

# 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 품질 특성

## The Quality Properties of Self Consolidating Concrete Using Lightweight Aggregate

김용직\* · 최연왕\*\*

Kim, Yong Jic · Choi, Yun Wang

### Abstract

This paper presents the development of self-consolidating concrete (SCC) using lightweight aggregates. SCC using Lightweight aggregate properties have been evaluated in terms of flowability, segregation resistance and filling capacity of fresh concrete as per the standards of the Japanese Society of Civil Engineering (JSCE). The measurement of the mechanical properties of hardened SCC using lightweight aggregate, including compressive strength, splitting tensile strength, elastic moduli and density, as well as its dry shrinkage and carbonation properties were also carried out. The characteristics of SCC using lightweight aggregate at the fresh state showed that as the use of the lightweight aggregate, the flowability improves without exception of Mix No. 9 but the segregation resistance tends to decrease without exception of Mix No. 3, 4 and 5. The 28 days compressive strength of the SCC using lightweight aggregate was found to be 30 MPa or higher. The relationship between the compressive strength and the splitting tensile strength was found to be similar to the expression presented by CEB-FIP, and the relationship between the compressive strength and the elastic moduli was found to be similar to the expression suggested by ACI 318-08 which takes into consideration the density of concrete. The density of the SCC using lightweight aggregate decreased by up to 26% compared to that of the control SCC. Also, The dry shrinkage and carbonation depth of the SCC using lightweight aggregate increased compared to that of the control SCC.

**Keywords** : *self-consolidating concrete, lightweight aggregates, segregation resistance, dry shrinkage, carbonation depth*

### 요 지

본 연구에서는 자기충전 콘크리트의 배합설계 방법을 활용하여 경량골재콘크리트를 제조하였다. 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 평가는 굳지 않은 상태의 유동성, 재료분리저항성 및 충전성을 검토하였고, 성능평가 기준은 일본토목학회에서 제시하고 있는 성능평가 기준을 적용하였다. 또한 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 역학적 특성과 함께 건조수축 및 탄산화 특성을 검토하였다. 그 결과 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 유동성은 경량굵은골재와 경량잔골재를 동시에 100% 사용한 경우를 제외하고는 목표 성능기준을 만족하였으며, 재료분리저항성은 경량굵은골재 및 경량잔골재를 동시에 사용한 경우에 성능기준을 만족하였고, 충전성의 경우는 경량잔골재를 100% 사용한 경우를 제외하고는 성능기준을 만족하는 경향을 보였다. 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 채령 28일 압축강도의 경우 모든 배합에서 30 MPa 이상 발현되었으며, 압축강도와 인장강도 및 탄성계수의 관계는 기존의 연구 경향과 유사하였다. 또한 자중감소 효과는 기준 콘크리트와 비교하여 최대 26% 감소하였다. 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 건조수축과 탄산화 특성은 기준콘크리트와 비교하여 다소 증가하는 경향을 나타내고 있었다.

**핵심용어** : 자기충전 콘크리트, 경량골재, 재료분리저항성, 건조수축, 탄산화

### 1. 서 론

최근에는 토목시공기술의 발전과 더불어 콘크리트 구조물이 고층화, 대형화 및 특수화됨에 따라 부재의 형상이 다양하고 복잡해지고 있어 신기술 및 신공법에 의한 건설공사의 합리화가 요구되고 있다. 이러한 건설 환경의 전반적인 여건에 따라 시공의 효율성 및 품질향상을 고려한 자기충전 콘

크리트의 개발 및 콘크리트의 자중 감소와 단면 축소를 위한 구조용 경량골재콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Rossignolo 등, 2003; Su 등, 2003; Su 등, 2001; Yasar 등, 2003).

일반적으로 자기충전 콘크리트는 굳지 않은 상태에서 유동성과 재료분리에 대한 저항성이 우수하며, 별도의 다짐작업 없이 콘크리트의 자중만으로 복잡한 구조물을 용이하게 충

\*정회원 · 교신저자 · (주)대우건설 기술연구원 전임연구원 · 공학박사 (E-mail : yjkim08@dwconst.co.kr)

\*\*정회원 · 세명대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : crete77@semyung.ac.k)

전시킬 수 있는 콘크리트를 말한다. 자기충전 콘크리트의 제조 방법으로는 분체만을 이용하는 경우와 화학혼화제인 증점제를 활용하는 경우 혹은 두 가지를 병용하는 측면으로 연구가 진행되어 왔다(최연왕 등, 2004; Aitcin, 1998; Haque 등, 2003; Kilic 등, 2003; Rossignolo 등, 2002). 이러한 자기충전 콘크리트는 일본 동경대의 Okamura 교수에 의해 개념이 제시된 이후 콘크리트에 대한 기존의 고정관념을 뛰어넘는 획기적인 공법으로 인정받고 있으며, 일본의 건설회사 및 대학 연구소에서 실용화를 위한 지속적인 연구 및 현장시공도 이루어지고 있다(Okamura 등, 1998; Okamura 1999).

또한, 경량골재콘크리트는 구조물의 자중을 줄일 수 있는 장점 때문에 부재단면의 축소 및 시공의 간편화를 이룰 수 있어 장경간 교량 및 초고층 건물 등에 적용하여 시공비용을 절감할 수 있는 효과가 있다. 그러나 경량골재콘크리트는 재료 자체의 특수성으로 인하여 일반콘크리트와는 다른 배합설계 방법이 필요하다. 만약, 경량골재콘크리트 제조시 일반콘크리트의 배합설계 방법으로 제조할 경우 골재의 경량화에 따른 재료분리 현상 및 강도저하 현상이 발생할 수 있다. 따라서, 경량골재콘크리트 제조시 발생하는 재료분리 및 강도저하 현상 등을 해결하기 위한 방안중 하나로 자기충전 콘크리트의 배합설계 방법이 제시되고 있다. 자기충전 콘크리트의 배합설계 방법을 적용한 경량골재콘크리트는 굳지 않은 상태에서 점성을 증대시킴으로서 재료분리 현상을 방지할 수 있으며, 콘크리트의 품질안정 및 압축강도 30 MPa 이상의 구조용 경량골재콘크리트 제조가 가능할 것으로 판단되며, 최근 여러 연구자들에 의해 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다(최연왕 등, 2002; 최연왕 등, 2003; Kim 등, 2010).

