

# 폐 브라운관(CRT) 유리의 잔골재 대체가 모르타르 시험체의 감마선 차폐에 미치는 영향

최윤석<sup>1</sup>, 이선민<sup>2</sup>, 김태상<sup>3</sup>, 김일순<sup>4</sup>, 양은익<sup>5\*</sup>

## Effect of Replacing Fine Aggregate by Cathode-Ray Tube(CRT) Waste Glass on Gamma-ray Shielding Properties of Cement Mortar Specimen

Yoon-Suk Choi<sup>1</sup>, Seon-Min Lee<sup>2</sup>, Tae-Sang Kim<sup>3</sup>, Il-Sun Kim<sup>4</sup>, Eun-Ik Yang<sup>5\*</sup>

**Abstract** : In this study, the microstructure and gamma-ray shielding efficiency of CRT glass mortar specimen were evaluated with replacement ratio and material properties. The results show that as the replacement ratio of CRT waste glass increases, the volume of pores with diameters below 50 nm and above 400 nm is increased. Also, the half-value layer of CRT glass mortar decreased with the increasing of linear attenuation coefficient. In addition, compressive and flexural strength were reduced when CRT waste glass was replaced as the fine aggregate, but the mechanical performance of CRT mortar specimen could be obtained by substitution of the mineral admixture.

**Keywords**: CRT waste glass, Fine aggregate, Gamma-ray shielding, Linear attenuation coefficient, Half-value layer

### 1. 서 론

1970년대부터 본격적으로 시작된 우리나라의 산업화는 철근 콘크리트 구조물의 건설로 이어졌으며, 콘크리트의 제조를 위한 강모래와 강자갈이 고갈된 실정에 이르렀다. 2000년대부터는 석산으로부터 쇄석 골재를 수급하여 왔으나 무분별한 개발로 인해 해외로부터 골재를 수입하게 되었으며, 근래에는 전 세계적인 골재 고갈로 인해 이 또한 용이하지 않은 상황이다.

이에 대한 해결 방안으로 산업 전반에서 발생하는 폐기물을 재활용하여 골재로 재생산하기 위한 연구가 필요하다. 최근에는 노후화된 콘크리트 구조물이 많아지면서 해체 콘크리트에서 발생하는 골재의 재활용 연구가 활발히 진행되고 있으며, 산업부산물을 활용한 슬래그 골재와 폐유리를 재처리하여 잔골재로 사용하기 위한 연구도 수행되고 있다(Choi et al., 2017; Choi et al., 2019; Maslehuddin et al., 2013; Kim et al., 2015).

한편, 2012년 국내 방송이 디지털 방송 시스템을 구축함에 따라 브라운관(Cathode Ray Tube, CRT) 형식의 텔레비전과 모니터가 대량 폐기처분 되었다(Gusukuma et al., 2018; Lee et

al., 2013; Mueller et al., 2012).

일반적인 유리와 달리 브라운관 유리는 전자파를 차단하기 위한 중금속을 함유하고 있어 폐기 시 환경에 문제가 되고 있으며, 브라운관의 전면부 유리와 납이 도포된 후면부 유리를 분리하고 납을 회수하는 처리 작업이 어렵기 때문에 대부분 매립 처리되어있는 상태이다. 폐브라운관 유리는 철, 납, 크롬, 규소 등의 성분을 포함하고 있어 일반 모래보다 높은 밀도를 가지게 된다(Choi et al., 2018; Choi et al., 2019). 따라서 일반 골재를 사용했을 때 보다 고밀도의 재료 조합이 가능할 것으로 판단되며 특히, 방사선 차폐가 필요한 콘크리트 제조에 유리할 것으로 사료된다(Akkurt et al., 2010; Gallala et al., 2016; Kim et al., 2019; Maslehuddin et al., 2013; Oh et al., 2016).

본 연구에서는 재활용이 어려운 폐브라운관 유리와 같은 산업폐자원을 건설자재로 재활용하기 위해 CRT 폐유리의 대체율과 결합재 비율 및 혼화재 치환 등으로 재료 물성(조성)을 달리한 모르타르의 미세구조와 감마선 차폐 효율성을 평가하였다.

### 2. 실험계획 및 방법

#### 2.1 실험변수

이 연구에서는 Table 1과 같은 실험 변수로 중금속을 지닌 CRT 폐유리를 잔골재로 대체하였을 때의 기초 물성과 미세

<sup>1</sup>정회원, 한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구원, 선임연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국건설생활환경시험연구원 융합기술센터, 주임연구원

<sup>3</sup>정회원, 한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구원, 센터장

<sup>4</sup>정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정

<sup>5</sup>정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 교수, 교신저자

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

• 본 논문에 대한 토의를 2020년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

구조를 분석하고 CRT 폐유리 대체율과 시험체의 두께, 배합 종류에 따른 감마선 차폐 효율 변화를 심층 분석하였다.

## 2.2 사용재료 및 배합

일반 잔골재는 밀도 2.6g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 1.01%, 조립률 2.48의 모래를 사용하였으며, 밀도 3.0g/cm<sup>3</sup>의 CRT 폐유리는 조립률 3.34로 하여 사용하였다. 모르타르 시험체의 결합재는 밀도 3.15g/m<sup>3</sup>, 분말도 3,200cm<sup>2</sup>/g의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하고 시멘트의 화학조성 및 CRT 폐유리의 구성성분은 Table 2에 나타내었다.

