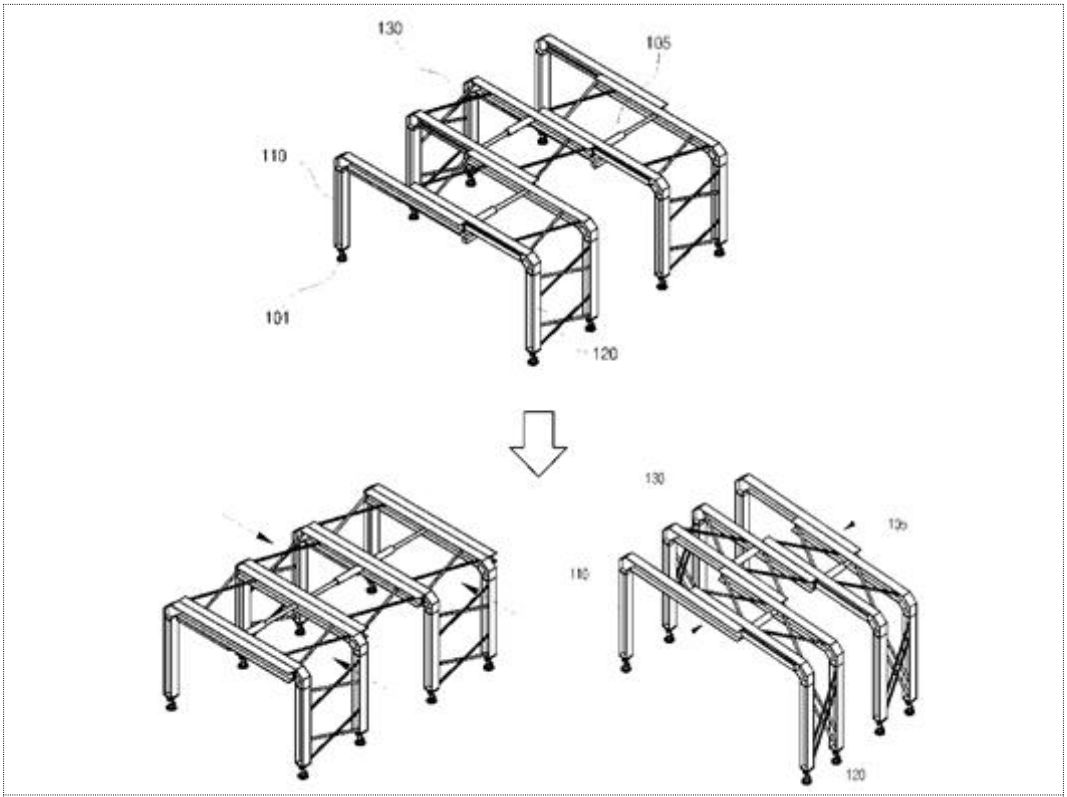
(D_1: 기존터널 폭, D_2: 확대터널 폭)



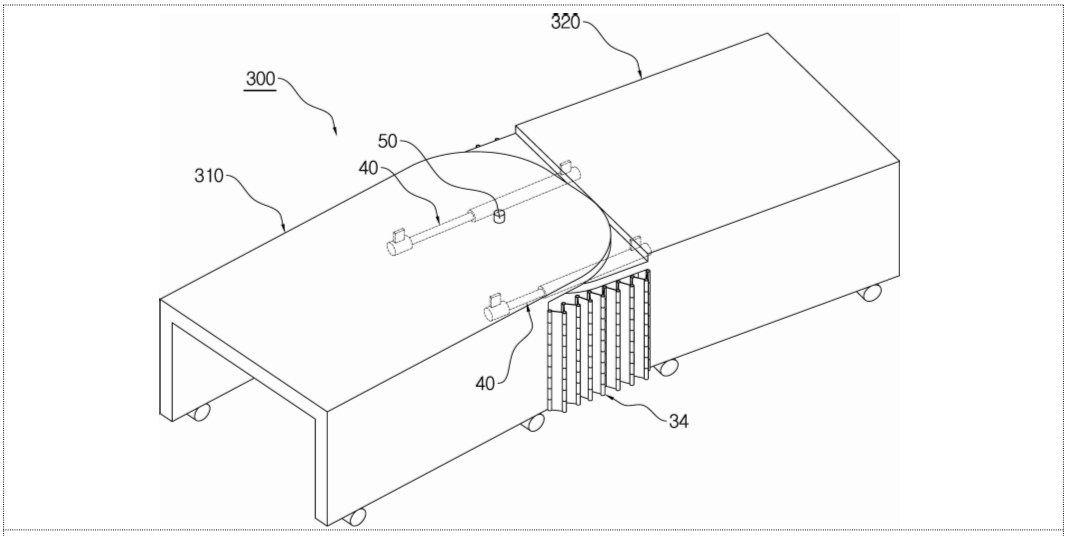
< 프로텍터 최소 길이>

○ 터널의 기하학적 조건을 고려한 가변형 및 굴절형 프로텍터 제작기술 제시

- 프로텍터의 재활용이 가능하도록 내공단면 및 길이가 조정되는 가변형 프로텍터 제시
- 곡선터널에 적합한 각도 조절이 가능한 굴절형 프로텍터



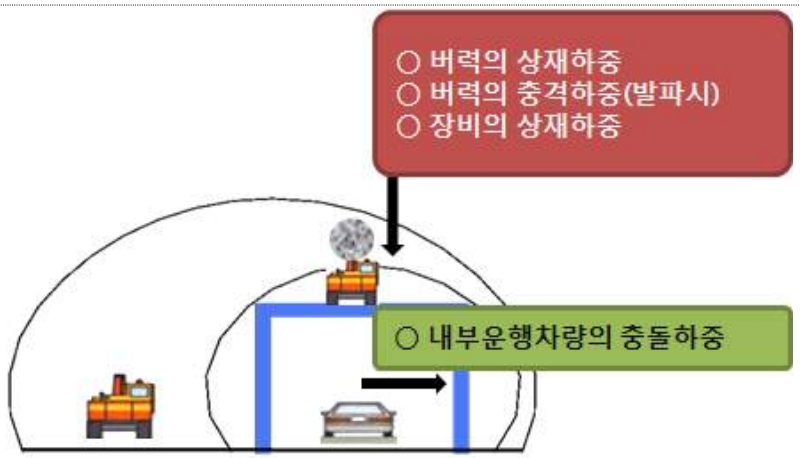
< 가변형 프로텍터>



< 굴정형 프로텍터>

○ 터널확대 시 프로텍터에 작용하는 하중분석

- 프로텍터 설계 시 작용하는 하중으로는 버력의 상재하중, 장비의 상재하중 및 내부차량의 충돌하중이 작용하게 되며 발파를 적용할 경우 발파버력의 충돌하중을 고려하여야 함
- 상재하중의 경우 어렵지 않게 산정이 가능하나 내부차량의 충돌하중과 발파 시 버력의 충격하중의 경우 동하중으로 산정이 어려움. 내부차량의 충돌하중은 NCHRP Report 86(1970)에 제시되어 있음. 발파 시 버력의 충돌하중을 합리적으로 산정할 수 있는 방법이 필요



< 프로텍터에 작용하는 하중 >

○ 발파버력의 충돌하중 산정식 개발

- 발파버력의 충돌하중을 보수적으로 산정하기 위해 버력이 완전탄성 거동을 한다고 가정하고, 무한탄성평면에 완전탄성구체가 충돌할 때의 변위와 힘의 관계인 Hertz(Johnson, 1985) 공식을 이용하여 다음과 같이 발파 버력의 충돌하중 산정식을 제안함

$$F_{max} = 1.7672(E^*)^{2/5}(\gamma)^{-1/15}(W)^{2/3}(H)^{3/5}$$

여기서, γ : 버력의 단위중량(kgf/m^3)

W : 버력의 중량(kgf)

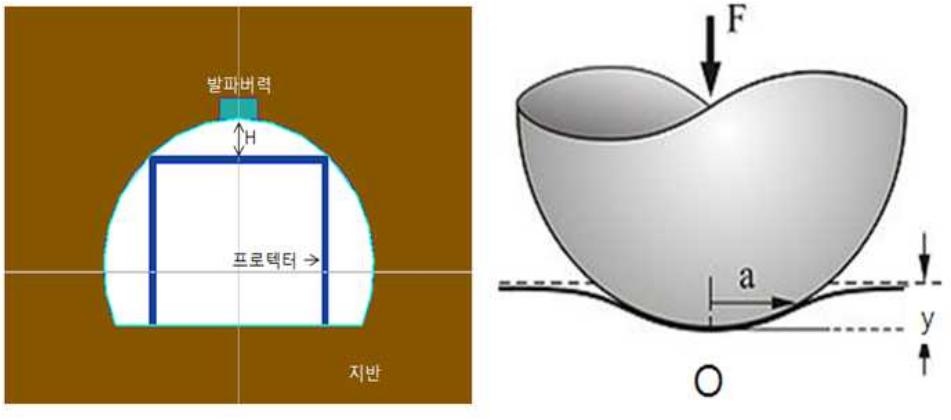
H : 낙하높이(m)

$$\frac{1}{E^*}=\frac{1-\nu_1^2}{E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{E_2}$$

E_1, E_2 : 구체와 평면의 탄성계수(N/m^2)

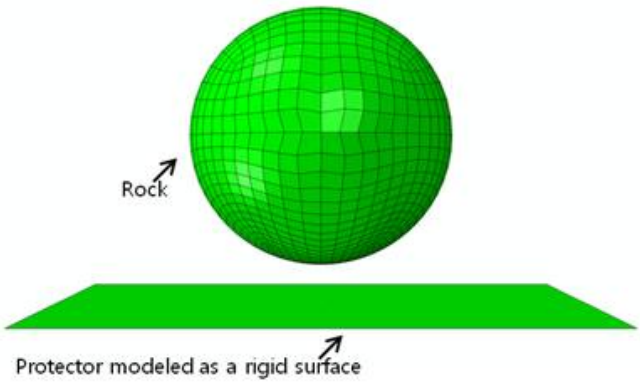
ν_1, ν_2 : 구체와 평면의 Poisson's ratio

R : 접촉 구체의 반경(m)



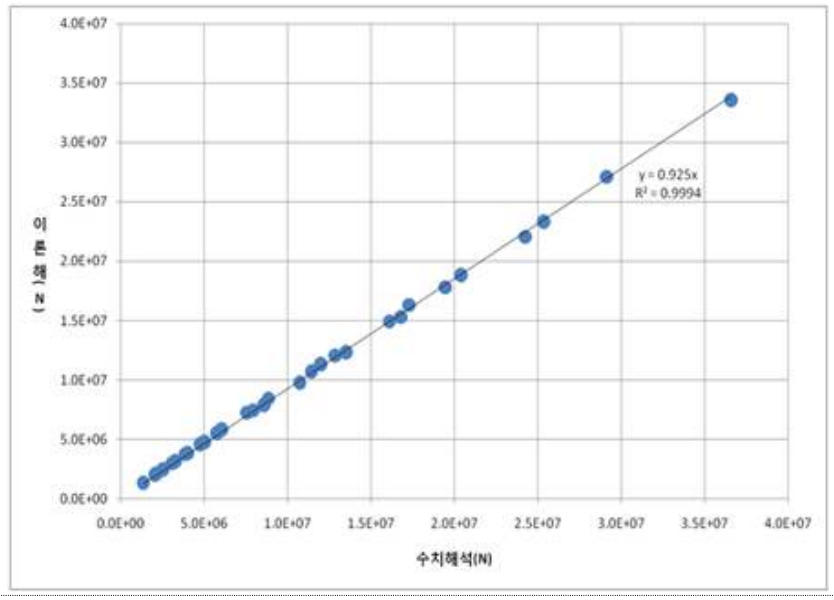
< 충돌하중 산정을 위한 프로텍터와 버력의 이상화 >

- 제안된 충돌하중 산정식을 검증하기 위하여 충격문제를 해석할 수 있는 ABAQUS프로그램을 사용하여 동해석인 Explicit 해석을 수행함. 버력의 재료거동이 충돌하중에 미치는 영향을 분석하기 위해 버력은 완전탄성체와 탄소성체로 모델링하였으며 프로텍터는 강체로 모델링함



< 충돌하중산정식 검증을 위한 수치해석 모델 >

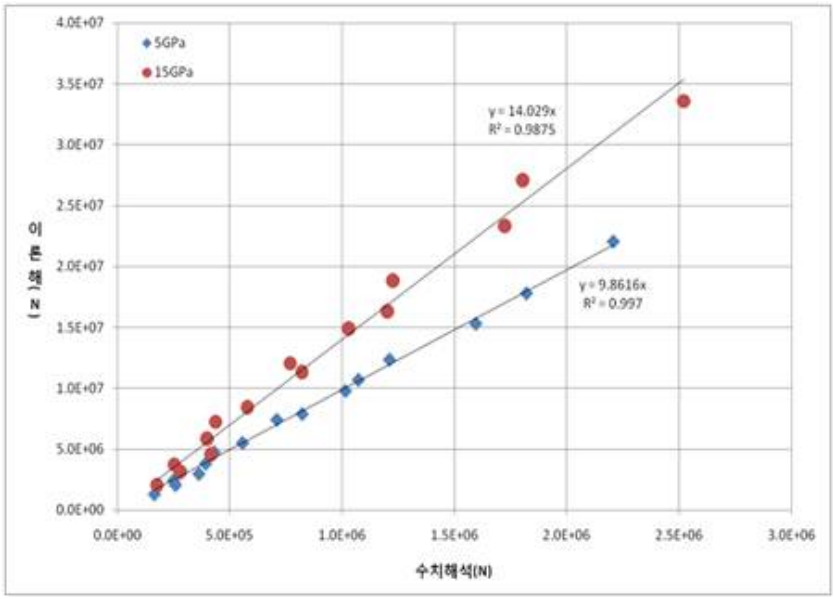
- 수치해석결과 버력이 완전탄성거동을 하는 경우 제안된 산정식과 해석결과가 잘 일치하는 것으로 나타나 제안된 산정식으로 발파 버력의 충돌하중을 합리적으로 예측할 수 있을 것으로 판단됨



< 버력이 완전탄성거동 시 이론해와 수치해석결과 비교 >

- 수치해석결과 버력이 탄소성거동을 하는 경우 탄성거동에 비해 충돌하중이 약 10%정도 수준으로 이는 프로텍터의 경제성과 관련되므로 실대형 실험을 통해 충돌 시 재료의 거동특

