



고로슬래그와 무수석고가 숏크리트의 강도에 미치는 영향

유성희¹⁾ · 신경준²⁾ · 김윤용^{2)*}

¹⁾(주)유니온 연구소 ²⁾충남대학교 토목공학과

Influence of Blast Furnace Slag and Anhydrite on Strength of Shotcrete

Sung Hee Ryu,¹⁾ Kyung-Joon Shin,²⁾ and Yun-Yong Kim^{2)*}

¹⁾Researcher, R&D Department, Union Corporation, Cheongwon 863-852, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT This study investigated the compressive strength, flexural strength, setting time, and rebound when blast furnace slag and anhydrite, which are widely used mineral admixtures for concrete, are applied to shotcrete. When Ordinary Portland Cement (OPC) was replaced at a rate of 10% with blast furnace slag and anhydrite, the initial and final setting time requirements were all satisfied. However, when OPC was replaced at a rate of 20%, final setting was delayed, revealing that this mixture was not suitable for shotcrete. Compressive strength test results showed that the mixture with 10% OPC replacement rate met the target strength at 1 day and 28 days for permanent tunnel support usage. Particularly, the mixture designed with OPC replacement by blast furnace slag and anhydrite at rates of 5% showed the highest compressive strength. Rebound measurements revealed that this mixture exhibited excellent performance with 23% reduction in the rebound compared to the shotcrete that was produced with only OPC binder.

Keywords : blast furnace slag, anhydrite, strength, setting time, rebound

1. 서 론

최근 산업의 발전으로 인구이동 및 물류운송, 교통흐름 속도향상을 위해 대단면, 초장대 터널 및 GTX(great train express), 서울시 지하철도로(U-smartway)등 사회기반 시설공사를 진행함에 있어 터널의 중요성이 강조되고 있다. 터널공법중에서 NATM(new austrian tunneling method) 공법은 가장 많이 사용되는 방법이다. 굴착 후 지하 공간 및 터널에 특수 장비를 사용한 콘크리트 뿌어붙이기(sprayed concrete)작업을 숏크리트라 하며, 1차 지보재로 암반에 밀착하여 이완방지 및 터널에 작용하는 지압을 외력으로 전달하는 효과가 있다. 기존 터널공법에서는 숏크리트 후에 주로 2차 라이닝을 진행하는데, 국외의 경우 영구지보 개념의 싱글셸 공법(permanent single shell)을 적용한 현장을 많이 볼 수 있다. 싱글셸 공법의 이점은 굴착크기의 감소, 전체 라이닝 두께의 감소, 2차 라이닝 생략, 매립쓰레기와 절차의 감소로 인한 공사기간 단축 등 여러 가지 장점이 있다.¹⁾ 싱글셸 공법을 적용하기 위해서 고강도의 숏크리트가 필요한데, 유럽통합규격

(EFNARC)은 28일 압축강도 30 MPa 이상, 일본은 28일 압축강도 36 MPa 이상 기준을 정하고 있다. 1990년대 이후 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 대체하여 숏크리트의 성능을 향상시키는 혼화제로서 실리카폼 15% 이내(권장 사용량 5~10%), 플라이 애쉬와 고로슬래그는 각각 30% 이내를 사용하고 있는 실정이다.^{1,2)}

국내의 고강도 숏크리트 혼화제 연구는 국외 연구사례에 비하여 활발하지는 않으나, 실리카폼의 사용량에 따라 고강도 숏크리트의 최적배합을 연구한 사례가 있다.^{3,4)} 실리카폼을 사용하면 포졸란 반응으로 조직이 치밀해져 장기내구성 및 장기강도가 증가한다. 그러나 OPC에 비하여 높은 분말도를 갖고 있어 단위수량 및 고성능 감수제의 사용이 증가하는 단점이 있다. 또한 국내 수급이 부족하여 해외 수입에 의존하기 때문에 실리카폼은 OPC에 비하여 15~20배 고가이다. 또한 메타카올린을 숏크리트 배합설계에 적용하여 실리카폼과 유사하게 장기강도를 증진한 연구사례가 있다.⁵⁾ 메타카올린은 실리카폼과 같이 포졸란 반응을 하지만, 슬럼프 확보를 위해 고성능 감수제의 사용이 증가하며, 초기강도 증진이 미약한 단점이 있다.⁶⁾ 또한, 메타카올린의 가격은 실리카폼의 70~80% 정도로 형성되어 있어 경제성이 크게 떨어진다.

한편, 고로슬래그를 사용하여 숏크리트 강도증진을 얻

*Corresponding author E-mail: yunkim@cnu.ac.kr
 Received November 22, 2011, Revised January 9, 2012,
 Accepted January 25, 2012
 ©2012 by Korea Concrete Institute

구한 사례가 있다.⁷⁾ 산업부산물인 고로슬래그의 활용으로 경제성 및 장기내구성이 향상되지만, 슬래그의 수화반응 지연으로 인해 초기강도의 발현이 미흡한 단점이 있다.

일본에서는 종래의 방법과 달리 에트린자이트를 다량으로 생성시키는 무수석고계 혼화재를 실용화하여 칼슘실퍼알루미네이트계(CSA) 급결제와 함께 고강도 숏크리트에 적용한 사례가 있다.⁸⁾ 하지만, CSA 급결제와 무수석고계 혼화재는 국내에 잘 알려지지 않은 상태이며, 관련 연구 자료도 많이 부족한 실정이다.