시험체 배합은 Table 3에 나타난 것과 같이 물-결합재비 0.35를 기준으로 CRT 폐유리 잔골재를 0, 50, 100%로 대체하였다. 또한, CRT 폐유리를 100% 대체했을 때 배합 조성에 따른 영향을 살펴보기 위하여 물-결합재비 0.45의 경우와 고로슬래그 미분말(BFS)과 플라이애시(FA)를 30%와 20%로 각각 시멘트 치환한 배합을 구성하였다.

## 2.3 실험방법

### 2.3.1 미세구조

일반 잔골재로 제작한 모르타르 시험체와 CRT 폐유리를 잔

**Table 1** Experimental variables

Conditions		Variables		
W/B		0.35	0.45	
Admixture (%)	OPC	FA20%	BFS30%	OPC
CRT glass (%)	0, 50, 100	100	100	100
Compressive and flexural strength test				
Type of experiment	XRD, SEM, MIP			
Gamma-ray shielding test				
Shielding test	Radiation source	122keV·Co <sup>57</sup> , 392keV·Sn <sup>113</sup> , 662keV·Cs <sup>137</sup> , 1173keV·Co <sup>60</sup>		
	Specimen thickness	50, 100, 150 (mm)		

**Table 3** Mix proportions

Specimen ID	W/B (%)	S/C (%)	Weight (kg)					
			W	C	FA	BFS	S	W.G*
0.35OPC_0%	35	1.83	255	728	-	-	1336	-
0.35OPC_50%	35	1.98	255	728	-	-	668	771
0.35OPC_100%	35	2.12	255	728	-	-	-	1542
0.35BFS30_100%	35	2.12	255	583	-	218	-	1542
0.35FA20_100%	35	2.12	255	510	146	-	-	1542
0.45OPC_100%	45	2.93	255	574	-	-	-	1679

\* W.G : waste glass (CRT glass)

골재로 대체한 모르타르 시험체의 입상 및 조성변화를 확인하기 위해 각 시험체의 샘플을 대상으로 전자주사현미경(SEM) 이미지 분석과 X-선 회절(XRD) 분석을 수행하였다. XRD의 측정조건은 Cu-Kα(λ=1.5418), 40kV, 30mA, scanning speed 0.67°/min, scanning step 0.017, scanning range 2θ 10°~90°로 하였다.

또한, 수은압입(MIP) 실험은 접촉각 130 degree, Hg의 표면장력은 485 dynes/cm, Mercury Filling Pressure는 0.53 psi의 조건으로 일반 모르타르와 CRT 폐유리 모르타르 시험체의 공극구조를 분석하였다.

### 2.3.2 압축강도 및 휨강도

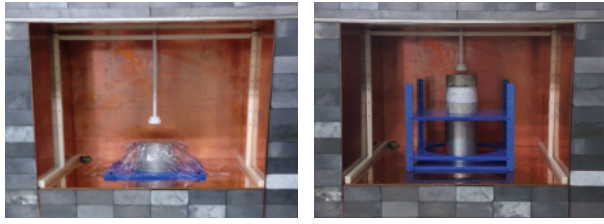
모르타르 시험체의 압축강도 및 휨강도 실험은 KS L ISO 679 시험방법에 따라 크기 40×40×160mm 시편을 제작하여 측정하였으며, 휨강도를 우선 측정하고 파단된 시편을 이용하여 압축강도를 측정하였다.

### 2.3.3 감마선 투과 실험

표준 방사선원(핵종)의 종류와 에너지양의 변화에 따른 차폐 성능을 평가하기 위하여 감마선 분광법으로 일반 모르타르 시험체와 CRT 폐유리를 대체한 모르타르 시험체의 감마선 투과 실험을 수행하였다. 감마선 투과 실험은 방사선이 차폐체를 1차원적으로 투과하는 정량적인 감쇠율을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 납 챔버를 구성하고 표준방사선원과 검출기 사이에 시험체를 거치하여 방사선만을 시험체에 입사시키는 방법으로 감마선 투과실험을 수행하였다.

**Table 2** Chemical compositions (Unit: %)

Cement	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>
		21.36	5.03	3.31	63.18	2.89
CRT glass	Fe	Pb	Cr	Si	O	Etc.
	39.89	16.73	13.27	10.03	9.80	10.28



(a) Blank test (b) Specimen test

Fig. 1  $\gamma$ -ray shielding test

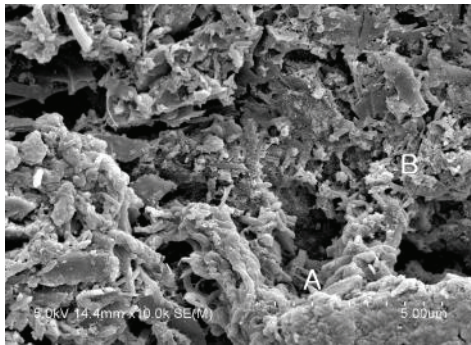
감마선 검출기는 상대효율 120%의 고순도Ge-검출기를 이용하였으며, 에너지양과 방사선원의 종류는 122keV-Co<sup>57</sup>, 392keV-Sn<sup>113</sup>, 662keV-Cs<sup>137</sup>, 1173keV-Co<sup>60</sup>를 대상으로 하였다. 시험체의 크기는 직경 100mm로 하였으며, 시험체 두께 영향을 파악하기 위해 시험체 높이를 50, 100, 150mm 로 달리하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

