



## 상동광산 광미를 혼합한 자기충전 콘크리트의 품질 특성

최연왕<sup>1)</sup> · 김용직<sup>2)\*</sup> · 최 욱<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>세명대학교 토목공학과, <sup>2)</sup>Dept. of Civil Engineering, Ryerson University, <sup>3)</sup>한국시설안전기술공단

## The Quality Properties of Self-Compacting Concrete Mixed with Tailing from the Sangdong Tungsten Mine

Yun-Wang Choi<sup>1)</sup>, Yong-Jic Kim<sup>2)\*</sup>, and Wook Choi<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, M5B-2K3, Canada

<sup>3)</sup>Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, Gyeonggi-do 411-758, Korea

**ABSTRACT** This study has focused on the possibility for recycling of tailings from the Sangdong tungsten mine as powder(TA) of self-compacting concrete(SCC). The experimental tests for slump-flow, time required to reach 500 mm of slump flow(sec), time required to flow through V-funnel(sec) and filling height of U-box test(mm) were carried out in accordance with the specified by the Japanese Society of Civil Engineering(JSCE). The results of this study, slump-flow of SCC was satisfied a prescribed range. And time required to reach 500 mm of slump flow(sec) and time required to flow through V-funnel(sec) decreased with increasing replacement of TA. But filling height of U-box test(mm), replacement of TA up to 30% were satisfied a prescribed range. The mechanical properties including compressive strength, splitting tensile strength and elastic modulus were checked with the requirements specified by Korean Industrial Standards(KS). The compressive strength of SCC decreased with increasing replacement of TA, splitting tensile strength and elastic modulus were similar to those of normal concrete. The fundamental durability was reviewed through the dry shrinkage rate and accelerated carbonation tests. As the result, dry shrinkage rate and accelerated carbonation depth increased with increasing replacement of TA.

**Keywords** tailings from the Sangdong tungsten mine as powder(TA), self-compacting concrete(SCC), elastic modulus, dry shrinkage rate, accelerated carbonation

### 1. 서 론

국내의 광산업은 근대 산업화에 기간산업으로서 1970년대 까지 우리나라의 경제성장에 중요한 역할을 담당하였다. 그러나 최근 들어서 지하자원을 필요로 하는 산업구조가 증대되었으나, 광물자원의 매장량 고갈 및 저품질, 그리고 중국을 위시한 개발도상국으로부터의 저가의 광물자원 수입 등으로 1990년대부터 국내 금속광물의 수요량의 97% 이상을 해외자원에 의존하게 되어, 광산업은 급격한 쇠퇴기를 맞이하게 되었다<sup>1)</sup>.

국내 광산업을 종류별로 1981년에 등록된 광구의 수를 살펴보면 금속광산 5,224개소, 비금속광 6,908개소, 석탄광 1,922개소로서 전체적으로 14,054개소가 등록되어 있었으나, 2002년 조사에서는 금속광산 768개소, 비금속광산 4,650개소, 석탄광산 137개소로 급격히 감소하여 휴광

또는 폐광된 광산이 8,500여 개소에 이르는 것으로 추정되고 있다<sup>2,3)</sup>. 특히, 가행 실적이 있는 광산이 휴광 또는 폐광되는 경우에는 가행 중 배출된 폐석과 광미 또는 완전히 복구되지 않은 갱내 환경 등에 의하여 여러 가지 형태로 주변 환경을 오염시키는 것으로 나타나고 있다<sup>4)</sup>.

휴광 또는 폐광산 주변에서 발생하는 광해의 종류로는 중금속을 함유한 폐수의 유출로 인한 주변토양 및 지표수와 지하수 오염 유발, 지반의 침하문제, 광미와 폐석 등에 의한 분진 발생 등이 있으며, 이러한 광해로 인하여 주변 지역민들의 건강 및 생명에 위해를 끼쳐 사회문제를 유발하기도 하였다<sup>5)</sup>. 따라서 이러한 광해문제가 발생하자 2000년대 이후 정부는 광해방지 및 관리를 위한 전담법규의 입법 작업을 시작하였으며, 이해 당사자들의 이견으로 인한 반력 등의 과정을 거쳐 2005년 5월 광해관리 전담 법규인 ‘광산폐해의 방지 및 복구에 관한 법률’이 제정되었다<sup>6)</sup>. 따라서 광산 폐기물의 안전한 처리 및 관리가 한층 중요시 되었다고 할 수 있다.

한편, 강원도 상동지역의 경우 D사가 회중석을 개발하

\*Corresponding author E-mail : yong1yong2@hanmail.net

Received May 30, 2006, Accepted October 23, 2006

©2006 by Korea Concrete Institute

면서 40년간 폐기하였던 광미가 약 1,200만톤 정도 적치되어 있어 광미담의 국부적인 토사유출과 담의 복부 팽창 등에 의해 담 전체의 구조적인 안정성이 문제되고 있다<sup>2,7,8)</sup>. 이에 대한 단기적인 대책으로는 국부적으로 담을 보수하는 방법이 있지만 보다 장기적이고 안정적인 해결을 위해서는 광미를 재활용하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 특히 콘크리트에 적용함으로써 대단위의 소비와 값싼 대체 혼화재료로서 적용이 가능할 것으로 판단된다.