따라서 본 연구에서는 사전 배합을 통하여 경량골재를 사용할 경우에 압축강도 30 MPa를 발현할 수 있는 기준 자기충전 콘크리트의 배합을 결정하였다. 기준 자기충전 콘크리트

의 배합설계를 적용하여 경량골재콘크리트를 제조하였으며, 경량골재의 혼합은 체적을 고려하여 경량골재를 대체하여 사용하였다. 자기충전 콘크리트의 성능평가는 일본토목학회에서 제시하고 있는 기준을 적용하여 평가하였다. 경화 콘크리트의 품질은 재령별 압축강도, 쪼갬 인장강도, 탄성계수, 기건 단위용적질량, 건조수축 및 탄산화를 측정하여 검토하였다(Chandra, 2002).

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트 및 골재

시멘트는 밀도 3.15 g/cm<sup>3</sup> 및 비표면적 3,539 cm<sup>2</sup>/g인 국내 S1의 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)를 사용하였다. 굵은골재는 최대치수(이하 G<sub>max</sub>로 약함) 20 mm, 밀도 2.72 g/cm<sup>3</sup>인 부순골재(이하 NC로 약함)를 사용하였고, 잔골재는 밀도 2.55 g/cm<sup>3</sup>인 강모래(이하 NS로 약함)를 사용하였다. 경량골재(이하 LA로 약함)는 유문암계 미분말을 주원료로 제조한 것을 사용하였으며, 화학성분은 표 1과 같다. 또한, 경량굵은골재(이하 LC로 약함)의 최대치수는 20 mm, 밀도는 1.58 g/cm<sup>3</sup>이고, 경량잔골재(이하 LS로 약함)의 밀도는 1.87 g/cm<sup>3</sup>, 0.08 mm 통과 미립분 양 5%인 것을 사용하였다. 사용골재의 물리적 성질은 표 2와 같다.

#### 2.1.2 혼화제

자기충전 콘크리트의 유동성을 확보하기 위하여 국내 H사

표 1. 경량골재의 화학성분(유문암계 미분말)

Type \ Items	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
LA*	74.20	13.20	1.00	1.00	0.10	-

\*Lightweighth Aggregate

표 2. 골재의 물리적 성질

Types \ Items	G <sub>max</sub> (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)	F.M.	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Percentage of solids(%)	Crushing ratio(%)
NC	20	2.72	0.80	6.72	1,668	62.3	14.6
NS	-	2.55	2.43	2.81	1,666	62.6	-
LC	20	1.58(1.23)*	28.09	6.40	793	50.2	23.8
LS	-	1.87(1.61)*	13.71	2.64	1,127	60.3	-

\*Density under oven-dry condition

표 3. 자기충전 콘크리트의 성능평가 기준안(일본토목학회, 분체계)

Items	Rank	1	2	3	
		Construction condition	Minimum gap between reinforcement (mm)	35-60	60-200
		Amount of reinforcement (kg/m <sup>3</sup> )	≥ 350	100-350	≤ 100
Flowability		Slump flow(mm)	600-700	600-700	500-650
Segregation resistance ability		Time required to flow through V-funnel (sec)	9-20	7-13	4-11
		The required to reach 500 mm of slump flow (sec)	5-20	3-15	3-15
Filling height of U-box test (mm)			≥ 300	≥ 300	≥ 300
Absolute volume of coarse aggregates per unit volume of SCC (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )			0.28-0.30	0.30-0.33	0.32-0.35

표 4. 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트 배합표

Mix No.	S/a (%)	W/C (%)	LC/ (LC+NC)(%)	LS/ (LS+NS)(%)	Unit mass(kg/m <sup>3</sup> )						HRWR (×C)(%)	AEA (×C)(%)
					W	OPC	NS	NC	LS	LC		
1	53	38	0	0	175	460	861	810	0	0	1.0	0.005
2	53	38	50	0	175	460	861	405	0	234	1.0	0.005
3	53	38	100	0	175	460	861	0	0	469	1.0	0.005
4	53	38	0	50	175	460	430	810	316	0	1.0	0.005
5	53	38	0	100	175	460	0	810	631	0	1.0	0.005
6	53	38	100	25	175	460	645	0	158	469	1.0	0.005
7	53	38	100	50	175	460	430	0	316	469	1.0	0.005
8	53	38	100	75	175	460	215	0	473	469	1.0	0.005
9	53	38	100	100	175	460	0	0	631	469	1.0	0.005

의 폴리카르본산계 고성능 감수제(이하 HRWR로 약함) 및 공기연행제(이하 AEA로 약함)를 사용하였다. HRWR의 밀도는 1.10±0.02 g/cm<sup>3</sup>, 사용량은 시멘트 질량에 대하여 1.0%를 사용하였다. 또한 AEA의 밀도는 1.04±0.01 g/cm<sup>3</sup>, 시멘트 질량에 대하여 0.005%를 사용하였다.

2.2 배합결정

본 실험에 사용한 콘크리트 배합은 예비 배합설계 실험을 통하여 기준 배합을 결정하였다. 기준 배합 결정시 사용한 자기충전 콘크리트의 성능평가 기준은 일본 토목학회에서 제시하고 있는 자기충전 콘크리트의 성능평가 기준 중 가장 범용적으로 활용할 수 있는 2등급을 선정하여 결정하였다. 표 3은 일본토목학회에서 제시하고 있는 자기충전 콘크리트의 성능평가 기준안 이다(JSCE, 1998).