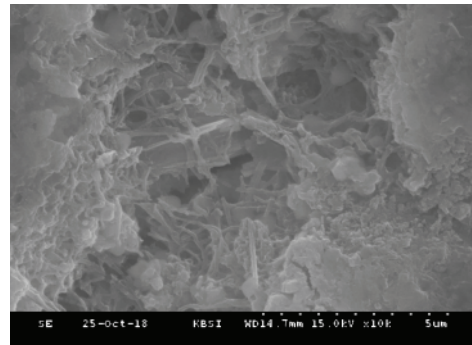
#### 3.1 SEM 이미지 및 XRD 분석

Fig. 2는 CRT 폐유리를 0% (일반 잔골재), 50%, 100% 대체한 모르타르의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 사진에 보이는 바와 같이, 일반 잔골재를 사용한 모르타르와 동일하게 CRT 폐유리를 잔골재로 대체한 경우에도 육각형 프리즘 구조의 수산화칼슘과 C-S-H 수화생성물이 고르게 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 침상 구조의 에트린자이트가 유사한 형태로 공극을 채우고 있는 것으로 나타났다. 따라서 중금속이 함유된 CRT 폐유리를 잔골재로 사용한 경우에도 수화반응에는 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.

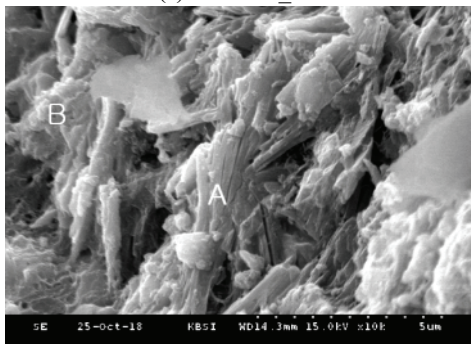
한편, Fig. 3은 CRT 폐유리 잔골재 대체율과 모르타르 물성에



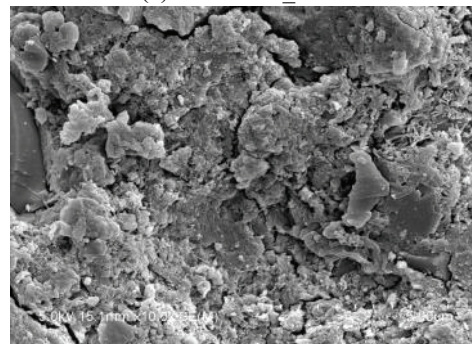
(a) 0.35OPC\_0%



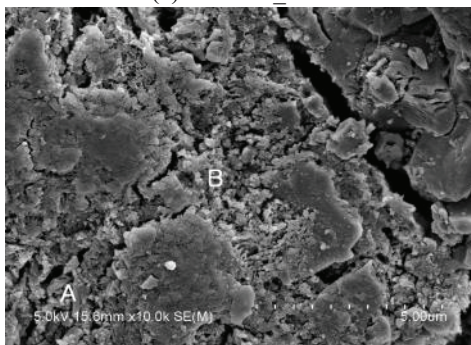
(d) 0.35BFS30\_100%



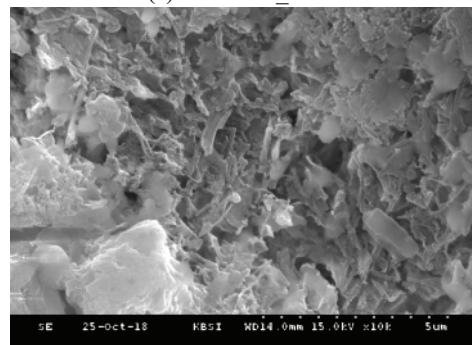
(b) 0.35OPC\_50%



(e) 0.35FA20\_100%



(c) 0.35OPC\_100%



(f) 0.45OPC\_100%

Fig. 2 SEM image (A:Ca(OH)<sub>2</sub>, B:C-S-H)

따른 시멘트 수화생성물의 결정세기를 나타낸 XRD 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 일반 잔골재로 제작한 모르타르 시험체 (0.35OPC\_0%)와 유사하게 CRT 폐유리를 대체한 모르타르 시험체에서도 수산화칼슘과 C-S-H의 피크가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 다만, 대체율이 높아질수록 수화생성물의 결정 세기가 다소 약해지는 것을 확인할 수 있는데 이는 일반 모래에

비해 상대적으로 흡수율이 낮은 CRT 폐유리를 골재로 대체함으로써 공극수가 부족하고 이로 인해 수화반응이 다소 늦게 진행되는 것으로 사료된다.

