

토양폐기물 고정화 특성실험

Immobilization Experiment of Soil Wastes

최영조, 광지훈, 강기두, 신상운
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원

오원진
한국원자력연구소

요 약

한국원자력연구소에서 약 4,500드럼 규모의 토양폐기물을 임시로 보관하고 있다. 이를 안전하게 처리하기 위한 고화기술 개발이 필요함에 따라 시멘트와 폴리머를 선정하여 시험을 수행하였다. 이를 위해 토양폐기물에 시멘트와 폴리머를 적절히 혼합하여 고화시편을 제조하였으며, 저장에 따른 처분기준 만족여부를 평가하기 위하여 압축강도시험과 침출시험을 수행하였다. 폐기물함량이 40%인 시멘트고화체와 65%인 폴리머고화체의 압축강도가 약 5,300psi 로서 유사하였으며, 침출지수는 11 이상으로서 모든 시편에서 기준치를 만족하였다. 고화과정의 균질한 혼합여부와 시편의 다짐상태가 고화체의 건전성에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 감용효과는 폴리머고화체가 시멘트고화체에 비해 20% 정도 우수한 것으로 평가되었다.

Abstract

The amount of 4,500 drums of soil waste are temporarily stored in KAERI. In order to develop a technology for safe treatment of the soil waste, a number of tests were performed by applying cement and polymer as solidifier. Immobilization specimens were adequately made by mixing soil waste with cement or polymer. Compressive strength and leaching tests were performed in order to see the fulfillment to standard of disposal following the storage. A compressive strength, about 5,300psi was obtained from both solidifiers of cement containing 40% of soil waste and polymer containing 60%. The obtained leaching index was larger than 11, which was satisfied with the relevant standard. It was shown that the integrity of the solidified waste much depends on homogenization in solidifying process and hardness of the specimen. Volume reduction of solidified waste with polymer was better than that of cement by 20%.

I. 서 론

국내의 원전 및 각종 원자력 관련시설의 건설, 운영이 증가됨에 따라 사용이 종료되거나 시설 개선 등으로 인해 제염 및 해체가 늘어나고 있는 등 오염된 토양폐기물 발생량이 증가하는 추세에 있어 이를 안전하게 처분하기 위해서는 폐기물 특성에 맞는 고화기술 개발이 필요하다. 한국원

자력연구소에서는 TRIGA연구로 부지에서 발생된 토양과 자체발생 토양폐기물(약 4,500드럼)을 임시 폐기물저장고에 보관하고 있다. 이를 제염하여 환경으로 방출하기 위해서는 물리·화학적인 방법에 의한 제염을 실시한 후 Clearance level 이하의 것은 환경에 영향을 미치지 않도록 방출하고 더 이상 처리하기 어려운 폐기물은 처분기준을 만족하도록 고화하여 처분하여야 한다. 방사능 및 화학물질이 포함된 토양폐기물의 고화기술은 아직까지도 연구단계에 있으며 고화기술 개발은 미미한 상태이다. 오염토양의 처리방법은 오염특성 및 부지상황에 따라 크게 격리, 고화/안정화, 화학적 분리, 물리적 분리 및 유리화로 구분할 수 있다. 세계적으로 오염토양을 처리하기 위한 연구는 주로 제염 및 오염지역의 부지 복원이 대부분인데 원자력관련시설에서 사용 중에 있는 각종 고화기술을 기반으로 국내외에서 사용 또는 개발중인 기술을 조사·분석하여 오염토양에 적용 가능한 최적의 고화기술을 개발하면 저장시설의 저장안정성을 개선할 수 있고 향후 제염, 해체 및 환경복원시 발생이 예상되는 오염토양의 처리에 활용할 수 있을 것으로 전망된다. 따라서 현안인 KAERI에서 임시 보관중인 토양폐기물을 처리하기 위하여 오염물질의 유동성을 제한하는 고화방법으로 널리 사용하고 있는 시멘트와 폴리머를 선정하여 폐기물함량, 압축강도 시험, 침출시험을 통해 토양폐기물에 적합한 매질을 선정하는 시험을 수행하였다.