경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 제조는 기준 배합의 골재 체적을 계산하여 경량굵은골재 및 경량잔골재를 대체하여 혼합하였다. 표 4는 경량골재를 이용한 자기충전 콘크리트의 배합표를 정리한 것이다.

2.3 시험방법

본 연구에 사용한 경량굵은골재는 표면건조 포화상태의 조건으로 콘크리트를 제조하였다. 경량굵은골재의 표면건조 포화 상태는 콘크리트 배합 24시간 전에 pre-wetting 과정을 통하여 수분을 충분히 흡수시킨 다음에 콘크리트를 제조하였다. 굳지 않은 콘크리트의 자기충전성 평가는 Slump-flow, Slump-flow 500 mm 도달시간, V-funnel 유하시간 및 U-box 충전시험을 콘크리트 믹싱 후에 바로 측정하였다.

콘크리트의 역학적 특성 검토를 위한 시험용 공시체는 다짐작업 없이 Ø 100×200 mm로 제조하였으며, 제작된 공시체는 24시간 후에 몰드를 제거한 다음 시험 전 까지 20±3°C에서 표준양생을 실시하였다. 콘크리트의 압축강도는 KS F 2403 및 2405에 따라서 재령 3, 7 및 28일에서 측정하였으며, KS F 2423에 의한 쪼갬 인장강도, 탄성계수 및 기전 단위용적질량은 재령 28일에 측정하였다. 콘크리트의 건조수축 시험은 KS F 2424에 따라서 실시 하였고, 시험용 공시체는 100×100×400 mm의 각주형 공시체의 양 끝단에 콘크리트 길이변화용 게이지 플러그를 삽입하고 다짐작업 없이 공시체를 제작 하였다. 제작된 공시체는 건조되지

않도록 습윤 상태에서 1일 후 콘크리트의 몰드를 제거하고 즉시 초기 길이를 1/1,000 mm 감도의 다이얼 게이지를 사용하여 측정하였다. 초기 길이 측정 후 건조수축에 의한 영향을 피하기 위해 7일간 20±3°C에서 수증 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, 촉진 탄산화 시험은 콘크리트의 압축강도용 공시체와 동일한 방법으로 제조하고 28일간 수증 양생을 실시한 후 Ø100×200 mm의 공시체를 반으로 절단하여 절단면 및 타설면에 에폭시 수지로 공극이 없도록 두께 1 mm 이상으로 마감하였다. 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 재령별 탄산화 깊이를 페놀프탈레인 용액을 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경량골재를 사용한 콘크리트의 자기충전성

그림 1, 2 및 3은 각각 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 유동성, 재료분리저항성 및 충전특성을 정리한 것이다. 그림 1의 유동성 평가를 위한 Slump-flow 측정결과 전체 골재를 경량골재로 사용한 배합(Mix No 9)을 제외한 모

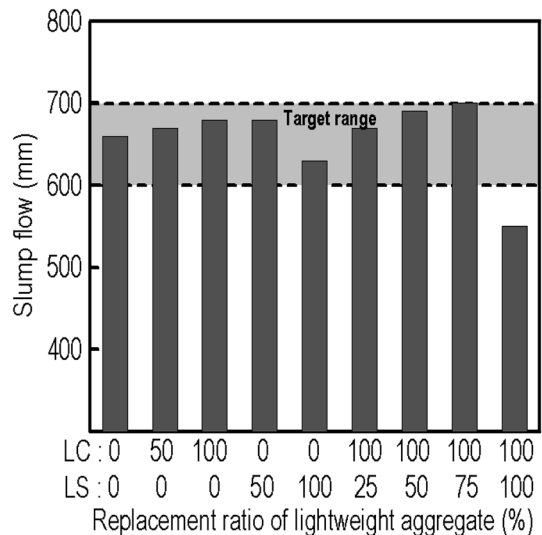


그림 1. 경량골재 혼합률에 따른 유동성 평가

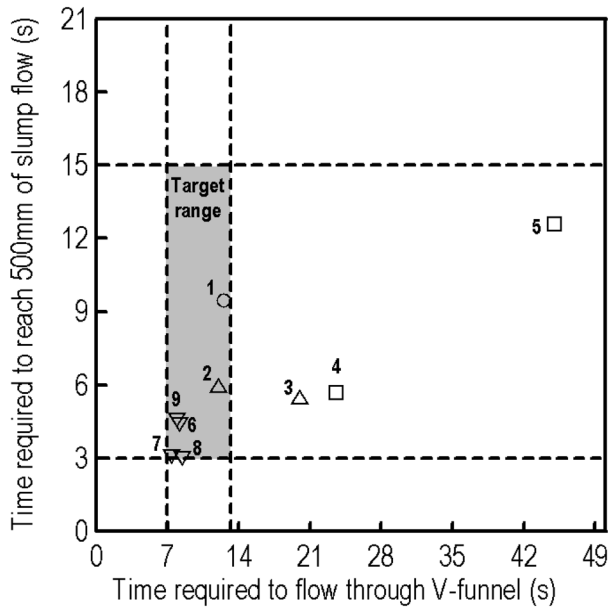


그림 2. 경량골재 혼합물에 따른 재료분리저항성 평가

든 배합에서 성능평가 기준 600~700 mm를 만족하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 경량골재를 혼합할 경우 콘크리트의 자중이 감소하여 보다 양호한 유동성을 확보한 것으로 판단되며, 또한 실험 전에 경량골재를 사전에 수분을 흡수시켜 사용함으로써 배합수량이 증가된 것으로 판단된다 (Lo 등, 2004; Lo 등 2004). 그러나 Mix No. 9와 같이 경량굵은골재 및 경량잔골재를 100% 사용할 경우 단위용적 질량이 기준콘크리트와 비교하여 26% 감소된 1,700 kg/m<sup>3</sup>이며, 경량잔골재에 포함된 미립분 양의 증가로 인하여 오히려 유동성이 저하된 것으로 판단된다.