더욱이 국내에 광범위하게 산재하고 있는 광산 폐재의 대부분이 미세한 분체들로 이루어져 있다는 점을 감안하여 광미의 중금속 용출 특성을 파악한 기존의 연구 결과를 참고하여 자원으로써의 재활용 한다면, 폐광산 광미의 안전한 처리 가능성은 극대화될 것으로 판단된다<sup>7,8)</sup>.

이에 따라 본 연구에서는 상동지역 중석광 광미를 자기충전 콘크리트용 시멘트 대체 재료로의 사용 가능성을 알아보기 위한 연구의 일환으로 광미를 혼합한 자기충전 콘크리트의 자기충전성 평가와 역학적 특성을 검토한 후 건조수축 및 축진 탄산화 실험을 통하여 자기충전 콘크리트의 품질 특성을 검토하였다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 사용 재료

#### 2.1.1 시멘트 및 상동광산 광미

시멘트는 밀도가  $3.15 \text{ g/cm}^3$ 인 보통포틀랜드시멘트(이하, OPC로 약함)를 사용하였으며, 시멘트 결합재로 사용한 상동광산 광미(이하, TA로 약함)는  $0.149 \text{ mm}$  체를 통과하는 시료를 건조하여 사용하였고 밀도는  $2.60 \text{ g/cm}^3$ 으로 나타났다.

Table 1은 시멘트 및 시멘트와 결합재로 사용한 분체의 화학성분 및 물리적 성질을 정리한 것이다.

#### 2.1.2 골재

잔골재는 밀도가  $2.57 \text{ g/cm}^3$ 인 여주산 강모래(이하, S로 약함)를 사용하였고 굵은골재는 최대치수  $20 \text{ mm}$ 인 부순골재(이하, G로 약함)를 사용하였다. Table 2는 잔골재 및 굵은골재의 물리적 성질을 정리한 것이다.

**Table 1** Chemical components and physical properties of OPC and TA

Items	Types	
	OPC	TA
SiO <sub>2</sub> (%)	21.60	59.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6.00	10.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.10	11.30
CaO(%)	61.40	14.00
MgO(%)	3.40	1.70
SO <sub>3</sub> (%)	2.50	-
Density(g/cm <sup>3</sup> )	3.15	2.60
Specific surface area(cm <sup>2</sup> /g)	3,539	1,198

**Table 2** Physical properties of aggregates

Items	Types	
	S	G
G <sub>max</sub> (mm)	-	20
Density(g/cm <sup>3</sup> )	2.55	2.70
Absorption(%)	2.12	0.63
F.M.	2.76	6.60
Bulk density(kg/m <sup>3</sup> )	1,658	1,685

#### 2.1.3 혼합재

자기충전 콘크리트의 유동성을 확보하기 위하여 폴리 카르본산계 고성능 감수제 및 공기연행제를 사용하였으며 밀도 및 사용량은 각각  $1.10 \pm 0.02$  및  $1.04 \pm 0.01$ 와 시멘트 질량에 대하여  $1.0 \pm 0.2\%$  및  $0.005 \pm 0.001\%$ 를 사용하였다.

### 2.2 배합 결정

자기충전 콘크리트의 기준배합은 Nan-Su의 배합설계법을 수정·보완하여 사용하였다<sup>10,11)</sup>. 즉 Nan-Su 배합설계법에서 주요인자인 골재채움률(이하, PF로 약함) 가정의 모호성을 해결하기 위한 방안으로 본 연구에서는 사전 실험을 실시하여 PF 값을 찾을 수 있도록 하였다<sup>12,13)</sup>. 수정된 PF 값은 ASTM C 29에 따라 실험을 실시하여 골재의 느슨한 상태에 대한 밀실한 상태의 단위용적질량의 비로서 콘크리트 배합에 적용되는 잔골재율에 따라 가중치를 적용하여 구한 값이다<sup>14)</sup>.

이러한 예비 실험에 의해 굵은골재와 잔골재 각각의 PF를 계산한 다음 잔골재율은 일반적으로 자기충전 콘크리트에 있어서 50~57%의 범위에 존재하기 때문에 잔골재율을 53%로 가정한 후 PF 값을 결정하였다<sup>15,16)</sup>.

따라서, ASTM C 29에 의하여 골재의 느슨한 상태와 밀실한 상태의 단위용적질량을 측정된 결과 굵은골재의 느슨한 상태의 단위용적질량은  $1,476 \text{ kg/m}^3$  밀실한 상태의 단위용적질량은  $1,685 \text{ kg/m}^3$ 로 측정되었고, 잔골재의 느슨한 상태의 단위용적질량은  $1,409 \text{ kg/m}^3$  밀실한 상태의 단위용적질량은  $1,658 \text{ kg/m}^3$ 으로 측정되었다. 식 (1)은 골재의 단위용적질량을 고려한 PF의 계산식을 나타낸 것이며, 잔골재율 53% 적용시 골재의 PF 값은 약 1.16으로 계산되었다. Table 3은 자기충전 콘크리트의 배합표를 정리한 것이다.

