

# 고성능 쉴드 세그먼트용 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 역학적 특성 및 증기양생 효과 분석

김병권<sup>1\*</sup>, 이진섭<sup>2</sup>, 이규필<sup>3</sup>, 장수호<sup>4</sup>, 배규진<sup>5</sup>

## Mechanical characteristics of high-performance concrete shield segment containing ground granulated blast furnace slag and their improvement by steam curing

Byoung-Kwon Kim, Jin-Seop Lee, Gyu-Phil Lee, Soo-Ho Chang, Gyu-Jin Bae

**ABSTRACT** This study aimed to evaluate the applicability of high-strength concrete mixed with blast furnace slag to shield segment lining in order to improve its performance and economic efficiency. Especially, it was also intended to derive the optimum replacing ratio of ground granulated blast furnace slag to ordinary cement as well as the optimum steam curing condition for shield segment concrete with the design strength of 60 MPa. From the a series of experiments, the condition of 50% replacement of ordinary cement by ground granulated blast furnace slag and unit water content of 125 kg/m<sup>3</sup> was proposed as the optimum mixing condition. Comparing with standard curing conditions, it was also possible to expect approximately 110~442% strength improvement of concrete by steam curing in the same mixing condition.

**Keywords:** Shield tunnel, segment, ground granulated blast furnace slag, steam curing

**요약** 본 연구에서는 쉴드터널에 사용되는 세그먼트의 성능향상과 경제성향상을 위하여 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도 콘크리트에 대한 기초 연구를 실시하였다. 특히, 설계강도가 60 MPa 세그먼트용 콘크리트에 대해서 고로슬래그 미분말의 최적 치환율과 최적의 증기양생 조건을 도출하고자 하였다. 이상의 결과로부터, 고로슬래그 치환율 50%와 단위수량 125 kg/m<sup>3</sup>일 경우가 성능과 경제적인 측면에서 가장 적합한 배합조건으로 나타났다. 또한 표준양생 조건과 비교할 때 증기양생에 의하여 약 110~442%의 강도증진 효과를 기대할 수 있는 것으로 확인되었다.

**주요어:** 쉴드터널, 세그먼트, 고로슬래그 미분말, 증기양생

접수일(2011.4.22), 수정일(2011.5.3), 게재확정일(2011.5.24)

<sup>1</sup>정회원, 삼표건설 기술개발 부장

<sup>2</sup>정회원, 삼표건설 기술개발 상무

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 수석연구원

<sup>4</sup>정회원, 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 연구위원

<sup>5</sup>정회원, 한국건설기술연구원 선임본부장

\*교신저자: 김병권 (E-mail: bkkim@sampyoenc.com)

## 1. 서론

소음진동과 같은 환경피해를 최소화하고 고속시공에 의한 공사단축을 위해, 도심지 터널뿐만 아니라 하해저터널과 같은 장대터널을 중심으로 전 세계적으로 TBM(Tunnel Boring Machine)의 적용이 증가하고 있다. 특히, 불량한 지반에서도 높은 안전성을 확보할 수 있는 쉴드TBM(shield TBM)의 적용사례가 더욱 늘어나고 있다.

그러나 경제적인 측면에서 NATM대비 쉴드터널의 상대적으로 높은 공사비용은 쉴드TBM의 적용을 저해하는 요인 중으로 하나이다. 일본 실적자료들에 따르면 쉴드터널의 직접공사비 가운데 가장 큰 비중을 차지하는 항목은 쉴드TBM의 장비가 아니라 세그먼트로서 전체 공사비의 약 25~40%를 차지하는 것으로 파악되고 있다. 최근에는 쉴드터널의 경제성 향상을 위하여 고강도·고유동 콘크리트 활용, 강섬유보강 콘크리트 세그먼트(Steel-Fiber Reinforced Concrete segment, SFRC segment), 세그먼트 규격화 및 효율적인 양생방법 연구 등 경제적인 쉴드터널 시공을 위한 세그먼트 기술 향상이 이루어지고 있다.

세그먼트의 성능 향상을 위해 사용될 수 있는 고강도 콘크리트는 일반적으로 단위시멘트량의 과다로 인한 수화열 상승, 균열발생 및 시공성 저하 등과 같은 문제점이 있다(이상수 등, 2000).