그림 2는 재료분리 저항성을 알아보기 위하여 V-funnel 유하시간과 Slump-flow 500 mm 도달시간과의 관계를 정리한 것이다. 그림 2의 Slump-flow 500 mm 도달시간은 대부분 모든 배합에서 본 연구에서 제시한 목표 성능기준 범위를 만족하였다. 그러나 V-funnel 유하시간은 목표 성능기준 범위를 대부분 만족하고 있으나, Mix No. 3, 4 및 5는 목표 성능기준 범위를 벗어나고 있었다. 특히 Mix No. 4 및 5의 경우 경량잔골재의 혼합률이 증가할수록 V-funnel 유하시간이 목표 범위보다 점차 지연되는 경향이 나타났다. 이러한 원인은 경량잔골재의 혼합률이 증가함에 따라 비례적으로 미분이 증가하여 점성이 증가되었기 때문으로 판단된다. 그러나 경량잔골재를 부순 잔골재의 콘크리트 표준 시방서 기준을 적용할 경우 0.08 mm체 통과량 7% 이하인 5%로서 기준 범위를 만족하고 있다. 또한, 경량굵은골재 및 경량잔골재를 동시에 혼합하여 자기충전 콘크리트를 제조한 경우(Mix No. 6, 7, 8 및 9)는 기준 콘크리트와 비교하여 Slump-flow 500 mm 도달시간과 V-funnel 유하시간이 다소 빠르며, 기준 범위를 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 경량굵은골재와 경량잔골재를 동시에 혼합하여 사용함으로써 콘크리트의 자중감소 효과에 영향을 받은 것으로 판단된다. 따라서 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트 제조에 있어서 경량굵은골재와 경량잔골재를 동시에 혼합하여 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

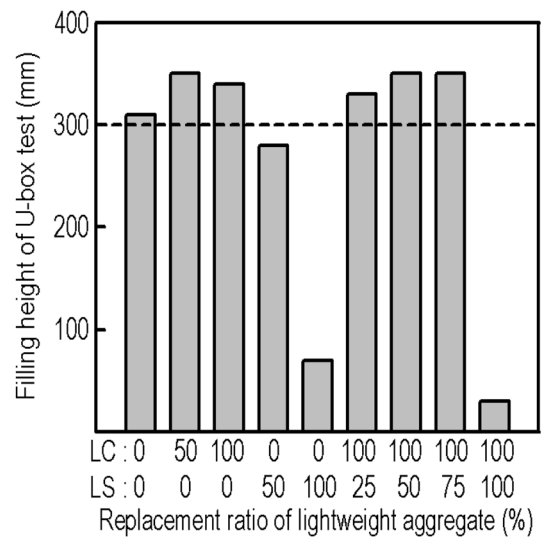


그림 3. 경량골재 혼합물에 따른 충전성 평가

그림 3은 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 충전성 평가를 위한 U-box 충전높이를 정리한 것이다. 그림 3의 결과 대부분 목표 성능 기준을 만족하고 있으나, Mix No. 4, 5 및 9의 경우 목표 성능기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 그림 1 및 2의 결과와 유사한 경향으로서 경량잔골재에 포함된 미분의 영향으로 점성이 증대되고 유동성이 다소 감소되었기 때문으로 판단된다.

### 3.2 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 역학적 특성

그림 4 및 5는 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 재령에 따른 압축강도를 정리한 그림이다. 그림 4 및 5의 결과 모든 배합에서 재령 28일 압축강도가 30 MPa 이상 측정되었다. 그림 4의 결과 경량잔골재만을 혼합한 Mix No. 4 및 5의 경우 40 MPa 이상의 압축강도가 발현되는 경향을 보이고 있다. 이는 경량잔골재의 혼합률이 증가할수록 미립분이 많아져 콘크리트 내부의 공극을 채워주는 filler 역할을 한 것으로 판단된다. 그러나 경량굵은골재만을 혼합한 Mix No. 2 및 3의 경우 경량굵은골재의 혼합률이 증가할수

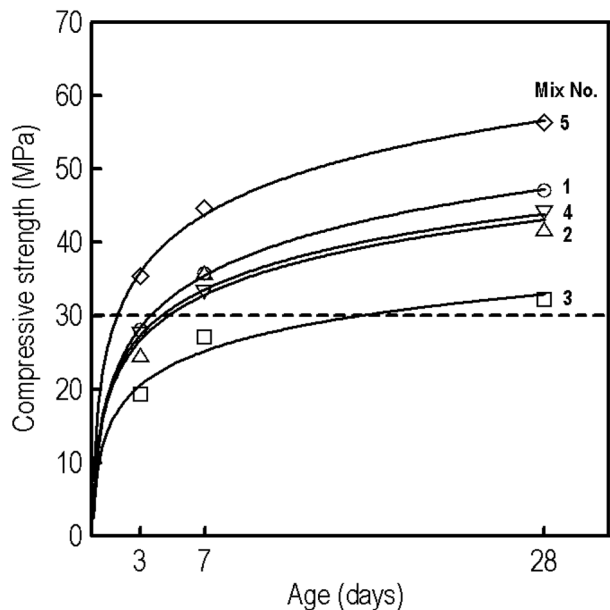


그림 4. 경량골재 혼합물에 따른 재령별 압축강도(Mix No. 1-5)