**Table 3** Mixture proportion of concrete

Mix. no.	S/a (%)	W/B (%)	TA/(OPC+TA) (%)	Unit mass (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	TA	S	G
1	53	38	0	174	459	0	866	805
2	53	38	10	174	413	38	866	805
3	53	38	20	174	367	76	866	805
4	53	38	30	174	321	114	866	805
5	53	38	40	174	275	151	866	805

$$PF = \frac{B}{A} \times \left(1 - \frac{S}{a}\right) + \frac{D}{C} \times \frac{S}{a} \quad (1)$$

여기서, A : 굵은골재의 느슨한 상태 단위용적질량  
 B : 굵은골재의 밀실한 상태 단위용적질량  
 C : 잔골재의 느슨한 상태 단위용적질량  
 D : 잔골재의 밀실한 상태 단위용적질량

### 2.3 시험 방법

상동광산 광미를 혼합한 자기충전 콘크리트의 자기충전성 평가는 국내의 경우 명확한 평가 기준이 정립되어 있지 않기 때문에 일본토목학회(JSCE)의 “자기충전 콘크리트의 성능평가 기준(안)”에 의해 검토하였으며, 가장 일반적으로 사용하는 성능 평가 기준인 2등급을 적용하여 검토하였다<sup>17)</sup>. 굳지 않은 콘크리트의 자기충전성 평가인 슬럼프플로우 500 mm 도달시간, V-funnel 유하시간 및 U-box 충전시험은 콘크리트 믹싱 후에 바로 측정하였으며, 유동성 측정시 기준을 만족하지 않을 경우 화학혼화제의 사용량을 조절하여 재시험을 실시하였다.

콘크리트 시험용 공시체는 다짐작업 없이 Ø100×200 mm로 제조하였으며, 제작된 공시체는 24시간 후에 몰드를 제거한 다음 시험 전 까지 20±3°C에서 수중 표준양생을 실시하였다. 콘크리트의 압축강도는 재령 3, 7 및 28일에서 측정하였으며, 쪼갬인장강도 및 탄성계수는 재령 28일에 측정하였다.

또한, 경화된 콘크리트의 기초적인 내구 특성으로서 건조수축에 의한 길이변화를 측정하기 위하여 KS F 2424에 준하여 각주형 공시체를 제작하였다. 제작된 공시체는 건조되지 않도록 습윤상태에서 1일 후 콘크리트의 몰드를 제거하고 즉시 초기 길이를 1/1,000 mm 감도의 다이얼 게이지를 사용하여 측정하였으며, 측정 후 건조수축에 의한 영향을 피하기 위해 7일간 20±3°C에서 수중 양생을 실시하고, 그 이후 온도 20±2°C, 습도 60±5%로 유지할 수 있는 항온·항습실에 공시체를 보관하여 보관된 시점에서의 재령별 길이변화를 측정하였다.

또한, 촉진탄산화 시험체는 콘크리트 압축강도용 공시체와 동일한 방법으로 제조하고 28일간 수중 양생을 실시한 후 Ø100×200 mm의 공시체를 반으로 절단하여 절단면 및 반대편에 에폭시 수지로 공극이 없도록 두께 1 mm 이상으로 마감하여 제작하였다. 그리고 온도 20±2°C, 상대습도 60±5% 및 CO<sub>2</sub> 농도 10±0.5%로 일정하게 유지할 수 있도록 제작된 촉진 탄산화 시험기에 투입하고 투입 재령별 탄산화 깊이를 페놀프탈레인 용액을 사용하여 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 자기충전성 평가

Figs. 1, 2 및 3은 각각 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트

트의 유동성, 재료분리저항성 및 충전 특성을 정리한 것이다. Fig. 1의 유동성 측정을 위한 슬럼프플로우 측정 결과는 TA의 혼합률 40% 까지의 모든 배합에서 JSCE 2등급 기준 600~700 mm를 만족하고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과는 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트 제조시 TA의 혼합률 별로 기준에 적합한 유동성을 확보하기 위해 고성능 감수제의 양을 조절했기 때문으로 판단된다.

Fig. 2는 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 재료분리저항성을 알아보기 위하여 TA의 혼합률에 따른 V-funnel 유하시간과 슬럼프플로우 500 mm 도달시간을 측정하여 정리한 그림이다. Fig. 2의 슬럼프플로우 500 mm 도달시간의 경우 TA의 혼합률이 0, 10, 20, 30 및 40%까지 증가함에 따라서 점진적으로 빨라지는 경향을 나타내고 있으며, TA의 혼합률 30 및 40%에서는 기준 범위의 하한값인 3초에 근접한 결과를 보였다. 그러나 V-funnel 유하시간은 TA의 혼합률 40%까지 기준 범위를 만족하고 있었으나 TA의 혼합률이 증가함에 따라 V-funnel 유하시간이 다소 빨라지는 결과를 나타내고 있었다. Fig. 2의 결과 TA의 혼합률이 0, 10, 20, 30 및 40%까지 증가함에 따라서 V-funnel 유하시간과 슬럼프플로우 500 mm 도달시간이 점진적으로 빨라지는 현상은 페이스트의 점성과

