

원전 방사화 폐기물 저감을 위한 저방사화 시멘트의 개발

Development of Low-activation Cement for Decreasing the Activated Waste in Nuclear Power Plant

이빛나¹ · 이종석^{1*} · 민지영¹ · 이장화¹

Binna Lee¹ · Jong-Suk Lee^{1*} · Jiyoung Min¹ · Jang-Hwa Lee¹

(Received June 6, 2017 / Revised September 6, 2017 / Accepted September 6, 2017)

When concrete is exposed to neutron rays for a long time, the concrete tends to become activated. If activated, it is classified as middle or low level radioactive waste. However, the great amount of the activated concrete is hard to dispose. In this study, low-activation cement was developed for decreasing the activated waste from shielding concrete around nuclear reactor. Furthermore, the manufactured low-activation was analyzed with activation nuclide Eu, Co. The low-activation cement showed great advantage for low-activation with detecting none of Eu and 3.75ppm of Co while ordinary portland cement showed 0.4~0.9ppm of Eu, 5.5~19.8ppm of Co content. As the results of physical properties of the low-activation cement, it is similar to type 1 ordinary portland cement and accords with type 4 low heat portland cement. Meanwhile, as for the chemical properties of the cement, it accords with type 1 and 4 at the same time.

키워드 : 방사화, 시멘트, 폐기물, 해체

Keywords : Activation, Cement, Waste, Dismantling

1. 서론

원전 구조물의 차폐대상 방사선의 종류는 α 선, β 선, γ 선 및 중성자 등으로 구분할 수 있으며, 가압경수로형 원전(pressurized-water reactor, PWR)의 경우 차폐 구조체와 관련해서는 감마선(gamma ray)과 중성자(neutron)를 주된 방사선 차폐대상으로 하고 있다. 방사선의 차폐는 차폐물의 밀도와 높은 연관성을 가지며, 차폐물의 밀도가 높을수록 감쇄효과가 높아지게 되므로 일반적으로 고밀도 골재를 사용하는 중량콘크리트를 차폐체로 주로 사용한다. 그러나 방사선 차폐를 목적으로 하는 철근콘크리트 차폐체가 중성자에 오랜 시간 노출될 경우 철근콘크리트 자체가 방사선을 방출하게 되는 방사화(activation)가 발생하게 된다. 이 경우 원전 구조물의 수명 종료 후 폐로시 많은 양의 콘크리트가 방사선 폐기물로 분류되어 폐로비용이 큰 폭으로 증가할 수 밖에 없으며, 또한 방사선 폐기물 저장시설이 부족해 질 수 있는 측면에서 바람직하지 않

다고 할 수 있다.

우리나라에서는 최근 고리원전 1호기가 10년간의 가동연장 후 2017년에 가동중지가 결정되어 상용 원전 최초로 폐로를 앞두고 있다. 아직까지 상용원전의 해체가 이루어진 경험은 없지만 연구용 원자로 1, 2호기에 대한 해체 경험(1호기: 2011~2014년, 2호기: 1997~2008년)을 가지고 있다. 이 중 연구용 원자로의 해체에서 발생한 해체폐기물은 모두 2,580톤이며, 이중 자체처분이 가능한 폐기물은 2,185톤, 방사성 폐기물은 총 해체폐기물의 약 15.3%인 395톤이 발생하였다. 여기서 콘크리트가 차지하는 비중은 약 70%정도인 269톤이 발생하였으며, 콘크리트의 방사화 깊이는 약 250mm 정도로 계산되었다(Park et al. 2009). 소규모 연구용 원자로가 아닌 대형 상용 원자로를 해체할 경우 방사화 콘크리트 폐기물의 양은 훨씬 커지게 되며 이에 따른 막대한 비용과 노력이 소요될 것으로 추정된다.

