

고로슬래그 미분말을 혼입한 레디믹스트 슛크리트의 현장적용성에 관한 실험적 연구

A Experimental Study on the Ready-mixed Shotcrete Using Granulated Blast Furnace Slag

최 희 섭¹ Choi, Hee-Sup 김 동 민² Kim, Dong-Min
장 필 성³ Jang, Pil-Sung 서 신 석⁴ Seo, Sin-Seuk

Abstract

The aim of this study is to evaluate the applicability of Granulated Blast Furnace Slag to the development of the Powdered Ready-mixed Shotcrete. First of all, after accomplishing SEM analysis and Leaching Test, the laboratory and field experiments for evaluating the utility of Granulated Blast Furnace Slag were performed. As a result of SEM and Leaching test, the environmental stability was confirmed. That is, non-detection of harmful lists and dense shotcrete structure result from mixing Granulated Blast Furnace Slag. As a result of lab. and field test, Blast Furnace Slag is superior to Plain Batch in improving strength and durability. And it will be able to improve to some extent the problem caused by the delayed reaction of existing Granulated Blast Furnace Slag with alkali activated material. Also the proper amount of Granulated Blast Furnace Slag is estimated to be under 30%. Finally, it is possible that Granulated Blast Furnace Slag can apply to economical recycling and development of the Ready-mixed Shotcrete for its price is only about 5% of Silica-fume's price.

요 지

본 연구에서는 레디믹스트(Ready-mixed) 슛크리트 개발을 위해 슛크리트 혼화재로 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 적용하였을 때, 이에 따른 현장적용성을 평가하고자 하였다. 우선, 고로슬래그 미분말의 강도발현 특성 및 환경적 불안정 요인을 파악하고자 SEM분석 및 중금속 용출시험을 수행한 후 다양한 실험변수들을 적용하여 실내실험과 현장실험을 수행하였다. SEM분석과 중금속용출 실험결과, 고로슬래그 미분말의 혼입으로 인해 슛크리트 조직의 치밀화 및 유해항목 미검출로 인한 환경적 안전성을 확인하였다. 실내실험과 현장실험결과, 고로슬래그 미분말은 일반 Plain 배합보다 강도증진 및 내구성 개선효과가 우수하게 나타났으며, 알칼리활성제 혼입을 통해 기존 고로슬래그 미분말의 수화반응의 지연으로 인한 초기강도발현의 문제점을 다소 효과적으로 개선시킬 수 있는 계기가 되었다고 판단된다. 또한 고로슬래그 미분말의 적정 혼입량은 30% 이내로 적용하는 것이 바람직하며, 경제성 측면에서도 실리카 흙 가격의 약 5% 정도의 수준으로 저렴하기 때문에 산업부산물인 고로슬래그 미분말의 경제적 재활용 및 분말형 레디믹스트 슛크리트 개발에도 적용이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

Keywords : Alkali activated material, Economical recycling, Granulated blast furnace slag, Leaching test, Ready-mixed shotcrete, SEM analysis

1 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 연구원 (Researcher, Infrastructure Research Department, Geotechnical Engrg. & Tunnelling Research Division, KICT)

2 정희원, 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 연구원 (Member, Researcher, Infrastructure Research Department, Geotechnical Engrg. & Tunnelling Research Division, KICT, dmkim@kict.re.kr, 교신저자)

3 한국건설자재시험연구원 내후성기술센터 연구원 (Researcher, Weathering Technology Center, KICM)

4 한일시멘트(주) 중앙연구소 건설재료2팀선임연구원 (Senior Researcher, Construction Materials 2nd Team, Central Research Center, Hanil Cement)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

췁크리트는 굴착 직후 발생하는 원지반의 초기변위를 제어하고 풍화 방지를 통해 굴착면의 안정을 도모하기 위한 구조물로서, 최근 들어 구조물의 장기적인 사용성과 안전성의 개념에서 그 역할이 매우 중요하게 부각되고 있다. 특히, 터널 분야에서는 NATM(New Austrian Tunneling Method : 이하 NATM) 공법이 획기적인 공법으로 인정받게 되면서, 1970년대 중반 이후 지하공간의 활용, 도로 및 철도 등의 건설로 인한 대단면 터널공사에 NATM 공법의 도입 및 활용과 연계되어 췁크리트 관련 기술도 비약적인 발전을 이루어 왔다. 그러나 아직까지 국내 췁크리트 관련 기술은 국가적인 제도의 미비와 재료 단가의 부담 및 시공현장에서의 의식 부족 등으로 선진국에 비해 상당히 낮은 수준이다(마상준 등, 2005).

췁크리트는 다양한 혼합물로 구성된 매우 복잡한 재료로서 성능과 효과에 영향을 미치는 변수들이 많이 있으며, 대표적으로 급결제, 혼화재, 보강재 등의 사용재료와 골재품질, 타설장비, 분사각도 및 거리, 타설방법, 양생방법 등을 들 수 있다. 이와 같은 변수들이 췁크리트가 사용된 구조물의 설계연한과

상관성을 가지며, 내구성에도 상당한 영향을 미치게 된다. 특히 췁크리트의 고강도화 및 고내구화를 목적으로 적용되고 있는 일반적인 방법은 고품질 혼화재와 고성능 급결제를 사용하는 것이다. 국외의 경우 고품질 혼화재로는 췁크리트의 품질을 향상시키고 고강도와 및 장기 강도 저하를 방지하는 실리카흙, 플라이 애쉬 및 고로슬래그 미분말 등이 적용되고 있고, 고성능 급결제로는 기존 알칼리성 급결제의 장기 강도 저하와 인체 유해성 등의 문제를 해결할 수 있는 알칼리 프리계 급결제가 사용되고 있다(한국건설기술연구원, 2006; 沼田, 1986). 하지만 국내의 경우 범용적으로 사용되고 있는 고품질 혼화재 및 급결제에 대한 품질 기준의 방향성 및 관련 연구 논문 및 보고서 등이 충분하지 못해 실제 현장적용에는 많은 어려움이 토로되고 있는 실정이다.

현재 국토해양부의 지원과 민간기업의 주도로 현장 타설 췁크리트가 가지는 불확실한 시공품질, 강도 및 내구성 품질저하 등과 같은 기존 현장에서의 췁크리트 문제점들을 효과적으로 개선하고, 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 재활용하여 췁크리트 품질향상 및 산업부산물을 경제적으로 재활용하여 국가자원의 확보 및 시공품질을 향상시키고자 품질관리가 잘 이루어진 건조

형태의 재료를 현장에서 배합하는 방식을 적용한 ‘분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 췁크리트’의 연구·개발이 수행 중에 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 수행되고 있는 연구 중 현재까지 국내 췁크리트 공법에 적용사례가 없는 고로슬래그 미분말의 혼입을 통해 국내 췁크리트 환경에 부합하는 산업부산물을 경제적으로 재활용하고, 장기내구성 향상 및 현장 췁크리트의 시공품질을 극대화시키기 위한 연구를 소개하고자 한다.

2. 레디믹스트 췁크리트

레디믹스트 췁크리트란 기존 현장배합 췁크리트를 대체하는 공법으로서 터널시공 특성, 현장조건 및 사용 용도에 맞게 생산할 수 있으며, 시공성 및 고품질 췁크리트를 확보할 수 있는 공법이다. 즉, 기존에 현장에서 배합되던 췁크리트의 고질적인 문제점들을 효과적으로 개선하기 위해 췁크리트 재료의 배합 및 제조를 레미탈 제조 전문업체에서 사전에 미리 실시하여 골재의 철저한 토립분 관리, 확실한 입도관리, 전문배합 장치를 이용한 엄격한 품질관리 및 재료의 규격화 등을 거쳐 시공 품질을 극대화 시킬 수 있게 제조되는 췁크리트 재료를 의미한다.

췁크리트는 적당한 강도와 장기내구성을 가져야 하며, 경제적인 시공이 가능해야 하기 때문에 이를 위해서는 췁크리트 구성재료 중 80%이상을 차지하는 골재의 역할이 상당히 중요하다. 하지만 골재부족 현상을 겪고 있는 우리나라의 경우 양질의 골재를 얻는 것은 상당히 어려운 현실이며, 또한 골재의 먼지, 진흙, 유기물 등의 유해물 함유량 관리 및 골재의 입도관리등 엄격한 품질관리가 시급한 실정이다. 따라서 이러한 문제를 해결하고 각 요소별 최적의 혼합을 유도하기 위한 공장배합 시스템의 적용이 불가피하며, 이를 통해 고품질 및 낮은 탈락율의 특성을 갖는 췁크리트 시공이 가능해질 것으로 판단된다(마상준 등, 2005).

