



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2022년 02월  
석사학위 논문

토양 세척 후 발생하는 처분부적합  
폐기물 처분을 위한 펠릿화 및  
고화체 특성평가 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

안 준 열

토양 세척 후 발생하는 처분부적합  
폐기물 처분을 위한 펠릿화 및  
고화체 특성평가 연구

A study on the pelletization and characterization of  
waste form for disposal of non-conformity waste  
generated after soil washing

2022년 02월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

안 준 열

토양 세척 후 발생하는 처분부적합  
폐기물 처분을 위한 펠릿화 및  
고화체 특성평가 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함

2021년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

안 준 열

## 안준열의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	이 경 진	(인)
위 원	조선대학교	교수	송 종 순	(인)
위 원	조선대학교	교수	정 운 관	(인)

2021년 12월

조선대학교 대학원

## 목 차

ABSTRACT .....	vii
제1장 서론 .....	1
제2장 이론적 배경 .....	3
제1절 방사성 오염 토양의 발생과 처분 .....	3
1. 원전 사고 및 해체 시 발생하는 오염 토양 .....	3
2. 처분부적합 방사성폐기물 .....	4
3. 방사성폐기물 처분 관련 규정 .....	4
제2절 방사성 오염 토양의 제염 및 처리 방법 .....	9
1. 방사성폐기물 제염 방법 .....	9
2. 방사성폐기물 처리 방법 .....	13
제3절 응집제를 적용한 토양세척 공정 .....	17
1. 토양세척 공정의 개념 .....	17
2. 토양세척 공정의 구성요소 .....	17
제4절 분말상의 방사성폐기물 감용화 기술 .....	19
1. Roll compaction의 특징 .....	19
2. Roll compaction의 주요인자 .....	20
3. Roll compaction 장치 .....	21
제3장 실험재료 및 실험방법 .....	23
제1절 실험재료 .....	23
1. 토양시료 .....	23
2. 응집제 .....	24

3. 폴리머 .....	25
제2절 실험 전처리 및 방법 .....	26
1. 모의 방사성 오염토양의 제조 .....	26
2. 토양 분말의 펠렛화 .....	28
3. 폴리머 고화체 제작 및 특성평가 .....	33
제4장 연구결과 .....	41
제1절 토양 분말의 펠렛화 결과 .....	41
1. 제조된 오염토양 펠렛의 상태 .....	41
2. 펠렛의 압축강도 측정 결과 .....	42
3. 펠렛의 감용비 평가 .....	43
제2절 폴리머 고화체 제작 결과 .....	44
1. 제조된 폴리머 고화체의 상태 .....	44
2. 펠렛 고화체의 감용비 평가 .....	45
제3절 폴리머 고화체 특성평가 결과 .....	47
1. 압축강도 시험 .....	47
2. 열순환 시험 .....	48
3. 방사선조사 시험 .....	49
4. 침수시험 .....	50
5. 침출시험 .....	51
6. 폴리머 고화체의 특성평가 요약 .....	59
제5장 결론 및 제안 .....	61
참고문헌 .....	62

## 표 목차

표 1. 방사성 핵종별 처분농도 제한치 .....	5
표 2. 폐기물 특성기준 .....	5
표 3. 폐기물 고화체 시험기준 .....	8
표 4. 폐기물 고화체 시험요건 및 판정기준 .....	8
표 5. 미국의 토양세척법 실제 사례 .....	10
표 6. 방사성폐기물 고화공정과 고화체의 비교 .....	14
표 7. Roll compaction의 주요 인자 .....	21
표 8. 연구용 성형장치의 주요 사양 .....	22
표 9. 체 진동기의 사양 .....	24
표 10. 응집제의 구성 성분 .....	24
표 11. 토양시료와 모의 방사성 오염토양의 화학조성 .....	26
표 12. 압축성 측정 결과 .....	29
표 13. LGE 첨가량에 따른 주제의 점도 변화 .....	34
표 14. 압축강도 시험장치의 사양 .....	36
표 15. 방사선조사 시험 조건 .....	38
표 16. 화학종의 초기 농도 .....	39
표 17. 펠렛의 압축강도 측정 결과 .....	42
표 18. 분말기준 감용비 측정 결과 .....	43
표 19. 고화체 기준 감용비 측정 결과 .....	46
표 20. 각 고화체의 압축강도 측정결과 .....	47
표 21. 열순환 시험 전, 후의 각 시험시편별 제원, 부피 및 무게 변화율 .....	48
표 22. 각 고화체의 열순환 시험 후 압축강도 측정 결과 .....	49
표 23. 방사선조사 시험 전, 후의 각 시험시편별 제원, 부피 및 무게 변화율 .....	49
표 24. 각 고화체의 방사선조사 시험 후 압축강도 측정 결과 .....	50
표 25. 침수 시험 전, 후의 각 시험시편별 제원, 부피 및 무게 변화율 .....	50



