



## 중량 자철석 콘크리트의 유동성 및 역학적 특성에 미치는 보통중량 굵은골재 치환율의 영향

문재성<sup>1)\*</sup> · 문주현<sup>1)</sup> · 양근혁<sup>2)</sup> · 이호<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>경기대학교 일반대학원 건축공학과 <sup>2)</sup>경기대학교 플랜트·건축공학과 <sup>3)</sup>경북대학교 융복합시스템공학부

### Effect of Substituting Normal-Weight Coarse Aggregate on the Workability and Mechanical Properties of Heavyweight Magnetite Concrete

Jae-Sung Mun,<sup>1)\*</sup> Ju-Hyun Mun,<sup>1)</sup> Keun-Hyeok Yang,<sup>2)</sup> and Ho Lee<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Seoul 120-702, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Plant · Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

<sup>3)</sup>School of Convergence & Fusion System Engineering, Kyungpook National University, Sangju 742-711, Korea

**ABSTRACT** The objective of this study is to evaluate the workability and various mechanical properties of heavyweight magnetite concrete and examine the reliability of the design equations specified in code provisions. The main parameters investigated were the water-to-cement ratio and substitution level of normal-weight coarse aggregate (granite) for magnetite. The oven-dried unit weight of concrete tested ranged between 2446 and 3426 kg/m<sup>3</sup>. The measured mechanical properties included compressive strength development, stress-strain curve, splitting tensile strength, moduli of elasticity and rupture, and bond stress-slip relationship of concrete. Test results revealed that the initial slump of heavyweight magnetite concrete increased as the substitution level of normal-weight coarse aggregate increases. The substitution level of normal-weight coarse aggregate had little influence on the compressive strength and tensile resistance capacity of heavyweight concrete, while it significantly affected the modulus of elasticity and stress-strain curves of such concrete. The design equations of ACI 349-06 and CEB-FIP provisions mostly conservatively predicted the mechanical properties of heavyweight magnetite concrete, but the empirical equations for modulus of elasticity and splitting tensile strength need to be modified considering the unit weight of concrete.

**Keywords** : heavyweight concrete, magnetite, workability, mechanical properties, design code

### 1. 서 론

일반적으로 중량 콘크리트는 X선과  $\gamma$ 선 등의 방사선 차폐를 위한 원전 구조물 또는 병원의 방사선실 등의 특수 용도로 주로 사용된다.<sup>1)</sup> 최근에는 콘크리트의 높은 수밀성과 고중량의 특성이 요구되는 해저 터널과 같은 수중 시설, 항만시설 및 도로용 중앙분리대 등으로 그 적용성이 확대되고 있다. 하지만 특수용으로 사용성이 제한적인 중량 콘크리트에 대한 기초연구 및 실험자료는 매우 미흡한 실정이다. 이에 따라 원전 구조용 콘크리트 설계기준인 ACI 349-06<sup>2)</sup>에서는 중량 콘크리트의 사용을 허용함에도 불구하고 보통중량 콘크리트 설계기준인 ACI

318-05<sup>3)</sup>를 기반으로 하고 있다. 또한 CEB-FIP<sup>4)</sup> 기준 및 EC 2<sup>5)</sup> 기준도 콘크리트 단위용적질량이 1400~2500 kg/m<sup>3</sup>의 범위에서 그 적용성을 제한함으로써 중량 콘크리트의 구조설계를 위한 기초자료는 매우 부족한 실정이다.

Davis,<sup>6)</sup> Witte<sup>7)</sup> 및 Karharine<sup>8)</sup> 등은 중정석, 갈철석, 자철석과 같은 각기 다른 중량골재를 사용하여 콘크리트의 기본조성과 역학적 특성에 대한 연구를 수행하였다. Karharine<sup>8)</sup>는 자철석을 사용한 콘크리트가 갈철석을 사용한 콘크리트에 비하여 우수한 압축강도를 발현함을 보였다. 하지만 콘크리트에 적용하기 위한 중량골재의 품질확보 및 수급이 어려워 중량 콘크리트의 연구는 매우 어려운 형편이다. ACI 304.3R<sup>9)</sup> 보고서는 중량골재는 보통중량골재와 비교하여 입형이 불규칙하고 예각이 보통중량 골재에 비해 높을 수 있기 때문에 콘크리트 배합 시 유동성이 떨어질 수 있으며, 중량골재의 높은 밀도로 다짐에 따른 콘크리트의 재료분리 가능성이 높음을 지적하였다. 또한, 중량 콘크리트의 경제성을 확보하기 위해서는 지역에서

\*Corresponding author E-mail : whenwhere@naver.com

Received February 15, 2013, Revised April 9, 2013,

Accepted April 15, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

생산되는 중량골재의 사용이 필요함을 지적하였다. 국내의 경우 생산 가능한 중량골재는 자철석이 유일하다. 따라서 자철석을 이용한 중량 콘크리트의 생산은 특별한 용도에 따라 중요하게 요구될 수 있다. 하지만, 이에 대한 기초자료 및 이를 활용한 구조부재의 설계를 위한 기초 역학적 특성들에 대한 유용한 정보는 매우 부족하다.

이 연구의 목적은 국내에서 생산하는 자철석을 이용한 중량 콘크리트의 유동성 및 역학적 특성들에 대한 기초 자료를 제시하는 것이다. 또한 경제성과 콘크리트 유동성을 고려하여 자철석을 보통중량 화강석으로 치환하는 것을 주요 변수로 설정하였다. 밀도가 서로 다른 자철석과 화강석 굵은골재의 사용에 따른 콘크리트 재료분리 특성은 굵은 콘크리트의 절단면에서 이미지 분석을 통해 확인하였다. 측정된 콘크리트의 역학적 특성들은 ACI 349-06<sup>2)</sup> 및 CEB-FIP<sup>4)</sup> 설계기준과 비교를 통하여 그 안전성을 평가하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 배합설계

물-시멘트비(W/C)가 35%(그룹 I)와 55%(그룹 II)에서 자철석 굵은골재를 보통중량의 화강석 굵은골재로 치환하였다(Table 1). 화강석 굵은골재를 이용한 체적 치환율은 25% 간격으로 변화시켰으며, 그 결과 배합표에 의한 콘크리트의 단위용적질량은 2446~3426 kg/m<sup>3</sup>의 범위에 있었다. 모든 배합에서 단위수량과 잔골재율(S/a)은 각각 180 kg/m<sup>3</sup>, 40%로 고정하였으며, 잔골재는 최대직경 5 mm 이하의 자철석을 사용하였다.