또한 본 공법은 NATM 지보개념을 준용하며, 영구지보재로 역할을 할 수 있는 장기 고성능 췁크리트 개발 및 터널 지보재 표준화와 시공의 편이성, 품질관리의 용이성 및 재료의 고성능화를 통해서 사회간접 시설물의 하나인 터널구조물 안정성 확보를 이룰 수 있다(이양규 등, 2004). 표 1은 레디믹스트 췁크리트의 장·단점을 나타낸 것이다.

표 1. 레디믹스트 슛크리트의 장·단점

장점	<ul style="list-style-type: none"> - 국제기준에 상응할 수 있는 고성능 슛크리트 확보 가능 - 슛크리트 구성재료의 철저한 품질관리 가능 - 전문 생산 설비에 의한 자동화 및 관리 가능 - 현장제조에 대한 부담 감소 및 품질의 안정성 확보 가능 - 비표준화 재료를 공장생산에 의한 표준화 가능 - 산업부산을 활용으로 인한 경제성 향상 - 고성능 슛크리트 적용에 의한 타 지보재량 절감 - 기존 생산품인 레미탈과 유사해 많은 생산경험 및 기존 레미탈 생산라인 사용에 의한 비용 절감 - 싱글 쉘 공법 적용을 위한 고성능 슛크리트 개발 가능
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 골재의 세척 및 체분류 작업 등 고품질화로 인한 재료비용 상승 - 재료 이동에 의한 물류비 상승 - 시공현장의 인식변화에 대한 현 골재업체 및 기술자들의 저항

3. 슛크리트 품질기준

소 높은 수준이며, 고품질 혼화재와 고성능 급결제를 사용하여 고강도 슛크리트의 사용이 일반적인 추세이다.

3.1 슛크리트 강도기준

국내에서 일반적으로 사용되고 있는 슛크리트 강도기준에는 터널표준시방서(국토해양부, 1999), 터널설계기준(국토해양부, 2007), 도로설계요령(한국도로공사, 2001), 터널지보공관련품질기준개정(한국도로공사, 2002) 등이 있다. 표 2는 국내 슛크리트 강도기준을 나타낸 것인데, 국내에서는 재령 1일 압축강도가 10MPa 이상, 재령 28일 압축강도가 21MPa 이상 되도록 배합할 것을 규정하고 있다(한국고속철도공단, 1998 ; 한국도로공사, 2002).

유럽통합규격(EFNARC, 1996)에서는 슛크리트 압축강도를 표 3과 같이 등급화 하여 규정하고 있으며, 현장 코어링의 영향을 고려하기 위해 0.85의 감소지수가 포함되어 있다.

유럽통합규격의 강도기준은 국내 강도기준에 비해 다

3.2 슛크리트 휨인성 기준

스�크리트 품질기준에는 강도 등과 같이 콘크리트에 적용되고 있는 일반적인 항목들에 더하여 휨인성 기준을 규정하고 있는데, 인성이란 균열의 생성 및 발달에 대한 재료의 내성을 의미하는 것으로 그 값이 클수록 균열에 대한 저항이 큰 것을 의미한다.

시험편의 하중-처짐 곡선을 구하는 경우에는 시험편 중앙에서의 순수 처짐을 측정해야하고, 처짐 측정의 정밀도를 높이기 위해 전기적인 변위계(LVDT)를 사용한다.

강섬유보강 슛크리트 시험편의 휨인성을 측정하는 값으로 등가휨강도를 사용하는 경우에는 초기균열이 발생할 때의 처짐 변위를 확인할 필요는 없지만 일반적으로 0.1mm 이내인 것으로 알려져 있다(한국건설기술

표 2. 국내 슛크리트 품질규정(한국고속철도공단, 1998 ; 한국도로공사, 2002)

구 분 ¹⁾²⁾	강 섬유		강섬유보강 슛크리트(MPa)					
	인장강도 (MPa)	형상비 (%)	휨강도		압축강도		코어압축강도 28일	등가휨강도 28일
			3일	28일	1일	28일		
한국고속철도공단	68.6	60~80	2.94	4.5	9.8	20.6	20.6 ¹⁾	3.06
한국도로공사	68.6	40~100	2.94	4.5	9.8	19.6	17 ²⁾	3.06

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

2) Steel Fiber 미사용 슛크리트 구간

표 3. 슛크리트 압축강도 등급 및 현장강도 기준(EFNARC, 1996)

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

연구원, 2006). 강섬유보강 슛크리트의 휨인성 시험시 중앙점 순수 처짐 측정장치의 원리는 그림 1과 같다.

휨강도(σ_t)는 삼등분점 재하시험에서 얻은 최대하중으로부터 다음 식에 의해 계산된다.

$$\sigma_t = \frac{P_u \cdot l}{b \cdot h^2}$$

여기서,

- P_u : 최대하중
- l : 시험편의 지간길이(30cm 또는 45cm)
- b, h : 시험편의 폭, 높이(10cm 또는 15cm)

등가휨강도는 삼등분점 재하시험에서 얻은 하중-처짐 곡선으로부터 규정 처짐 $\delta_{tb} = l/150$ 까지의 인성(toughness)을 기초로 하여 다음 식에 의해 계산된다(그림 2).

$$f_e = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bh^2}$$

여기서,

- T_b : 기준 처짐까지의 휨인성(flexural toughness)
- δ : 기준 처짐($l/150$)
(지간이 30cm인 경우 2mm, 45cm인 경우 3mm)
- l : 시험편의 지간 길이
- b, h : 시험편의 폭, 높이

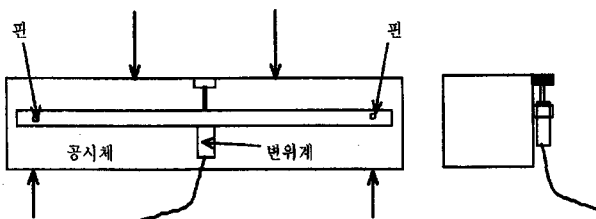


그림 1. 휨인성 시험시 중앙점 순수처짐 측정장치(JSCE-SF4)

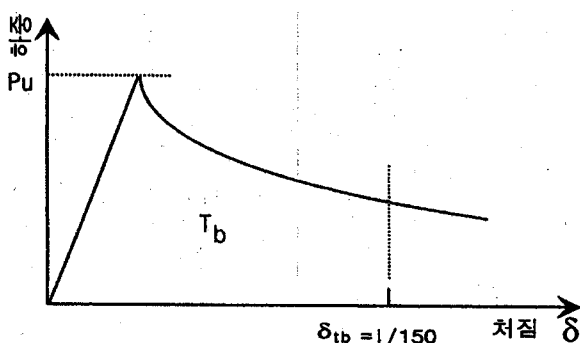


그림 2. 휨인성을 구하기 위한 기준 처짐 지점

한국도로공사(2002) 기준에서는 강섬유보강 슛크리트에서 최대 휨강도(설계기준강도)는 1일에서 2.1MPa이고 28일에 4.5MPa이다. KS F 2781(강섬유 보강 습식 슛크리트)에 의거해 3개의 시험체에 대해 최대휨강도의 평균값 68%이상, 최소 등가휨강도는 58%이상(순수 처짐이 지간길이 $l/150$)되어야 한다고 규정하고 있다.

4. 실내실험

4.1 실험개요

스�크리트 품질의 성능개선을 통한 레디믹스트 슛크리트 개발의 일환으로 우선, 레디믹스트 슛크리트에 고로슬래그 미분말을 적용함에 있어 강도발현 특성 및 환경적인 불안정 요인을 파악하고자 SEM 촬영을 통해 고로슬래그와 Plain 배합의 양생특성을 비교·분석하였으며, 이와 더불어 증금속 용출시험(KSLT)을 통해 유해물질의 검출 여부를 확인하여 레디믹스트 슛크리트에 고로슬래그 미분말의 적용성을 평가하고자 하였다.

또한, 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 혼화재로 이용할 때 우선, 고로슬래그의 적정 혼입량을 산정하여, 본 연구의 최종 목표인 고로슬래그 레디믹스트 슛크리트의 최종배합을 도출하는데 기초자료로 활용하고자 실내실험을 통해 굳지 않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트의 기본물성을 파악하고자 하였다.

