

폐유리와 킬레이트 수지를 사용한 방사선 차폐재의 재료특성 평가

김효정¹, 장종민¹, 송용순², 노재호³, 이성태^{4*}

Characteristics Evaluation of Radiation Shielding Materials Used Waste Glass and Chelate Resins

Hyo-Jung Kim¹, Jong-Min Jang¹, Young-Soon Song², Jae-Ho Noh³, Seong-Tae Yi^{4*}

Abstract: Various approaches have been attempted to develop recycling technologies related to industrial waste resources containing metals. Among them, glass is not decomposed into microorganisms, so landfill is not suitable, and interest in the recycling of waste glass is increasing. In this paper, by incorporating chelate resin to suppress the elution of heavy metals in waste glass and using waste glass as a fine aggregate and we want to evaluate the strength, drying shrinkage, alkali-silica reaction and heavy metal leaching of shielded filler materials and to provide basic data for utilizing waste glass as an economical and environmentally friendly shielding filler. As a result of the test, it was found that the use of waste glass as a fine aggregate was effective in the development of strength, but the incorporation of chelate resin had an influence on the strength development. In addition, the addition of chelate resin was effective in improving drying shrinkage but it was found to affect the alkali - silica reaction. As a result of the heavy metal leaching test, the KSLP test method satisfies all the criteria for heavy metal leaching. However, in case of lead, the limit of US ANSI 67-2007a was exceeded and further study should be done.

Keywords: Waste glass, Chelate resin, Radiation shielding materials, Heavy metals leaching reduction

1. 서 론

산업의 급격한 발달은 다량의 산업폐기물을 발생시키고 있으나 그 처리방안과 처리비용문제로 인해 대부분 매립 또는 방치되고 있는 실정이다. 이러한 산업폐기물 중 상당수를 차지하는 폐유리(Waste Glass, WG)는 전자파의 외부 방출을 방지하기 위해 철, 납, 수은 등의 중금속을 다량 함유하고 있으며 이를 매립할 경우 생태계에서는 자연적으로 분해되지 않고 중금속의 용출로 인해 환경 부하가 가중될 우려가 있다.

세계 각국에서는 폐기물로 버려지는 물질을 자원으로 재활용하여 폐기물의 발생을 저감하고 자원고갈을 방지하기 위한 자원순환형 경제 활성화 방안을 제시하고 있다. 특히, 에너지 수요의 증가, 구리나 아연과 같은 희토류 등의 희소금속을 비롯한 원자재 가격의 급등 및 매립·소각 등 폐기물 처리에 대한 기술 부족은 자원 순환이용률을 저해하므로 이를 개선할 수

있는 방법의 개발이 시급한 실정이다.

산업 기술의 급속한 발전은 기존 제품이 사용 가능함에도 불구하고 신제품으로 교체되게 함으로서 폐기단계에 더 빨리 도달하게 하는 결과를 초래하게 된다. 이와 같은 이유로 금속을 함유하고 있는 산업폐자원과 관련한 재활용 기술을 개발하기 위해 다양한 접근이 시도되고 있으며, 그 중에서 가장 활성화된 대체 재료인 유리는 미생물로 분해되지 않기 때문에 환경친화적인 측면에서 매립은 적합하지 않아 폐유리의 재활용에 대한 관심은 증대되고 있다. 폐유리는 페브라운관의 유리를 수거하여 브라운관 TV의 제작에 재사용되기도 했지만, 최근 제조사들이 이러한 형식의 TV 생산을 중단함으로써 사실상 적절한 재활용 기술을 확보하지 못하고 있다(Choi et al., 2015). 하지만, 콘크리트에 적용 시 잔골재의 대체 재료나 콘크리트의 혼화제로 사용될 수 있으므로 환경문제와 경제성 측면에서 유용한 재료로 활용될 수 있다.

한편 1990년 이후부터 국내 에너지 생산 중 원자력에너지가 차지하는 비중이 점차 증가하고 있으며, 2014년에는 총 생산에너지 중 70%에 달할 정도로 원자력에너지 발전은 경제적인 이점이 다수 존재하고 있으나, 다른 에너지원과 달리 방사성물질의 사용으로 인해 이에 따른 폐기물이 발생하는 단점이 있다. 이 폐기물의 폐기 처리는 외부 노출을 방지하는 방법 외는 처분기술이 거의 없는 실정이다. 이 폐기물의 폐기를

¹정회원, (주)제이엔티아이엔씨 기술연구소 연구원

²정회원, (주)제이엔티아이엔씨 기술연구소 기술이사

³정회원, (주)제이엔티아이엔씨 기술연구소 대표이사

⁴정회원, 인하공업전문대학 토목환경과 교수

*Corresponding author: yist@inhac.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon 22212, Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2019년 3월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

위해서는 해수면 아래 깊은 곳에 콘크리트 사일로를 건설하여 영구적으로 처분하게 된다. 이 때 요구되는 차폐성능은 원자번호가 크거나 밀도가 큰 중금속 재료를 사용하면 가장 효과적이나 중금속 처리방법 및 경제성 측면에서 사용하기 어려운 실정이다.

폐유리는 컴퓨터, TV 등 다양한 전자제품에서 발생하는 전자파의 외부 방출을 방지하기 위해 철, 납, 수은 등의 중금속을 용융시킨 후 유리화 과정을 거쳤기 때문에 중금속을 다량 포함하고 있다. 즉 이 폐유리는 중금속을 함유하고 있어서 자연적인 방법으로는 용출되지 않는다고 하지만, 중금속의 용출 가능성이 전무하다고 판단하기엔 다소 무리가 있다. 일부 특허(Sho, 2002)에서는 폴리머나 수지를 사용하여 중금속 등이 포함되어 있는 조각재를 시멘트와 시멘트 혼화용 폴리머로 개질하여 시멘트 수화물과 폴리머에 의해 매트릭스를 형성시켜 중금속이 용출되는 것을 방지할 수 있다고 보고된 바 있다. 따라서 본 논문에서는 중금속을 함유한 폐유리의 중금속 용출을 억제하기 위해 킬레이트 수지를 혼입함으로써 차폐체움재의 중금속 용출을 평가하고자 한다.