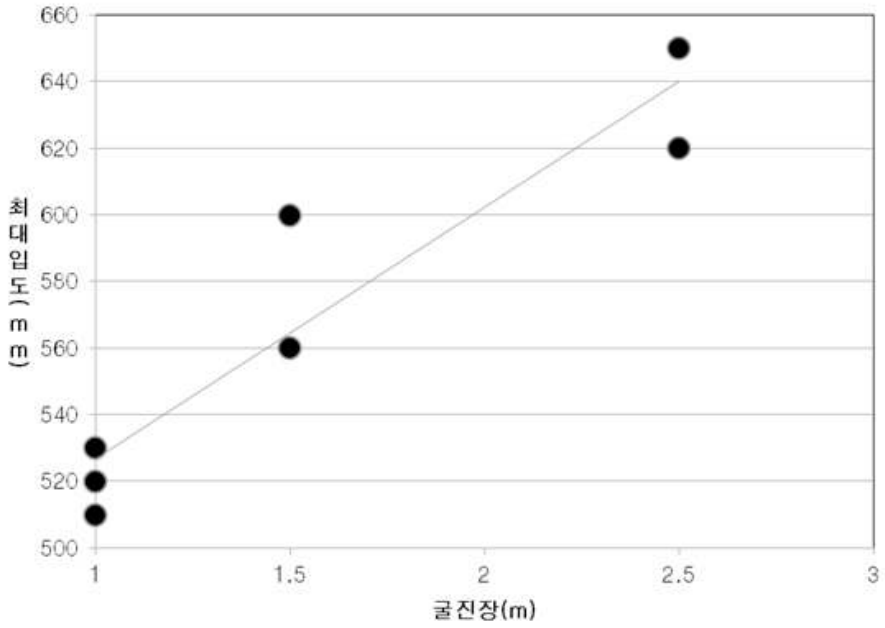
성 파악이 필요할 것으로 판단됨. 이론해와 수치해석결과를 도시하고 회귀분석을 실시한 결과 버력의 탄성계수에 따라 예측식이 변화되는 것으로 나타남



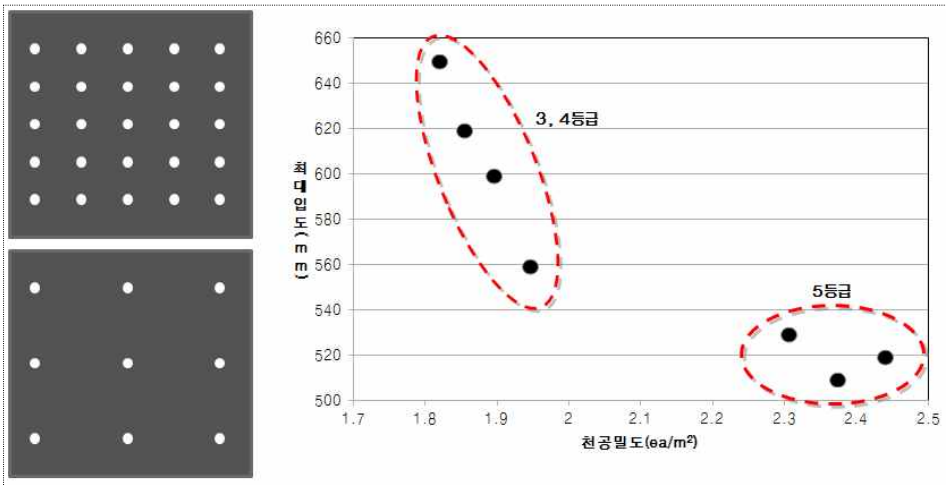
< 버력이 탄소성거동 시 이론해와 수치해석결과 비교 >

○ 발파버력의 충돌하중 저감기술 개발

- 발파버력의 충돌하중을 저감하는 방안은 발파전과 후로 나눌 수 있으며 발파 전 저감방안으로는 제안된 충돌하중 산정식에서 볼 수 있듯이 조절발파를 통해 발파버력의 입도와 비산속도를 작게하는 방법이 있음. 발파 후에 저감하는 방안으로는 피충돌체의 탄성계수를 작게하는 방법이 있음
- 발파 전 발파버력의 입도를 조절하기 위해 발파 설계 시 고려해야할 요인을 분석하기 위해 실제 발파사례를 분석하였으며 분석결과 입도를 조절하기 위해서는 천공밀도와 천공장(굴진장)을 조절하는 것이 합리적일 것으로 판단됨



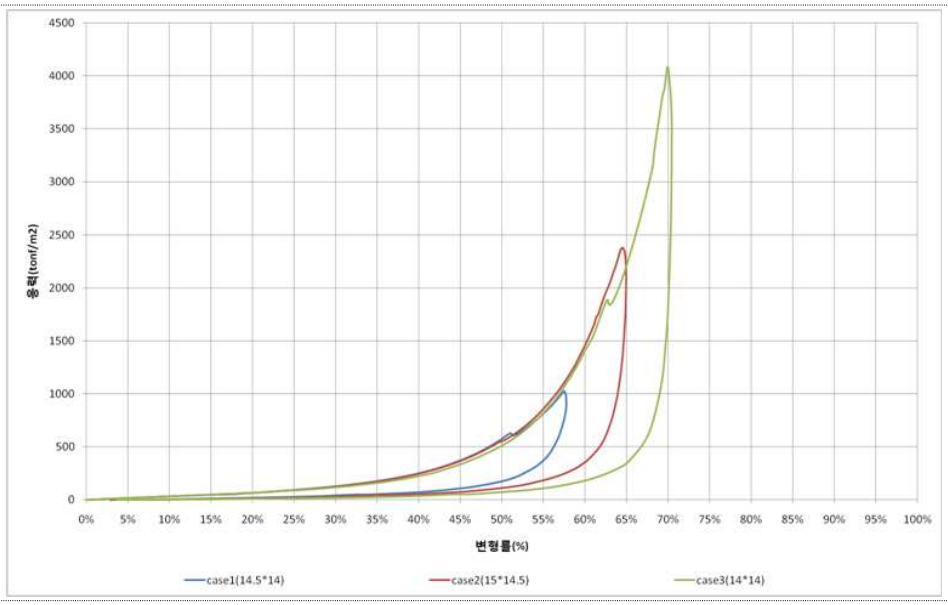
< 천공장에 따른 발파버력의 최대입도 분석 >



< 천공밀도에 따른 발파버력의 최대입도 분석 >

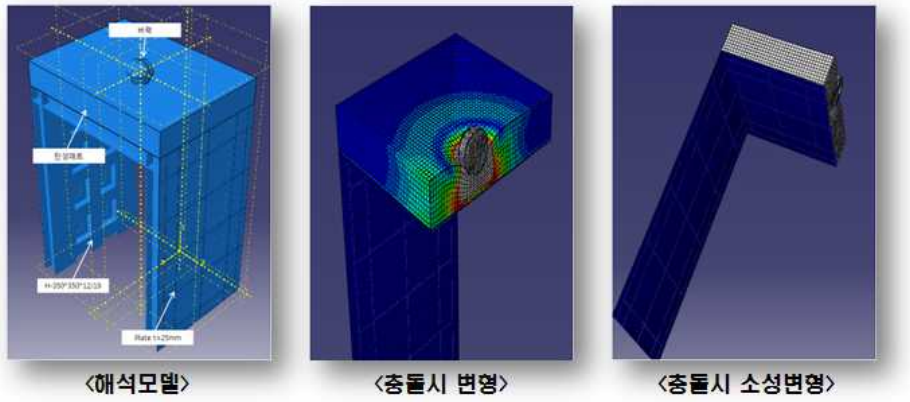
- 장약량과 암반의 상태도 발파버력의 최대입도와 관련되는 요인이나 암반의 상태는 제어할 수 있는 부분이 아니며 암반의 상태에 따라 장약량이 결정되므로 장약량 또한 발파버력의 입도조절을 위한 관리요인이 될 수 없다고 판단됨

- 발파 후 충돌하중을 저감하기 위해서는 버력이 충돌하는 프로텍터 상부에 탄성계수가 작은 재료를 포설하여 피충돌체의 탄성을 작게하는 방안이 있으며 포설재료로는 모래, 기 발파된 버력이나 폐타이어를 활용한 탄성매트 등이 있음. 폐타이어를 활용한 탄성매트는 다음 그림과 같이 변형이 커질수록 탄성이 변하는 Hyper-elastic 특징이 있음. 즉, 초기에는 작은 하중에도 큰 변형이 발생하나 변형이 크게 발생할수록 저항력이 커지는 특성을 발휘하며 폐타이어를 활용함으로서 친환경적인 재료임



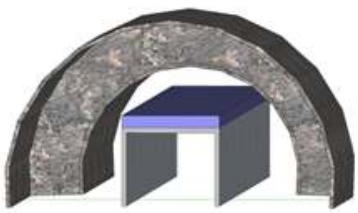
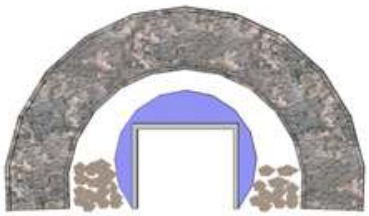
< 폐타이어를 활용한 탄성매트의 Hyper-elastic 특성 >

- 발파버력의 충돌하중을 상쇄시키기 위해 필요한 탄성매트의 포설높이를 산정하기 위해 ABAQUS 프로그램을 이용하여 수치해석(버력은 완성탄성체 가정, 직경 50cm, 최대비산속도 30m/sec 적용)을 실시한 결과 56cm의 탄성매트 설치 시 프로텍터에 소성변형이 발생되지 않는 것으로 나타남

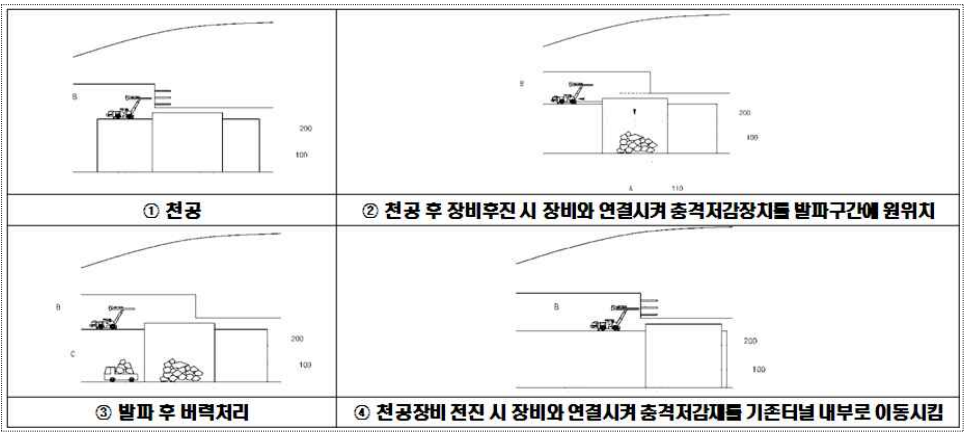


< 탄성매트의 충돌하중 저감효과 분석을 위한 수치해석 >

- 탄성매트의 경우 하중저감효과가 큰데 비해 작은 하중 수준에서 큰 변형을 나타내므로 프로텍터 전체에 포설할 경우 시공장비의 운용성이 저하될 것으로 예상됨. 따라서 다음과 같이 탄성매트를 활용하여 이동식 충격저감장치와 이를 활용한 터널확대공법을 제안하였으며 이동식이므로 장비의 운용상 제한이 없고 탄성매트 포설높이가 제한되지 않으므로 적은 비용으로 큰 하중 저감효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단됨

구분	기존공법	신청기술
충격저감 장치 설치길이		
발파 후 버력의 위치		

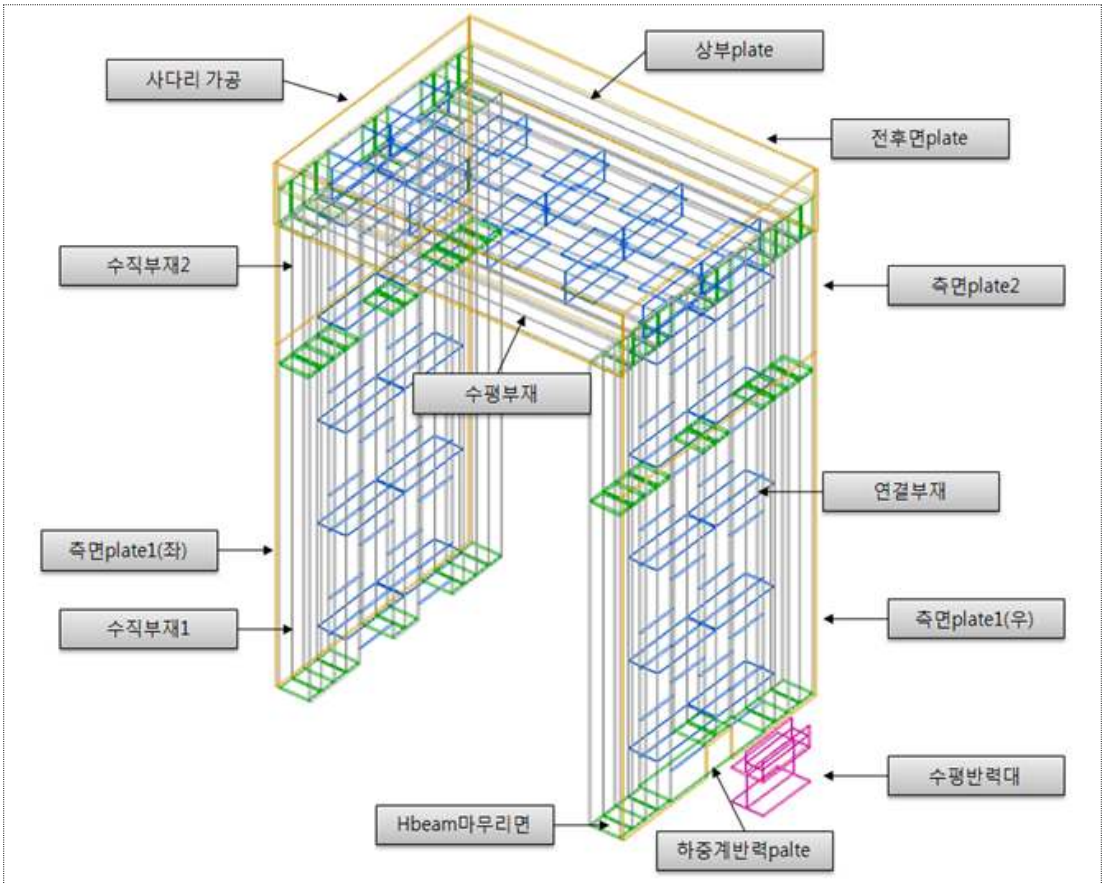
< 이동식 충격저감장치 및 기존공법과 비교 >



< 이동식 충격저감장치를 활용한 터널확대 공법 >

○ 프로텍터 시작품 제작 및 실대형실험에 의한 검증

- 실대형 실험을 수행하기 위해 프로텍터 시작품을 제작하였음. 1차로 터널 확대에 대응되는 프로텍터로 강재로 제작하였으며 전체 개요도 및 각 부재의 규격은 다음과 같음