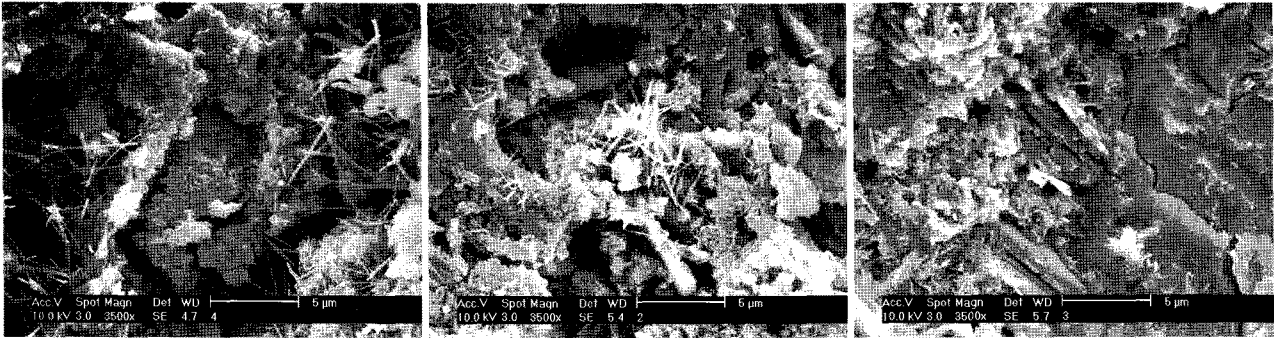
본 실내시험에서는 유럽통합규격(EFNARC)에 의거해 골재입도분포 및 골재최대크기를 8mm로 적용하였고, 고로슬래그와의 비교·분석을 실시하기 위해 일반 현장에서 고강도용으로 사용되고 있는 실리카흙을 적용하였다. 그 혼입량은 실리카흙이 5, 10, 15%, 고로슬래그 미분말 10, 20, 30%로 치환하여 혼화재 종류별 치환량에 따른 성능평가를 실시하였다.

4.2 고로슬래그 미분말의 적용가능성 평가

4.2.1 고로슬래그의 양생특성

본 실험에서는 고로슬래그 혼입에 따른 수화 생성물 및 구조적 차이를 설명하기 위해 시멘트 페이스트 시험체(Plain)와 고로슬래그 미분말을 30% 혼입한 시험체에 대해 SEM 촬영 및 분석을 실시하였다.

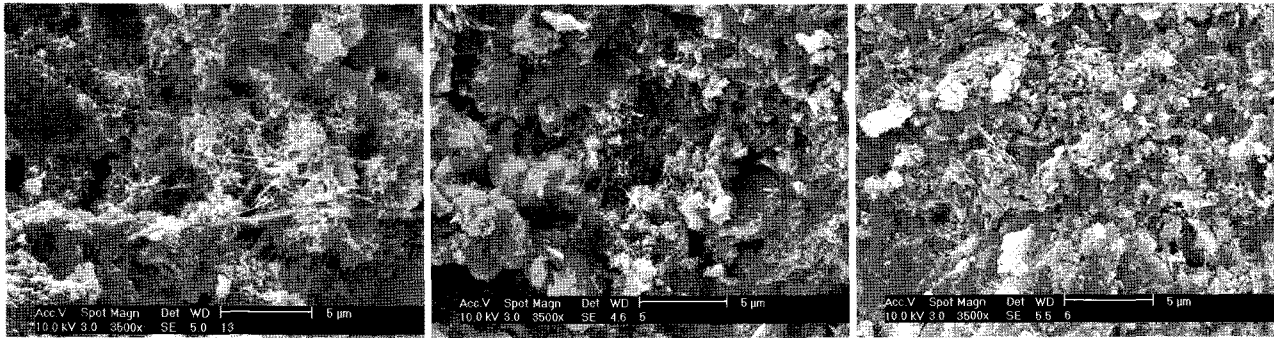
그림 3은 Plain 및 고로슬래그 혼입 페이스트 SEM 촬영 사진을 나타낸 것이며, 전자현미경(SEM) 관찰사진



① Plain(양생 1일)

② Plain(양생 3일)

③ Plain(양생 28일)



④ 고로슬래그(양생 1일)

⑤ 고로슬래그(양생 3일)

⑥ 고로슬래그(양생 28일)

그림 3. Plain 및 고로슬래그 혼입 페이스트 SEM 사진

에서는 Plain과 비교하여 고로슬래그를 사용한 시편의 미세구조가 가지는 특징은 크게 두 가지로 판단된다. 첫째는 양생 1일 시편에 명확하게 나타나는 특징으로, Plain과 비교하여 고로슬래그 30%를 치환한 시험체(④,⑤,⑥)에서는 수화생성물의 크기가 감소하고 균일한 분포를 보이는 점이다. 예를 들어 Plain의 에트링가이트 결정(①)과 고로슬래그의 에트링가이트 결정(④)은 생성된 결정의 크기 및 분포에서 두드러진 차이를 나타내고 있다. 이와 같은 특징은 혼화재에 의하여 시멘트 입자의 분포가 보다 균일해지기 때문에 수화생성물이 생성될 수 있는 시멘트 입자와 물과의 접촉면이 증가하기 때문으로 판단된다. 따라서 초기 수화생성물이 생성될 수 있는 수화반응 지점이 증가하여 생성물의 크기가 감소하고 균일해지는 것으로 판단된다. 둘째는 28일 시험체 조직의 치밀성의 차이이다. Plain(③)과 비교하여 고로슬래그 30%를 치환한 시험체(④,⑤,⑥)는 전체적으로 매우 치밀한 구조를 나타내고 있으며, 결정의 크기가 작으면서도 수화생성물이 치밀하게 결합되어 있음을 보여주고 있다. 이와 비교하여 Plain 시험체들은 상대적으로 큰 결정이 존재하고 치밀하지 못한 것으로 나타났다. 고로슬래그 30%를 치환한 시험체의 경우 초기 수화생성물의 크기가 작고 균일하게 분포하기 때문에 공극의 크기가 작아 지속적으로

생성되는 C-S-H겔이 공극을 채우고, 다른 결정의 수화상과 결합하며 미 반응의 슬래그 골재등과 강하게 엉겨 붙어 치밀해지는 것으로 판단되며, 생성물의 크기가 큰 Plain 시험체들의 경우 추가로 생성되는 C-S-H겔이 공극을 충분히 충전시키지 못했기 때문으로 판단된다.

4.2.2 고로슬래그 미분말의 환경유해성 평가

레디믹스트 숏크리트 배합에 사용된 고로슬래그의 성분은 SiO₂, CaO, Al₂O₃, MgO가 대부분을 차지하며 이들 네 가지 성분이 약 95%를 차지하고 있다. 고로슬래그의 화학조성은 철광석 중의 불순물, 첨가하는 석회석 또는 돌로마이트의 품질 및 환원제로 사용하는 코크스 중의 회분에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 고로슬래그 미분말의 환경영향성 평가를 위해 폐기물 공정 시험법 제2장 제5항에 의거해 중금속 용출 실험(Korean Standard Leaching Test, KSLT)을 수행하였다. 표 4는 중금속 용출시험 결과를 나타낸 표로서, KSLT법에 의한 최종배합비로 만든 샘플의 용출시험 사례로 고로슬래그 혼입 레디믹스트 숏크리트의 용출시험결과 Pb, Cu, Cd 등 전항목에서 거의 검출되지 않았다. 따라서 고로슬래그 혼입 레디믹스트 숏크리트는 유해항목에 대해 환경적으로 안전할 것으로 판단된다.

표 4. 중금속 용출시험 결과(단위 : mg/l)

구 분	Pb	Cu	As	Cr ⁶⁺	CN	유기인	Cd	TCE	PCE	Hg
고로슬래그 레디믹스트 숏크리트	N.D.	0.005	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	N.D.	N.D.	N.D.
환경기준	3	3	1.5	1.5	1	1	0.3	0.3	0.1	0.005

* N.D. : Not Detected

4.3 실내실험

4.3.1 사용재료 및 배합표

가. 시멘트

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 H사에서 제조된

표 5. 시멘트 물리적 특성

비중	분말도 (cm ² /g)	응결시간 (hr:min)		압축강도 (MPa)		
		Initial	Final	3d	7d	28d
3.15	3,260	4:10	7:40	21.5	26.6	38.9

표 6. 시멘트 화학적 특성

Chem. Comp (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	Free CaO	Insol
	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7	0.8	1.0	0.5

표 7. 실리카 흙 및 고로슬래그 미분말 물리적 특성

종 류	비 중	분말도(cm ² /g)	강열감량(%)	염화이온(%)	활성도지수(%)		
					7일	28일	91일
실리카 흙	2.3	200,000	1.3	0.19	99	-	-
고로슬래그	2.9	4,355	0.83	0.008	84	120	123

표 8. 실리카 흙 및 고로슬래그 미분말 화학적 특성

종 류	화학 성분(%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
실리카 흙	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7
고로슬래그	33.5	15.2	0.5	43.9	2.6	2.5

표 9. 혼화재 종류별 치환량에 따른 배합표

구 분 ¹⁾	W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	단위량(kg/m ³)							
				W	C	S	G	SF	BFS	SP	
8-Plain	33.7	8	67	155	460	1062	524	-	-	2.3	
5-SF		8						437	23		-
10-SF		8						414	46		-
15-SF		8						391	69		-
10-BFS		8						414	-		46
20-BFS		8						368	-		92
30-BFS		8						322	-		138

주1) SF : 실리카 흙(Silica Fume)

BFS : 고로슬래그 미분말(Blast Furnace Slag)

KS L 5201 규정에 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 시멘트의 물리·화학적 특성은 표 5, 6에 각각 나타내었다.

