

폐 브라운관(CRT) 유리를 잔골재로 대체한 방사선 차폐 채움재의 성능평가

An Evaluation of the performance of Radiation Shielding Filler replacing CRT(Cathode Ray Tube) Glass with Fine Aggregate



최윤석 Yoon-Suk Choi
(재)한국건설생활환경시험연구원
산업융합센터 선임연구원/
공학박사
E-mail : yoons0305@kcl.re.kr



장필성 Pil-Sung Jang
(재)한국건설생활환경시험연구원
산업융합센터 선임연구원
E-mail :
psjang@kcl.re.kr



박옥윤 Ok-Yun Park
(재)한국건설생활환경시험연구원
산업융합센터 선임연구원
E-mail :
suntree@kcl.re.kr



장현오 Hyun-O Jang
(재)한국건설생활환경시험연구원
산업융합센터 연구원/공학박사
E-mail :
san1312@kcl.re.kr

1. 서론

최근 국토 인프라 시설의 확충과 건설 산업발전으로 인해 바닷모래, 부순 모래, 부순 돌 등 골재의 부족량의 한계로 드러나면서 산업폐자원을 재활용한 재생 골재, 슬래그 골재, 유리 골재 등의 대체 재료가 각광 받고 있다.[1] 이와 관련하여 「지상파 텔레비전 방송의 디지털 전환과 디지털방송의 활성화에 관한 특별법(이하 디지털전환 특별법)」발효에 따라 TV 및 모니터의 폐 브라운관(Cathode Ray Tube, CRT)에서 많은 양의 폐유리가 발생하고 있지만, 이는 자원 및 폐기물 재활용의 중요한 대상이 되고 있다.[2] 브라운관이 함유한 중금속을 기술적으로 분리하는 것은 매우 어려운 관계로 현재 전량 매립되고 있는 실정이며, 이에 따른 중금속 용출 등의 영향으로 환경오염이 우려되고 있다. 근래에는 폐 브라운관의 본체를 전면부 유리라와 납이 함유된 후면부 유리로 분리하고 납을 회수해 안정화한 후 콘크리트 블록과 점토 블록용, 방사선 차폐 소재로 재사용하는 재활용 방안이 모색되고 있는 실정이다.[3]

콘크리트는 비교적 방사선에 대한 차폐 효과가 높고 시공이 용이하기 때문에 원전 구조물의 주재료로 활용되고 있다. 특히 상대적으로 밀도가 높은 자철석, 철광석, 중정석 등을 굵은 골재로 대체한 중량 콘크리트를 사용하는 것이 일반적이지만 고밀도 골재의 경우, 대부분 수입 의존성이 높아 공급이 쉽지 않기 때문에 일반 골재를 사용한 콘크리트의 단면 두께를 확장하여 방사선 차폐 성능을 확보하고 있다. 또한 최근에는 방사능 차폐에 대한 중요성 인식으로 중성자 차폐를 위한 고분자 물질, 신소재 등을 혼합한 패널 형태의 콘크리트 개발 연구도 활발히 이루어지고 있다.[4]

따라서 본 논문에서는 고밀도 산업폐자원인 CRT 폐유리를 방사선 차폐 채움재의 재료로 전량 대체함으로써, 산업 폐기물을 효과적으로 재활용함과 동시에 방사선 차폐 성능확보에 기여하고자 한다.

2. 실험계획

2.1 실험변수

중금속을 함유하고 있는 고밀도의 CRT 폐유리를 잔골재로 재활용하기 위한 일환으로 모르타르 물성 및 방사선 차폐 성능 평가를 수행하기 위해 [표 1]과 같이 실험변수를 설정하였다.