특히, 시멘트의 경우 시멘트의 원재료에 포함된 코발트(cobalt,

* Corresponding author E-mail: jslee@kict.re.kr

¹한국건설기술연구원 구조융합연구소 (Structural Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil engineering and Building technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

Co)와 유퀴륨(europium, Eu)이 중성자에 의해 방사화가 되는 대표적인 물질이기에 이러한 성분을 최소한으로 포함하는 시멘트를 콘크리트의 결합재로 사용하는 것이 바람직하다. 따라서, 본고에서는 원전의 사용기간 이후 방사성폐기물을 줄이기 위한 저방사화 기술개발을 위하여 원전 구조물의 콘크리트 차폐벽에 사용되는 새로운 저방사화 시멘트를 개발하고자 하였다.

2. 저방사화 시멘트 제조 기술 현황

저방사화 성능은 크게 2가지로 나눌 수 있으며, 첫 번째는 방사화를 일으키는 성분이 적은 시멘트 원재료나 골재를 선별하여 사용하는 것이며, 두 번째는 붕소 등 중성자 차폐에 탁월한 성능을 가진 재료를 사용하여 중성자를 흡수하거나 산란시켜 방사화에 미치는 중성자의 영향을 줄이고자 하는 것이다. 첫 번째 방식의 저방사화 연구는 주로 일본에서 연구가 많이 진행되어져 왔으나, 상대적으로 많은 연구가 이루어지지하는 못하였다. 반면 두 번째 방식의 경우 중성자 차폐성과 더불어 연구를 수행하기 때문에 많은 연구가 진행되어 왔다.

Kinno 등은 시멘트 및 골재 원료가 가지고 있는 핵종을 분석하고 방사화와 밀접한 관련이 있는 Eu와 Co의 함량(ppm)을 방사성 폐기물 처분기준(clearance level, C.L.)을 고려하여 상세히 분석함으로써 저방사화 연구에 대한 체계적인 틀을 제공하였으며, 저방사화에 적합한 골재를 석회암, 규암, 알루미나 세라믹, 규사, 회분광 등으로 규정하였으며, 저방사화에 유리한 시멘트는 백색 포틀랜드 시멘트, 고 알루미나 시멘트임을 입증한 바 있다(Kinno et al, 2002, Kinno et al, 2011). 그러나 지층 조건에 따라 각 암석에 포함되는 Eu와 Co의 함량이 달라지기 때문에 이러한 결과를 국내에 그대로 적용하기에는 어려움이 있을 것으로 보인다.

Gencil 등은 저방사화를 위해 6Li, 10B, 카드뮴(Cd), 가돌리늄(Gd) 등을 중성자 흡수재로서 첨가하는 방법도 고려하였으나, 사용상의 어려움으로 인해 탄화붕소, 붕산 등 붕소화합물을 주로 사용하는 방안을 채택하였다(Gencil et al, 2010).

일본의 쥬쿠마가이구미와 일본원자력연구개발기구는 고가의 붕소함유 저방사화 콘크리트층으로 단일 구조체화 한 경우와 저방사화 콘크리트층-붕소함유 저방사화 콘크리트층-일반 콘크리트층으로 3층 구조체화 한 경우 저방사화 성능을 평가하였다(Sato et al, 2011). 평가 결과 3층 구조체가 단일 구조체에 비해 저렴한 반면 유사한 성능을 보였으며, 또한 붕소함유 저방사화 콘크리트층을 다른 층을 위한 거푸집으로 활용하기 때문에 생산성이 향상되었으며, 시설 해체시 방사능이 높은 영역의 분리과 폐기가 용이

해지는 장점이 있다고 보고하였다.

일본의 후지타 건설은(2011) 붕소화합물을 첨가하여 중성자를 포획하여 저방사화를 시키는 방법과 골재에 저방사화 석회석을 사용하여 중성자에 의한 방사화를 줄일 수 있는 기술을 개발하였다.

한편, 2008년 일본 통산성 지원금으로 실시된 동북대학교의 저방사화 차폐체 개발 연구(2008)에 따르면 알루미나시멘트를 활용한 저방사화 차폐체를 개발하였다(METI, 2008).

