



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

터널 숏크리트 급결제별 강도특성과 경제적인 배합비 제안

Strength Characteristic and Economical Mixing Ratio
Proposal by Tunnel Shotcrete Accelerators Type



2018년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

건설관리공학협동과정

진 창 덕

공 학 석 사 학 위 논 문

터널 숏크리트 급결제별 강도특성과
경제적인 배합비 제안

Strength Characteristic and Economical Mixing Ratio
Proposal by Tunnel Shotcrete Accelerators Type

지도교수 김 수 용

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2018년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

건설관리공학협동과정

진 창 덕

진창덕의 공학석사 학위논문을 인준함

2017년 12월 15일



주 심 농 학 박사 이 영 대 (인)

위 원 공 학 박사 김 수 용 (인)

위 원 공 학 박사 양 진 국 (인)

목 차

표 목차	ii
그림 목차	iv
Abstract	vi
제1장 서론	
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구방법 및 범위	2
제2장 문헌연구	
2.1 재료	3
2.2 배합설계에 대한 사례	12
2.3 시공장비	14
제3장 재료 및 시험	
3.1 재료	19
3.2 시험방법	24
3.3 시험배합	28
제4장 시험결과 및 고찰	
4.1 기존배합 및 고찰	32
4.2 개선된 배합 및 고찰	34
4.3 경제성분석	50
제5장 결론	52
참고문헌	53

표 목 차

표 2.1 급결제별 특성비교	4
표 2.2 급결제 일반 품질 기준(고속도로 건설공사 품질기준, 제16차 개정) ..	5
표 2.3 알칼리 프리계 급결제 품질기준	5
표 2.4 유동화제의 품질규정	8
표 2.5 유동화제의 작용기구 및 특징	9
표 2.6 광물질 혼화제의 물리적 성질	10
표 3.1 보통포틀랜드 시멘트(1종) 시방기준 및 결과	19
표 3.2 부순모래 시방기준 및 결과	20
표 3.3 자연사(해사) 시방기준 및 결과	20
표 3.4 굵은골재(10mm) 시방기준 및 결과	21
표 3.5 유동화제 시방기준 및 결과	22
표 3.6 급결제 시방기준 및 결과	23
표 3.7 강섬유 시방기준 및 결과	23
표 3.8 숯크리트 압축강도 기준(코아압축강도)	24
표 3.9 숯크리트 휨강도 기준	25
표 3.10 숯크리트 골재용 합성입도	28
표 3.11 혼합특성 (kg/m^3)	29
표 3.12 숯크리트 시험배합	31
표 4.1 기준배합표	32
표 4.2 기준배합의 실측강도(평균)	33
표 4.3 기준배합의 실측강도	35
표 4.4 압축강도 통계분석 (알칼리프리계, C: 460kg)	35
표 4.5 압축강도 통계분석 (시멘트광물계, C: 460kg)	35

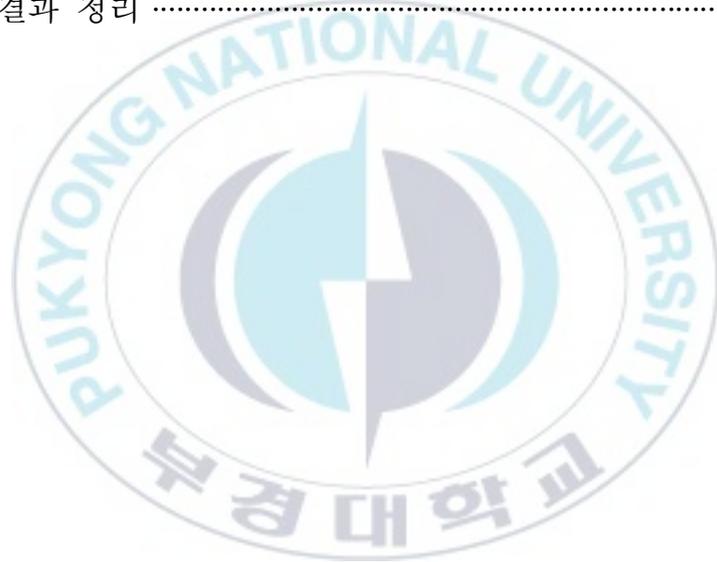
표 4.6 압축강도 시험결과	36
표 4.7 휨강도 통계분석 (알칼리프리계, C: 460kg)	38
표 4.8 휨강도 통계분석 (시멘트광물계, C: 460kg)	39
표 4.9 휨강도 시험결과	40
표 4.10 휨인성 시험결과	47
표 4.11 리바운드 시험결과	49
표 4.12 변경배합표	51
표 4.13 터널시공 단가	51
표 4.14 급결제 단가비교(시멘트 480kg일 경우)	51



그 립 목 차

그림 1.1 연구방법 흐름도	2
그림 2.1 에트린자이트 형성	6
그림 2.2 급결제별 응결시간 비교	6
그림 2.3 급결제별 숏크리트 압축강도 비교	6
그림 2.4 급결제별 숏크리트 휨강도 비교	6
그림 2.5 실리카폼의 휨강도 특성	11
그림 2.6 플라이애쉬의 휨강도 특성	11
그림 2.7 고로슬래그 미분말의 휨강도 특성	11
그림 2.8 최적배합의 휨강도 특성	11
그림 2.9 혼화제 사용량을 고정한 배합에서의 압축강도 및 휨인성 시험결과 ...	13
그림 2.10 시멘트 광물계 습식 숏크리트 시공장비	15
그림 2.11 시멘트 광물계 습식 숏크리트 시공시스템	15
그림 2.12 시공시스템의 인젝션링 및 Y자관	15
그림 2.13 시멘트 광물계 습식 숏크리트 시공 흐름도	16
그림 2.14 액상급결제 습식 숏크리트 시공장비	17
그림 2.15 액상급결제 습식 숏크리트 시공시스템	17
그림 2.16 급결제별 시공시스템	18
그림 3.1 하중-처짐 곡선	26
그림 3.2 리비운드 시험 개요도	27
그림 3.3 배합별 시험타설	30
그림 3.4 숏크리트 시험타설 전경	30
그림 3.5 코아채취	30
그림 3.6 실내 강도시험	30

그림 4.1 기존배합 실측강도 시험결과28	32
그림 4.2 압축강도 시험결과(알칼리프리계)	34
그림 4.3 압축강도 시험결과(시멘트광물계)	35
그림 4.4 휨강도 시험결과(알칼리프리계)	38
그림 4.5 휨강도 시험결과(시멘트광물계)	39
그림 4.6 휨인성 시험결과(알칼리프리계)	46
그림 4.7 휨인성 시험결과(시멘트광물계)	46
그림 4.8 리바운드율 시험결과(알칼리프리계)	46
그림 4.9 리바운드율 시험결과(시멘트광물계)	46
그림 4.10 시험결과 정리	50



Strength Characteristic and Economical Mixing Ratio Proposal by Tunnel Shotcrete Accelerators Type

Jin, Chang Deok

*Interdisciplinary Program of Construction Engineering and Management
Graduate School Pukyong National University*

Abstract

Since the 1980s, the NATM method(New austrian Tunneling Method) has been used in highway tunnels, subways, underground joints and so on. Since 1997, wet shotcrete has been applied to reduce rebound.

The types of accelerators for shotcrete used in domestic tunnels are aluminate system, alkali-free system, and cement mineral system. But, in this study, alkali - free and cement mineral systems, which are increasing in use, are used.

The purpose of this study is to analyze the shotcrete strength characteristics and to present an economical mixing ratio in the design of highway tunnels shotcrete using accelerator type and amount of cement as variables.

The specimens were produced at a standard mixing ratio of $480\text{kg}/\text{m}^3$ for the highway construction work. $460\text{kg}/\text{m}^3$ and $470\text{kg}/\text{m}^3$ were also prepared. The specimen was made of

shotcrete machine. The compressive strength, bending strength and flexural toughness test were carried out using specimens and the following conclusions were obtained.

The alkali-free system is advantageous in terms of environmental management, and the cement mineral system is advantageous in terms of strength. It was confirmed that these two types of accelerators can achieve the performance satisfying the specifications even when the standard cement amount of $480\text{kg}/\text{m}^3$ is reduced by $20\text{kg}/\text{m}^3$. This can reduce the cost of tunnel construction by 13,000,000 won per kilometer.

Also, it is suggested that a new design method reflecting the mechanical properties of high performance admixture development should be presented through more testing and verification.

Key Word : Shotcrete accelerator, Shotcrete strength characteristic, Economical mixing

제1장 서론

1.1 연구배경 및 목적

-shotcrete는 굴착면의 이완방지, 암괴의 전단 및 붕괴방지, 응력전달효과, 응력 집중 완화, 개구절리 봉합 등에 의하여 후속작업(지보재, 락볼트 등)이 원활하게 진행 되도록 지내력을 증대시키는데 사용되는 콘크리트의 일종이다.

1950년대 후반부터 NATM공법(New Austrian Tunnelling Method)이 적용되면서 광범위하게 사용 되었고 우리나라에서는 1980년대부터 서울 지하철 3,4호선을 시작으로 고속철도, 지하철, 도로터널, 지하공동구 등 많은 분야에 적용되어 왔다. 1996년까지는 대부분 건식공법으로 시공되었으나 1997년부터는 리바운드를 줄일 수 있는 실험적 요인이 입증된 습식 shotcrete공법이 활발히 적용되고 있다.(최 성 외 5인, 2012)

콘크리트시방서 및 각 발주청에서는 2009년부터 전체적으로 타설한 후 반발된 총량으로 한 반발률이 10~20%범위 이내로 관리하게끔 정해져 있다.

고속도로의 기준은 리바운드를 천정부 13%이내, 측벽부 10% 이내로 코아압축 강도를 $f_{28}=20\text{MPa}$ (잠정기준)로 관리하고 있으며 상기 기준을 만족하면서 최적의 성능과 원가절감을 기대할 수 있는 배합을 만들하고자 하였다.

shotcrete 배합에서 가장 중요한 재료인 급결제는 현재 사용량이 증가 추세에 있는 알칼리프리계(액상형)와 시멘트광물계(분말형)가 있다.

이 두 혼화제(급결제)와 시멘트량을 변수로 하여, 각각의 특성을 파악하고자 하였다. 현재의 shotcrete 표준배합(표)은 성능이 개선된 급결제의 특성을 적정하게 반영하지 않은 상태로 각 변수를 변화시켜 최적의 shotcrete 배합을 도출하고자 하였고 현장 시공사례를 중심으로 shotcrete 배합설계에서 혼화제(급결제)와 시멘트량에 따른 shotcrete 강도특성을 분석하여 경제적인 배합비를 제시하는데 본 연

구의 목적이 있다.

1.2 연구범위 및 방법

현재 터널공사에 사용되고 있는 숯크리트용 급결제의 종류는 알루미늄에이트계, 알칼리프리카, 시멘트광물계가 있으나 이중 현재 사용량이 많거나 점차 사용량이 증가 추세에 있는 알칼리프리카, 시멘트광물계를 각각 사용하였다.

시멘트량은 고속도로터널 표준배합에서 제시한 $480\text{kg}/\text{m}^3$ 을 기준으로 시멘트 사용량을 $470\text{kg}/\text{m}^3$, $460\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 감소시켜 강도 특성 등을 확인하였고 또, 유동화제는 최근 사용빈도가 높은 폴리카본산계를 사용하여 총 6종의 표본을 만들어 비교하고자 한다.



그림 1.1 연구방법 흐름도

제2장 문헌연구

2.1 재 료

2.1.1 급결제

급결제는 알칼리프리계 및 시멘트광물계 급결제를 사용하였다. 알칼리프리계 급결제는 약산성의 액상형으로 분진발생이 적고 저자극성으로 인체에 유해성이 비교적 적다.

시멘트광물계 급결제는 Calaium 알루미늄네이트 광물을 사용하는 급결제로 일본에서 개발된 후 1980년대 이후로 사용하기 시작해서 현재 가장 널리 사용되고 있다. 광물계 급결제 중 가장 뛰어난 급결력을 가진 것은 $C_{12}A_7$ 계로서 비정질의 상태가 결정질보다 급결력이 더 우수하므로 $C_{12}A_7$ 의 제조 시 용융물을 급 냉각하여 비정질화 하는 방향으로 제조하고 있다.

$C_{12}A_7$ 은 수화되면 C_2AH_8 과 C_4AH_x (x 는 19또는 13)의 혼합물을 생성하며, 카드 하우스상 구조를 형성한다. 그렇지만 시멘트와 섞으면 시멘트 중의 수산화칼슘 및 황산칼슘과 반응하여 에트린자이트($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)의 침상결정을 생성시켜 급결하게 된다. 수화초기에 생성된 에트린자이트는 시멘트의 수화를 저해시키지 않아 장기적으로 안정된 강도를 보인다. 광물계 급결제는 인체에 미치는 영향과 환경오염이 일반 시멘트와 비슷한 정도이고 콘크리트의 반죽질기 변화에 둔감해서 현장의 숏크리트 품질관리에 용이한 측면이 있다.

시멘트광물계 급결제는 분말상이기 때문에 기존 습식장비로는 타설할 수 없고 별도의 분말 공급장치를 사용해 Y자관으로 연결해서 시공한다.

급결제는 $C_{12}A_7$ 조성의 용융물에 물을 포함한 고압 공기로 급냉시켜 Glass상의 Bead를 만들고 불밀에서 분쇄한 비정질의 $C_{12}A_7$ 분말을 주성분으로 하는 알칼리 탄산염과 석고를 첨가하여 제조하였다.