나. 혼화재

실리카 흙은 노르웨이 E사의 제품을 사용하였으며, 고로 급냉 슬래그는 선철 공정 중 부산물로 발생된 것으로 KS F 2563(콘크리트용 고로슬래그 미분말)의 3종을 사용하여 실험하였다.

실험에 사용된 각 혼화재의 물리·화학적 특성은 표 7, 8에 나타내었다.

다. 배합표

Plain, 실리카흙 5, 10, 15% 배합, 고로슬래그 10, 20, 30% 배합을 통해 혼화재 종류별 치환량에 따른 성능평

가를 실시하였으며, 배합표는 표 9와 같다.

4.3.2 실험방법 및 결과

가. 실험방법

굳지 않은 콘크리트의 특성은 슬럼프 시험(KS F 2402)과 공기량 시험(KS F 2401)을 통해 작업성을 평가하였으며, 굳은 콘크리트의 특성은 시험체의 재령(3, 7, 28 일)에 따라 압축강도 시험(KS F 2405)과 동탄성계수를 측정하여 숏크리트의 강도특성을 분석하였다. 표 10은 실험방법을 기술한 것이다(한국건설기술연구원, 2006).

나. 실험결과

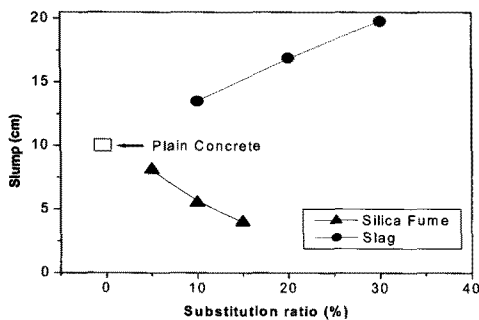
그림 4의 (a), (b)는 혼화재의 종류 및 치환량에 따른 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량의 결과로 고로슬래그 미분말을 치환 사용한 경우 치환량 증가에 따라 초기 수화 반응 지연 및 슬래그의 유리질 표면에 의한 윤활 작용으로 슬럼프는 Plain과 비교해 증가하는 경향성을 나타내었다(최항등, 2000). 그러나 실리카흙을 치환 적용한 경우 실리카흙의 높은 비표면적 및 흡수성에 의한 콘크리트의 점성 증가로 유동성은 크게 상실되는 경향을 나타내었다. 이와 같은 유동성 손실에 의해 동일한 작업성을 얻기 위하여서는 일반적인 Plain에서 요구

되어지는 것보다 초기 슬럼프가 대략 5cm 정도 증가되어야만 하는 것으로 보고되고 있다.

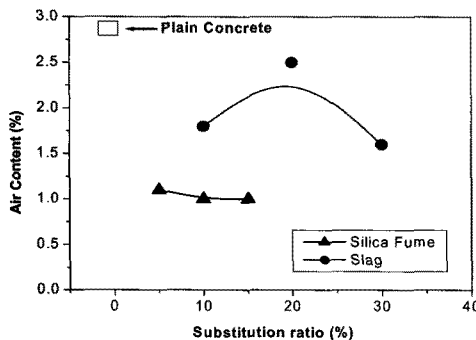
Plain과 비교해 혼화재를 사용한 굳지 않은 콘크리트의 공기량은 종류 및 치환량에 상관없이 낮아졌다. 혼화재의 치환량이 공기량에 미치는 영향성은 적었지만, 종류에 따라 다소 차이점이 인지되었다. 고로슬래그 미분말 치환에 따른 공기량 감소는 앞에서 유동성 개선에 따른 콘크리트의 슬럼프 증가에 따라 공기 연행 성능이 감소된 것으로 판단된다(김기형 등, 1986; Metha, 제3판). 특히 실리카흙 치환 시 공기량 감소 현상은 더욱 분명했으며, 이것은 실리카흙의 높은 비표면적과 발생 과정에서 포함될 미연소 탄소 함유, 그리고 낮은 슬럼프가 기인된 것으로 사료된다(한국콘크리트학회, 1997).

혼화재의 종류 및 치환량이 경화 콘크리트 특성에 미치는 영향성을 평가하고자 압축 강도와 동탄성계수 평가를 실시하였다. 압축 강도 측정 및 동탄성계수 측정 결과, 실리카 흙의 혼입량 증가에 따라 측정값이 Plain 대비 크게 증가되는 경향성을 나타내었다.

이는 실리카흙의 미세한 입자(보통 시멘트 입자 크기의 수백분의 일)의 미세 충전 효과(Micro Filler Effect)와 높은 비표면적에 의한 우수한 증장기 반응성과 관련이 있다. 고로슬래그 미분말 치환 시 초기 재령에서는

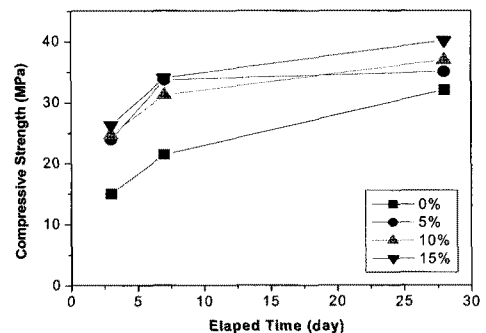


(a) 슬럼프 변화

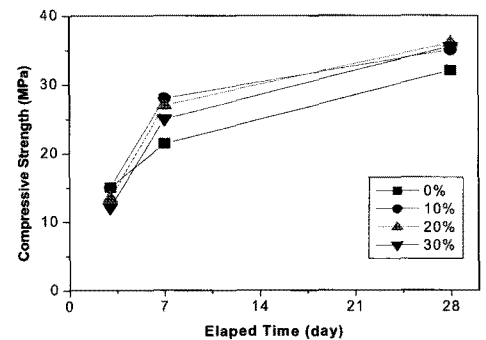


(b) 공기량 변화

그림 4. 혼화재 종류 및 치환량에 따른 변화



(a) 실리카 흙



(b) 고로슬래그

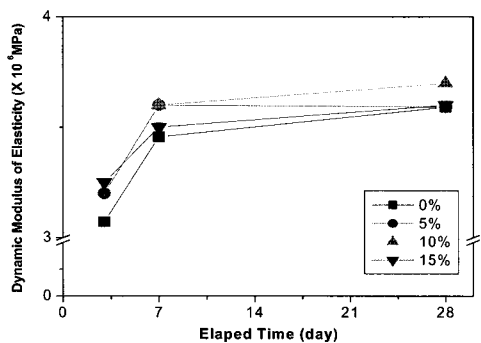
그림 5. 각 혼화재의 재령별 압축강도 변화

치환량이 적을수록 유리했다. 그러나 장기 재령에서는 고로슬래그 미분말의 잠재 수경 반응에 의해 치환량은 크게 중요하지 않았으며, 실리카흙의 강도 개선 효과보다는 적지만 Plain보다는 다소 증진되는 경향성을 나타내었다.

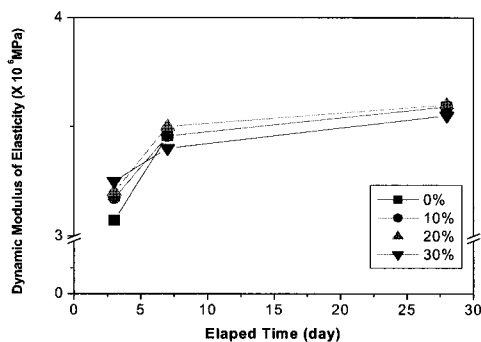
그림 6은 실리카흙, 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트 시편의 재령별 동탄성계수 특성을 나타낸 것이다. 이들 혼화재는 보통 내구성 등 구조의 밀실화에 크게 도움이 되는 것으로 알려져 있으나, 혼화재의 치환율 변화에 따른 동탄성계수에는 압축강도 결과에 비해 그 영향성은 크지 않았으며 실리카흙 적용 시 다소 유리한 것을 알 수 있었다.

또한, 고로슬래그 혼입배합은 Plain에 비해 동탄성계수가 다소 높게 나타났으며, 실리카흙 배합에는 못 미치지만 내구성 및 구조의 밀실화에 다소 유리할 것으로 판단된다. 하지만 동일 슬럼프를 기준으로 할 때 고로슬래그 미분말의 경우 단위 수량이 일정 수준 감소될 수 있는 여지가 있기 때문에 압축강도 및 동탄성계수와 같은 역학적 특성 및 내구특성은 다소 개선될 수 있을 것으로 사료된다.