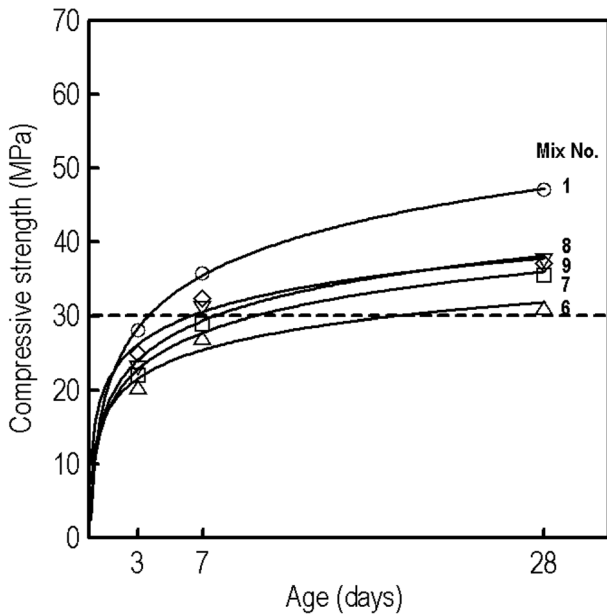


그림 5. 경량골재 혼합률에 따른 재령별 압축강도(Mix No. 6-8)

록 압축강도는 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 이는 경량골재의 파쇄율이 일반골재 보다 약 63% 높아 골재 자체의 강도가 낮으며(Turkmen 등, 2007), 또한 경량골재 자체의 흡수율이 28.09%로서 일반골재의 흡수율에 비하여 상당히 큰 품질 특성을 보이고 있다. 따라서 실험전에 사전흡수에 의한 전체 콘크리트의 배합수량이 증가되었기 때문으로 판단된다.

그림 5는 경량골재의 혼합률 100%와 경량골재의 혼합률을 25%씩 증가시켜 제조한 자기충전 콘크리트의 재령별 압축강도를 정리한 것이다. 그림 5의 결과 경량골재 및 경량골재를 동시에 사용한 경우도 경량골재의 혼합률이 증가함에 따라서 압축강도가 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 그림 4와 유사한 결과로 판단된다.

그림 6 및 7은 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 재령 28일에서 압축강도와 쪼갬 인장강도 및 탄성계수의 관

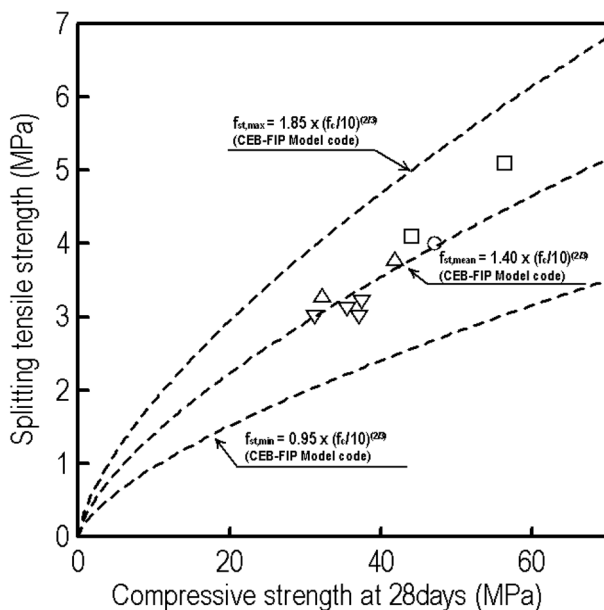


그림 6. 경량골재 혼합률에 따른 압축강도와 쪼갬 인장강도 관계

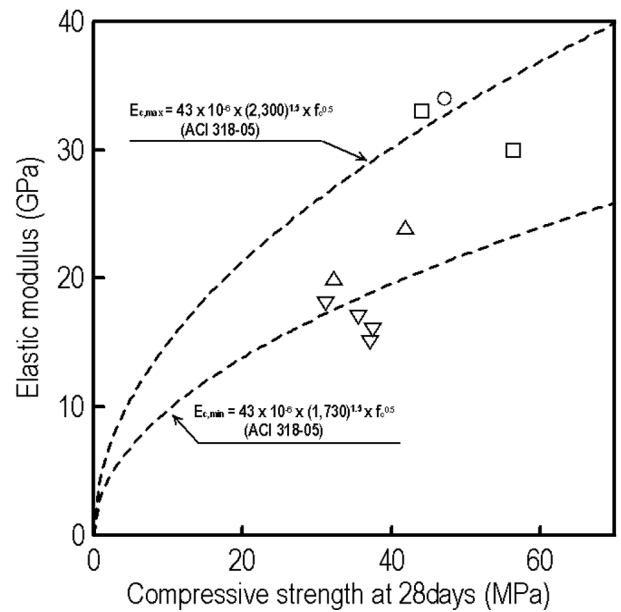


그림 7. 경량골재 혼합률에 따른 압축강도와 탄성계수 관계

계를 정리한 것이다. 그림 6의 결과 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 압축강도와 쪼갬 인장강도의 관계는 압축강도가 커짐에 따라 쪼갬 인장강도가 비례적으로 증가하였으며, 기존의 CEB-FIP Model Code에서 제시하고 있는 식과 유사한 경향을 나타내고 있었다(CEB-FIP, 1993).

또한, 압축강도와 탄성계수의 관계를 정리한 것이 그림 7이며, 그림 7에서 제시하고 있는 식들은 ACI 318에서 제시하고 있는 식이다(ACI, 2008). 그림 7의 결과 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 관계는 콘크리트의 단위용적질량을 고려한 ACI 318에서 제시하고 있는 식과 유사한 경향을 나타내고 있다. 일반적으로 경량골재콘크리트의 탄성계수는 골재의 종류 및 특성, 콘크리트의 압축강도와 단위용적질량 등의 영향을 받으며 일반콘크리트의 40~70% 정도이다. 이러한 원인은 경량골재 자체의 탄성계수가 작기 때문인 것으로 알려져 있다.