또한, 원자력발전소 내 주요 구조물에서 각 부재는 생물체의 방호를 위하여 X선, γ 선 및 중성자선의 차폐 성능이 요구되며, 이 성능은 일반적으로 방사선 차폐벽체의 설계법에 따라 콘크리트 부재의 두께로 결정되고 있으며, 부재의 두께를 감소시키기 위해 단위질량이 큰 중량콘크리트(2.5~4.0ton/m³)를 사용하기도 한다(KCI, 2016). 하지만, 중량콘크리트에 이용되는 골재는 국내 생산이 어려운 실정으로 거의 수입에 의존하고 있는 상황이다. 기존의 연구결과(Choi et al., 2015)에 따르면 폐유리를 잔골재로 일부 대체한 모르타르에 대한 실험적 연구에서, 폐유리 사용하면 단위용적질량의 증가하며 이에 따라 차폐율이 증가하는 것으로 보고된 바 있다.

폐유리는 시멘트나 골재의 대체재로 유용한 자재이지만, 시멘트와 수화 반응 시 포졸란 반응의 가능성이 있어 경화 콘크리트의 물리적 성질을 향상시키고 굳지 않은 콘크리트의 블리딩 저감, 수화열 발생의 억제 등에 효과적인 것으로 보고

(Kim et al., 2009)된 바 있으나 시멘트의 알칼리 성분과 유리의 실리카광물질이 화학반응을 일으켜 실리카 겔을 형성하고 수분을 계속 흡수하는 알칼리-실리카반응(Alkali-silica reaction, ASR)으로 인해 팽창 및 균열이 발생하는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 폐유리를 잔골재로 사용하고 킬레이트 수지를 혼입함에 따른 차폐체움재의 강도, 건조수축, 알칼리-실리카반응, 중금속 용출 등을 평가하여 폐유리를 경제적으로 환경 친화적인 차폐체움재로서 활용하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

폐유리를 잔골재로 사용함에 따른 차폐체움재의 특성평가를 위해 Table 1에 실험계획과 배합설계를 나타내었다. 실험배합은 콘크리트 용적 1m³에서 굵은골재를 사용하지 않은 모르타르 배합으로 하였으며, 물-결합재비는 예비시험에서 40~50MPa의 강도를 낼 수 있는 35%로 고정하였고 폐유리 사용시 알칼리-실리카반응 억제 등 차폐재의 내구성 개선을 위해 고로슬래그 미분말을 시멘트에 대한 중량비로 30%를 대체하였고, 폐유리의 중금속 용출 억제 가능성을 검토하고자 킬레이트 수지(Chelate resin, CR)를 결합재의 중량비로 0.2%와 1.0%를 첨가하였다. 실험변수로는 재령 3일, 7일, 28일에서의 압축강도와 건조수축에 따른 길이변화, 알칼리-실리카반응 및 중금속 용출로 하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 결합재

본 연구에서 사용한 결합재의 물리적 특성과 화학적 성분은 Table 2에 나타내었다. 여기서 시멘트는 밀도 3.15 g/cm³, 분말도 3,350 cm²/g인 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였고 고

Table 1 Experimental plan and mix design

Mix type	Content of waste glass (%)	Unit weight (kg/m ³)					AD (%)
		Water	Binder		Sand	WG ³⁾	CR
			OPC	BFS			
AD ¹⁾ 0%	0	178	509	-	1,555	-	-
	0		357	152	1,555	-	-
	100		509	-	-	1,830	-
	100		357	152	-	1,830	-
CR ²⁾ 0.2%	100		509	-	-	1,830	0.2
	100		357	152	-	1,830	
CR ²⁾ 1.0%	100		509	-	-	1,830	1.0
	100		357	152	-	1,830	

¹⁾ AD: Admixture, ²⁾ CR: Chelate resin, ³⁾ WG: Waste glass

Table 2 Physical properties and chemical composition of binder

Type of binder	Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Chemical composition (%)						
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI
OPC ¹⁾	3.15	3,350	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2	1.30
BFS ²⁾	2.95	6,300	33.54	15.22	0.51	43.88	2.62	2.54	0.01

¹⁾ OPC: Ordinary portland cement, ²⁾ BFS: Blast furnace slag

Table 3 Physical properties and chemical composition of waste glass

Type	Density (g/cm ³)	F.M	Chemical composition (%)				
			SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
WG ¹⁾	3.0	3.23	60.5	1.9	19.6	10.0	8.0

¹⁾ WG: Waste glass

로슬래그 미분말(BFS)은 밀도 2.95g/cm³, 분말도 6,300cm²/g 인 Y사의 2종을 사용하였다.

2.2.2 폐유리

폐유리는 폐브라운관 후면부에서 발취하였으며 브라운관 제조사에 따라서 중금속 함유량에는 차이가 있었으나, 폐유리를 구성하는 성분에는 큰 차이가 없었다. 폐유리의 물리적 특성과 화학적 성분은 Table 3에 나타난 바와 같이 조크러서로 분쇄후 5mm체를 통과한 폐유리로 고밀도 3.0g/cm³, 조립률(F.M) 3.23이며 입도분포 곡선은 Fig. 1과 같이 KS F 2502 (굵은골재 및 잔골재의 체가름 시험방법) 입도분포곡선 내 분포한 것으로 사용하였다.

2.2.3 잔골재

본 논문에서 품질 기준용 일반 잔골재는 KS L 679에서 품질을 규정하고 있는 ISO 표준사를 사용하였다.