혼화재 종류별 치환량에 따른 성능평가의 실내실험



(a) 실리카 흙



(b) 고로슬래그

그림 6. 각 혼화재의 재령별 동탄성계수 변화

결과 골재최대크기가 8mm일때 실리카 흙을 사용할 경우보다 고로슬래그 미분말을 숏크리트 및 콘크리트 배합에 적용할 경우에 단위 수량이 감소되고 슬럼프 증가에 의해 강도증진 및 내구성 개선 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다(한국건설기술연구원, 2008). 또한 경제성 측면에서도 고로슬래그 미분말의 가격이 실리카 흙 가격의 약 5% 정도의 수준으로 더 저렴하기 때문에 고성능 숏크리트나 고성능 콘크리트의 혼화재로 사용하는 것이 보다 유리하다고 판단된다. 하지만 기존에 수행된 연구 및 문헌을 살펴보면, 고로슬래그 미분말의 치환율이 30%를 넘을 경우 초기응결 지연 및 경화불량이 발생할 수 있기 때문에 그 이하로 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다(한국콘크리트학회, 1997).

5. 현장실험

5.1 실험개요

숏크리트는 급결제의 혼입 및 현장특성에 의해 정확한 특성을 규명하기에 어려움이 있다. 따라서, 실내에서 믹서를 이용하여 배합한 실험만으로는 숏크리트 급결제의 영향 및 뿜어붙이는 속도 및 위치에 따른 영향성을 평가할 수 없다는 단점이 있다. 이에 최대한의 시공오차를 줄이며 객관적인 숏크리트 특성을 파악하기 위하여 본 현장타설 시험에서는 실제 터널 시공 현장의 장비 및 시공시스템을 그대로 도입하여 실시하였으며, 타설 장소는 분당구 신분당선에 위치한 ○○터널시공 현장에서 수행하였다.

레디믹스트 숏크리트에 산업부산물인 고로슬래그 미분말의 적용가능성을 평가하고자 우선, 실내시험을 통해 레디믹스트 숏크리트에 적용할 적정 고로슬래그 치환량은 30%로 하는 것이 바람직하다는 결론을 얻었다. 그러나 일반적으로 숏크리트의 특성 상 초기강도발현이 가장 중요한 부분을 차지하고 있어, 수화반응의 지연효과를 가지는 고로슬래그 미분말은 초기강도 발현에 악영향을 미칠 것으로 판단된다(한국건설기술연구원, 2008). 따라서 본 현장타설 시험에서는 고로슬래그 미분말이 혼입된 레디믹스트 숏크리트의 초기강도 발현 및 현장 적용성을 평가하고자 터널 벽면에 일정시간 뿜어 붙이기를 하면서 리바운드율 및 패널에 숏크리트를 직접 타설하는 시험을 수행하였다.

본 실험에서는 실내시험을 바탕으로 고로슬래그 배

합의 초기강도를 발현시키고자 고로슬래그 분말도 분류기준 1종, 2종, 3종에 각각 치환율 30%를 동일하게 적용하였으며, 이와 더불어 고로슬래그가 물과 접해 생기는 산성피막을 강알칼리나 황산염을 첨가하여 피막 파괴를 통해 초기강도를 증진시킬 수 있는 수산화칼륨(KOH)과 황산나트륨(Na_2SO_4) 등의 2가지 알칼리 자극제를 혼입한 배합을 사용하였다. 그리고 이에 따른 강도 발현 효과를 분석하기 위해 비교 군으로 Plain 및 실리카 흙 8% 치환 배합을 추가하여 리바운드율, 압축강도, 휨강도, 휨인성 실험을 실시하였다.

5.2 사용재료 및 배합표

5.2.1 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 현장에서 동일한 물성평가의 연계성을 위해 실내시험과 동일한 국내 H사에서 제조된 KS L 5201 규정의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 시멘트의 물리·화학적 특성은 앞 절의 표 5, 6과 같다.

5.2.2 레디믹스트 골재

레디믹스트용 골재는 생산지별 골재를 수집 및 분류한 후 ACI 및 유럽규격의 슛크리트 골재 입도기준에 맞게 입도조정을 실시한 후 사용하였다. 표 11은 본 실험

에서 사용한 골재의 혼입량을 나타낸 것이며, 그림 7은 실험용 레디믹스트 슛크리트 배합 재료의 공급을 위한 공장 생산 단계를 나타낸 것이다.

5.2.3 고로슬래그 미분말

본 실험에서 사용한 고로슬래그 미분말은 광양 제철소에서 선철공정 중 부산물로서 발생된 것으로 부산물 1종, 2종, 3종의 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 고로슬래그 미분말의 물리적 성질을 파악하기 위하여 KS L 5110(시멘트의 비중 시험 방법)에 따라 비중을 측정하였고, 분쇄 후의 실시료에 대하여 KS L 5106(공기 투과 장치에 의한 포틀랜드 시멘트의 분말도 시험 방법)에 의하여 비표면적을 측정하였다. 고로슬래그 미분말의 화학조성은 KS L 5120(포틀랜드 시멘트의 화학 분석 방법)과 기기 분석적 방법을 통하여 분석하였다. 표 12는 본 실험에 사용한 고로슬래그 미분말의 특성을 나타낸 것이다.

5.2.4 급결제

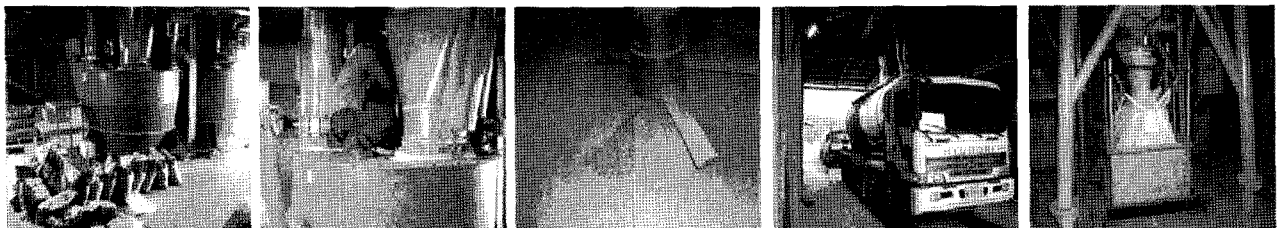
급결제는 기존 알칼리성 급결제가 가지고 있는 장기 강도 저하 및 인체에 유해한 단점을 보완할 수 있어, 최근 유럽 및 일본 등을 중심으로 사용빈도가 높아지고 있는 알칼리프리계를 적용하였다. 국내 품질규정에서 일반적으로 적용되고 있는 급결제 혼입량은 5~12%이

표 11. 레디믹스트용 골재 혼입량

골재크기	S1	S2	S3	S4
혼입량	0.1~0.8mm 32.0%	0.8~2.4mm 25.0%	2.4~5.6mm 21.0%	6~8mm 22.0%

표 12. 현장타설실험용 고로슬래그 미분말의 특성

화 학 성 분 (%)							물리적 성질
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	강열감량	비 중
34.81	16.19	0.47	41.25	8.05	0.16	-0.85	2.92



(a) 공장 원재료 스케일

(b) 혼합 믹서

(c) 믹서내부 믹싱상태

(d) 재료 BCT 직상차

(e) 톤백포장 라인

그림 7. 레디믹스트 슛크리트 배합 생산 라인 모습

며(한국도로공사, 2001), 현장상황이나 타설 조건에 따라 차이가 있으므로 기존에 발표된 연구들을 참고하여 알칼리프리계 8%로 결정하였다(이상필 등, 2004 ; 류종현 등, 2005).

5.2.5 강섬유

강섬유 혼입량은 국외 및 국내 품질기준이 각기 다르기 때문에 기존연구내용(한국도로공사, 2001)을 참고하고, 건설현장에서 일반적으로 적용되고 있는 40kg/m³를 혼입하였다. 강섬유 규격은 Ø0.5×30mm 이며, 번들형을 사용하였다. 표 13은 현장시험에 사용된 번들형 강섬유의 특성을 나타낸 것이다.

표 13. 현장시험에 사용된 강섬유의 특성

제품	길이 (cm)	직경 (mm)	형상비	형태	1m ³ 당 혼입량(kg)
A사 제품	30	0.5	60	Hooked ends type*	40

* 응력작용 시 뽑히지 않도록 양끝단이 구부러진 형태

5.2.6 배합표

본 실험의 주요골자인 초기강도 보상의 목적을 달성하여 산업부산물의 효과적 재활용을 이루고자 고로슬래그 분말도에 따른 1종, 2종, 3종 및 수산화칼륨(KOH)과 황산나트륨(Na₂SO₄) 등의 2가지 알칼리 활성화제를 배합에 적용하였으며, 이의 비교 군으로 Plain 및 실리카 흙 8% 치환 배합의 총 7가지 배합에 대해 현장시험을 수행하였으며, 표 14는 현장타설 시험 배합표를 나타낸 것이다.