이상과 같이 저방사화 시멘트의 경우 주로 일본에서 연구가 진행되어 왔으나, 후쿠시마 원전사고 이후 추가적인 연구가 어려운 상태이며 향후 일본에서 원전 신규건설이 모호한 상태에서 연구결과의 적용 또한 불분명하게 되었다.

국내의 경우 저방사화에 대한 개념 및 정의 등에 대한 연구가 미비한 상황이며, 향후 방사성 폐기물의 저감 등을 위해 저방사화 시멘트에 대한 기반 연구가 필요한 상황이다.

3. 시멘트 및 시멘트 원재료의 방사화 특성 분석

3.1 국내 상용 시멘트의 방사화 특성 분석

콘크리트의 경우 중성자선에 노출되었을 때 방사화되는 성분의 중 대표적 성분인 Co 및 Eu가 주로 시멘트에 포함되어 있기 때문에 시멘트의 성분 중 방사성 핵종(Co 및 Eu 등)을 저감하여 저방사화에 유리하도록 만드는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 사용 시멘트 중에서 주로 많이 사용되는 시멘트를 선별하여 방사화 핵종인 Co 및 Eu를 분석하였다. 또한, 플라이애시 등의 혼화재의 경우 Co 및 Fe 등의 함량이 높아 저방사화에 부적합하다는 기준은

Table 1. Activation nuclide on domestic commercial cements

Types	Co(ppm)	Eu(ppm)
OPC-1	14.170	0.605
OPC-2	9.673	0.573
OPC-3	12.310	0.695
OPC-4	19.850	0.960
OPC-5	8.740	0.580
OPC-6	5.513	0.467
OPC-7	11.330	0.640
OPC-8	12.050	0.640
OPC-9	11.080	0.600
Blast furnace slag type 3 A	0.306	2.878
Blast furnace slag type 3 B	0.323	2.600

현(Lee et al. 2014)을 참조하여 본 연구에서는 제외하였다.

방사화 핵종의 분석은 유도결합플라즈마 발광분광법(inductively coupled plasma-optical emission spectrometer, ICP-OES)을 이용하였으며, 이 방법은 플라즈마 안으로 들어온 시료 내의 원소들에 의해 방출되는 빛을 측정하여 원소를 분석하는 방법으로써 매우 낮은 농도(수 ppb 이하) 수준의 미량 원소까지 분석할 수 있다.

ICP-OES방법에 의하여 Co와 Eu를 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다. 고로슬래그의 경우 Co 함량이 0.3ppm 수준으로 가장 낮으며, 보통포틀랜드시멘트(OPC)는 약 5-20ppm으로 가장 높게 나타났으며, Eu의 경우 보통포틀랜드시멘트는 0.5-0.9ppm이며, 고로슬래그가 2.6-2.9ppm 수준으로 가장 높게 나타났다.

3.2 시멘트 원재료별 방사화 특성 분석

한편, 시멘트를 만들기 위하여 사용되는 원재료의 방사화 물질 분석을 위하여 Fig. 1와 같이 국내 광산의 광물을 지역 및 생성지층 별로 분류한 65개소에서 샘플을 채취하였으며, 일부 광물은 수입 광물을 포함하였다. 방사화 분석 결과는 Tables 2~6과 같으며 자세한 사항은 다음과 같다.

3.2.1 석회석

석회석의 경우, 동일한 석회석 광종이라 할지라도 수급원(산지)에 따라 Co와 Eu의 함량 변화가 매우 크게 났으며, Co의 경우 최소 0.065ppm에서 6.627ppm, Eu의 경우 최소 0.036ppm에서 0.530ppm의 변동성을 보였다.

시멘트 공장에서 고품위 석회석으로 분류된 #1의 경우 Co와 Eu

함량이 0.065ppm, 0.036ppm으로 가장 낮았으며, 옥천계 내 갑산층 대비로 추정되는 충북 및 전남 지역의 석회석 #15의 경우 Eu의 함량은 0.1ppm 이하로 낮았으나 Co의 함량이 6.627ppm 수준으로 높게 나타났다. 방사화 분석 결과 석회석 내 핵종 함량 차이가 매우 크게 나타나 저방사화 시멘트 원료 선정이 매우 중요함을 알 수 있었으며, 분석을 위한 샘플링 위치에 따라서도 차이가 발생할 수 있을 것으로 나타났다.