[표 1] 실험 변수

Conditions		Variables
W/B 0.45	Fundamental test	OPC, FA, BFS
	Shielding test	OPC
CRT waste glass substitution ratio(%)		0, 100
Specimen size (mm)	Compressive and flexural strength test	40(W)×40(H)×160(L)
	Shielding test	150(L)×150(W)×50(D)
Curing duration (day)	Compressive and flexural strength test	7, 28
	Shielding test	28
Curing condition		Water curing (20±3 °C)

물-결합재비(W/B) 0.45를 대상으로 플라이애시(Fly Ash, FA) 20%, 고로슬래그(Blast Furnace Slag, BFS) 30%를 치환하였으며, CRT 폐유리 잔골재 대체율은 0%와 100%로 설정하였다. 방사선 차폐 성능평가의 경우, CRT 폐유리를 대체한 0% 및 100%의 모르타르 배합을 대상으로 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC) 시험체에 대해서만 평가하였다.

주요평가 항목으로는 플로우 및 밀도 변화, 중금속 함유량 및 용출시험, 압축강도 및 휨강도를 수행하였으며, 방사선 차폐 성능평가의 경우, X-선 투과시험과 핵종별 시험체의 γ-선 감쇠율을 평가하였다.

2.2 사용재료

본 연구에서 사용한 CRT 폐유리는 전자폐기물 처분장에서 수거한 CRT의 후면부 유리를 분리·파쇄하여 잔골재로 활용

하였다. 파쇄한 CRT 폐유리의 밀도는 3.0 g/cm³, 조립률(F.M) 3.34이며, <그림 1> 및 [표 2]에 파쇄된 모습 및 구성성분을 나타내었다. 또한 일반 잔골재와 CRT 폐유리 잔골재의 입도분포곡선은 <그림 2>와 같다.



그림 1. CRT 폐유리

[표 2] CRT 폐유리 구성성분

Composition	Content(%)
Fe	39.89
Pb	16.73
Cr	13.27
Si	10.03
O	9.80
Etc.	10.28

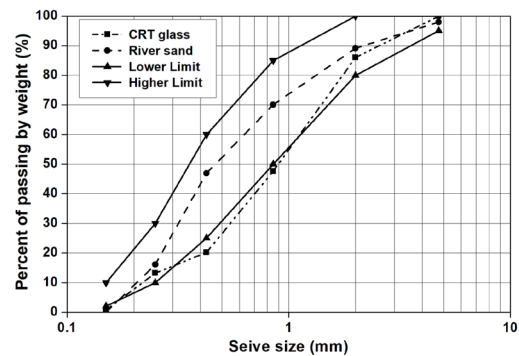


그림 2. 잔골재의 입도분포곡선

일반 모래를 잔골재로 사용한 경우와 CRT 유리를 잔골재로 대체한 모르타르 시험체 제작에는 밀도 3.15 g/m³, 분말도 3,200 cm²/g의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 이에 따른 모르타르 배합은 [표 3]과 같다.

[표 3] 모르타르 배합

(단위 : kg)

Type	W	C	BFS	FA	S	W,G*
OPC_0%	258	574	-	-	1,456	-
OPC_100%					-	1,679
BFS_0%	258	402	172	-	1,456	-
BFS_100%					-	1,679
FA_0%	258	459	-	115	1,456	-
FA_100%					-	1,679

