

# 플라이 애쉬 치환율에 따른 중량 자철석 콘크리트의 건조수축 평가

## Evaluation of Shrinkage of Heavyweight Magnetite Concrete with Fly Ash

문재성<sup>1\*</sup> · 양근혁<sup>2</sup> · 이현호<sup>3</sup> · 김상철<sup>4</sup>Jae-Sung Mun<sup>1\*</sup> · Keun-Hyeok Yang<sup>2</sup> · Hyun-Ho Lee<sup>3</sup> · Sang-Chel Kim<sup>4</sup>

(Received June 18, 2014 / Revised June 24, 2014 / Accepted June 28, 2014)

The objective of this study is to examine the drying shrinkage and autogenous shrinkage strains of heavyweight magnetite concrete. As a main parameters, cement was partially replaced by fly ash (FA) from 5% to 35%. The measured shrinkage strains were compared with predictions obtained from CEB-FIP equations and Yang et al.'s model. Test results showed that the magnitite of the autogenous and total shrinkage strains of heavyweight concrete slightly increased as the amount of fly ash increases up to 15%, beyond which the strains tended to decrease. The CEB-FIP equations considerably underestimated the shrinkage behavior of heavyweight concrete, indicating that this trend was more notable with the age. On the other hand, Yang et al.'s model predicted accurately the shrinkage of heavyweight concrete.

**키워드** : 수축, 자철석, 중량콘크리트, 플라이 애쉬

**Keywords** : Shrinkage, Magnetite aggregates, Heavyweight concrete, Fly ash

### 1. 서론

국내·외로 전력에너지 사용의 급증에 따라서 원자력 발전소의 건설이 각광받고 있다. 원자력 발전소의 건설에서 가장 중요한 요소는 방사선으로부터 안전하기 위한 차폐 성능이다. 방사선 차폐 성능을 증가하기 위해서는 콘크리트 부재의 두께를 증가시키는 방법과 중량 콘크리트를 사용함으로써 밀도를 증가시키는 방법 등이 있다. 이러한 점에서 중량콘크리트의 사용은 동일한 차폐 성능을 갖기 위한 대안으로 장점을 갖는다.

콘크리트 부재가 안정적으로 차폐 성능을 유지하기 위해서는 균열의 발생 여부가 가장 중요한 요소이다. 콘크리트 부재의 균열은 소성균열, 자기수축 균열, 건조수축 균열 및 탄화수축균열 그리고 구조 균열로 분류 할 수 있다. 이 중 건조수축 균열은 수화된 결합재에 흡착되었던 수분의 증발로 콘크리트 체적이 감소하여 발

생하는 것으로 콘크리트 부재의 역학적으로 많은 문제를 야기 시킨다(Choi et al., 2012). 이에 따라 중량콘크리트를 사용한 차폐벽에서 건조수축 균열의 제어는 매우 중요한 사항이다. 하지만 중량 콘크리트의 특성에 대한 연구는 사용 중량골재의 특성에 따른 재료의 유동성 및 압축강도 발현 등의 기초적 연구가 대부분이다(Davis et al., 1956; Witte and Backstorm, 1954; Katharine, 1972). 이러한 이유로 콘크리트 구조부재의 적용을 위한 기준들에서 콘크리트 건조수축 특성은 콘크리트 기건단위질량에 대한 영향을 전혀 고려하고 있지 않다.

콘크리트 건조수축은 사용 골재의 종류와 양에 따라 중요한 영향을 받는다(Tarr and Farny, 2008). 특히 중량 골재는 일반적으로 보통 중량 골재와 비교하여 높은 비중과 탄성계수를 가지며, 낮은 흡수율을 갖기 때문에 콘크리트의 수축을 저감에 효율적일 수 있지만 이 역시 콘크리트 배합조건에 따라 큰 영향을 받는다.