고로슬래그는 고로에서 생성된 부산물이며, 무수석고는 인산제조시 생성되는 부산물로 각각 700만톤/year, 200만톤/year이 발생하며, 폐기물 처리시 큰 비용이 요구되는 반면, 혼화재로 판매될 때의 가격은 OPC에 비하여 약 1~1.5배로서 저렴한 편이다. 따라서 실리카폼과 메타카올린을 이용하면 배합설계시 단위체적당 약 2배의 비용이 상승되지만, 고로슬래그와 무수석고를 사용하면 OPC와 유사한 가격으로 제조가 가능하므로 우수한 경제성을 확보할 수 있다.

1990년대 후반부터 국내외에서는 고로슬래그와 무수석고를 함께 활용하여 콘크리트 강도를 향상시키는 연구가 꾸준히 이루어져 왔다.^{9,12)} 이러한 연구를 통하여 고로슬래그와 무수석고의 혼용이 콘크리트의 역학적 성능을 향상시키고, 재료의 친환경성과 경제성을 확보할 수 있음이 널리 인식되고 있다. 그러나 고로슬래그와 무수석고를 함께 적용하는 사례는 PC과일, 저발열 시멘트 콘크리트 제조 등 일반 콘크리트 분야에 한정되고 있으며 이를 숏크리트에 적용한 사례는 전무한 실정이다.

숏크리트가 영구지보재로 설계되기 위해서는 1일과 28일 압축강도가 각각 10 MPa과 35 MPa이상의 기준¹³⁾을 만족하여야 한다. 고로슬래그와 무수석고를 OPC와 함께 숏크리트에 사용할 경우, 숏크리트의 1일 강도와 28일 강도의 개선이 기대되므로 이에 대한 연구가 충분한 실용성과 현장 적용성을 갖고 있다고 판단된다. 따라서 이 논문에서는 고로슬래그와 무수석고가 숏크리트의 강도에 미치는 영향을 평가하는 데에 중점을 두었다. 고로슬래그와 무수석고의 혼합 비율과 OPC 치환율을 변수로 두고 1일, 28일 압축강도와 휨강도를 측정하였고 조기 응결특성, 리바운드 특성, 점성 등을 측정하여 숏크리트의

시공성을 평가하였다.

2. 사용 재료

2.1 시멘트 및 골재

시멘트는 국내 A사에서 시판되는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 그 물리적 특성은 Table 1과 같다. 굵은골재의 최대치수는 10 mm이며, 잔골재는 강모래를 사용하였다.

2.2 혼화재

고로슬래그는 선철공정 중 부산물로 생성되는 3종 고로슬래그이며, U사 제품이다. 비표면적(blaine)은 4,000~6,000 cm²/g이며 무수석고는 II형-무수석고로 인산제조시 발생하는 인산 부생석고(화학석고)로 약 700°C에서 제조된다. T사의 제품이며, 비표면적은 5,500 cm²/g으로 외관은 회백색이다. 고로슬래그와 무수석고의 화학성분은 Table 2와 같다.

2.3 급결제

급결제는 숏크리트 작업시 필요한 재료로 콘크리트에 첨가하면 수초 내에 응결된다. 사용된 급결제는 국내 U사에 시판중인 칼슘알루미네이트계(C₁₂A₇)로서 소량의 급결 보조제가 첨가되어 있는 것으로 외관은 백색에 가까운 회색이다. 시멘트계와 유사한 형태이므로 친환경적이며, 급결력이 매우 우수한 것으로 알려져 있다.

2.4 고성능감수제

이 연구에서 사용한 고성능감수제는 액상형태의 폴리카본산계로서 시멘트 분산작용과 미세 공기의 연행을 통하여 단위수량 저감을 목적으로 사용되었다. 고성능감수제의 물리적 특성은 Table 3과 같다.

3. 예비 모르타르 실험

3.1 모르타르 배합설계

Table 1 Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	44 μm on residue (%)	Setting time (min)		Compressive strength (MPa)		
			Initial set.	Final set.	3 days	7 days	28 days
3.14	3,200	12.5	240	370	22.5	30.0	39.5

Table 2 Chemical compositions of slag and anhydrite

(Unit: %)

Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Total
Slag	33.4	15.8	0.6	41.8	5.3	0.3	0.3	1.5	99.0
Anhydrite	2.5	0.08	0.10	39.1	0.67	-	-	57.2	99.65

Table 3 Physical properties of high range water reducing admixture

Type	Appearance	Density (g/cm ³)	pH	Content of solid (%)
AE-HRW ⁽¹⁾	Light brown liquid	1.06±0.05	6.5±1.0	41~45

⁽¹⁾Air-entraining high-range water reducing admixture

숏크리트 실험에 앞서 혼화재(고로슬래그와 무수석고)의 OPC 치환율 범위를 결정하고자 모르타르 예비실험을 수행하였다. 사전시험을 통하여 고로슬래그 80% 이상일 때에는 1일 강도가 미달하였고, 무수석고 80% 이상은 종결시간 기준을 만족하지 못하여 고로슬래그와 무수석고의 혼합비율을 1:1 중량비로 고정하였고, 혼화재의 OPC 치환율을 변수로 고려하였다. 따라서 OPC 치환율을 Table 4와 같이 0%, 5%, 7%, 10%, 12%, 15%, 20%로 두어 압축강도 시험을 하였다. 20%를 초과하는 경우, 사전 시험에서 1일 강도가 급격히 저하하여 변수에서 제외하였다. 숏크리트에 적용할 고로슬래그와 무수석고의 최종 혼합비율은 4절에서 기술하는 콘크리트 실험에서 결정하고자 한다.