그림 8은 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 자중감소 효과를 알아보기 위하여 재령 28일 콘크리트에 대하여 기건 단위용적질량을 측정하여 정리한 것이다. 그림 8의 결과 자중

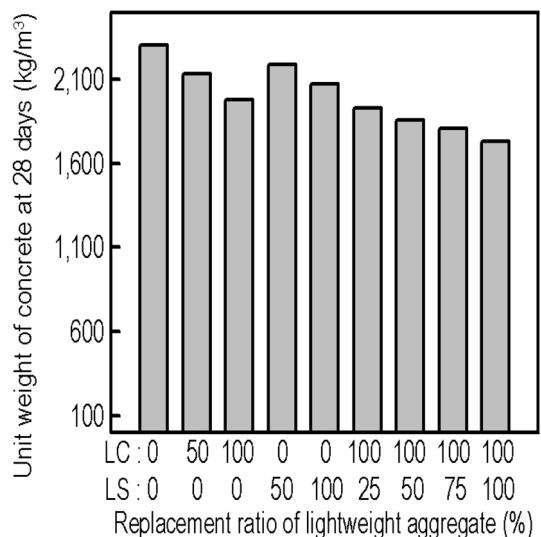


그림 8. 경량골재 혼합률에 따른 기건 단위용적질량

감소 효과는 경량굵은골재 및 경량잔골재를 각각 혼합한 경우 최대 15%의 자중 감소효과가 있었지만, 경량굵은골재와 경량잔골재를 동시에 혼합한 경우 최대 26%의 자중 감소 효과가 있다. 따라서 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트를 제조할 경우 경량굵은골재 및 경량잔골재를 동시에 혼합하여 사용하는 것이 자중 감소에 유리할 것으로 판단된다.

### 3.3 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 건조수축 및 탄산화

그림 9 및 10은 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 재령에 따른 건조수축률을 정리한 것이다. 그림 9 및 10의 결과 경량잔골재만을 100% 혼합한 경우를 제외하고는 기준 콘크리트와 비교하여 모든 배합에서 건조수축률이 다소 큰 경향을 보이고 있었다. 이러한 원인은 경량잔골재 내부에 포함되어있는 미립분의 영향으로 압축강도 특성과 유사한 결과로 판단되며, 경량굵은골재와 경량잔골재를 동시에 사용한

경우도 경량잔골재의 혼합률이 증가함에 따라서 건조수축률이 다소 감소하는 경향을 보이고 있다.

그림 11 및 12는 기존의 건조수축률 예측식인 식 (1)을 적용하기 위하여 정리한 것이다. 그림 11 및 12에서 식 (1)에 대입할 계수 a 및 b를 구할 수 있다.

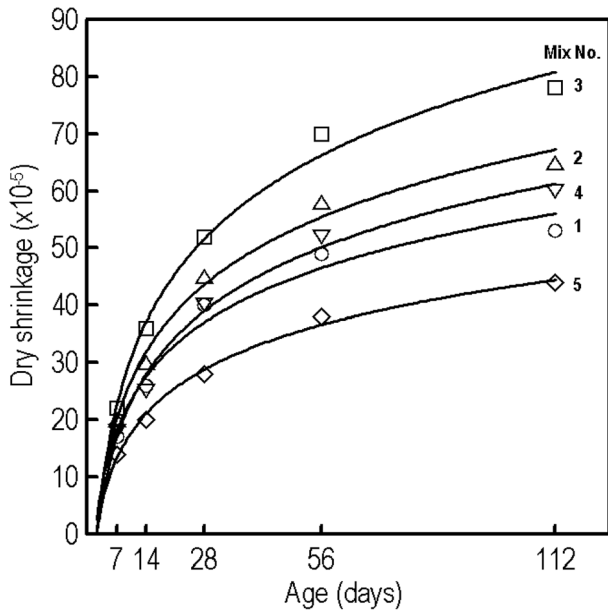


그림 9. 재령에 따른 건조수축률(Mix No. 1-5)

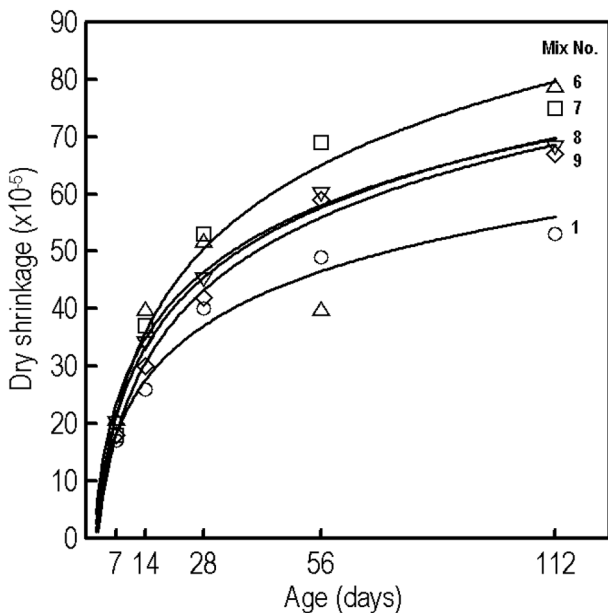


그림 10. 재령에 따른 건조수축률(Mix No. 6-9)

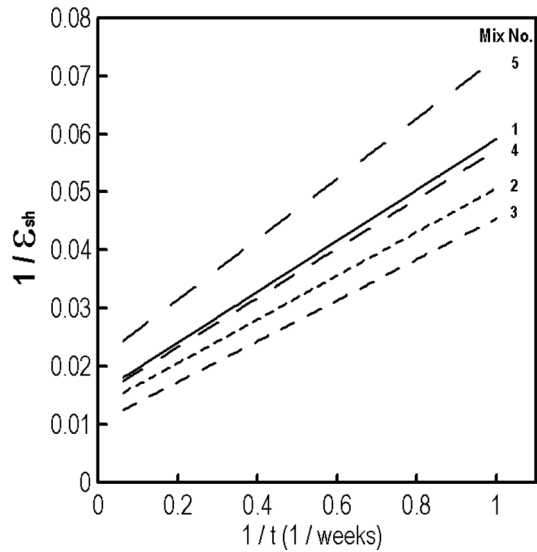


그림 11. 1/ε와 1/t의 관계(Mix No. 1-5)