\* Corresponding author E-mail: [whenwhere@kgu.ac.kr](mailto:whenwhere@kgu.ac.kr)

<sup>1</sup>경기대학교 일반대학원 건축공학과 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Kyonggi-do, 443-760, Korea)

<sup>2</sup>경기대학교 플랜트·건축공학과 (Department of Plant·Architectural Engineering, Kyonggi University, Kyonggi-do, 443-760, Korea)

<sup>3</sup>동양대학교 건축소방행정학과 (Department of Architecture and Fire Administration, Dongyang University, Yeongju, 750-711, Korea)

<sup>4</sup>한서대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Hanseo University, Chungnam, 356-706, 305-731, Korea)

따라서, 중량 콘크리트의 건조수축 평가는 다양한 실험결과들을 바탕으로 보통 중량콘크리트의 실험결과에 기반하고 있는 설계기준의 안전성 평가부터 이루어질 필요가 있다.

본 연구의 목적은 자철석을 이용한 중량콘크리트의 자기수축 건조수축 변형률 거동을 파악하는데 있다. 실험결과를 CEB-FIP(1999)의 설계모델 및 Yang et al.(2003)의 제안모델과 비교하였다. 플라이애쉬 치환을 최대 20%까지 허용하고 있는 국내 원전 구조물의 시방기준을 참고로 중량 자철석 콘크리트의 건조수축에 대한 플라이애쉬 치환율의 영향을 주요 변수로 설정하였다. 플라이 애쉬 치환율에 따른 중량콘크리트의 내부공극 분포를 측정함으로써 이들이 콘크리트 건조수축 변형률에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 실험

### 2.1 배합설계

건조수축을 평가하기 위한 자철석 중량 콘크리트의 배합은 Table 1에 나타내었다. 원전용 콘크리트의 기준인 ACI 304.3R(1997)에서는 FA의 사용량을 15~25%로 제한하고 있다. 이에 따라, FA의 치환율은 제한량의 범위에서 상하한치의 10%를 고려하여 5~35%로 총 5배합을 실시하였다. 모든 배합은 물-결합재 비를 45%로 고정하였으며, 잔골재율과 단위수량은 40%, 180kg/m<sup>3</sup>으로 하였다. 중량콘크리트의 유동성은 100mm이하를 추천하고 있다. 이에 따라서 감수제의 사용은 타설을 위한 최소한의 유동성을 갖기 위하여 폴리카르본산계 감수제를 0.5%를 첨가하였다.

### 2.2 재료특성

사용된 재료의 화학적 조성 Table 1에 나타내었다. 주 결합재로는 OPC와 FA가 사용되었다. OPC는 CaO와 SiO<sub>2</sub>가 주요성분으로 각각 62%와 21.3%이었으며, 비중과 분말도는 각각 3.15, 3,800cm<sup>2</sup>/g 이었다. FA는 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 주요성분으로 각각 57.0%, 29.3% 나타났으며, CaO가 0.4%인 F급으로 KS 규격 2종을 만족하였다. FA의 비중과 분말도는 각각 2.2와 4,200cm<sup>2</sup>/g 이었다.

중량골재는 국내 수급이 가능하고 ACI 304.3R(1997)에서 규정하고 있는 종류인 자철석을 사용하였다. 자철석 골재의 화학적 조성은 Table 1에 나타내었으며, 물리적 특성은 Table 2에 나타내었다. 사용된 자철석 골재는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 약 46~50%로 가장 높은 비율을 차지하였다. 잔골재와 굵은 골재의 최대 치수는 각각 5, 25mm가 사용되었으며, 흡수율은 0.6%로 보통 중량 골재보다 낮았다. 잔골재와 굵은 골재의 비중은 각각 3.76과 4.29 였다. 잔골재와

굵은 골재의 비중차이는 산화철(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 비율이 굵은 골재가 높기 때문인 것으로 판단된다.

자철석 골재를 구조용으로 사용하기 위한 입도분포는 KS F 2502(2006)에 준하여 Fig. 10에 나타내었다. 국내의 자철석 골재는 건축용 골재로 사용하고 있지 않기 때문에 건축용 골재로 사용하기 위해서 반드시 체가름이 수행되어야 한다. 이에 따라 자철석 잔골재와 굵은 골재의 조립률은 각각 3.1과 6.7이었다.