따라서 고강도 콘크리트에서 이상과 같은 문제점들을 해결함과 동시에 사용재료의 원가절감 및 최적의 배합설계를 통한 경제성 제고를 위하여, 고로슬래그 미분말, 플라이애쉬 등과 같은 광물질 혼화재의 혼합 사용이 증가하고 있다(문한영 등, 2001; 문한영과 최연왕, 1996; Rahhal and Bantic, 1994). 특히, 고로슬래그 미분말은 용광로에서 선철과 동시에 생성되는 용융 고로슬래그를 물로 급냉시켜 미분쇄한 것으로서, 시멘트의 대체재로 사용할 경우에 유동성 개선, 수화 발열속도의 저감, 온도상승의 억제, 장기강도 향상, 수밀성 향상 등의 효과를 가지고 있다(沼田晉一, 1995).

따라서 본 연구에서는 강도, 내구성, 연성 등 물리적 특성이 우수한 고성능 세그먼트 개발을 위하여, 고로슬래그 미분말을 이용한 고강도 콘크리트의 특성 평가에 관한 기초연구를 수행하였다. 또한 세그먼트 제작 시에는 일반적으로 증기양생이 이루어지기 때문에, 증기양생에 따른 고로슬래그 미분말 혼입 고강도 콘크리트의 물리적 특성 변화를 함께 분석하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 시멘트는 비중이 3.15인 보통 포틀랜드시멘트(이하 시멘트)이며, 혼화재로는 고로슬래그 미분말(이하 슬래그)을 사용하였다. 시멘트의 물리적 특성 및 슬래그의 물리·화학적 특성은 각각 다음의 표 1 및 표 2와 같다.

본 연구에 사용된 잔골재는 인천산 해사(S1)와 경기도 화성 석산에서 생산된 부순 모래(S2)를 약 5:5의 비율로 혼합된 것이며, 굵은 골재로는 동일한 화성 석산에서 생산되는 부순 굵은골재를 사용하였다. 각 골재의 물리적 성질은 표 3과 같다.

또한 콘크리트의 유동성 향상을 위하여 사용된 AE감수제(AE Water Reducing Agent)는 표준형으로서 상온에서 비중은  $1.2 \pm 0.02$ 이고 pH는  $7.0 \pm 1.0$ 이다. 고성능감수제는 나프탈렌 술폰산 포르말린 고축합물이 주성분이며 상온에서 비중은  $1.2 \pm 0.02$ 이고 pH는  $9.0 \pm 1.0$ 이다.

### 2.2 실험방법

잔골재, 시멘트, 혼화재 및 굵은 골재를 투입하고 트윈 샤프트믹서를 사용하여 콘크리트를 혼합하였으며, 저속(20 rpm)으로 30초간 믹싱한 후 물과 혼화제를 투입하여 고속(40 rpm)으로 150초간 믹싱하였다.

표 1. 시멘트의 물리적 성질

밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	분말도 (m <sup>2</sup> /kg)	안정도 (%)	응결시간(분)	
			초결	종결
3,150	314	0.18	230	375

표 2. 고로슬래그 미분말의 물리적·화학적 성질

밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	분말도 (m <sup>2</sup> /kg)	염기성	화학적성분(%)			
			MgO	SO <sub>3</sub>	염화물이온	Ig-loss
2,890	430	1.89	5.79	2.10	0.004	0.09

표 3. 골재의 물리적 성질

구분		밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	조립률 (FM)	흡수율 (%)	단위용적질량 (kg/m <sup>3</sup> )	0.08mm체 통과량(%)
잔골재	해사(S1)	2,590	2.74	1.40	1,518	0.30
	부순모래(S2)	2,610	2.95	0.85	1,684	0.32
굵은 골재		2,620	6.48	0.58	1,564	0.40

굳지 않은 콘크리트의 유동성 평가를 위한 슬럼프 시험은 KS F 2402 규정에 의거 실시하였으며, KS F 2421 규정의 공기실 압력법에 의거 콘크리트 공기량 시험기를 이용하여 측정하였다.

또한 100×200 mm의 원주형 공시체들을 제조하고 표준양생(20±1℃ 수중양생) 및 증기양생을 한 후, KS F 2405 규정에 따라 콘크리트의 재령별 압축강도를 측정하였다.