* W,G : CRT 폐유리

3. 실험결과

3.1 플로우 및 밀도 변화

고밀도의 CRT 폐유리 대체 시, 유동성을 파악하기 위하여

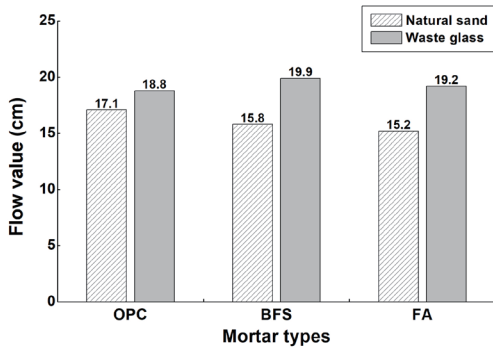


그림 3. 플로우 측정결과

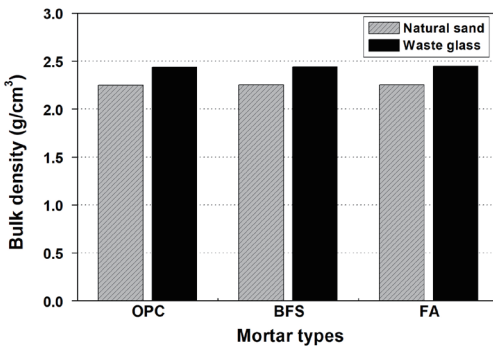


그림 4. 밀도 측정결과

KS L 5105[5]에 따라 플로우를 측정하였다. 또한 중금속을 함유한 CRT 폐유리를 대체 혼합한 모르타르 시험체의 밀도 변화를 파악하기 위해 ASTM C 642[6]에 준하여 겉보기 밀도(Bulk density)를 측정하였다.

<그림 3>은 일반 모래를 사용한 경우와 CRT 유리 골재를 100% 대체한 모르타르 배합의 플로우 값을 나타낸 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 폐유리를 대체한 모르타르의 플로우 값이 다소 상승하는 것을 알 수 있는데, 이는 파쇄 과정에서의 표면 마모에 의해 폐유리 골재의 입형이 원형에 가까워지고 일반 자연사보다 코팅 처리된 브라운관 유리의 표면이 매끄러운 것이 원인으로 사료된다.

또한 <그림 4>는 변수별로 굳은 모르타르 시험체의 밀도 측정결과를 나타낸 것이다. 모르타르 배합 변수에 상관없이 폐유리를 잔골재로 사용한 시험체의 밀도가 약 8% 정도 상승하는 것으로 나타났는데, 이는 CRT 폐유리가 함유한 중금속의 영향으로 판단된다.

3.2 중금속 함유량 및 용출 특성

CRT 폐유리 골재의 중금속이 함유된 정도를 파악하기 위하여 중금속 함유량 분석을 실시하였다. 또한 폐유리를 대체한 모르타르 시험체의 환경 안정성을 파악하기 위해 굳은 모르타르 시험체를 이온교환수(pH 5)에 침지시킨 후, 이온교환수로 용출된 중금속의 성분분석을 통해 용출특성을 평가하였다. 중금속 용출 시험은 폐유리 골재를 100% 대체한 물-결

[표 4] 중금속 용출 결과

Type	Unit	Leachate concentration					
		Pb	Cu	Cd	As	Hg	Cr
Mortar powder (detection limited)	mg/kg	8,676 (-)	49 (-)	N.D (3)	N.D (1)	N.D (0.05)	24 (1)
Mortar specimen	mg/L	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D

* N.D : non detection

합재비 0.45의 OPC 시험체를 대상으로 실시하였으며, 주요 6 수준의 중금속(Pb, Cu, Cd, As, Hg, Cr6+)에 대하여 「폐기물 공정시험방법」에 준하여 수행하였다.

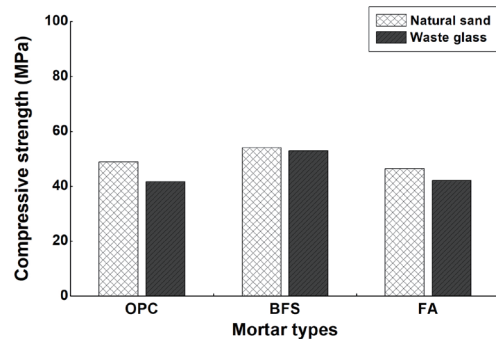
CRT 폐유리 잔골재 중금속 함유량에 대한 실험결과를 살펴보면, CRT 후면부의 폐유리 자체 성분은 Fe > Pb > Cr > Si 순으로 구성되어 있는데, 폐유리를 잔골재로 대체한 모르타르 시험체에서도 동일한 경향을 확인할 수 있다. 특히, 납 성분은 8,676 mg/kg으로 가장 많은 양을 포함하고 있었으며, 차폐 효과가 뛰어난 고비중의 납 성분 비율이 높기 때문에 방사선 차폐 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, CRT 폐유리로 제작한 모르타르 시험체가 함유한 중금속으로 인해 방사능 차폐 효과를 기대할 수 있으나 시험체가 이온 교환성을 지닌 순수 등에 접촉 시에는 콘크리트 내부의 공극수와 외부 접촉수와의 농도차로 인해 함유된 중금속이 외부로 용출될 수 있는 위험성을 지니고 있다고 판단된다. 또한 폐유리 골재를 100% 대체한 모르타르 시험체의 이온교환수에 의한 중금속 용출 시험을 실시한 결과, 모든 중금속 성분이 불검출된 것을 확인하였다. 이에 따라 CRT 폐유리의 중금속 성분은 시멘트 페이스트 결합재로 내부정착을 유도할 수 있으며, 환경 유해성 문제에서도 안전성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

