

## 전자폐기물을 잔골재로 적용한 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구

김용무<sup>1</sup>, 최소영<sup>2</sup>, 김일순<sup>3</sup>, 양은익<sup>4\*</sup>

# A study on the Mechanical Properties of Concrete using Electronic Waste as Fine Aggregate

Yong-Moo Kim<sup>1</sup>, So-Yeong Choi<sup>2</sup>, Il-Sun Kim<sup>3</sup>, Eun-Ik Yang<sup>4\*</sup>

**Abstract:** The quantities of electronic waste have been increased rapidly, and was caused variety problems such as environmental pollution or dissipation of resource. So, it needed to development of recycling technology about heavy metal in the electronic waste. Meanwhile, filler material (concrete or mortar) was used for shielding radioactive waste, however, it did not used materials that it is proved radiation shielding performance. So, there is a lack of confidence in the shielding performance. Therefore, in this paper, mechanical properties of concrete was evaluated for the applicability using electronic waste as fine aggregate of filler material. From the test results, compressive and flexural strength and elasticity modulus and the micro pore in the 1 $\mu$ m range was significantly affected by substitution of electronic waste, however, it could be improved the performance by using mineral admixture as binder. So, it is shown that the electronic waste could be applicable as fine aggregate of filler material.

**Keywords:** Concrete, Electronic waste, Filler material, Mechanical properties, Micro pore structure

### 1. 서 론

전자폐기물은 1980년대만 해도 발생량이 많지 않아 별도로 언급되거나 정의될 필요가 없는 폐기물이었으나, 1990년대를 기점으로 전 세계적으로 발생량이 급증하여 2012년에는 4500만톤이 배출(Paolo, 2012)되었다. 세계 각국에서는 전자폐기물에 대한 규정(Widmer et al., 2005)을 마련함은 물론, 전자폐기물에 포함된 중금속을 유용한 자원으로 활용할 수 있는 재활용기술 개발이 필요한 실정이다. 이에 우리나라에서도 EPR 제도를 실시하여 전자폐기물을 분리수거하고 있으나, 전자폐기물에 포함된 중금속 처리 기술의 한계로 환경오염문제가 발생하고 있어 이를 해결할 수 있는 기술 개발이 시급한 상황이다(Choi et al., 2015).

한편, 2016년 에너지 통계연보(KEEI, 2017)에 따르면, 국내 총 생산에너지는 약 5천만 TOE로 공급에너지 대비 5.2%

이고, 지난 1990년대부터 소폭상승하고 있음에도 불구하고 소비에너지에 비해 매우 부족한 실정이다. 이에, 1990년부터 자국의 에너지 생산에 대한 경쟁력 확보를 위하여 자체 생산이 가능한 원자력 에너지 발전량을 점차 증가시켜왔으며, 원자력 에너지는 총 생산에너지의 70%에 도달하기에 이르렀다. 그러나 원자력에너지원은 풍력, 수력 등 친환경 에너지원과 달리, 원자력 생산이후 발생하는 방사성폐기물의 안전관리가 필요하다. 원자력 생산에 의해 발생하는 폐기물을 에너지 준위에 따라 고준위, 중준위, 저준위로 구분하여 고준위 폐기물의 경우에는 원전에 별도 보관을 실시하고 중·저준위 방사성 폐기물의 경우에는 방사성폐기물처분장을 통해 별도의 처분을 실시하고 있다. 이때의 처분방식은 방사성폐기물을 인간 생활권에서 격리하기 위해 폐기물 드럼에 방사성폐기물과 채움재인 콘크리트(혹은 모르타르)를 함께 타설하여 폐기물드럼을 적치한 사일로를 폐쇄하는 방식을 채택하고 있으며, 많은 양의 채움재는 방사성물질의 차폐하기 위해 사용되고 있다. 그러나 채움재 제작에 사용되는 재료에 대한 직접적인 차폐 성능 여부에 관한 기준이 없기 때문에 채움재의 차폐 성능에 대한 신뢰가 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구(Choi et al., 2015; Choi et al., 2017)를 통해 확인된 중금속을 함유하여 차폐 성능 개선이 가능한 전자폐기물인 고밀도 폐유리를 적용하여 제작된 콘크리트를 방사성폐기물 차폐 채움재로서의 개발 가능성을 평가하기 위하여 고밀도 폐유리를

<sup>1</sup>학생회원, 강릉원주대학교 토목공학과, 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정

<sup>3</sup>정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정

<sup>4</sup>정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 교수, 교신저자

\*Corresponding author: eiyang@gwnu.ac.kr

Professor, Dept. of Civil Eng., Gangneung-Wonju National University, Jukheon-gil 7, Gangneung-si, Gangwon-do, 25457, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

혼입한 콘크리트의 역학적 특성을 검토하고자 하였다. 이를 위해, 본 연구에서는 압축강도, 휨강도, 탄성계수와 공극분포 등 역학적 특성을 비교, 분석하였다.