급결제의 용량은 반발률을 되도록 적게 하고, 조기강도를 발현 할 수 있어야 하며 암반에 견고하게 부착되는 재료로 필요한 조기강도가 발현되는 동시에 장기강도

에 악영향이 없어야 한다. 또한 인체에 유해한 영향이 없어야 하고 강재를 부식시키지 않고, 용수가 있어도 양호한 효과를 발휘할 수 있어야 한다. 일반적으로 사용량이 적으면 응결이 늦고 그로인해 급결효과가 떨어져 리바운드 되는 양이 많고, 이와 반대로 사용량이 많으면 리바운드 되는 양은 적으나 장기강도가 저하된다.

표 2.1 급결제별 특성비교

구분	알루미늄네이트계 급결제	알칼리프리계 급결제	시멘트 광물계 급결제
인체영향 및 환경오염	* pH14 (강알칼리) * 피부 화상 및 부식 * 강염기성 용출수	* pH2-4(약산성) * 저자극성 * 분진발생이 적음	* pH10-12(약알칼리) * 저자극성 * 환경오염 적음
품질특성 및 시공성	* 장기강도 저하 * 시멘트 특성, 슬럼프에 민감	* 장기강도 보통 * 시공면 균일	* 장기강도 우수 * 재료특성에 둔감하여 품질관리 용이 * 용수부위 타설 용이
안전성 및 내구성	* 초기강도가 낮아 작업 안전성 불량 * 장기적 내구성 저하	* 인체에 대한 유해성이 적음 * 장기적 내구성 우수	* 초·중기강도가 높아 작업 안전성 우수 * 장기적 내구성 우수
경제성	* 급결제 사용량 7-10% * 리바운드 많음	* 급결제 사용량 5-10% * 리바운드 적음	* 급결제 사용량 4-6% * 리바운드 보통 * 공기단축 및 비용절감

※ 알칼리프리계 급결제는 수산화알루미늄을 주성분으로 하고 알루미늄네이트계 급결제는 가성소다를 주성분하며, 장기강도에 영향을 주는 수화반응이 알칼리프리계에 서 더 높게 나타나므로 장기강도면에서 좀 더 우수하다.

표 2.2 급결제 일반 품질 기준(고속도로 건설공사 품질기준, 제16차 개정)

항 목		기 준 값	비 고
압축강도	1일	9.0MPa	W/B=48.5% 이하 S/C =3.0 모르타르
	28일	기준모르터 강도대비 75% 이상	
응결시간	초결	5분 이내	W/B=50% 이하 페이스트
	종결	15분 이내	
고형분량	분말	기준값 ±4%	
	액상	기준값 대비 ±12%	

표 2.3 알칼리프리계 급결제 품질기준

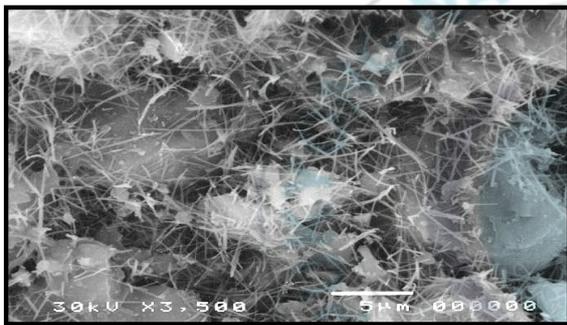
항 목	기 준 값	비 고
등가알칼리량(%)	1.0 이하	KS F 2560
pH의 범위	2.5~8	KS M 0011(25℃)
※ 일반품질기준 및 등가알칼리량, pH 기준을 준수		

숏크리트 성능을 결정하는 중요한 요소 중 하나인 급결제는 기존의 알루미늄계와 실리케이트계 급결제를 대체하는 환경오염, 강도, 품질이 우수한 새로운 종류의 급결제인 알칼리프리계와 시멘트 광물계 급결제에 대한 다수의 시공사례 및 검증이 이루어지고 있다.

알칼리프리계 급결제는 황산알루미늄과 같은 알루미늄염을 주성분으로 하는 급결제로서, 장기강도가 저하되지 않고, 인체에 대한 자극성이 적은 친환경적인 제품으로, 액상이기 때문에 기존의 장비를 이용할 수 있다는 장점이 있으나 초결이 느린 편이고, 비교적 높은 단가와 급결제 탱크, 압송펌프, 압송관 등에서 부식방지를 위

한 재료의 사용이 요구되는 단점이 있다.(한국콘크리트학회 논문집 제17권3호, 2005)

시멘트광물계 급결제에는 $C_{12}A_7$ 계, $C_{12}A_7 \cdot CaF_2$ 계 및 CSA계가 있는데, $C_{12}A_7$ 계가 급결력이 뛰어나 많이 사용되고 있고, 시멘트 광물을 주체로 하기 때문에 인체에 해가 적으며 초기 수화물로 다량의 에트린자이트(ettringite)가 형성되는 특징으로 인해 초기 반응성이 높아 지수성 및 부착성이 뛰어날 뿐만 아니라 장기적으로도 안정된 수화반응이 진행되어 고강도를 나타내는 성질이 있다. 또한 시멘트와 흡사한 PH특성과 자극성을 나타내고 있어 환경오염 및 유해성이 비교적 적고, 분말이므로 콘크리트의 슬럼프 변화에 미치는 영향이 적어 현장에서 숏크리트 품질관리가 용이하나, 현재 국내의 숏크리트 타설 장비가 대부분 액상용이므로 분말용의 숏크리트 타설 장비가 별도로 필요한 단점이 있다.



(수화 1시간 후, SEM 3,500배관찰)

그림 2.1 에트린자이트 형성

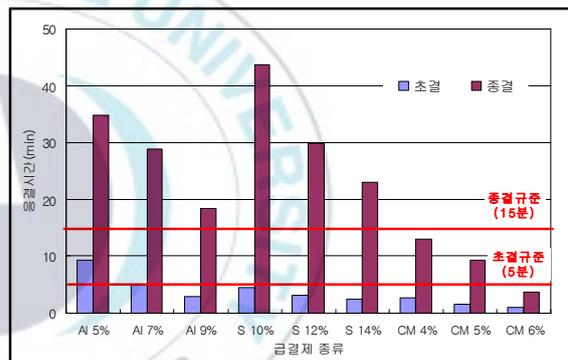


그림 2.2 급결제별 응결시간 비교

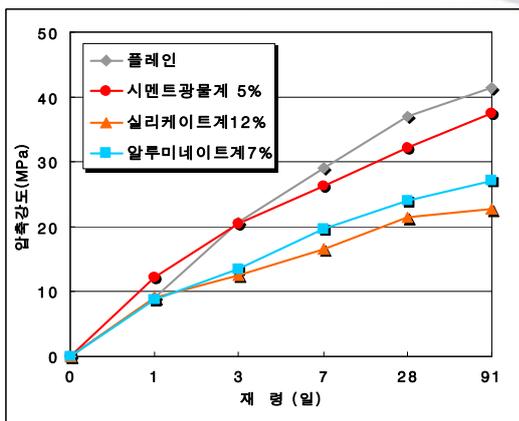


그림 2.3 급결제별 숏크리트 압축강도 비교

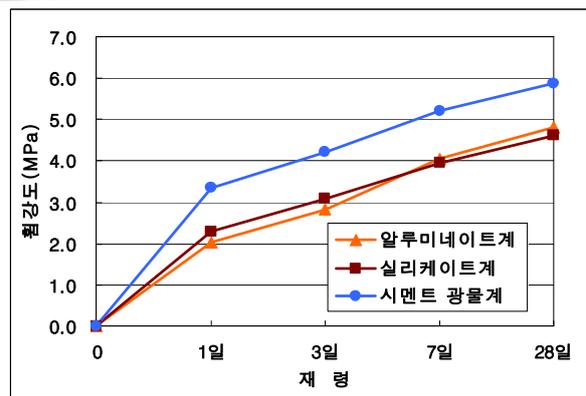


그림 2.4 급결제별 숏크리트 휨강도 비교

2.1.2 유동화제

유동화제는 시멘트 입자의 분산성능이 뛰어나 감수성능이 우수한 혼화제이다. 특히 일반감수제와 비교하여 우수한 감수성능은 물론이고, 비교적 과량 사용하여도 응결지연 및 과도한 공기연행, 강도저하 등 나쁜 영향이 없다는 것이 특징이다.

유동화제를 개발 및 사용하게 된 세계적인 배경은 1960년대 후반 이후부터 펌프 공법을 주로 사용했는데, 이 경우는 시멘트량을 많이 하고, 잔골재율을 크게하여 콘크리트의 펌핑성을 높이도록 배합하게 되면서 필연적으로 단위수량이 증가 되었으며, 또한 골재의 품질도 악화되면서 콘크리트의 품질저하가 매우 심각하게 되었다. 이에 따라 콘크리트의 품질을 확보하기 위해서는 된반죽 콘크리트의 필요성이 크게 증대되었지만, 시공성을 저해하는 문제점이 발생되었다.

이러한 상황에서 콘크리트용 혼화제로서 종래의 감수제에 비해 다량사용이 가능하면서도 한층 높은 감수효과를 갖도록 할 수 있는 유동화제가 독일에서는 멜라민계로 일본에서는 나프탈렌계를 필두로 하여 세계 각국에서 개발 및 활용되기 시작하였으며, 1970년대부터는 본격적인 실용화 단계로 접어들기에 이르렀다.

표 2.4 유동화제의 품질규정

항목		유동화제의 종류	표준형	지연형
시험항목	슬럼프 (mm)	베이스콘크리트	80±10	
		유동화콘크리트	200±10	
	공기량 (%)	베이스콘크리트	4.5±0.5	
		유동화콘크리트	4.5±0.5	
블리딩량의 차(mm ³ /mm ²)			1이하	2이하
응결시간의 차 (분)	초 결	-30 ~ +90	-60 ~ +120	
	중 결	-30 ~ +90	+210 이 하	
시간에 따른(15분) 슬럼프 감소량 (mm)			40 이하	40 이하
시간에 따른(15분) 공기량의 감소(%)			1.0 이하	1.0이하
압축강도비(%)	재령 3일	90이상	90이상	
	재령 7일	90이상	90이상	
	재령 28일	90이상	90이상	
길이변화비(%)			120이하	120이하
동결융해에 대한 저항성(1) (상대동탄성계수비 %)			90이상	90이상

그러나 우리나라의 경우는 1980년대부터 학계 및 업계에 소개 및 보급되기에 이르렀다.

고성능감수제 · 유동화제의 품질규격은 한국콘크리트학회의 경우 KCI-AD101 (콘

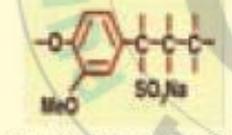
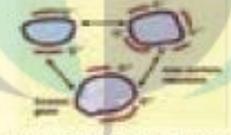
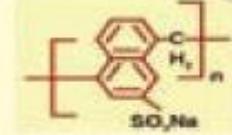
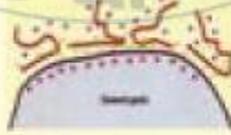
크리트용 유동화제 품질규격)로 표2.4과 같이 규정하고 있다.

고성능감수제의 종류로는 영국의 시멘트 콘크리트 협회(CCA)의 보고서에 의하면 다음 4가지의 범주로 분류된다.

- ① 폴리알킬아릴 술포산염계(나프탈렌술포산염계)
- ② 멜라민 포르말린수지 술포산염계
- ③ 방향족 다환축합물 술포산염계
- ④ 기타

상기중 일반적으로 시판되는 것은 ①,②에 관한 것으로 약칭하여 나프탈렌계, 멜라민계로 불려지며 또 최근에는 폴리카본산계를 많이 사용하는 추세이다. 경우에 따라서는 감수제로 사용되는 리그닌 술포산염(약칭 리그닌계)도 유동화제에 포함시키기도 한다. 따라서 각 유동화제의 특징을 정리하면 표2.5과 같다.

표 2.5 유동화제의 작용기구 및 특징

구분	작용 기구	특징
리그닌계	 [리그닌 술포산염 축합물의 화학구조]  [리그닌 술포산염 축합물의 분산기구]	<ul style="list-style-type: none"> · 저조용이, 가격 저렴 · 지체 공기포를 함유 · 저장시 분리현상 · 고강도 저조 곤란 · 다량사용 시 경화불량
나프탈렌계	 [나프탈렌 술포산염 축합물의 화학구조]  [나프탈렌 술포산염 축합물의 분산기구]	<ul style="list-style-type: none"> · 분산성 우수 · 화학적으로 매우 안정 · 고강도 발현 용이 · 지체 공기포 함유없음 · 응해도 저장성 우수 · 첨가제 활용이 용이 · 슬럼프 로스가 큼
멜라민계	 [멜라민 술포산염 축합물의 화학구조]  [멜라민 술포산염 축합물의 분산기구]	<ul style="list-style-type: none"> · 화학적으로 매우 안정 · 분산성이 우수 · 응결시간이 약간 빠름 · 지체공기포 함유없음 · 슬럼프 로스가 심함

나프탈렌계 및 멜라민계 유동화제는 일반적인 감수제와 동일하게 음전하에 의한 정전기적 반발력에 기인하나 보다 높은 분자량(n개의 긴 Chain 구조)에 의한 물리적인 분산효과로 감수제보다 더 큰 감수율을 나타내게 된다.