**Table 1** Mix proportions of each concrete specimen

Group	Specimen	W/C (%)	S/a (%)	R <sub>a</sub> <sup>(1)</sup> (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	F	G	MG
1	35-0	35	40	0	180	514	987	0	1689
	35-25			25				237	1267
	35-50			50				474	844
	35-75			75				712	422
	35-100			100				949	0
2	55-0	55	40	0	180	327	1076	0	1842
	55-25			25				259	1382
	55-50			50				517	921
	55-75			75				776	460
	55-100			100				1035	0

<sup>(1)</sup> R<sub>a</sub> - replacement ratio of normal weight coarse aggregates for heavyweight magnetite coarse aggregates. W, C, F, G and MG indicate water, ordinary portland cement, magnetite fine aggregate, granite coarse aggregate and magnetite coarse aggregate, respectively. The notation of specimens includes two parts; the former indicates water-to-cement ratio, and the other refers to the replacement level of normalweight coarse aggregates for heavyweight magnetite coarse aggregates.

### 2.2 사용재료

결합재로서 사용된 보통 포틀랜드 시멘트의 밀도와 분말도는 각각 3.15 g/cm<sup>3</sup>와 3800 cm<sup>2</sup>/g이다. 배합에 사용된 골재의 물리적 특성과 화학적 조성을 각각 Table 2와 3에 나타내었다. 보통중량 굵은골재는 목포산 화강석을 분쇄한 것으로서 최대직경 25 mm이다. 중량 잔골재와 굵은골재는 국내 생산이 가능하고 ACI 304.3R<sup>9)</sup>에서 규정하고 있는 자철석을 파쇄하여 최대치수 5 mm와 25 mm 이하로 분류하여 사용하였다. 콘크리트 배합에 사용된 골재의 입도 분포 곡선은 Fig. 1에 나타내었다. 국내에서 생산되

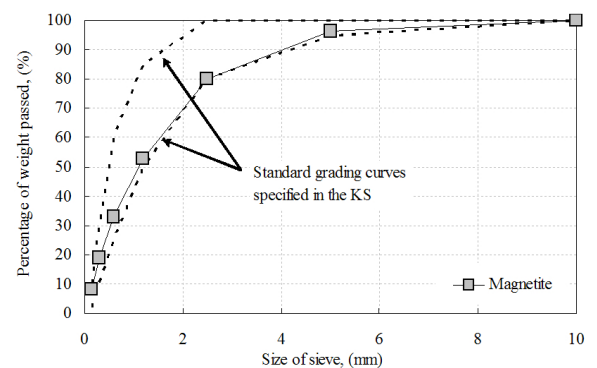
**Table 2** Physical properties of aggregates used

Type	G <sub>max</sub> (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water absorption (%)	FM	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )
Granite	25	2.41	1.03	6.4	1536
Magnetite	5	3.76	0.6	3.36	2337
	25	4.29	0.6	6.7	2487

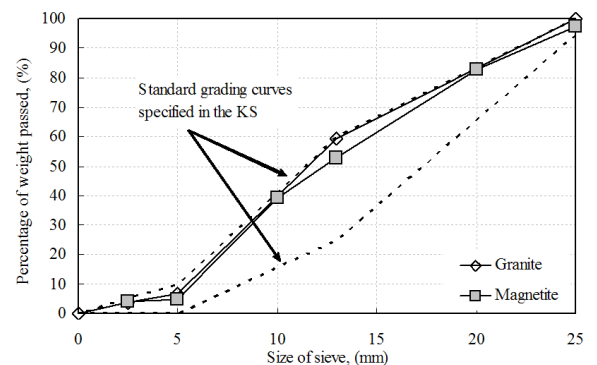
G<sub>max</sub> is maximum size of aggregates and FM is fineness modulus of aggregates.

**Table 3** Chemical composition of aggregates used (% by mass)

Type	G <sub>max</sub> (mm)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>
Granite	25	72.4	13.8	1.7	4.65	0.32	1.41	0.24
Magne-tite	25	12.7	7.2	49.8	0.3	7.4	1.8	18.6
	5	17.9	7.4	45.8	0.3	7.9	2.8	15.4