2.2.4 킬레이트 수지

킬레이트 수지(CR)는 3차원 가교된 고분자 기체로써 중금속과 배위결합이 가능한 관능기(N, S, O, P)를 결합시킨 것으로, 물리적 형상은 비드 형태로 기공이 미세한 겔형 이외에 세밀

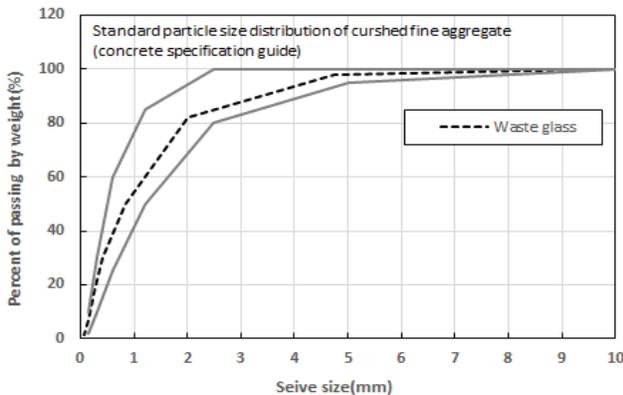


Fig. 1 Particle size distribution curve (Waste Glass)

Table 4 Chemical composition of chelate resin

Type	Density (g/cm ³)	Viscosity (mPa · s), 23 °C	pH
Liquefied	1.05	5.18	2.5±1

한 다공질형 등이 있으며, 반복사용이 가능한 재생능력이 있다. 또한 기존 연구(Jung and Jeong, 2000)에서는 킬레이트 수지가 이온교환 수지이기 때문에 일반 이온교환 수지에 비해 킬레이트 수지가 금속이온과 더 센 결합을 형성하는 동시에 더 높은 선택성을 가지며, 수지의 선택성이 금속이온의 크기, 하전량 등 물리적 성질보다 리간드의 성질에 더 의존하는 성질을 가지고 있다고 보고된 바 있다. 따라서 킬레이트 수지는 물속의 중금속 제거, 혼합 용액 안에서 특정 금속의 선택적으로 회수 등의 용도로 사용되기 때문에, 본 연구에서는 중금속 용출을 억제하기 위해 사용하였다(Table 4).

2.3 시험방법

2.3.1 압축강도

폐유리와 혼화재료를 사용했을 경우의 내구성 검토를 위해 압축강도를 측정하였다. 시험체로는 KS L 5105 「수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법」에 따라 50mm 크기의 모르타르 입방체를 제작하였으며, 온도 20±1 °C에서 수중양생 후 재령 3일, 7일 및 28일에 압축강도 시험을 실시하였다.

2.3.2 건조수축 길이변화

차폐체움재의 건조수축에 따른 길이변화를 검토하기 위해 KS F 2424 「모르타르 및 콘크리트 길이변화 시험방법」 기준에 의하여 40×40×160mm 크기의 모르타르 각주 공시체를 제작하였으며, 온도 20±1 °C에서 재령 7일간 수중양생을 수행한 후, 1일간 기건양생 실시 후 이로부터 7일 간격으로 버니어 캘리퍼스를 이용하여 길이변화를 측정하였다.

2.3.3 알칼리-실리카반응(ASR)

유리질 재료의 혼입으로 인해 발생하는 알칼리-실리카반

응(ASR)에 의한 팽창성을 확인하기 위해, ASTM C 1260 「Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates」 기준에 따라 25×25×285mm 크기의 시험체를 제작하였다. 시험체는 재령 1일 후 탈형하여 버니어 캘리퍼스로 양쪽 끝의 스티드를 제외한 시편의 크기를 0.02mm까지 측정하고, 증류수가 채워진 밀폐 용기의 80℃가 유지되는 항온에서 24시간 수중양생을 하였다. 수중양생 후 시편을 건조하여 15초 이내에 0.01mm까지 측정 가능한 다이얼게이지 측정기를 이용하여 양쪽 끝의 스티드를 포함한 시편의 길이를 측정하고, 이를 영점으로 하였다. 영점이 측정된 시편은 1N의 NaOH 용액이 담긴 밀폐 용기에 넣어 다시 80℃가 유지되는 항온에 보관하면서 침지 2일, 4일, 7일, 14일에 알칼리-실리카 반응을 측정하였다.

2.3.4 중금속 용출

국내에서는 콘크리트에 대한 중금속 용출 기준이 전무한 상태이다. 다만, 시멘트 산업에서는 천연광물 외 화학성분을 함유한 물질의 산업부산물 및 폐기물을 폐기물 재활용 관련 규정에 따라 “폐기물관리법”으로 기준에 만족하면 재활용 할 수 있는 기준이 마련되어 있다. 따라서 본 연구에서는 전자폐기물인 폐유리를 잔골재로 사용함으로써 중금속 용출을 평가하고자 한국 폐기물 재활용 기준인 KSLP법(폐기물공정시험법)과 미국 음용수법에 따라 콘크리트 자재 관리기준에서 정한 ANSI(American National Standard Institute) 67-2007a법으로 평가를 수행하였다.