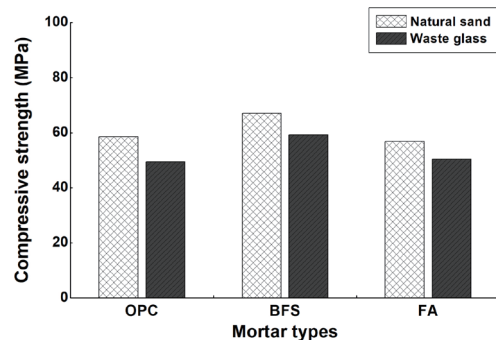
3.3 압축강도 및 휨강도 특성

압축강도 및 휨강도 실험은 KS L ISO 679[7]에 준하여 크기 40×40×160mm 시편을 제작하여 측정하였다.

<그림 5>는 일반 잔골재로 사용한 시험체와 CRT 폐유리를 잔골재로 대체한 시험체의 압축강도 시험결과를 나타낸 것이다. 일반 잔골재를 사용한 시험체는 재령이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향으로 나타났으며, 고로슬래그를 혼입한 경우, 압축강도는 14.52%로 가장 높게 나타났다.



(a) 재령 7일



(b) 재령 28일

그림 5. 압축강도 시험결과

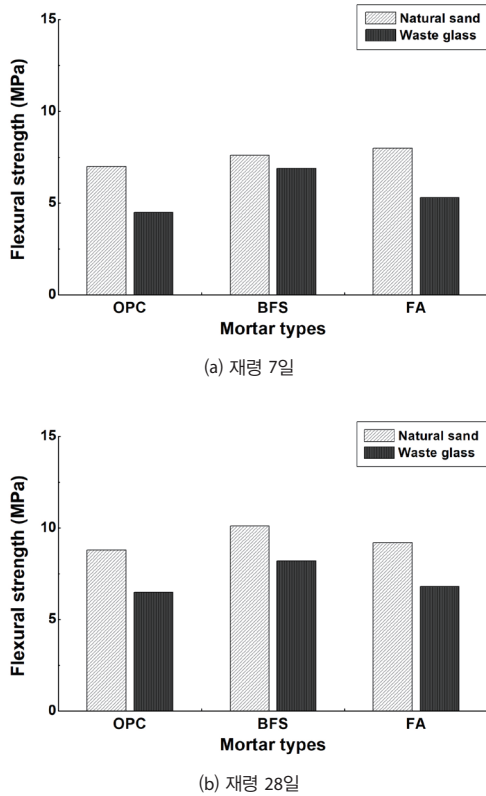


그림 6. 휨강도 시험결과

반면, CRT 유리를 100% 대체한 시험체는 재령 7일에서 28일로 증가했을 때 압축강도는 다소 증가하였으나, W/B와 혼화제 종류에 상관없이 일반 잔골재를 사용한 시험체보다 압축강도가 저하되는 경향으로 나타났다. 재령 28일 측정된 CRT 폐유리 시험체의 압축강도의 경우, 일반 모르타르 시험체 대비 OPC 시험체는 16%, BFS 시험체는 12%, FA 시험체는 11%로 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 폐유리의 매끄러운 표면으로 인한 마찰력 감소에 기인하는 것으로 판단된다.