3.2 모르타르 시험체 제작

숏크리트용 급결제 품질규격(KCI SC 102)에 준하여 시험체를 제작하였다. 현장 숏크리트 시공을 고려하여 비닐봉지에 담긴 모르타르에 OPC 중량대비 5%의 급결제를 투입하여 10초간 잘 흔들어 골고루 혼합한 후, 다짐봉으로 다짐작업을 하여 시험체를 제작하였다. 습윤양생장치(RH 90% 이상)에서 1일 양생 후에 23±2°C의 수중양생조에서 양생하였다. 각각 재령일(1일, 7일, 28일)에 해당하는 시험체는 3개씩 제작하여 압축강도의 평균값을 측정하였다.

3.3 예비실험 결과

혼화재(고로슬래그:무수석고=1:1)의 치환율에 따른 모

Table 4 Mix proportion of mortar

OPC replacement ratio (%)	W/C (%)	OPC (g)	Sand (g)	CM ⁽¹⁾ (C×wt)	Mineral admixture
0 (plain)	50	300	900	5%	Slag: anhydrite =1:1
5					
7					
10					
12					
15					
20					

⁽¹⁾Cement mineral accelerator

Table 5 Compressive strength of mortar

OPC replacement ratio (%)	Compressive strength (MPa)		
	1 day	7 days	28 days
0	16.1±1.4	26.7±1.9	36.1±2.8
5	14.7±1.6	29.2±3.1	38.8±2.6
7	17.4±1.1	29.3±1.5	40.3±3.1
10	21.4±1.2	39.7±2.7	48.5±2.8
12	21.0±2.4	44.0±3.1	48.9±3.4
15	17.5±2.6	45.3±1.4	50.8±1.7
20	13.8±1.3	47.9±3.3	52.5±1.3

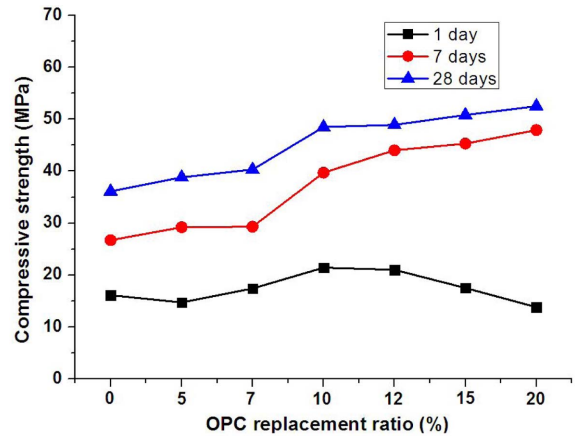


Fig. 1 Compressive strength of mortar plotted as a function of OPC replacement ratio

르타르 압축강도의 시험 결과는 Table 5와 Fig. 1에 나타내었다. 치환율 10%에서 1일 및 28일 강도가 각각 plain에 비하여 약 33%, 34% 높은 값을 나타냈다. 또한 치환율 20%에서 가장 높은 28일 강도(평균 52.5 MPa)가 측정되었다. 따라서 모르타르 실험 결과 초기 및 장기강도가 모두 우수한 10%와 가장 높은 28일 강도를 나타낸 20% 치환율을 변수로 선정하여 콘크리트 배합실험에 적용하기로 결정하였다.

4. 시험계획 및 방법

4.1 배합설계

3.3절에서 기술한 바와 같이 예비 모르타르 실험의 결과, 시멘트 중량의 10%, 20%를 혼화재 치환율로 하고, 고로슬래그와 무수석고의 비율은 Table 6과 같이 5가지 혼합비율을 적용하였다.

이 연구에서는 시멘트 혼화재로 고로슬래그와 무수석고의 숏크리트 적용성을 평가하기 위해 슬럼프는 120±25 mm, 공기량은 4±1%인 Table 7의 숏크리트 배합설계를 결정하였다. 물시멘트비 40%는 OPC와 혼화재를 사용하는 기준의 숏크리트 현장 배합을 토대로 결정하였고, 잔골재를 60%, 굵은골재 최대치수 10 mm는 고속도로공사 전

Table 6 Amount of slag and anhydrite used for OPC replacement in terms of weight fraction

Type	Slag (wt.%)	Anhydrite (wt.%)
1	30	70
2	40	60
3	50	50
4	60	40
5	70	30

문시방서¹⁴⁾에 근거하여 적용하였다. 모든 배합에 사용된 급결제량은 제조사의 권장 사용량인 결합재 중량의 5%로 하였고, 고성능 감수제는 기존의 쏫크리트 현장에서 사용하는 수준인 결합재 중량의 1%, 강섬유량은 40 kg/m³ (체적비는 약 0.5%)로 선정하였다. 이러한 기본 배합을 바탕으로 Table 6의 5가지 혼합비율을 적용하여 최종 11개의 배합을 시험에 적용하였다.

4.2 시험체 제작

휨, 압축강도를 평가하기 위하여 콘크리트 믹서에 골재(잔골재, 굵은골재), 시멘트, 혼화제를 순서대로 넣고 건식 혼합 후 물과 고성능 감수제를 넣고 약 3분간 혼합하였다. 시험체는 믹서에서 혼합한 콘크리트 반죽을 계량하여 급결제와 함께 비닐봉지에 넣고 10초간 골고루 혼합한 후, 원주형(φ100×200 mm)몰드에 넣어 제작하였다. 재령별(1일, 7일, 28일)로 3개의 시험체를 제작하여 압축강도를 측정하였다. 시험체 제작 과정은 Fig. 2에 나타나었다. 휨강도를 평가하기 위하여 150×150×550 mm 시험체를 재령별(1일, 28일)로 3개씩 제작하였고 그 제조 과정은 압축강도 시험체와 동일하다. 모든 시험체는 1일 온도 23±2 C, 상대습도 50~55%의 실내에서 양생하였고, 1일 이후부터는 온도 23±2°C 조건으로 수중양생을



Fig. 2 Specimen preparation for compressive test

실시하였다.