한국 KSLP 시험법은 시험하고자 하는 목적 성분들이 입자에 흡착되어 있거나 난분해성의 착화합물 또는 착이온 상태로 존재하는 경우가 있기 때문에 시험의 목적에 따라 적당한 방법으로 전처리를 한 다음 분석해야 한다. 전처리 방법에는 질산법, 질산-염산법, 질산-황산법, 질산-과염소산법 등이 있으며, 이 중 콘크리트의 중금속 용출 시험은 보통 질산-염산법으로 전처리를 한다. 이 방법은 유기물 함량이 비교적 높지 않고 금속의 수산화물, 산화물, 인산염 및 황화물을 함유하고 있는 시료에 적용된다. 시료를 5mm 이하로 분쇄한 다음, 질산과 가열하여 거의 건조되는 부근까지 증발농축하고 방냉한다. 여기에 염산과 물을 넣고 가열하는데 잔류물을 녹인 후 유기물의 분해가 완전히 끝나지 않을 경우 다시 질산을 넣어 가열

을 반복하여 여과한 전처리용액을 정확히 100mL 만든다. 이 용액을 100g 이상 정확히 개량하고 정제수에 염산을 넣어 pH를 5.8~6.3으로 한 용매를 시료용액과 용매의 비율을 1:10으로 2,000 mL 삼각플라스크에 넣고 혼합하여 중금속 용출을 검출하고자하는 시료용액을 조제한다. 조제를 끝낸 후 진탕기를 사용하여 6시간 연속 진탕한 다음 여과하여 용출 시험용 시료용액으로 중금속을 분석하는 방법이다.

ANSI 67-2007a 음용수 평가 시험법은 모르타르 시험체를 제작한 다음 24시간 경화한 후에 탈형하고 수침시켜 91일간 수중양생을 실시한 후, 용출 시험을 실시하기 전에 200mg/L 염소 용액으로 컨디셔닝을 한다. 이후 시험체의 비표면적이 최소 50cm²/L가 되도록 pH 5의 산성용액과 pH 10의 염기성 용액에 각각 노출시키고 23±2℃에서 4일 동안 1일 마다 노출 용액을 교체하는 과정을 3일 동안 반복한다. 3일 경과 후, 4일째에 산성 및 염기성 용액을 모두 버리고 새로운 산성 및 염기성 용액에 1일 동안 모르타르 시험체를 침지하여 중금속 용출을 실시한 후 각 pH 용액에 용출된 중금속을 분석하는 방법이다.

이 연구해서 선택한 중금속 종류인 수은(Hg), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As), 구리(Cu), 크롬(Cr)에 대한 각 시험법의 허용기준치는 Table 5와 같다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 압축강도

킬레이트 수지를 사용하지 않고 폐유리를 사용한 경우, 차폐체용제의 압축강도 발현비에 대한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이 논문에서는 압축강도 발현비의 기준(Plain)은 폐유리를 사용하지 않고 결합재로 OPC를 사용한 차폐체로 하였고, 이 Plain의 3일, 7일 및 28일에서의 압축강도는 각각 31, 37 및 43MPa였다. 강도를 측정된 결과, 폐유리를 사용하지 않고 결합재로 BFS30%를 치환한 차폐체에서는 재령 3일과 7일에 Plain보다 각각 98%, 94%로 낮게 측정되었지만 재령 28일에서 114%로 높게 측정되어 장기강도 개선에 효과가 있는 것으로 판단된다. 또한, 폐유리를 사용한 차폐체의 경우에도 OPC보다 BFS30%에서 압축강도가 상대적으로 높게 측정되어 BFS의 사용에 따른 강도 개선에 효과가 있는 것으로 나타났다.

Table 5 Allowable standard values

Test methods	Emission concentration (mg/L)					
	Hg ¹⁾	Pb	Cd	As	Cu	Cr
KSLP method	0.005	3	0.3	1.5	3	-
ANSI 67-2007a method	0.005	0.015	0.005	0.01	1.3	0.1

(Note) Hg : Hydrargyre, Pb : Plomb, Cd : Cadmium, As : Arsenic, Cu : Cuprum, Cr : Chromium

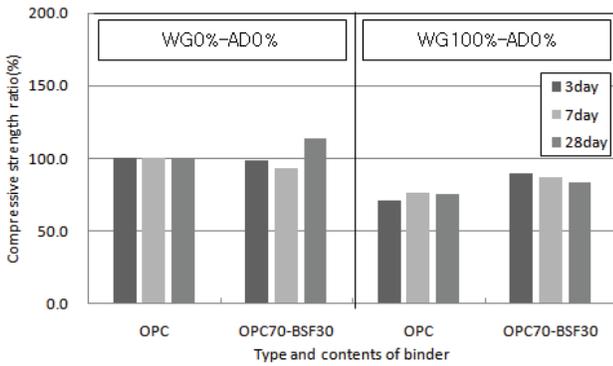


Fig. 2 Compressive strength ratio with binder type and contents (WG0%-AD0%, WG100%-AD0%)

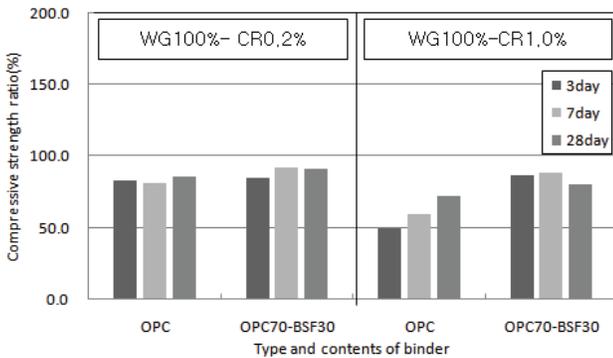


Fig. 3 Compressive strength ratio with binder type and contents (WG100%-CR0.2%, 1.0%)

반면, 폐유리를 사용한 차폐재인 경우 사용하지 않은 차폐재보다 압축강도 발현비가 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 기존의 연구(Lee and Lim, 2012; Kim et al., 2016)에서와 같이 폐유리와 시멘트 페이스트 사이의 부착강도가 저하된 때문으로 판단된다.