## 2. 실험계획 및 변수

### 2.1 실험변수

본 연구에서는 전자폐기물의 일종인 고밀도 폐유리를 잔골재로 적용한 콘크리트의 역학적 특성을 평가하기 위하여 실험 변수로 물-결합재비 및 고밀도 폐유리의 잔골재 대체율을 결정하고, 시멘트 대체재로 사용되고 있는 광물질 혼화재료의 혼입 특성도 함께 고려하기 위하여 광물질 혼화재인 플라이애시와 고로슬래그 미분말도 함께 사용하였다. 본 연구에 사용된 실험 변수는 Table 1과 같다.

### 2.2 사용재료

#### 2.2.1 결합재

본 연구에서는 결합재로 시멘트와 광물질 혼화재인 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 본 연구에서 사용

Table 1 Test variables

Item	Content
W/B ratio	35%, 45%, 55%
Mineral admixture (replacement ratio)	Fly ash(20%), Blast Furnace Slag(50%) (at W/B 45%)
Waste glass substitution ratio	0, 50, 100(%)
Specimen size	∅100×200 mm (Compressive strength, Elastic modulus) 100×100×400 mm(Flexural strength) 10 g(Micro pore structure)
Curing condition	Water curing (20±3°C)

Table 2 Physical and chemical properties of the binders

Properties	Material	OPC	FA	BFS
		Specific gravity	3.15	2.34
Chemical (%)	Blaine(cm <sup>2</sup> /g)	3,200	3,700	4,000
	SiO <sub>2</sub>	21.36	52.83	31.85
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.03	18.08	14.55
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.31	7.74	0.59
	CaO	63.18	5.95	34.95
	MgO	2.89	1.43	5.63
	SO <sub>3</sub>	2.30	0.01	2.97
	LOI	1.40	6.14	0.60

된 결합재의 물리적, 화학적 특성은 Table 2에 나타내었다.

#### 2.2.2 골재

본 연구에서 사용된 잔골재는 하천모래를 사용하였으며 굵은 골재는 쇄석을 사용하였다. 굵은 골재의 최대치수는 19 mm이며, 배합에 사용된 골재의 특성은 Table 3과 같다. 또한 고밀도 폐유리와 천연잔골재의 조립률이 다르게 때문에 혼입률 증가에 따라 변화된 잔골재 조립율은 Table 4에 나타내었다.

#### 2.2.3 고밀도 폐유리

고밀도 폐유리는 브라운관에서 발췌한 것으로 중금속을 일부 함유하여 밀도가 3.0 g/cm<sup>3</sup>이다. 또한 중금속을 용출하지 않고 jaw crusher를 이용하여 단순 분쇄한 후, 5 mm체를 통과하는 폐유리만을 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 3과 같다.

### 2.3 배합조건

본 연구에서 사용된 고밀도 폐유리의 잔골재 대체율은 부피비로 각각 0, 50, 100%이며, 물-결합재비는 35, 45, 55%로 결정하였다. 또한, 광물질 혼화재가 미치는 영향을 함께 검토하기 위하여 물-결합재비 45% 경우에 대하여 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 시멘트 질량의 각각 20%, 50%로 치환하여 함께 평가하였으며, 본 연구에 사용된 배합표는 Table 5에 나타내었다.

### 2.4 실험 방법

#### 2.4.1 압축강도 및 탄성계수

콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 측정은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라 실시하였다. 공시체는 ∅100×200 mm 크기인 것을 사용하였으며, 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 하중제어 방식으로 실시하였다. 이때, 선형변위 측정기(LVDT)를 설치하여 콘크리트의 변형률도 함께 측정하여 탄성계수를 산정하였다.

Table 3 Physical properties of all of the aggregate

Type	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)	F.M.
Fine	2.6	1.07	2.79
Coarse	2.68	1.35	6.86
Heavy weight waste glass	3.0	0	3.32

Table 4 Fineness modulus of fine aggregate

Substitution ratio	0	50	100
F.M.	2.79	3.06	3.32

**Table 5** Concrete mix proportions

Type	W/B (%)	S.R (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	G	S	H.G	FA	BFS
35OPC-N	35	0	167	477	999	673	-	-	-
35OPC-H	35	50	167	477	999	337	388	-	-
35OPC-A	35	100	167	477	999	-	777	-	-
45OPC-N	45	0	170	378	1008	738	-	-	-
45OPC-H	45	50	170	378	1008	369	426	-	-
45OPC-A	45	100	170	378	1008	-	851	-	-
55OPC-N	55	0	173	315	998	792	-	-	-
55OPC-H	55	50	173	315	998	396	457	-	-
55OPC-A	55	100	173	315	998	-	914	-	-
FA20-N	45	0	170	302	996	729	-	76	-
FA20-H	45	50	170	302	996	364	420	76	-
FA20-A	45	100	170	302	996	-	841	76	-
BFS50-N	45	0	170	189	971	713	-	-	189
BFS50-H	45	50	170	189	971	357	421	-	189
BFS50-A	45	100	170	189	971	-	842	-	189