< 프로텍터 시작품 전체 개요도 >

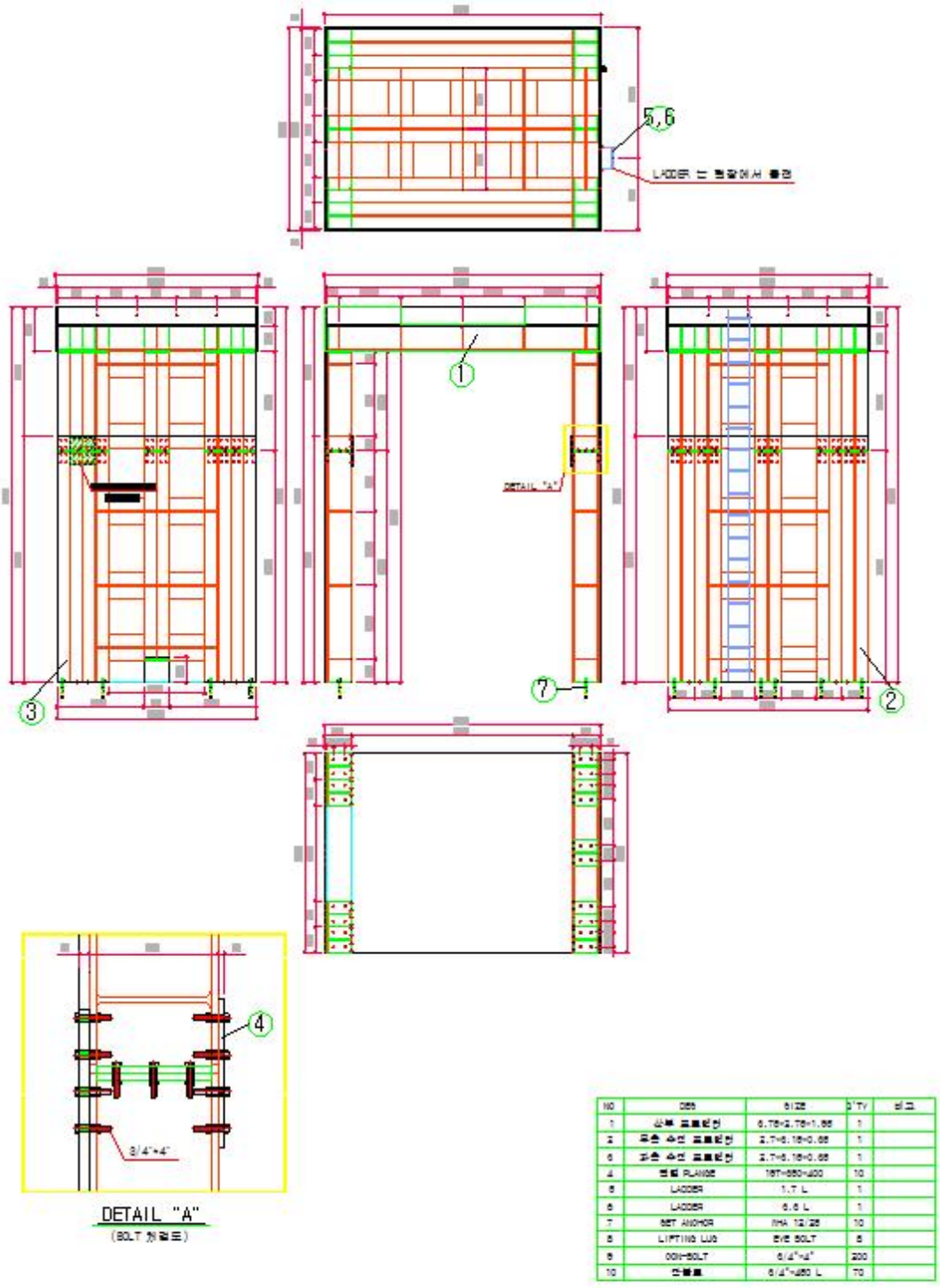
구분	강재	규격	비고
수직부재1	H-beam	350•350•12/19	하부 수직부재
수직부재2	H-beam	350•350•12/19	상부수직부재
수평부재	H-beam	350•350•12/19	
연결부재	H-beam	350•350•12/19	
측면plate1(좌)	Plate	두께: 25mm	
측면plate1(우)	Plate	두께: 25mm	수직 및 수평반력 측정을 위해 가공
측면plate2	Plate	두께: 25mm	
상부plate	Plate	두께: 25mm	
전후면plate	Plate	두께: 25mm	
Hbeam마무리면	Plate	두께: 19mm	
하중계반력plate	Plate	두께: 19mm	수직반력측정을 위한 반력plate
수평반력대	Hbeam	350•350•12/19 200•200•10/15	

< 프로텍터 시작품 각 부재의 규격 >



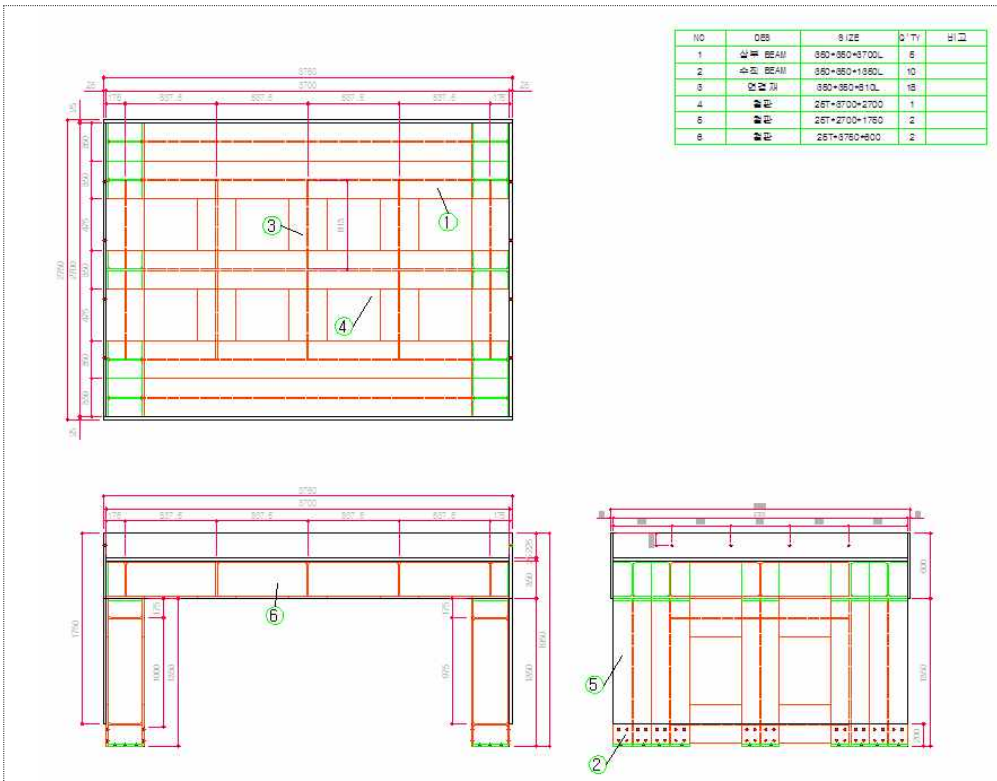
< 프로텍터 시작품 전경 >

- 프로텍터는 규모가 크기 때문에 운반을 용이하게 하기 위해서 3개의 세그먼트로 분리하여 공장에서 제작되었으며 현장 반입 후 완전 조립되었음



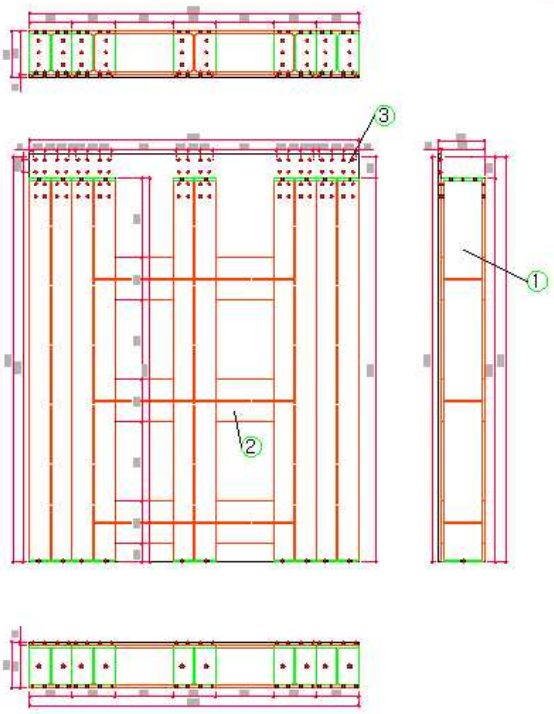
NO	DES	SIZE	QTY	비고
1	상부 프레임인	6.75×2.75×1.65	1	
2	우측 수선 프레임인	2.7×6.15×0.65	1	
3	좌측 수선 프레임인	2.7×6.15×0.65	1	
4	연결 PLANGE	15T×550×400	10	
5	LADDER	1.7 L	1	
6	LADDER	6.6 L	1	
7	SET ANCHOR	M4 12/25	10	
8	LIFTING LUG	EYE BOLT	8	
9	CON-BOLT	5/4"×4"	200	
10	안전로	5/4"×450 L	70	

< 프로텍터 시작품 전체도면 >



NO	DES	SIZE	Q'TY	비고
1	상부 BEAM	350×350×3700L	5	
2	슈지 BEAM	350×350×1350L	10	
3	연결재	350×350×810L	18	
4	철판	25T×3700×2700	1	
5	철판	25T×2700×1750	2	
6	철판	25T×3750×600	2	

< 프로텍터 시작품 상부도면(1개) >



NO	DES	SIZE	Q'TY	비고
1	슈지 BEAM	350×350×3150L	5	
2	연결재	350×350×810L	6	
3	철판	25T×2700×3350	1	

< 프로텍터 시작품 측면도면(2개) >

- 프로텍터의 조립순서는 우선 프로텍터를 정위치시키기 위해 현장에서 설치위치를 스케치하고 각 설치위치별 레벨을 측정하여 보정하였음. 다음 프로텍터를 현장으로 반입한 후 가조립하고 각 세그먼트를 볼팅체결하여 완전 조립하였음

	
① 프로텍터 설치 위치 sketch	② 하부앵커리지를 위한 천공
	
③ 설치지점별 레벨측정	④ 프로텍터 반입
	
⑤ 프로텍터 세그먼트 하차-1	⑥ 프로텍터 세그먼트 하차-2
	
⑦ 프로텍터 정위치 설치 및 간이 조립-1	⑧ 프로텍터 정위치 설치 및 간이 조립-2
	
⑨ 각 세그먼트 볼팅체결	⑩ 안전난간 설치 및 설치완료

< 프로텍터 시작품 조립순서 >

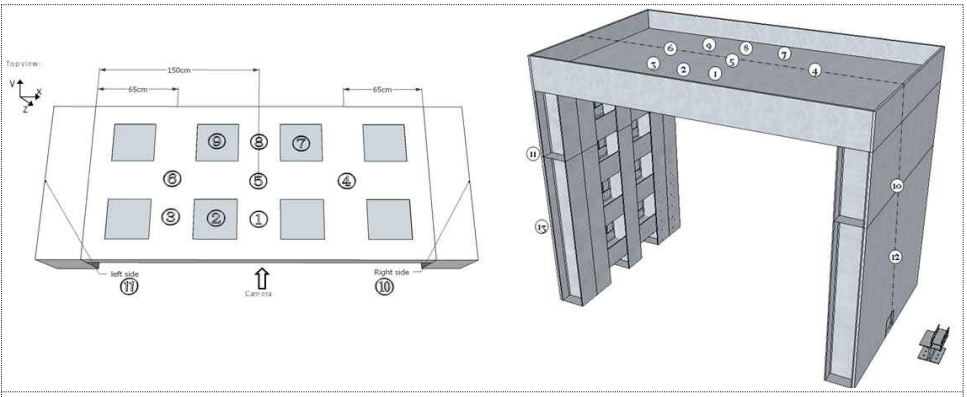
- 실제 현장적용 시 프로텍터의 설치시간은 공사기간에 직접적으로 영향을 주기 때문에 시작품 설치 시 시공시간을 측정하여 설치시간을 분석하였음. 길이 2m의 프로텍터 설치 및 해체 시 소요되는 시간을 분석한 결과 설치 시 약 9~10시간 소요되며 해체 시에는 약 4시간인 것으로 나타남. 실제 현장적용 시에는 부지정리 및 크레인의 설치시간은 최초 1회만 실시되고 조립만 되므로 설치시간은 보다 단축될 것으로 판단됨

<프로텍터 실험체 설치 및 해체시간>

구분	순서	소요시간(hr)
프로텍터 설치	① 부지정리	0.5
	② 프로텍터 설치 위치 sketch	0.6
	③ 하부앵커리지를 위한 천공	0.3
	④ 각 지점부 레벨 측정	0.3
	⑤ 프로텍터 반입 및 가조립	4
	⑥ 프로텍터 완전 조립	4
프로텍터 해체	① 프로텍터 볼트 해체	3
	② 프로텍터 해체 및 반출	1

< 프로텍터 설치 및 해체시간 분석 >

- 버력의 충돌에 의한 프로텍터의 거동을 분석하기 위해 실대형 충돌시험을 수행함. 버력은 신선한 포천화강암(탄성계수: 50GPa, 직경: 50cm)을 가공하여 사용. 수치해석결과 충돌부터 반발되기까지의 극히 짧은 시간이므로 동적 거동분석에서는 측정rate를 5,000Hz 이상인 데이터 로거와 계측기를 사용하여 충돌실험 수행함. 적용된 계측센서와 설치위치 및 전경은 다음과 같음



< 계측기 설치위치 >

No.	계측 센서(방향)	No.	계측 센서(방향)
①	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)	⑧	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z), 가속도 게이지2, 타겟
②	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z), 가속도 게이지 1, 타겟	⑨	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)
③	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)	⑩	변형률 게이지 (y, z), LVDT(z)
④	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)	⑪	변형률 게이지 (y, z), LVDT(z)
⑤	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)	⑫	변형률 게이지 (z), LVDT(z)
⑥	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)	⑬	변형률 게이지 (z), LVDT(z)
⑦	변형률 게이지 (x, y), LVDT(z)		