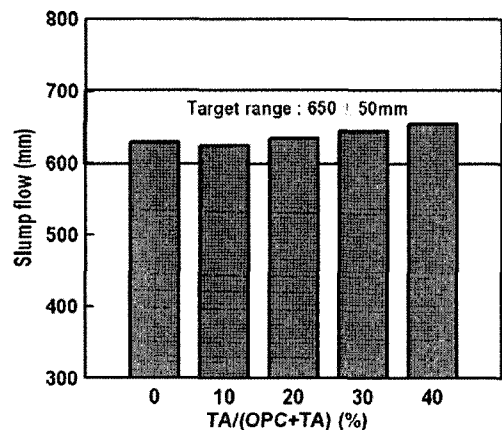


Fig. 1 Slump-flow according to replacement ratio of TA

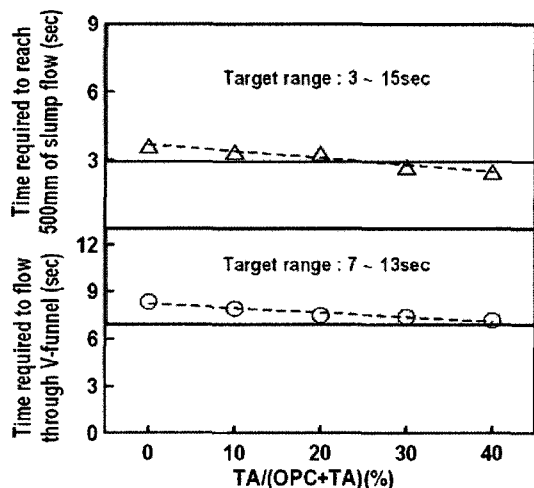


Fig. 2 Time required to flow through V-funnel and reach 500 mm of slump-flow according to replacement ratio of TA

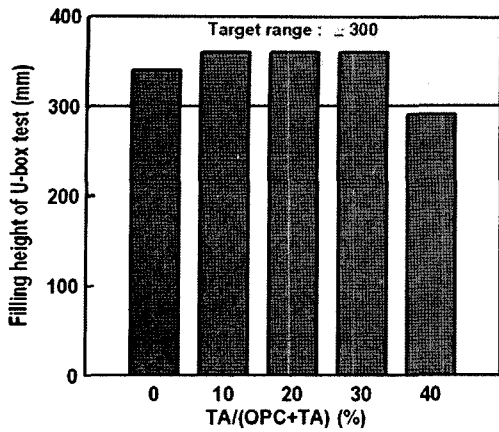


Fig. 3 Filling height of U-box test

관계가 있을 것으로 판단된다. 이러한 원인은 TA의 경우 OPC와 비교하여 약 66% 적은 비표면적을 나타내고 있어 입자가 크기 때문에 물과 접하는 면적이 충분치 않으므로 과잉수가 발생하여 점성이 다소 저하한 것으로 판단된다.

Fig. 3은 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 충전성 평가를 위한 U-box 충전높이를 정리한 것이다. Fig. 3의 결과 TA의 혼합률 30%까지는 목표 성능 기준을 만족하고 있으나, TA의 혼합률 40%에서는 기준 범위의 하한값 300 mm를 벗어난 290 mm로 측정되었다. 이러한 원인은 TA의 혼합률 40%로 자기충전 콘크리트를 제조할 경우 과잉수의 영향으로 점성이 감소하여 재료분리 현상이 나타나 충전성에 문제가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트는 적절한 TA의 혼합률 결정이 중요할 것으로 판단된다.

### 3.2 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 역학적 특성 평가

Fig. 4는 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 재령 3, 7 및 28에서 압축강도를 측정하여 정리한 그림이다. TA의 혼합률이 0, 10, 20, 30 및 40%로 증가함에 따라서 재령 3, 7 및 28일 압축강도가 저하는 결과를 나타내었다. 특

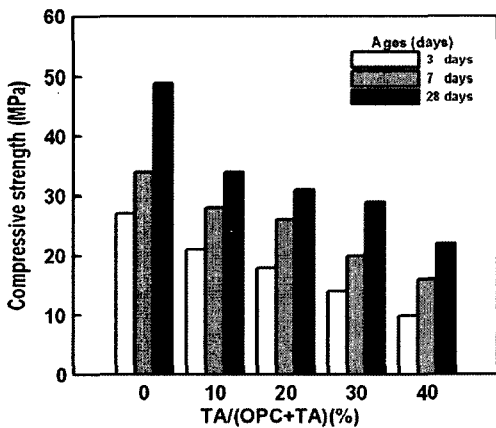


Fig. 4 Compressive strength according to replacement ratio of TA

히 TA의 혼합률 40%의 경우 재령 28일 압축강도는 기준과 비교하여 55% 감소하는 결과를 나타내고 있었다. 이러한 원인은 TA의 경우 무반응성 및 입자의 크기가 OPC와 비교하여 큰 분체로서 콘크리트의 강도 발현에 큰 영향을 미치고 있지 않는 것으로 판단된다<sup>7,8)</sup>. 그러나 TA의 혼합률 10 및 20%의 경우 재령 28일 압축강도는 각각 34 및 31 MPa로 측정되었으며, 기준과 비교하여 30 및 37%의 강도 감소율을 보이고 있었다. 따라서 자기충전 콘크리트 제조시 TA를 적절히 활용한다면 보통강도의 자기충전 콘크리트 제조가 가능할 것으로 판단된다.