\*S.R : Substitution ratio of heavy weight waste glass



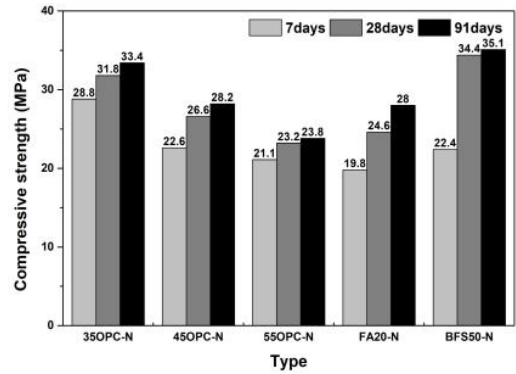
**Fig. 1** Photo of compressive strength test

### 2.4.2 휨강도

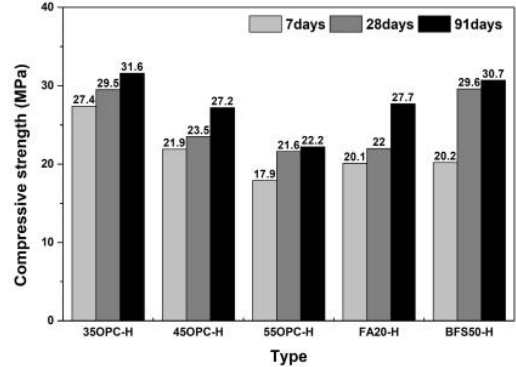
고밀도 폐유리를 혼입한 콘크리트의 휨강도 측정방법은 KS F 2408(콘크리트의 휨 강도 시험방법)를 이용하여 4점 재하방식으로 실시하였다.

### 2.4.3 공극분포

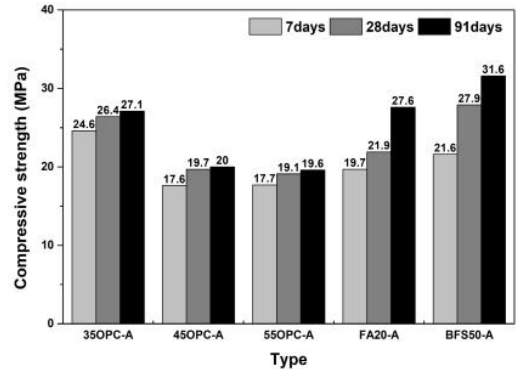
본 연구에서는 강도와 공극분포의 상관관계를 규명하기 위하여 내부 미세 공극 분포(Micropore-size-distribution)를 ASTM D 4284에 의거하여 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry)으로 분석하였다.



(a) Non-Substitution



(b) Substitution Ratio : 50%



(c) Substitution Ratio : 100%

**Fig. 2** Results of compressive strength

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 압축강도

Fig. 2에는 고밀도 폐유리 대체율 변화에 따른 원주형 시험체의 압축강도 측정결과를 나타내었다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 고밀도 폐유리를 적용하지 않은 경우, 물-결합재비가 증가함에 따라 강도가 감소하고 동일한 물-결합재비에서 재령이 증가함에 따라 강도가 증진되는 콘크리트의 일반적인 특성이 나타났다. 또한, 광물질 혼화제를 사용한 경우, 동일한 물-결합재비에서 동등한 강도 수준을 확보하기 위해서는

FA20인 경우에는 재령 91일, BFS50 경우에는 재령에 관계없이 강도 개선이 가능한 것으로 나타나, 광물질 혼화제 사용에 따른 강도 발현특성에는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

한편, 고밀도 폐유리를 50% 대체한 경우(Fig. 2(b)), 물-결합제비에 관계없이 Fig. 2(a)에 비하여 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 고밀도 폐유리 표면이 잔골재 표면보다 매끄럽기 때문에 시멘트 수화물과의 부착성능 저하로 인하여 강도가 감소하는 것으로 보고된 바 있으며, 본 연구결과도 기존 연구결과(Choi et al., 2015; Choi et al., 2017)와 동일한 경

향을 나타내었다. 한편, 고밀도 폐유리를 100% 대체한 경우 (Fig. 2(c)), 광물질 혼화제를 사용하지 않으면 45OPC에 비하여 FA20, BFS50 모두 강도개선이 가능한 것으로 나타났다. 이는 광물질 혼화제와 고밀도 폐유리에 포함된 미분말 성분이 포졸란 반응을 유도하여 재령이 증가할수록 압축강도 개선에 기여한 것으로 판단된다. 따라서 고밀도 폐유리 대체에 따른 강도저하는 광물질 혼화제를 사용하면 일정수준 회복 가능한 것으로 사료된다.