< 계측위치에 적용된 계측센서 >



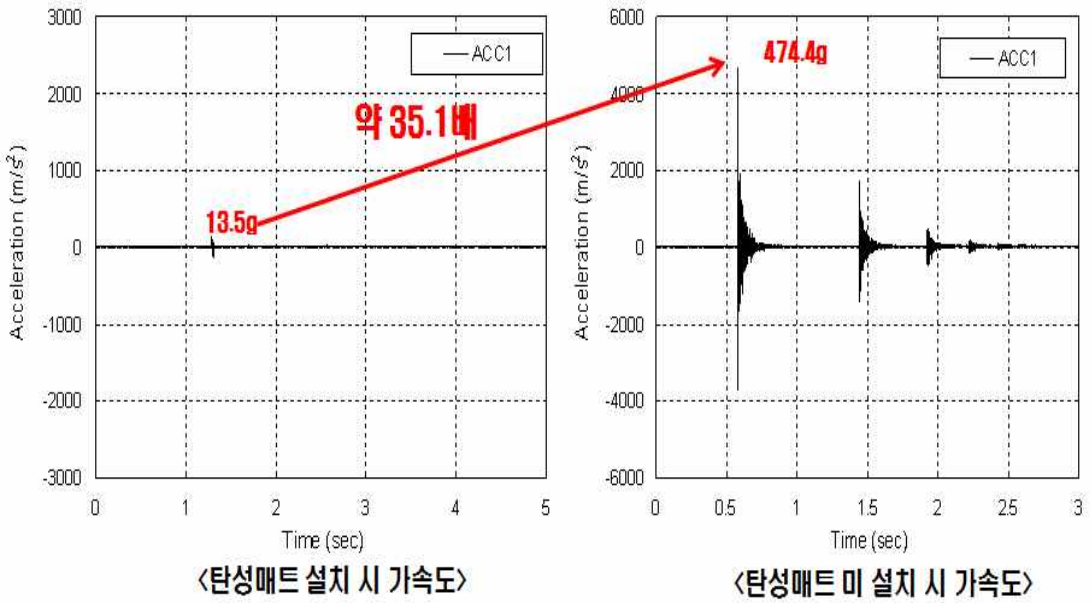
< 계측기 설치 전경 >

- 충돌실험의 실험순서는 낙석을 매단 후 낙석의 정확한 타격 위치를 알기 위해 낙석 하부에 페인팅을 하였으며 소정의 낙하높이까지 낙석을 정위치 시킨 후 낙하시켰으며 낙하 후 낙하지점을 마킹하고 이를 반복하는 순서로 진행되었음



< 실대형 충돌실험 실험순서 >

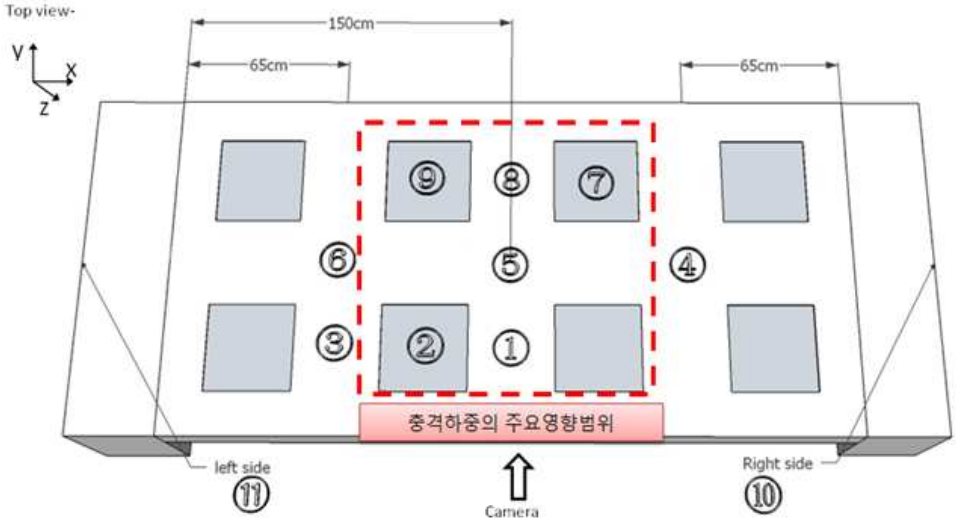
- 낙하높이와 탄성매트의 유무에 따른 총 19 case에 대해 실험을 수행하였으며 동적계측결과 탄성매트가 설치된 경우 최대가속도는 200m/sec^{2}을 넘지 못하는 것으로 나타났으나 탄성매트가 제거된 경우에는 약 1,608~10,443m/sec^{2}의 범위를 갖는 것으로 나타나 탄성매트에 의한 에너지 흡수가 매우 큰 것으로 계측되었음. 다음은 낙하높이 6m에서 탄성매트의 유무에 따라 가속도를 측정한 결과이며 약 35.1배의 차이가 나는 것으로 나타남



< 실대형 충돌실험 가속도 계측결과(낙하높이: 6m) >

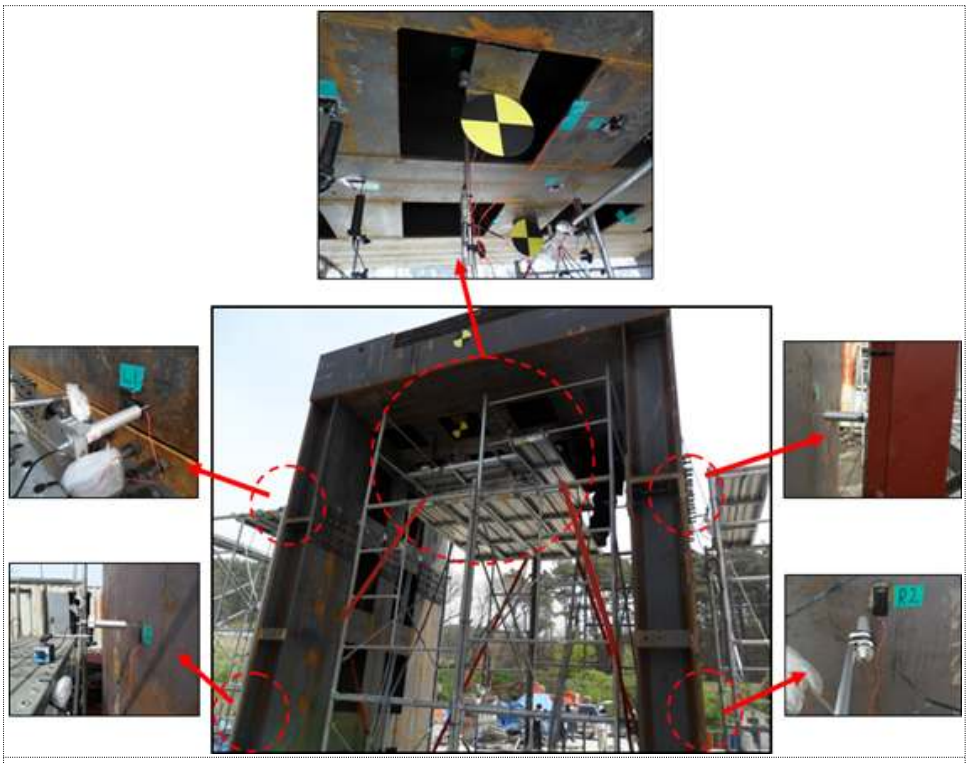
- 변형률 계측값도 앞의 가속도 결과와 유사한 경향으로 계측되었음. 탄성매트가 설치된 경우에는 최대 335με으로 측정되었으나, 탄성매트가 없는 경우에는 변형률이 748~5120με으로 계측되었음.
- 탄성 매트가 설치된 경우 Test Case별 최대변형률은 ②-Y, ⑤-X, ⑦-Y 위치에서 계측되었으나, 탄성매트 제거 후 최대변형률 ②-Y에서만 계측되는 것을 알 수 있음. 이러한 계측결과는 충격하중에 의해 ②-Y가 손상을 입어 소성거동을 하

기 때문인 것으로 판단됨. 또한 탄성매트가 제거된 후 타격위치에 따른 변형률을 보면 Beam에 타격하였을 경우에는 타격위치 주변 계측기에서도 변형률이 상대적으로 크게 측정되지만 Plate에 타격했을 경우에는 크게 발생되지 않는 것을 알 수 있음. 이는 Beam보다 Plate가 강성이 약하여 변형이 발생되므로 그로 인해 충격에너지를 흡수하기 때문인 것으로 판단됨. 하지만 전체 변형률 발생경향을 보았을 때 Beam과 Plate 어느 부분을 타격하더라도 충격에 의한 영향은 타격위치에 국한되는 것을 볼 수 있는데 이는 충격하중이 매우 짧은 시간에 발생하여 소산되기 때문인 것으로 판단됨



< 충격하중의 주요영향 범위 >

- 정적계측은 타격 후 최종잔류 변위만 측정하였음. 잔류변위도 탄성매트를 제거한 후 상대적으로 크게 발생하는 것으로 나타남



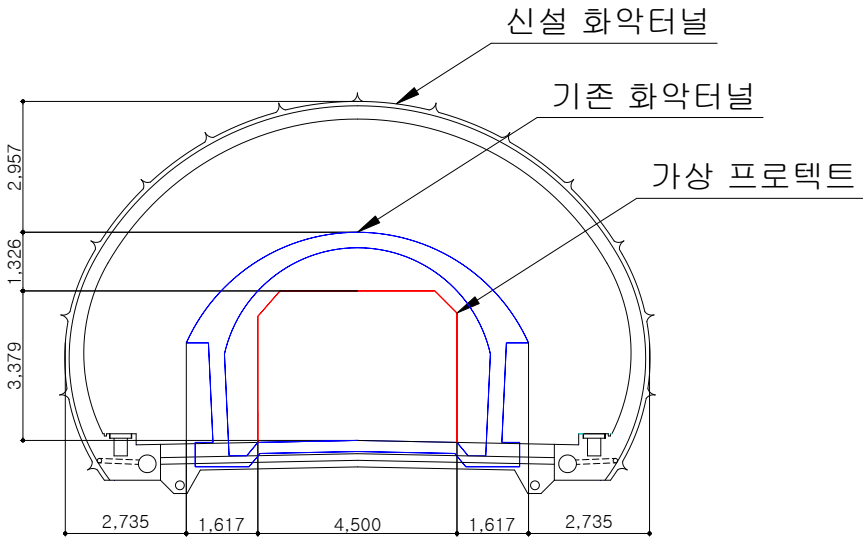
< 최종잔류 변위 계측위치 >

- 실대형 실험결과를 요약하면 충격하중은 버력이나 장비의 상재하중에 비해 매우 크나 그 발현시간이 매우 짧고 타격되는 위치에 국한되는 특징을 보이며 탄성매트를 활용할 경우 충돌하중을 효과적으로 저감시킬 수 있을 것으로 판단됨

□ 협소공간에서 터널 시공장비의 운영성 분석

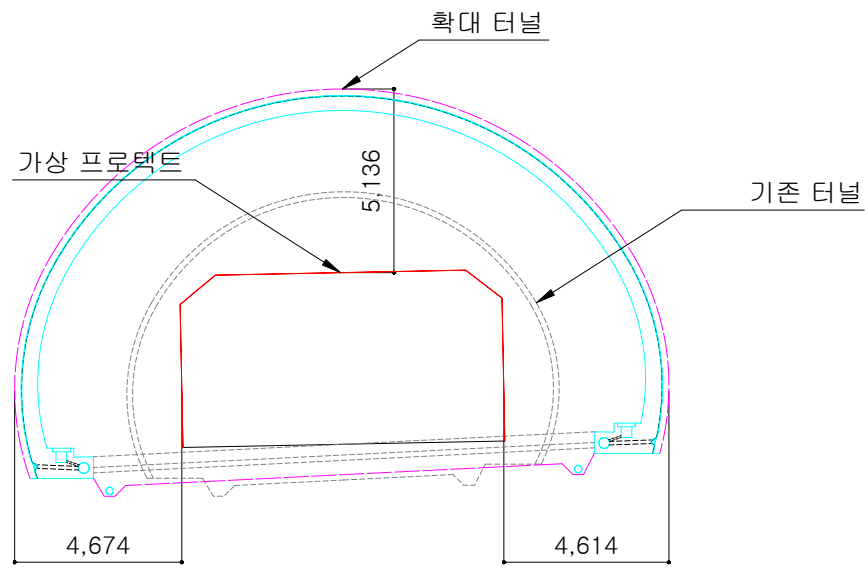
○ 협소한 공간에서의 터널 시공장비의 운용공간 분석

- 1차로 도로터널(재래식 터널)에서 2차로 도로터널로 확대한 국내 화악터널을 대상으로 분석한 결과에 따르면 약 4.3~4.4m의 공간이 확보됨



< 재래식 1차로 터널의 확대 시 시공장비 운용성 분석 >

- 2차로 도로터널(NATM 터널)을 3차로 도로터널로 확대한 방화터널에 대한 분석결과에 따르면 편측확대의 경우에는 최소 1.5m의 공간이 형성되며, 양측확대인 경우에는 최소 4.8m의 공간이 형성되는 것으로 나타나 양측확대가 유리한 것으로 분석됨



< 2차로 터널의 확대 시 시공장비 운용성 분석 >

○ 터널 시공장비의 운용성 시뮬레이션

- 2차선 도로터널을 3차로 도로터널로 확대하는 경우에 대한 터널 시공장비의 운용성에 대한 2차원 시뮬레이션을 실시한 결과에 따르면 0.6㎡ 규격의 굴삭기는 운영이 어려우며, 경사 록볼트의 적용이 필요한 것으로 나타남

사용 목적	장 비 명	주요 제원 및 규격		적용성 여부
버럭 처리, 지보재 설치 및 스케일링	굴삭기	0.6㎡	전고=6.3m, 전폭=2.6m	O
		0.2㎡	전고=2.6m, 전폭=1.9m	X
발파 천공, 록볼트 및 Forpoling 시공	점보드릴	2 Boom 및 3 Boom		O
차수 및 보강공법 시공	크롤러 드릴 (PCR 200)	전고=1.3m, 전폭=2.4m		O
보강공법 시공	보강용 전용장비 (E15TJ)	전고=3.7~6.1m, 전폭=2.5~3.5m		O