Figs. 5 및 6은 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 재령 28일에서 압축강도와 쪼갠인장강도 및 탄성계수의 관계를 정리한 것이다. Fig. 5의 결과 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 압축강도와 쪼갠인장강도의 관계는 압축강도가 커짐에 따라 쪼갠인장강도가 비례적으로 증가하여  $f_t = 1.446 \times (f_c/10)^{0.6565}$ 의 관계로 표현되어, CEB-FIP에서 제시하고 있는 압축강도와 쪼갠인장강도의 관계식의 상·하한 식  $f_t = 0.95 \times (f_c/10)^{0.6667} \sim f_t = 1.85 \times (f_c/10)^{0.6667}$ 을 만족하고 있었다<sup>19)</sup>.

또한, 쪼갠인장강도와 압축강도의 비( $f_t/f_c$ )는 0.08~0.10의

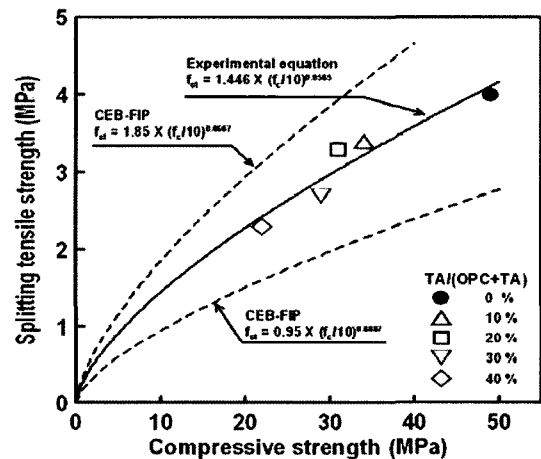


Fig. 5 Relationship of compressive and splitting tensile strength

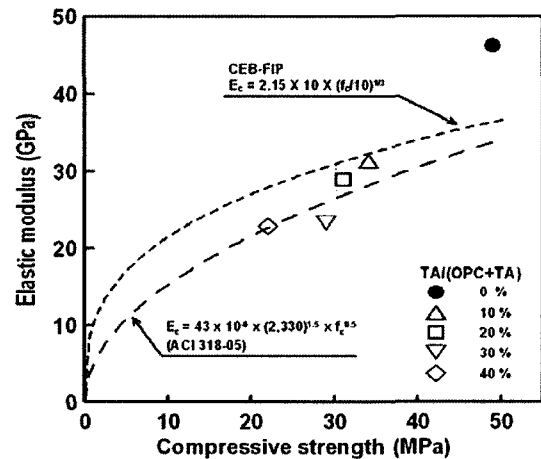


Fig. 6 Relationship of compressive strength and modulus of elasticity

범위로 나타나 기존의 연구자들에 의해 제시된 0.07~ 0.09 범위 보다 약간 상회하는 값을 나타냈으나, 이러한 원인은 미소한 압축강도의 차이에 의한 영향으로 판단된다<sup>19)</sup>.

Fig. 6은 압축강도와 탄성계수의 관계를 정리한 것이며, 제시된 식들은 ACI 및 CEB-FIB Model Code를 나타낸 것이다<sup>20,21)</sup>. Fig. 6의 결과 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 압축강도와 탄성계수 관계는 콘크리트의 단위용적 질량을 고려한 ACI 및 CEB-FIP에서 제시하고 있는 연구 경향과 유사한 결과를 나타내고 있었다.

### 3.3 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 내구 특성

Fig. 7은 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 탄산화 깊이를 재령에 따라 정리한 것이며, 가장 일반적으로 사용하고 있는 식 (2)를 이용하였다.

$$Y = C\sqrt{t} \quad (2)$$

여기서, Y = Carbonation depth(mm)

t = Time(days)

C = Carbonation rate constant(mm/time)

Fig. 7의 결과 재령이 증가함에 따라 TA의 혼합률 0, 10, 20, 30 및 40%를 혼합한 자기충전 콘크리트의 탄산화 깊이는 식 (2)의 경향으로 증가하고 있었다. 또한, TA의 혼합률이 10, 20, 30 및 40%로 증가함에 따라 재령 84일에서 탄산화 깊이는 기준과 비교하여 1, 3.2, 4.7 및 6.6배 증가하는 것으로 나타나 TA의 혼합률이 증가함으로써 탄산화 깊이에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 TA의 혼합률에 따라 탄산화 속도 상수를 정리한 그림이다. Fig. 8의 결과 탄산화 속도 상수는 TA의 혼합률이 증가함에 따라 비례적으로 증가하고 있었다.

이러한 원인은 주성분이 SiO<sub>2</sub>인 TA의 혼합률이 증가함에 따라서 시멘트의 사용량이 적어짐으로서 수화반응 중에 생성되는 강 알칼리성의 수산화칼슘 생성량이 부족하여 탄산화 진행 속도가 증가한 것으로 판단된다<sup>18)</sup>.