### 3.2 휨강도

Fig. 3에는 고밀도 폐유리 대체율 변화에 따른 휨강도 측정 결과를 나타내었다. 휨강도 측정결과, Fig. 2에 나타난 압축강도 측정결과와 마찬가지로 고밀도 폐유리 대체율이 증가함에 따라 2.3~26.4%까지 휨강도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 압축강도가 감소하는 요인과 마찬가지로 고밀도 폐유리 표면 상태로 인하여 시멘트 페이스트와 고밀도 폐유리의 부착력 감소에 기인한 것으로 판단된다. 또한, Fig. 3(b), (c)에 나타난 고밀도 폐유리와 광물질 혼화제를 함께 사용한 콘크리트의 휨강도 측정결과를 살펴보면, 압축강도 측정 결과와 마찬가지로 폐유리 대체에 따라 50%만 대체한 것에 비하여 전량 대체한 경우에 휨강도가 폐유리를 대체하지 않은 콘크리트와 동등하거나 그 이상의 휨강도 발현이 가능한 것으로 나타났다. 이는 포졸란 반응에 의해 강도 증진 효과와 고밀도 폐유리 입형이 휨강도 개선에 기여한 것으로 사료되며, 특히 BFS를 혼입하는 경우가 휨강도 개선에 효과적인 것으로 판단된다.

### 3.3 압축-휨 상관관계

일반적으로 휨강도는 압축강도의 1/8~1/5의 범위를 나타내며, 강도 구간에 따라 편차가 있다. 따라서 휨강도의 직접적인 측정이 어려운 경우에 적용하기 위하여 압축강도를 이용한 휨강도 예측모델 식을 각 기준마다 명시하고 있다. 따라서 본

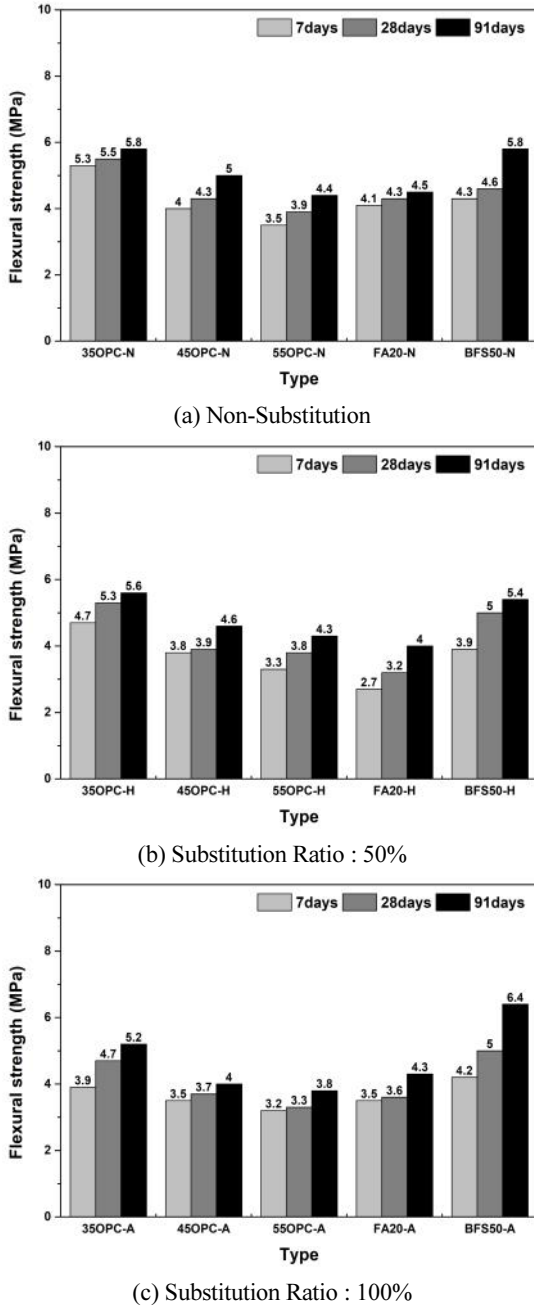


Fig. 3 Results of flexural strength

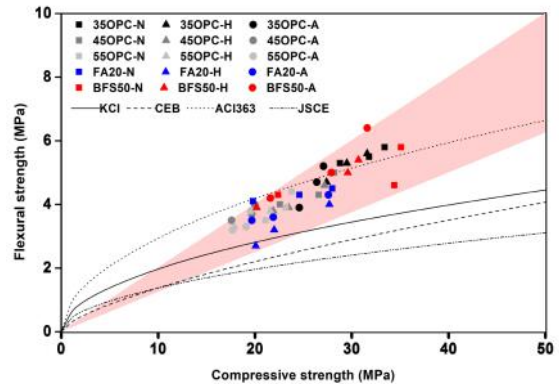


Fig. 4 The correlation between the compressive strength and the flexural strength

연구에서는 KCI 2012, CEB-FIP, ACI 363 및 JSCE에 의한 예측모델 식(1)~식(4)로 구한 예측결과와 실험결과를 비교, 분석하여 Fig. 4에 나타내었다.

$$f_r = 0.63 \sqrt[3]{f_{ck}} \quad (1)$$

$$f_r = 0.3 \sqrt[3]{(f_{ck})^2} \quad (2)$$

$$f_r = 0.94 \sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

$$f_r = 0.44 \sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 압축강도(MPa),  $f_r$ 은 휨강도(MPa)이다.