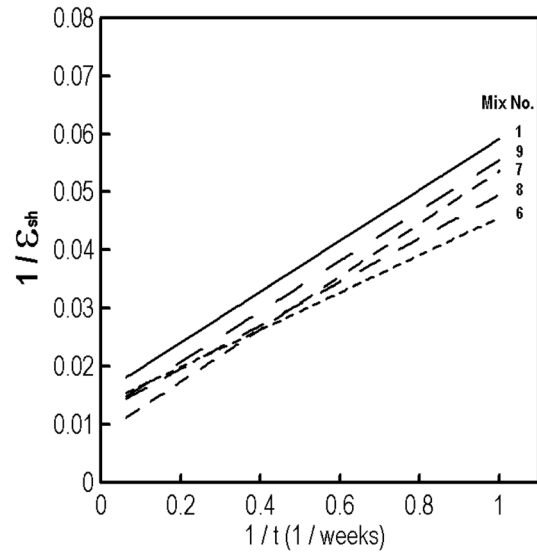


그림 12. 1/ε와 1/t의 관계(Mix No. 6-9)

표 5. 건조수축률의 실측 및 예측값

Mix No.	LC/(LC+NC) (%)	LS/(LS+NS) (%)	Measurement ( $\times 10^{-5}$ , A)	Prediction ( $\times 10^{-5}$ , B)	A/B
1	0	0	53	55	0.96
2	50	0	65	65	1.00
3	100	0	78	80	0.98
4	0	50	60	57	1.05
5	0	100	44	41	1.07
6	100	25	77	65	1.19
7	100	50	75	90	0.83
8	100	75	68	69	0.98
9	100	100	67	67	0.99

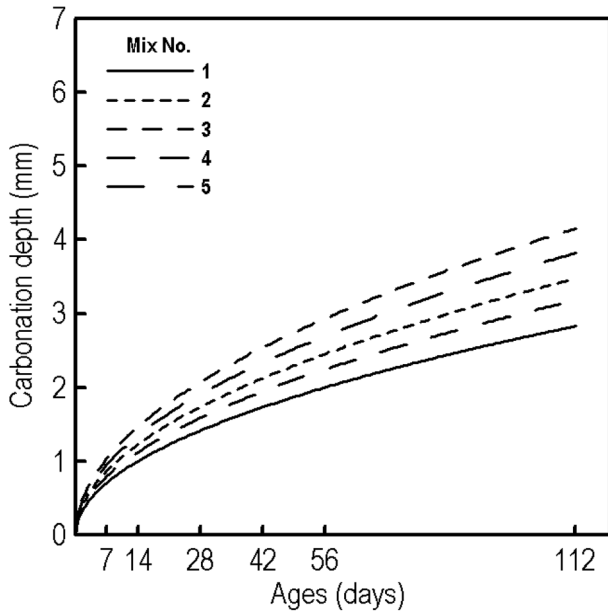


그림 13 재령에 따른 탄산화 깊이(Mix No. 1-5)

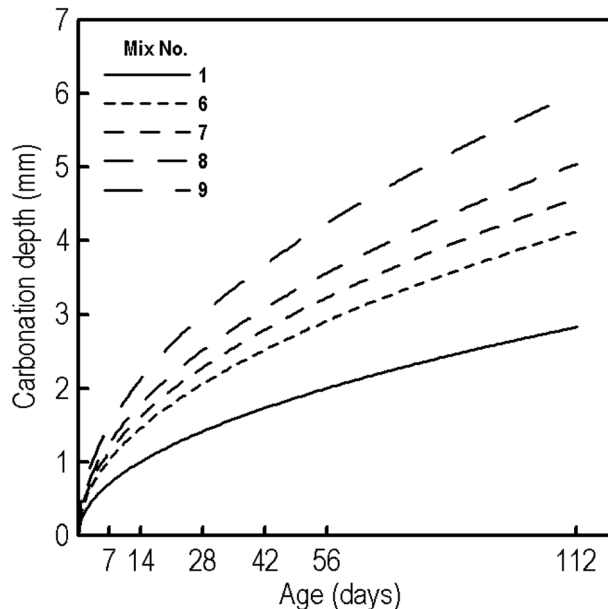


그림 14 재령에 따른 탄산화 깊이(Mix No. 6-9)

$$\varepsilon_{sh} = t/(a+b) \quad (1)$$

여기서,  $\varepsilon_{sh}$  : 건조수축률  
 $t$  : 재령 (weeks)  
 $a, b$  : 계수

표 5는 식(1)을 이용하여 재령 16주에서 건조수축률의 실측값과 예측값을 비교하여 정리한 것이다. 표 5의 결과 실측값과 예측값의 비는 0.83에서 1.19의 범위를 나타내고 있다.

그림 13 및 14는 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 재령에 따른 탄산화 깊이를 정리한 그림이다. 그림 13 및 14의 결과 기준 콘크리트와 비교하여 모든 배합에서 탄산화 깊이가 다소 큰 경향을 보이고 있다. 탄산화 진행속도 예측식은 식(2)를 이용하였다(최성 등, 2009).