### 2.3 배합 및 측정

자철석 중량 콘크리트의 배합은 100ℓ 강제식 믹서기를 사용하였다. 굳지 않은 콘크리트에서는 초기 슬럼프와 공기량을 측정하였다. 경화된 콘크리트에서는 건조수축 평가를 위하여 KS 기준(2006)에 준하여 압축강도와 탄성계수를 측정하였다. 건조수축의 측정은 전체 건조수축과 자기수축을 측정하였다. 건조수축을 측정하기 위한 실험체는 150×150×550mm를 사용하였으며, 실험체

Table 1. Mix proportions of each concrete specimen

Specimen	W/B (%)	S/a (%)	*R <sub>f</sub> (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	OPC	FA	F	C
F5	45	40	5	180	380	20	1025	1754
F15			15		340	60		
F20			20		320	80		
F25			25		200	100		
F35			35		260	140		

\*R<sub>f</sub> - Replacement ratio of Fly-ash.

W, OPC, FA, F and Gindicate water, ordinary portland cement, Fly-ash, magnetite fine aggregate and magnetite coarse aggregate, respectively.

Table 2. Chemical composition of materials

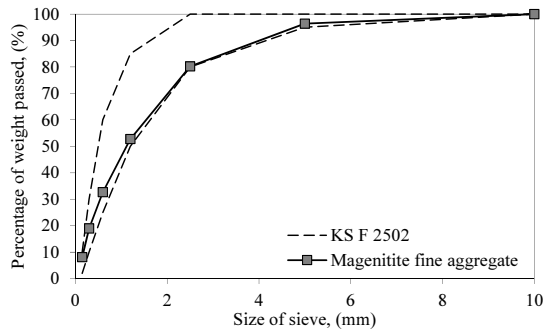
(% by volume)

Materials	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	
OPC	21.3	5.2	3.5	63.5	3.6	0.9	-	
Fly-ash	57.7	28.6	5.08	4.70	0.67	0.57	1.53	
Magnetite	Fine	17.9	7.4	45.8	2.8	7.9	0.3	15.4
	Coarse	12.7	7.2	49.8	1.8	7.4	0.3	18.6

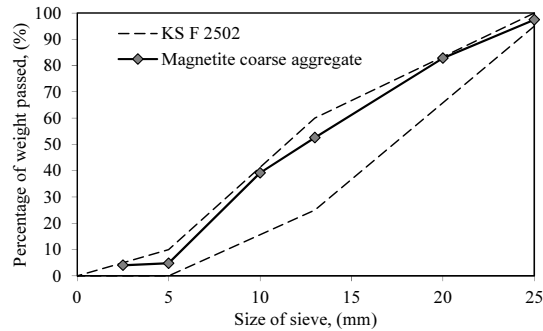
Table 3. Physical properties of Magnetite used

Type	G <sub>max</sub> (mm)	Gravity	Water absorption (%)	FM	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )
Fine	5	3.76	0.6	3.36	2,337
Coarse	25	4.29	0.6	6.7	2,487

G<sub>max</sub> is maximum size of aggregates and FM is fineness modulus of aggregates



(a) Fine aggregate



(b) Coarse aggregates

Fig. 1. Particle distribution curves of aggregates used

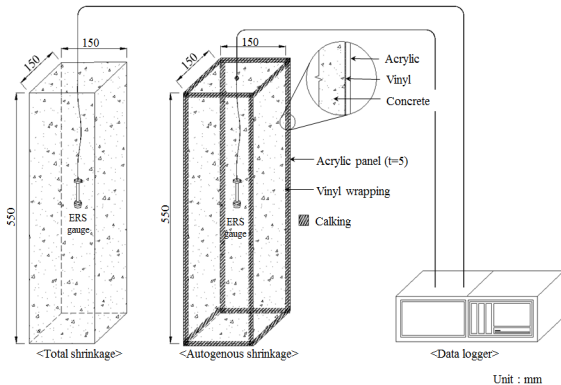


Fig. 2. Shrinkage testing procedures

Table 4. Summary of test results

Specimen	Slump (mm)	Air content (%)	$f_{ck}$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	Shrinkage strain ( $\times 10^6$ ) at different days							Unit weight ( $\text{kg/m}^3$ )
					Days							
					1	3	7	28	56	91	365	
F5	10	0.95	30.8	44,521	158	195	216	297	365	395	428	3,390
F15	10	0.9	33.2	47,764	179	212	243	334	377	410	458	3,363
F20	30	0.8	25.4	40,246	92	120	160	285	368	374	416	3,289
F25	50	0.7	24.5	40,279	106	146	187	302	341	354	386	3,275
F35	30	0.4	24.2	37,786	106	136	167	283	348	361	372	3,280