분석결과, 고밀도 폐유리 혼입물 및 광물질 혼화제 사용 유무에 관계없이 휨강도는 압축강도의 12.5~20% 수준인 것으로 나타나, 사용재료에 따른 압축-휨 상관관계에 별다른 차이점은 존재하지 않는 것으로 보인다. 한편, 휨강도 예측모델과 실험결과(Fig. 4)를 비교하면, 30 MPa 이상의 압축강도를 확보한 경우(35OPC, BFS50)에는 ACI 363 예측모델보다 크게 측정되었으나, 30 MPa 미만인 경우에는 ACI 363 모델과 KCI 2012 모델 사이 수준을 확보한 것으로 나타났다. 따라서 추후 고밀도 폐유리를 혼입한 콘크리트의 압축-휨 강도 상관관계에 적용 가능한 예측모델의 수정이 필요할 것으로 사료된다.

### 3.4 응력-변형률 관계

콘크리트의 응력-변형률 관계는 구조물의 설계 또는 해석에 있어 반드시 필요한 재료적 특성(Kang and Ryu, 2011)이므로 본 연구에서는 고밀도 폐유리를 혼입한 콘크리트 최대응력까지의 응력-변형률 곡선을 비교, 분석하고자 하였다. Fig. 4에는 고밀도 폐유리를 잔골재로 사용한 콘크리트의 최대응력에서의 응력-변형률 곡선을 고밀도 폐유리 대체에 따라 나타내었으며, Hognestad(Hognestad, 1951)의 식을 이용하여 예측한 응력-변형률 곡선을 측정 결과와 함께 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 5(a)를 살펴보면, 응력 초기에는 거의 선형 거동이 나타났지만, 최대 응력의 40%가 넘어가는 시점에서부터는 비선형 거동을 보였다. 또한, 최대응력의 80%를 넘어서게 되면 급격한 변형률 증가가 나타나고 있다(Chang et al., 2000).

또한, 광물질 혼화제 종류에는 관계없이 실제 실험결과와 예측모델에서는 차이가 발생하였다. 이는 광물질 혼화재료의 재료 특성을 응력-변형률 예측모델에서 고려하지 않기 때문인 것으로 보인다. 이러한 경향은 고밀도 폐유리를 대체한 경우(Fig. 5(b), (c))에서도 동일하게 나타났으며, 따라서 고밀도