폐유리와 킬레이트 수지를 사용한 차폐재의 압축강도 발현비에 대한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그 결과, Fig. 2에서와 같이 폐유리를 사용한 OPC 차폐재의 경우 압축강도가 재령 3일, 7일 및 28일에서 각각 71%, 77%, 75%로 낮게 측정되었지만, 폐유리와 킬레이트 수지 0.2%를 혼입한 OPC 차폐재의 경우 각각 83%, 81%, 85% 낮게 측정되어 강도개선에 효과적이었으나 킬레이트 수지 1.0% 혼입한 OPC 차폐재일 때는 재령 3일, 7일 및 28일에서 각각 49%, 60%, 73%로 낮게 측정되었다. 이는 킬레이트 수지가 시멘트 수화물과 매트릭스처럼 화학적 반응을 형성하여 혼입량이 증가할수록 강도 발현에 영향이 있는 것으로 판단되며, 향후 킬레이트 수지의 적정 혼입량에 따른 내구성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한, 폐유리를 혼입하고 BFS30%를 치환한 차폐재에서는 킬레이트 수지의 사용량에 관계없이 OPC 배합보다 압축강도가 높게 측정되었는데 이는 OPC와 킬레이트 수지의 화학적 반

응보다 BFS와 킬레이트 수지와 화학적 반응의 영향이 강도 발현에 영향이 작기 때문으로 판단된다.

3.2 건조수축

킬레이트 수지를 사용하지 않은 차폐재의 건조수축에 따른 길이변화를 Fig. 4에 나타내었다. 측정 결과, 킬레이트 수지를 사용하지 않은 차폐재의 건조수축은 BFS 첨가와 관계없이 재령 7일부터 상대적으로 급격하게 발생하는 것으로 나타났다.

킬레이트 수지를 사용한 차폐재의 건조수축으로 인한 길이변화를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 측정 결과, 킬레이트 수지를 혼입하였을 경우는 혼입하지 않은 경우보다 길이변화가 적게 발생하는 것으로 나타나 킬레이트 수지가 건조수축의 개선에 효과가 있는 것으로 판단된다.

고로슬래그를 혼합한 경우는 품질, 분말도, 분쇄방법 등에 따라 차이가 있지만 보통포틀랜드시멘트에 비해 건조수축이 크게 발생하는 것으로 알려져 있다. 하지만 Fig. 5에서는 같이 킬레이트 수지 0.2%를 혼입하였을 때 OPC의 경우는 449 μ m를 나타내지만 BSF30% 치환 시는 174 μ m이 되어 길이변화가 상대적으로 적게 발생하는 것으로 나타났고, Fig. 5와 Fig. 6의 비교에서는 OPC의 경우 킬레이트 수지 혼입량이 증가할수록 길이변화가 적게 나타나고, BSF30% 치환일 경우에 킬레이트 수지 혼입량에 상관없이 킬레이트 수지를 혼입하지 않은 경우보다 길이변화가 적어 건조수축의 개선에 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 앞서 압축강도에 대한 결과에서와 같이 킬레이트 수지가 결합재 수화물과 매트릭스 구조를 이루어 건조수축에 효과적임을 나타낸다.

3.3 알칼리-실리카반응(ASR)

폐유리를 사용하고 킬레이트 수지를 혼입하지 않은 차폐재의 ASR반응에 따른 길이변화를 Fig. 7에 나타내었다. OPC의 경우, ASR 반응에 의해 재령 4일까지는 팽창률이 ASTM C

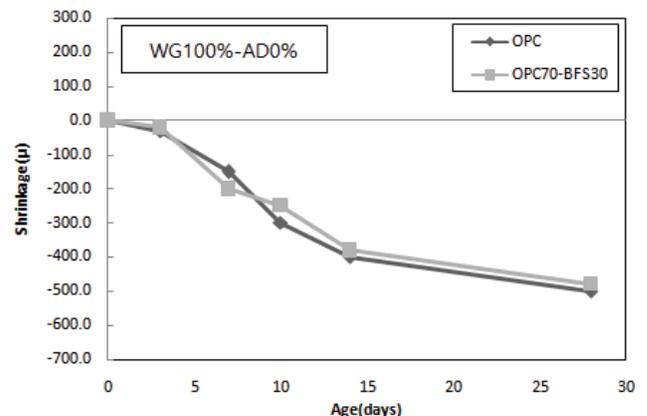


Fig. 4 Shrinkage with age (Non AD)

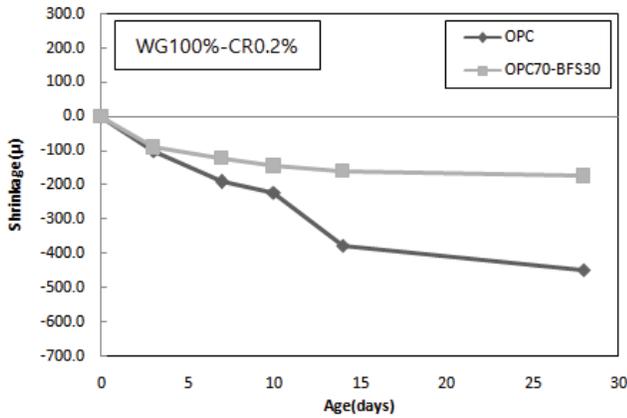


Fig. 5 Shrinkage with age (CR0.2%)

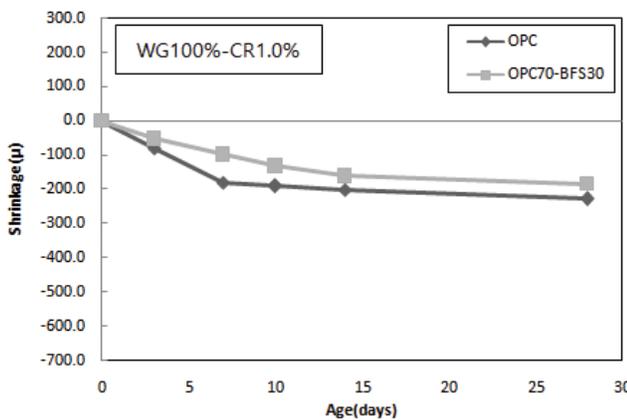


Fig. 6 Shrinkage with age (CR1.0%)