(a) Fine aggregate



(b) Coarse aggregates

**Fig. 1** Particle distribution curves of aggregates used

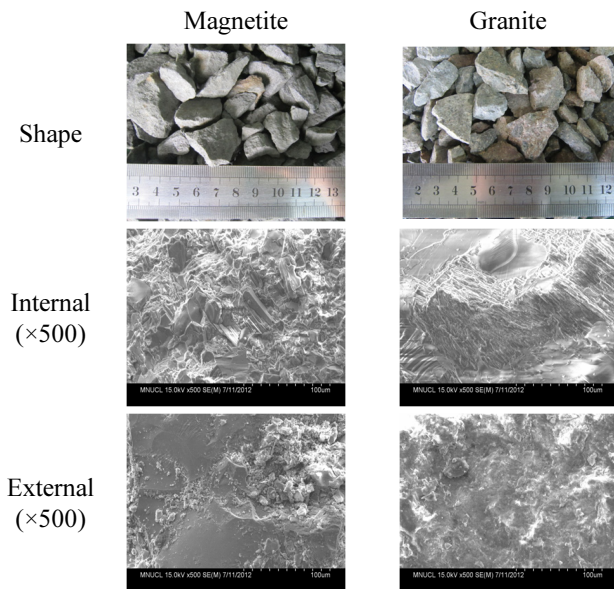


Fig. 2 Shape and scanning electron microscope image of coarse aggregates

는 자철석 골재는 콘크리트 골재용이 아닌 이유로 배합을 하기 위한 입도분포의 조절이 어렵기 때문에 이 연구에서는 중량 자철석 골재를 KS 표준입도 분포곡선<sup>10)</sup>에 만족하도록 체가름 후 사용하였다. 일반적으로 자철석 중량골재의 흡수율과 밀도는 산화철( $Fe_2O_3$ )의 함유량에 영향을 받는다. 이 연구에서 사용된 자철석 잔골재 및 굵은골재는  $Fe_2O_3$ 의 함유량이 각각 45.8%, 49.8% 이었으며, 밀도는 각각 3.76, 4.29  $g/cm^3$ 이었다. 자철석의 흡수율은 0.6%로서 1.03%인 보통중량 화강석 골재에 비해 낮았다. 자철석 골재의 표면 및 불규칙 형상은 보통중량의 화강석골재와 비슷한 수준이었다(Fig. 2). 내부면의 경우 화강석골재는 전체적으로 물결모양의 골들이 있는 반면, 자철석 골재는 일정하지 않은 모양이었다.

### 2.3 배합 및 측정방법

콘크리트 배합은 300l 용량의 강제식 믹서기를 사용하였다. ACI 304.3R<sup>9)</sup>에서는 콘크리트의 재료분리 및 건조수축 균열 방지를 위하여 중량 콘크리트의 초기 슬럼프를 100 mm 이하를 추천하고 있다. 이를 고려하여 이 배합에서는 슬럼프를 가능한 한 작게 설계하였다. 물-시멘트비가 35%인 그룹 I의 배합에서는 콘크리트 타설을 위한 최소한의 유동성을 얻기 위하여 폴리카본산계 감수제를 0.5% 첨가하였다. 실험체의 제작은 슬럼프를 고려하여 KS 2403<sup>10)</sup> 따라 진동다짐을 실시하였다. 모든 시험체들은 대기에서 1일 양생 후 강제 물드를 제거하여  $20 \pm 2^\circ C$ , 상대습도  $60 \pm 5\%$ 인 항온항습실에서 양생하였다.

유동성 평가를 위하여 굳지 않은 콘크리트에서는 배합 직후 초기 슬럼프를 측정하였다. 슬럼프의 측정은 KS F 2402<sup>10)</sup>의 기준에 따라 측정되었다. 압축강도는  $\phi 100 \times$

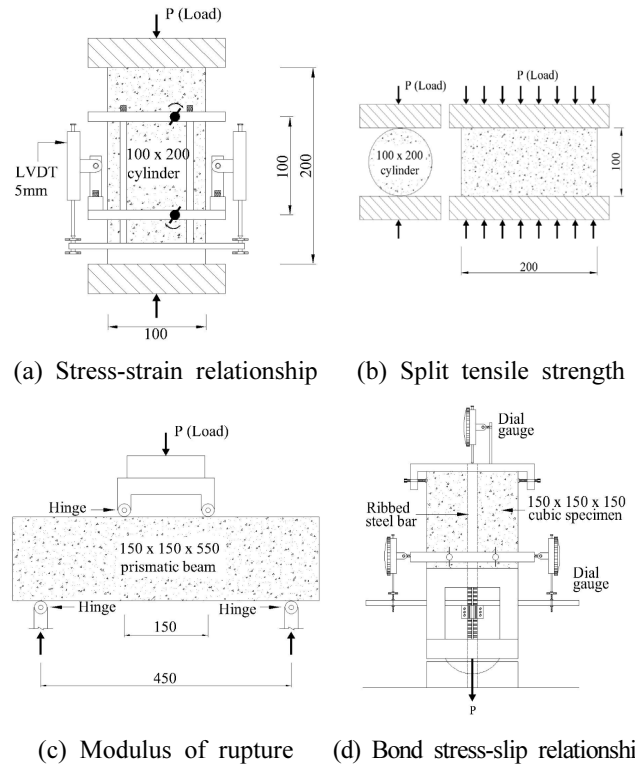


Fig. 3 Testing procedures for different properties of concrete (unit: mm)

200 mm의 원형 공시체를 이용하여 재령 1, 3, 7, 28, 56 및 91일에서 측정하였다. 탄성계수는 응력-변형률 곡선에서 최대응력 40%에서 원점을 잇는 기울기로 측정하였다(Fig. 3(a)). 쪼갬 인장강도는 KS F 2423<sup>10)</sup> 기준에서 제시하는 방법으로 측정하였다(Fig. 3(b)). 파괴계수는 KS F 2408<sup>10)</sup>에 따라 3등분점 휨 실험을 통해 평가하였다(Fig. 3(c)). 이형철근과의 부착응력-미끄러짐 관계는 150x150x150 mm 콘크리트 시험체에 매립된 직경이 16 mm 철근의 직접 인발실험으로 평가하였다. 부착실험을 위하여 사용된 철근은 콘크리트의 파괴 전에 항복을 방지하기 위하여 항복강도 820 MPa인 고강도 철근을 사용하여 평가하였다<sup>11)</sup> (Fig. 3(d)). 이들 역학적 특성들은 재령 91일에서 측정되었다.

### 3. 실험 결과

각 콘크리트 배합에서 측정된 실험 결과는 Table 4에 요약하였다. 일반적으로 콘크리트의 탄성계수, 인장저항성 및 부착강도와 같은 역학적 특성들은 압축강도의 지수승에 비례한다.<sup>12)</sup> 이를 고려하여 측정된 역학적 특성들은 동일재령에서 측정된 압축강도의 루트승으로 무차원하여 분석하였다. 또한 설계기준<sup>2,4)</sup>에서 제시하는 역학적 특성 모델들의 중량 콘크리트에 대한 그 안전성을 Table 5에 나타내었다.