5.3 실험계획

고로슬래그 미분말을 혼입한 레디믹스트 슛크리트의 적용가능성을 평가하고자 각각의 배합에 대하여 슬럼프, 리바운드량, 압축강도, 휨강도, 휨인성 등의 현장타설 실험을 수행하였다. 리바운드를 실험은 슛크리트 타설기계의 2회 토출량을 반복시험을 통해 계량한 후 총 10회의 스트로크를 측정하여 리바운드된 슛크리트를 수거하여 계량 및 각 배합의 리바운드를 산출하였다.

또한 압축강도 측정용 시험체를 채취하기 위해 시험

표 14. 현장타설 시험 배합표

구분 ¹⁾	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/B (%)	단위결합재량(kg/m ³)								
				W	C	골재	강섬유	급결제	고로슬래그 C*30%	실리카 흙 C*8%	유동화제	알칼리활성제 B*2%
Plain	8	12	45.6	212	465	1602	40	37.20 (알칼리프리계 : 8%)	-	-	4.65	-
B#1									140.0	-	4.19	-
B#2									140.0	-	4.19	-
B#3									140.0	-	4.19	-
B#3-1									140.0	-	-	2.8
B#3-2									140.0	-	-	2.8
SF									-	37.0	5.58	-

주1) B#1, #2, #3 - 고로슬래그 1종, 2종, 3종

B#3-1 = 수산화칼륨(KOH)

W/B: 물 바인더(시멘트+혼화제)비, S/a: 잔골재율,

SF - 실리카흙

B#3-2 = 황산나트륨(Na₂SO₄)

Gmax: 골재최대치수

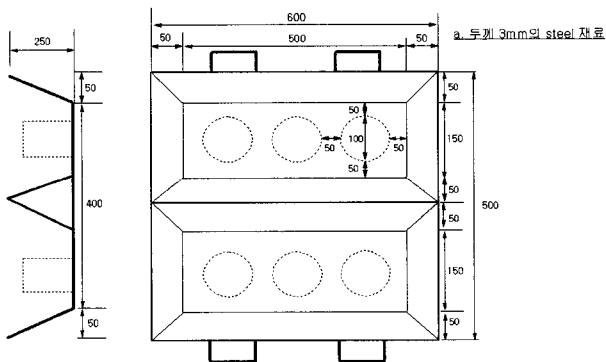


그림 8. 압축강도 시험체 채취용 몰드(mm)

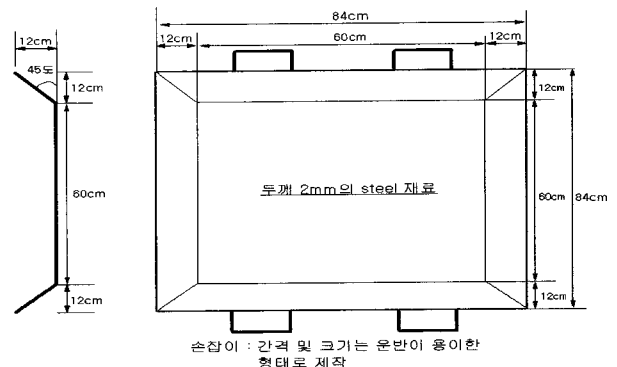


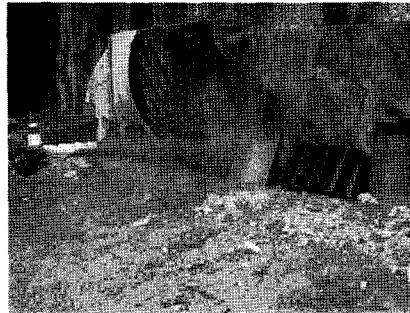
그림 9. 휨강도 시험체 몰드(cm)

표 15. 현장시험 평가항목

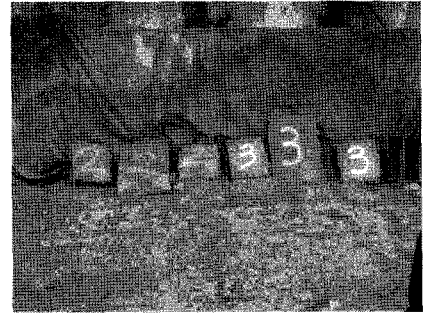
시험 항목	관련 시험 방법
리바운드율 측정 (타설시)	- 리바운드율 계산 · 리바운드 총량(kg)/숫크리트의 전중량(kg)*100
압축강도 측정 (1, 3, 7, 28일)	- KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법(Ø100×200mm) · 강섬유보강 숫크리트의 28일 압축강도 20MPa
휨강도 및 휨인성 측정 (28일)	- 터널설계기준(2007), 한국도로공사(2002) - KS F 2781(강섬유 보강 습식 숫크리트, 10×10×40cm) · 강섬유보강 숫크리트의 28일 휨강도 4.5MPa · 강섬유보강 숫크리트의 28일 등가휨강도(휨인성) 3.0MPa · 평균 등가휨강도비 68%이상, 최소 등가휨강도비 58%이상



(a) 코어 및 빔 시편 채취용 몰드



(b) 몰드 숫팅 장면



(c) 숫팅이 완료된 몰드

그림 10. 현장타설 시험 모습

채 취용 몰드를 사용하여 원통형 코어를 각 재령(1, 3, 7, 28일)별로 각각 3개의 현장코어를 채취하여 평균 압축강도를 측정하였다. 휨강도 및 휨인성용 패널을 사용하여 28일 재령의 각주형 시험체(10×10×40cm)를 절단·가공하여 삼등분점 재하시험을 수행하였다. 그림 8 과 그림 9는 압축강도용 시험체 채취 몰드 및 휨강도용 시험체 채취 몰드를 나타낸 것이다(한국건설기술연구원, 2008). 표 15와 그림 10은 각각 현장시험 평가항목과 현장타설 모습을 나타낸 것이다.

타낸 것으로서, 레디믹스트 배합 중 고로슬래그 1종(B#1) 배합과 고로슬래그 3종(B#3(Na₂SO₄))배합이 5.9%로 가장 적은 리바운드량을 나타내었다. 또한 Plain 배합과 실리카흄 배합을 포함한 거의 모든 배합이 약 6~7%의

5.4 실험결과

5.4.1 리바운드율

표 16과 그림 12는 총 7개의 배합별 리바운드율을 나

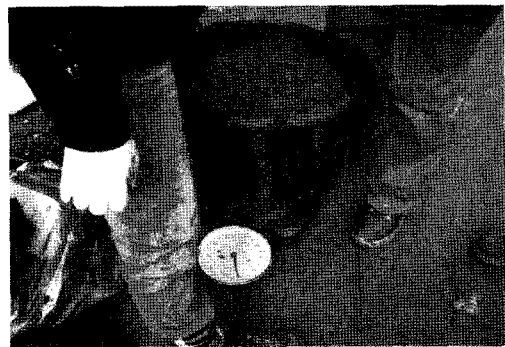


그림 11. 리바운드량 측정 모습

표 16. 리바운드율 실험 결과

배합명	슬럼프(cm)	2스트로크(kg)	10스트로크(kg)	리바운드량(kg)	리바운드율(%)
Plain	10	85	425	27	6.4
B#1	11			25	5.9
B#2	10.5			29	6.8
B#3	10			31	7.3
B#3-1	16			47	11.1
B#3-2	10			25	5.9
SF	12			26	6.1

리바운드율을 나타내고 있으며, 일반 현장 슛크리트의 리바운드율을 측정값보다 약 3~4%정도 리바운드 저감 효과를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 이는 공장에서 품질관리가 확실히 이루어진 레디믹스트 골재의 사용으로 인해 상대적으로 품질관리가 잘 이루어지지 않는 현장 슛크리트 골재보다 우수한 슛크리트용 재료의 품질 관리에서 기인된 것으로 판단된다(마상준 등, 2008). 또한 고로슬래그 혼입배합은 분말도 1종, 2종, 3종에 따라 각각 5.9%, 6.8%, 7.3% 순으로 나타났으며, 실리카흙 혼입배합의 6.1%와 차이가 거의 없거나 오히려 우수하게 나타났다. 즉, 동일한 고로슬래그양을 혼입하였을 때 분말도가 작을수록 조직이 더욱 치밀해져 리바운드율이 저감된 것으로 판단되지만, 고로슬래그의 분말도를 증가시키는 것은 분말도에 따른 생산단가의 상승 및 양생 온도 조절 등의 문제가 발생할 것으로 예상된다. 또한 전체배합 중 고로슬래그 3종(B#3(KOH))배합이 리바운드율이 11.1%로 가장 높게 나타났으나, 이는 배합상의 문제가 아니라 상대적으로 슬럼프 값이 커서 슛크리트 타설시 빠르게 터널 벽체에 고형화 되지 않아 나타난 현상으로 판단되며, 슛크리트에 알칼리활성제의 적용가능성을 증명하는 계기가 되었다고 판단된다(한국건설

기술연구원, 2008).