또한 리그닌계의 경우는 당류함유에 의한 응결지연성 때문에 0.3%이하의 사용량을 권장하였으나 최근에는 초미세여과에 의해 응결지연 성분 제거 기술 도입으로 기존 리그닌계 혼화제의 사용량보다 사용량증대가 가능해짐에 따라 유동화제로까지 확대 이용되고 있다.("고성능감수제·유동화제" 월간 레미콘 아스콘 골재 2015)

2.1.3 혼화제

혼화제는 혼화재료 중 사용량이 비교적 많아서 그 자체의 부피가 콘크리트의 배합계산에 관계되는 혼화재료를 말하며 플라이애시(이하 FA라 칭함), 고로슬래그(이하 SG라 칭함), 실리카폼(이하 SF라 칭함) 등이 이에 해당한다. 물리적 성질은 표 2.6에 나타내었다.

표 2.6 광물질 혼화제의 물리적 성질

분 류	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O	K ₂ O	Fineness(cm ² /g)
SF	91.2	1.3	0.8	0.7	0.3	-	0.47	0.84	204,700
FA	56.4	-	-	-	-	-	-	-	3,317
SG	33	14.24	0.3	41.4	6.14	3.36	-	-	4,880

숏크리트는 구조특성상 압축력과 함께 휨에 대한 저항성을 많이 필요로 한다. 따라서 휨에 대한 저항성을 알아보기 위하여 휨강도를 측정한 결과 그림 2.5에서 그림 2.8과 같은 결과를 확인 할 수 있었다.

압축강도와 같이 SF를 혼입한 숏크리트의 휨강도가 가장 높게 측정되었으며, 포졸란 반응이 늦게 나타나는 FA와 SG의 경우는 초기에 OPC보다 낮은 값을 나타내는 것으로 확인 되었다.

그림 2.5는 SF의 혼입률에 따른 휨강도의 특성을 나타낸 것으로 10%의 혼입률에

서 높은 강도를 나타내었다.

그림 2.6은 FA를 혼입한 휨강도 측정결과로서 FA-15와 FA-30은 목표 휨강도를 만족하였지만 FA-45의 경우는 재령 28일에서도 만족하지 못하는 결과를 보였다. SG를 사용한 숏크리트의 휨강도를 나타낸 그림 2.7에서 보는 것과 같이 초기 휨강도는 OPC보다 낮지만 재령 28일 후에는 SG-35는 높은 휨강도를 나타냈고, SG-50과 SG-65 모두 목표 휨강도를 만족하는 결과를 얻는 것을 알 수 있었다.

광물질 혼화재를 혼입한 배합중 최적배합의 휨강도 특성을 그림 2.8에 나타내었다. 휨강도는 SF-10, FA-15, SG-35 순으로 나타났으며, 이는 분말도가 높은 SF가 콘크리트 내부를 밀실하게 충전하였기 때문으로 보이며, 숏크리트의 품질향상을 위한 광물질 혼화재를 사용한 결과 SF를 사용한 배합이 가장 좋은 결과를 나타내었지만 앞으로 내구성과 경제성을 고려한 배합이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

광물질 혼화재의 혼입률 변화에 따른 숏크리트의 휨강도 특성은 다음과 같았다.

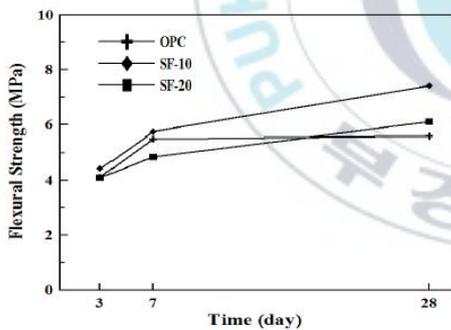


그림 2.5 실리카폼의 휨강도 특성

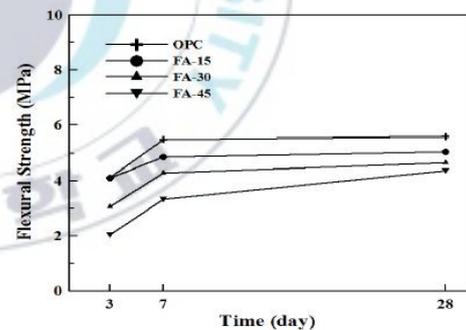


그림 2.6 플라이애쉬의 휨강도 특성

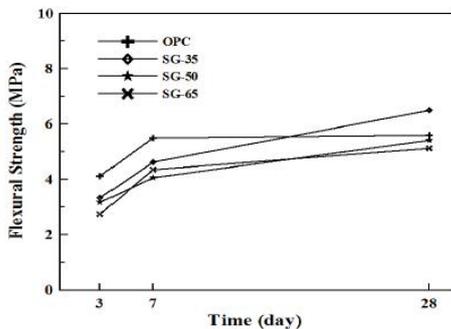


그림 2.7 고로슬래그 미분말의 휨강도 특성

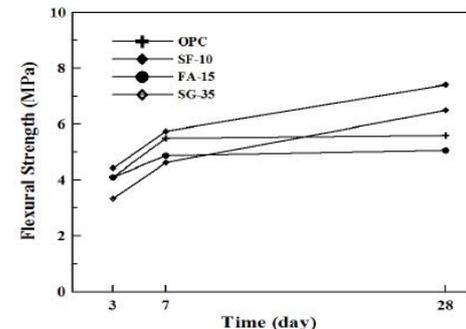


그림 2.8 최적배합의 휨강도 특성

휨에 대한 저항성을 알아보기 위해 휨강도를 측정한 결과 전반적으로 압축강도와 비슷한 경향을 보였으며, SF-10이 가장 높은 측정값을 나타내는 것을 알 수 있었다.

광물질 혼화재의 종류 및 혼입률에 따른 강도특성을 비교한 결과 SF의 강도가 큰 결과를 얻었다. 하지만, 경제적인 측면에서 가격이 SF의 약5% 정도 수준인 SG를 혼입한 배합의 강도특성이 시간이 경과함에 따라 OPC에 가까워지는 것으로 나타나므로 추후 광물질 혼화재에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.(김성수의 5명성 연구")

2.2 배합설계에 대한 사례(이상돈의 2명, 2016)

고속도로 터널에 적용중인 숯크리트 기준 배합은 2000년대 초반 강도 증가를 목적으로 단위결합재량만을 과다하게 늘린 현장배합에 기반하고 있으며, 숯크리트 휨인성을 발휘하는 데 중요한 강섬유의 성능 및 혼입량은 이전보다 낮아지고 있다. 이 연구에서는 현행 시방기준과 숯크리트의 특성에 맞게 배합설계를 개선하기 위하여 단위결합재량을 현재 기준인 $480\text{kg}/\text{m}^3$ 부터 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 까지 변화시키면서 실내시험을 실시하였다.

강섬유의 성능 및 혼입률에 따른 숯크리트 휨 성능을 확인하기 위해서는 일반 강섬유와 고인장강도 강섬유의 성분을 분석하고, 강섬유 자체의 인장강도를 측정하였으며, 강섬유 투입량을 변화시키면서 숯크리트 성능시험을 실시하였다. 단위결합재량을 현행보다 줄이면서 배합 실험을 한 결과, 단위결합재량을 $420\sim 440\text{kg}/\text{m}^3$ 까지 줄이더라도 숯크리트 성능을 발휘 하는 데에는 별 다른 문제가 없는 것으로 확인되었다.

상기와 같이 시멘트량에 따른 배합설계 연구는 기존에도 있었지만 단순히 시멘트량만 줄여서 시험한 거였고 본 연구는 시공사례를 바탕으로 성능이 향상된 급결제를 사용하여 배합을 시행하였다.

숯크리트의 배합을 개선하기 위해 우선 2가지 방향에서 적정 결합재량을 찾고자

하였는데, 먼저 물-결합재비를 현재의 기준값인 44%로 고정한 상태에서 단위시멘트량을 480kg/m³에서 400kg/m³까지 20kg/m³씩 단계적으로 감소시켜 콘크리트시료를 제작한 다음, 압축강도 및 휨인성 등을 분석하였다. 다른 한편으로는 터널 현장에서의 배합특성 및 적용성을 감안하여 혼화제(고성능 감수제)사용량을 1%로 고정한 상태에서 단위시멘트량 변화에 따른 콘크리트 시료를 제작 하였는데, 2가지 방향의 배합에서 골재 입도 및 강섬유는 기존규정에 적합한 것을 사용하였다.

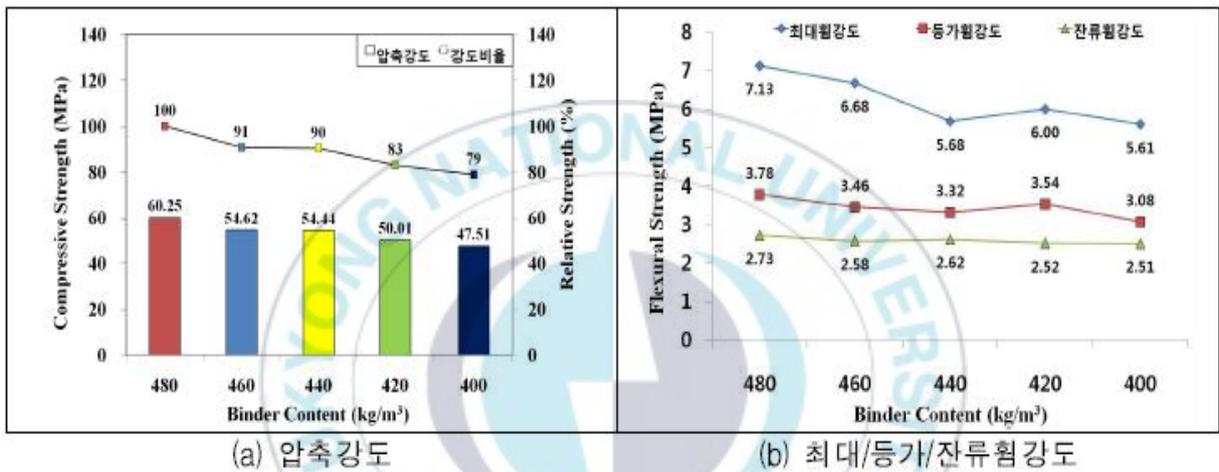


그림 2.9 혼화제 사용량을 고정한 배합에서의 압축강도 및 휨인성 시험결과

그림 2.9 혼화제 사용량을 고정한 배합에서의 압축강도 및 휨인성 시험결과 일정 수준 이상의 단위시멘트량을 사용할 경우 강도는 결합재량보다는 -결합재비에 좌우된다는 기존 연구결과와도 어느 정도 일치하는 결과이다.

고성능 감수제 사용량을 1%로 고정한 후 단위시멘트량을 감소시킨 배합에서의 시험결과는 그림 2.9에 제시되어 있다.

감수제 사용량을 고정하였기 때문에 단위시멘트량을 줄임에 따라 물-결합재비는 증가하는데, 물-결합재비가 50%이고 단위시멘트량이 400kg/m³인 배합에서도 압축강도와 휨강도가 높은 수준을 나타내 단위시멘트량이 과다함을 보여주고 있다.

높은 배합강도와 달리 휨인성은 낮은 수준인데, 10가지 배합 모두에서 증가/최대 휨강도비는 60% 미만, 잔류/최대휨강도비는40% 전후로 나타나 강섬유 함량이나 성능 개선이 필요함을 알 수 있다.

본 연구에서는 과거 슛크리트 배합설계시 고려되지 않은 강도상의 중요한요소인 급결제 종류를 바탕으로 강도특성과 시공성 등을 현장 시공사례를 바탕으로 한 경제적인 배합을 찾고자 하였다.

2.3 시공장비

2.3.1 복합 에어인젝션

컴프레샤 및 슛크리트 장비를 가동하여 준비 후 공기의 압축력을 조절하여 최적의 조건으로 한 후 시공현장의 슛크리트 배치플랜트에서 생산한 슛크리트를 시공장비에 투입하여 펌프를 작동시킨 후 급결제 투입밸브를 열어 노즐로 부터 슛크리트를 분사하면 된다.

기존의 액상급결제로 시공하는 시파 장비로는 분말상인 시멘트광물계 급결제를 정량적으로 이송하는 것은 불가능하여 별도의 분말공급 장치가 필요하다. 이를 위해 시공장비 시스템은 <그림2.10><그림2.11>와 같이 정량적으로 분말을 공급하는 장치를 사용하여 급결제를 콘크리트에 투입하는 Y자관의 전·후단에 <그림2.12>와 같은 공기투입 및 와류형성이 가능한 인젝션고리를 결합해 Y자관의 압력을 감소시켜서 많은 양을 타설하는 조건에서 급결제의 투입과 혼합이 용이토록 하였다. 이 장비는 각각의 부분에 걸리는 압력을 조정함으로써 기존 타설 장비의 문제점으로 지적된 맥동현상을 확연히 감소시켜 균일한 슛크리트의 시공 및 품질을 유지하는 것이 가능했다.