II. 본 론

1. 고화재

시멘트는 고화공정이 비교적 간단하고 다양한 방사성물질을 수용하며, 상온에서 고화가 가능하고 압축강도가 크며 비용이 저렴한 매질이기에 주 매질로 선정하였으며 이의 비교대상으로 성형성이 좋고 내식, 내화학성이며 방사성폐기물에 대한 함유율이 큰 폴리머를 선정하여 특성시험을 수행하였다. 시험에 사용된 포틀랜드시멘트(IV종)의 화학적인 주요성분과 물리적인 성능을 표 1과 표 2, 폴리머 액상 수지에 대한 사양을 표 3에 나타내었다.

분말도	비표면적(Blaine)cm ³ /g	2,800 이상	
안정도	오토클레이브 팽창도(%)	0.8 이하	
응결시간	길모어시험	초결 (분)	60 이상
		종결(시간)	10 이하
	비이커시험	초결 (분)	45 이상
			375 이하
수화열 (cal/g)	7일	60 이상	
	28일	70 이하	
압축강도 (kgf/cm ³)	7일	75 이상	
	28일	180 이상	

산화제이철(Fe ₂ O ₃)	%	6.5 이하
산화마그네슘(MgO)	%	5.0 이하
C ₃ A 8% 이하일 때	%	2.3 이하
감열 감량	%	2.5 이하
C ₃ S	%	35 이하
C ₂ S	%	40 이하
C ₃ A	%	7 이하

표 1. 포틀랜드시멘트의 화학성분

표 2. 포틀랜드시멘트의 물리적 특성

표 3. 폴리머(액상수지)의 사양

Factor	Polycoat	폴리머
Appearance		Clear-Colorless Liquid
Color(Hazen)		60 Max.
Viscosity(Gardner)		L ~ N
Viscosity(Poise)		3 ~ 4
Gel Time		5 ~ 9
Air Dry		None
Recommended		General Use

* Gel Time at 25 °C : Resin 50 g, 0.6 % Co-Naph 1 ml, 55 % MEKPO 1 g

2. 고화체 제조

고화체 제조절차는 시멘트의 경우 ASTM C192 를 참조하였으며, 28일 동안 상온에서 경화시켜 양생한 후 압축강도와 침출시험을 수행하였다.[1] 폴리머는 2~3일 동안 몰드 속에서 경화시킨 다음 경화가 완료되면 몰드를 제거하고 특성시험 전까지 기밀용기 안에 밀봉하여 보관하였다.[2]

3. 압축강도 및 침출특성 평가

시편을 제조하기에 앞서 매질별 토양폐기물의 최대 함유율을 알아보기 위하여 시멘트와 폴리머 각각 40 %에서 75 %까지 5 % 간격으로 8개를 제조하여 고화체 성형상태를 육안으로 관찰한 결과 시멘트는 60%, 폴리머는 75%에서도 고화체 성형상태는 양호한 것으로 판단되었다. 따라서 토양폐기물과의 함량을 시멘트는 40%, 50%, 60%, 폴리머는 45%, 55%, 65%로 혼합하여 압축강도 및 침출 시험용 시편을 제조하였다. 제조된 시편의 압축강도시험은 ASTM C39[3]에 따라 수행하였고, 침출시험은 ANS 16.1[4]의 방법을 참조하여 침출액을 1일, 7일, 30일, 90일 주기로 교체하여 시편 제작 당시의 초기 방사능농도와 침출액 중의 최종 방사능농도를 감마핵종분석기로 측정·분석하여 침출지수를 산출하였다.