Fig. 9는 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 건조수축률

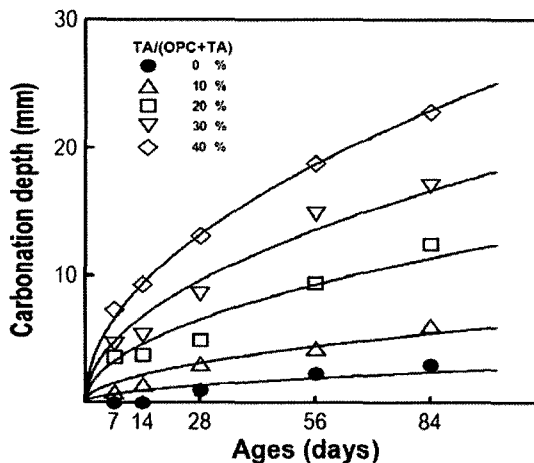


Fig. 7 Carbonation depth according to ages

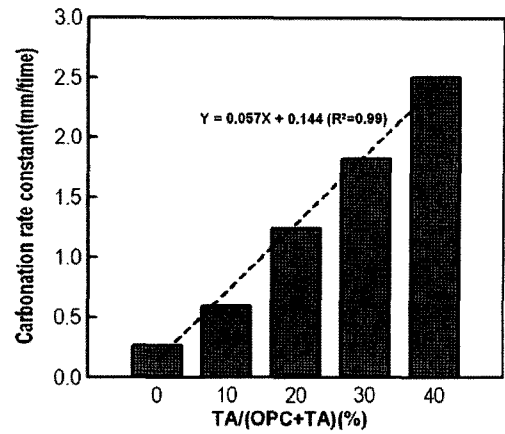


Fig. 8 Carbonation rate constant

을 검토하기 위해 4개월 동안 측정하여 정리한 그림이다. Fig. 9의 결과 TA의 혼합률 0, 10, 20, 30 및 40%로 증가함에 따라 건조수축률은 기준과 비교하여 재령 16주에서 각각 0.6, 0.8, 1.6, 3.1배 증가하였다. 이러한 경향은 TA의 혼합률이 증가함에 따라서 페이스트의 수화 반응에 관여하지 못하는 과잉수의 영향으로 건조수축률이 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 10은 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 건조수축

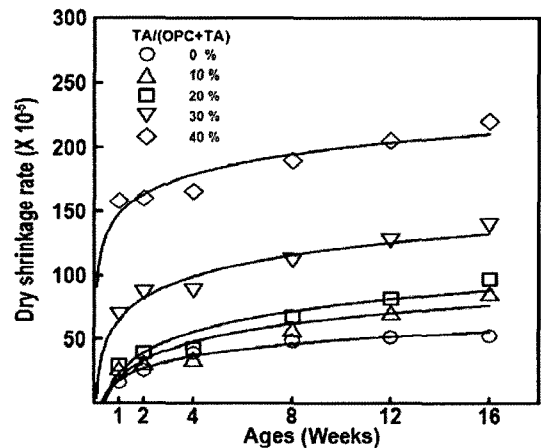


Fig. 9 Dry shrinkage rate according to ages

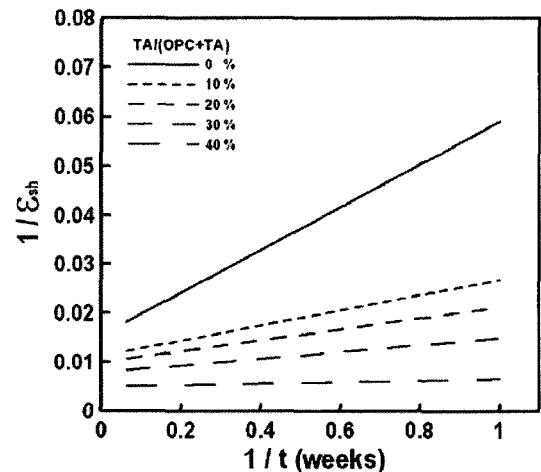


Fig. 10 Relationship of 1/t and 1/ε<sub>sh</sub>

률을 예측하기 위하여 ACI committees 209의 식에 준하여 정리한 그림이며, 식 (3)은 ACI committees 209의 식을 정리한 것이다<sup>22)</sup>.

$$\epsilon_{sh} = \frac{t}{a + bt} \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon_{sh}$  : 건조수축률( $\times 10^{-5}$ )  
 $t$  : 시간(주)  
 $a, b$ : 계수

Fig. 10은 식 (3)을 이용하기 위하여 시간의 역수  $1/t$ 과 건조수축률의 역수  $1/\epsilon_{sh}$ 를 선형식으로 나타낸 것이다.

Fig. 10에서 나타난 선형식에서 기울기는  $a$ , y절편은  $b$ 로서 식 (3)에 대입하여 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 건조수축률을 예측하는데 이용하였으며, Table 4는 기울기  $a$ 와 y절편  $b$ 를 정리한 표이다.

Fig. 11은 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 재령 16주에서 건조수축률을 예측하기 위하여 Table 4의  $a$ 와  $b$ 를 식 (3)에 대입하여 정리한 그림이다.

Fig. 11의 결과 재령 16주에서 TA혼합한 자기충전 콘크리트의 건조수축률 예측값은 실측값보다 다소 적은 경향을 보였으며, 실측값과 예측값의 비가 1.05에서 1.16의 범위로 나타나고 있었다. Table 5는 재령 16주에서 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 건조수축률의 실측값과 예측값을 정리한 것이다.