<굴착기(0.6m²) 시뮬레이션>


<굴착기(0.2m²) 시뮬레이션>


<크로라드릴 시뮬레이션>


<점보드릴 시뮬레이션 1>


< 점보드릴 시뮬레이션 2>


<보강전용장비 시뮬레이션>

< 협소공간에서의 장비 시공성 분석 >



< 터널 시공장비(점보드릴)의 시공성 평가 >



< 터널 시공장비(굴삭기)의 시공성 평가 >



< 터널 시공장비(천공장비)의 시공성 평가 >

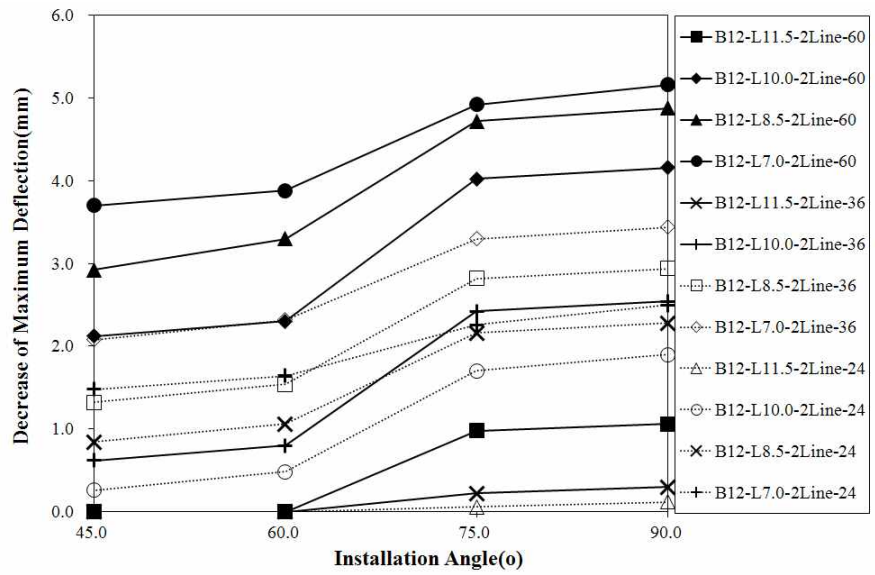
□ 교통 흐름을 유지한 터널의 보강기술 개발

○ 경사 록볼트 보강효과에 대한 모형시험

- 경사 록볼트의 보강효과를 평가하기 위하여 설치각도, 볼트의 길이 등을 변경하며 총 111회의 모형시험 실시함
- 모형시험 결과에 의하면 경사 록볼트의 효과적인 설치각도는 90°~75°인 것으로 나타남



< 경사 록볼트 보강효과 확인을 위한 실내 모형시험 개요 및 전경 >



< 경사 록볼트 보강효과 확인을 위한 실내 모형시험 결과 >

○ 협소한 공간 및 교통흐름을 유지한 터널 보강기술 개발

- 협소공간에서 지반 보강기술은 기존 보강기술인 파이프루핑 공법, 강관그라우팅 공법, 포아폴링 공법뿐 만 아니라 레그드릴 록볼트 공법, 막장면 선진 록볼트공법, 경사 록볼트공법등을 적용할 수 있음



< 협소공간에서의 보강기술 >

- 협소한 공간에서 터널 보강재의 강도 손실을 최소화 하는 보강기술을 특허등록
- 협소한 공간에서 터널 보강재의 강도 손실을 최소화 하는 보강기술을 특허등록
- 교통흐름을 유지한 상태에서 터널 라이닝 배면 채움 그라우팅을 위한 시공기술을 특허등록

Ⅲ 연구성과 활용방안

□ 국내외 터널단면 확대 시공기술 적용 조사 및 분석

○ 터널확대 시공사례 분석
- 교통류 보존형 터널확대 사업 추진 시 계획단계에서 사업의 필요성과 타당성 검토 및 설계 시 검토항목에 대한 가이드라인으로 활용
- 시공 시 교통규제, 적용 지보공법에 대한 가이드라인 제시
- 교통류 보존형 터널확대 시공 프로세서에 대한 이해도 증진

□ 터널단면 확대 시공프로세서 정립

○ 터널단면 확대 시공프로세서 정립
- 국내 도심지내 공용중인 터널의 단면확대 시공시 활용
- 이동식 프로텍터를 활용한 터널단면 확대 시공법에 활용

○ 터널단면 확대 시 터널내 교통흐름 유무에 따른 경제성 비교
- 국내 도심지내 터널단면 확대시 경제성 분석방법에 활용
- 터널단면 확대공법 적정성 및 타당성 확보에 활용

○ 터널확대 시 핵심기술 도출
- 다양한 주변조건을 가진 기존 터널의 단면확대 설계 및 시공 시 고려할 조건으로 활용

□ 터널확대 시 안정성 분석 및 설계기술 개발

○ 터널확대 방식 및 형상에 따른 지반 변형 특성 분석
- 터널확대 설계 시 막장의 전진에 따른 확대부와 기존터널부

의 지반변형특성에 대한 이해도 증진으로 설계결과의 적합성 검토에 대한 가이드라인 제시
- 노후터널의 확대 방식 및 형상에 따른 지반 변형 특성 분석을 통해 최적의 안정성을 확보할 수 있는 형상 결정에 대한 가이드라인으로 활용
- 기존 터널 확대시 차량 및 작업자 보호를 위한 프로텍터 설치 범위의 최적화를 통해 운영중 터널 확대 공법의 경제성을 확보할 수 있는 지침으로 활용

○ 터널확대 시 굴착영향권 산정식 개발 및 검증
- 사업 계획단계에서 경제성 분석 시 프로텍터의 비용에 대한 근거로 활용
- 설계 시 확대에 따른 굴착영향권 산정으로 이동식 프로텍터의 보호범위 산정 시 활용
- 시공 시 안전시공을 위한 주요 관리구간 제시

○ 터널측벽 록볼트 미시공에 따른 숏크리트 최적 보강두께 제시
- 터널측벽 협소공간에서 록볼트 시공이 불가능한 경우 터널 해석 및 안정성 분석을 위한 기법에 활용
- 록볼트 미시공에 따른 터널 안정성 확보를 위한 최적 보강 숏크리트두께 산정에 활용

□ 프로텍터 설계 및 제작기술 개발

○ 프로텍터에 제원 및 다양한 형태의 프로텍터 형상 제시
- 다양한 기하학적 조건 및 설계속도를 고려한 프로텍터 단면 기본 제원 결정 활용
- 지반조건에 따른 이동식 이동식 프로텍더의 최소길이 결정에 활용

○ 터널 확대시 프로텍터에 작용하는 하중 및 충돌하중 산정식 개발

- 프로텍터 설계 시 고려해야할 하중에 대한 가이드라인 제시
- 시간의 함수인 충돌하중에 대한 정량적 산정식을 제시함으로서 합리적인 프로텍터 설계 및 다양한 충돌조건에 대한 간편한 충돌하중 산정으로 설계 시간 단축 및 여러 위험 상황에 대한 검토 가능
- 특허 등록된 터널단면 대응형 프로텍터로 터널의 단면에 따라 프로텍터의 추가제작 없이 모든 터널 확대에 대응 가능
- 특허 등록된 계측기능을 가지는 프로텍터 적용으로 협소공간에서의 계측시간 단축 및 안정성 확보

○ 발파 버력의 충돌하중 저감기술 개발

- 발파 굴착 적용 시 충돌하중을 저감시키기 위해서 발파 설계와 프로텍터 설계 시 고려해야할 사항에 대한 가이드라인 제시
- 특허 등록된 발파 버력 낙하지점 유도기능을 가지는 충격저감장치로 협소공간에서 버력의 처리 효율 증진 및 충격저감장치의 비용 최소화
- 특허 등록된 소음 및 진동저감장치를 구비하는 프로텍터 적용으로 프로텍터 내 운전자의 안전 확보

○ 발파버력의 실대형 충돌실험

- 국내 최초 낙석의 실대형 충돌실험 수행으로 추후 유사 실험 시 실험 가이드라인 제시
- 충돌저감재의 저감효과 평가로 버력 충돌 시 안정성에 대한 신뢰도 증진 및 저감재 비용 최소화
- 낙석의 충돌 시 충돌하중의 분산 특성에 대한 실대형 실험 수행으로 발파굴착 대응형 프로텍터 설계 시 안정성과 경제

성의 동시 확보 가능

□ 협소공간에서 터널 시공장비의 운영성 분석

○ 협소한 공간에서의 터널 시공장비의 운용공간 분석
- 다양한 기하학적 단면을 가진 터널에서 시공장비 선정에 활용
- 기존 장비를 활용한 터널 단면 확대 기술정립에 활용

○ 터널 시공장비의 운용성 시뮬레이션
- 다양한 기하학적 단면을 가진 터널과 프로텍터 제원에 따른 사용가능한 터널 시공장비 운용서에 대한 검증에 활용

□ 교통 흐름을 유지한 터널의 보강기술 개발

○ 경사 록볼트 보강효과에 대한 모형시험 결과
- 국내에서도 방재기준이 강화되어 피난연결통로 설치가 증가하고 있으며, 최근의 피난연결통로 시공에서는 시공장비의 운용공간이 협소하여 경사 록볼트를 시공한 사례가 발생함
- 설계사에서 경사 록볼트의 보강효과 평가를 위한 기초자료로 참고가 가능함

○ 협소한 공간 및 교통흐름을 유지한 터널 보강기술 개발
- 특허가 등록된 터널 보강재의 강도 손실을 최소화 하는 보강기술은 설계사와 시공사에서 피난연결통로 및 협소한 수로터널의 터널 보강공법으로 활용이 가능함
- 특허가 등록된 터널 라이닝 배면 채움 그라우팅을 위한 시공기술은 시공장비를 최소화하여 공기단축 및 공사비 절감을 도모할 수 있으므로 설계사와 시공사에서 활용이 가능함

Ⅳ 기대효과

□ 기술적 기대효과

○ 교통류 보존형 터널확대 공법에 대한 국내 최초 연구수행으로 실제 적용을 위한 기반기술 확보
○ 신규터널과 다른 터널확대 시의 지반변형특성 제시
○ 국내 최초 낙석에 대한 실대형 충돌실험 수행으로 유사 상황에서의 실험방법과 분석항목에 대한 가이드라인 제시
○ 최초로 경사 록볼트 보강효과에 대한 모형시험을 실시하였으며, 경사 록볼트 보강효과 확인으로 터널 기술력이 향상됨

□ 경제적 기대효과

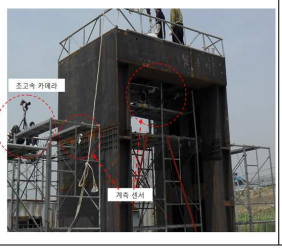
○ 신설터널 또는 우회도로 개설로 인한 공사비 증가 억제
○ 터널 폐쇄로 발생하는 교통정체 최소화로 사회적 손실비용 감소

□ 사회적 기대효과

○ 우회도로 및 신규터널 건설에 의한 환경파괴 최소화
○ 차선 통제에 따른 도심지 공사 시 교통불편 최소화
○ 노후터널의 리뉴얼로 붕괴사고로 인한 재난대비

첨부1 시제품 개발 실적

□ 시제품별 주요 기능 및 용도

순번	시제품명	관련 사진	주요 기능	용도
1	소음및충돌하중 저감용 탄성매트		- 발파버력 충돌 시 소음저감 - 충돌하중 저감	- 발파버력 충돌 시 소음 및 충돌하중 저감
2	충격실험용 프로텍터		- 낙석 실대형 충돌실험을 위한 프로텍터 - 1차로 단면에 대응	- 낙석 충돌 시 프로텍터 거동 및 충돌하중 분산특성을 분석하기 위한 실대형 충돌실험용

첨부2 지식재산권 실적

□ 특허 출원 및 등록

순번	특허명	출원번호 (등록번호)	출원일 (등록일)
1	그라우트 주입장 및 이를 이용한 지반보강공법	10-2011-0132692 (10-1181468)	2011.12.12 (2012.09.04.)
2	강지보재와 주입관을 이용한 터널 라이닝 배면 그라우팅 방법	10-2011-0040730 (10-1104329)	2011.04.29 (2012.01.03.)
3	운영중 터널확대를 위한 터널단면 대응형 프로텍터	10-2011-0042923 (10-1063773)	2011.05.06 (2011.09.02)
4	소음 및 진동 저감형 터널 확대용 강재 프로텍터	10-2010-0059353 (10-1002402)	2010.06.23 (2010.12.13)
5	발파비산석 낙하지점 유도기능을 갖는 충격저감장치를 구비한 프로텍터 및 이를 이용한 운용중 터널확대공법	10-2011-0004143 (10-1028397)	2011.01.14. (2011.04.04.)
6	계측장치를 구비하는 프로텍터	10-2012-0080380 (10-1200917)	2012.07.24. (2012.11.07)
7	다단 연결 록볼트 이용 터널 확장 시공방법	10-2011-0051561	2011.05.30
8	굴절형 프로텍터 구조물 및 이를 이용한 터널 확장 시공방법	10-2011-0051815	2011.05.31

첨부3 논문 실적

□ 학술지 게재

순번	학술지명	논문명	게재일	비고
1	한국터널지하공간학회	발파버력의 재료거동이 프로텍터에 작용하는 충격하중에 미치는 영향	2011.05	일반
2	한국방재학회논문집	우산망 보강공법 보강재의 보강효과	2011.08	일반
3	한국지반공학회	노후터널의 운용중 터널확대시 지반종단변형특성에 관한 연구	2011.11	일반
4	대한토목학회논문집	경사볼트의 보강효과에 대한 모형시험 연구	2012.09	일반
5	한국터널지하공간학회	운영중 도로터널의 측벽하부 숏크리 보강에 의한 단면확대	2012.11	일반
6	한국터널지하공간학회	절리 암반터널 내 그라우팅 전후의 암반 투수계수 및 그라우팅 주입량과 Q 시스템 항목들과의 상관관계 연구	2012.11	일반
7	한국지반환경공학회	측벽부 숏크리트 보강에 의한 재래식 도로터널 단면확대	2012.12	일반

□ 학술회의 발표

순번	학술지명	논문명	발표일	비고
1	WTC 2010	Analyses and Recovery Execution in NATM Tunnel through Migmatite Fault Zone	2010.05	국외
2	WTC 2011	Evaluation of impact force on the protector during the existing tunnel expansion by blast excavation	2011.05	국외
3	WTC 2012	Full-scale impact test of a steel protector for existing tunnel enlargement	2012.05	국외
4	WTC 2012	SUPPORTING EFFECT OF INCLINED SYSTEM BOLTING AT THE TUNNEL IN COHESIONLESS GROUND	2012.05	국외
5	암반공학회	록볼트의 설치각도에 따른 보강효과의 수치해석적 연구	2010.03	국내
6	한국지반공학회	노후터널 확대 시 기존터널 지보재의 응력변화에 대한 분석	2010.05	국내
7	한국지반공학회	발파에 의한 터널확대 굴착 시 교통처리를 위한 교통량 분석	2010.09	국내
8	대한토목학회	터널 발파 굴착 시 파쇄암의 최대입도분석에 대한 사례연구	2010.10	국내
9	암반공학회	터널확대 시 지반변형특성 분석	2011.09	국내
10	한국지반공학회	암반사면의 한계평형해석을 고려한 평사투영법 개발을 위한 기초연구	2012.10	국내

첨부4 **연구비 세부 현황**

□ 연구기관별/연차별 연구비

(단위 : 천원)