4.3 시험 방법

4.3.1 응결시간 시험

쏘크리트의 응결시간 시험은 한국콘크리트학회의 KCI SC 102¹⁵⁾에 따라 모르타르 샘플을 준비하고 급결제 5% 첨가하여 응결시간 시험을 실시하였다.

4.3.2 압축강도 시험

쏘크리트의 압축강도는 KS F 2405에 따라 200톤 용량의 만능시험기를 사용하여 측정하였다.

4.3.3 휨강도 시험

쏘크리트의 휨강도는 KS F 2408에 준하여 3등분점 재하시험으로 측정하였다. 사용된 기기는 50톤 용량의 유압식 만능시험기이다.

4.3.4 리바운드 시험

Table 7 Mix proportion of shotcrete

Type	W/B (%)	Replacement ratio (%)	Unit weight (kg/m ³)						Admixtures
			W	C	Slag ⁽¹⁾	Anhydrite	S	G	
Plain	40	-	188	470	-	-	960	665	CM ⁽²⁾ (C×wt 5%) AE-HRW ⁽³⁾ (C×wt 1%)
I-1		10	188	423	14.1	32.9	960	665	
I-2			188	423	18.8	28.2	960	665	
I-3			188	423	23.5	23.5	960	665	
I-4			188	423	28.2	18.8	960	665	
I-5			188	423	32.9	14.1	960	665	
II-1		20	188	376	28.2	65.8	960	665	
II-2			188	376	37.6	56.4	960	665	
II-3			188	376	47	47	960	665	
II-4			188	376	56.4	37.6	960	665	
II-5	188		376	65.8	28.2	960	665		

⁽¹⁾Blast furnace slag, ⁽²⁾Cement mineral accelerator, ⁽³⁾Air-entraining and high ranger water reducing admixture

리바운드 성능을 평가하기 위하여 2 m³의 슛크리트를 터널 천장부와 벽면에 타설할 때 바닥에 떨어지는 재료를 수거하여 중량을 측정하였다. 측정된 중량을 타설된 슛크리트의 총 중량에 대한 백분율, 즉 리바운드율로 환산하여 리바운드 성능을 정량화하였다.

5. 시험 결과

5.1 응결시간

고로슬래그와 무수석고의 혼합비율 및 치환율에 따른 응결시간 결과를 Table 8에 나타내었다. 10%, 20% 치환 조건에서 초결은 한국콘크리트학회(KCI SC 102)의 기준인 5분 이내를 모두 만족하였다. 10% 치환율 조건은 고로슬래그와 무수석고의 혼합비율에 상관없이 종결기준 15분을 만족하지만, 20% 치환율 조건은 II-4, II-5를 제외한 모든 배합이 종결기준을 만족하지 못하는 결과가 나타났다. Table 8의 결과를 분석해보면 10% 치환율 조건에서 고로슬래그의 비율이 높아질수록 응결시간이 짧아지며, 종결시간이 40~50% 단축되는 결과가 나타났다. 이는 급결제가 OPC 내부의 황산염과 반응하여 에트린자이트를 급격하게 생성하여 응결시간이 단축된 것이라 판단된다.

20% 치환율 조건에서 Fig. 3(b)와 같이 종결시간이 지연되었는데, OPC 내부에 무수석고가 10%이상 과량의 황산염이 존재하게 되면, 응결에 기여하지 못하는 미반응 황산염이 그대로 남아 있게 되어 지연에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 또한 와파나베 등¹⁶⁾의 연구 결과에 따르면, 무수석고의 양이 6%이상일 경우, 응결 지연효과를 나타내는 것으로 보고되고 있어 위의 결과와 유사한 경향을 나타낸다. 따라서 무수석고의 양이 6%이하이면서 초결과 종결이 빠르게 나타난 I-3, I-4, I-5이 슛크리트에 적합한 배합인 것으로 판단된다.

Table 8 Setting time of cement mortar

Type	Setting time (min:sec)	
	Initial setting time	Final setting time
Plain	0:48	12:10
I-1	0:56	10:10
I-2	0:49	7:30
I-3	0:45	6:10
I-4	0:47	5:40
I-5	0:44	6:50
II-1	1:50	19:30
II-2	1:40	17:40
II-3	1:20	16:20
II-4	1:15	11:10
II-5	1:10	9:30

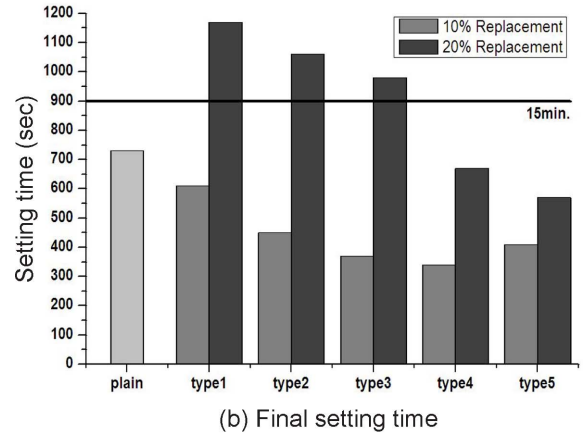
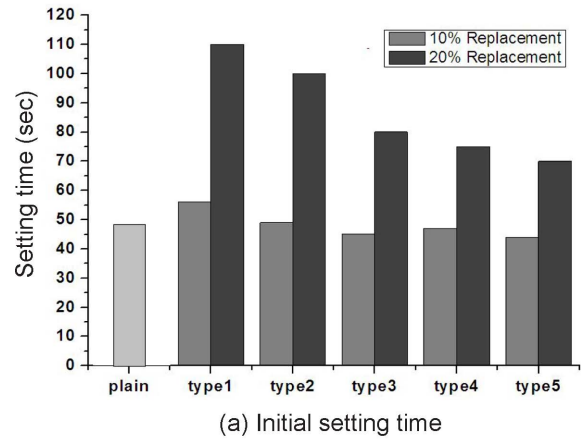