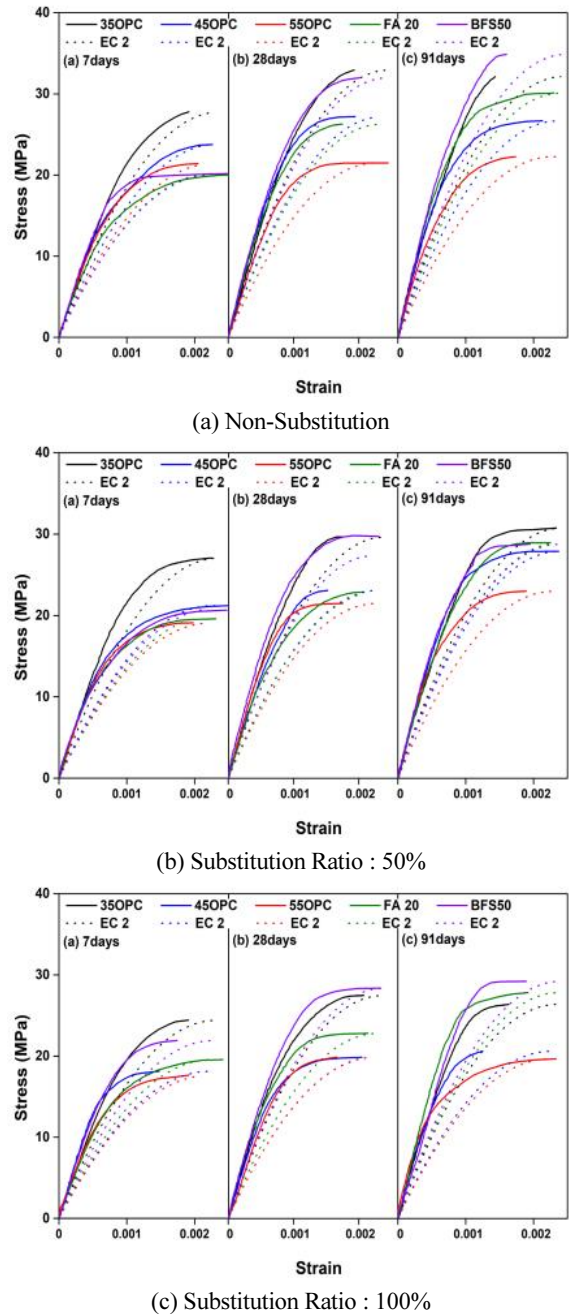


Fig. 5 Results of stress-strain curve

폐유리 대체는 응력-변형률 곡선에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

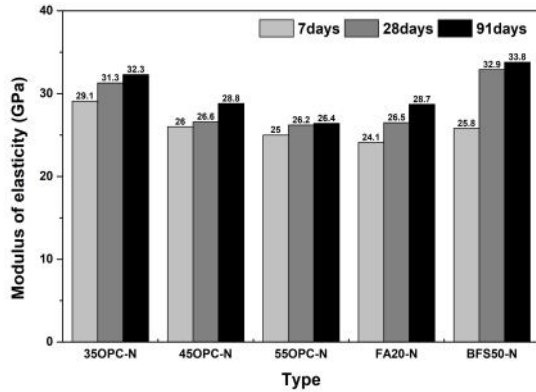
### 3.5 탄성계수

콘크리트의 탄성계수는 실험적으로 얻어진 콘크리트의 응력-변형률 관계에서 최대응력의 40~45% 인 지점에서의 응력-변형률 관계를 이용하여 산정하고 있다. 그러나 실험적으로 탄성계수를 산정하지 못할 경우, ACI 318과 유사한 KCI 2012

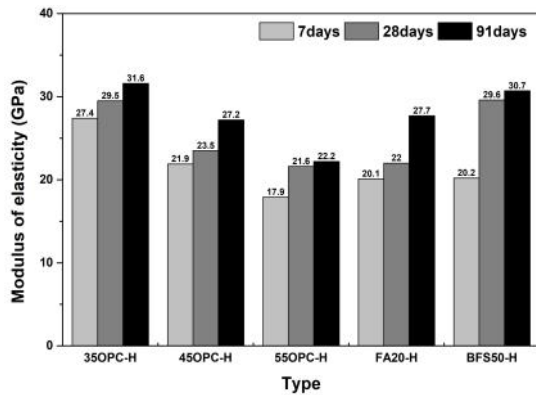
를 비롯하여 CEB-FIP, Euro code 2에는 압축강도 및 단위 중량을 이용하는 식 (5)~식 (7)를 통하여 탄성계수를 산정하고 있다. 따라서 본 연구를 통해 얻어진 탄성계수 측정결과와 예측모델을 비교, 분석하여 Fig. 5에 나타내었다.

$$E_c = 8500 \sqrt[3]{f_{cu}} \quad (5)$$

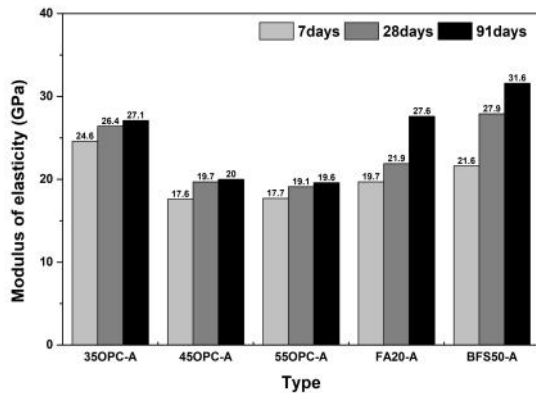
$$E_c = 21500 \cdot \left( \frac{f_{ck} + \Delta f}{10} \right)^{1/3} \quad (6)$$



(a) Non-Substitution



(b) Substitution ratio : 50%



(c) Substitution ratio : 100%

Fig. 6 Results of modulus of elasticity

$$E_c = 22000 \cdot \left( \frac{f_{ck} + \Delta f}{10} \right)^{0.3} \quad (7)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 압축강도(MPa),  $E_c$ 는 탄성계수(GPa)이다.

Fig. 6(a)에는 고밀도 폐유리를 대체하지 않은 일반 콘크리트의 탄성계수 측정결과를 나타내었다. 측정결과, 압축강도 측정결과와 마찬가지로 물-결합재비가 감소하고 재령이 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 콘크리트의 일반적인 특성이 나타났다. 또한 동일한 물-결합재비에서 광물질 혼화제를 대체하게 되면 FA20는 45OPC와 동등하지만, BFS50의 경우에는 재령 28일 이후에 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 고밀도 폐유리 대체율이 증가함에 따라 탄성계수는 감소하였으며, 이는 탄성계수가 압축강도에 의존하여 결정되기 때문에 감소한 것으로 보인다. 그러나 압축강도 측정결과와 마찬가지로, 고밀도 폐유리 대체에 따른 탄성계수 저하는 고로슬래그를 혼입하면 그 수준을 완화시킬 수 있을 것으로 사료된다. 일반적으로, 콘크리트의 탄성계수에 큰 영향을 미치는 재료는 굵은 골재인 것으로 보고되고 있다(Mehta and Monteiro, 2014). 따라서 본 연구에서는 동일한 굵은 골재를 사용하였으며, 고밀도 폐유리 대체에 따른 추가적인 탄성계수의 감소는 발생하지 않으므로 고밀도 폐유리 대체에 따른 탄성계수 특성은 일반적인 콘크리트의 특성과 유사한 것으로 판단된다. 한편 Fig. 7에는 실험을 통해 얻어진 탄성계수와 각 예측모델을 통하여 비교한 탄성계수 분포를 함께 나타내었다. 분석 결과, KCI 예측모델이 CEB-FIP 및 EC 2 예측모델에 비하여 동일한 압축강도에 대한 탄성계수를 작게 예측하는 것으로 나타났다. 또한, 실험결과와 예측모델을 비교하여 보면, 배합 조건에 관계없이 모두 CEB-FIP 모델보다 작게 측정된 것으로 나타났다. 또한, 압축강도가 30 MPa 미만인 경우에는 KCI 예측모델과 거의 일치하였으나, 그 이상의 경우에는 CEB-FIP 및 EC 2 예측모델에 가까운 것으로 나타났다.