구분		연구과제명	연구기관	연구책임자	'09		'10		'11		계	
					정부	기업	정부	기업	정부	기업	정부	기업
총괄	주관	터널단면 확대 안정성분석 및 설계 기술개발	한국건설기술연구원	김동규	60,000	–	115,000	–	121,000	–	296,000	-
	공동	터널 단면 확대 시공기술 개발	㈜대우건설	백기현	15,000	60,000	25,000	100,000	48,000	106,000	88,000	266,000
	공동	터널 단면 확대 보강기술	대원토질(주)	이재덕	5,000	35,000	12,000	67,000	13,000	89,000	30,000	191,000
	계				80,000	95,000	152,000	167,000	182,000	195,000	414,000	457,000

부 록 - 3

연구 성과집

-교통류 보존형 터널단면 확대 시공기술 개발-

연구성과집

교통류 보존형 터널단면 확대 시공기술 개발

주관연구기관: 한국건설기술연구원
공동연구기관: ㈜대우건설
대원토질㈜
연구기간: 2009.10.26~2012.10.25(3년)
연구비: 총 871백만원
(정부 414백만원, 기업 457백만원)

교통류 보존형 터널단면 확대 시공기술 개발

1 연구배경 및 필요성

- 도심지내 교통량 증가 및 도로차선 확대 필요
  - 도심지내 교통정체 심화로 도로차선 확대 필요
  - 신설도로터널 또는 우회도로 건설 시 도심지내 녹색공간 훼손 또는 추가 공간 부족
- 기존터널 단면확대 요구
  - 도심지내 도로터널 단면확대시 터널내 교통흐름 차단으로 주변 교통정체 가속화
  - 프로텍터를 활용한 터널내 교통흐름 유지 터널단면 확대 설계/시공 기술 부재
  - 터널 성능개선 및 공용기간 연장
  - 터널단면 확대 후 병목현상 해소 및 교통정체 감소

2 연구 목표

도심지내 교통량 증대에 따른 차선확대에 대응하기 위해 프로텍터를 활용하여 기존 도로터널의 교통흐름을 유지하면서 기존 터널단면을 확대하는 '교통흐름 확보 터널단면 확대 시공기술 개발' 이 최종목표임. 세부목표는 다음과 같음

- ■ 터널 확대 안정성 분석 및 설계 기술 개발
- ■ 교통흐름 유지 터널 확대 시공 기술 개발
- ■ 교통흐름 유지 터널 확대 보강 기술 개발



3 연구 주요 내용

- 터널 단면 확대 형식 및 규모에 따른 안정성 해석기법 및 설계기법 제시
- 이동식 프로텍터 설계제작 기술 제시
- 협소공간 지반 보강 기법제시
- 협소공간 및 프로텍터를 고려한 시공장지 선정 및 운영기법 제시
- 터널 단면 확대 시공 프로세서 및 시공법 제시
- 교통류 보존형 터널단면 확대 설계 및 시공 지침(안)제시





4 기대효과 및 활용방안

- 도심지내 도로터널 확대에 의한 차선증대로 교통정체 해소
- 교통정체에 따른 환경 및 사회간접비용 감소
- 신설터널/우회도로 미건설로 도심지내 녹색공간 확보
- 도심지내 기존터널 확대 및 성능개선에 활용
- 노후터널 공용기간 연장을 위한 보수/보강시 활용

5 연구책임자 및 연락처

- 주관연구책임자: 김동규(한국건설기술연구원, 연구위원, dgkim2004@kict.re.kr, 031)9100-238)

국토해양부 | KICTEP 한국건설교통기술평가원 | KICT 한국건설기술연구원 | 대우건설 | 대원토질

연구성과 1: 교통류 보존형 터널단면 확대 시공기법

1 연구목표

- 도심지내 기존 도로터널을 확대시공시 터널내 교통흐름을 유지하기 위한 프로텍터를 활용하여 터널단면을 확대하는 공법 개발
- 도로터널확대를 위해 발파로 굴착하고 이동식 프로텍터를 활용하는 공법

2 연구내용

- 이동식 프로텍터를 활용한 기존 도로터널단면 확대 시공프로세서 제시
- 이동식 프로텍터 사용 유 · 무에 따른 직접 건설공사비 비교분석
- 기존 도로터널내 교통흐름 차단 유 · 무에 따른 경제사회적 손실비용 비교분석

3 연구배경 및 필요성

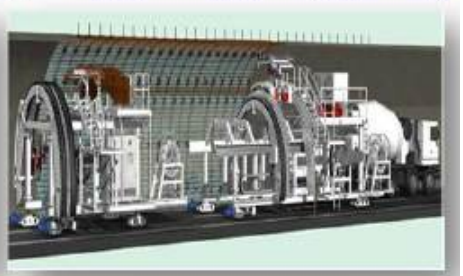
- 도심지내 교통량 증가로 차선확대 필요
- 차선확대를 위한 신설도로/우회도로는 녹지공간 훼손 및 추가공간 부족
- 기존 터널 단면확대시 터널내 교통차단시 교통정체 심화
- 터널내 교통흐름을 유지하면서 기존 터널단면 확대공법 필요

4 국내·외 기술동향

- 터널내 교통흐름을 유지하면서 터널단면 확대사례 40여건(일본)
- 운영중인 철도터널 확대사례 2건(독일)
- 선진외국은 교통흐름 보존형 터널단면 확대 공법, 장비 개념도 및 특허에 대한 다수의 연구실적 보유
- 국내는 교통흐름 보존형 터널단면 확대 기술에 대한 연구 전무





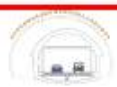


국토해양부 KICTEP 한국건설교통기술평가원 KICT 한국건설기술연구원 대우건설 대원토질

연구성과 1: 교통류 보존형 터널단면 확대 시공기법

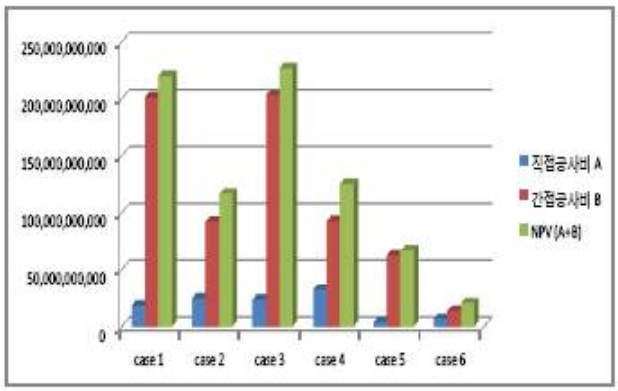
5 연구성과

● 이동식 프로텍터를 적용하고 발파굴착에 의한 기존 도로터널 단면확대 시공 프로세서 제시

시공순서	시공개요도	주요사항	시공순서	시공개요도	주요사항
① 기초 공법		· 프로텍터 연결 기초부 시공	⑤ 공동구		· 방수막, 공동구 설치 · 가포장 시공 · 확대터널 구간 조명설치
② 프로텍터 설치		· 강재프로텍터 설치 · 야간 교통통제후 설치	⑥ 프로텍터 이동		·프로텍터 이동(야간통행 금지)
③ 사전 보강		· 불안정 지반 사전 보강 작업	⑦ 라이닝 설치		· 콘크리트 라이닝 타설 (확대굴착이 완료후)
④ 굴착 및 지보재 설치		· 발파천공 · 발파 및 환기(20분간 교통통제) · 기존 라이닝 및 지보재, 버력처리 · 지보재 시공	⑧ 프로텍터 제거 및 포장		· 프로텍터 제거 · 배수공 및 포장 완료 · 부대시설 설치

● 터널내 프로텍터 사용 및 교통흐름 차단 유 · 무에 따른 건설공사비 및 경제사회적 비용 분석기법 제시





6 기대효과 및 활용분야

● 국내 도심지내 도로터널 확대에 의한 차선증대로 교통정체 해소

● 도심지내 녹색공간 보존

● 국내 도심지내 장대도로터널의 단면확대시 적용

● 노후터널 수명연장을 위한 보수/보강시 활용

국토해양부 | KICTEP 한국건설교통기술평가원 | KICT 한국건설기술연구원 | 대우건설 | 대원토질

연구성과 2:터널확대 시 안정성 분석 및 설계기술 개발

1 연구목표

- 이동식 프로텍터를 활용하여 기존터널을 발파굴착으로 단면확대시 터널 안정성 분석 및 설계기법 제시

2 연구내용

- 터널확대의 규모 및 형식에 따른 지반변형특성 분석
- 지반변형특성 분석을 통한 종단변형 곡선식 제안
- 기존터널을 확대시 해석 및 설계기법 제시

3 연구배경 및 필요성

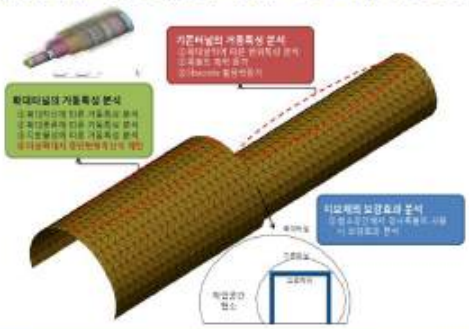
- 터널확대의 규모 및 형삭에따른 지반변형특성 연구 전무
- 이동식 프로텍터 최소 연장 제원 결정을 위한 터널단면용 종단변형 예측기법 전무
- 기존터널을 확대시 해석 및 설계기법 전무

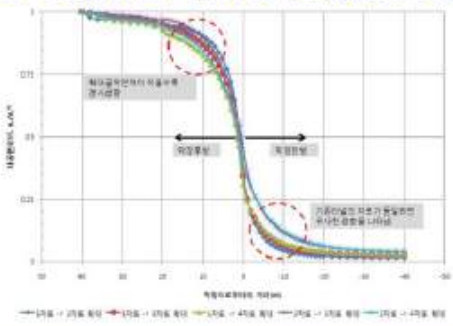
4 국내·외 기술동향

- 일본의 경우 실제 시공사례를 통한 기존터널과 확대터널의 지반과 지보재의 변형특성 분석
- 국내의 경우 연구 및 실제 시공사례 부재로 관련 분석내용 부재

5 연구성과

- 기존터널과 확대터널의 규모 및 형식에 따른 지반변형특성을 고려한 종단변형곡선식 제안
- 종단변형곡선식을 예측된 기존 및 확대터널 종단변형으로 이동식 프로텍터 최소연장길이 추정





국토해양부 | KICTEP 한국건설교통기술평가원 | KICT 한국건설기술연구원 | 대우건설 | 대원토질

연구성과 2: 터널확대 시 안정성 분석 및 설계기술 개발

$x \geq 0$ (굴착면 후방, 확대터널)

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1+\exp\left(\frac{-x/\left(\sqrt{R_{enlarge}^2 - R_{old}^2}\right)}{0.958}\right)\right]^{-1.171}$$

$x < 0$ (굴착면 전방, 기존터널)

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1+\exp\left(\frac{-x/R_{old}}{0.958}\right)\right]^{-1.171}$$

x : 굴착면부터의 거리(후방은 +, 전방은 -)

u_r : 터널 임의의 지점 x에서 현 굴착으로 인한 중심방향의 변위

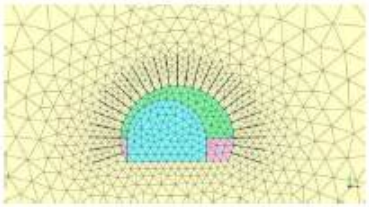
u_r^M : 현 굴착으로 인한 중심방향 최대 수렴범위

u_r^x : 터널 임의의 지점 x에서 중심방향 범위

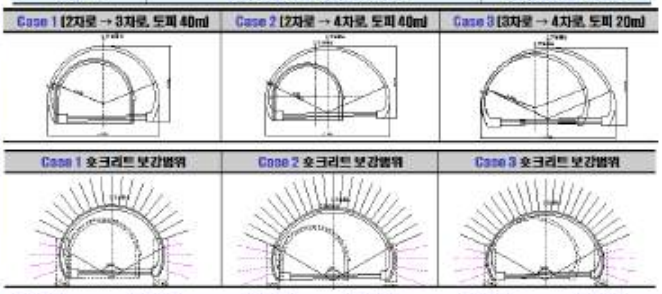
$u_r^{m,in}$: 중심방향 최하 수렴변위(선행범위)

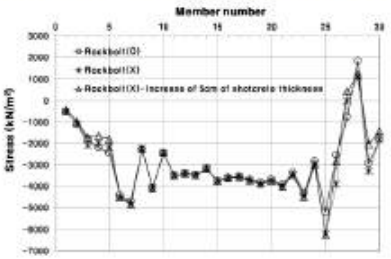
$u_r^{m,ax}$: 중심방향 최대 수렴변위

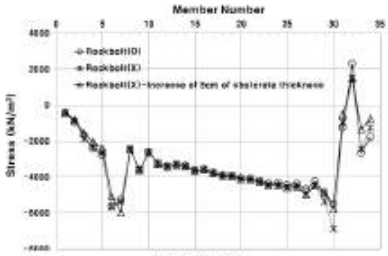
● 기존터널 확대시 설계기법 제시 및 록볼트 미시공구간 숏크리트 최적 보강 두께 설계 기법 제시

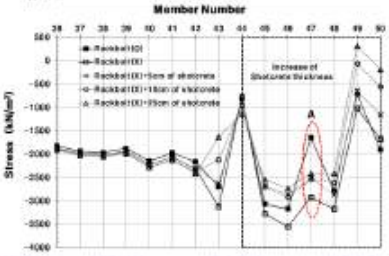


구분	시공단계	비고
step 1	지반 초기화	
step 2	null stage	
step 3	기존 터널 전단면 굴착	하중분담율 70%
step 4	기존 터널 라이닝시공	하중분담율 100%
step 5	초기화	변위 zero
step 6	기존터널 라이닝 삭제 및 확대 터널 상부 굴착	하중분담율 40%
step 7	확대 터널 상부 연성숏크리트 및 록볼트 보강	하중분담율 70%
step 8	확대 터널 상부 강성숏크리트	하중분담율 100%
step 9	확대 터널 하부 굴착	하중분담율 40%
step 10	확대 터널 하부 연성숏크리트 및 록볼트 보강	하중분담율 70%
step 11	확대 터널 하부 강성숏크리트	하중분담율 100%









6 기대효과 및 활용분야

- 터널확대 설계 시 설계결과의 적합성 검토에 대한 가이드라인 제시
- 사업의 계획단계에서 경제성 분석 시 근거자료로 활용(프로텍터 제원, 지보패턴등등)
- 터널확대 시공 시 주요 관리구간 제시