그림 2.10 시멘트 광물계 습식 슛크리트 시공장비

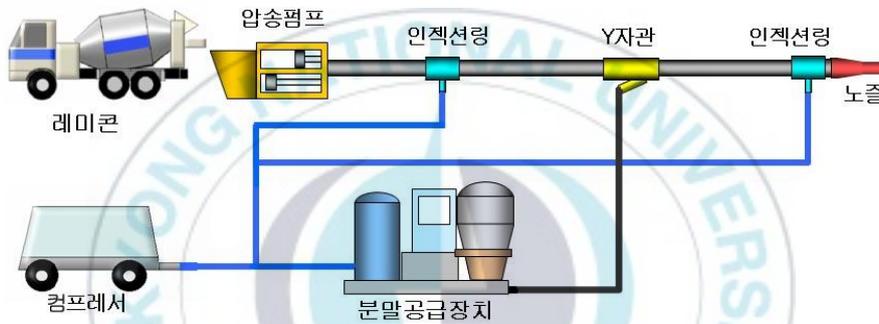


그림 2.11 시멘트 광물계 습식 슛크리트 시공시스템

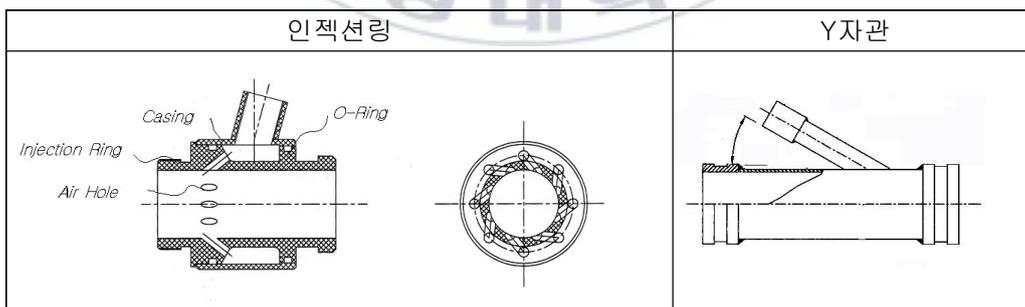


그림 2.12 시공시스템의 인젝션링 및 Y자관

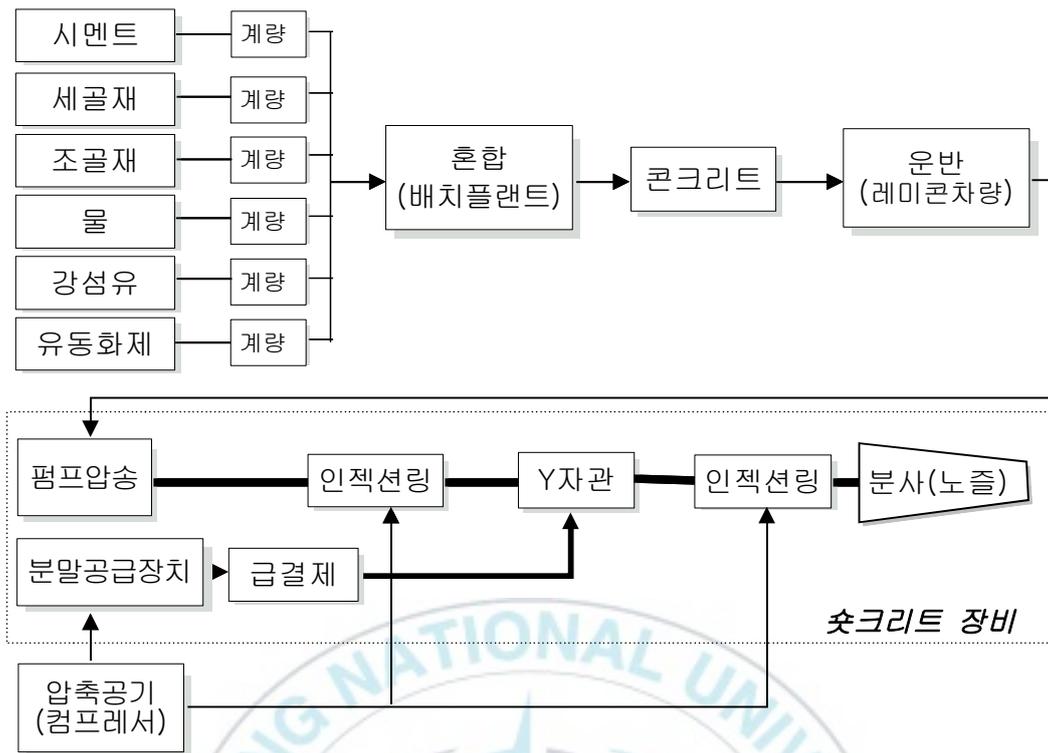


그림 2.13 시멘트 광물계 습식-shotcrete 시공흐름도

2.3.2 시파(CIFA)

액상형 급결제를 습식 shotcrete에 사용할 때 믹싱챔버를 사용하여 급결제가 콘크리트 또는 몰탈과 충분히 혼합 될 수 있도록 하며, 분사용 압축공기가 노즐 부위에서 별도로 분산 투입되어 콘크리트가 이송되는 연결관의 마모를 방지할 수 있도록 해준다. 이 장치는 압축공기와 급결제가 선택적으로 유입되는 투입관에 연결된 믹싱챔버가 노즐로부터 적절한 거리를 두고 위치한다. 노즐과 믹싱챔버를 연결관으로 연결하여 믹싱챔버에서 액상 급결제를 콘크리트 또는 몰탈에 투입하여 혼합하고, 분사용 압축공기를 노즐 부위에서 투입하여 급결제와 콘크리트 혼합물을 분사한다.

이 방법은 급결제와 몰탈 또는 콘크리트가 믹싱챔버에 투입되므로 혼합이 용이하고, 노즐부위에서 분사용 압축공기를 투입하기 때문에 믹싱챔버와 노즐 사이에 과도한 이송압력이 작용하지 않으므로 믹싱챔버와 노즐 사이의 연결관이 마모되는 것을 방지할 수 있다.



그림 2.14 액상급결제 습식 슷크리트 시공장비

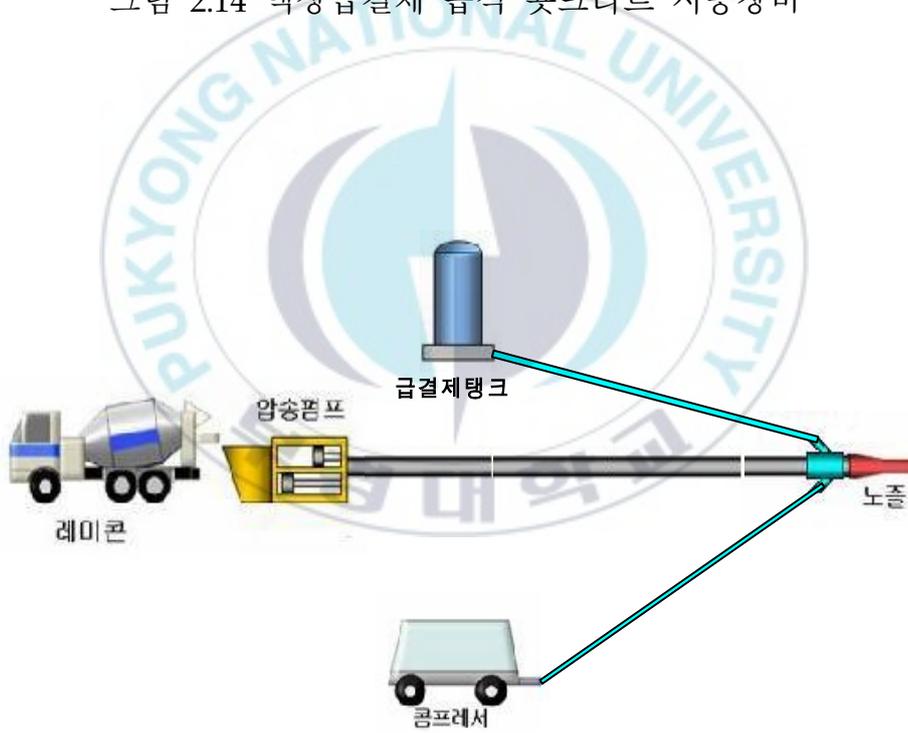
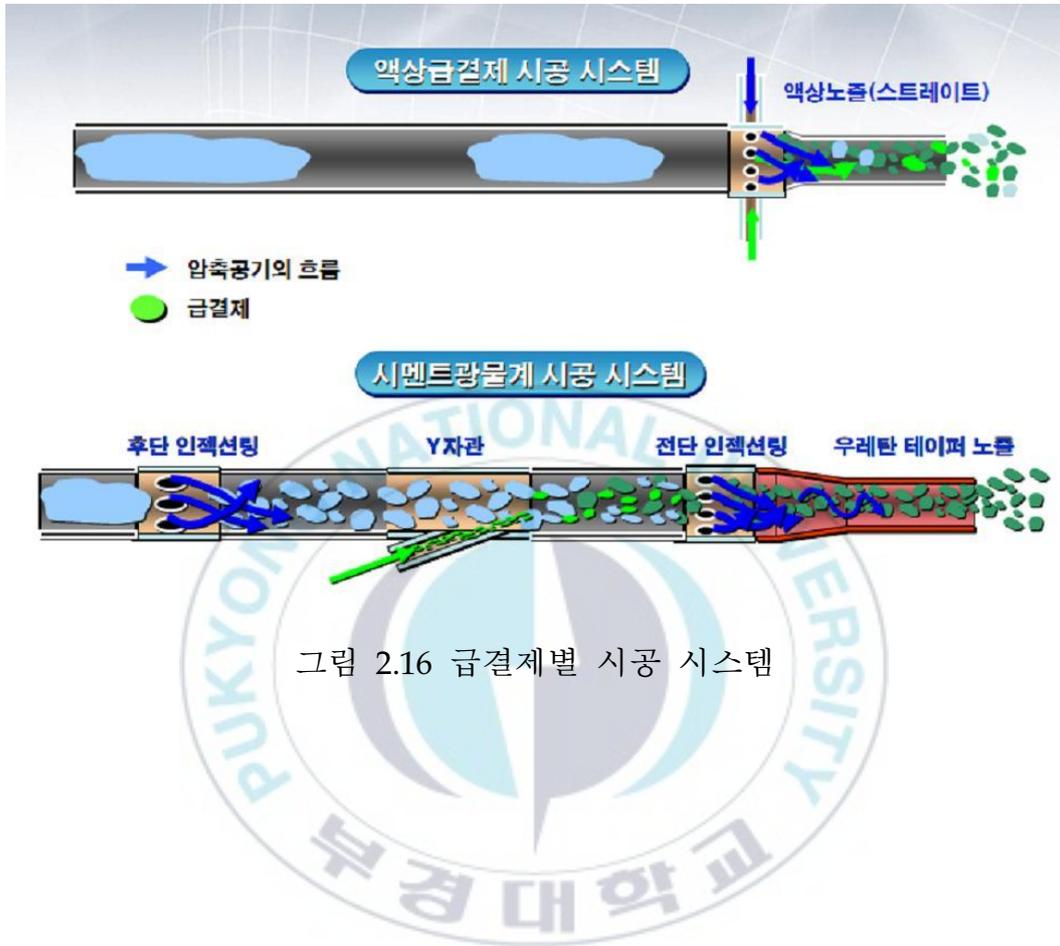


그림 2.15 액상급결제 습식 슷크리트 시공시스템



제3장 재료 및 시험

3.1 재 료

3.1.1 시멘트

시멘트는 일반적으로 널리 사용되는 KS L 5201(시멘트)의 기준에 적합한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

표 3.1 보통포틀랜드 시멘트(1종) 시방기준 및 결과

자재명	시험항목		단위	시방기준	시험결과	비고
시멘트	압축강도	3일	MPa	12.5이상	26.9	
		7일	MPa	22.5이상	38.5	
		28일	MPa	42.5이상	56.8	
	분말도		cm ³ /g	2,800이상	3,415	
	안정도		%	0.8이하	0.15	
	응결시간(초결)		분	60이상	225	
	응결시간(종결)		시간	10이하	5:30	
	MgO		%	5.0이하	2.70	
	SO ₃		%	3.5이하	2.30	
	강열감량		%	3.0이하	1.60	

3.1.2 골재

1) 잔골재

콘크리트 표준시방서의 잔골재 품질 기준을 만족하는 것으로 체적비로 자연사(해사)50%와 부순모래50%를 섞어 조립률이 2.58이고, 밀도 2.58g/cm³, 흡수율 1.33%인 혼합사를 사용하였다.

표 3.2 부순모래 시방기준 및 결과

자재명	시험항목	단위	시방기준	시험결과	비고
부순모래	최대건조밀도	kg/m ³	2,500이상	2,600	
	흡수율	%	3.0이하	1.49	
	안정성	%	10이하	2.9	
	0.08mm체통과량	%	4이하	2.2	
	입자모양판정실적률	%	55이상	57.1	
	알카리골재반응시험	%	팽창률0.1%미만	0.07	
	동결융해저항성시험	%	80%이상(300 Cycle적용시)	90	

표 3.3 자연사(해사) 시방기준 및 결과

자재명	시험항목	단위	시방기준	시험결과	비고
자연사(해사)	점토덩어리	%	1.0이하	시험불가	
	0.08mm체 통과량	%	콘크리트의 표면이 마모작용을 받는 경우 2.0이하 기타의 경우 5.0이하	1.5	
	염화물	%	0.04이하	0.003	
	유기불순물	-	표준색보다연할것	표준색보다 연함	
	표면건조포화상태밀도	g/cm ³	-	2.58	
	절대건조상태밀도	g/cm ³	2.5이상	2.55	
	흡수율	%	3.0이하	1.12	
	안정성(Na ₂ SO ₄)	%	10이하	2.9	
	경량편[석탄 및 갈탄]	%	콘크리트외관이 중요할 경우 0.5이하 기타의 경우 1.0이하	0.00	

2) 굵은골재

콘크리트 표준시방서의 굵은골재 품질을 만족하며, 입도는 슛크리트의 규격에 적합한 10mm이하이고, 밀도 2.66g/cm³, 흡수율 0.89%인 부순골재를 사용하였다.

표 3.4 굵은골재(10mm) 시방기준 및 결과

자재명	시험항목	단위	시방기준	시험결과	비고
굵은골재 (10mm)	점토덩어리	%	0.25이하	0.10	
	0.08mm체 통과량	%	1.0이하	0.45	
	흡수율	%	3.0이하	0.89	
	단위용적질량	kg/L	1.5이상	1.56	
	표면건조포화상태밀도	g/cm ³	-	2.68	
	겉대건조상태밀도	g/cm ³	2.5이상	2.66	
	입자모양판정실적율	%	55이하	58.7	
	마모율	%	40이하	14.1	
	안정성	%	12이하	4.52	

3.1.3 유동화제

고속도로 건설재료 품질기준(16차개정)을 만족하는 유동화제를 사용하였다.