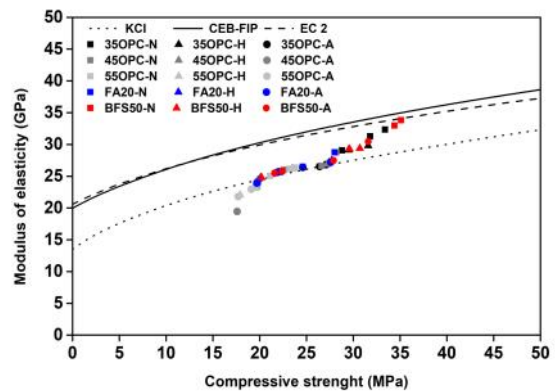


Fig. 7 The correlation between the compressive strength and the secant modulus of elasticity

### 3.6 공극분포

Fig. 8에는 고밀도 폐유리 대체율에 따른 콘크리트의 미세 공극 분포를 나타내었다. 우선, 고밀도 폐유리 대체에 관계없이 재령이 증가함에 따라 각 공극의 피크점이 감소하는 일반적인 콘크리트의 특성이 나타났다. 또한, 고밀도 폐유리의 혼입에 관계없이 고로슬래그 미분말을 사용하면 미세공극의 피크점이 발생하지 않으므로 고로슬래그 사용에 따른 공극구조 개선 효과가 고밀도 폐유리를 잔골재로 대체하여도 나타났다.

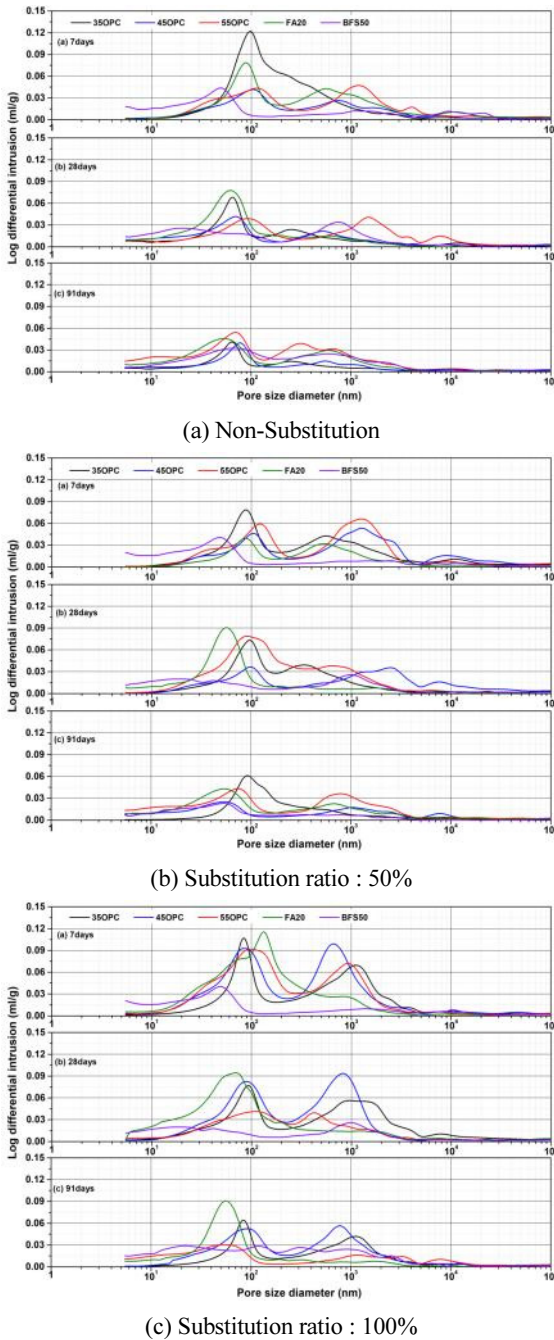


Fig. 8 Size distribution of micro pore

한편, 동일한 재령에서 고밀도 폐유리의 혼입률이 증가할수록 1000 nm(1 μm) 영역에서의 공극이 확대되는 것을 확인할 수 있었으며, 압축강도에 영향을 미치는 공극 범위인 50 nm ~200 nm 영역에서의 공극분포 특성은 고밀도 폐유리 대체에 따른 영향이 미미한 것으로 나타났다. 이는 고밀도 폐유리 대체에 따른 강도 감소요인은 골재와 시멘트 수화물 사이에 존재하는 1 μm 영역의 공극이 영향을 받아 시멘트 페이스트와 골재 계면사이의 부착력 감소에 영향을 미친 것으로 보인다. 따라서 고밀도 폐유리 대체는 미세공극 구조 변화에 따른 강도 감소를 유발하지 않는 것으로 사료된다.