Fig. 11 및 Table 5의 결과 TA를 혼합한 자기충전 콘크리트는 식 (3)에 의한 건조수축률 예측이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

- 1) TA의 혼합률 0, 10, 20, 30 및 40%를 혼합한 자기충전 콘크리트의 유동성은 모든 배합에서 목표기준을 만족하였으며, 재료분리저항성 평가인 V-funnel 유하 시간과 슬럼프플로우 500 mm 도달시간은 TA의 혼합률이 증가함에 따라서 측정 시간이 다소 빨라지는 경향을 보였다.
- 2) TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 충전성 평가를 위한 U-box 충전높이는 TA의 혼합률 0, 10, 20 및 30%까지 목표 기준을 만족하고 있으나 TA의 혼합률 40%를 사용한 경우 과잉수의 영향으로 점성이 감소하여 재료분리 현상이 나타나 충전성에 문제가 발생하였다.

Table 4 Value of a and b

TA / (OPC+TA)(%)	a	b
0	0.044	0.015
10	0.016	0.011
20	0.011	0.010
30	0.007	0.008
40	0.002	0.005

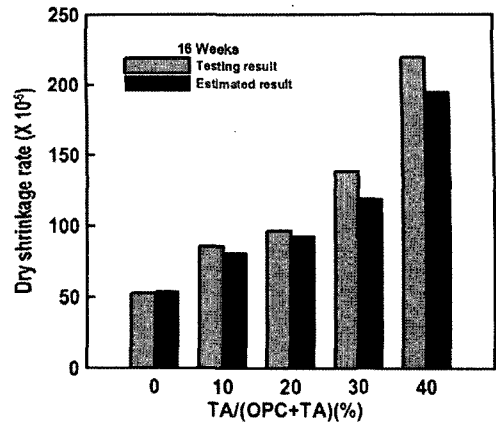


Fig. 11 Testing and estimated result of dry shrinkage rate

Table 5 Testing and estimated result of dry shrinkage rate at 16 weeks

TA/(OPC+TA)(%)	Testing result ( $\times 10^{-5}$ , A)	Estimated result ( $\times 10^{-5}$ , B)	A/B
0	53	55	0.96
10	86	82	1.05
20	97	94	1.03
30	139	120	1.16
40	220	196	1.12

- 3) TA의 혼합률이 증가함에 따라서 압축강도는 감소하여 TA의 혼합률 40%의 경우 재령 28일의 압축강도는 기준과 비교하여 55% 감소하는 결과를 나타냈으나, TA의 혼합률 10 및 20%의 경우 재령 28일 압축강도는 각각 34 및 31 MPa로 측정되어 자기충전 콘크리트 제조시 TA를 적절히 활용한다면 보통강도의 자기충전 콘크리트 제조가 가능할 것으로 판단된다.
- 4) TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 압축강도와 쪼갠 인장강도의 관계는 압축강도가 커짐에 따라 쪼갠 인장강도가 비례적으로 증가하여 기존에 제시된 식과 유사한 형태를 보였으며, 압축강도와 탄성계수의 관계 또한 콘크리트의 단위용적질량을 고려한 ACI 및 CEB-FIP에서 제시하고 있는 연구 경향과 유사하였다.
- 5) TA를 혼합한 자기충전 콘크리트의 탄산화 깊이는 혼합률이 10, 20, 30 및 40%로 증가함에 따라 재령 84일에서 기준과 비교하여 1, 3.2, 4.7 및 6.6배 증가하는 것으로 나타났고, 이러한 원인은 TA의 혼합률이 증가함에 따라서 시멘트의 사용량이 적어짐으로서 수산화칼슘의 생성량이 부족하여 탄산화 진행 속도가 증가한 것으로 판단된다.
- 6) TA의 혼합률 0, 10, 20, 30 및 40%로 증가함에 따라서 자기충전 콘크리트는 TA를 혼합하지 않은 콘크리트와 비교하여 재령 16주에서 각각 0.6, 0.8, 1.6, 3.1배 증가하였고, 이러한 경향은 TA의 혼합률이 증가함에 따라서 페이스트의 수화 반응에 관여하지 못하는 과잉수의 영향으로 건조수축률이 증가한 것으로 판단된다.