Fig. 3 Setting time with respect to replacement ratio

5.2 압축강도

고로슬래그와 무수석고의 혼합비율 및 치환율에 따른 압축강도 결과를 Table 9와 Fig. 4(a), (b)에 나타내었다. 결과에 따르면 모든 배합이 슛크리트가 영구지보재로 설계되기 위한 압축강도 기준, 즉 1일에 10 MPa과 28일에 35 MPa이상의 기준은 만족하는 것으로 나타났다.

I-시리즈의 배합에서 1일 압축강도는 무수석고의 비율이 높을수록 높은 강도를 보였다. Fig. 4(a)는 10% 치환율의 압축강도를 나타내는데, I-1의 1일 강도가 Plain 배합에 비하여 38.7% 향상된 것으로 측정되었다. 무수석고에 포함된 황산염이 C₃A와 반응하여 에트린자이트가 모세관 공극 안에서 다량생성이 촉진되어 초기강도가 향상되었다고 판단된다. 또한 II형-무수석고는 이수석고, 반수석고, III-형 석고 등의 다른 형태의 석고보다 초기반응속도가 빠르며, C₃S 수화반응이 촉진시키기 때문에 초기강도 증가에 기여한 것으로 판단된다.¹⁷⁾ 반면, I-1과 같이 무수석고의 치환율이 높은 배합은 낮은 28일 강도를 나타내는 특성이 있다.

I-시리즈의 배합에서 28일 압축강도는 고로슬래그의 비율이 높은 I-5 배합이 plain에 비하여 31.9% 향상된 강도가 나타났다. 칼슘알루미네이트계 급결제를 사용하면, 장기강도가 낮아지는 것이 일반적인데,^{8,19)} 고로슬래그의 잠재수경성 반응으로 경화체의 미세구조가 치밀해져 장기

Table 9 Average compressive strength

Type	Compressive strength (MPa)		
	1 day	7 days	28 days
Plain	16.0	35.8	41.3
I-1	22.2	44.8	49.7
I-2	19.8	40.8	48.8
I-3	20.5	46.8	54.8
I-4	16.8	35.2	49.0
I-5	18.1	37.8	54.5
II-1	13.0	33.5	40.1
II-2	13.5	33.1	46.0
II-3	14.5	43.2	51.1
II-4	15.5	39.3	50.4
II-5	14.9	38.1	45.1

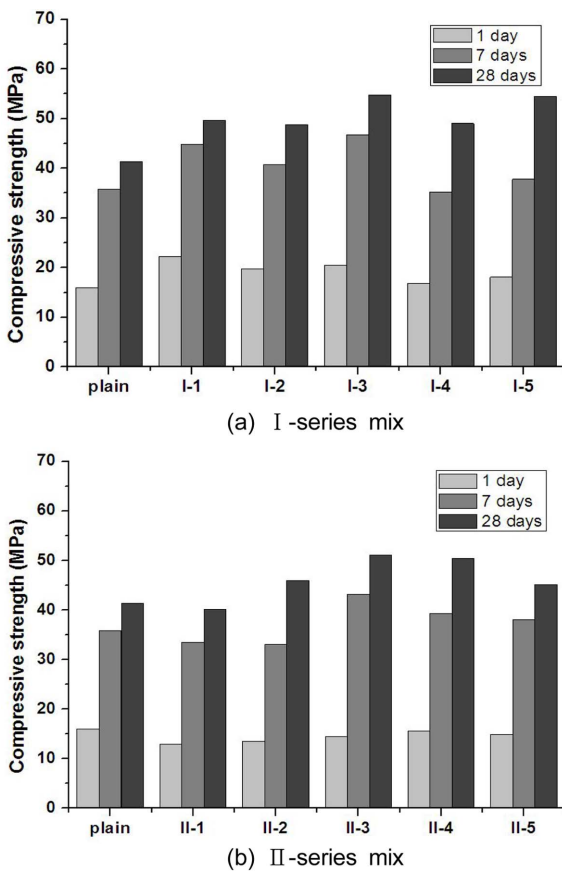
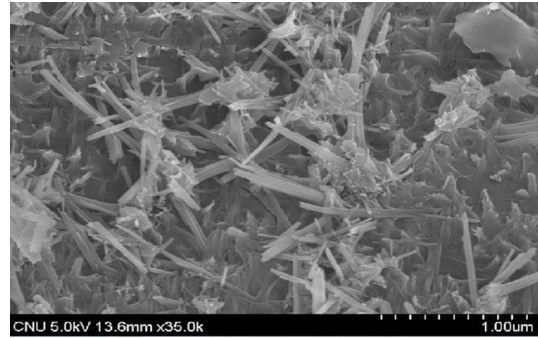


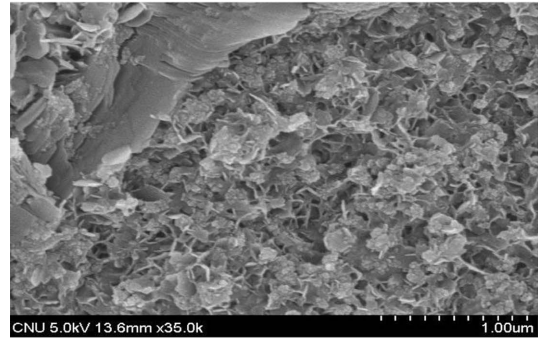
Fig. 4 Compressive strength

강도가 증가한 것으로 판단된다. 반면, I-5와 같이 고로슬래그의 치환율이 높은 배합은 낮은 초기강도를 보이는 특징을 나타내었다.