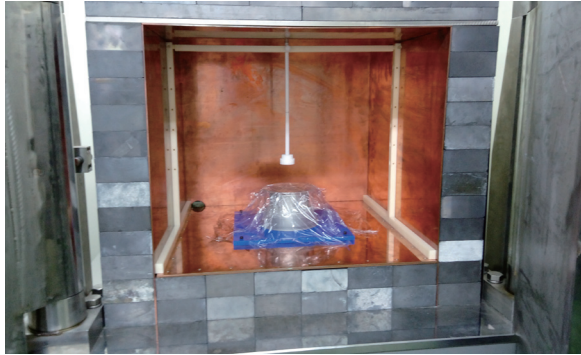
광물질 혼화제에 의한 압축강도의 경우, 폐유리 잔골재의 대체 유·무에 관계없이 BFS와 FA를 치환한 시험체가 OPC보다 다소 높은 압축강도를 나타냈다. 특히, <그림 5>의 (b)에서 CRT 폐유리를 100% 대체하고 고로슬래그를 혼합한 시험체의 압축강도가 자연사를 사용한 시험체의 압축강도와 동등한

수준을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 CRT 폐유리의 대체 사용으로 인해 압축강도가 저하되는 현상은 분말도가 높은 광물질 혼화제를 함께 사용하여 원활한 수화반응과 포졸란 반응을 유도함으로써 시멘트만을 결합재로 사용한 경우와 동등한 수준으로 강도보상 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

한편, <그림 6>의 (a)와 (b)는 재령 7일 및 28일에 대한 휨강도를 나타낸 것이다. 휨강도 특성에서도 압축강도 특성과 같이 양생 기간이 길어질수록 휨강도는 상승하였으며, 혼화제를 사용한 시험체의 휨강도가 다소 증가하는 것으로 나타났다. 이에, 압축강도와 마찬가지로 CRT 폐유리를 잔골재로 대체한 경우에는 고로슬래그 혼화제를 함께 사용하여 OPC 수준으로 휨강도를 향상할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 방사선 차폐 성능

고밀도의 CRT 폐유리를 잔골재로 대체한 모르타르 시험체의 방사선 차폐 성능을 평가하기 위하여 X-선 투과실험과 γ -선 투과실험을 수행하였다. 먼저, 저에너지의 방사선 차폐 성능을 측정하기 위한 X-선 투과실험은 표준 X-ray Field에서 중·저에너지(10~320 kV) X-선과 표준 조사장치(IEC RQR 8 diagnostic X-ray Beam)를 이용하여 측정하였으며, 동일한 두께(50 mm)의 일반 자연사로 제작한 시험체와 폐유리를 100% 대체한 시험체를 전리함 전면에서 각각 위치시키고 같은 크기의 X-선을 투과시켰을 때의 차폐율을 파악하였다. 또한 표준 방사선원(핵종)의 종류와 에너지양의 변화에 따른 차폐 성능을 평가하기 위하여 γ -선 분광법을 이용한 γ -선 투과실험을 수행하였다. γ -선 투과실험은 방사선이 차폐 재료를 1차원적으로 투과하는 정량적인 감쇠율을 측정하기 위하여 아래 <그림 7>과 같이 납 블록 챔버를 구성하였으며, 표준 방사선원과 검출기 사이에 시험체를 거치시키고 방사선만을 시험체에 입사시켜 정확한 차폐실험을 진행하였다. 사용된 γ -선 검출기는 상대효율 120%의 고순도 Ge-검출기를 이용하였으며, 방사선원의 종류는 ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{60}Co 를 대상으로 하였다. γ -선 에너지양은 122.1 keV, 391.77 keV, 661.7 keV, 1173.2 keV, 1332.5 keV로 하여 중·저에너지부터 고에너지까지의 방사선 감쇠율 변화를 비교·분석하였다.