### 3.2 미세 공극 구조 분석

Fig. 4의 (a)는 CRT 폐유리의 잔골재 대체율과 모르타르 물성

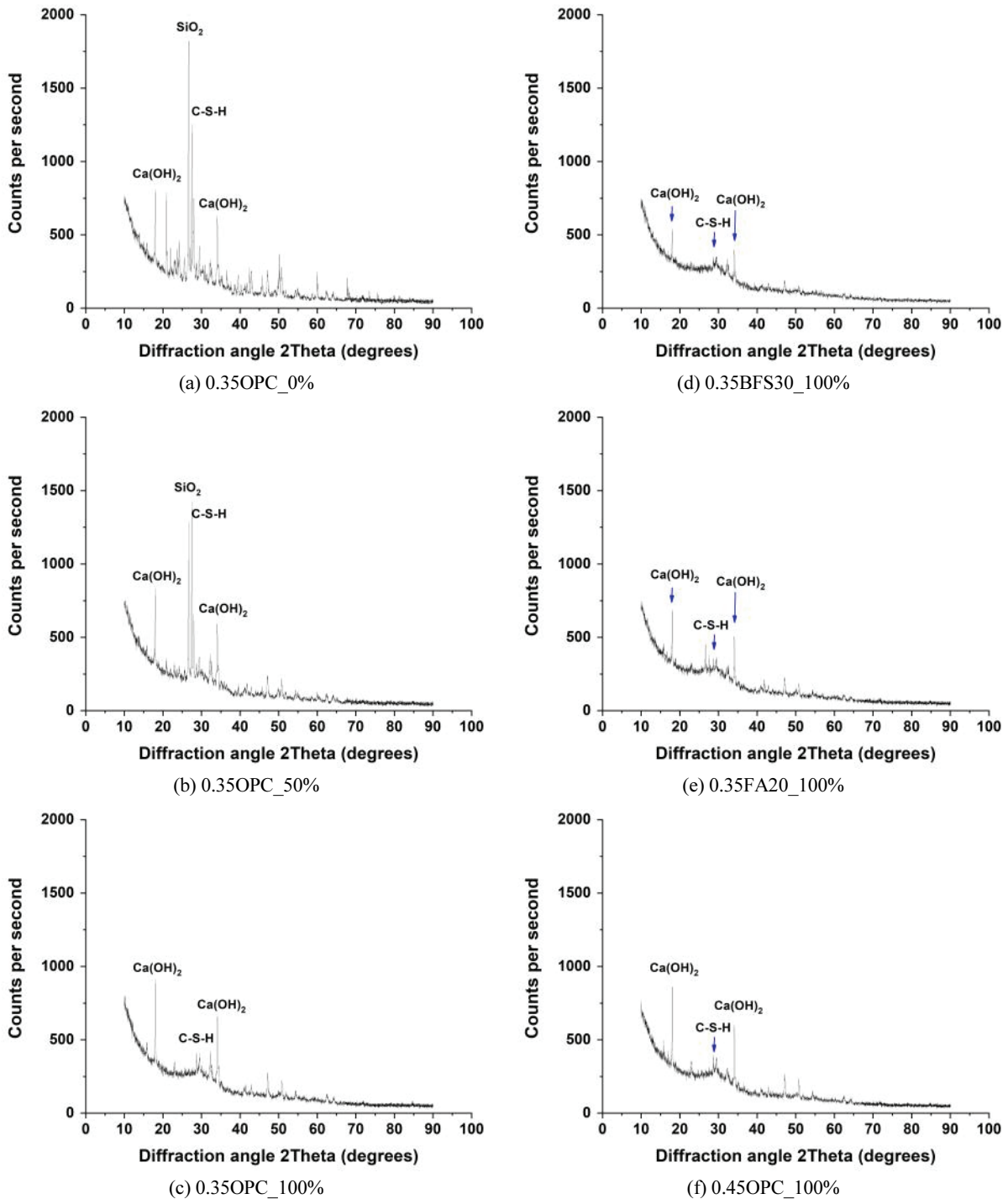


Fig. 3 X-ray diffraction plots

(결합재 종류)에 따른 각각의 미세 공극 분포(micro-size-distribution)를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면, CRT 폐유리의 대체율과 시험체의 물성에 상관없이 공극 사이즈 50nm에서 가장 높은 피크를 형성하고 있다. 일반적으로 시멘트 기반 재료의 미세 공극구조 형성은 수화반응이 왕성한 28일 이전 초기 재령에서 50nm 이하 크기의 공극들이 형성되고, 재령이 증가하여 수화반응이 진행될수록 50nm 이상 크기의 공극들이 형성되는 것으로 보고되고 있다(Choi et al., 2013; Yang and Choi, 2011). 본 연구에서 CRT 폐유리를 골재로 대체한 모르타르 시험체의 미세공극 구조 분석 실험은 혼화재와 재료 물성의 영향을 파악하기 위해 양생 재령 91일이 경과한 후에 측정하였다. 따라서 공극 크기 50nm 피크를 중심으로 다양한 크기의 공극들이 고르게 형성되어 있는 것을 모든 시험체에서 확인할 수 있다.

한편, Fig 4의 (b)는 각각의 미세 공극 분포를 공극 크기별로 분류하고 공극률(pore volume)과 비교하여 나타낸 것이다.

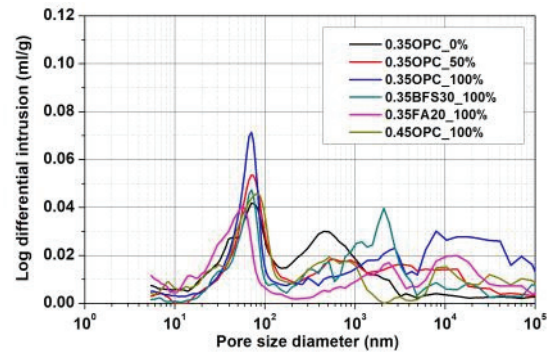
분석 결과를 살펴보면, 50nm 이하 크기의 공극 볼륨이 가장 크게 나타났으며, 400nm 크기 이상의 공극 볼륨도 높게 분포하는 것으로 나타났다.