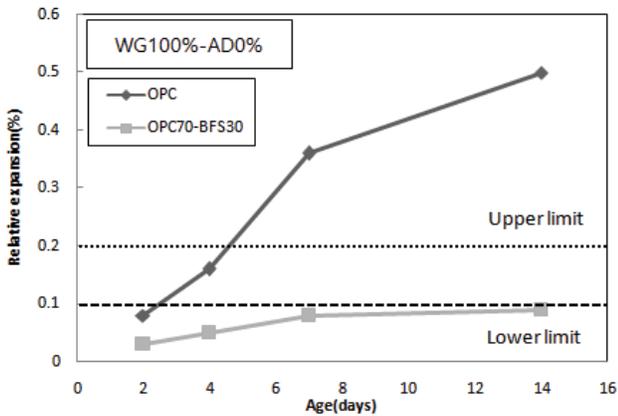


Fig. 7 ASR with age (Non AD)

1260에서 규정하고 있는 0.2% 미만으로 측정되었으나 재령 7일 이후부터는 팽창률이 증가하여 재령 14일에서 0.2% 이상인 0.5%로 나타나 ASR반응으로 인해 유해한 것으로 판단되었다. 그러나, 결합재로 BFS30%를 치환한 시험체의 경우 재령 14일에서도 팽창률 0.1%이하로 나타나 폐유리를 사용하

더라도 ASR반응을 억제할 수 있는 것으로 나타났다.

폐유리와 킬레이트 수지를 사용한 차폐제의 ASR 반응에 의한 길이변화를 Fig. 8와 Fig. 9에 나타내었다. 이들은 Fig. 7과 유사한 경향을 나타내고 있어 킬레이트 수지의 사용은 ASR 반응을 억제하는 데는 효과가 없는 것으로 판단되었다. 즉, 킬레이트 수지의 사용은 실리카반응의 억제를 위한 알칼리 수화물의 저장 또는 폐유리내 반응성 실리카반응의 억제에 효과가 없는 것으로 판단되며, 고로슬래그 미분말을 대체하여 사용하는 것이 시멘트내 알칼리 함량 및 알칼리-실리카 반응성 수화물을 저장하는데 효과적인 것으로 나타나 알칼리-실리카반응의 저감에 가장 양호한 방안으로 사료된다.

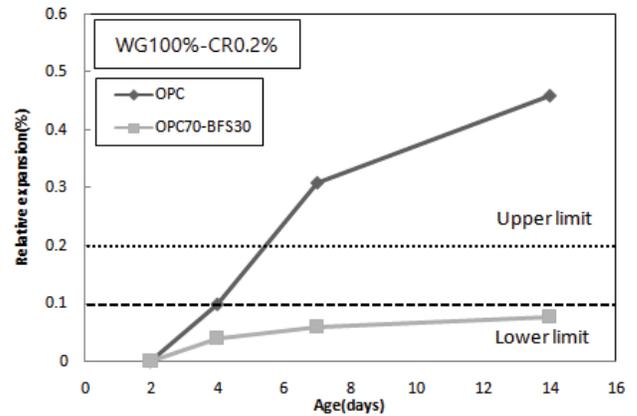


Fig. 8 ASR with age (CR0.2%)

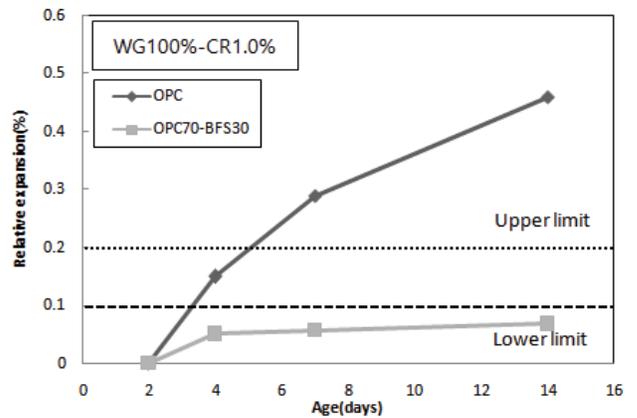


Fig. 9 ASR with age (CR1.0%)

3.4 중금속 용출

폐유리를 사용한 OPC 차폐제의 경우보다 BFS30%를 치환한 차폐제의 경우가 압축강도 증진과 건조수축 및 ASR 반응 저감에 효과적이므로 중금속 용출 시험에서는 BFS30%를 치환한 차폐제에 킬레이트 수지의 혼입량과 중금속 용출 시험 방법에 따른 중금속의 용출여.부를 평가하였다. 또한 이 연구

에서 중금속의 종류로 수은, 납, 카드뮴, 비소, 구리 및 크롬을 선정하였다.

한국 KSLP 시험법에 따른 결과를 Fig.10~Fig.12에 나타내었다. 시험결과, 킬레이트 수지를 사용하지 않고 BFS30%를 치환한 차폐재에서는 납 0.12mg/L와 구리 0.019mg/L가 검출되었고, 킬레이트 수지 0.2%를 사용한 차폐재에서는 납 0.05mg/L와 구리 0.012mg/L가 검출되었으며 킬레이트 수

지 1.0%를 사용한 차폐재에서는 납 0.23mg/L와 구리 0.012mg/L가 검출되었다. 즉, 킬레이트 수지의 사용 여부와 관계없이 이 시험법에서는 모든 경우 허용기준치 (Table 5) 이하를 만족하였다.