표 3.5 유동화제 시방기준 및 결과

자재명	시험항목	단위	시방기준	시험결과	비고	
유동화제	블리딩량의차	mm ² /mm ³	1이하	0.24		
	응결시간(초결)	min	-30~+90	+30		
	응결시간(중결)	min	-30~+90	+40		
	압축강도비(3일)	%	90이상	96		
	압축강도비(7일)	%	90이상	97		
	압축강도비(28일)	%	90이상	99		
	길이변화비	%	120이하	102		
	동결융해 저항성	%	90이상	97		
	슬럼프	베이스	mm	80±10	90	
		유동화		200±10	195	
	공기량	베이스	%	6.0±0.5	5.8	
		유동화		6.0±0.5	5.6	
		전체알카리량	%	0.3이하	0.06	

3.1.4 급결제

고속도로 건설재료 품질기준(16차개정)을 만족하는 급결제를 사용하였다.

표 3.6 급결제 시방기준 및 결과

자재명	시험항목		단위	시방기준	시험결과	비고
급결제	압축강도	1일	MPa	9.0MPa이상	10.1	
		28일		기준모르터 강도대비75%이상	33.8	
	응결시간	초결	분	5분 이내	4분22초	
		종결		15분 이내	13분29초	
	고형분량		%	기준값 ±4%	99.5%	

3.1.5 강섬유

고속도로 건설재료 품질기준(16차개정)을 만족하는 강섬유를 사용하였다.

표 3.7 강섬유 시방기준 및 결과

자재명	시험항목		단위	시방기준	시험결과	비고
강섬유	규격		-	0.5×30 mm [재질 : 선재(wire)]	이상없음	
	인장강도		MPa	70 kgf/mm ² (686 MPa) 이상	1104	
	굽힘강도		-	이상 없을 것 (90°방향)	이상없음	
	형상계수		-	60 이상	60.8	
	허용 오차	직경	%	-측 : 관계없음, +측 : 2 % 이내	0.49	
		길이		-측 : 2 % 이내, +측 : 관계없음	30.1	

3.2 시험방법

3.2.1 압축강도시험

1) 시험개요

동일한 시멘트, 골재, 혼화제에 급결제만 알칼리프리계 및 시멘트광물계를 사용하여 압축강도, 휨강도, 리바운드시험을 실시하여 설계기준강도를 만족하면서 리바운드가 최소가 되는 배합을 찾고자 하였다.

물-시멘트비를 각각의 배합에 맞게 고정시키고 시멘트량을 변화시켜 강도 및 리바운드 특성을 파악하였다.

표 3.8 숏크리트 압축강도 기준(코아압축강도)

강도	강도(MPa)	
	1일	28일
압축강도	10	21(20)

2) 시험방법

압축강도 시험은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 공시체를 그 중심축이 가압판의 중심과 일치하게 놓은 후 일정한 속도로 하중을 가하여 파괴되었을 때의 압축강도로 만능시험기를 이용하여 시험결과를 얻었다.

압축강도는 식3.1로 계산하여 유효숫자 1자리까지 구했다.

$$f_c = p$$

$$f_c = \frac{P}{\pi(d/2)^2} \quad (\text{식3.1})$$

여기서, f_c : 압축강도(MPa)

P : 시험기가 타나내는 최대하중(N)

d : 공시체의 지름(mm)

3.2.2 휨강도시험

1) 시험개요

공시체에 3등분점 하중을 연직으로 재하하여 파괴될 때까지의 최대휨강도를 알아 보는 것으로 기준값은 표 3.9과 같다.

표 3.9 숏크리트 휨강도 기준

강 도	강 도(MPa)	
	1일	28일
휨강도	2.1	4.5

2) 시험방법

휨강도 시험은 15×15×53cm 몰드를 터널측벽에 세워 숏크리트 머신으로 뿔어 제작한 것으로 1일, 28일 휨강도를 KS F 2408(콘크리트의 휨강도 시험방법)에 준하여 실시했다.

공시체의 인장측 표면의 스펠방향 중심선의 3등분점 사이에 파괴되었을 때의 휨강도로 만능시험기를 이용하여 결과값을 얻었다.

휨강도는 식 3.2로 계산하여 유효숫자 1자리까지 구한다.

$$f_b = \frac{p \ell}{bh^2} \quad (\text{식3.2})$$

여기서, f_b : 휨강도(MPa)

p : 시험기가 나타내는 최대하중(N)

ℓ : 스펠(cm)

b : 파괴단면의 폭(cm)

h : 파괴단면의 높이(cm)

3.2.3 휨인성시험

1) 시험개요

등가휨강도(f_r)는 재령 28일 이상에서 시편의 처짐이 $\ell/150$ (ℓ :지간길이, mm)이 될 때까지의 인성을 휨인성계수(Flexural Toughness Factor)로 표시한 것으로 측정된 최대 휨강도의 68% 이상이어야 한다.

2) 시험방법

본 시험에서는 휨인성시험기를 사용하여 산출하며 500×500×125mm의 거푸집에 숏크리트를 친후 재령 6일에 석재절삭기를 이용하여 100×100×350mm로 절단하여 시편을 제작하거나, 기존 휨강도 몰드(150×150×530mm)에 직접 뽑어 붙여 캐핑 후 시험체를 제작한다.

공시체는 지점의 폭 중앙에 두고, 스패의 3등분점에 하중을 재하하여 아래그림에 나타난 바와 같이 재하점의 처짐이 스패 ℓ 의 1/150이 될 때까지의 하중-처짐 곡선 아래의 면적(T_B)을 구하는 것이다.

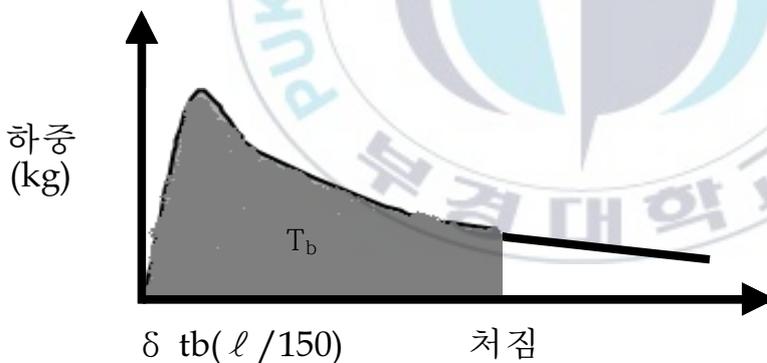


그림 3.1 하중-처짐 곡선

$$f_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{\ell}{bh^2} \quad (\text{식3.3})$$

여기서, f_b : 등가휨강도(MPa)

T_b : δ_{tb} 까지의 면적(kg·cm)

δ_{tb} : 스패의 1/150의 처짐(cm)

- ℓ : 스패(cm)
- b : 파괴단면의 평균폭(cm)
- h : 파괴단면의 평균높이(cm)

3.2.4 슛크리트 리바운드 시험

1) 시험개요

입도조정에 따른 슛크리트의 리바운드를 측정하여 적정 배합설계를 유도하기 위해 터널내에서 슛트머신으로 슛크리트를 직접 타설하여 그림 3.6과 같이 시험하여 리바운드 된 슛크리트량을 측정한다.

2) 시험방법

스�크리트 타설전 전재료의 중량 파악 및 슛크리트 타설부위에 슈트 등으로 갈아서 반발된 슛크리트량을 측정할 수 있도록 준비하여 일정량 슛크리트를 타설한 후 반발되어 떨어진 슛크리트량을 측정하여 슛크리트 전체의 무게와 반발된 무게의 비로 리바운드율은 식4.4으로 구한다.

$$\text{리바운드율} = \frac{\text{리바운드재료의 전중량}}{\text{스�크리트용재료의 전중량}} \times 100(\%) \quad (\text{식3.4})$$

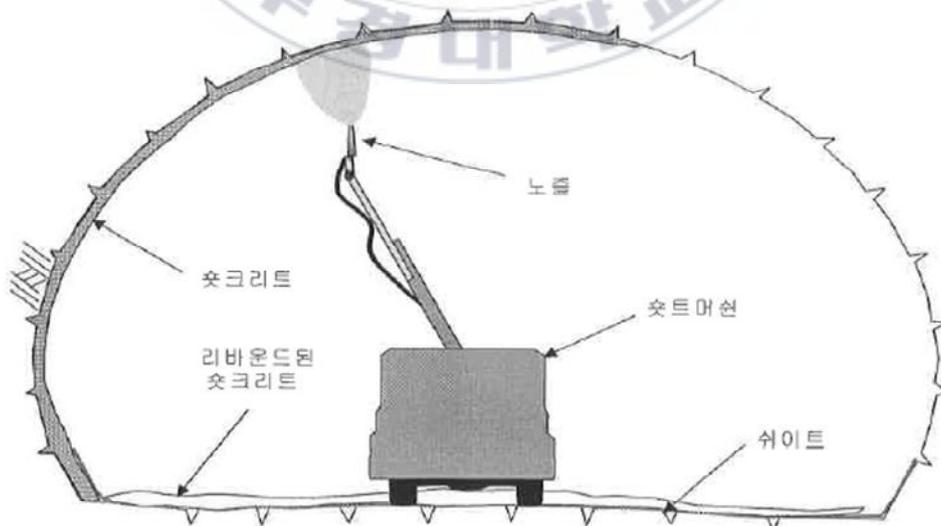


그림 3.2 리바운드 시험 개요도

3.3 시험배합

현장의 배치플랜트를 이용하여 물, 골재, 시멘트, 강섬유, 유동화제를 자동 계량하여 혼합하였으며 배합설계의 순서는 실내시험으로 단위재료량을 결정한 후에 배치플랜트에서 콘크리트를 생산하고, 현장시험에서 숏크리트 장비로 급결제를 혼입하면서 숏크리트를 분사하였다. 급결제의 성능비교는 동일한 시험조건에서 결과를 추출해 내기 위해 계획된 투입량에 맞추어 사용하였으며, 타설시 작업성 확보와 슬럼프 조절을 목적으로 폴리카보산계 유동화제를 0.7%투입하여 사용하였다. 고속도로 공사 전문시방서에 따라 잔골재율은 60%를 기준으로 하였고 골재의 합성입도도 아래 표4.1에 맞게 배합하였다.

표 3.10 숏크리트 골재용 합성입도

호칭지수(mm)	공칭입경에 대한 체통과 중량 백분율(%)
13	100
10	90~100
5	65~85
2.5	50~70
1.2	35~55
0.6	20~35
0.3	8~20
0.15	2~10

3.3.1 시험개요

동일한 시멘트, 골재, 혼화제에 급결제만 알칼리프리계 및 시멘트광물계를 사용하여 압축강도, 휨강도, 리바운드시험을 실시하여 설계기준강도를 만족하면서 리바운드가 최소가 되는 배합을 찾고자 하였다.

표 3.11에 나타난 바와 같이 물-시멘트비를 각각의 배합에 맞게 고정시키고 시멘트량을 변화시켜 강도 및 리바운드 특성을 파악하였다.

표 3.11 혼합 특성 (kg/m^3)

급결제 종류	w/c	C	W	G	S	유동화제량	급결제량
알칼리프리계	0.44	480	211	653	967	C*0.7%	C*8%
	0.44	470	207	668	975	C*0.7%	C*8%
	0.44	460	202	669	991	C*0.7%	C*8%
시멘트광물계	0.42	480	202	663	979	C*0.7%	C*5%
	0.42	470	198	671	990	C*0.7%	C*5%
	0.42	460	194	676	1003	C*0.7%	C*5%

본 연구에서는 현장에서 숏크리트 머신을 이용하여 숏크리트를 막장면에 타설 후 리바운드율을 측정하고 24시간 후 $\varnothing 10cm$ 의 코어채취기를 통해 측벽 코어를 채취하였고 국내최초로 천단코어채취기를 사용하여 천단부 코어를 채취하여 수중양생을 실시하고 28일 후 압축강도를 측정하였다.



그림 3.3 배합별 시험타설



그림 3.4 슛크리트 시험타설 전경



그림 3.5 코어채취



그림 3.6 실내 강도시험

3.3.2 시험배합 결과

표 3.12 숯크리트 시험배합

구 분	w/c (%)	S/a (%)	단위재료량(kg)							슬럼프 (mm)	공기량 (%)
			C	W	G	S	유동화제	급결제	강섬유		
알칼리 프리계	0.44	60	480	211	653	967	3.36	38.4	40	105	2.3
	0.44		470	207	668	975	3.29	37.6	40	100	2.1
	0.44		460	202	669	991	3.22	36.8	40	100	2.5
시멘트 광물계	0.42		480	202	663	979	3.36	24.0	40	100	1.9
	0.42		470	198	671	990	3.29	23.5	40	100	1.8
	0.42		460	194	676	1003	3.22	23.0	40	95	2.1

시험배합결과 슬럼프(100mm±25mm), 공기량이(2.0±1.5%) 모든 배합에서 기준을 만족하였다.



제4장 시험결과 및 고찰

4.1 기존배합 및 고찰

기존배합표는 작성 당시 전국의 고속도로현장에서 실제 사용하고 있는 배합표를 평균하여 반영하였다.