중량부에 장기수축용 스트레인 게이지를 매립하여 데이터 로거를 사용하여 타설 직후 30분 간격으로 재령 365일까지 측정하였다. 자기수축을 측정하기 위한 실험체는 수분의 증발을 억제하기 위하여 같은 크기의 실험체를 5mm의 아크릴몰드를 사용하였다. 몰드의 모서리 부분은 실리콘 처리를 하였으며, 전체 몰드는 비닐수지로 래핑하였다(Fig. 2). 모든 실험체는 양생온도  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ , 상대습도  $60 \pm 5\%$ 로 하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 일반사항

콘크리트의 건조수축 예측모델들은 콘크리트 타설 직후 노출시점( $t_s$ )과 재령( $t$ )에 따른 시간함수로서 양생 시 상대습도와 부재의 크기를 고려하여 건조수축 변형률을 제시하고 있다(식 (1)).

$$\epsilon_{sh}(t, t_s) = \beta T_{sh}(t, t_s) \epsilon_{sh\infty} \quad (1)$$

여기서,  $T_{sh}(t, t_s)$ 와  $\epsilon_{sh}(t, t_s)$ 는 시간함수와 건조수축 변형률이며,  $\beta$ 는 상대습도와 부재의 크기를 고려한 계수를 나타낸다.  $\epsilon_{sh\infty}$ 는 극한 건조수축 변형률을 나타낸다.

콘크리트의 건조수축 변형률은 일반적으로 재령, 상대습도, 결합재, 압축강도, 사용골재 그리고 부재의 크기에 영향을 받는다. 특히, 극한 건조수축 변형률은 특정한 재령을 지나면 일정한 변형률로 수렴하는 경향을 보인다. 이에 따라서, Ojdrovic와 Zargham-eee(1996)는 콘크리트 재령 28일을 기준으로 하는 건조수축 변형률의 예측모델을 제안하였다.

#### 3.2 건조수축 변형률

Table 4에 실험결과를 요약하여 나타내었으며, Fig. 30에는 플라이애쉬 치환율에 따른 중량 콘크리트의 건조수축 변형률을 나타내

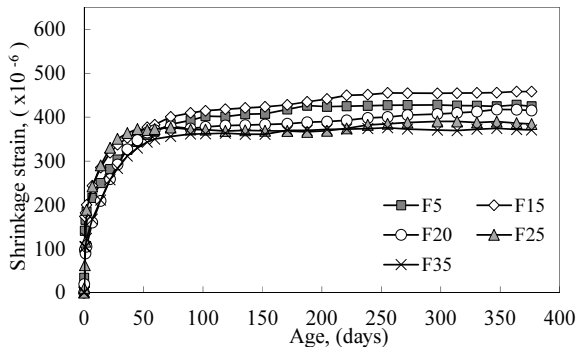


Fig. 3. Shrinkage behavior of concrete specimens

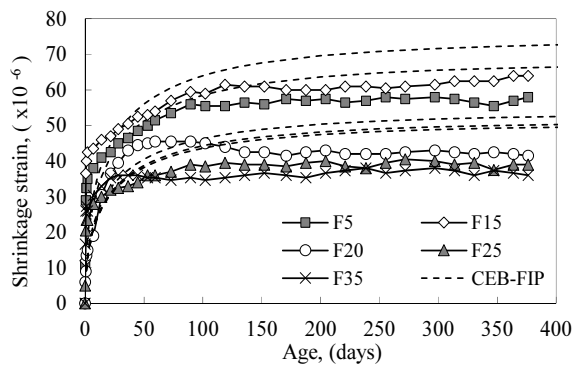


Fig. 4. Autogenous shrinkage behavior of concrete specimens

었다. 중량 콘크리트의 건조수축 변형률은 보통 중량 콘크리트와 마찬가지로 재령이 증가함에 따라서 일정하게 수렴하는 포물선 곡선의 경향을 나타내었다.