Table 2. Activation nuclide of limestones

Mineral	No	Co(ppm)	Eu(ppm)
Limestone	L-1	0.065	0.036
	⋮		
	L-7	1.731	0.530
	⋮		
	L-15	6.627	0.092

Table 3. Activation nuclide of silica stones

Mineral	No.	Co(ppm)	Eu(ppm)
Silica stone	S-1	0.120	< 0.1
	S-2	32.360	1.218
	S-3	84.110	0.374
	S-4	< 0.1	< 0.1

Table 4. Activation nuclide of iron ores

Mineral	Types	Co(ppm)	Eu(ppm)
Iron ores	magnetite	206.000	1.160
	hematite	5.360	0.450
	the others	7.680	0.490

Table 5. Activation nuclide of agalmatolites

Mineral	No.	Co(ppm)	Eu(ppm)
Agalma tolite	A-1	11.680 ± 0.080	1.730 ± 0.020
	A-2	13.180 ± 0.129	0.100 ± 0.016
	A-3	40.570 ± 0.231	1.132 ± 0.034
	A-4	63.370 ± 0.279	0.176 ± 0.017

Table 6. Activation nuclide of clay samples

Minerals	No.	Co(ppm)	Eu(ppm)
Zeolite	Z-1	0.78	0.46
	Z-2	2.26	0.71
Diatomite	D-1	1.85	0.58
	D-2	2.92	0.34
Bentonite	B-1	2.68	0.44
	B-2	3.53	0.81
	B-3	3.60	0.76

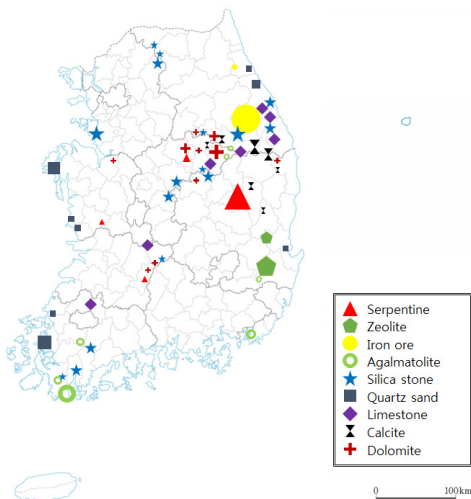


Fig. 1. Map of domestic mine mineral resources

3.2.2 규석

규석의 경우, 중국 및 인도에서 수입된 규석(#1, #4)의 경우 Co와 Eu이 0.1ppm 수준으로 매우 작았으며, 이들의 SiO₂ 함량은 약 98~100%로 순도가 매우 높았다. 반면, 국내 옥천계 및 평안계 지층에서 수급된 규석(#2, 3)의 경우 SiO₂ 함량이 70~94%로 낮았으며, Co 함량이 32,360ppm, 84,110ppm 수준으로 매우 높을 뿐만 아니라, Eu 함량도 석회석 대비 매우 높게 나타났다. 만약 국내에서 규석을 수급하여 시멘트 원재료로 사용할 경우 저방사화 측면에서는 SiO₂의 순도가 높은 것이 불순물의 함량이 적고 이에 따라 Co나 Eu를 함유하고 있을 가능성이 낮기 때문에 유리하다고 판단된다.

3.2.3 철광석

철광석의 경우, 적철광의 Co 함량이 자철광의 Co 함량의 2.6% 수준으로 매우 작게 나타나 저방사화 원재료로서 적철광이 적합함을 확인할 수 있었으며, 기타 철질의 경우 원료에 따라 달라질 수 있어 선별하여 사용할 필요가 있다.