이상의 상동광산 광미를 혼합한 자기충전 콘크리트의

품질 특성 검토를 통하여 현재 휴·폐광산에 무분별하게 적치되어 환경오염과 각종 처리문제를 야기하고 있는 상동광산 광미를 자기충전 콘크리트의 분체계 혼화재료로 재활용하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 특히 분체계 자기충전 콘크리트의 혼합 분체로 적용시 콘크리트의 자기충전성, 역학적 특성 및 기타 내구 특성을 고려할 경우 광미의 혼합량을 30% 이내로 사용한다면 보통강도 자기충전 콘크리트 제조와 같은 강도조절용 분체로의 사용이 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 2005년도 산·학·연 과제 「고성능/다기능 콘크리트의 핵심 및 활용기술 개발」 중 「초유동 자기충전 콘크리트를 이용한 프리캐스트교량부재 개발 및 실용화」에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 정수복, “석탄광산 폐석의 유효 이용 방안 연구”, KR-04(C)-19, 한국지질자원연구원, 산업자원부, 2004, pp.23~24.
2. 채연배, “유해폐광미의 감량화/무해화를 위한 고도 선별·처리기술개발 연구”, KR-04(C)-16, 한국지질자원연구원, 환경부, 2004, pp.35~36.
3. 서정률, “국내 금속광산의 현황”, KIGAM Bulletin, Vol.9, No.1, pp.22~47.
4. 김희중, 양재의, 이재영, 전상호, “휴·폐광산지역에서 폐재내 중금속의 존재형태 및 용출특성에 관한 연구”, 한국지하수토양환경학회지, 8권 3호, 2003, pp.45~55.
5. 송원경, “금속광산 지역 지반침하 위험도 평가 연구”, KR-04(C)-13, 한국지질자원연구원, 산업자원부, 2004, pp.15~16.
6. 김대형, 권현호, “광산폐해의 방지 및 복구에 관한 법률”, KIGAM Bulletin, Vol.9, No.4, pp.32~40.
7. 최연왕, 정문영, 정명채, 구기정, “상동광산 광미를 콘크리트용 혼화재료로 사용하기 위한 모르타르의 품질 특성”, 콘크리트학회 논문집, 16권 3호, 2004, pp.383~390.
8. 최연왕, 김용직, 정문영, “상동광산 광미를 혼합한 자기

충전 콘크리트의 유동 및 강도 특성”, 대한토목학회 논문집, 26권 4A호, 2006, pp.767~774.

9. 최연왕, 정문영, 정명채, 구기정, “상동광산 광미를 혼합한 시멘트 페이스트의 레올로지 특성”, 2004년도 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, 강원도 평창, 16권 1호, 2004, pp.617~619.
10. Nan, S. and Miao, B., “A New Method for the Mix Design of Medium Strength Flowing Concrete with Low Cement Content”, *Cement and Concrete Composite*, Vol.25, Issue 2, 2003, pp.215~222.
11. Nan, Su., Hsb, K. C., and Cha, H. W. “A Simple Mix Design Method for Self-Compacting Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.31, Issue 12, 2001, pp.1799~1807.
12. 김용직, 최연왕, 문한영, “경량골콘크리트 밀도에 따른 자기충전 콘크리트의 배합설계”, 대한토목학회 논문집, 25권 2A호, 2005, pp.455~462.
13. 최연왕, 정문영, 정지승, 문대중, 안성일, “골재채움률 잔골재 용적비를 고려한 자기충전형 콘크리트의 최적배합”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 고려대학교, 14권 2호, 2002, pp.549~554.
14. ASTM C 29/C 29M-97, *Test for Unit Weight and Void in Aggregate*, American Society of Testing and Material, ASCE, USA, 2002, 4pp.
15. Okamura, H., *Self-Compacting High Performance Concrete*, Social System Institute, Tokyo, 1999, pp.5~15.
16. Okamura, H., Maekawa, K., and Ozawa, K., *High Performance Concrete*, Gihoudou Pub., Tokyo, 1998, pp.5~21.
17. 日本土木學會, “高流動 콘크리트施工指針”, 日本土木學會, 東京, 2002, 40pp.
18. 한국콘크리트학회, *최신콘크리트공학*, 기문당, 1999, pp.411~412.
19. Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., *Concrete*, McGraw-Hill, New York, 2005, pp.76~78.
20. ACI 318M-05, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI Manual of Concrete Practice, ACI, 2005, 99pp.
21. CEB-FIP Model Code 1990, *CEB Bulletin' Information No. 213/214*, Committee Euro-International Du Beton, Thomas Telford, 1993, pp.39~42.
22. ACI 209R-92, *Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effect in Concrete Structures*, ACI Manual of Concrete Practice, ACI, 1997, 47pp.

**요 약** 본 연구에서는 상동지역 중석광 광미를 콘크리트용 혼화재료로 사용하기 위한 연구의 일환으로 자기충전 콘크리트의 분체로서 적용가능성을 검토하였다. 상동지역 중석광 광미를 혼합한 자기충전 콘크리트의 자기충전성을 평가는 일본의 토목학회 기준을 적용한 슬럼프플로우, 슬럼프플로우 500 mm 도달시간, V-funnel 유하시간 및 U-box 충전높이 시험을 실시하여 검토하였다. 그 결과 슬럼프 플로우는 목표기준을 만족하였으며, 슬럼프플로우 500 mm 도달시간 및 V-funnel 유하시간은 상동지역 중석광 광미의 혼합률이 증가함에 따라 측정시간이 감소하였으며, U-box 충전높이는 상동지역 중석광 광미의 혼합률 30% 까지 목표기준을 만족하였다. KS 규준에 의해 평가된 역학적 특성 검토 결과는 압축강도의 경우 상동지역 중석광 광미의 혼합률이 증가함에 따라 압축강도는 감소하였고, 쪼갬인장강도 및 탄성계수는 기존의 연구 경향과 유사하였다. 건조수축률 및 탄산화 깊이는 상동지역 중석광 광미의 혼합률이 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

**핵심어** : 상동지역 중석광 광미, 자기충전 콘크리트, 탄성계수, 건조수축률, 탄산화