II-시리즈 배합, 즉 20% 치환율(Fig. 4(b))일 경우에는 전반적으로 10% 치환율에 비하여 낮은 압축강도를 나타내었다. 이는 미반응 황산염의 응결 지연효과가 강도발현 지연의 결과로 나타났기 때문인 것으로 판단된다. 또한 기존의 연구에 따르면 OPC 내부에 10%이상 무수석고가 존재하게 되면 초기, 장기강도가 전체적으로 감소



(a) 1 day



(b) 28 days

Fig. 5 SEM images taken from the samples at the age

한다는 유사한 결과가 보고된 바 있다.¹⁸⁾

따라서 1일, 7일, 28일 압축강도의 결과를 종합하여 볼 때에 모든 재령에서 높은 강도 특성을 나타낸 I-3이 고강도 숏크리트로서 가장 적합한 배합이라 판단하였다. I-3배합은 고로슬래그와 무수석고의 OPC의 치환율이 각각 5%로 동일한 양이 혼입된 경우이다.

재령에 따른 숏크리트의 조직구조 차이를 관찰하기 위하여 에탄올에 침적한 1일과 28일의 경화체를 장방출 주사전자현미경II(SEM)로 촬영하였다. Fig. 5(a), (b)는 각각 1일, 28일 경과된 샘플의 SEM 사진으로서 배율은 35,000배이고 한 눈금의 크기는 1 μm이다. Fig. 5(a)는 1일 경과된 조직사진으로 짧은 침상형태의 에트링자이트가 주로 관찰된 반면, Fig. 5(b)는 작은 알갱이 형태의 C-S-H겔이 공극 내부에 주로 관찰되어 고로슬래그의 잠재수경성 물질이 조직을 치밀하게 채우고 있음을 알 수 있다.

5.3 휨강도

재령 1일과 28일에 측정된 3개 휨강도의 평균값을 Table 10과 Fig. 6(a), (b)에 나타내었다. 모든 배합이 설계기준 휨강도인 4.5 MPa보다 높게 나타났다. 압축강도와 비슷한 경향으로 무수석고의 영향으로 초기강도가 증가하고, 슬래그의 잠재수경성물질이 장기강도 증진에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 전반적으로는 고로슬래그와 무수석고의 혼합비율의 영향이 휨강도에는 크게 나타나지 않았다. 이는 강섬유의 혼입으로 인하여 혼화제의 영향이 상대적으로 크게 나타나지 않은 것으로 판단된다.

Table 10 Average flexural strength

Type	Flexural strength (MPa)	
	1 day	28 days
Plain	2.34	4.63
I-1	2.29	4.81
I-2	2.54	5.09
I-3	2.27	5.26
I-4	2.46	5.21
I-5	2.43	5.24
II-1	1.96	4.72
II-2	2.28	4.86
II-3	2.20	5.17
II-4	2.32	5.03
II-5	2.04	5.01

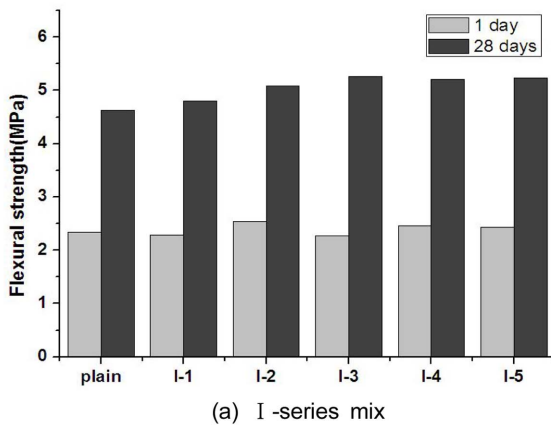
Table 11 Rebound test result

Type	Total weight (kg)	Rebound weight (kg)	Rebound ratio (%)
Plain	4,648	515.9	11.1
I-3	4,648	396.4	8.5

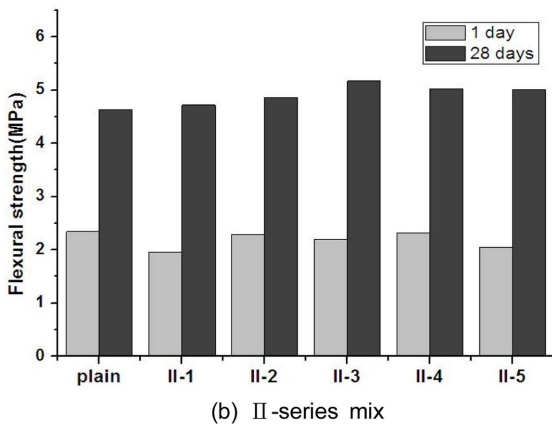


(a) Overhead surface (b) Vertical surface

Fig. 7 Spraying of shotcrete



(a) I-series mix



(b) II-series mix

Fig. 6 Flexural strength

5.4 리바운드

리바운드 시험은 터널현장에서 수행하였다. 배치플랜트에서 고로슬래그와 무수석고를 미리 혼입하였고 타설 방식은 슛크리트 머신을 이용한 습식방식이었다. 콘크리트 표준시방서에 따라 노즐을 타원형으로 회전하며 타설하였고, Fig. 7에 나타난 바와 같이 타설면의 수직으로 1m 이격하여 뿔어붙이기를 시행하였다. Table 6의 다양한 배합에 대하여 실험을 수행하고자 했으나, 현장 여건상 응결시간, 압축강도 및 휨강도가 가장 우수한 I-3 배