**Table 4** Summary of test results

Group	Specimen	Slump (mm)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive strength, $f_{ck}$ (MPa)						Splitting tensile strength		Modulus of rupture		Bond strength		Modulus of elasticity	
				Day (s)						$f_{sp}$ (MPa)	$\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$	$f_r$ (MPa)	$\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}$	$v_b$ (MPa)	$\frac{v_b}{\sqrt{f_{ck}}}$	$E_c$ (MPa)	$\frac{E_c}{\sqrt{f_{ck}}}$
				1	3	7	28	56	91								
1	35-0	0	3359	29.4	35.32	37.17	41.42	43.22	44.62	3.34	0.50	4.98	0.746	17.50	2.620	51649	7732
	35-25	10	3103	28.02	36.36	41.53	46.29	48.67	49.88	3.34	0.473	5.35	0.758	17.98	2.546	40343	5712
	35-50	15	2869	25.88	31.8	38.43	43.07	45.72	46.46	3.22	0.472	5.31	0.779	16.42	2.409	35859	5261
	35-75	25	2679	25.18	31.35	36.13	41.37	44.14	44.75	3.12	0.466	5.16	0.771	15.17	2.268	33484	5005
	35-100	25	2473	21.21	32.91	37.36	45.75	48.67	50.26	2.95	0.416	5.00	0.705	16.73	2.360	32798	4626
2	55-0	10	3426	11.03	15.91	19.4	25.52	26.66	27.24	2.48	0.475	3.72	0.713	13.75	2.635	41687	7987
	55-25	15	3118	8.96	16.22	21.77	27.5	28.9	29.5	2.85	0.525	4.25	0.782	14.71	2.708	35255	6491
	55-50	20	2945	10.64	19.94	24.63	30.57	32.5	33.5	3.13	0.541	5.03	0.869	15.52	2.681	34840	6019
	55-75	25	2681	7.36	13.63	15.53	24.01	26.39	27.14	2.56	0.491	4.30	0.825	14.22	2.730	30985	5948
	55-100	35	2446	8.2	14.72	17.6	25.9	28.9	29.3	2.36	0.436	3.92	0.724	13.50	2.494	26837	4958

**Table 5** Comparisons of measured mechanical properties and predictions of code provisions

Group	Specimen	$\frac{(E_c)_{Exp.}}{(E_c)_{Pre.}}$		$\frac{(f_{sp})_{Exp.}}{(f_{sp})_{Pre.}}$	$\frac{(f_r)_{Exp.}}{(f_r)_{Pre.}}$		$\frac{(v_b)_{Exp.}}{(v_b)_{Pre.}}$
		ACI 349	CEB-FIP	CEB-FIP	ACI 349	CEB-FIP	CEB-FIP
		1	35-0	0.92	1.35	0.77	1.20
35-25	0.77		1.02	0.74	1.22	0.94	1.27
35-50	0.80		0.93	0.73	1.26	0.96	1.20
35-75	0.84		0.88	0.72	1.24	0.95	1.13
35-100	0.87		0.83	0.65	1.14	0.87	1.18
2	55-0	0.93	1.25	0.70	1.15	0.89	1.32
	55-25	0.87	1.03	0.78	1.26	0.97	1.35
	55-50	0.88	0.99	0.81	1.40	1.07	1.34
	55-75	1.02	0.94	0.73	1.36	1.05	1.39
	55-100	0.99	0.80	0.66	1.21	0.94	1.29
Mean		0.89	1.00	0.73	1.24	0.96	1.28
Standard deviation		0.08	0.18	0.05	0.08	0.06	0.08

### 3.1 초기 슬럼프

각 변수에 따른 초기 슬럼프는 Fig. 4에 나타내었다. W/C가 중량 콘크리트의 초기 슬럼프에 미치는 영향은 보통중량 콘크리트의 일반적인 경향과 비슷하였다. 굽은골재의 치환율이 따른 슬럼프 값은 W/C에 관계없이 화강석 골재의 치환율이 높아질수록 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 굽은골재의 밀도의 차이에 의하여 나타나는 현상으로 화강석 굽은골재와 비교하여 높은 밀도를 갖는 자철석 굽은골재가 유동성을 저하시키는 것으로 판단된다.

### 3.2 재료분리

Fig. 5에서는 타설된 콘크리트에서 굽은골재의 밀도차

이에 따른 재료분리를 판단하기 위하여 100×200 mm 원형공시체의 단면을 4등분하고 이미지 분석 프로그램 (i-solution)을 이용하여 각각 시멘트 페이스트, 화강석 그리고 자철석 굽은골재의 비율로 나타내었다. 화강석 굽은골재의 치환율이 0%와 100%에서는 각 4등분한 면적에서 시멘트 페이스트와 굽은골재의 면적 비율이 각각 약 60~70%, 30~39% 수준으로 분포하였다. 골재의 치환율이 25%인 경우는 시멘트 페이스트, 자철석 그리고 화강석 굽은골재의 분포가 면적 비율 약 60%, 25%, 15% 수준이었으며, 치환율이 75%인 경우는 약 60%, 9% 그리고 30% 수준에 있었다. 즉, 밀도가 다른 두 골재를 사용함에도 불구하고 콘크리트 내에서의 재료분리 현상은 미미하였다.