중량 콘크리트의 건조수축 변형률은 재령 365일을 기준으로 28 일 이전에 모든 배합에서 약 70~78%의 변형률이 급격하게 발생 하였으며, 장기재령으로 갈수록 건조수축 변형률의 증가량은 감소 하였다. 플라이애쉬 치환율에 따른 건조수축 변형률은 재령 28일 을 기준으로 하는 초기 재령에서는 플라이애쉬 치환율이 20% (F20)인 배합이 가장 작은 변형률을 나타내었다. 하지만, 그 후 장 기건조수축 변형률은 플라이애쉬 치환율 15%(F15)를 기준으로 치 환율이 증가함에 따라서 감소하여 최종적으로 플라이애쉬 치환율 이 35%인 배합이 가장 작은 건조수축 변형률을 나타내었다.

### 3.3 자기건조수축 변형률

자기건조수축은 양생기간 동안 외부로부터 추가 수분 공급이 없고 내부에서 외부로 수분 유출이 없는 상태에서 결합재와 물의 수화반응만으로 콘크리트 내부에 건조가 진행되어 수축하는 것이 다. 이러한 이유로 자기건조 수축에 대한 예측 모델들은 배합의

Table 5. Pore size distribution

Designation	$R_f=5\%$	$R_f=15\%$	$R_f=20\%$	$R_f=25\%$
Small mesopores	1.707	1.005	1.234	0.489
Large mesopores	6.473	8.044	6.210	6.065
Macropores	19.178	23.286	19.019	18.602
Total Porosity(%)	27.358	32.335	26.463	25.156

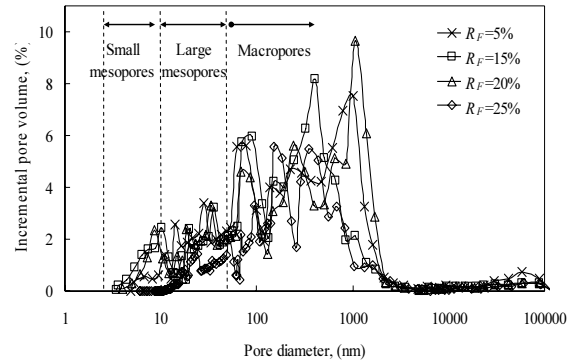


Fig. 5. Pore size distribution of pastes for various values of  $R_f$  at age of seven days

압축강도가 가장 큰 영향인자로 활용하고 있다. 플라이 애쉬 치환 율에 따른 중량 콘크리트의 자기건조수축 변형률은 Fig. 4에 나타 내었다. 동일한 그림에 CEB-FIP(1999)의 예측 모델과 비교하여 나타내었다. 자기건조수축 변형률도 전체 건조수축 변형률과 마찬가지로 재령 28일 이전에 장기재령인 365일과 비교하여 약 70% 이상 급격히 변형률이 증가 하였다. 플라이 애쉬 치환율에 따른 자기건조수축 변형률은 플라이애쉬 15%(F15)를 치환한 배합이 가 장 크게 나타났다. 이러한 이유는 Table 4의 실험결과에 나타났듯 이 F15의 압축강도는 33.2 MPa로 가장 높기 때문인 것으로 판단된 다. 이러한 결과는 모든 배합에서 같은 경향을 나타내었다. 즉, 자 기 건조수축 변형률은 압축강도 큰 순서대로 크게 나타났다. CEB-FIP(1999)의 제안 모델과의 비교는 모든 배합에서 CEB-FIP (1999)가 실험값보다 높은 자기건조수축 변형률을 보였다. 이러한 이유는 자철석 중량 골재가 보통 중량 골재와 비교하여 낮은 흡수 율을 갖고 높은 탄성계수를 가짐으로서 안정하지만, CEB-FIP (1999)에서는 골재이 종류에 대한 요소가 없기 때문인 것으로 판단 된다.