(a) 핵종 별 Blank 상태에서의 실험



(b) 차폐 채움재 블록 거치 후 핵종별 감마선 투과 실험

그림 7. 감마선 분광법 실험 전경

선형감쇠계수의 산정은 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 감쇠하게 된다. 따라서 재료 내에서 이동한 단위 거리 당 방사선 빔 강도에 대한 감소 정도의 측정값(cm^{-1})을 선형감쇠계수(linear attenuation coefficient, μ)로 표현하며, 아래의 식(1)과 같이 나타낸다.

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

여기서, x 는 차폐체의 두께이며, N 과 N_0 는 검출기와 감마선 점선원 사이에 차폐체가 있을 때와 없을 때의 해당 감마선 피크의 순계수율을 각각 나타낸다.

<그림 8>의 X-선 투과실험 결과에서 일반 잔골재를 사용한 시험체는 97.3%의 X선 차폐율을 나타냈으며, CRT 폐유

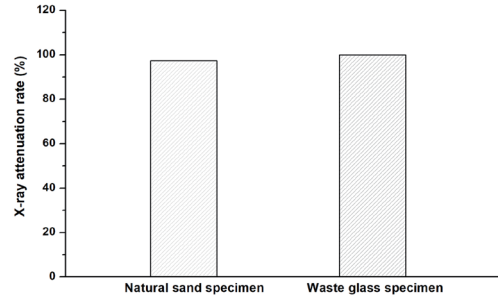
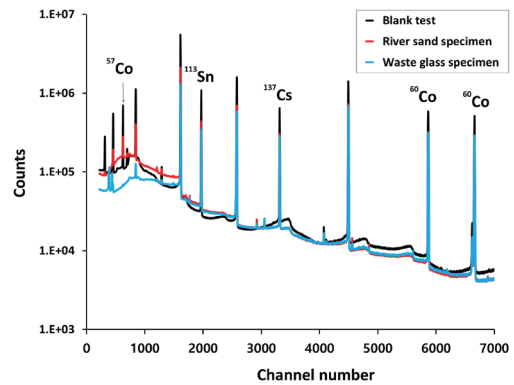
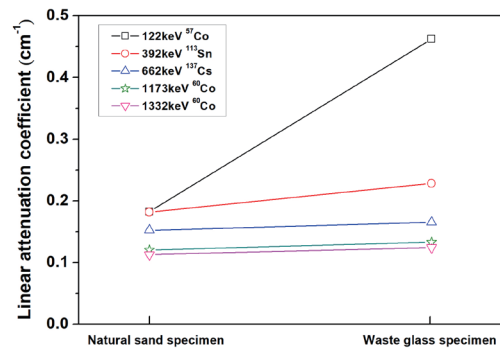


그림 8. X-ray 투과 실험 결과



(a) γ -ray 스펙트럼



(b) 선형감쇠계수

그림 9. γ -ray 스펙트럼 및 선형감쇠계수

리로 제작한 동일한 두께의 시험체는 100%의 X-선 차폐 효과를 보였다. 그러나 일반 잔골재 시험체와 폐유리 시험체의 X-선 차폐율 변화가 3% 이내로 미미하여 그 성능 차이를 판가름하기에 무리가 있는 것으로 판단된다. 따라서, 좀 더 면밀한 방사선 차폐 성능의 분석을 위해 여러 종류의 방사선원(표

준핵종)과 방사선량을 달리하여 γ 선 투과실험을 수행한 결과를 <그림 9>에 나타내었다. <그림 9>의 (a)는 γ 선 투과 실험에서의 스펙트럼 결과를 나타낸 것이며, <그림 9>의 (b)는 스펙트럼 결과를 바탕으로 식(1)을 이용하여 계산한 선형감쇠계수(μ)값의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 방사선원(핵종)별 선형감쇠계수를 살펴보면, 자연사와 시멘트를 혼합하여 제작한 일반 모르타르 시험체의 경우, 122.1 keV_57 Co, 391.7 keV_113 Sn, 661.7 keV_137 Cs, 1173.2 keV_60 Co, 1332.5 keV_60 Co에 대하여 각각 0.18, 0.18, 0.15, 0.12, 0.11(cm⁻¹)의 선형감쇠계수를 나타내었다. 반면, CRT 폐유리를 잔골재로 대체한 모르타르 시험체의 선형감쇠계수는 0.46, 0.23, 0.17, 0.13, 0.12(cm⁻¹)로 저에너지부터 고에너지까지 감쇠계수가 상승하는 효과를 나타냈다. 이는 방사선 차폐효과가 높은 고비중의 납 성분이 다량 포함된 CRT 폐유리를 잔골재로 사용함으로써 시험체의 밀도가 상승하여 방사선 차폐 효과가 높아지는 것으로 판단할 수 있다.