표 26. 각 고화체의 침수시험 후 압축강도 측정 결과 .....	51
표 27. 침출 시험 후의 각 시험시편별 제원, 부피 및 무게 변화율 .....	52
표 28. 침출 시험 후의 교체된 침출액의 pH 및 EC(전기전도도) 측정결과	53
표 29. 침출수 교체시 침출액의 화학종 농도(J-19) .....	54
표 30. 침출수 교체시 침출액의 화학종 농도(J-20) .....	55
표 31. 화학종 별 평균 침출 지수 .....	56
표 32. 침출지수 계산(J-19) .....	57
표 33. 침출지수 계산(J-20) .....	58
표 34. 특성평가 시험 후 고화체의 합격유무 판정 .....	59

## 그림 목차

그림 1. 방사성 오염토양의 제염방법 .....	9
그림 2. 방사성폐기물 처리방법 .....	13
그림 3. 토양세척법의 공정도 .....	17
그림 4. 오염토양 제염 기본 공정도 구성 .....	18
그림 5. 롤 컴팩션(Roll compaction) 개념도 .....	19
그림 6. 펠렛 성형장치의 측면도와 각부 명칭 .....	21
그림 7. 펠렛 성형장치의 롤 설계도 .....	22
그림 8. 성형 펠렛의 형태와 크기 .....	22
그림 9. 입도별 토양시료 .....	23
그림 10. 체 진동기의 모습 .....	24
그림 11. 온도에 따른 YD-128의 점도 변화 .....	25
그림 12. 토양 38 $\mu\text{m}$ 미만(a), J-AF(b), 모의 방사성 오염토양(c)의 SEM 분석 결과	27
그림 13. 압력변화에 따른 모의 오염토양 시료의 압축성 실험 .....	29
그림 14. (a) Roll compaction 장치의 개념도, (b) 토양 펠렛의 모습 .....	30
그림 15. 롤 회전속도에 따른 펠렛의 밀도 변화 .....	30
그림 16. 분말공급속도에 따른 펠렛의 밀도변화 .....	31
그림 17. 압축강도 측정용 지그 모습 .....	32
그림 18. 폴리머 고화체 제작 과정 .....	33
그림 19. 60 $^{\circ}\text{C}$ 의 항온조 내에서 경화모습 .....	35
그림 20. 60 $^{\circ}\text{C}$ 항온조에서 경화시간에 따른 고화체 발열온도 측정 .....	35
그림 21. 열순환 시험의 1사이클에 대한 시간, 온도 변화 .....	37
그림 22. 침수용기 설계도 및 개념도 .....	37
그림 23. 침수시험 시작(좌) 및 종료(우) 후 모습 .....	38
그림 24. (a) 침출용기 설계도, (b) 침출시험 개념도 .....	39
그림 25. 침출수 교체 및 침출액의 pH 및 Conductivity 측정 .....	40