### 3.4 공극분포

플라이애쉬 치환율에 페이스트의 공극분포는 재령 28일에 측 정되었으며 실험결과는 Table 5와 Fig. 5에 나타내었다. 일반적으

로 콘크리트의 압축강도는 수화생성물의 강도 뿐만 아니라 내부 공극분포에 따라 영향을 받는다. 즉 시멘트의 수화도의 증가는 압축강도의 증가로 이어진다. 또한 내구 공극의 증가는 건조수축 변형률의 증가로 나타난다. 이러한 결과는 플라이애쉬의 치환율에 따라서 자기 건조수축 변형률과 같은 경향을 나타내었다. 압축강도가 가장 높은 F15의 배합의 경우는 내구 공극의 분포가 가장 높았으며, 이에 따라 자기 건조수축 또한 가장 높았다. 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 내구 공극량은 감소하였으며, 이에 따라 자기 건조수축 변형률도 감소하였다.

#### 4. 실험결과와 평가모델의 비교

플라이 애쉬가 치환된 중량 콘크리트의 실험값과 CEB-FIP (1999) 및 Yang et al.의 제안모델(2003)과의 비교는 재령 365일로 무차원하여 Fig. 6에 나타내었다. 또한 평가모델과 실험값의 비교는 오차계수법(RMSE)을 사용하여 평균과 표준편차로 평가하였다 (Table 6). 두 평가모델들은 보통 중량 콘크리트에 기반하고 있다. CEB-FIP 제안모델(1999)의 경우는 건조수축 변형률의 증가가 실험값과 비교하여 완만한 기울기 값을 나타내었다. 반면, Yang et al.의 제안모델(2003)은 초기 재령에서 나타나는 급격한 건조수축

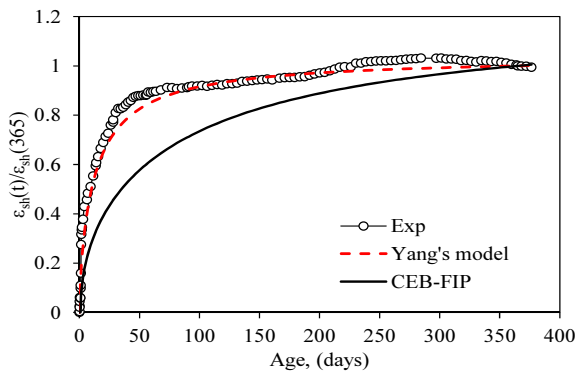


Fig. 6. Normalized shrinkage strains

Table 6. Comparison of normalized root-mean-square error calculated from each shrinkage curve

Statistical values	CEB-FIP	Yang's model
Mean	0.336	0.126
Standard Deviation	0.137	0.067

$$* RMSE = \frac{1}{\epsilon_{sh}(t, t_s)_m} \sum \left[ \frac{(\epsilon_{sh}(t, t_s)_{Exp} - \epsilon_{sh}(t, t_s)_{Pre})^2}{n} \right]^{1/2}$$

where,  $\epsilon_{sh}(t, t_s)_m$  is mean of the measured shrinkage,  $\epsilon_{sh}(t, t_s)_{Exp}$ , and  $\epsilon_{sh}(t, t_s)_{Pre}$  are the experimental and predicted shrinkage strains, respectively, and n is the number of measured points.

변형률을 잘 예측하였다.

이는 CEB-FIP의 제안모델(1999)의 경우는 보통 중량 콘크리트를 기반으로 설계되어 자철석에 대한 특성을 고려하고 있지 않은 반면, Yang et al.의 제안모델(2003)의 자철석을 특성을 고려하여 높은 예측률을 보이는 것으로 나타난다. 이러한 결과는 실험값과 예측값의 오차계수법에도 같은 결과를 나타내었다. CEB-FIP의 제안모델(1999)의 경우는 예측값과 실험값의 오차율이 평균과 표준편차를 각각 0.336, 0.137로 나타난 반면, Yang et al.의 제안모델(2003)의 오차율은 평균과 표준편차를 각각 0.126, 0.067로 잘 예측하였다.