보통 내부 조직이 치밀해지는 경우에는 10~50nm 크기의 모세관 공극(capillary void)이 발달하는 것으로 알려져 있다. CRT 폐유리의 대체율이 증가함에 따라 공극 크기 50nm 이하의 공극 볼륨이 증가하는 경향을 나타내는데 이는 폐유리의 파쇄 과정에서 표면 마모로 인해 입형이 원형으로 형성됨에 따라 골재 계면에서의 수화생성물 형성과 부착에 유리하게 작용한 것으로 사료된다.

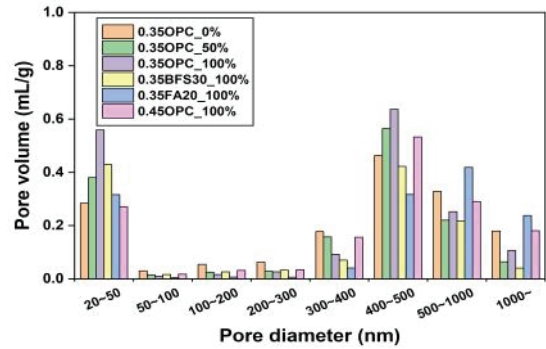
또한, 일반 모르타르(0.35OPC\_0%)에 비해 혼화재를 치환한 경우가 50nm 이하의 공극 볼륨이 높은 것으로 나타났다. 따라서 고로슬래그 미분말의 잠재 수경성 반응과 플라이애시의 포졸란 반응을 유도하여 2차적으로 내부 조직을 강화할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 압축강도 및 휨강도 특성

Fig. 5의 (a)는 CRT 폐유리 대체율과 물성에 따른 압축강도 변화를 나타낸 것이다. 실험 결과를 살펴보면, 일반 잔골재를 사용한 모르타르 시험체의 압축강도에 비해 CRT 폐유리를 대체한 모르타르 시험체의 압축강도가 다소 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 폐유리의 대체율이 증가될수록 압축강도가 감소되는 경향이 크게 나타났다. CRT 폐유리를 50% 대체한 경우에는 일반 모르타르 대비 약 3% 감소하였으며, 100% 대체한 경우에는 17% 정도 감소하였다. 이는 CRT 폐유리의 파쇄 전처리 과정에서 표면 마모로 인해 원형의 골재를 형성하게 되고 표면 거칠기가 저하되면서 결합재인 시멘트 페이스트와의 부착력이 감소한 결과로 판단된다.

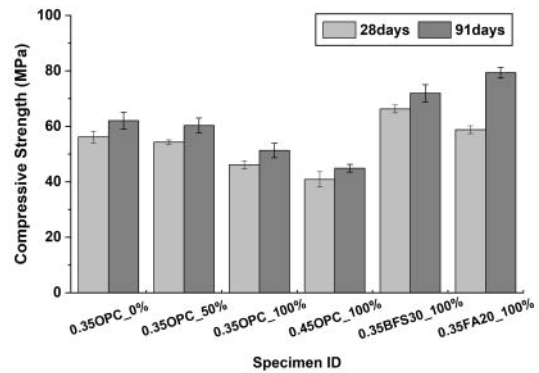


(a) Result of mercury intrusion porosimetry

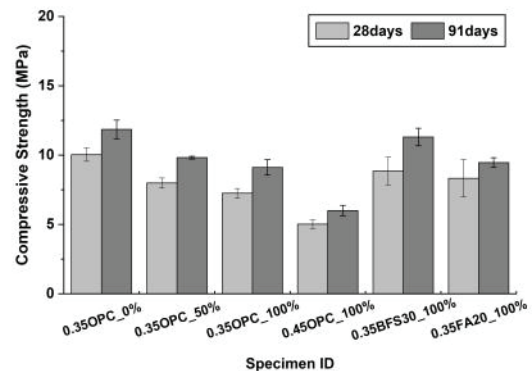


(b) Pore volume vs. Pore diameter

Fig. 4 Pore size distribution



(a) Compressive strength



(b) Flexural strength

Fig. 5 Result of strength test

Fig. 5의 (b)는 휨강도 실험 결과를 나타낸 것이다. 압축강도 특성과 동일하게 CRT 폐유리를 대체했을 때 휨강도가 저하되는 경향을 나타냈으나 압축강도에 비해 낮은 휨강도의 범위에서 CRT 폐유리의 영향은 크지 않은 것으로 사료된다. 즉, 일반적인 콘크리트의 휨강도는 압축강도 대비 1/5~1/8 수준으로 강도 수준이 미미하여 CRT 폐유리 골재의 영향이 크게 나타나지 않은 것으로 판단된다.

한편, CRT 폐유리를 100% 대체하고 시멘트를 광물질 혼화재로 치환한 경우를 살펴보면, CRT 폐유리를 100% 대체하였음에도 불구하고 일반 잔골재를 사용한 모르타르 시험체보다 높은 압축강도를 나타내었다. 28일 압축강도의 경우, 플라이애시를 혼화재로 치환(0.35FA20\_100%)했을 때에는 일반 모르타르 시험체(0.35OPC\_0%) 보다 약 8%의 압축강도가 증진되었으며, 고로슬래그미분말(0.35BFS30\_100%)을 치환했을 때에는 약 18%의 강도 증진 효과를 나타냈다. 특히, 혼화재의 영향이 뚜렷한 91일의 압축강도 결과를 살펴보면, 고로슬래그미분말 혼화재는 약 16%, 플라이애시 혼화재는 약 28% 정도 일반 모르타르 보다 강도가 상승하였다.