3.2.4 납석

납석의 경우, Co 함량이 11~64ppm으로 평균적으로 높게 나타났으며, 편차가 있지만 Eu도 최대 1,730ppm으로 높게 나타났다. 납석의 경우 변성된 광종으로 다양한 성분이 혼입되어 있기 때문에 Co 및 Eu과 같은 핵종이 생성과정에서 혼입될 가능성이 크기 때문인 것으로 판단되며 Co 함량의 측면에서는 저방사화 재료로 부적합할 것으로 판단된다.

3.2.5 점토류

점토류의 경우, Co 및 Eu 함량이 타 광종보다 적은 수준으로 Co의 경우 0.78~3.60ppm, Eu의 경우 0.44~0.81ppm 정도로 나타났으며, 제올라이트 계열이 상대적으로 낮은 함량을 나타내었다.

본 연구에서 시멘트를 만들기 위하여 사용되는 원재료의 경우 산지 및 지층, 채취시기에 따라 Co 및 Eu의 함량이 다르기 때문에 광물별 편차가 크게 나타난다. 따라서 저방사화 시멘트 제조시 사전 분석 후에 재료를 재취하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

3.3 원료 분쇄 방법에 따른 방사화 물질 저감 검토

시멘트 원료를 분쇄할 때 주로 철제 볼밀을 사용하게 되는데 이때 철제 볼밀로부터 Co가 유입될 가능성이 있다. 따라서, 분쇄법

Table 7. Difference between using steel ball and alumina ball for the mill

Balls for milling	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Eu	Co
Steel balls	11.82 %	2.17 %	0.16 ppm	48.74 ppm
Alumina balls	10.56 %	1.75 %	0.13 ppm	8.70 ppm

에 따른 방사화 유발 원소 함량을 비교하고자 철제 볼밀과 알루미나 볼밀을 사용하여 콘크리트를 분쇄한 시료를 대상으로 핵종 원소인 Eu과 Co, 그리고 이들과 밀접한 관련이 있는 화합물로 보고된 Al₂O₃와 Fe₂O₃ 함량을 비교분석을 실시하였다.

Table 7에서 보면, 일반 철제 볼밀을 사용할 경우 Eu 함량에는 큰 차이가 없었으나 Co 함량이 8.70ppm에서 48.74ppm으로 급격히 증가하였다. 따라서 저방사화 시멘트를 제조할 경우 원료 분쇄 시부터 Eu과 Co 혼입을 저감시키기 위해 알루미나 볼밀 등을 사용하는 노력이 필요할 것으로 판단된다.

4. 저방사화 시멘트 제조 및 분석

4.1 저방사화 시멘트의 제조방법 제안

저방사화 시멘트를 제조함에 있어 주요 핵종인 Co와 Eu의 함량을 저감하는 방향으로 설계하였다.

3.1~3.2절에서 분석한 결과, 시멘트의 원재료별 Eu 및 Co 함량에 있어서 석회석 < 규석 < 슬래그 < 점토류 < 적철광 < (보통포틀랜드시멘트) < 납석 < 자철광의 순으로 나타났다.

Eu와 Co 함량이 가장 작은 광종은 석회석으로 최소 0.1ppm까지 나타났다. 그러나 수급원별 품질 및 핵종 함량의 변동성이 아주 크므로 저방사화용 시멘트 제조를 위하여 균질한 품질 확보가 중요할 것으로 판단된다.

국내산 규석의 경우 Co 함량이 수 십 ppm 수준으로 매우 높게 나타난 반면, 순도가 높은 수입 규석의 경우 Eu과 Co 함량이 0.2 ppm 수준으로 석회석보다 조금 높게 나타나 선별적인 사용이 필요하다고 판단된다.

적철광은 자철광에 비해 저방사화에 적합하나 대표적인 수출 의존성 광물로 국내 수급이 쉽지 않아서 경제성을 고려할 경우 유사 성분의 슬래그 중 방사화 물질이 적게 함유된 것으로 대체할 필요도 있다.

납석은 다양한 성분이 포함된 변성암류 광물로 타 광물에 비하여 Eu과 Co 함량이 높게 나타나므로 저방사화 시멘트 제조시 혼입하지 않아야 한다.