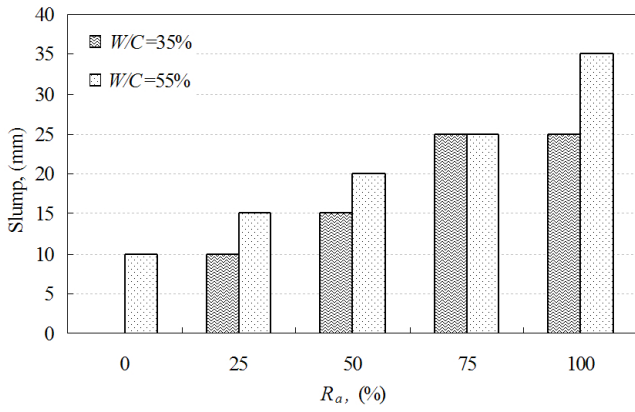


Fig. 4 Initial slump of fresh concrete

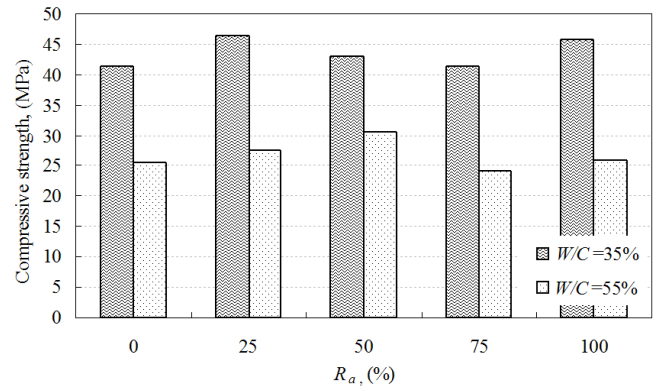


Fig. 6 28-day compressive strength of specimens

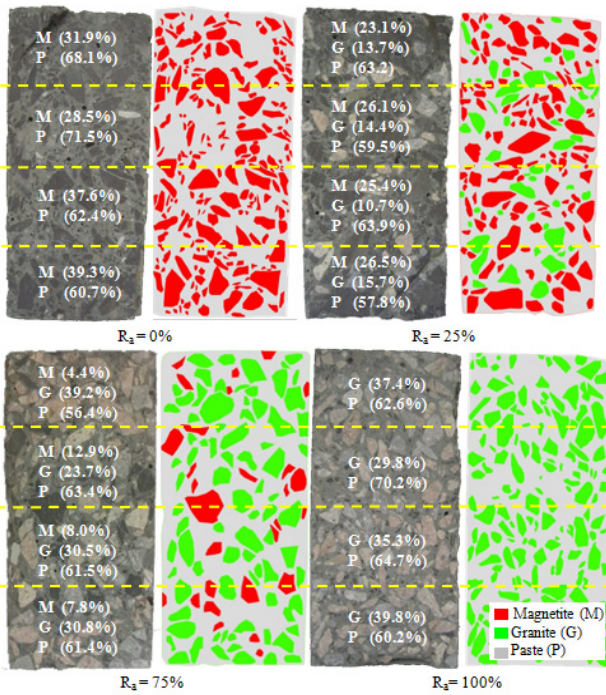


Fig. 5 Distribution of coarse aggregates along the height of concrete specimen

### 3.3 28일 압축강도 및 압축강도 발현율

일반적으로 중량 콘크리트는 골재의 높은 밀도로 인하여 유동성 및 다짐성이 다소 나쁘고 이는 압축강도 발현의 저하의 한 원인으로 작용할 수 있다. 중량 콘크리트의 압축강도는 예상한바와 같이 W/C 증가에 따라 감소하였다(Fig. 6). 반면, 보통중량 화강석 골재의 치환은 중량 콘크리트의 압축강도에 영향을 거의 미치지 않았다. 보통중량 골재가 치환된 콘크리트의 압축강도는 자철석만을 이용한 콘크리트 압축강도 대비 W/C가 35%일 때 0.99~1.11배, W/C가 55%일 때 0.94~1.2배 사이에 있었다.

재령에 따른 압축강도의 발현율은 Fig. 7에서 W/C에 따라 나타내었다. 동일 그림에 ACI 209<sup>13)</sup>와 CEB-FIP<sup>4)</sup>에서의 예측값을 나타내었다. ACI 209<sup>13)</sup>의 식은 결합재의 종류에 따른 압축강도 발현율의 예측으로써 1종 시멘트

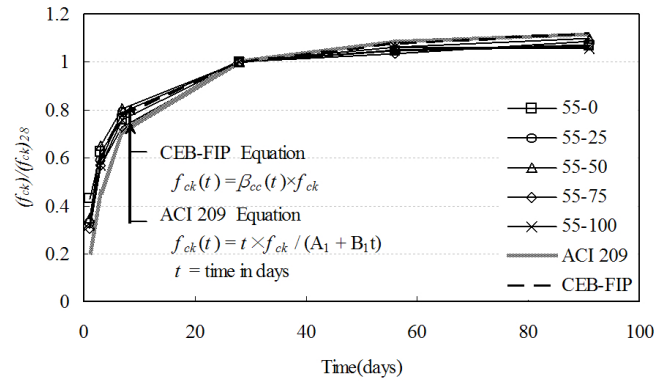
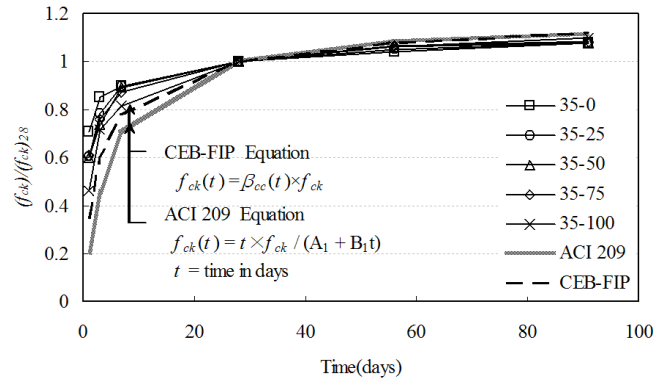