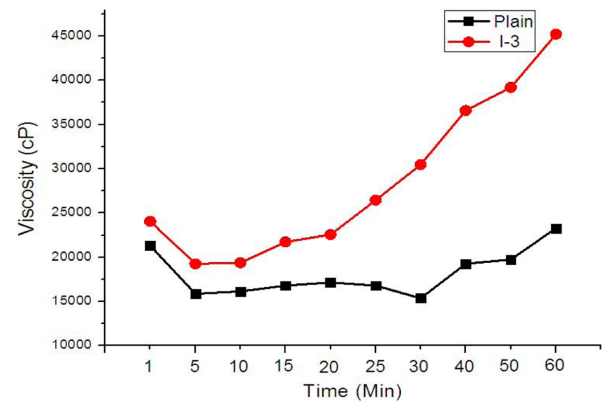


Fig. 8 Viscosity of cement paste plotted as a function of time after mixing

합과 plain 배합의 리바운드를 시험하여 그 결과를 Table 11에 나타내었다. 4.3.4절에서 언급한 바와 같이 리바운드율은 슛크리트 시공 중에 바닥에 떨어진 재료의 중량을 총 타설된 재료의 중량에 대한 백분율로 나타내었다.

시멘트 광물계 급결제 리바운드율의 평균은 13~15%이며, plain 배합의 리바운드 결과는 매우 양호한 편에 속한다. 고로슬래그와 무수석고가 첨가된 I-3배합의 리바운드율은 8.5%로서 plain배합(11.1%)에 비하여 23% 감소된 것으로 나타나 크게 개선된 결과를 보여주고 있다.

리바운드율은 슛크리트 반죽의 점성 차이에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로²⁰⁾ plain과 I-3 배합의 점성을 측정하였다. 이 배합에는 급결제를 첨가하지 않으므로써 터널 현장의 대기시간동안 급결제 영향 없이 시멘트풀의 점성이 변하는 것을 모사하여 측정하였다. 실험에 사용된 기기는 회전점도계(brookfield/DV-E viscometer)이다. 물결합재비는 동일하게 40%로 두었고, 2 rpm의 일정한 속도로 회전하는 조건에서 점성을 측정하였다.

Fig. 8에 도시한 바와 같이, I-3 배합의 경우에는 plain 배합에 비하여 높은 점성을 유지하면서 특히 비빔 후 20분이 경과한 시점부터는 시멘트풀 점성이 급격하게 상승하는 특성을 나타내었다. 일반적으로 터널 현장에서 비

빔 이후에 30~60분 정도의 대기시간이 있는 조건을 감안하였을 때에 비빔 이후 20분이 경과한 다음에 시멘트 풀의 점성이 증가하는 특성은 슛크리트 타설면의 점착력을 증가시키는 효과로 나타나게 된다. 이러한 점착력의 증가로 인하여 I-3 배합의 리바운드가 현저히 감소하게 된 것으로 사료된다.

6. 결 론

이 연구는 고로슬래그와 무수석고를 고강도 슛크리트에 적용하기 위하여 고로슬래그와 무수석고의 사용이 슛크리트의 강도에 미치는 영향을 평가하였다. 고로슬래그와 무수석고의 혼합 비율과 OPC 치환율을 변수로 두고, 물시멘트비 40%, 잔골재율 60%, 급결제량 5%(시멘트 중량대비)로 설계된 슛크리트 배합의 응결시험, 압축강도, 휨강도, 리바운드 등을 측정하였다.

- 1) 응결시험 결과, 고로슬래그와 무수석고는 급결제와 반응하여 응결시간을 단축시키는데 효과적이었다. OPC 10% 치환율의 경우, 초결과 종결의 조건을 모두 만족하였다. 반면 OPC 20% 치환율은 종결이 지연되었는데, 이는 무수석고가 과량 혼입되어 무수석고에 존재하는 황산염이 응결에 기여하지 못하는 미반응 상태로 남아 있기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 응결시간으로 판단할 경우, 빠른 초결 및 종결 시간을 나타내면서 무수석고의 양이 과다하지 않은 I-3, I-4, I-5가 슛크리트의 배합으로서 적합한 것으로 나타났다.
- 2) OPC 10% 치환율 배합은 영구지보재로서 목표강도를 모두 만족하였다. 특히 고로슬래그와 무수석고의 OPC의 치환율이 각각 5%로 동일한 양이 혼입된 I-3의 1일, 7일, 28일 압축강도가 가장 우수한 것으로 나타났다. 이는 무수석고의 혼입으로 생성된 에트린자이트가 1일 강도를 증진시키고, 고로슬래그의 잠재수경성 물질이 28일 강도를 증진시키는 효과가 함께 나타났기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 I-3 배합이 영구지보재로서 활용할 수 있는 고강도 슛크리트의 배합으로서 가장 적합하다고 판단하였다. 반면 OPC 20% 치환율의 배합은 모든 재령에서 OPC 10% 치환율에 비하여 전반적으로 낮은 압축강도를 나타내었다.
- 3) 휨강도는 모든 배합에서 설계기준 휨강도인 4.5 MPa 보다 높게 나타났다. 또한 고로슬래그와 무수석고의 혼합비율이 휨강도에 거의 영향을 미치지 않았는데, 이는 강섬유의 혼입으로 인하여 혼화재의 영향은 상대적으로 감소되었기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) 고로슬래그와 무수석고가 1:1이고, OPC 치환율이 10%인 I-3배합의 리바운드율은 OPC만을 결합재로 사용한 plain 배합에 비하여 23% 감소되는 우수한 결과를 나타내었다. 이는 고로슬래그와 무수석고가 콘크리트 반죽의 점성을 증가시킴으로 인해 슛크리