점토류의 경우 전반적으로 높은 방사화 핵종 함량을 보여주지

는 않았지만 종류에 따라 핵종 함량이 차이가 있으며, 제올라이트 계열이 상대적으로 낮은 핵종 함량을 나타내었다. 따라서 선별하여 사용하거나 적절한 슬래그로 대체가 가능할 것으로 판단된다.

따라서 저방사화 결합재를 제조하기 위해 석회석 80%, 규석 10%, 점토질 및 철질 원료 10%로 설계하여 Fig. 2과 같은 방법으로 저방사화 시멘트를 제조하였으며 각 단계별 주요 내용은 다음과 같다.

- 1) 원료: 광물 성분 중 원소가 방사성 동위원소로 변화하는 것을 방지하기 위하여 Co 및 Eu가 최소화된 재료를 사용하며, ‘혼합된 원료’에 함유된 Co, Eu 원소의 함유량 총 합계를 8 ppm 이하로 제한한다.
- 2) 원료 분쇄: 장주기 방사성 동위원소의 친핵종 함유량이 적은 알루미늄 불을 구비한 불밀을 사용한다.
- 3) 소성: 소성 공정에 사용되는 연료는 Co, Eu와 같은 장주기

방사성 동위원소 친핵종 함유량이 적은 등유, 천연가스, 경유 등을 사용한다(KETEP, 2015).

- 4) 클링커 분쇄 : 원료 분쇄와 동일하게 진행한다.

4.2 저방사화 시멘트의 역학적·화학적 특성 분석

제조된 저방사화 시멘트를 대상으로 모르타르 및 콘크리트의 역학적 특성 분석을 수행하였으며 이를 일반 시멘트 및 저발열 시멘트와 비교 분석하였다.

저방사화 시멘트의 역학적 특성 검토 결과를 Table 8에 나타내었으며, KS 규격 내 1종 일반 포틀랜드시멘트(OPC) 기준과 비교시 7일 압축강도를 제외한 나머지 항목은 기준을 충족하였으며, OPC의 7일 압축강도는 22.5MPa이지만, 저방사화 시멘트는 이보다 낮은 19.29MPa였다.