Fig. 7 Compressive strength development against age

를 사용하였을 경우 A와 B의 값은 각각 4.0과 0.85를 제시하고 있다. CEB-FIP<sup>4)</sup>의 예측식은 재령별 압축강도를 시멘트 종류와 시간의 함수( $\beta_{cc}$ )로 제안하고 있다. 실험 결과, 초기 재령에서는 W/C와 관계없이 예측식보다 높았다. 재령 7일의 압축강도 발현율은 재령 28일 압축강도 발현율과 비교하여 W/C가 35%, 55%에서 각각 81~89%, 73~80%의 범위에 있었다. 이러한 초기 압축강도 발현율은 화강석 굵은골재의 치환율이 감소할수록 높았다. 반면, 28일 이후 장기재령에서는 압축강도 발현율이 예측식과 비교하여 모든 배합에서 약 5~10% 감소하는 경향을 보였다. 이는 자철석 콘크리트의 압축강도 발현은 자철석의 화학적 성분에 의해 다소 영향을 받고 있음을 의

미한다. 따라서 콘크리트 압축강도 발현 평가를 위한 설계식들은 골재의 영향을 다소 고려할 필요가 있다고 판단된다.

### 3.4 응력-변형률 관계

중량 자철석 콘크리트의 응력-변형률 관계를 CEB-FIP<sup>4)</sup>의 예측식(압축강도 45 MPa와 27 MPa일 때)과 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 중량 콘크리트는 높은 단위용적질량으로 인하여 보통중량 콘크리트와 비교하여 상승부 구간의 기울기가 크고, 이에 따라 최대 응력 시 변형률은 작았다. 또한 최대응력 이후 하강부 구간은 보통중량 콘크리트 실험 결과에 기반한 CEB-FIP<sup>4)</sup> 제안식에 비해 더 연성적으로 거동하는 특성을 보였다. 보통중량 굵은골재 치환율에 대한 응력-변형률 관계는 중량 콘크리트의 특성에 부합하여 자철석 굵은골재의 함유량이 높은 배합일수록 상승부 구간의 기울기는 컸다. 이에 따라 최대응력 시 변형률은 압축강도가 45 MPa와 27 MPa일 때 각각 0.021과 0.018로서 CEB-FIP<sup>4)</sup> 예측값에 비해 87.5~90.0% 범위에 있었다. 즉, 콘크리트의 응력-변형률 관계는 압축강도 뿐만 아니라 단위용적질량에 의해서도 중요한 영향을 받았다.

### 3.5 탄성계수

Fig. 9에서는 91일 압축강도 루트승으로 무차원 시킨 탄성계수와 콘크리트 단위용적질량과의 관계를 ACI 349-06<sup>2)</sup>에서 제안한 예측식과 비교하여 나타내었다. 콘크리트의 탄성계수는 사용된 골재의 밀도 및 탄성계수와 밀접한 관련을 갖는다. 이러한 이유로, ACI 349-06<sup>2)</sup>에서는 탄성계수를 예측하기 위한 콘크리트 단위용적질량을 1440~2420 kg/m<sup>3</sup>으로 제한하고 있다. 하지만 실험 결과 콘크리트 단위용적질량이 2420 kg/m<sup>3</sup>이 초과하는 범위에서도 단위용적질량의 증가에 따라 압축강도로 무차원된 탄성계수는 증가하는 경향을 보였다. 특히, 콘크리트의 단위용적질량이 3300 kg/m<sup>3</sup> 이상이 되는 범위에서는 ACI 349-06<sup>2)</sup>이 예측 값과 비교하여 약 1.5배 수준의 결과를 가졌다. 반면, ACI 349-06<sup>2)</sup>의 예측식을 단위용적질량의 제한값인 2420 kg/m<sup>3</sup>을 초과하는 범위까지 확장한다면 실험 결과 보다 약 6~30% 높은 값을 예측함으로써 불안전측에 있었다.

### 3.6 인장저항성

인장저항성을 평가하기 위한 압축강도 루트승으로 무차원한 쪼갠 인장강도와 파괴계수는 물-시멘트비와 상관없이 보통중량 굵은골재의 치환율이 50%일때 가장 높았으며, 그 이후 인장저항성은 감소하였다(Figs. 9, 10). 자철석 중량 콘크리트의 쪼갠인장강도는 CEB-FIP<sup>4)</sup> 예측값