5.4.2 압축강도

레디믹스트 골재 사용 배합 및 현장골재 사용 배합의 압축강도 측정은 표 15의 시험항목에 따라 실시하였다. 재령 1, 3, 7, 28일 마다 각 배합별로 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 크기의 공시체를 3개씩 코어채취 하여 그 평균값을 측정하였다.

표 17과 그림 13은 각 배합별 압축강도를 나타낸 것이며, 레디믹스트 재료를 사용한 슛크리트의 압축강도는 터널설계기준(2007)에 의거해 1일 및 28일 압축강도가 모두 규정에 만족하는 경향을 나타내었다. 특히, 고로슬래그를 혼입한 배합의 초기강도 발현은 모두 평균 15MPa 이상으로 나타났으며, Plain 배합의 17.2MPa나 실리카흙 배합의 19.5MPa에 비하여 약 8~18%정도 낮지만 거의 대등한 초기강도를 발현하는 것으로 보인다. 또한, 본 현장실험의 강도값은 실내실험과 비교하여 유사하거나 오히려 약간 높게 나타나 급결제의 영향 및 양생 등의 실험적 오차가 거의 발생하지 않은 것으로 판단된다.

고로슬래그의 초기강도 발현을 향상시키고자 고로슬

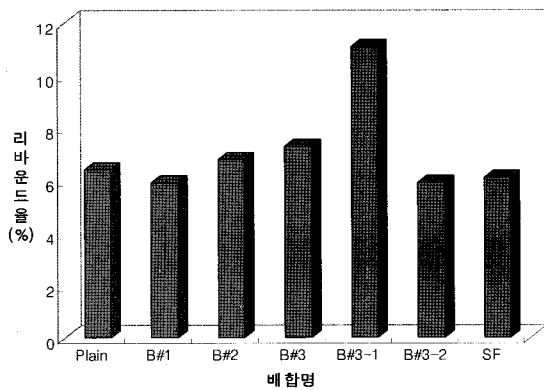


그림 12. 리바운드율 그래프

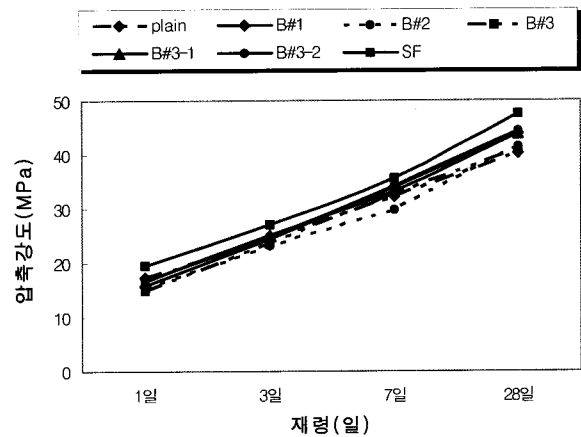


그림 13. 압축강도 그래프

표 17. 압축강도 실험 결과

구 분	재 령	압축강도 (MPa)			
		1일	3일	7일	28일
	Plain	17.2	24.5	32.3	40.2
	B#1	15.8	24.3	33.9	43.8
	B#2	15.3	23.2	29.8	41.4
	B#3	14.9	23.6	32.7	41.0
	B#3-1	16.5	25.1	33.2	44.0
	B#3-2	16.9	24.9	34.1	44.3
	SF	19.5	27.1	35.6	47.5

래그 분말도에 따라 1, 2, 3종으로 구분한 배합과 3종 고로슬래그에 KOH와 Na₂SO₄의 알칼리활성제를 첨가한 배합의 강도결과를 살펴보면, 3종 고로슬래그를 기준으로 수화특성을 촉진시키기 위해 알칼리활성제를 첨가한 배합이 각각 44MPa와 44.3MPa로 나타났으며, 이는 슬래그 분말도를 변화한 배합의 평균값 보다 약 11%정도 초기강도 증진 효과를 나타내었다. 즉, 고로슬래그가 물과 접한 직후 Ca²⁺가 용출되고, 그 표면에 투과성이 나쁜 ASH6의 유리구조가 형성된다. 하지만 알칼리활성제를 첨가하였을 경우 고로슬래그 미분말 입자의 유리질을 구성하고 있는 불규칙한 3차원 그물구조의 쇄상결합이 pH가 12 이상의 강알칼리에 의해 파괴되며, 이후 Al₂O₃, CaO, MgO 등이 쉽게 용출되어 수화반응을 시작되고, 이로 인해 고로슬래그 미분말의 잠재수경성을 수화초기에 이끌어 내어 초기강도가 증진된 것으로 판단된다(한국건설기술연구원, 2008).

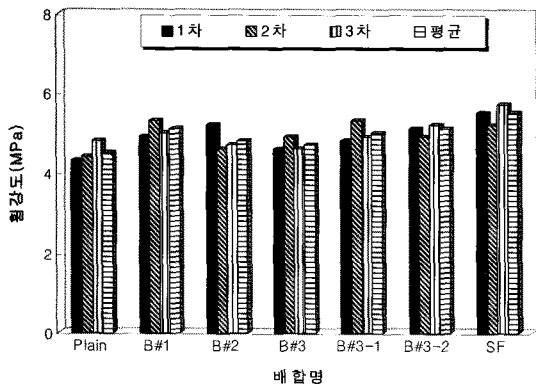


그림 14. 휨강도 그래프

5.4.3 휨강도 및 휨인성(등가휨강도)

숏크리트에서는 압축강도 보다 휨강도 및 휨인성이 중요한 요소로 작용한다. 표 18과 그림 14는 각 배합별 휨강도를 나타낸 것이며, 대체적으로 설계기준 휨강도인 4.5MPa를 상회하고 있음을 알 수 있다. 특히 압축강도의 경향과 휨강도의 경향이 비슷하게 나타났으며, 그중 실리카 흙 혼입배합이 5.5MPa로 가장 높게 나타났다. 또한 알칼리활성제 혼입배합 및 고로슬래그 1종배합(B#1)이 약 5.0MPa 정도로 나타났지만, 대체적으로 각 배합별 간 휨강도 차이의 경향성은 크게 나타나지 않았으며, 이는 휨강도가 콘크리트 매트릭스의 경화 상태 및 바인더 량에 영향을 받고 있음을 간접적으로 알 수 있었다. 압축강도 시편과는 달리 뱀 시편의 가공 상태나 시험 오차에 의해 측정하지 못하는 공시체가 존재해 시험의 정확성은 다소 부족한 면이 있으나, 전체적인 휨강도의 경향성을 파악에 도움이 되었다고 판단된다(마상준 등, 2006).

현장타설 시험 결과, 거취된 패널로부터 각주형 시편을 절단·가공 한뒤 재령 28일에 휨인성 평가를 실시하

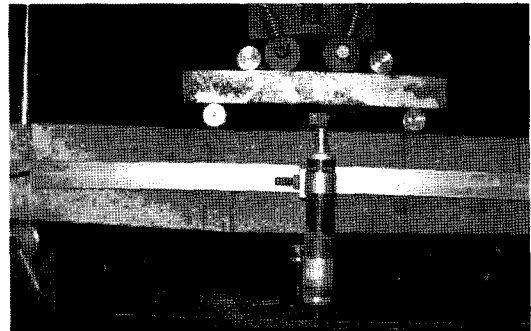


그림 15. 휨강도 및 휨인성 시험 모습

표 18. 휨강도 실험 결과

구 분	재령 28일 휨강도			
	1	2	3	평균
Plain	4.3	4.4	4.8	4.5
B#1	4.9	5.3	5.0	5.1
B#2	5.2	4.6	4.7	4.8
B#3	4.6	4.9	4.6	4.7
B#3-1	4.8	5.3	4.9	5.0
B#3-2	5.1	4.9	5.2	5.1
SF	5.5	5.2	5.7	5.5

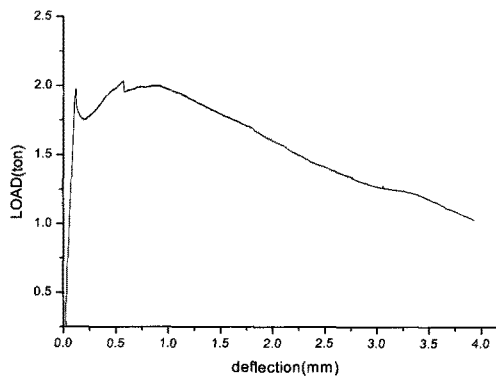
표 19. 등가휨강도 실험 결과

구 분	Plain	B#1	B#2	B#3	SF
등가휨강도비(%)	63.7	68.4	66.7	64.8	82.1

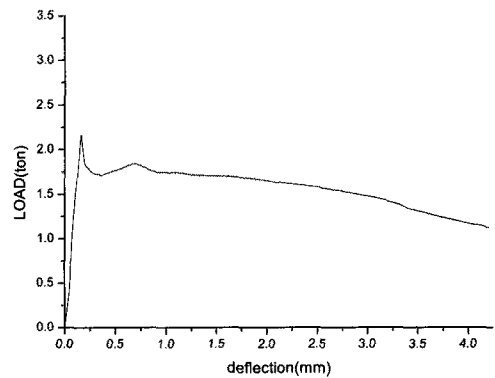
였다. 표 19는 각 배합별 등가 휨강도비를 나타낸 것으로, 각 배합별로 KS F 2781에서 제시한 최소 등가 휨강도 58% 이상을 나타내 품질 기준을 상회하는 것으로 나타났다. 특히, 실리카 흙을 혼입한 배합이 최소 등가 휨강도비 82.1%를 나타내 가장 우수한 성능을 발휘하였으며, B#1, B#2, B#3, Plain 순으로 각각 68.4%, 66.7%, 64.8%, 63.7%의 등가 휨강도비를 나타내었다.