반면, 상용 저열포틀랜드시멘트보다 약간 높은 7일 강도를 나타

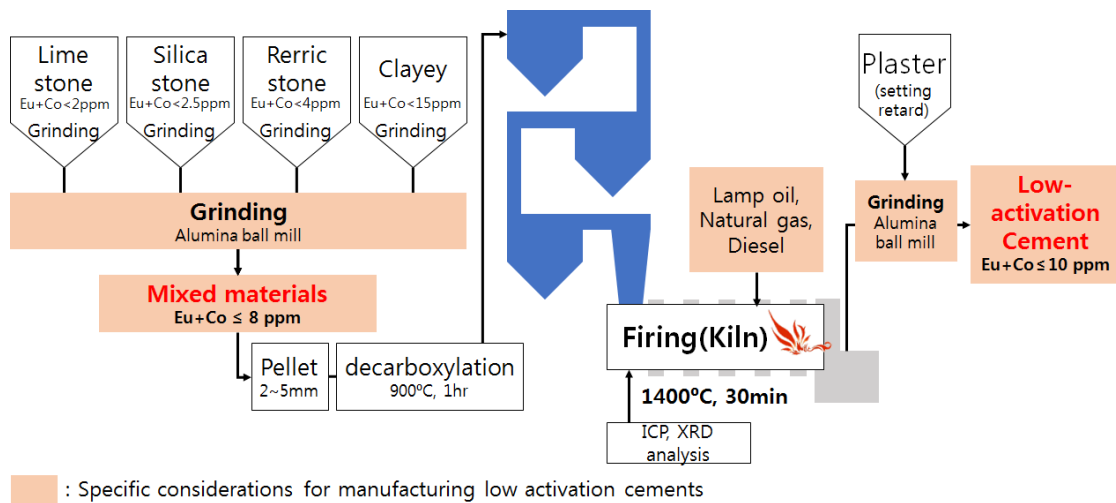


Fig. 2. Manufacturing procedures of low-activation cement

Table 8. Physical properties of low-activation cement

Test items	Units	Type #1 Ordinary portland cement(KS)	Type #4 Low heat portland cement (KS)	Commercial low heat portland cement	Low-activation cement	Remarks	
Specific gravity(20°C)	g/cm ³	-	-	3.21	3.21		
Fineness	cm ² /g	above 2800	above 2800	3170	3820	KS standard	
Stability(%)	%	below 0.8	below 0.8	-	0.08	KS standard	
Porosity(%)	%			-	29.42		
Setting time	Initial	min.	above 01:00	above 01:00	03:05	05:30	KS standard
	Final	hr:min.	below 10:00	below 10:00	05:00	07:30	KS standard
Compressive strength	3day	MPa	-	-	-	10.1	
	7day		above 22.5	7.5	16.9	19.2	KS standard
	28day		above 42.5	22.5	44.6	52.3	KS standard

Table 9. Chemical properties of low-activation cement

Test items	Type #1 Ordinary portland cement(KS)	Type #4 Low heat portland cement (KS)	Commercial low heat portland cement	Low-activation cement	Remarks
SiO ₂	-	-	26.41	26.25	
Al ₂ O ₃	-	-	2.54	3.59	
Fe ₂ O ₃	-	-	2.99	2.17	
CaO	-	-	63.09	64.25	
MgO	below 5.0	below 5.0	0.68	0.70	KS standard
SO ₃	below 3.5	below 3.5	2.30	2.10	KS standard
Na ₂ O	-	-	-	0.20	
K ₂ O	-	-	-	0.35	
C ₃ S	-	-	29.2	28.8	
C ₂ S	-	above 40	56.6	53.5	KS standard
C ₃ A	-	below 6	1.7	5.9	KS standard
C ₃ S + C ₃ A	-	-	30.9	34.7	
C ₄ AF + 2(C ₃ A)	-	-	9.4	18.3	

내었는데 이러한 원인은 저방사화 시멘트가 시판 저열포틀랜드시멘트 보다 Al₂O₃을 높게 함유하고 있기 때문으로 판단된다.

응결시간의 경우 저방사화 시멘트가 초결이 5시간 30분, 종결이 7시간 30분으로 KS 기준인 1종 및 저열 포틀랜드 시멘트의 기준을 만족하였다.

저방사화 시멘트를 저열시멘트의 규격기준과 비교한 경우, 분말도, 안정도, 응결시간, 압축강도 등 모든 항목에서 4종 저열시멘트의 규격에 적절한 값을 나타내었다.

또한 저방사화 시멘트의 화학적 특성 검토 결과를 Table 9에 나타내었으며, 저방사화 시멘트는 상용 저열포틀랜드시멘트보다 C₃A가 높았으며 이러한 원인은 Eu의 함유량을 제한하기 위하여 최소한의 Fe를 함유한 원재료를 사용하였기 때문인 것으로 판단된다.

또한 C₄AF 역시 Fe 사용을 줄여 Eu, Co의 혼입을 억제하기 위함으로 저열포틀랜드시멘트 보다 적은 6%대로 나타났으며, 제조된 저방사화 시멘트는 1종과 4종 시멘트의 규격기준에 적절한 것으로 나타났다.

5. 결론

중성자에 장기간 노출된 콘크리트에서 발생하는 방사화를 줄이기 위한 방법으로 저방사화 시멘트를 개발하였으며, 이에 대한 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 국내 상용 시멘트를 사용한 콘크리트는 방사화 핵종인 Eu와 Co가 많아 저방사화에 불리하였으며, 시멘트의 원재료가 되는 광물

들에 대한 방사화 핵종 분석 결과, 동일 광물에서도 지역적인 편차가 크게 나타나는 것을 확인하여 원재료 선정에 유의할 필요가 있다고 판단된다.