### 4. 결론

고밀도 폐유리를 혼입한 콘크리트의 역학적 특성을 비교, 평가하기 위하여 실시한 연구로부터 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 고밀도 폐유리를 잔골재로 사용한 콘크리트의 경우, 고밀도 폐유리 대체율이 증가함에 따라 골재와 시멘트 수화물 사이의 부착력 감소로 인해 압축강도 및 휨강도가 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 시멘트페이스트와 골재계면의 공극 영역인 1 μm 영역이 고밀도 폐유리 대체에 따라 증가한 것에 영향을 받은 것으로 판단된다.
- 2) 고밀도 폐유리 대체에 따른 압축-휨 관계, 압축강도-탄성계수 관계를 평가한 결과, 고밀도 폐유리를 대체하지 않은 콘크리트의 특성과 유사하게 나타났으며, 응력-변형률 곡선 역시 고밀도 폐유리 대체에 따른 특이점이 발생하지 않았다. 따라서, 고밀도 폐유리를 잔골재로 대체하여도 고밀도 폐유리를 잔골재로 대체하지 않은 콘크리트와 유사한 역학적 특성을 갖는 것으로 판단된다.
- 3) 고밀도 폐유리를 잔골재로 사용한 경우, 광물질 혼화재를 사용하면 포졸란 반응 및 공극 채움 효과에 따른 공극분포를 개선할 수 있으므로 강도 개선이 가능 할 것으로 판단된다.
- 4) 고밀도 폐유리를 혼입한 콘크리트의 공극분포는 고밀도 폐유리를 사용하지 않은 콘크리트와 마찬가지로 압축강도에 직접적으로 영향을 주는 50~200 nm 영역이 유사한 것으로 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평

가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20171520101680).

## References

ACI 363-92 (1992), Report on High-Strength Concrete, American Concrete Institute.

British Standard Institution (2004), Euro code 2: Design of Concrete Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, BSI.

CEB\_FIP Code (2010), CEB-FIP Model Code, Design Code, Comite Euro International du Beton, Lausanne.

Chang, D. I., Son, Y. H., Cho, K. H., and Kim, K. L. (2000), Evaluation of Stress-Strain Relationship and Elastic Modulus Equation of Steel Fiber Reinforced High-Strength Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 12(2), 13-20.

Choi, S. Y., Choi, Y. S., and Yang, E. I. (2017), Effects of Heavy Weight Waste Glass Recycled as Fine Aggregate on the Mechanical Properties of Mortar Specimens, *Annals of Nuclear Energy*, 99, 372-382.

Choi, S. Y., Choi, Y. S., Won, M. S., and Yang, E. I. (2015), Evaluation on the Applicability of Heavy Weight Waste Glass as Fine Aggregate of Shielding Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(4), 101-108 (in Korean).

Hognestad, H. E. (1951), A Study of Combined Bending and Axial Load

in Reinforced Concrete Members, University of illinois experiment station, *Urbana*, 49(22).

Japan Society of Civil Engineers (2007), Standard Specifications for Concrete Structures.

Kang, S. T., and Ryu, G. S. (2011), The Effect of Steel-Fiber Contents on the Compressive Stress-Strain Relation of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPC) *Journal of the Korea Concrete Institute*, 23(1), 67-75 (in Korean).

Korea Concrete Institute (2012), Concrete Structure Design Code and Commentary, Korea Concrete Institute, Seoul.

Korea Energy Economics institute (2017), Yearbook of Energy Statics, 1-77.

Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. (2014), Concrete Structures, Properties and Materials, 4<sup>th</sup> Edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood cliffs, New Jersey, 86-88.

Paolo Gemma (2012), Overview of ITU Activities on e-Waste.

Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., and Böni, H. (2005). Global Perspectives on E-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, 25(5 SPEC. ISS.), 436-458.

Received : 11/13/2017

Revised : 02/15/2018

Accepted : 02/22/2018

---

**요 지** : 전자폐기물의 발생량이 급증하고 있고, 전자폐기물로 인한 환경오염 혹은 자원낭비등과 같은 문제를 야기하고 있다. 따라서 전자폐기물 안에 포함된 중금속을 재활용할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 한편, 채움재(콘크리트 혹은 모르타르)는 방사성폐기물의 차폐를 위해 사용되나, 방사성 차폐 성능을 확보한 재료를 적용하고 있지 않다. 따라서 채움재는 차폐성능에 관한 신뢰가 부족한 상황이다. 그러므로 본 연구에서는, 전자폐기물을 채움재의 잔골재로 적용하기 위하여 콘크리트의 역학적 특성을 평가하였다. 실험결과, 압축강도, 휨강도, 탄성계수 및 1 $\mu$ m 영역의 공극이 상당히 영향을 받는 것으로 나타났으나, 광물질 혼화재를 결합재로 사용하면 성능이 개선되었다. 따라서 전자폐기물은 채움재의 잔골재로써 적용이 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 콘크리트, 전자폐기물, 채움재, 역학적 특성, 미세공극구조

---