

## 방사성폐기물 처분장의 시멘트물질 적용에 관한 기술동향 분석

김진섭, 권상기, 조원진

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150

kverity@kaeri.re.kr

## 1. 서론

고준위폐기물의 저장용량은 일부 원전에서 이미 포화상태이며 다른 원자로의 경우도 조만간 10년 이내로 포화상태에 이를 것으로 전망된다. 더욱이 폐기물 후보부지 선정을 위한 부지조사 및 건설을 위한 소요시간을 고려할 때, 우리나라는 고준위 방사성폐기물처분장의 구체적인 건설계획이 시급한 국면에 처해 있다. 전 세계적으로 방사성폐기물 처분장의 건설에 있어 중저준위 폐기물의 경우 건설 재료의 약 93%가 시멘트 계열의 물질을 주재료로 활용하고 있다. 시멘트 물질을 활용하여 waste packaging, waste immobilization 그리고 waste backfilling의 목적으로 사용하고 있다. 하지만 고준위폐기물의 경우는 처분장 건설 심도가 중저준위 폐기물에 비해 더 깊고 일반적으로 인간생활계로의 노출가능 시간확률을 10만년 이상으로 설정하는 초장기 플랜을 세우고 있기 때문에 시멘트 물질의 사용은 신중을 기해야 하는 딜레마에 있다. 일반적으로 시멘트 물질의 사용은 pH 12.5 이상의 초염기성 상태를 유발하며 이는 완충재로서의 벤토나이트의 거동은 물론 주변 암반의 물리·화학적 거동에 변화를 초래하며, cask 붕괴 시 누출될 수 있는 방사성핵종의 이동특성에도 상당한 영향을 미치게 된다. 하지만 시멘트 물질의 사용 없이 현재의 기술로 고심도 암반조건에 방사성폐기물 처분장과 같은 대규모 지하공동 구간을 건설할 수 있을지는 의문이다. 지금의 수준으로 볼 때 처분터널의 구조적 안정성을 고려하면 시멘트 물질의 사용은 피할 수 없는 대안임을 간과할 수 없다. 따라서 본 논문은 고준위폐기물처분장 내에 시멘트 물질 적용에 관한 관련 기술 선진국들의 연구개발 동향에 대해 살펴보았다.

## 2. 연구개발 동향

본 기술동향 분석은 실제 처분장을 건설하고 있는 핀란드의 ONKALO 터널을 중심으로 스웨덴, 일본 등의 각국 처분장 조건에서의 시멘트 물질 적용현황 및 연구개발 동향에 대해 살펴보았다. Low-pH 시멘트 규정 시 사용되는 설정 기준은  $\text{pH} < 11$  이다. 벤토나이트와 시멘트에 주성분으로 존재하는 규소성분의 pH에 따른 용해도 변화가 수치설정의 가이드라인을 제공한다. 규소성분은 pH 10 이하에서는 용해도의 변화가 거의 없이 일정한 상태를 유지하지만 그 이상에서는 용해도가 현저히 증가되는 현상을 발견할 수 있다. 따라서 폐기물 완충재로서의 벤토나이트 안전성을 위해 pH의 상한선을 설정할 필요가 있다. 물론 pH를 10 이하로 하면 가장 좋으나 현실점에서 경제성이 맞지 않으며, 추가적으로 혼화제의 투입이 필요하여 이들의 안정성 문제가 대두될 가능성이 있기 때문에 pH를 11 이하로 설정하였다.

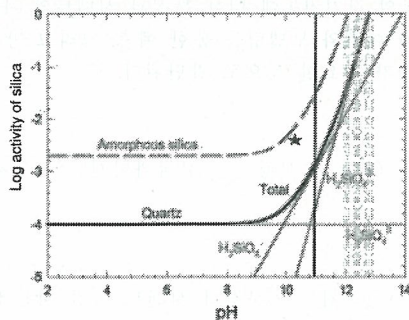


그림. 1 pH에 따른 Bentonite의 용해특성 곡선(Low-pH 시멘트 설정기준)

Low-pH 시멘트 그라우트를 얻기 위해서는 ONKALO의 경우 Ca/Si 비를 0.8 이하로 유지하여야 하며, 전체 건조중량의 약 50% 이상을 포졸란 계열의 대체 혼화제(blending agent)로 투입하여야 한다. 대체 혼화제로는 플라이 애쉬, 고로 슬래그, 그리고 실리카 폼 등이 고려되고 있으며 이 중 실리카 폼이 가장 적