2. 원료 분쇄시 사용되는 볼밀의 경우 철제 볼을 사용할 경우 Co가 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타나 알루미늄 볼밀과 같이 방사화 핵종의 추가 혼입이 없는 볼을 사용할 필요가 있는 것으로 나타났다.
3. 저방사화 시멘트를 제조하기 위한 설계법을 제시하였으며, 이에 따라 제작된 저방사화 시멘트를 분석한 결과, Eu는 검출되지 않았으며, Co는 3.75ppm으로 나타나 보통포틀랜드시멘트 (Eu 0.4~0.9ppm, Co 5.5~19.8ppm)에 비해 저방사화에 매우 유리한 것으로 나타났다.
4. 또한 제조된 저방사화 시멘트의 물리적 특성은 1종 보통포틀랜드시멘트와 유사하였으며, 4종 저열포틀랜드 시멘트의 기준에 부합하는 것으로 나타났으며, 화학적 특성은 1종과 4종 모두에 적절한 것으로 나타났다.

References

Gencil, O., Brostow, W., Ozel, C., Filiz, M. (2010). An investigation on the concrete properties containing colemanite, International Journal of Physical Sciences, **5(3)**, 216–225.

KETEP(Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning). (2015). Technological Developments of Low-acti-

vation and Radiation-shielding Performance of Primary Shield Walls for Nuclear Power Plants 1-69 [in Korean].

Kinno, M., Katayose, N., Ichitsubo, K., Hayashi K., Yamaguchi, K. (2011), Low-activation multilayer shielding structure of light water reactor using various types of low-activation concrete, Nuclear Science and Technology, **1**, 28-31.

Kinno, M., Kimura, K., Nakanura, T. (2002), Raw material for low-activation concrete neutron shields, Journal of Nuclear Science and Technology, **39(12)**, 1275-1280.

Lee, J.S., Min, J., Won, C., Han, S.M. (2014), Formation of raw materials for manufacturing low-activation binding material, Journal of the Korea Concrete Institute, **26(1)**, 399-400 [in Korean].

Ministry of Economy, Trade and Industry(METI). (2008), Innovative and Viable Nuclear Energy Technology (IVNET) Development Project, 1-48.

Park, H.S., Hong, S.B., Lee, K.W., Jung, C.H., Jin, S.I. (2009), A Study of Radiation Distribution for Dismantling a Nuclear Facility, Industrial Survival Strategy for Next Generation Information Technology, **13(2)**, 299-302 [in Korean].

Sato, S., Maegawa, T., Yoshimatsu, K., Sato, K., Nonaka, A., Takakura, K., Ochiai, K., Konno, C. (2011), Development of a low activation concrete shielding wall by multi-layered structure for a fusion reactor, Journal of Nuclear Materials, **417(1-3)**, 1131-1134.

원전 방사화 폐기물 저감을 위한 저방사화 시멘트의 개발

원전 구조물에 주로 사용되는 중량 콘크리트의 경우 중성자에 오랜 시간 노출되면 콘크리트 자체가 방사선을 방출하는 방사화가 발생하게 된다. 이러한 경우 원전 구조물 해체시 많은 양의 방사성 폐기물이 발생되고 이를 처리하기 위한 비용이 큰 폭으로 증가하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 원전 해체시 폐기물의 처리비용을 저감하기 위하여 방사화에 밀접한 관련이 있는 Eu 및 Co를 포함하고 있는 시멘트를 대상으로 저방사화 시멘트를 제작하였다. 또한, 저방사화 시멘트 개발을 위하여 원재료 수급부터 제조방법을 제안하였으며 이를 일반 시멘트 및 저발열 시멘트와 비교 분석하였다. 방사화 분석 결과 Eu는 검출되지 않았으며, Co는 3.75ppm으로 보통포틀랜드 시멘트보다 낮게 측정되었으며, 물리적·화학적 특성 역시 1종 보통포틀랜드 시멘트와 4종 저발열 포틀랜드 시멘트 기준에 부합하는 것으로 나타났다.