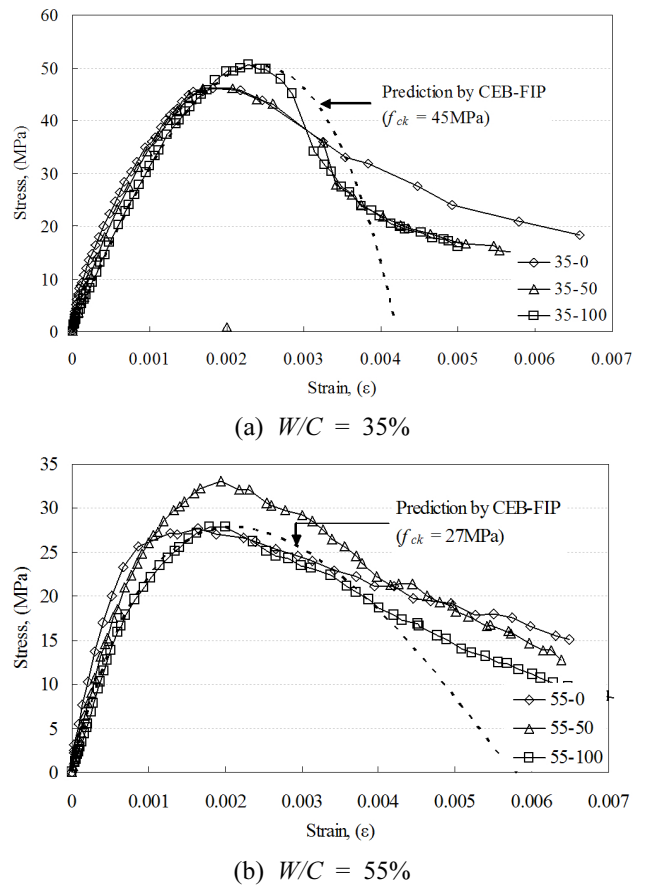


Fig. 8 Stress-strain curve of concrete tested

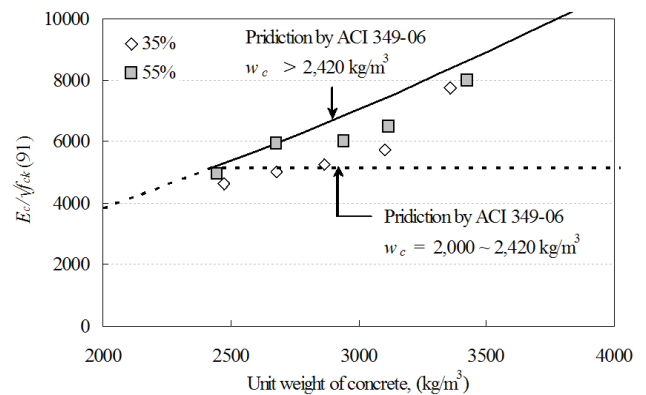


Fig. 9 Normalized  $E_c$  versus unit weight of concrete

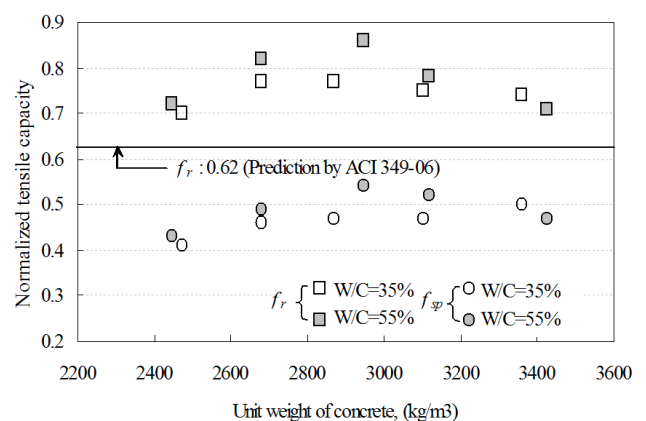


Fig. 10 Normalized tensile resistance of concrete tested

에 비해  $W/C$ 비가 55%일 때에는 66~81% 수준이고,  $W/C$ 비가 35%일 때에는 65~77% 수준이었다. 즉, CEB-FIP<sup>4)</sup> 제안모델은 압축강도에 관계없이 중량 콘크리트에서 상당한 불안전측에 있다. 파괴계수의 예측에 있어서 ACI 349-06<sup>2)</sup>에서는 단순히 압축강도의 함수로만 제시하고 있는 반면, CEB-FIP<sup>4)</sup>는 압축강도와 시험체 크기를 고려하여 예측값을 제시하고 있다. 일반적으로 자철석 중량 콘크리트의 파괴계수는 ACI 349-06<sup>2)</sup> 예측값에 비해 보통중량 굵은골재의 치환율이 관계없이 약 120%로 있는 반면, CEB-FIP<sup>4)</sup> 예측값과는 96% 수준으로 있었다.

### 3.7 부착응력-미끄러짐 관계

중량 콘크리트의 부착응력과 철근의 미끄러짐 관계를 CEB-FIP<sup>4)</sup> 예측모델(압축강도 45 MPa와 27 MPa일 때)과 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 자철석 기반 중량 콘크리트의 부착응력은 최대 부착응력 시 까지 상승 곡선부에서는 CEB-FIP<sup>4)</sup> 예측값에 비해 높은 값을 보였다. 이에 따라 최대 부착응력 시 미끄러짐 양은 0.6 mm를 제안하고 있는 CEB-FIP<sup>4)</sup> 값에 비해 매우 낮았다. 보통중량 굵은골재 치환율이 부착응력-미끄러짐 곡선의 상승부 기울기 및 최대 부착응력 시 미끄러짐 양에 미치는 영향은 미미하였다. 최대 부착응력 이후 곡선 하강부의 기울기는

$W/C$ 가 35%일 때에는 CEB-FIP<sup>4)</sup> 예측값과 비슷하였지만,  $W/C$ 가 55%일 때에는 다소 완만하였다. 일반적으로 자철석 기반 중량 콘크리트의 부착강도는 CEB-FIP<sup>4)</sup> 예측값에 비해 1.2~1.4배 높았다. 보통중량 굵은골재 치환율이 자철석 기반 중량 콘크리트의 압축강도로 무차원한 부착강도에 미치는 영향은 미미하였다(Table 4).

## 4. 결 론

이 연구에서는 국내생산이 가능한 자철석을 이용한 중량 콘크리트의 유동성 및 역학적 특성들을 평가하고 ACI 349-06 및 CEB-FIP의 설계식과 비교하여 그 안전성을 확인하였다. 초기 슬럼프가 35 mm 이하인 자철석 기반 중량 콘크리트의 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 중량 자철석 콘크리트의 초기 슬럼프는 보통중량 굵은골재의 치환율이 증가할수록 높았다.
- 2) 중량 자철석 굵은골재의 함유량이 높을수록 콘크리트의 초기 압축강도 발현율은 높았지만 장기강도 발현율은 감소하였다.
- 3) 콘크리트의 응력-변형률 관계는 그 단위용적질량이 높을수록 상승부 기울기는 증가하고, 최대응력 이후 하강 기울기는 완만하였다.
- 4) CEB-FIP의 예측모델과 비교하여 중량 콘크리트의 부착강도는 높았으며 철근의 미끄러짐 양은 작았다.
- 5) 일반적으로 중량 콘크리트의 역학적 특성들은 ACI 349-06 및 CEB-FIP의 모델식에 비해 안전측에 있지만, 탄성계수 및 쪼갬인장강도는 불안전측이 다소 높았다.