따라서 CRT 폐유리를 골재로 대체 사용한 시멘트 기반 재료의 압축강도가 저하되는 현상은 분말도가 높은 광물질 혼화재를 적절히 치환하여 원활한 수화반응과 포졸란 반응을 유도함으로써 일반 잔골재를 사용한 경우와 동등한 강도 수준과 강도 보상 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.4 감마선 차폐 성능 분석

#### 3.4.1 선형감쇠계수

방사선이 어떤 물질 혹은 매질을 통과하는 동안 그 매질의 구성 원자 또는 원자핵과 반응할 때 방사선의 세기가 감쇠하게 된다. 즉, 공간 중 두께가  $x$  cm 인 차폐체가 있을 때 차폐 효과로 인하여 감쇠현상을 보인다.

따라서 재료 내에서 이동한 단위 거리 당 방사선 빔 강도에 대한 감소 정도의 측정값( $\text{cm}^{-1}$ )을 선형감쇠계수(linear attenuation coefficient,  $\mu$ )로 표현할 수 있으며, 아래의 식(1)을 이용하여 차폐체의 선형감쇠계수를 산정하였다.

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{N_0}{N} \quad (1)$$

여기서,  $x$  는 차폐체의 두께이며,  $N$  과  $N_0$  는 검출기와 감마선 점선원 사이에 차폐체를 거치했을 때와 Blank 상태에서의 감마선 피크 순계수율이다.

선형감쇠계수는 방사선의 에너지와 차폐체의 종류에 따라 변화되며, 같은 종류의 차폐체라도 재료의 조성(밀도)에 따라 달라지기 때문에 같은 종류 및 동일한 두께의 차폐체에서는

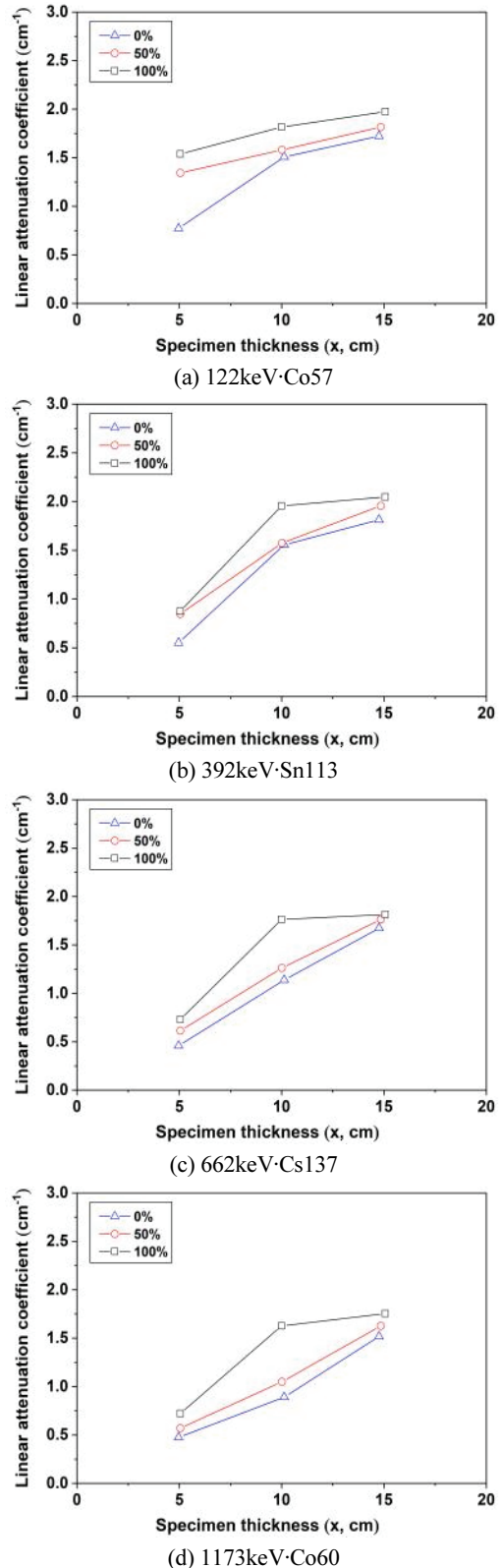


Fig. 6 Linear attenuation coefficient

선형감쇠계수가 큰 것이 차폐효과가 높은 것을 의미한다.

Fig. 6은 감마선 분광실험을 통해 얻은 일반 모르타르 시험체

와 CRT 폐유리를 잔골재로 대체한 모르타르 시험체의 감마선 스펙트럼 결과를 바탕으로 식(1)을 사용하여 산정한 선형감쇠계수의 변화를 나타낸 것이다. 실험 결과에서 알 수 있듯이, CRT 폐유리의 잔골재 대체율이 높아질수록 방사선원 종류에 상관없이 선형감쇠계수가 상승하는 결과를 나타냈으며, 이는 CRT 폐유리가 함유한 납, 철 등의 중금속으로 인해 차폐체가 높은 밀도를 갖게 됨으로써 감마선에 대한 선형감쇠계수가 상승하는 것으로 판단된다. 특히, 저에너지의 방사성을 보이는 Co<sup>57</sup> 방사선원에 대해서는 선형감쇠계수가 크게 상승하는 경향을 보였으나 고에너지의 방사선원 Cs<sup>137</sup>과 Co<sup>60</sup> 대해서는 선형감쇠계수의 상승 효과가 다소 낮아지는 것을 알 수 있었다.