#### 5. 결론

자철석을 이용한 중량콘크리트의 건조수축 변형률에 대한 플라이애쉬 치환율의 영향을 평가한 실험 및 예측모델과의 비교로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 중량콘크리트의 건조수축 변형률 및 자기수축 변형률은 플라이애쉬 치환율이 15% 이상에서 그 치환율이 증가함에 따라 감소하였다. 장기재령에서 플라이애쉬가 35% 치환된 중량콘크리트의 건조수축 변형률과 자기수축 변형률은 플라이애쉬가 15% 치환된 콘크리트에 비해 각각 약 19%와 46% 감소하였다.
2. 중량콘크리트의 건조수축 변형률에 대한 플라이애쉬 치환율의 영향은 콘크리트 압축강도 및 내부 공극분포에서 측정된 플라이애쉬 영향과 비슷한 경향을 보였다.
3. 중량콘크리트의 건조수축 변형률은 일반적으로 CEB-FIP 기준의 예측값보다 약 20% 낮은 반면, Yang et al.의 모델값에 비해서는 그 오차가 작았다. 이는 중량콘크리트의 건조수축 변형률을 합리적으로 예측하기 위해서는 골재의 특성을 고려해야 함을 의미한다.

#### 감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 2011-T100200161)

#### References

ACI Committee 304.3R-96. (1997), Heavyweight Concrete :

- Measuring, Mixing, Transporting, and Placing, ACI Manual of Concrete, 8.
- Choi, H.J., Choi, O.C., Choi, K.K., and Hwang, Y.J. (2012), A Prediction model of shrinkage cracking of steel fiber reinforced concrete, *Journal of Architectural Institute of Korea*, **28(6)**, 59–66.
- Comité Euro-International du Béton (CEB-FIP) (1999), *Structural Concrete: Textbook on Behaviour, Design and Performance*, International Federation for Structural Concrete (Fib), 224.
- Davis, H.S., Browne, F.L., and Witter, H.C. (1956), Properties of high-density concrete made with iron aggregates, *ACI Journal*, **27(7)**, 705–726.
- Katharine Mather (1972), High Strength, High Density Concrete, *ACI Journal(special Publication)*, **34(8)**, 1587–1596.
- Korea Industrial Standard (2006), Koean Standards Information Center.
- Ojdovic, R.P. and Zarghamee, M.S. (1996), Concrete Creep and Shrinkage Prediction from Short-Term Tests, *ACI Materials Journal*, **93(2)**, 169–177.
- Tarr, S.M, and Farny, J.A. (2008), *A concrete floor on ground*, 4 th ed, Portland Cement Association, 55–76.
- Witte, L.P. and Backstorm, J.E. (1954), Properties of heavy concrete made with baryte aggregates, *ACI Journal*, **51(6)**, 65–88.
- Yang, K.H., Mun, J.S., and Shim, H.J. (2013), Shrinkage of heavyweight magnetite concrete with and without fly ash, *construction and Building Materials*, **47**, 56–65.

#### 플라이 애쉬 치환율에 따른 중량 자철석 콘크리트의 건조수축 평가

이 연구의 목적은 중량 자철석 콘크리트의 건조수축 및 자기건조수축의 평가이다. 이를 위한 주요변수는 결합재 대비 플라이애쉬의 치환율 5~35% 총 5배합이 수행되었다. 측정된 건조수축 변형률은 CEB-FIP와 Yang et al.의 제안모델과 비교 분석하였다. 실험결과, 건조수축 변형률 및 자기 건조수축 변형률은 플라이애쉬의 치환율이 15% 이상에서 그 치환율이 증가함에 따라 감소하였다. CEB-FIP 제안모델과 실험값의 비교는 CEB-FIP의 예측값이 약 1.2배 이상 높게 나타났으며, 이러한 경향은 재령이 증가함에 따라 현저하였다. 반면, Yang et al.의 모델은 자철석 중량콘크리트의 건조수축 변형률을 잘 예측하였다.