표 4.1 기존배합표(고속도로 건설공사 품질기준, 제16차 개정)

종별	fbk (MPa)	단위재료사용량(kg/m ³)					단위혼화제량(kg/m ³)		비고
		물	시멘트	강섬유	잔골재	굵은골재	급결제	유동화제	
숏크리트	f _{bk} =4.5	211	480	37	962	659	24.0	4.80	

표 4.2 기존배합 실측강도 (평균)

평균	A현장	B현장	C현장	D현장	E현장
5.63	6.12	5.91	6.18	4.94	5.0
급결제	시멘트광물계	알칼리프리계	시멘트광물계	알루미늄에이트계	

상기 실측강도는 각 공구의 휨강도 데이터(30회)를 평균한 값으로 숏크리트 28일 강도에서 대부분 배합설계 강도를 상회하였다. 특히, 시멘트광물계와 알칼리프리계의 경우는 부배합으로 추정될 정도로 강도값이 컸으며 알루미늄에이트계의 경우는 비교적 표준배합에서 제시한 시멘트의 양이 적당한 것으로 판단되었다.

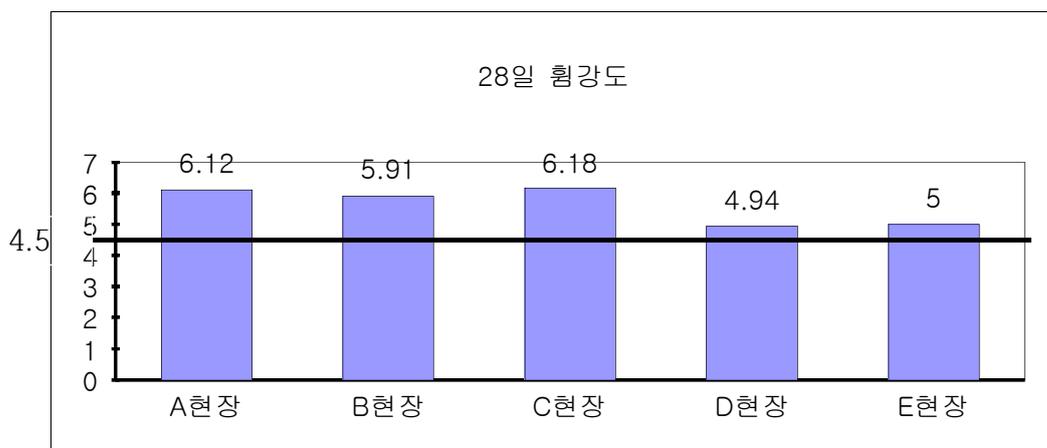


그림 4.1 기존배합 실측강도 시험결과

표 4.3 기존배합의 실측강도

순번	-shotcrete 28일 휨강도(MPa)				
	A현장	B현장	C현장	D현장	E현장
	시멘트광물계	알칼리프리계	시멘트광물계	알루미늄이트계	알루미늄이트계
1	6.2	5.8	6.3	4.6	4.9
2	6.4	5.6	6.5	5.1	5
3	5.9	5.5	5.3	5.2	4.7
4	6.5	5.4	5.7	4.8	4.6
5	6.1	5.9	6.6	4.7	5.3
6	6	5.6	6.8	4.6	5.2
7	5.8	5.8	6.5	4.5	5
8	5.8	5.9	6.6	4.7	5.3
9	5.9	5.9	6.5	4.8	5.4
10	6.1	6	6.2	5	5
11	6.2	6.1	5.6	5.1	4.8
12	6	6.2	6.5	5	4.7
13	5.7	6.3	5.9	4.9	4.9
14	6.4	6.2	6.1	4.8	5
15	5.6	6.5	6.3	5.1	5.1
16	6.3	6.3	6.4	4.8	4.5
17	6.5	5.9	6.1	4.7	4.7
18	6.4	5.7	6.1	5.2	5
19	5.6	6.6	6.2	5.3	5.1
20	6.2	6.5	5.8	5.1	5.2
21	6.5	5.5	5.7	5.1	5.4
22	6.6	6.1	6.6	5.6	5.2
23	6.2	6.3	5.6	4.9	5.1
24	5.5	5.7	6.5	4.9	5
25	6.5	5.6	5.9	4.8	5.3
26	6.1	5.5	6.4	5.1	4.8
27	5.6	5.5	5.6	5	4.7
28	6.5	5.4	5.9	5.2	4.6
29	6.7	6.3	6.6	4.9	5.3
30	5.9	5.6	6.5	4.8	5.1
평균	6.12	5.91	6.18	4.94	5.00

4.2 개선된 배합 및 고찰

4.2.1 압축강도결과 및 고찰

앞서 언급했듯이 숯크리트의 코아압축강도의 잠정기준은 20MPa이고 배합기준강도는 24.5MPa이다. 시멘트량을 460kg, 470kg, 480kg 으로 구분하여 각각의 재료량을 산출하여 알칼리프리계 급결제를 사용한 숯크리트의 경우 시멘트량이 460kg인 경우에도 충분한 압축강도를 발현하였다.

시멘트광물계 급결제를 사용하고 다른 재료는 상기와 동일한 조건으로 사용하는 경우에서도 시멘트량 460kg에서 26.5MPa의 압축강도를 발현하여 설계기준강도인 20MPa을 32%가량 상회하는 것으로 나타났다. 압축강도만 보았을 경우 지금의 도로공사 표준배합의 기준인 시멘트량 480kg을 20kg정도 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

설계된 시험항목에 대한 압축강도의 시험결과는 아래 표 4.6과 그림 4.2, 4.3에서와 같이 나타났다.

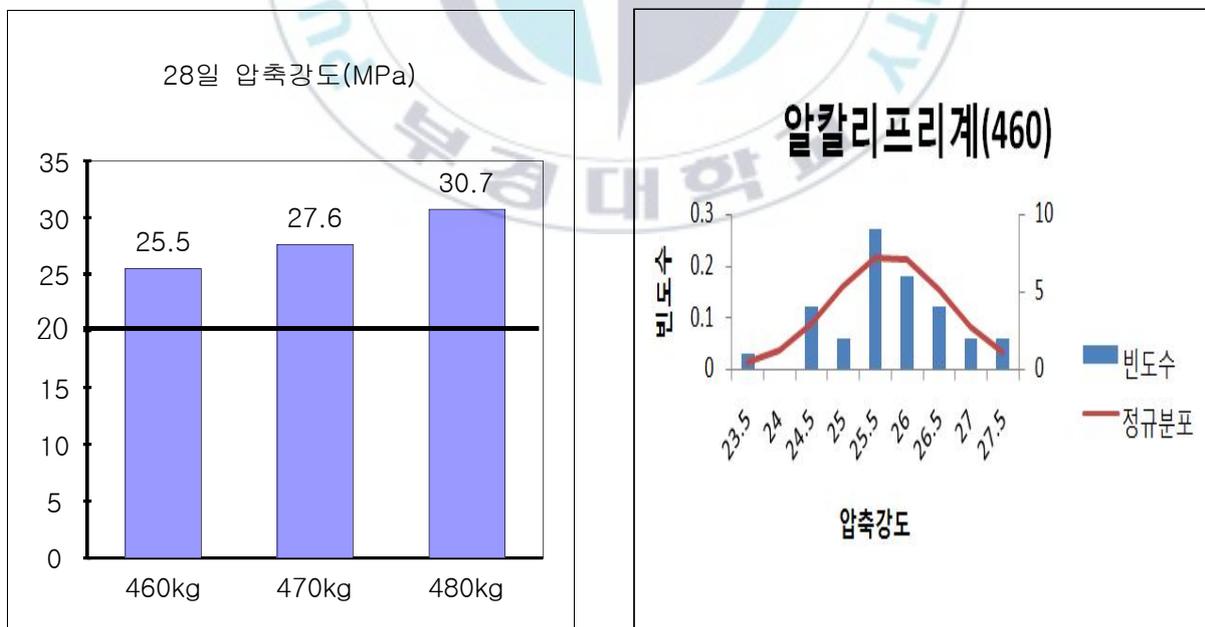


그림 4.2 압축강도 시험결과(알칼리프리계)

표 4.4 압축강도 통계분석 (알칼리프리계, C: 460kg)

평균	표준편차	범위(Mpa)		관측수	변동계수	95%신뢰구간(Mpa)		비고
		최소	최대			하한	상한	
(Mpa)	(Mpa)			(개)	(%)			
25.5	0.89	23.5	27.1	30	3.5%	25.2	25.8	

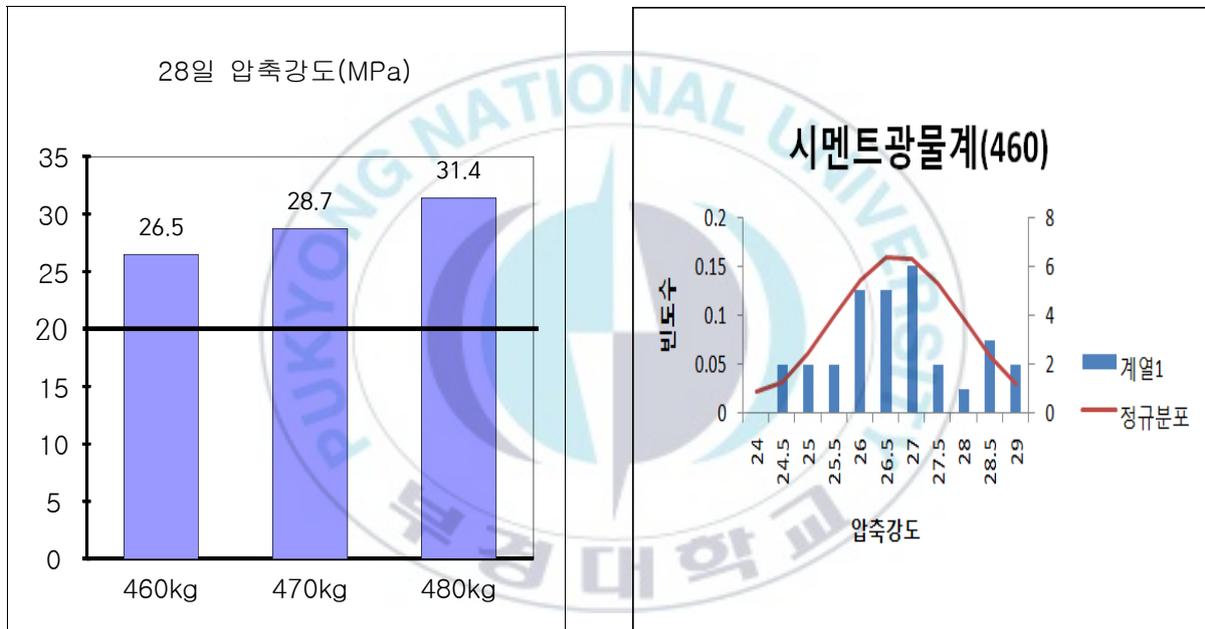


그림 4.3 압축강도 시험결과(시멘트광물계)

표 4.5 압축강도 통계분석 (시멘트광물계, C: 460kg)

평균	표준편차	범위(Mpa)		관측수	변동계수	95%신뢰구간(Mpa)		비고
		최소	최대			하한	상한	
(Mpa)	(Mpa)			(개)	(%)			
26.5	1.23	24.2	28.8	30	4.6%	26.0	26.9	

표 4.6 압축강도 시험결과(알칼리프리계)

번호	급결제종류	유동화제량	급결제량	코아 압축강도(MPa)		
				C : 480	C : 470	C : 460
1	알칼리프리계	C*0.7%	C*8%	30.3	27.7	25.5
2				31.5	26.5	27.1
3				32.3	28.6	25.3
4				30.9	29.4	25.6
5				29.7	27.5	26.8
6				29.6	27.6	24.5
7				33.1	29.4	23.5
8				33.6	28.6	27.1
9				33.5	27.6	26.3
10				31.2	25.8	25.2
11				29.8	27.9	25.6
12				29.9	30.1	24.3
13				30.6	29.6	26.5
14				30.4	27.4	24.7
15				30.2	28.6	25.3
16				31.6	25.9	26.1
17				32.4	26.3	25.4
18				33.1	25.9	25.3
19				30.6	26.4	27.1
20				30.5	27.5	26.8
21				31.6	26.8	25.6
22				27.6	26.7	25.3
23				28.9	28.6	24.3
24				30.1	27.5	25.6
25				28.6	29.1	25.8
26				27.4	27.3	26.1
27				30.2	26.4	24.6
28				31.2	26.8	24.1
29				30.6	25.9	25.1
30				29.8	28.6	25.7
평균				30.7	27.6	25.5

표 4.6 압축강도 시험결과(시멘트광물계)

번호	급결제 종류	유동화제량	급결제량	코아 압축강도(MPa)		
				C : 480	C : 470	C : 460
1	시멘트광물계	C*0.7%	C*5%	31.2	28.3	26.7
2				33.2	27.5	25.4
3				30.6	29.2	26.8
4				33.7	26.9	26.7
5				31.1	30.1	27.9
6				32.6	30.6	25.8
7				33.5	29.8	24.3
8				31.2	27.6	28.1
9				30.6	26.8	26.3
10				28.6	29.4	24.2
11				30.1	28.6	28.6
12				31.5	30.1	26.9
13				30.6	30.6	26.7
14				32.6	31.2	25.8
15				29.8	29.4	28.3
16				30.2	28.7	28.8
17				33.6	29.5	26.2
18				31.2	30.6	25.7
19				30.6	28.4	25.6
20				32.1	26.7	28.1
21				30.8	27.4	26.5
22				30.7	28.4	24.6
23				30.6	28.6	24.8
24				31.6	27.9	26.3
25				32.4	25.9	27.1
26				32.6	29.5	26.5
27				30.6	28.3	25.3
28				29.6	29.1	26.9
29				34.1	27.6	27.3
30				29.6	28.1	25.9
평균				31.4	28.7	26.5

4.2.2 휨강도결과 및 고찰

1일 휨강도는 모두 관리기준(2.1MPa)을 만족하는 것으로 나타났으며 알칼리-프리계 급결제를 사용한 숏크리트는 시멘트량의 8%를 혼합하여 사용하였고, 시멘트 광물계는 시멘트량의 5%를 사용하였으며 두 종류다 시멘트량 460kg에서 충분한 강도 발현이 되었으며 시멘트광물계 급결제를 사용한 경우 강도가 다소 뛰어난 것으로 나타났다.