미국 ANSI 67-2007a 시험법에 따른 결과는 Fig.13~Fig.15에 나타내었다. 시험결과, pH 10의 경우 모든 시험체에서 구리가 검출되었으나 중금속 용출량이 허용기준치 (Table 5)를 만

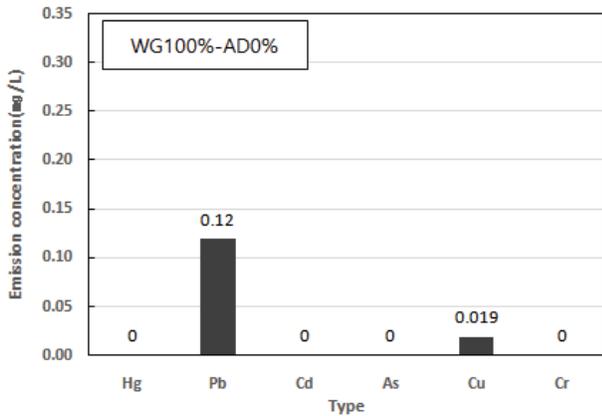


Fig. 10 KSLP method (Non AD)

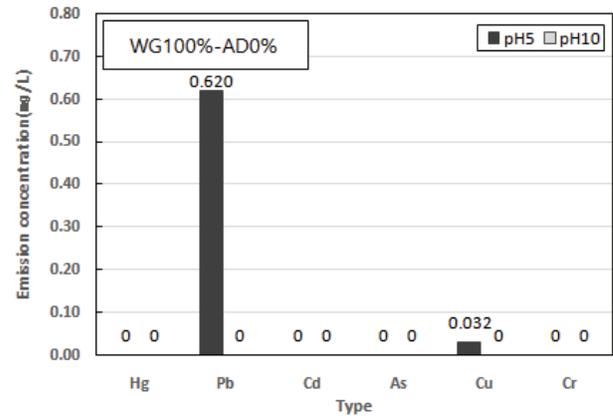


Fig. 13 ANSI 67-2007a method (Non AD)

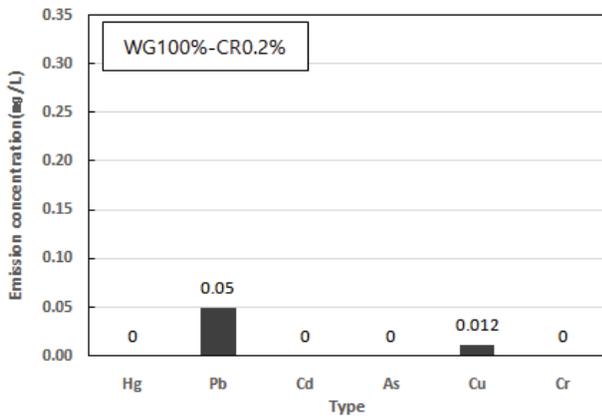


Fig. 11 KSLP method (CR0.2%)

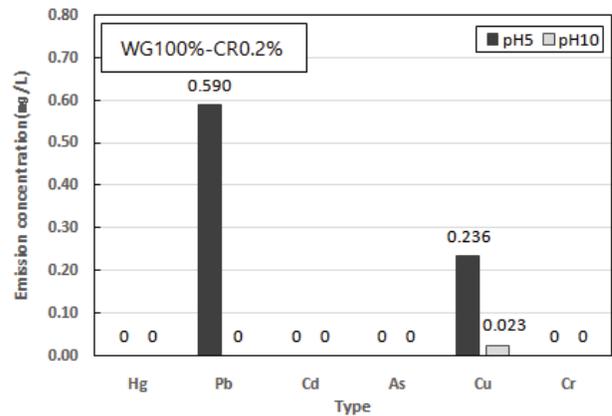


Fig. 14 ANSI 67-2007a method (CR0.2%)

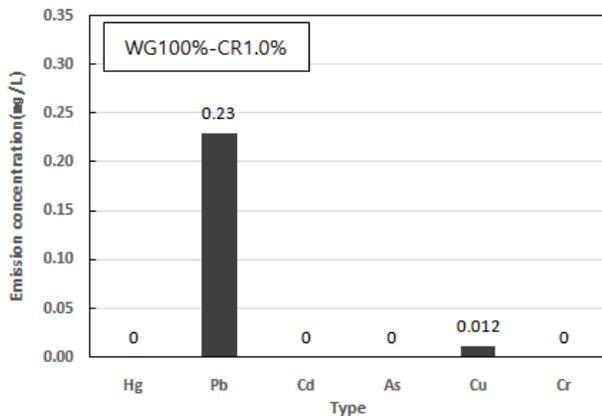


Fig. 12 KSLP method (CR1.0%)

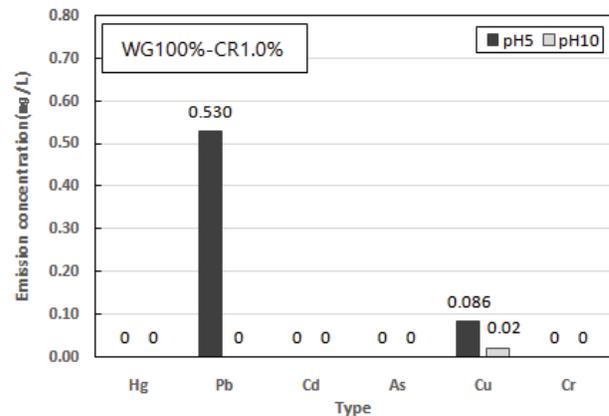


Fig. 15 ANSI 67-2007a method (CR1.0%)

축하였다. 한편 pH 5의 경우 킬레이트 수지를 사용하지 않고 BFS30%를 치환한 차폐재에서는 납 0.62mg/L와 구리 0.032mg/L가 검출되었고 킬레이트 수지 0.2%를 사용한 차폐재에서는 납 0.59mg/L와 구리 0.236mg/L가 검출되었으며 킬레이트 수지 1.0%를 사용한 차폐재에서는 납 0.53mg/L와 구리 0.086mg/L가 검출되어 납을 제외한 모든 중금속이 킬레이트 수지의 사용 여부와 상관없이 허용기준치를 만족하였다. 한편, pH 10의 경우는 pH 5의 경우보다 킬레이트 수지 량에 관계없이 구리가 검출되지 않거나 적은량이 검출되었다.