### 2.3 콘크리트의 배합

단위수량이 낮고 슬럼프가 거의 없는 경우에서도 세그먼트 제작 시 진동테이블을 사용하여 작업 성능 및 마감성능을 확보할 수 있다. 이로 인해 동일 물시멘트비에서 단위수량의 감소에 따른 단위 시멘트량 절감 등을 도모할 수 있게 되어 세그먼트 제작과 관련된 경제성을 제고할 수 있다. 이와 더불어 고로슬래그의 단가는 일반적으로 시멘트 단가의 80~90% 수준이기 때문에 고로슬래그의 치환율을 높이면 경제성을 향상시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 진동테이블을 사용하는 조건에서 고강도 콘크리트의 고로슬래그 치환율 및 단위수량 변화에 따른 기초 물성을 파악하기 위한 콘크리트 실험계획을 수립하였다.

물-결합재비(W/B)를 28%로 고정하였으며, 고로슬래그 치환율(S/P)은 30% 및 50%로 설정하였다. 이때 단위분체량을 경감시키기 위하여 S/P가 30%일 경우에 단위수량을 115, 125, 135 및 145 kg/m<sup>3</sup>의 4가지 조건으로 변화시켰다. 반면, S/P가 50%일 경우에는 S/P 30%의 실험결과를 바탕으로 145 kg/m<sup>3</sup>에서 125 kg/m<sup>3</sup>까지 단위수량을 낮추고 시멘트량을 줄여도 강도가 확보되는 것을 확인하였기에 115 및 125 kg/m<sup>3</sup>의 두 가지 조건으로 결정하였다. 이상과 같은 여섯 가지 배합조건을 정리하면 다음의 표 4와 같다.

각 배합조건에서의 목표 슬럼프를 50±25 mm, 그리고 목표 공기량을 3±1%로 설정하고, 유동성 및 공기량을 확보하기 위한 고성능 감수제 사용량과 AE제 사용량을 변화시켜 표 4와 같이 배합설계를 실시하였다.

표 4. 연구에 적용된 콘크리트 배합조건

배합 조건	W/B (%)	S/P 치환율(%)	중량(kg/m <sup>3</sup> )						AD (%)	AE (%)
			W	C	S/P	S1	S2	G		
A-1	28	30	145	363	155	357	360	1002	0.3	0.005
A-2			135	337	145	369	372	1035	0.4	0.004
A-3			125	312	134	381	384	1068	0.5	0.005
A-4			115	288	123	392	396	1101	0.8	0.005
A-5		50	125	223	223	379	382	1064	0.5	0.006
A-6			115	206	205	391	394	1097	0.8	0.006

## 2.4 증기양생

본 연구에서는 고로슬래그 혼합 콘크리트의 증기양생 온도 조건변화에 따른 콘크리트의 재령별 일축압축강도 값을 평가하기 위한 실험을 수행하였다.

증기양생 온도는 전치시간과 상승시간 및 최고온도와 유지시간의 변수를 두고 일축압축강도를 평가하였다(표 5 및 그림 1 참조). 증기양생 시에는 그림 2와 같이 증기양생기를 이용하여 증기양생 온도 변수에 따른 양생을 수행하였다.

표 5. 증기양생 온도변화에 따른 영향평가를 위한 실험조건

배합 조건	증기양생 온도					적용 강도 규격	목표 슬럼프 (mm)	목표 공기량 (%)
	전치구간		상승구간	유지구간				
	°C	hr	hr	°C	hr			
B-1	Plain(20°C 공기중 양생)					60 MPa	50±25	3±1
B-2	20	3	1.5	50	6			
B-3	20	2	1.5	50	6			
B-4	20	2	2.0	50	4			
B-5	20	2	2.0	60	4			
B-6	20	2	1.5	50	4			