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

여기서,  $y$  : 탄산화 깊이(mm)

표 6. 탄산화 속도계수

Mix No.	LC/(LC+NC)(%)	LS/(LS+NS)(%)	Carbonation velocity coefficient
1	0	0	0.26743
2	50	0	0.32809
3	100	0	0.39211
4	0	50	0.30023
5	0	100	0.36050
6	100	25	0.38961
7	100	50	0.43154
8	100	75	0.47632
9	100	100	0.56710

$C$  : 탄산화 속도계수

$t$  : 재령(weeks)

표 6은 식 (2)를 활용하여 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 탄산화 속도 계수를 정리한 것이다. 기준 콘크리트와 비교하여 탄산화 속도 계수는 경량굵은골재와 경량잔골재를 동시에 사용할 경우 최대 112% 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 원인은 경량골재의 내부가 다공성으로 이루어져 있어 투기성이 증대되어 이산화탄소가 골재를 통하여 내부로 침입함에 따라 탄산화 정도가 높아졌기 때문으로 판단된다. 일반적으로 콘크리트의 압축강도와 탄산화 속도계수와의 관계는 콘크리트의 압축강도가 높을수록 탄산화 속도계수가 낮아지는 것으로 알려져 있다. 따라서, 탄산화 속도계수는 경량굵은골재 및 경량잔골재의 혼합률이 증가할수록 콘크리트의 역학적 특성이 저하되는 현상과 관련이 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

1. 유동성 분석결과 전체 골재를 경량골재로 사용한 배합 (Mix No 9)을 제외한 모든 배합에서 목표 성능기준을 만족하였으며, 재료분리저항성은 Mix No. 3, 4 및 5를 제외한 배합에서 목표 성능기준을 만족하였다. 또한, 충전성 평가 결과는 Mix No. 4, 5 및 9를 제외한 모든 배합에서 목표 성능기준을 만족하는 것으로 나타났다.
2. 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 기준 콘크리트와 비교하여 최대 33%의 압축강도가 감소하는 경향이 있었으나 모든 배합에서 30 MPa 이상의 압축강도가 발현되었다.
3. 경량골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 재령 28일 압축강도와 쪼갬 인장강도의 비는 9.8에서 12.4로 나타났으며, 탄성계수는 ACI에서 제시한 연구 경향과 유사하였다. 또한 지중감소 효과는 경량잔골재 및 경량굵은골재를 동시에 혼합한 경우에서 26%로 나타났다.
4. 기존의 예측식을 이용하여 경량골재를 혼합한 자기충전 콘크리트의 건조수축률 예측 결과는 실측값과 예측값의 비가 0.83~1.19의 범위를 나타내고 있었으며, 탄산화 속도계수는 기준콘크리트와 비교하여 최대 112% 증가하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- 최선, 이광명, 정상화, 김주형(2009) 급속축진 탄산화 시험을 통한 플라이애쉬 콘크리트의 탄산화 특성 연구, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, Vol. 20, No. 4, pp. 449-455.
- 최연왕, 김용직, 최욱, 이상호, 조선규(2004) 경량 굵은골재 비중 및 혼합률에 따른 콘크리트의 자기충전성, **한국콘크리트학회 가을학술발표회논문집**, 한국콘크리트학회, pp. 747-750.
- 최연왕, 정문영, 정지승, 문대중, 안성일(2002) 골재 채움율과 잔골재 용적비를 고려한 자기충전형 콘크리트의 최적배합, **한국콘크리트학회 가을학술발표회논문집**, 한국콘크리트학회, pp. 549-554.
- 최연왕, 조선규, 최욱, 김경환, 안성일(2003) 간편 배합설계방법을 통한 중간강도 자기충전 콘크리트의 특성, **한국콘크리트학회 봄학술발표회논문집**, 한국콘크리트학회, pp. 83-88.
- ACI Building Code 318M-08 (2008) *Building code requirements for structure concrete and commentary*, ACI Committee 318.
- Aitcin, P.C. (1998) *High-Performance Concrete*, E&FN Spon, London.
- CEB-FIP Model code (1993) *Committee Euro-International du Beton(CEB-FIP)*, Thomas Telford, London.
- Chandra, S. and Berntsson, L. (2002) *Lightweight Aggregate Concrete*, Noyes, New York.
- Haque, M.N., Al-Khaiat, H., and Kayali, O. (2003) Strength and durability of lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, Vol. 26, Issue 4, pp. 307-314.
- JSCE (1998) *Japanese Society of Civil Engineering Guide to Construction of high Flowing Concrete*, Gihoudou Pub., Tokyo.
- Kilic, A., Atis, C.D., Yasar, E., and Ozcan, F. (2003) High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, Issue 10, pp. 1595-1599.
- Kim, Y.J., Choi, Y.W., and Lacjemi, M. (2010) Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol. 24, pp. 11-16.
- Lo, T.Y. and Cui, H.Z. (2004) Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete, *Materials Letters*, Elsevier, Vol. 58, Issue 6, pp. 916-919.
- Lo, T.Y., Cui, H.Z., and Li, Z.G. (2004) Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete, *Waste Management*, Elsevier, Vol. 24, Issue 4, pp. 333-338.
- Okamura, H. (1999) *Self-compacting high performance concrete*, Social System Institute, Tokyo.
- Okamura, H., Maekawa, K., and Ozawa, K. (1998) *High performance concrete*, Gihoudou Pub., Tokyo.
- Rossignolo, J.A. and Agnesini, M.V.C. (2002) Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Vol. 32, Issue 9, pp. 329-334.
- Rossignolo, J.A., Agnesini, M.V.C., and Morais, J.A. (2003) Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregate, *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, Vol. 25, Issue 1, pp. 77-82.
- Su, N. and Miao, B. (2003) A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content, *Cement and Concrete Composite*, Elsevier, Vol. 25, Issue 2, pp. 215-222.
- Su, N., Hsu, K.C., and Chai, H.W. (2001) A simple mix design method for self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Vol. 31, Issue 12, pp. 1799-1807.
- Turkmen, I. and Kantarci, A. (2007) Effect of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self compacting concrete, *Build Environ*, Elsevier, Vol. 42, pp. 2378-2383.
- Yasar, E., Atis, C.D., Kilic, A., and Gulsen, H. (2003) Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly-ash, *Materials Letters*, Elsevier, Vol. 57, Issue 15, pp. 2267-2270.

(접수일: 2010.6.14/심사일: 2010.7.27/심사완료일: 2010.9.10)