## 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부의 재원(교육과학기술부)으로 한국과학재단의 지원 및 한국에너지기술평가원에 의하여 연구되었다(No. 2011-0028983, 2011-T100200161).

## References

1. Korea Concrete Institute, *New Concrete Engineering*, Kimoondang Publishing Company, Korea, 2001, 932 pp.
2. ACI Committee 349, *Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures* (ACI 349-06), American Concrete Institute, 2006, 154 pp.
3. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-05), American Concrete Institute, 2005, 436 pp.
4. Comité Euro-International du Béton (CEB-FIP), *Structural Concrete: Textbook on Behaviour, Design and Performance*, International Federation for Structural Concrete (Fib), Switzerland, 1999, 437 pp.
5. European Standard EN 1992-1-1:2004, *Eurocode 2 : Design of Concrete Structures*, British Standard, 2004, 224 pp.

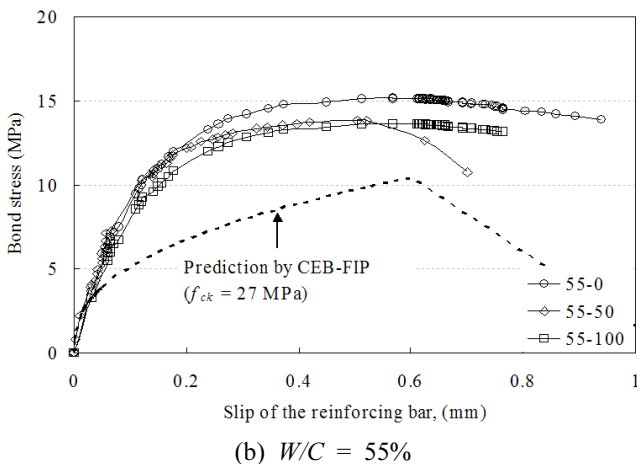
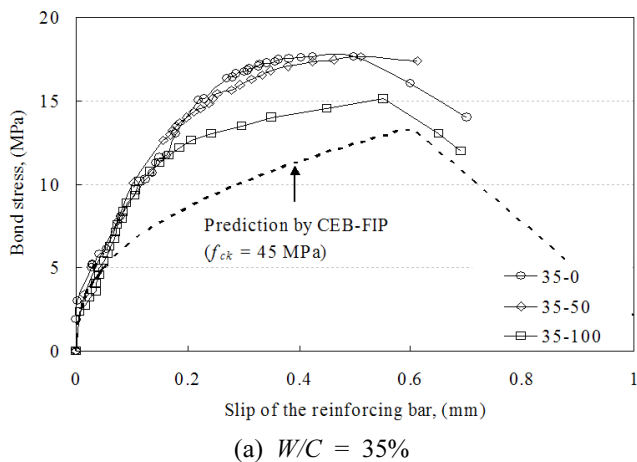


Fig. 11 Bond stress-slip response of concrete tested

6. Davis, H. S., Browne, F. L., and Witter, H. C., "Properties of High-Density Concrete Made with Iron Aggregates," *ACI Journal*, Vol. 52, No. 3, 1956, pp. 705-726.
7. Witte, L. P. and Backstorm, J. E., "Properties of Heavy Concrete Made with Baryte Aggregates," *ACI Journal*, Vol. 51, No. 6, 1954, pp. 65-88.
8. Katharine Mather, "High Strength, High Density Concrete," *ACI Journal(special Publication)*, Vol. 34, 1972, pp.1587-1596.
9. ACI Committee 304, *Heavyweight Concrete : Measuring, Mixing, Transporting, and Placing* (ACI 304.3R-96), American Concrete Institute, 1996, 8 pp.
10. Korea Industrial Standard, Koean Standards Information Center, 2006.
11. Yang, K. H., Chung, H. S., Ashour, A. F., "Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties," *ACI Materials Journal*, Vol. 105, No. 3, 2008, pp. 289-296.
12. Neville, A. M., *Properties of Concrete : Fourth and Final Edition*, John Wiley & Sons., 1996, 844 pp.
13. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures (ACI 209R-92)," *ACI Manual of Concrete Practice, Part1: Materials and General Properties of Concrete*, Detroit, Michigan, 2008, 47 pp.

**요 약** 이 연구의 목적은 국내생산이 가능한 자철석을 이용한 중량 콘크리트의 유동성 및 역학적 특성을 평가하고 설계기준의 안전성을 확인하는 것이다. 주요변수로는 물-시멘트 비와 보통중량 굵은골재(화강석)의 치환율이다. 배합된 콘크리트 기건 단위용적질량은 2446~3426 kg/m<sup>3</sup> 범위에 있었다. 측정된 역학적 특성들은 압축강도, 응력-변형률관계, 탄성계수, 쪼갬인장강도, 파괴계수 그리고 철근과의 부착응력-미끄러짐 관계 등이다. 실험 결과, 자철석 중량 콘크리트의 초기 슬럼프는 보통중량 굵은골재 치환율이 증가할수록 향상하였다. 압축강도, 인장저항성 등의 역학적 특성은 굵은골재 치환율에 따른 영향이 미미하였으나, 응력-변형률 관계와 탄성계수는 콘크리트 단위용적질량에 중요한 영향을 받았다. ACI 349-06 및 CEB-FIP 제안모델들은 일반적으로 자철석 중량 콘크리트의 역학적 특성들에 대해 안전측에 있지만, 탄성계수 및 쪼갬인장강도에 대해서는 콘크리트 단위용적질량을 고려하여 보완될 필요가 있었다.

**핵심용어** : 중량 콘크리트, 자철석, 유동성, 역학적 특성, 설계기준