설계된 시험항목에 대한 휨강도의 시험결과는 아래 표 4.9과 그림 4.4, 4.5에서와 같이 나타났다.

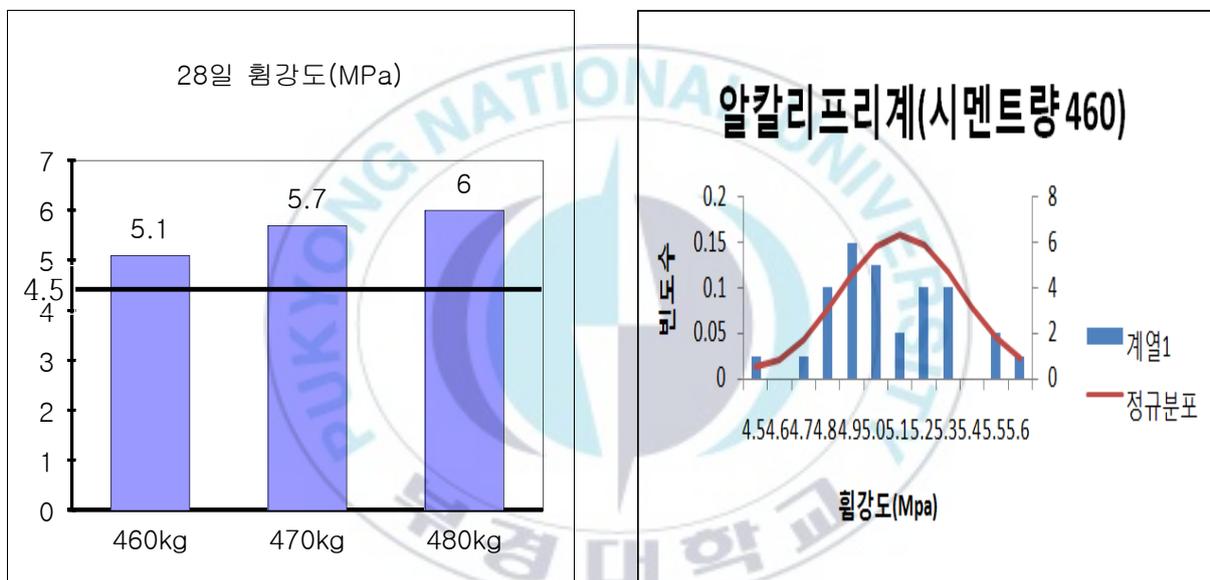


그림 4.4 휨강도 시험결과(알칼리프리계)

표 4.7 휨강도 통계분석 (알칼리프리계, C: 460kg)

평균	표준편차	범위(Mpa)		관측수	변동계수	95%신뢰구간 (Mpa)		비고
		최소	최대			하한	상한	
(Mpa)	(Mpa)			(개)	(%)			
5.10	0.25	4.5	5.6	30	4.9%	4.96	5.14	

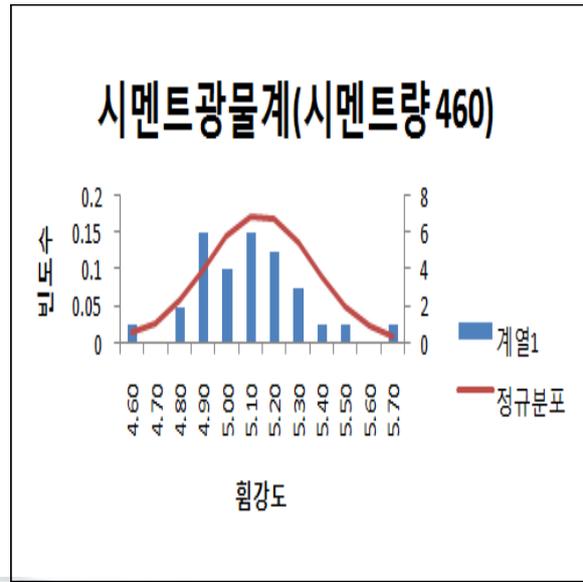
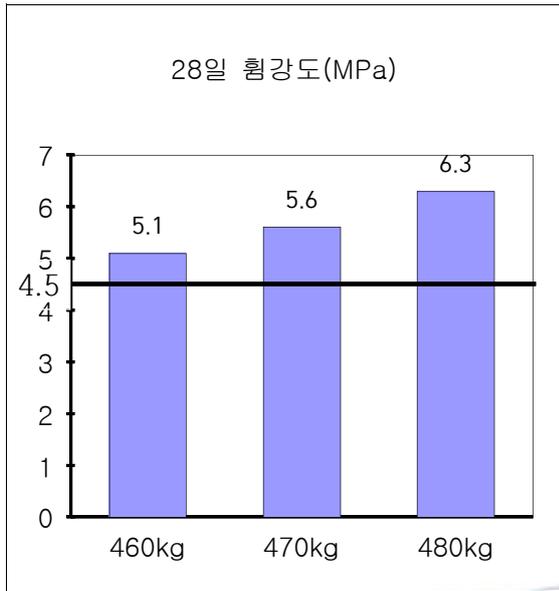


그림 4.5 휨강도 시험결과(시멘트광물계)

표 4.8 휨강도 통계분석 (시멘트광물계, C: 460kg)

평균	표준편차	범위(Mpa)		관측수	변동계수	95%신뢰구간 (Mpa)		비고
		최소	최대			하한	상한	
(Mpa)	(Mpa)			(개)	(%)			
5.09	0.23	4.6	5.7	30	4.4%	5.01	5.17	

표 4.9 휨강도 시험결과(1)

번호	급결제 종류	시멘트량	유동화제량	급결제량	휨강도 (MPa)	
					1일	28일
1					2.8	6.1
2					2.7	5.7
3					2.5	6.0
4					2.9	5.9
5					3.1	5.8
6					2.6	5.8
7					2.9	6.0
8					2.8	6.0
9					2.9	6.2
10					3.0	6.3
11					3.1	6.2
12					3.2	5.9
13					2.8	6.5
14					2.7	5.9
15	알칼리프리계	480	C*0.7%	C*8%	2.9	6.0
16					2.6	6.1
17					2.7	6.1
18					2.9	6.3
19					3.0	6.2
20					3.1	5.9
21					3.3	5.8
22					2.9	5.9
23					2.7	6.0
24					2.8	6.1
25					2.6	5.7
26					2.9	5.5
27					3.0	6.0
28					3.1	6.1
29					3.0	6.2
30					2.9	6.0
30회 평균					2.9	6.0

표 4.9 휨강도 시험결과(2)

번호	급결제 종류	시멘트량	유동화제량	급결제량	휨강도 (MPa)	
					1일	28일
1					2.6	5.6
2					2.7	5.8
3					2.9	5.5
4					2.5	5.6
5					2.4	5.5
6					2.6	5.8
7					2.7	5.7
8					2.5	5.6
9					2.9	5.4
10					2.7	5.5
11					2.8	5.8
12					2.9	5.9
13					2.6	5.9
14					2.4	6.0
15	알칼리프리계	470	C*0.7%	C*8%	2.5	5.7
16					2.3	5.5
17					2.5	5.6
18					2.6	5.5
19					2.7	5.4
20					2.7	5.5
21					2.5	5.9
22					2.6	5.7
23					2.8	6.0
24					2.9	6.1
25					2.5	5.4
26					2.6	5.6
27					2.4	5.5
28					2.5	5.7
29					2.6	5.9
30					2.5	6.0
				30회 평균	2.6	5.7

표 4.9 휨강도 시험결과(3)

번호	급결제 종류	시멘트량	유동화제량	급결제량	휨강도 (MPa)	
					1일	28일
1					2.3	5.3
2					2.5	5.2
3					2.4	5
4					2.6	4.9
5					2.1	4.7
6					2.0	4.8
7					2.3	5
8					2.3	5.1
9					2.5	5.3
10					2.1	5
11					2.5	4.9
12					2.3	5.5
13					2.2	5.3
14					2.0	5.3
15	알칼리프리계	460	C*0.7%	C*8%	1.9	4.9
16					2.3	4.8
17					2.2	5.2
18					2.0	5
19					1.8	5.1
20					2.0	5.5
21					2.2	4.5
22					2.5	5.6
23					2.1	4.9
24					2.0	5
25					2.3	5.2
26					2.2	4.8
27					2.0	4.9
28					1.9	4.9
29					2.2	5.2
30	2.5	4.8				
30회 평균					2.2	5.1

표 4.9 휨강도 시험결과(4)

번호	급결제 종류	시멘트량	유동화제량	급결제량	휨강도 (MPa)	
					1일	28일
1	시멘트광물계	480	C*0.7%	C*5%	3.3	6.2
2					3.5	6.7
3					3.2	6.3
4					3.0	6.0
5					3.4	6.4
6					3.1	6.6
7					3.2	5.9
8					2.9	6.2
9					2.8	5.9
10					3.1	6.6
11					3.3	6.6
12					3.0	6.4
13					3.2	6.3
14					3.1	6.3
15					3.5	6.2
16					3.6	6.5
17					3.4	5.9
18					3.2	6.5
19					3.6	6.3
20					3.1	6.5
21					3.5	6.5
22					3.7	6.4
23					3.4	6.6
24					3.5	6.8
25					3.3	5.9
26					3.4	6.0
27					3.2	6.1
28					2.9	6.2
29					3.1	6.3
30					3.2	6.5
				30회평균	3.3	6.3

표 4.9 휨강도 시험결과(5)

번호	급결제 종류	시멘트량	유동화제량	급결제량	휨강도 (MPa)	
					1일	28일
1	시멘트광물계	470	C*0.7%	C*5%	3.1	5.6
2					3.3	5.5
3					3.1	5.6
4					3.1	5.9
5					2.9	5.4
6					2.8	5.5
7					3.0	5.5
8					3.3	5.6
9					3.4	6.0
10					3.1	5.7
11					3.1	5.4
12					3.0	5.3
13					2.9	5.5
14					3.2	5.6
15					3.3	5.5
16					3.3	5.6
17					3.4	5.8
18					3.0	5.7
19					2.9	5.4
20					2.9	5.6
21					2.7	5.5
22					2.8	5.8
23					3.1	5.7
24					3.2	5.5
25					3.3	5.6
26					3.0	5.5
27					2.9	5.8
28					2.8	5.1
29					2.9	5.3
30					3.0	5.6
				30회평균	3.1	5.6

표 4.9 휨강도 시험결과(6)

번호	급결제 종류	시메트량	유동화제량	급결제량	휨강도 (MPa)	
					1일	28일
1	시멘트광물계	460	C*0.7%	C*5%	2.7	5.1
2					2.9	5.0
3					2.6	5.2
4					2.7	5.3
5					2.6	5.5
6					2.5	5.1
7					2.9	4.9
8					2.6	4.8
9					2.4	4.6
10					2.6	4.9
11					2.7	5.2
12					2.6	5.3
13					2.9	5.0
14					2.5	5.0
15					2.8	5.1
16					2.6	4.8
17					2.7	4.9
18					2.5	4.9
19					2.5	5.2
20					2.9	5.2
21					2.8	5.1
22					2.8	5.0
23					2.5	5.3
24					2.6	5.4
25					2.7	4.9
26					2.7	5.7
27					2.6	5.1
28					2.8	5.1
29					2.5	5.2
30					2.4	4.9
				30회평균	2.7	5.1

4.2.3 휨인성결과 및 고찰

급결제의 종류에 관계없이 시험결과 값에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났으나 시멘트량이 많을수록 강도 증진 효과가 있었으며 기준인 3.0MPa은 모두 만족하였다. 설계된 시험항목에 대한 휨인성의 시험결과는 아래 표 4.10과 그림 4.6, 4.7에서와 같이 나타났다.