중금속 용출 시험 결과 한국 KSLP 시험법에서는 폐기물의 중금속 용출 허용 기준치를 만족하였으나, 납의 경우 ANSI 67-2007a 음용수 기준의 중금속 용출이 허용기준치를 초과하여 인체에 해롭거나 환경오염 등의 다양한 사회문제를 야기시킬 우려가 있으므로 추후 중금속 용출을 더 저감할 수 있는 연구를 추가적으로 진행해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 폐유리를 잔골재 및 킬레이트 수지를 사용한 차폐재료로서의 재료특성 및 중금속 용출에 대한 평가를 수행하였다. 그 결과, 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압축강도는 폐유리를 잔골재로 사용하였을 경우 강도 발현에 영향을 있는 것으로 나타났는데 이는 폐유리와 의 부착강도 저하 등에 의한 것으로 판단되었다. OPC 보다 BFS30%에서 압축강도가 상대적으로 높게 측정되어 BFS의 사용에 따른 강도개선 효과가 있는 것으로 판단 된다. 또한, 킬레이트 수지 혼입량이 증가할수록 압축강도가 낮게 측정되었는데 이는 킬레이트 수지가 시멘트 수화물과 매트릭스처럼 화학적 반응을 형성하여 혼입량이 증가할수록 강도 발현에 영향을 미치는 것으로 판단되며, OPC보다 BFS30%에서 압축강도가 높게 측정되었는데 이는 OPC와 킬레이트 수지의 화학적 반응보다 BFS와 킬레이트 수지와 화학적 반응이 강도 발현에 영향을 적게 미치는 것으로 판단된다.
- 2) OPC의 경우 킬레이트 수지 혼입량이 증가할수록 길이 변화가 적게 나타나고, BFS30% 치환의 경우에는 킬레이트 수지 혼입량에 상관없이 킬레이트 수지를 혼입하지 않은 경우보다 길이변화가 적어 킬레이트 수지는 건조수축의 개선에 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 3) 알칼리-실리카반응의 측정결과, 폐유리 사용 시 알칼리-실리카반응이 있는 것으로 확인되었으며 고로슬래그 미분말 사용은 알칼리-실리카반응의 억제에 효과가 있고

킬레이트 수지는 알칼리-실리카반응에 영향을 미치는 않는 것으로 나타났다.

- 4) 한국 KSLP 시험법과 미국 ANSI 67-2007a 시험법에 따라 중금속 용출을 시험한 결과, 한국 KSLP 시험법에서는 중금속 용출 허용 기준치를 모두 만족하였으나, 납의 경우 미국 ANSI 67-2007a의 허용 기준치를 초과하여 이에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 연구는 한국에너지기술평가원 산업기술혁신사업 연구비 지원(20171520101680)에 의해 수행되었습니다.

References

1. 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).
2. Sho, Y. S. (2002), Treatment Method of Waste Ash Included a Heavy Metal, *Korea, Patent 10-0327826-0000* (in Korean).
3. Korea Concrete Institute (2016), Standard Specification Reinforced Concrete Work, Korea Concrete Institute (in Korean).
4. Kim, Y. S., Jeong, Y. J. and Lee, D. U. (2009), Magnesium Sulfate Resistance of Concrete Containing Waste Glass, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 9(3), 109-116 (in Korean).
5. Jung, E. H., Jeong, G. H. (2000), Selectivity of Laccic Acid A-XAD-2 Chelate Resin, *Journal of the Korea Society For Environmental Analysis*, 3(3), 167-170 (in Korean).
6. Lee, H. S. and Lim, H. S. (2012), Development of Radiation Shielding Concrete Utilizing Electronic Arc Furnace Oxidizing Slag, *Review of Architecture and Building Science*, 56(8), 53-60 (in Korean).
7. Kim, T. H., Lee, S. H., Lee, S. S. and Song, H. Y. (2016) Properties of Non-cement Artificial Stone Utilizing the Waste Porcelain and Waste Glass, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 4(2), 136-142 (in Korean).

Received : 12/04/2018

Revised : 12/10/2018

Accepted : 12/14/2018

요 지 : 금속을 함유하고 있는 산업폐자원과 관련한 재활용 기술을 개발하기 위해 다양한 접근이 시도되고 있으며, 그 중에서 유리는 미생물로 분해되지 않기 때문에 매립은 적합하지 않아 폐유리의 재활용에 대한 관심은 증대되고 있다. 따라서 본 논문에서는 폐유리를 잔골재로 사용하고 폐유리의 중금속 용출을 억제하기 위한 킬레이트 수지를 혼입함으로써, 차폐 채움재의 강도, 건조수축, 알칼리-실리카반응, 중금속 용출 등을 평가하여 폐유리를 경제적이며 환경 친화적인 차폐 채움재로서 활용하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다. 시험결과, 폐유리를 잔골재로 사용하였을 경우 강도 발현에 효과적이었으며, 킬레이트 수지를 혼입하였을 경우 강도 발현에 영향이 있는 것으로 나타났다. 또한 킬레이트 수지를 혼입하였을 경우 건조수축의 개선에는 효과적이었으나 알칼리-실리카반응에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 중금속 용출 시험결과, 한국 KSLP 시험법에서는 중금속 용출 허용 기준치를 모두 만족하였으나, 납의 경우 미국 ANSI 67-2007a의 허용 기준치를 초과하여 이에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 폐유리, 킬레이트 수지, 방사선 차폐재, 중금속 용출 저감