한편, 방사선원별로 상승률을 살펴보면, 57 Co는 154 %, 113 Sn은 26 %, 137 Cs는 8 %, 60 Co는 10 %의 상승률을 나타냈다. 특히, 57Co 방사선원에 대해서는 2.5배의 높은 상승효과를 보였다. 반면, 방사선량(에너지양)이 높아질수록 방사선 차폐 상승률이 낮아지는 것을 알 수 있다. 즉, 방사선량이 클수록 CRT 폐유리의 대체 효과가 낮아지는 것으로 볼 수 있으며, 고에너지의 방사선을 차단하기 위해서는 잔골재의 배합 용적 비율을 증가시켜야 할 것으로 사료된다. 그러나 잔골재의 용적 비율이 높아질수록 역학적 성능 저하를 초래하므로 고에너지에 대한 방사선 차폐를 위해서는 골재 용적비가 큰 굵은골재를 사용한 콘크리트가 유리할 것으로 판단된다.

4. 맺음말

CRT 폐유리를 잔골재로 대체한 시험체는 폐유리가 함유한 고비중의 중금속 성분으로 인해 일반 잔골재를 사용한 시험체보다 겉보기 밀도가 상승하는 것을 확인하였다. 또한 폐유리를 대체한 모르타르의 중금속 함유량 분석결과, 차폐 효과에

유리한 납 성분의 함유량이 가장 높은 것으로 나타났으며, 굳은 모르타르의 용출 시험결과에서는 유해성분이 검출되지 않았다.

폐유리를 100 % 대체한 시험체는 압축강도 및 휨강도가 저하되는 경향을 보였으나, 고로슬래그를 치환 사용하면 자연사를 잔골재로 사용한 OPC 시험체와 동등한 수준의 압축강도를 나타냈으며, 납 성분이 포함된 CRT 폐유리를 잔골재로 사용했을 때 γ -선에 대한 시험체의 선형감쇠계수가 상승하는 결과로 나타나, 고에너지일수록 선형감쇠계수의 상승효과가 미미한 것을 확인하였다.

마지막으로 CRT 폐유리를 재활용한 고밀도의 시험체는 저에너지 영역의 γ -선 차폐 성능이 우수했으며, 적절한 고비중의 굵은 골재와 조합하여 고에너지의 방사선 차폐 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Choi, S.Y., Choi, Y.S., Won, M.S., Yang, E.I. (2015), Evaluation on the Applicability of Heavy Waste Glass as Fine Aggregate of Shielding Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(4), 101-108.
- [2] Mueller, J., Boehm, M., Drummond, C. (2012), Direction of CRT waste glass processing: Electronics recycling industry communication, *Waste Management*, 32, 1560-1565.
- [3] 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.
- [4] Min, J.Y., Lee, B.N., Lee, J.S., Lee, J.H. (2016), Neutron Shielding Performance of Mortar Containing Synthetic High Polymers and Boron Carbide, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 28(2), 197-204.
- [5] KS L 5105. (2007), Testing method for compressive strength of hydraulic cement mortar, Korean Agency for Technology and Standards.
- [6] ASTM C 642. (2013), Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [7] KS L ISO 679. (2016), Methods of testing cements - Determination of strength, Korean Agency for Technology and Standards.

담당 편집위원 : 장현오 ((재)한국건설생활환경시험연구원)