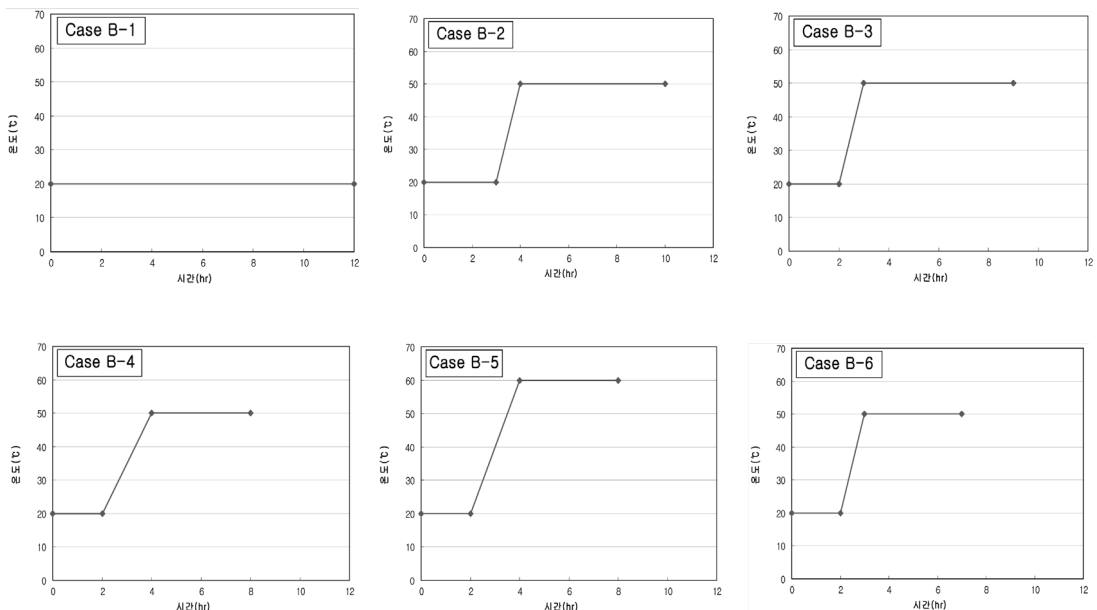


그림 1. 실험조건별로 적용된 증기양생 온도 곡선

**표 6.** 증기양생 영향평가를 위한 콘크리트 시험체 배합조건

W/B (%)	S/P 치환율(%)	단위중량(kg/m <sup>3</sup> )						AD (%)	AE (%)
		W	C	S/P	S1	S2	G		
28	50	125	223	223	379	382	1064	0.50	0.005



**그림 2.** 증기양생기에 의한 콘크리트 공시체의 양생

콘크리트의 압축강도는 12시간, 3일, 7일 및 28일에 측정하였으며, 시험체 제작을 위한 콘크리트 배합표는 표 6과 같다. 표 6의 배합은 선행된 고로슬래그 치환율과 단위수량 변화에 따른 압축강도 실험결과를 참고하여 목표강도수준(60 MPa)를 확보하면서 가장 시멘트량을 적게 사용한 친환경, 저단가 배합을 선정하여 AE제의 가감을 통해 목표공기량을 맞춘 배합이다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 슬럼프 및 공기량 특성

콘크리트 배합설계시 S/P 치환율 30% 및 50% 조건에서 고성능 감수제 사용량을 변화시키면서 슬럼프 및 공기량에 대한 평가하였으며, 그 결과 목표 슬럼프 및 공기량을 모두 만족하는 것으로 나타났다(표 7).

표 7. 굳지 않은 콘크리트의 실험결과

배합조건	슬럼프(mm)	공기량(%)
A-1	50	3.5
A-2	50	3.4
A-3	35	3.5
A-4	40	3.0
A-5	75	3.0
A-6	50	3.0

※ 목표 슬럼프 : 50±25 mm, 목표 공기량 : 3±1%

표 8. S/P대체율 및 단위수량 변화에 따른 콘크리트의 재령별 일축압축강도

배합 조건	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	일축압축강도(MPa)			배합 조건	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	일축압축강도(MPa)		
		재령 16시간	재령 7일	재령 28일			재령 16시간	재령 7일	재령 28일
A-1	145	40.8	60.3	64.3	A-4	115	33.2	46.2	56.9
A-2	135	42.0	59.0	66.2	A-6	115	34.6	47.5	55.8
A-3	125	41.3	58.1	66.0					
A-5	125	40.2	57.0	65.2					
평균		41.1	58.6	0.00	평균		0.00	0.00	0.00