그림 16은 각 배합별 하중-처짐 그래프를 나타낸 것이며, 모든 그래프에서 알 수 있듯이 초기 균열이 발생한 뒤에도 높은 인성을 나타내고 있다. 특히, 그림 16의

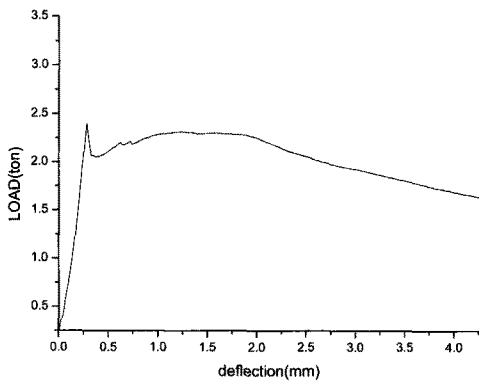
(f)실리카 흙 배합은 실리카흙의 특성인 고강도 공시체에서 나타나는 경향으로서, 매트릭스가 매우 치밀해서 강섬유를 부착하고 있는 부착력이 좋아져 결과적으로 휨인성이 우수하게 나타난 것으로 판단된다(마상준 등, 2006). 고로슬래그 미분말을 혼입한 각 배합들은 실리카흙 배합보다는 휨인성이 비교적 낮게 나타났지만, 실리카흙과 마찬가지로 부착성 향상에 의해 Plain 배합에 비하여 약 5%정도의 휨강도가 증진된 것으로 판단되며, 고로슬래그 미분말의 적용을 통해 숏크리트의 휨강도를 다소 증진시킬 수 있는 것으로 판단된다.



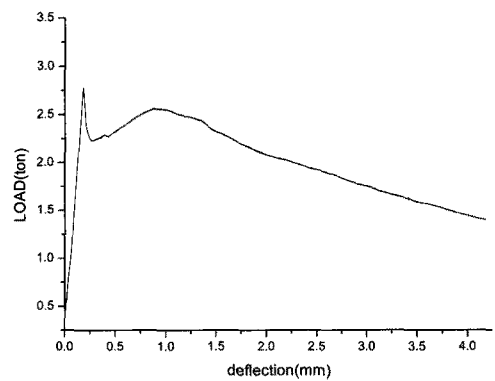
(a) Plain 배합



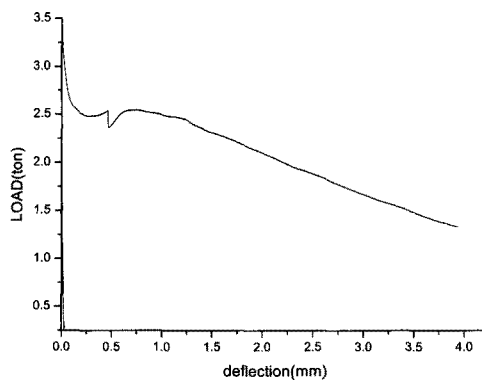
(b) B#3 배합



(d) B#2 배합



(e) B#1 배합



(f) SF 배합

그림 16. 하중-처짐 곡선

6. 결론

본 연구에서는 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 혼화재로 이용하여 레디믹스트 쏏크리트를 개발하고자 우선, SEM분석과 환경유해성 평가를 통해 레디믹스트 쏏크리트에 대한 고로슬래그 미분말의 적용성을 평가하였으며, 실내실험을 통해 굳지않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트의 기초물성 실험을 실시하였다. 또한 현장실험을 통해 고로슬래그 미분말의 쏏크리트 현장적용성에 대해 알아보았으며, 종합적인 결론은 다음과 같다.

- (1) 레디믹스트 쏏크리트에 고로슬래그 미분말을 적용함에 있어 강도발현 특성 및 환경적인 불안정 요인을 파악하고자 SEM 촬영을 통해 고로슬래그와 플레인 배합의 양생특성을 비교·분석하였으며, 이와 더불어 중금속 용출시험을 통해 유해물질의 검출 여부를 확인한 결과, 조직의 치밀화를 통한 강도증진과 유해항목 미검출로 환경적으로도 안전하다는 결론을 도출하였다.
- (2) 실내실험 결과, 골재최대크기(8mm)를 동일하게 적용했을 때 실리카 흙을 사용할 경우보다 고로슬래그 미분말을 쏏크리트 및 콘크리트 배합에 적용할 경우에 단위 수량이 감소되고 슬럼프 증가에 의해 강도증진 및 내구성 개선 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.
- (3) 현장실험 결과, 리바운드율, 압축강도, 휨강도, 휨인성의 모든 항목에서 고로슬래그 미분말의 레디믹스트 쏏크리트 적용가능성을 확인할 수 있었다. 또한 경제성 측면에서도 가격이 실리카 흙 가격의 약 5% 정도의 수준으로 더 저렴하기 때문에 고로슬래그 미분말을 고성능 쏏크리트나 고성능 콘크리트의 혼화재로 사용하는 것이 보다 유리하며, 그 사용량은 30% 이내로 치환하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 건설핵심기술개발사업에서 지원한 “산업부산물의 경제적 재활용과 시공품질 향상을 위한 분말형 레디믹스트(Ready-mixed) 쏏크리트 개발” 사업으로 수행된 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 국토해양부 (1999), 터널표준시방서.
2. 국토해양부 (2007), 터널설계기준.
3. 김기형, 최재진, 문한영 (1986), “레디믹스트 콘크리트의 공기량 손실에 관한 고찰”, *대한토목학회 학술발표회 개요집*, pp.37-42.
4. 마상준, 김동민, 최재석, 안경철, 김선명 (2006), “현장실험과 복합열화시험을 통한 고강도 쏏크리트의 장기내구성 검토”, *한국지반공학회 논문집*, Vol.22, No.10, pp.77-91.
5. 마상준, 최희섭, 김동민 (2008), “레디믹스트 쏏크리트의 적정 골재최대치수 제안을 위한 기초적 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제24권 제4호.
6. 마상준, 최재석, 김동민, 김재신 (2005), “고성능 쏏크리트 적용가능성 파악을 위한 쏏크리트 품질특성 검토”, *한국터널공학회 학술발표회 논문집*, pp.131-1331.
7. 이양규, 전준태, 김종열 (2004), “NATM 터널의 건설식 Shotcrete 강도시험에 관한 연구”, *대한토목학회논문집*, 제24권 2호, pp.239-245.
8. 최황, 이상수, 원철, 김동석, 정한웅 (2000), “고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성 및 경제적인 효과에 관한 연구”, *대우건설기술*.
9. 한국건설기술연구원 (2006), “쏏크리트 장기 내구성 평가 및 체기준 제정 연구”.
10. 한국건설기술연구원 (2008), “산업부산물의 경제적 재활용과 시공품질 향상을 위한 분말형 레디믹스트 쏏크리트 개발”.
11. 한국건설기술연구원 (1998), “고속전철 터널기술 개발(2차년도 연차보고서)”.
12. 한국콘크리트학회 (1997), “콘크리트혼화재료”.
13. 한국도로공사 (2002), “터널지보공 관련 품질기준 개정 및 시공시 유의사항”.
14. 한국도로공사 도로연구소 (2001), “강섬유보강 쏏크리트의 성능향상 및 품질기준 정립(II)”. *도로연 01-37*.
15. 沼田 (1986), “시멘트·콘크리트用 混和材料”, 技術書院.
16. EFNARC (1996), European Specification for Sprayed Concrete
17. P.Kumar Mehta and Paulo J.M.Monteiro, “Microstructure, Properties and Materials”, *Third Edition*, Chapter 3, pp.49-84.

(접수일자 2009. 2. 2, 심사완료일 2009. 7. 13)