국토해양부 | KICTEP 한국건설교통기술평가원 | KICT 한국건설기술연구원 | 대우건설 | 대원토질

연구성과 3: 프로텍터 설계 및 제작기술 개발

1 연구목표

- 발파굴착 대응형 이동식 프로텍터의 설계 및 제작기술 개발

2 연구내용

- 국내 적용을 위한 이동식 프로텍터 최소단면 및 최소연장 도출
- 발파굴착 시 프로텍터에 작용하는 하중분석
- 발파 버력 충돌 시 충돌하중 산정식 개발
- 발파 버력의 충돌하중 저감기술 개발

3 연구배경 및 필요성

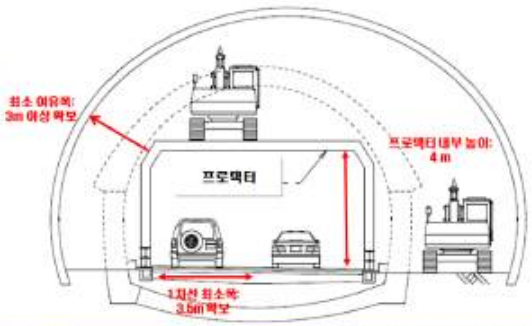
- 터널확대 시 교통흐름을 보존하기 위해서는 프로텍터 적용 필수
- 국내 이동식 프로텍터 설계 및 제작 사례 전무
- 국내 노후터널 확대 시 경제성 확보를 위해 발파굴착 적용 예상
- 발파버력의 충돌하중 산정 곤란 및 소음과 하중 저감기술 필요

4 국내·외 기술동향

- 일본의 경우 터널 전체에 강재프로텍터 설치
- 충돌하중 저감을 위해 프로텍터 상부에 모래포설로 상재하중 증가 및 포설높이 제한
- 충돌하중 산정시 하중저감체의 물성을 고정하여 다양한 저감방안에 대한 고려가 어려움
- 국내의 경우 이동식 프로텍터 제작 및 시공사례 전무

5 연구성과

- 국내 적용을 위한 프로텍터 최소단면 도출
  - 국내 기준(터널내 설계속도 80km/hr이상)
    - → 1차로 최소폭 3.5m
    - → 건축한계 4.8m
  - 이동식 프로텍터 내부높이: 4.0m
  - 1차로 최소폭: 3.5m
  - 측방여부폭: 3.0m

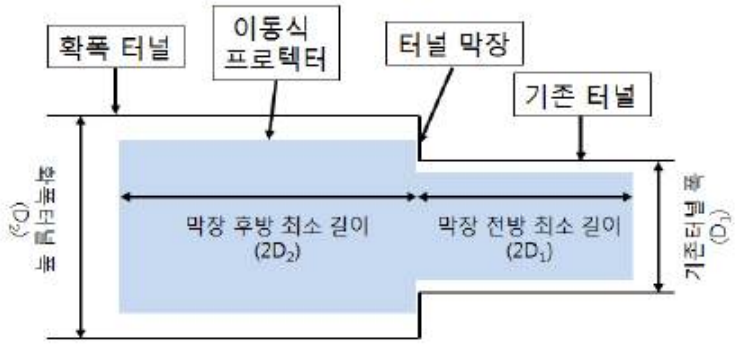


연구성과 3: 프로텍터 설계 및 제작기술 개발

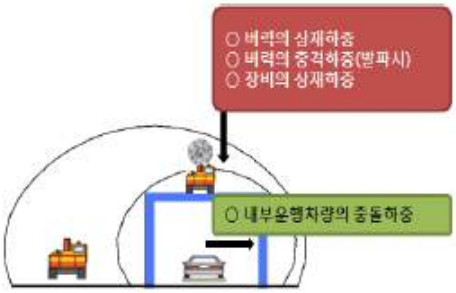
● 이동식 프로텍터 최소길이 제시

이동식 프로텍터 최소길이 = 기존터널 최소 보호구간($2D_1$)+확대터널 최소 보호구간($2D_2$)

(D_1: 기존터널 폭, D_2: 확대터널 폭)



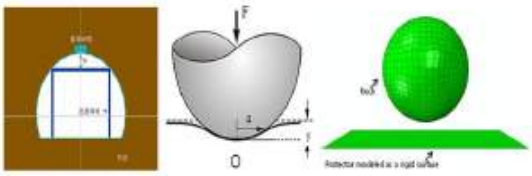
● 터널확대 시 차량보호용 이동식 프로텍터에 작용하는 하중 분석

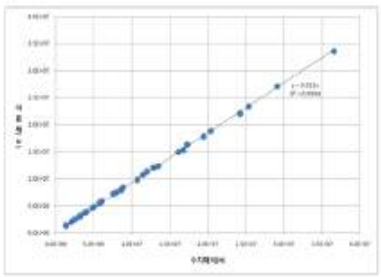


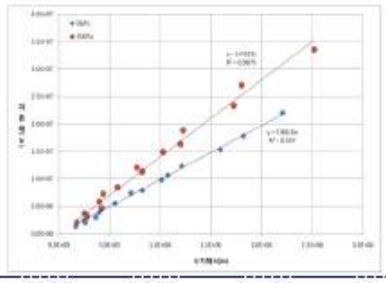
●발파버력의 충돌하중 산정식 개발 및 수치해석적 검증

$$F_{max} = 1.7672(E^*)^{2/5}(\gamma_1)^{-1/15}(W)^{2/3}(H_1 + H_s + H_g)^{3/5}$$

F_{max} : 낙석의 충격력(kN)
m : 낙석 질량(t)
g : 중력 가속도(m/s2)
H_1: 버력의 초기높이
H_s : 발파 충격압에 의한 버력의 환산높이
H_g : 발파 가스압에 의한 버력의 환산높이

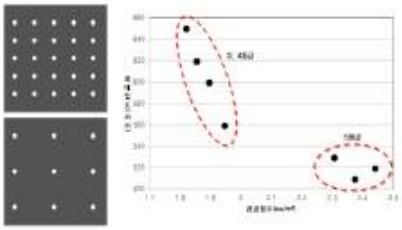




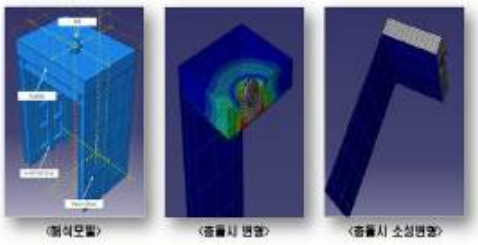


연구성과 3: 프로텍터 설계 및 제작기술 개발

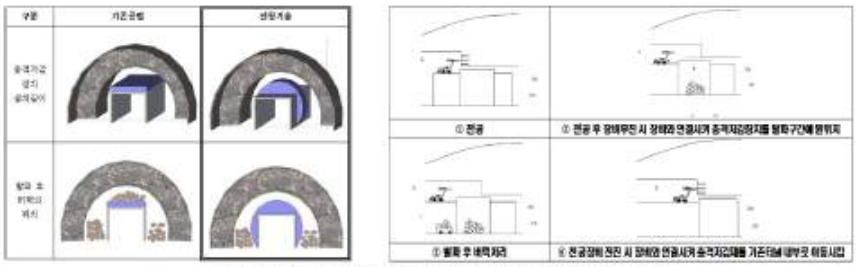
● 발파 버력의 충돌하중 저감기술 개발



〈발파설계 시 하중저감방안 제시〉



〈충돌하중 저감 탄성매트 필요두께 평가〉

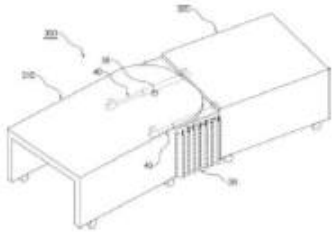


〈제안된 충격저감장치를 이용한 터널확대공법 제안〉

● 터널의 기하학적 조건을 고려한 가변형 및 굴절형 프로텍터 제작기술 제시



〈전단면 대응용 가변형 프로텍터〉



〈곡선터널을 위한 굴절형 프로텍터〉

5 기대효과 및 활용분야

- 통행차량 보호 및 프로텍터에 가해지는 하중을 고려한 설계제작 가이드 라인 제시
- 시간함수인 충돌하중에 대한 정량적이고 간편한 산정식 제시
- 터널단면 대응형 프로텍터로 모든 터널확대에 대응 가능
- 충돌하중을 저감하기 위해 발파와 프로텍터 설계 시 고려사항에 대한 가이드라인 제시
- 제안된 충격저감장치를 활용한 협소공간에서의 버력처리 효율 증진 및 충격저감 장치의 설치비용 최소화

연구성과 4: 프로텍터의 실대형 충돌실험

1 연구목표

- 프로텍터 설계 및 하중저감 기술 검증

2 연구내용

- 프로텍터 시작품 제작 및 운반성을 고려한 조립식 프로텍터 개발
- 실제 암석 충돌 시 프로텍터의 거동 및 하중분산특성 분석
- 제안된 탄성매트의 하중저감효과 분석

3 연구배경 및 필요성

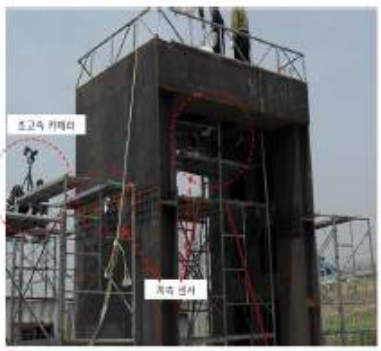
- 교통을 보존하기 위한 프로텍터의 실제 거동 분석 필요
- 경제적, 효율적 하중 및 소음 저감 방안 필요
- 실대형 낙석 충돌실험에 대한 연구 전무

4 국내·외 기술동향

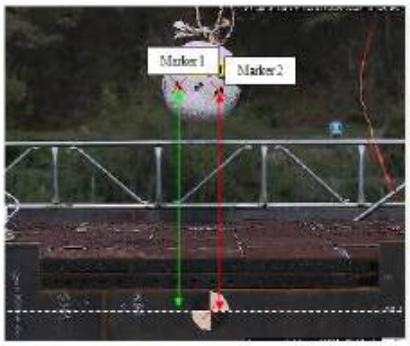
- 일본의 경우 낙석 방호시설에 대한 충돌실험 수행 사례 보유
- 충격저감재로서 모래 사용 및 충돌 시 방호시설의 거동 분석
- 국내의 경우 관련 연구 전무

5 연구성과

- 버력 충돌 시 프로텍터의 동적거동 분석

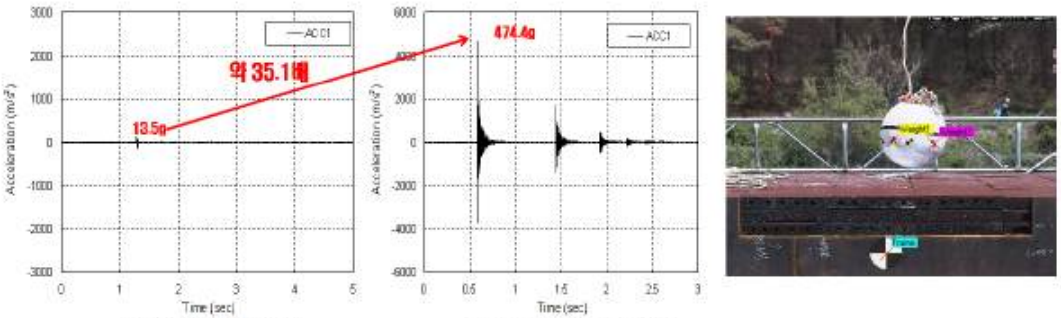






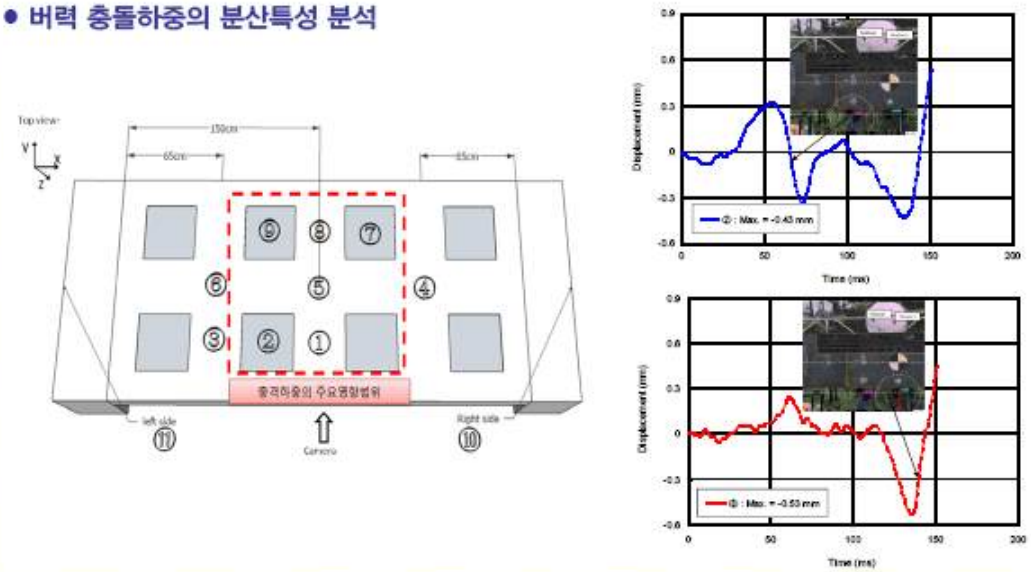
연구성과 4: 프로텍터의 실대형 충돌실험

● 제안된 탄성매트의 하중저감효과 분석



〈탄성매트 설치 시 가속도〉 〈탄성매트 미 설치 시 가속도〉

● 버력 충돌하중의 분산특성 분석



5 기대효과 및 활용분야

● 국내 최초 낙석의 실대형 충돌실험 수행으로 추후 유사 실험 시 가이드라인 제시

● 충돌하중 저감재의 저감효과 평가로 버력 충돌 시 안전성에 대한 신뢰도 증진 및 저감재 비용 최소화

● 충돌하중의 분산특성에 대한 실대형 실험 수행으로 발파굴착 대응형 프로텍터 설계 시 안전성과 경제성의 동시 확보 가능

연구성과 5: 협소공간에서 터널 시공장비의 운영성 분석

1 연구목표

- 운용중인 도로터널 단면확대 시공시 발생하는 협소환 공간에서 터널 시공장비의 운용성을 평가하여 확대터널 시공법의 시공성 평가

2 연구내용

- 국내외의 터널 확대단면 시공단면 수집
- 터널 시공장비 제원 수집 및 분석
- 국내 터널 확대단면에 대한 장비 운용성 3차원 시뮬레이션

3 연구배경 및 필요성

- 국내에서는 교통흐름을 유지한 터널의 확대시공사례가 전무함
- 해외의 시공사례 등을 분석하여 터널 시공공법의 시공성 평가가 필요함

4 국내·외 기술동향

- 일본에서는 교통흐름을 유치한 터널확대를 도로터널을 대상으로 40여회의 시공사례가 있으며, 이에 따른 시공법 개발이 이루어짐
- 유럽에서는 철도 및 도로터널을 대상으로 운용중인 터널 확대장비를 개발함