4. 결과 및 논의

가. 압축강도시험 결과

시멘트 고화체의 압축강도는 표 4에서 보는 바와 같이 기준치(압축강도 > 500 psi)를 모두 만족하는 것으로 평가되었다. 시험결과 시멘트고화체 보다 폴리머고화체의 압축강도가 높은 것으로 나타났다으며 폐기물함량이 많을수록(폐기물함량 상한 65 %) 압축강도는 낮아지는 경향을 보였으나 이 경우에도 기준치를 모두 만족시키는 것으로 나타났다. 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 폐기물 함량이 40 %인 시멘트고화체와 65 %인 폴리머고화체의 평균 압축강도가 5,300 psi로서 유사하였다. 압축강도 측면에서만 본다면 폐기물함량 증가에 따른 압축강도 변화비율도 폴리머가 시멘트에 비해 상대적으로 유리한 것으로 평가되었다. 즉 폐기물함량을 10 % 증가시켰을 때 압축강도의 감소비율이 시멘트는 6~32 %, 폴리머는 25~27 %였다.

표 4. 압축강도시험 결과

시편종류	압축강도 (kgf/cm ²)	압축강도 (psi)	평균압축강도 (psi)	시편종류	압축강도 (kgf/cm ²)	압축강도 (psi)	평균압축강도 (psi)
시멘트 (40%)	369	5,250	5,270	폴리머 (45%)	439	6,240	5,636
	372	5,290			341	4,850	
	174	2,470			307	4,370	
시멘트 (50%)	213	3,030	3,590	폴리머 (55%)	171	2,430	7,135
	287	4,080			483	6,870	
	257	3,660			520	7,400	
시멘트 (60%)	268	3,810	3,830	폴리머 (65%)	402	5,720	5,330
	267	3,800			347	4,940	
	273	3,880			187	2,660	

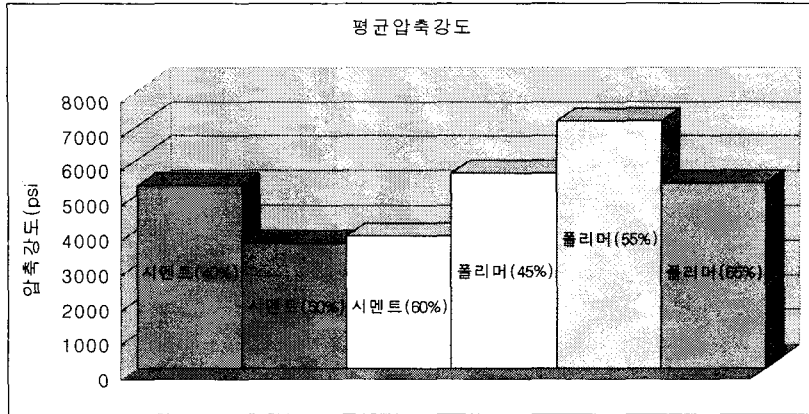


그림 1. 토양폐기물의 평균 압축강도

그림 2는 시편 종류별로 압축강도 결과를 보여주는데, 폐기물함량이 40%인 시멘트고화체 #3와 55%인 폴리머고화체 #1과 65%인 폴리머고화체 #3의 경우 상대적으로 압축강도가 낮음을 알 수 있다. 이러한 현상은 시편 제조과정에서의 불균일한 혼합이 주요 원인이었을 것으로 추정되는데, 특히 폴리머고화체의 경우 폐기물과 고화제의 균일한 혼합이 고화체의 건전성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

나. 침출시험 결과

침출시험 결과는 시멘트고화체나 폴리머고화체의 침출지수 모두 기준치(침출지수>6)를 만족하는 것으로 평가되었다. 그림 3에서 보는 바와 같이 시멘트와 폴리머 모두 1일 경과 후의 침출지수가 가장 낮았으며, 침출기간이 경과할수록 침출지수는 증가하는 경향을 보였는데 이는 침출시험 1일 경과 후의 침출이 상대적으로 많이 일어나는 것에 기인한 것으로 판단된다.