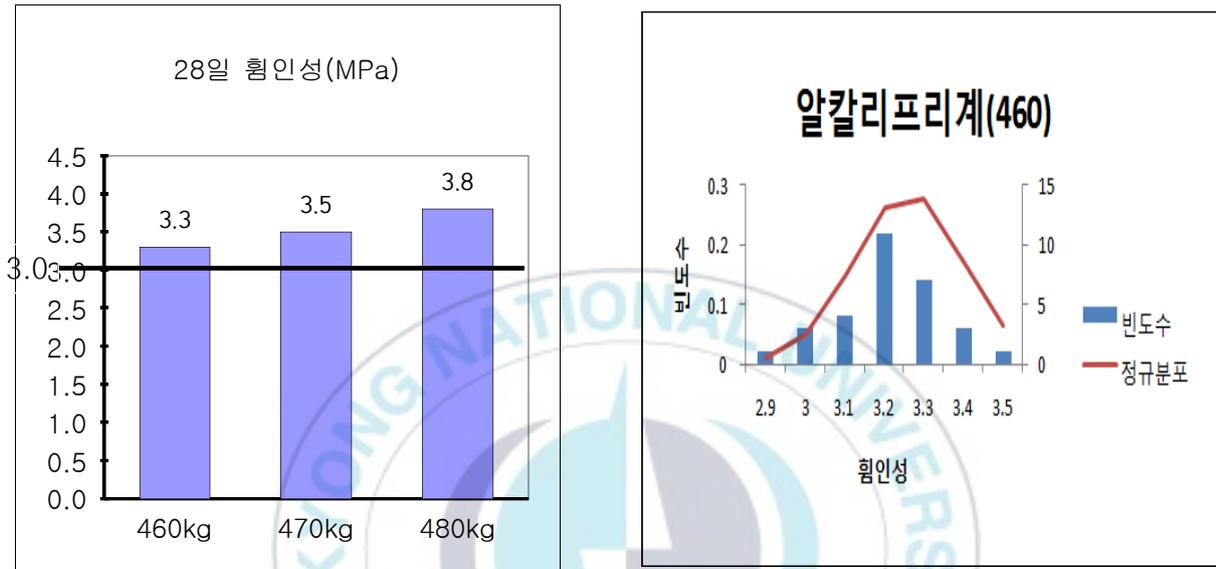


그림 4.6 휨인성 시험결과(알칼리프리계)

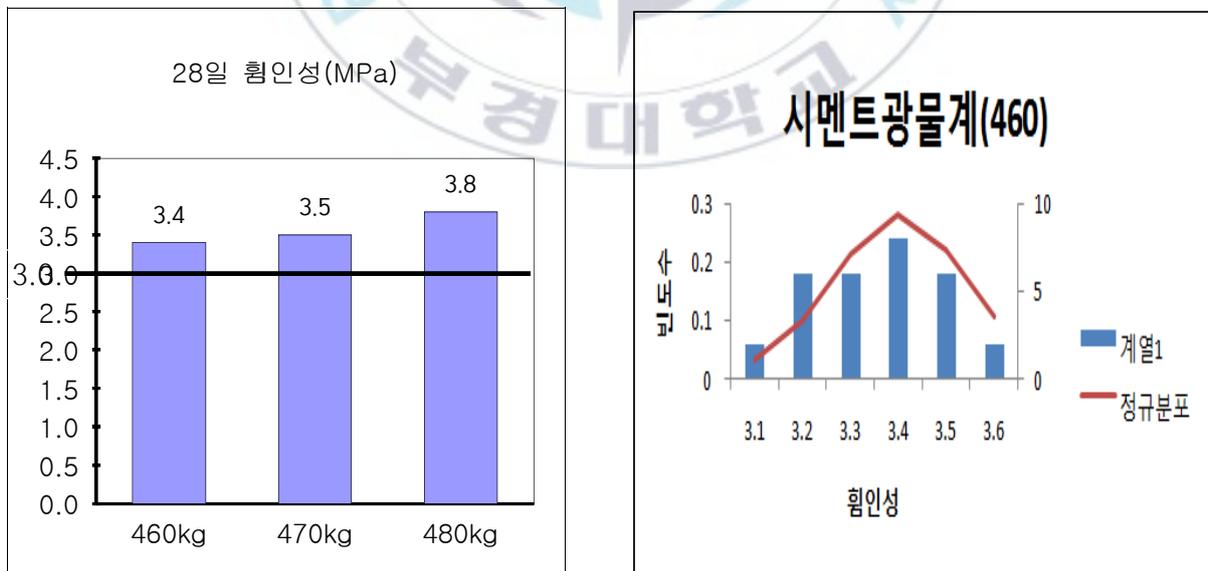


그림 4.7 휨인성 시험결과(시멘트광물계)

표 4.10 휨인성 시험결과(알칼리프리계)

번호	급결제 종류	유동화제량	급결제량	휨인성(MPa)		
				C : 480	C : 470	C : 460
1	알칼리프리계	C*0.7%	C*8%	3.9	3.5	3.3
2				3.8	3.3	3.1
3				4.0	3.6	3.3
4				3.8	3.2	3.3
5				3.7	3.1	3.2
6				3.6	3.6	3.4
7				3.5	3.5	3.2
8				3.6	3.3	3.5
9				3.4	3.4	3.2
10				3.5	3.6	3.3
11				3.6	3.2	3.0
12				3.5	3.6	3.1
13				3.8	3.5	3.2
14				4.0	3.5	3.2
15				3.9	3.4	3.4
16				4.2	3.2	3.2
17				4.2	3.6	3.2
18				4.0	3.5	3.1
19				3.9	3.4	3.3
20				3.7	3.3	3.1
21				3.9	3.5	3.2
22				4.1	3.6	3.5
23				4.2	3.5	3.4
24				4.0	3.7	3.2
25				4.3	3.5	3.5
26				4.0	3.6	3.5
27				3.9	3.5	3.2
28				3.7	3.4	3.3
29				3.6	3.5	3.2
30				4.0	3.6	3.4
평균				3.8	3.5	3.3

표 4.10 휨인성 시험결과(시멘트광물계)

번호	급결제 종류	유동화제량	급결제량	휨인성(MPa)		
				C : 480	C : 470	C : 460
1	시멘트광물계	C*0.7%	C*5%	3.8	3.6	3.4
2				3.9	3.5	3.2
3				3.7	3.6	3.5
4				3.5	3.7	3.3
5				3.6	3.5	3.4
6				3.9	3.5	3.2
7				3.8	3.6	3.1
8				3.7	3.3	3.3
9				3.5	3.5	3.5
10				3.6	3.6	3.2
11				3.5	3.7	3.4
12				3.6	3.5	3.6
13				3.8	3.4	3.2
14				3.8	2.5	3.3
15				3.9	3.6	3.4
16				3.7	3.6	3.5
17				3.9	3.7	3.3
18				4.1	3.5	3.1
19				3.9	3.5	3.5
20				3.8	3.6	3.4
21				3.7	3.7	3.2
22				3.5	3.6	3.3
23				3.9	3.5	3.6
24				3.8	3.6	3.4
25				4.0	3.7	3.5
26				3.9	3.8	3.2
27				3.9	3.7	3.3
28				4.0	3.6	3.4
29				3.8	3.5	3.5
30				3.9	3.6	3.4
평균				3.8	3.5	3.4

4.2.4 리바운드결과 및 고찰

리바운드율은 타설장비의 성능 및 조종원의 숙련도에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나 시멘트량이 많을수록 굵은골재의 양이 줄어 리바운드가 적어 지는 것으로 판단된다.

설계된 시험항목에 대한 슛크리트 리바운드시험은 시험의 특성상 1개의 타입에 한번만 시험을 실시하였으며 그 결과는 아래 표4.11와 그림 4.8, 4.9에서와 같이 나타났다.



그림 4.8 리바운드율 시험결과 (알칼리프리계)

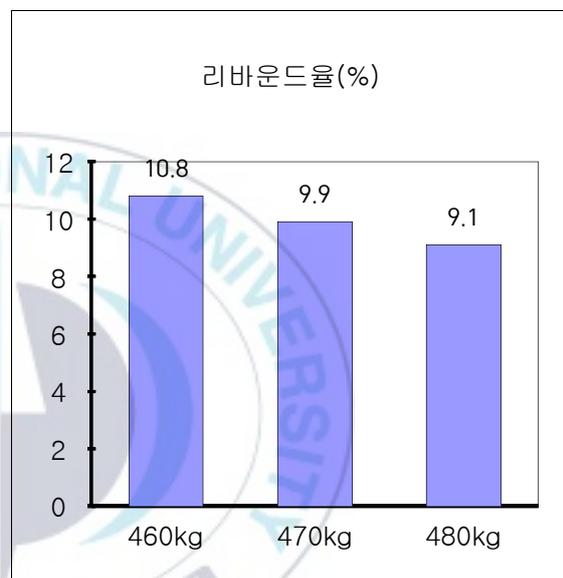


그림 4.9 리바운드율 시험결과 (시멘트광물계)

표 4.11 리바운드 시험결과

급결제 종류	C	혼화제량	급결제량	리바운드율(%)
알칼리프리계	480	C*0.7%	C*8%	8.9
	470	C*0.7%	C*8%	9.6
	460	C*0.7%	C*8%	10.3
시멘트광물계	480	C*0.7%	C*5%	9.1
	470	C*0.7%	C*5%	9.9
	460	C*0.7%	C*5%	10.8

4.3 경제성 분석

4.3.1 경제적인 배합비

성능이 향상된 급결제를 사용한 결과 시멘트 사용량을 기준인 480kg/m³ 대비 20kg/m³ 줄여도 시방기준에 적합한 성능을 발휘하는 것으로 확인되었다.



그림 4.10 시험결과 정리

표 4.12 변경배합표

구분	fbk (MPa)	단위재료사용량(kg/m ³)					단위혼화제량(kg/m ³)	
		물	시멘트	강섬유	잔골재	굵은골재	급결제	유동화제
기존	f _{bk} =4.5	211	480	37	962	659	24.0	4.80
변경	f_{bk}=4.5	194	460	37	1003	676	23.0	3.22

4.3.2 공사비 절감액

숏크리트 최적배합을 통하여 시멘트량을 절감할 경우 터널 1km당 공사비 13백만 원을 절감할 수 있으며, 또한 본 연구에서 사용한 급결제의 경우 숏크리트 1m³ 생산 시 적용되는 단가는 아래 표 4.14에서와 같이 큰 차이가 없는 것으로 보인다.

표 4.13 터널시공 단가(주)

터널시공비 (굴착, 숏크리트, 라이닝)	숏크리트단가	시멘트절약금액	비 고
140억원/km	98,000원/m ³	13,000,000원/km	

(주) □□□□고속도로건설공사현장 ○○1터널의 경우를 예로 작성

표 4.14 급결제 단가 비교(시멘트 480kg 일 경우)

구분	알루미늄에이트계 (C*10%)	시멘트광물계 (C*5%)	알카리프리계 (C*8%)	비 고
급결제량	48kg	24kg	38kg	
급결제 단가	400원	780원	520원	
1m ³ 당 단가	19,200원	18,720원	19,760원	
리바운드율	12.0%	9.1%	8.9%	

제5장 결 론

도로공사 표준배합비를 기본으로 급결제와 시멘트량에 변화를 주어 숏크리트 머신을 이용, 공시체를 제작하였고 압축강도시험, 휨강도시험, 휨인성시험, 리바운드시험 등을 실시하여 역학적 강도를 증가시키면서 리바운드를 줄일 수 있는 배합을 확인코자 하였으며 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

숏크리트의 현장 시험시공 결과 급결제의 성능 발달에 따라 역학적 강도가 우수한 편이었고 특히, 환경적 측면에서 알카리프리계가 강도측면에서는 시멘트광물계가 다소 유리한 값을 나타내었다.

본 연구에서 진행한 숏크리트 최적배합을 통해 고속도로 터널 표준배합에서 제시한 $480\text{kg}/\text{m}^3$ 대비 시멘트 사용량을 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 절감한 $460\text{kg}/\text{m}^3$ 을 사용하여도 시방기준(압축강도, 휨강도, 휨인성 및 리바운드율)에 적합한 성능을 발휘하는 것으로 확인되었으며 공사비 13백만원/km를 절감할 수 있었다. 향후 보다 많은 연구와 시험 및 검증을 통해 발주자 입장에서는 발주 시 설계에 반영하여 공사비를 절감할 수 있고, 시공사의 경우는 공사비용을 절감할 수 있을 것이다.

또한, 고성능의 혼화제 개발에 따라 적은 시멘트량으로 충분한 역학적 성질을 확보할 수 있는 콘크리트를 만들 수 있어 향후 배합설계시에 기존의 배합공식에 의존하지 않는 새로운 배합설계방법이 제시 되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 고속도로 건설재료 품질기준 개정(제16차)
2. 고속도로공사 전문시방서 pp.7-18~19
3. “고성능감수제·유동화제” 월간 레미콘 아스콘 골재(2015)
4. 김성수의 5명, “숯크리트의 품질향상을 위한 강도특성 연구” 대한토목학회 정기학술대회 2008
5. 성능중심의 건설기준 표준화 연구보고서 : 국토해양부 한국건설교통기술평가원 2011. 06
6. 이상돈외 2명, “고속도로 터널 숯크리트 배합설계 개선연구” 대한토목학회 정기학술대회 2016
7. 최 성외 5인, “급결제 종류에 따른 숯크리트 결합재의 유변학적 특성” 한국콘크리트학회 가을학술대회 논문집 2012, pp.239~240
8. 한국시멘트협회 연구자료<시멘트 광물계 및 액상 급결제를 사용한 숯크리트의 특성비교>
9. 한국콘크리트학회 논문집 제17권3호(2005) pp.428~432

감사의 글

논문을 마치고 '감사의 글'을 접하고 보니 지난 대학원 생활이 주마등처럼 떠오릅니다. 회사와 학교 두 마리 토끼를 놓치지 않으려고 발버둥 쳤던 제 그 모습에 격려를 아끼지 않으셨던 지인들과 더불어 감사의 마음으로 2017년, 뜻 깊은 한 해를 마감하고 있습니다.

부경대 대학원에 들어 선지가 엇그제 같은데 벌써 2년이란 시간이 훌쩍 지나가 또 하나의 이정표를 세워야 할 시기네요.

항상 힘과 용기를 주시고 마지막까지 큰 그림을 그려주신 김수용 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 올리고 싶습니다. 또한 성심으로 지도해 주신 이영대 교수님, 자유로운 수업 분위기에 인기가 있던 양진국 교수님 감사드립니다. 그리고 학업에 힘이 되어준 김정균 차장, 황석준 부장 고맙다.

끝으로 그동안 공부한다고 수고한 우리 딸 하영이가 즐거운 대학 생활이 되었으면 한다.

2017년 12월

진 창 덕