합한 혼화제로 추천되고 있다. 실리카 폼을 콘크리트에 혼합하면 수화열을 저감시키고, 강도발현이 현저하며, 수밀성, 화학저항성 및 내구성을 향상시킬 수 있으므로 고강도 및 고내구성의 콘크리트 제조에 효과적이다. 또한 재료분리와 블리딩이 감소되어 수중콘크리트로서의 활용가치도 크다고 할 수 있다. 다만 이와 같은 포졸란 계열의 실리카 폼 주입은 높은 단위수량을 요구하여 초유동화제의 추가 주입을 필요하며 sulphonated naphthalene formaldehyde를 초유동화제 후보 물질로 고려하고 있다. 그라우트의 경우 일반적으로 fracture size > 0.1mm인 경우에 low-pH 시멘트 계열의 물질을 사용할 예정이며, fracture size < 0.1mm인 조건에서는 silica sol을 사용하여 그라우팅할 계획에 있다.

현재까지 핀란드, 스웨덴, 일본, 캐나다 스페인 등에서 개발된 low-pH 시멘트의 성능은 기존 그라우트 비해 강도가 현저히 증가하였으며, 재료분리 저감, 블리딩현상 감소, 밀도증가로 인한 투수도 감소, 화학적 저항성 증대 및 leachate 저항성 등이 증가하였다. 아래 표 1.에 스위스 NAGRA에서 고려 중에 있는 대표적인 Low-pH 시멘트 제조법을 나타내었다.

Table 1. Low-pH cement grout recipe (Mont Terri, NAGRA)

Components [kg/m <sup>3</sup> ]	LPC	OPC
Water	175	225
CEM I 42.5 N	210	425
Silica Fume(EN 13263)	140	20
- Filter (Quartz sand)		
- Sand 0/1	175	
- Sand 0/4	1,057	1,079
- Gravel 4/8	672	626
Aggregates in total	1,904	1,705
Superplasticizer 'Glenium 51'	7.0	7.65
Air entraining Agents 'Sika Air S'	-	-
Water/Binder ratio [%]	0.50	0.50
Water/Cement ratio [%]	0.83	0.53
Slump (0 min/ 120 min) [mm]	220/160	
Flow table (0 min/120 min) [mm]	500/430	420/
Air content [%]	4.7	2.6
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2,299	2,333

실제 처분장 건설과 관련하여 시멘트 물질의 현장 적용을 위한 실증문제에 대해 활발한 국제 공동연구가 수행되고 있다. EU ESDRED(Engineering Studies and Demonstrations of Repository Designs) Module #4 (Low pH cement for shotcrete and sealing plug construction technology)는 EU의 펀드로 유럽 9개국 13개 기관이 모여 ANDRA의 주도로 2004년 부터 low-pH 시멘트 개발 및 실증 그리고 처분장의 플러깅(plugging)과 rock support 설치를 위한 슛크리트의 full scale 실증관련 연구를 수행하고 있다. 또한 IAEA Coordinated Research Project로 'Behavior of cementitious Materials in Long Term Storage and Disposal of Radioactive Waste'가 수행 중에 있다.

### 3. 결론

고준위폐기물 처분장 건설과 관련하여 low-pH 시멘트 그라우트의 적용을 검토하고 있으며, 이의 개발을 위해 핀란드, 스웨덴, 스위스, 일본 등이 많은 연구를 수행하고 있다. 또한 이의 현장적용 실증을 위해 국제 공동연구가 활발히 진행되고 있다. Low-pH 시멘트 그라우트의 실제 고준위폐기물 처분장 조건에 적용하기 위해서는 low-pH 시멘트의 장기거동에 대한 특징과 시멘트의 pH 감소에 따른 처분시스템에 미치는 영향, 시멘트 강도변화에 대한 이해와 모델링을 통한 예측, 그리고 방사성핵종의 migration/sorption 특성변화 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 사 사

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학기술재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

### REFERENCES

- [1] 김진섭, 권상기, 조원진, “방사성폐기물 처분장의 시멘트 물질 적용에 관한 기술현황 분석보고서”, 한국원자력연구원, KAERI/TR-3696 (2008)
- [2] 권상기, 조원진, “지하처분연구시설에서의 암반 손상대 발생 및 영향평가”, 한국원자력연구원, KAERI/TR-3533 (2008)