트 타설시 타설면의 점착력이 증가되어 압반 부착력이 향상된 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년 국토해양부 첨단도시개발사업의 지원(11CHUD-C058202-01)을 받아 수행되었으며, 이에 대한 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. Melbye, T. A. and Dimmock, R. H., "Modern Advances and Applications of Sprayed Concrete," *Proc. of the Int. Conf. on Engineering Developments in Shotcrete*, Tasmania Australia, Keynote Paper, 2001, pp. 7~13.
2. EFNARC, *European Specification for Sprayed Concrete*, Published by EFNARC, 1996, pp. 5~8.
3. 원종필, 김황희, 박경훈, 이시원, "급결제 종류 및 실리카폼 치환율에 따른 영구지보재로서 슛크리트의 배합설계 및 성능 평가," 대한토목학회논문집, 27권, 2C호, 2007, pp. 157~162.
4. Lee, S. P., Kim, D. H., Ryu, J. H., Yu, J. Y., Lee, S. D., Han, S. H., Choi, M. S., and Park, C., "An Experimental Study on the Development of High Performance Shotcrete for Permanent Tunnel Support," *Proceeding of the 31st ITA-AITES World Tunnel Congress*, Vol. 1, 2005, pp. 455~461.
5. 장수호, 배규진, 원종필, 최명식, "국산 메타카올린에 의한 습식 슛크리트의 조기 및 장기강도 향상에 관한 연구," 대한토목학회 정기학술대회, 2007, pp. 3003~3006.
6. 장수호, 배규진, 최순욱, 박민환, 차철용, 최명식, 김준우, 장준희, 이흥규, 슛크리트의 성능향상을 위한 고성능 혼화재 조성물 및 이를 포함하는 슛크리트, 출원번호 2009-0056579, 2009.
7. 최희섭, 김동민, 장필성, 서신석, "고로슬래그 미분말을 혼입한 레디믹스트 슛크리트의 현장적용성에 관한 실험적 연구," 한국지반공학학회논문집, 25권, 6호, 2009, pp. 31~45.
8. 일본터널기술협회, 현장기술자를 위한 슛크리트, 록볼트, 2005, pp. 2-60, 2-113~2-114.
9. Manjit Singh and Mridul Garg, "Activation of Gypsum Anhydrite-Slag Mixtures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 2, 1995, pp. 332~338.
10. Neto, A. A. M., Cincotto, M. A., and Repette, W., "Mechanical Properties, Drying and Autogenous Shrinkage of Blast Furnace Slag Activated with Hydrated Lime and Gypsum.," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, Issue 4, 2010, pp. 312~318.
11. 노재성, 김도수, 임채영, "시멘트 모르타르의 압축강도 개선을 위한 고강도 혼화재의 제조 및 적용특성," 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 1998, pp. 83~88.
12. 조민형, 남재현, "II형 무수석고를 이용한 고강도콘크리트용 혼화재개발에 관한 연구," 대한건축학회논문집, 15권, 3호, 1999, pp. 71~80.
13. 국토해양부, 콘크리트표준시방서, 한국콘크리트학회, 2009, pp. 220~221.
14. 한국도로공사, 고속도로공사 전문시방서, 2009, pp. 7-17~

- 7-31.
15. 한국콘크리트학회, 슛크리트용 급결제 품질규격, KCI SC 102, pp. 483~487.
 16. 와타나베 요시하루, 마쓰나가 요시히사, 미노루, 시멘트 혼화재 및 이를 함유하는 시멘트 조성물, 출원번호 특 1992-0006891, 1992, pp. 7-1~7-7.
 17. 박종탁, 오홍섭, “인산부산석고의 각 형태조건에 따른 슬래그 시멘트의 품질특성에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 6호, 2009, pp. 729~735.
 18. 이민웅, “무수석고를 혼입한 모르타르의 내구특성 분석에 관한 실험적 연구,” 건국대 석사학위논문, 2011, pp. 29~30.
 19. 원종필, 정상경, 박해균, 이명섭, “C₁₂A₇계 광물계 급결제를 사용한 슛크리트의 내구특성,” 대한토목학회논문집, 25권, 3C, 2005, pp. 235~240.
 20. Kim, Y. Y., Kong, H. J., and Li, V. C., “Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-Mixture Shotcreting,” *ACI Materials Journal*, Vol. 100, No. 6, 2003, pp. 511~518.

요 약 이 연구는 일반 콘크리트 혼화재로 사용되는 고로슬래그 및 무수석고를 슛크리트에 적용하였을 때에 압축강도, 휨강도, 응결시간, 리바운드에 미치는 영향을 평가하였다. 1종 포틀랜드 시멘트(OPC)를 10% 치환할 때에 초결과 중결의 요건을 모두 만족한 반면, OPC를 20% 치환한 배합은 중결이 지연되어 슛크리트에 적합하지 않은 것으로 나타났다. 압축강도 시험 결과, OPC를 10% 치환한 배합은 영구지보재로서 목표강도를 1일과 28일 재령에서 모두 만족하였다. 특히 OPC를 고로슬래그와 무수석고로 각각 5%씩 치환한 배합의 압축강도가 가장 우수한 것으로 나타났다. 이 배합의 리바운드를 측정된 결과, OPC만을 결합재로 사용한 배합에 비하여 23% 감소되는 우수한 성능을 나타내었다.

핵심용어 : 고로슬래그, 무수석고, 강도, 응결시간, 리바운드