### 3.2 고로슬래그 혼합 콘크리트의 일축압축강도 특성

고로슬래그 혼합 콘크리트의 배합조건 변화에 따른 재령별 일축압축강도 실험결과는 표 8과 같다. 표 8의 결과에 따르면 S/P 치환율에 관계없이 단위수량이 125 kg/m<sup>3</sup> 이상인 경우에는 재령별 일축압축강도에 큰 차이가 없는 것으로 나타났으나, 단위수량이 115 kg/m<sup>3</sup>일 경우에는 일축압축강도가 상대적으로 약 14%(재령 28일 기준) 작게 측정되는 것으로 나타났다. 이는 물-결합재비가 동일한 경우에도 적정수준의 단위시멘트량이 사용되어야만 콘크리트 조직이 치밀해져 요구되는 일축압축강도를 발현할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

세그먼트 제조시에 사용되는 콘크리트 배합에서의 일반적인 단위수량은 145 kg/m<sup>3</sup> 수준으로 파악된다. 하지만 이상의 실험결과에 근거할 때, 동일한 물결합재비에서 단위수량을 125 kg/m<sup>3</sup>로 약 14% 줄이고 시멘트량도 동일한 비율만큼 줄여도 동일한 강도를 확보할 수 있다는 것을 확인하였다.

이상과 같은 슬럼프, 공기량 및 일축압축강도에 대한 실험결과와 함께 세그먼트 제작시 콘크리트 타설 작업성, 시멘트 사용량 절감에 따른 경제성 등을 종합적으로 분석하면, 배합조건 A-5가 가장 효과적인 콘크리트 배합인 것으로 판단되었다.

### 3.3 고로슬래그 혼합 콘크리트의 증기양생 특성

고로슬래그 혼합 콘크리트의 증기양생 조건 변화에 따른 일축압축강도 측정결과들을 비교해보면, 표준양생 조건(20℃ 공기중 양생)으로 양생한 배합조건 B-1의 경우에 비해 고온양생을 행한 배합조건 B-2에서 B-6까지의 경우에서 상당한 압축강도 향상효과가 나타났다(표 9).

증기양생시 전치시간 변화에 따른 압축강도 변화를 살펴보면, 재령에 따라 다소 차이는 있으나 전치시간 2시간으로 양생한 배합조건 B-3가 전치시간 3시간으로 양생한 배합조건 B-2보다 압축강도가 최소 5%에서 최대 14% 정도 크게 나타났다.

온도상승 속도 변화에 따른 압축강도 변화를 살펴보면, 상승속도가 빠른 배합조건 B-6가 B-4의 경우보다 압축강도가 최소 7%에서 최대 18.3% 정도 크게 발생하는 것으로 나타났다.

최고온도 변화에 따른 압축강도 변화는 재령에 따른 차이는 있으나 최고온도가 10℃ 높은 배합조건 B-5가 B-4보다 최소 16.7%에서 최대 103% 정도 크게 나타났다. 이는 양생시 온도 의존성이 높은 고로슬래그가 다량으로 사용되었기 때문에 최고온도가 높을수록 압축강도가 크게 발휘되는 것으로 판단되었다.

고로슬래그 혼합 콘크리트에 대한 표준양생조건 대비 증기양생 효과를 분석한 결과(표 9), 증기양생 조건에 따른 차이는 있지만 재령 18시간에서는 표준양생조건 대비 약 265~442%, 그리고 재령 28일에는 표준양생조건 대비 약 110~120% 정도 일축압축강도가 향상되는 것으로 나타났다(표 9).

이상과 같은 실험결과와 더불어 세그먼트 제작시 증기양생 후 탈형, 운반 등의 일련의 과정 수행을 위해서는 조기강도 발현이 매우 중요하다는 점을 고려한다면, 본 연구에서 적용된 증기양생 배합조건들 중에서는 B-5가 가장 효과적인 증기양생 조건으로 판단된다.