한편, Fig.7은 CRT 폐유리를 잔골재로 100% 대체하고 물-결합재비율과 혼화제 종류를 달리했을 때의 물성별 선형감쇠계수 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 시험체의 두께 100mm 이상에서는 물성에 따른 영향이 나타나지 않아 두께 50mm의 시험체 결과만을 비교·분석하였다.

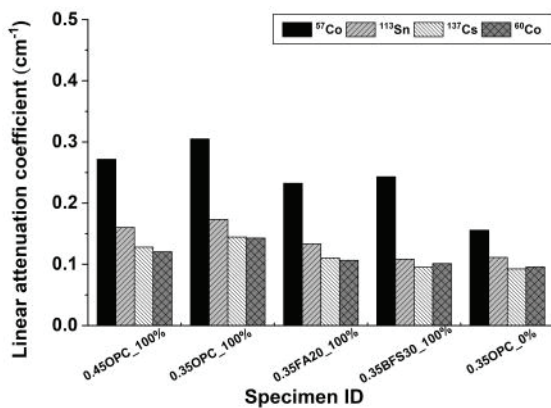


Fig. 7 Comparison of linear attenuation coefficients by material property (specimen thickness: 500mm)

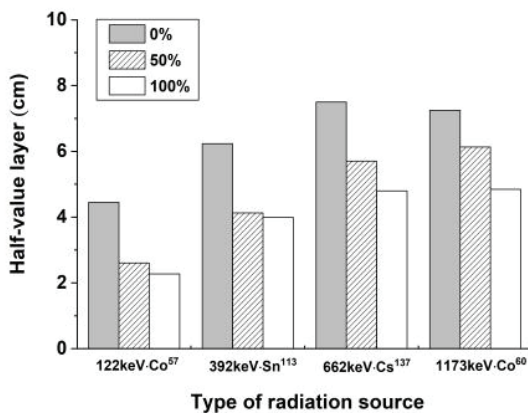


Fig. 8 Half-value layer (HVL)

결과적으로 일반 잔골재 모르타르(0.35OPC\_0%) 보다는 CRT 폐유리를 100% 대체한 모든 시험체의 선형감쇠계수가 커지지만 각각의 물성 변화에 따른 선형감쇠계수의 차이는 크게 나타나지 않았다. 따라서 역학적 성능과 산업부산물의 재활용성을 고려했을 때 고로슬래그 미분말을 혼화제로 사용한 경우(0.35BFS30\_100%)가 가장 물리적 성능과 차폐성능을 충족시키는 것으로 판단된다.

### 3.4.2 반가층

차폐체에 투과되는 최초의 방사선 선속의 세기를 절반으로 감소시키는 임의의 차폐체의 두께를 ‘반가층(Half-value layer, HVL)’이라 한다. 방사선의 차폐 효율은 이론적으로 차폐체의 밀도와 두께의 곱에 비례하며, 차폐체의 두께가 같은 경우 재료의 밀도가 클수록 차폐 효과는 우수하게 나타난다. 선형감쇠계수 결과에서 알 수 있듯이 일반적으로 동일한 재질과 밀도를 지닌 상태에서 차폐체의 두께가 두꺼워질수록 선형감쇠계수는 상승하며, 같은 두께의 차폐체에서 조성과 밀도를 변화시켜 반가층을 달리할 수 있다. 반가층은 차폐체의 설계에 주로 사용되며, 차폐 효율성으로도 표현된다. 따라서 차폐체의 반가층이 작을수록 더 적은 체적(차폐체의 두께)으로 차폐성능을 만족할 수 있으며, 이는 차폐체의 두께를 감소시켜 재료 절감의 경제적인 효과를 지닌 것으로 판단할 수 있다.

한편, 반가층은 다음의 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \approx \frac{0.693}{\mu} \quad (2)$$

여기서,  $x_{1/2}$  는 반가층이며,  $\mu$  는 선형감쇠계수이다.

시험체의 정밀 두께로 계산한 각각의 선형감쇠계수와 식(2)를 사용하여 Fig. 8에 CRT 폐유리의 잔골재 대체율에 따른 핵종별 반가층 변화를 나타내었다. 일반적인 콘크리트의 경우, Co<sup>60</sup>의 감마선 반가층은 60~70mm이며, Cs<sup>137</sup>은 40~50mm로 알려져 있다. 이 연구에서는 모르타르 시험체를 비교 대상으로 하였으나 Co<sup>60</sup>과 Cs<sup>137</sup>의 반가층은 대략 70mm로 나타났으며, CRT 폐유리를 100% 대체한 경우에는 50mm이하로 반가층이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Co<sup>57</sup>핵종에서는 반가층의 두께를 48%까지 크게 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 CRT 폐유리를 재활용한 고밀도의 모르타르 시험체는 저에너지 영역의 감마선 차폐 성능이 우수했으며, 적절한 고밀도의 곱은 골재와 조합하여 고에너지의 방사선 차폐 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 결 론

이 연구에서는 CRT 폐유리의 잔골재 대체율과 재료 물성을 달리한 모르타르의 미세구조와 감마선 차폐 효율을 평가하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) SEM 이미지 및 XRD 분석 결과, CRT 폐유리를 잔골재로 대체하여도 일반 모르타르와 동일하게 수화생성물을 형성하는 것으로 나타났다.
- 2) 폐유리의 대체율이 증가할수록 50nm 크기 이하와 400nm 크기 이상의 공극 볼륨이 증가하는 경향을 보였다.
- 3) CRT 폐유리 잔골재의 대체율에 따른 강도 측정결과, 대체율이 증가할수록 강도는 감소하였으며, 혼화제를 치환했을 때는 OPC 보다 높은 강도값을 나타냈다.
- 4) 페브라운관 유리 잔골재 대체율이 높을수록 감마선에 대한 차폐재의 선형감쇠계수는 상승하고 반가층은 작아지는 결과를 나타냈다.
- 5) 차폐성능을 고려했을 때 CRT 폐유리의 재활용성은 높은 것으로 판단되며, 역학적 성능을 개선하기 위해 적합한 산업 부산물과의 조합이 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20171520101680).