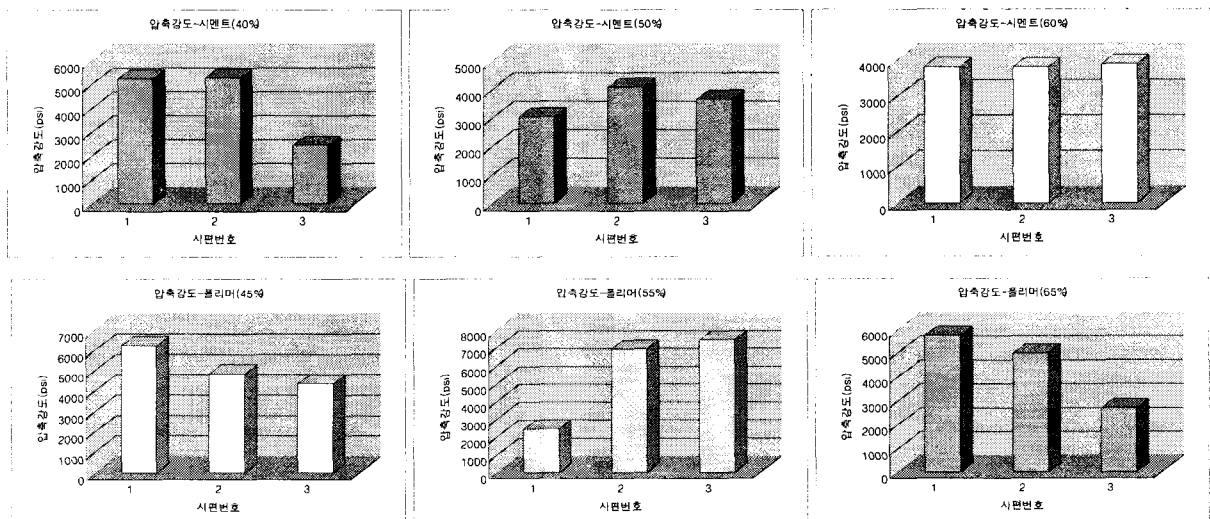


그림 2. 시멘트와 폴리머의 압축강도 시험 결과

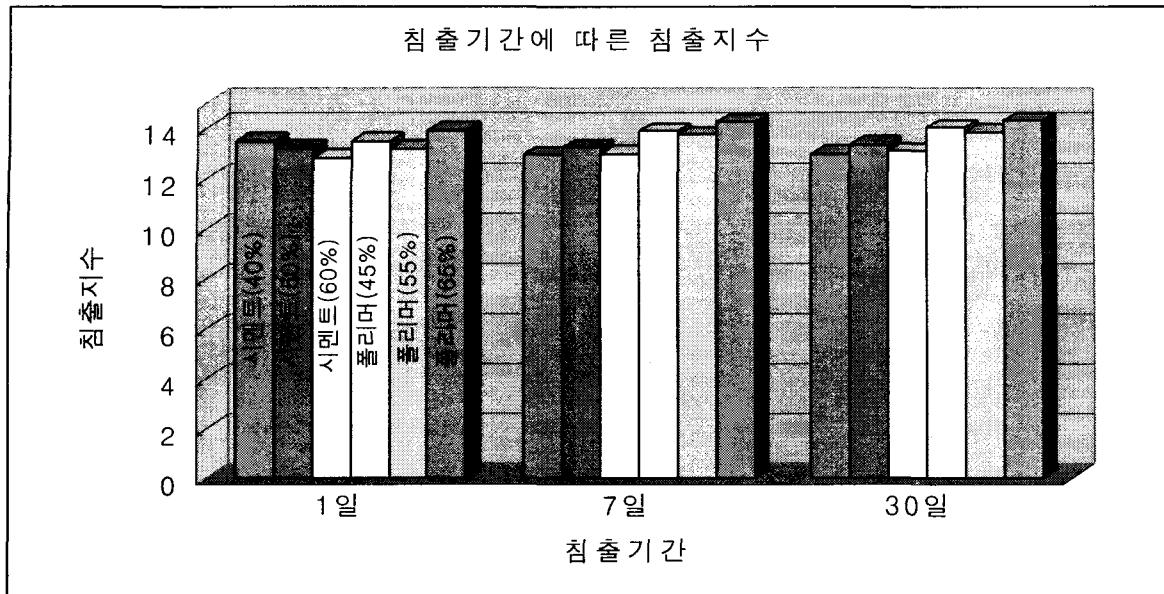


그림 3. 침출기간에 따른 침출지수 추이

표 5. 고화체 침출시험 결과(침출지수)