표 9. 증기양생 조건변화에 따른 재령별 일축압축강도

배합 조건	재령별 일축압축강도(MPa)							
	재령 18시간	B-1대비 증가율 (%)	재령 3일	B-1대비 증가율 (%)	재령 7일	B-1대비 증가율 (%)	재령 28일	B-1대비 증가율 (%)
B-1	9.3	-	26.4	-	42.3	-	53.0	-
B-2	35.8	384.9	44.6	168.9	48.6	114.9	63.5	119.8
B-3	38.3	411.8	47.6	180.3	55.4	131.0	66.7	125.8
B-4	23.0	247.3	34.4	130.3	44.8	105.9	58.6	110.6
B-5	41.1	441.9	51.1	193.6	58.2	137.6	68.4	129.1
B-6	24.6	264.5	40.7	154.2	49.9	118.0	64.5	121.7



## 4. 결 론

본 연구에서는 역학적 성능과 경제성 향상을 위한 고성능 세그먼트 개발을 위한 기초 연구로서 고로슬래그 미분말을 이용한 고강도 콘크리트의 물리적 특성평가와 증기양생의 영향 평가를 위한 기초연구를 수행하였으며 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 고로슬래그 치환율에 관계없이 단위수량이  $125 \sim 145 \text{ kg/m}^3$ 일 경우에는 재령별 콘크리트 일축압축강도에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 즉, 세그먼트 배합시 적용되고 있는 일반적인 단위수량 조건인  $145 \text{ kg/m}^3$  대신  $125 \text{ kg/m}^3$ 로 단위수량을 약 14% 줄이고 이와 비례하여 시멘트량을 줄여도 동일한 강도를 확보할 수 있다는 것을 확인하였다.
2. 고로슬래그 치환율에 관계없이 단위수량이  $115 \text{ kg/m}^3$ 일 경우, 재령 28일 일축압축강도가 약 14% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 높은 압축강도 발현을 위해서는 물-결합재비가 동일한 경우에도 적정수준의 단위시멘트량이 사용되어야 할 것으로 나타났다.
3. 증기양생이 콘크리트 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 전치시간, 온도상승속도 및 최고온도변화를 변수로 실험을 수행한 결과, 재령에 따라 증기양생 효과에 차이는 있으나 표준양생 조건과 비교할 때 약 110~442%의 강도증진 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.
4. 고로슬래그 치환과 증기양생 조건에 대한 실험적 검토를 실시한 결과, 본 연구에서 적용된 배합 조건들 가운데  $60 \text{ MPa}$ 의 설계강도와 높은 조기강도 발현을 기대할 수 있는 경제적인 최적 조건은 고로슬래그 치환율 50%와 단위수량  $125 \text{ kg/m}^3$ 의 배합조건에서 최고 온도  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  및 유지 4 시간의 증기양생을 수행할 경우로 나타났다. 그러나 이와 같은 결과는 프리캐스트 콘크리트의 배합조건에 따라 다소 상이하게 나타날 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술(과제번호: 10CCTI-B056690-01) - 2세부과제: 고성능 세그먼트 라이닝의 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

---

## 참 고 문 헌

1. 문한영, 최연왕, 김용직(2001), “고로슬래그 미분말 혼합 콘크리트의 온수양생법에 의한 강도 추정”, 대한토목학회논문집, Vol. 21, No. 6-A, pp. 967~976.
2. 이상수, 원철, 김동석, 박상준(2000), “고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회논문집, Vol. 12, No. 4, pp. 49~58.
3. 문한영, 최연왕(1996), “고로슬래그 미분말을 혼화제로 사용한 고강도콘크리트의 강도 특성에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, Vol. 16 No. I-4, pp. 463~472.
4. 沼田晉一(1995), “高爐スラグ微粉末混和コンクリートの動向”, 콘크리트工學, Vol. 33, No. 5, pp. 15~24.
5. Rahhal, V.F., Bantic, O.R. (1994), “Mineral Admixtures Contribution to the Development of Heat of Hydration and Strength, Cement”, Concrete and Aggregates, CCAGPD, Vol. 16, No. 2, pp. 150~158.
6. 민경환, 정형철, 양준모, 윤영수(2009), “대단면 터널 라이닝 적용 고성능 콘크리트의 수화열 특성”, 한국터널공학학회논문집, Vol. 11, No. 1, pp. 37~46.
7. 이상근, 김동인, 조규성(2001), “터널라이닝 구조재로서 SFRC 적용에 관한 연구”, 한국터널공학학회논문집, Vol. 3, No. 4, pp. 25~34.s
8. 김상면, 신진용, 마상준, 남관우, 김기호(2008), “숏크리트 구성 재료에 따른 콘크리트 성능에 관한 실험적 연구”, 한국터널공학학회논문집, Vol. 10, No. 1, pp. 59~68.