### References

1. Akkurt, I., Akyildirim, H., Mavi, B., Kilincarslan, S., Basyigit, C. (2010), Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies, *Progress in Nuclear Energy*, 52, 620-623.
2. ASTM D 4284. (2012), Standard Test Method for Determining Pore Volume Distribution of Catalysts by Mercury Intrusion Porosimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA.
3. Choi, Y.S., Yang, E.I. (2013), Effect of calcium leaching on the pore structure, strength, and chloride penetration resistance in concrete specimens, *Nuclear Engineering and Design*, 259, 126-136.
4. Choi, S.Y., Choi, Y.S., 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.
5. Choi, S.Y., Choi, Y.S., Yang, E.I. (2018), Characteristics of volume change and heavy metal leaching in mortar specimens recycled heavyweight waste glass as fine aggregate, *Construction and*

*Building Materials*, 165, 424-433.

6. Choi, Y.S., Kim, I.S., Choi, S.Y., Yang, E.I. (2019), Fundamental Properties and Radioactivity Shielding Characteristics of Mortar Specimen Utilizing CRT Waste Glass as Fine Aggregate, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(1), 163-170 [in Korean].
7. Choi, S.Y., Kim, I.S., Choi, Y.S., Yang, E.I. (2019), A Study on the Applicability of Heavyweight Waste Glass and Steel Slag as Aggregate in Heavyweight Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(2), 107-115 [in Korean].
8. Gallala, W., Hayouni, Y., Gaided, M.E., Fusco, M., Alsaied, J., Bailey, K., Bourham, M. (2016), Mechanical and radiation shielding properties of mortars with additive fine aggregate mine waste. *Annals of Nuclear Energy*, 101, 600-606.
9. Gusukuma, M., Kahhat, R. (2018), Electronic waste after a digital TV transition: Material flows and stocks, *Resources, Conservation & Recycling*, 138, 142-150.
10. KS L ISO 679. (2016), Methods of testing cements-Determination of strength, Korean Agency for Technology and Standards.
11. Kim, B.C., Cha, T.G., Jang, P.K., Jang, I.Y. (2015), An Experimental Study on High Strength Concrete Using the LCD Waste Glass Powder. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 3(4), 335-341 [in Korean].
12. Kim, I.S., Choi, S.Y., Yang, E.I. (2018), Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 184, 269-277.
13. Kim, I.S., Choi, Y.S., Choi, S.Y., Yang, E.I. (2019), Evaluation of durability and radiation shielding property of heavyweight filling material for application in radioactive disposal facilities, *Annals of Nuclear Energy*, 133, 750-761.
14. Lee, J.S., Yoo, H.M., Yang, W.S., Park, J.K., Cho, S.J., Kim, B.S., Seo, Y.C. (2013), A Study on Clay Brick manufacturing with Powders of CRT Glass Waste, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 30(1), 86-93 [in Korean].
15. Mueller, J., Boehm, M., Drummond, C. (2012), Direction of CRT waste glass processing: Electronics recycling industry communication, *Waste Management*, 32, 1560-1565.
16. Maslehuddin, M., Naqvi, A.A., Ibrahim, M., Kalakada, Z. (2013), Radiation shielding properties of concrete with electric arc furnace slag aggregates and steel shots, *Annals of Nuclear Energy*, 53, 192-196.
17. Oh, J.H., Mun, Y.B., Lee, J.H., Choi, H.K., Choi, S.S. (2016), Aggregate Effects on  $\gamma$ -ray Shielding Characteristic and Compressive Strength of Concrete, *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, 14(4), 357-365 [in Korean].
18. Yang, E.I., Choi, Y.S. (2011), Characteristics of Pore Structures and Compressive Strength in Calcium Leached Concrete Specimens, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 23(5), 647-656 [in Korean].

Received : 11/28/2019

Revised : 12/02/2019

Accepted : 12/04/2019



---

**요 지** : 이 연구에서는 CRT 폐유리의 잔골재 대체율과 재료 물성(조성)을 달리한 모르타르의 미세구조와 감마선 차폐 효율을 평가하였다. 실험 결과에 따르면 CRT 폐유리의 잔골재 대체율이 증가할수록 50nm 크기 이하와 400nm 크기 이상의 공극 볼륨이 증가하였으며, 선형감쇠계수는 상승하고 반가층은 작아지는 결과를 나타냈다. 또한, CRT 폐유리의 대체했을 때 강도는 감소하였으나 혼화제를 치환하여 OPC 이상의 강도값을 확보할 수 있었다.

**핵심용어** : 브라운관 폐유리, 잔골재, 감마선 차폐, 선형감쇠계수, 반가층

---