고화체	⁶⁰ Co			¹³⁷ Cs		
	1일	7일	30일	1일	7일	30일
시멘트(40%)	11.49	11.75	11.97	12.95	12.98	13.10
시멘트(50%)	11.66	11.84	12.13	13.18	13.23	13.36
시멘트(60%)	11.41	11.69	11.89	12.83	12.97	13.08
폴리머(45%)	11.98	12.11	12.24	13.49	13.88	14.01
폴리머(55%)	11.76	12.09	12.21	13.20	13.72	13.83
폴리머(65%)	11.87	11.73	11.84	13.90	14.23	14.30

표 6. 고화체 감용효과 비교

고화체	시멘트(40%)	시멘트(50%)	시멘트(60%)
감용효과 (kg/cm ²)	1,255	1,021	813
고화체	폴리머(45%)	폴리머(55%)	폴리머(65%)
감용효과 (kg/cm ²)	1,375	1,100	894

표 5와 같이 핵종별 침출지수 역시 폴리머 고화체가 높게 나타났으며 ⁶⁰Co 보다는 ¹³⁷Cs의 침출지수가 훨씬 높았다. 특히 폴리머의 경우 토양폐기물의 함량이 많은 시료에서 침출지수가 더 높게 나타났는데, 이는 폐기물함량보다는 고화체 표면의 국부적인 균질성이 오히려 65%를 함유한 시편에서 양호하였기 때문으로 추정된다. 즉 균질한 시편을 제작한다면 65%이상(폴리머) 토양폐기물을 혼합하더라도 침출지수 기준을 충분히 만족시킬 수 있는 것으로 판단된다.

다. 감용효과 비교

토양 1kg을 고화하였을 경우 발생하는 최종 고화체의 단위부피당 질량비는 표 6과 같다. 표 6

에서 알 수 있는 바와 같이 폴리머고화체의 감용효과가 다소 높게 나타났는데 다짐상태에 따라 약 20 % 가량의 차이를 보였다.

III. 결 론

토양폐기물을 대상으로 시멘트와 폴리머 고화재의 고화특성 및 감용효과를 분석하였다. 폐기물 함량 40%인 시멘트고화체와 65%인 폴리머고화체의 압축강도가 모두 5,300 psi 로서 압축강도 기준치(500 psi)를 모두 만족하였으며, 동일한 압축강도 하에서 폐기물함량은 폴리머가 시멘트에 비해 무게비로 약 25% 이상 높았다. 침출지수의 경우 ^{60}Co 에서는 11~12, ^{137}Cs 에서는 12~14로서 모두 기준치인(6) 이상을 만족하였다. 위와 같은 고화체의 특성실험 결과 고화공정에서 폐기물과의 균질한 혼합여부가 압축특성과 침출특성을 좌우하는 중요한 요소가 됨을 알 수 있었다. 또한 감용효과를 분석한 결과 시편 제조 과정에서의 균질한 혼합도 중요하지만 다짐 상태에 따라 감용효과가 상당한 차이를 보이는 것으로 확인되었다.

IV. 참 고 문 헌

- [1] ASTM, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory", ASTM C 192, 2000
- [2] "Solidification of Spent Ion-Exchange Resins in Polymers", ki-hong kim, et al., 1987
- [3] ASTM, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", ASTM C 39, 1996
- [4] ANS, "American National Standard Measurement of the Leachability of Solidified Low-Level Radioactivity Wastes by a Short-Term Test Procedure", ANSI/ANS-16.1, 1986