일본의 터널확대 시공전경





유럽의 철도터널확대 시공전경

국토해양부 | KICTEP 한국건설교통기술평가원 | KICT 한국건설기술연구원 | 대우건설 | 대원토질

연구성과 5: 협소공간에서 터널 시공장비의 운영성 분석

5 연구성과

- 국내 터널 확대단면 분석을 통하여 2차로 도로터널을 3차로 도로터널로 확대하는 경우에 대한 3차원 터널 시공장비 운용성을 평가한 결과, 굴착기는 소형화 되어야 함


〈굴착기(0.6m²) 시뮬레이션〉


〈굴착기(0.2m²) 시뮬레이션〉


〈크로라드릴 시뮬레이션〉


〈점보드릴 시뮬레이션 1〉


〈 점보드릴 시뮬레이션 2〉


〈보강전용장비 시뮬레이션〉

- 보강공법에 대한 시공성을 평가한 결과, 국내외에서 주로 적용되는 보강공법의 시공성은 대부분 문제가 없으나, 록볼트공법의 경우에는 경사 록볼트공법의 적용이 필요한 것으로 나타남







5 기대효과 및 활용분야

- 실제 터널 확대단면을 대상으로 실시한 3차원 시뮬레이션으로 장비 선택에 대한 가이드 라인 제시
- 향후 교통흐름을 유지한 터널확대 계획 시 시공장비 선정 및 공기선정 등에 대하여 발주처, 설계사 및 시공사에 가이드라인 제시

연구성과 5: 교통 흐름을 유지한 터널의 보강기술 개발

1 연구목표

- 운용중인 터널단면 확대공사시 발생하는 협소한 공간에서 지반보강공법 개발

2 연구내용

- 협소공간에서 시공되는 경사 록볼트의 보강효과 검증
- 협소공간에서 터널 안정성을 위한 요소공법 개발

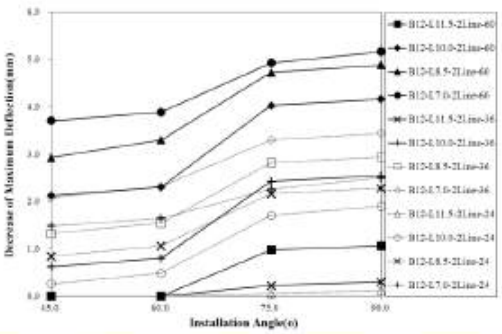
3 연구배경 및 필요성

- 협소공간에서는 경사 록볼트의 시공이 필요한 것으로 분석됨
- 국내외적으로 경사 록볼트의 보강효과에 대한 연구는 거의 전무함
- 교통흐름을 유지한 협소한 공간에서 터널 안정성 확보를 위한 보강공법 개발이 필요함

4 연구성과

- 록볼트의 설치각도 및 길이를 변화하며 111회의 모형시험을 실시
- 모형시험 결과, 효과적인 록볼트 타설각도는 90°~75°인 것으로 나타남
- 모형시험 결과를 이용하여 록볼트의 길이 및 설치간격 변화에 따른 경사 록볼트의 보강효과 검증

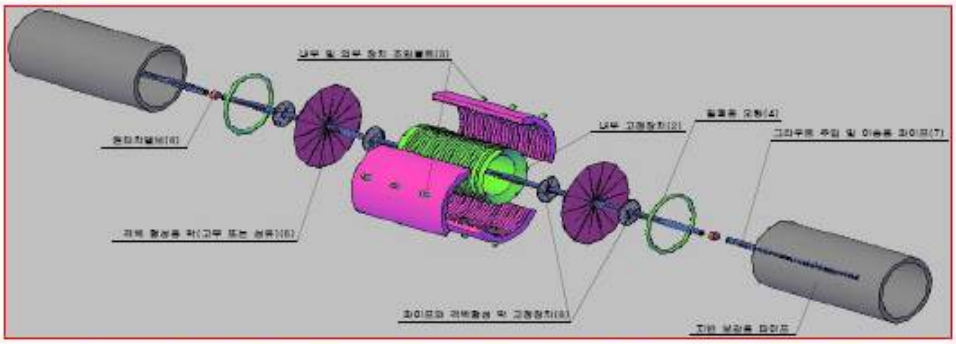




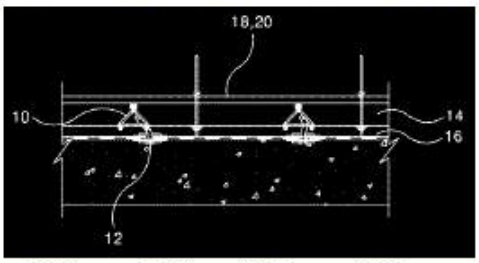
국토해양부 | KICTEP 한국건설교통기술평가원 | KICT 한국건설기술연구원 | 대우건설 | 대원토질

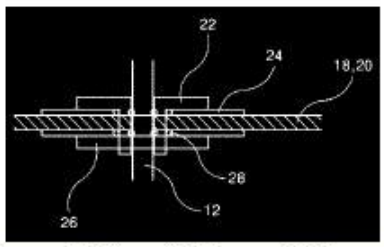
연구성과 6: 교통 흐름을 유지한 터널의 보강기술 개발

- 협소한 공간에서는 길이가 긴 보강재는 이음부가 발생하여 이에 따른 보강재의 강도 손실이 발생하는 문제점을 보완하는 길이가 짧은 보강재의 연결시 강도 손실이 발생하지 않는 보강공법 제시



- 교통흐름이 유지한 경우에는 터널 라이닝 채움 그라우팅은 통상적인 방법으로 시공이 불가능한 문제점이 있어 터널 지보재 시공 중 라이닝 배면 그라우팅이 가능한 장치를 설치하여 라이닝 배면 채움 그라우팅이 가능하게 하는 보강공법을 특허등록





5 기대효과 및 활용분야

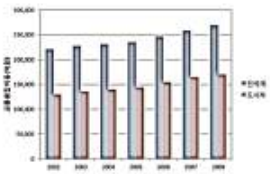
- 경사 록볼트의 보강효과를 확인한 모형시험결과는 교통류를 유지한 터널 확대단면 시공뿐만 아니라 피난연결통로 등의 대형화된 시공장비의 운용이 어려운 비교적 굴착단면의 크기가 작은 터널 시공 및 설계에서도 활용될 수 있음
- 길이가 짧은 보강재의 연결하는 보강공법은 비교적 굴착단면의 크기가 작은 터널 시공 및 설계에서도 활용될 수 있음
- 라이닝 채움 그라우팅 공법은 시공장비의 활용을 최소화한 친환경적인 공법으로 향후 터널 시공 및 설계에서도 활용될 수 있음

교통류 보존형 도심지 도로터널단면 확대 설계/시공 지침 및 매뉴얼(안)

목 차

1. 총칙 ····· 1
1.1 목적 ····· 1
1.2 적용범위 ····· 2
1.3 용어의 정의 ····· 2
1.4 관련법규, 규정 및 기준 ····· 5
2. 계획 ····· 7
2.1 계획일반 ····· 7
2.2 기본조사 ····· 9
2.3 터널확대의 유효성 검토 ····· 9
2.4 교통처리대책 검토 ····· 11
3. 조사 ····· 15
3.1 조사일반 ····· 15
3.2 조사흐름 및 조사계획 ····· 15
3.3 기존 자료조사 ····· 16
3.4 상세조사 ····· 17
3.5 시공 중 조사 ····· 18
4. 설계 ····· 19
4.1 설계일반 ····· 19
4.2 지반분류 ····· 21
4.3 확대단면 및 확대공법의 선정 ····· 21
4.4 굴착탕법의 선정 ····· 24
4.5 교통보호공(Protector) ····· 25
4.6 지보시스템 ····· 35
4.7 굴착보조공법 ····· 36
4.8 갱구의 설계 ····· 37
4.9 환기, 방재 및 조명설비 ····· 39
4.10 안전시설 ····· 40
5. 시공 ····· 41
5.1 시공일반 ····· 41
5.2 시공계획 ····· 41
5.3 굴착 ····· 44
5.4 교통보호공 ····· 48
5.5 지보재 설치 ····· 49
5.6 굴착보조공법 설치 ····· 50
5.7 환기, 조명 및 배수설비 ····· 50
5.8 안전시설 ····· 51
5.9 계측 ····· 52
부 록 ····· 54

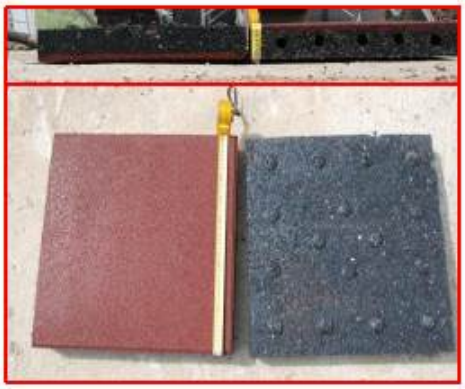




연구실적: 시제품 개발

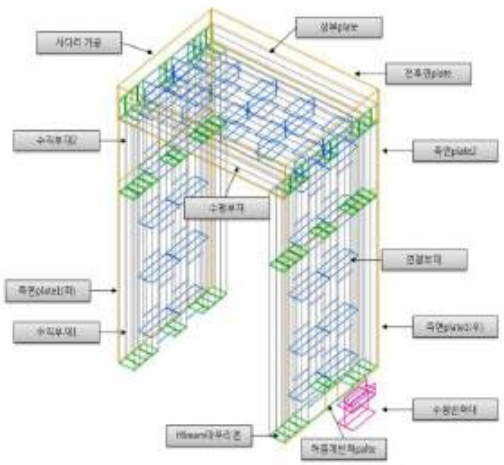
소음 및 충동하중 저감용 탄성매트

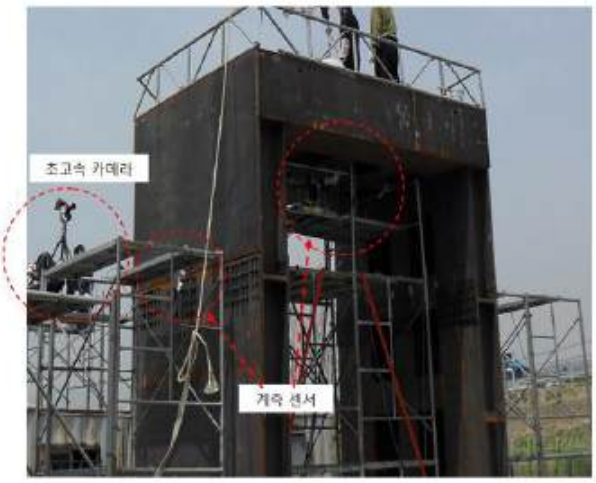
– 발파버력 프로텍터 충돌시 소음 및 충돌하중 저감





충격실험용 프로텍터





연구실적: 지적재산권

순번	특허명	출원번호 (등록번호)	출원일 (등록일)
1	그라우트 주입장 및 이를 이용한 지반 보강공법	10-2011-0132692 (10-1181468)	2011.12.12 (2012.09.04.)
2	강지보재와 주입관을 이용한 터널 라이닝 배면 그라우팅 방법	10-2011-0040730 (10-1104329)	2011.04.29 (2012.01.03.)
3	운영중 터널확대를 위한 터널단면 대응형 프로텍터	10-2011-0042923 (10-1063773)	2011.05.06 (2011.09.02)
4	소음 및 진동 저감형 터널 확대용 강재 프로텍터	10-2010-0059353 (10-1002402)	2010.06.23 (2010.12.13)
5	발파비산석 낙하지점 유도기능을 갖는 충격저감장치를 구비한 프로텍터 및 이를 이용한 운용중 터널확대공법	10-2011-0004143 (10-1028397)	2011.01.14. (2011.04.04.)
6	계측장치를 구비하는 프로텍터	10-2012-0080380 (10-1200917)	2012.07.24. (2012.11.07)
7	다단 연결 록볼트 이용 터널 확장 시공방법	10-2011-0051561	2011.05.30
8	굴절형 프로텍터 구조물 및 이를 이용한 터널 확장 시공방법	10-2011-0051815	2011.05.31







국토해양부 KICTEP 한국건설교통기술평가원 KICT 한국건설기술연구원 대우건설 대원토질

연구실적: 논문

학술지

순번	학술지명	논문명	게재일	비고
1	한국터널지하공간학회	발파버력의 재료거동이 프로텍터에 작용하는 충격하중에 미치는 영향	2011.05	일반
2	한국방재학회논문집	우산망 보강공법 보강재의 보강효과	2011.08	일반
3	한국지반공학회	노후터널의 운용중 터널확대시 지반종단변형특성에 관한 연구	2011.11	일반
4	대한토목학회논문집	경사볼트의 보강효과에 대한 모형시험 연구	2012.09	일반
5	한국터널지하공간학회	운영중 도로터널의 측벽하부 숏크리 보강에 의한 단면확대	2012.11	일반
6	한국터널지하공간학회	절리 암반터널 내 그라우팅 전후의 암반 투수계수 및 그라우팅 주입량과 Q 시스템 항목들과의 상관관계 연구	2012.11	일반
7	한국지반환경공학회	측벽부 숏크리트 보강에 의한 재래식 도로터널 단면확대	2012.12	일반

학술발표

순번	학술지명	논문명	발표일	비고
1	WTC 2010	Analyses and Recovery Execution In NATM Tunnel through Migmatite Fault Zone	2010.05	국외
2	WTC 2011	Evaluation of Impact force on the protector during the existing tunnel expansion by blast excavation	2011.05	국외
3	WTC 2012	Full-scale Impact test of a steel protector for existing tunnel enlargement	2012.05	국외
4	WTC 2012	SUPPORTING EFFECT OF INCLINED SYSTEM BOLTING AT THE TUNNEL IN COHESIONLESS GROUND	2012.05	국외
5	암반공학회	록볼트의 설치각도에 따른 보강효과의 수치해석적 연구	2010.03	국내
6	한국지반공학회	노후터널 확대 시 기존터널 지보재의 응력 변화에 대한 분석	2010.05	국내
7	한국지반공학회	발파에 의한 터널확대 굴착 시 교통처리를 위한 교통량 분석	2010.09	국내
8	대한토목학회	터널 발파 굴착 시 파쇄암의 최대입도분석에 대한 사례연구	2010.10	국내
9	암반공학회	터널확대 시 지반변형특성 분석	2011.09	국내
10	한국지반공학회	암반사면의 한계평형해석을 고려한 평사투영법 개발을 위한 기초연구	2012.10	국내

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.