그림 26. Roll compactor를 이용한 펠릿 제조 모습 .....	41
그림 27. 제조된 펠릿 모습. 일반 펠릿(좌), 침출용 펠릿(우) .....	41
그림 28. 제조된 고화체 모습 .....	44
그림 29. 고화체 표면처리 후 최상단 부위 모습 .....	45
그림 30. 압축강도 측정 전(좌), 후(우) 고화체의 모습 .....	47
그림 31. 열순환 시험 후 고화체 모습(좌) 및 압축강도 측정 후 모습(우) .....	48
그림 32. 방사선조사 시험 후 모습(좌) 및 압축강도 측정 후 모습(우) .....	49
그림 33. 침수시험 후 고화체 모습(좌) 및 압축강도 측정 후 모습(우) .....	51
그림 34. 침출시험을 위한 시험시편 .....	52
그림 35. 침출액 내 화학종 분석 장치 .....	52
그림 36. 침출 시험 후의 고화체 시편 .....	52
그림 37. 침출액 교체에 따른 침출액의 pH .....	53
그림 38. 침출수 교체에 따른 침출액의 conductivity .....	54
그림 39. J-19, J-20의 누적 침출지수 그래프 .....	56
그림 40. 특성평가 후 고화체 압축강도 측정결과 .....	60
그림 41. 침출시험 후 누적침출지수 결과 .....	60

## ABSTRACT

A study on the Pelletization and characterization of waste form for disposal of non-conformity waste generated after soil washing

An JunYeol

Advisor : Prof. Jongsoon Song, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

In the event of a nuclear power plant accident and decommissioning, radioactive materials are released into the atmosphere and soil, which can contaminate the soil in a wide area. In particular, in the case of nuclear accidents, nuclides such as Cs-137, I-131, etc. are vaporized and released to the atmosphere, and radioactive clouds are formed through insulation expansion. At this time, soil contamination in the wide area occurs through precipitation. Technologies that can be applied to decontaminate radioactive materials such as cesium from contaminated soil can be largely classified into soil washing, copper, integrated technology, and other methods (natural reduction, plant cultivation, soil cultivation, etc.). And soil washing methods can be roughly classified

into simple physical methods such as soil flushing and chemical extraction (acid, chelate, surfactant, Redox agents, etc.).

Among these methods, the technology that can be applied to urgent situations is judged to be the soil washing method. The soil washing method is highly utilized because it can be used for a short period of time. However, it has the disadvantage of generating secondary waste in sludge/slurry condition. In the case of drying them, they are classified as non-conforming waste because they have liquidity and cannot be disposed of in the disposal site as they are. Therefore, in order to dispose of them, it must be converted into waste form stabilized with an appropriate solidification agent accordance with the regulations of the disposition site. Therefore, we studied how to reduce the volume of contaminated-soil generated from the decontamination process using a flocculating agent (J-AF), and how to solidify the pellets to solidified waste forms which improved leaching resistance and high mechanical integrity. To this end, we manufactured simulated contaminated-soil, derived the optimum operation conditions(roll speed, hydraulic pressure and feeding rate) to form pellets with roll compactor, and solidified those pellets using epoxy resin.

Pellets, strength above 5 MPa, were formed in the optimum conditions(1.5 rpm of roll speed, 28.44 MPa of hydraulic pressure, 20 rpm of feeding rate). The volume reduction ratio was 1/3.9 ~ 1/3.5 on pellets, 1/1.1 on solidified waste form. Through the characterization(compressive strength, thermal cycling, immersion, irradiation, leach test) of polymer waste forms, we confirmed that all polymer waste forms incorporated fine contaminated-soil met the national regulation and WAC of disposal site. The leach index were above 8.1.

## 제1장 서론

원전 사고 및 해체 시 방사성물질은 대기 및 토양으로 방출되어 광역의 토양을 오염시킬 수 있다. 특히 원전 사고의 경우 Cs-137, I-131 등의 핵종들이 기화되어 대기에 방출되고 단열팽창을 통해 방사성 구름이 형성된다. 이때 강수를 통해 광역의 토양오염이 발생하게 된다. 광역의 토양오염 사례를 살펴보면 대표적으로 체르노빌과 후쿠시마 원전 사고가 있다. 1986년 체르노빌 원전 사고로 인해 약 20만 km<sup>2</sup>에 이르는 지역이 방사성 세슘으로 오염되었다 [1]. 그리고 2011년 후쿠시마 원전 사고 시 원자로건물에서 수소가스의 폭발로 인하여 넓은 범위에 걸쳐 토양이 오염되었으며, 제염을 위하여 수집된 오염토양의 양은 정확한 산정은 어렵지만 약 14 km<sup>2</sup>정도로 보고되어 있다 [2]. 이들을 제염한 후 방사성 세슘이 농축된 토양은 일정 기간동안 임시 저장하여 처분되어질 것이다. 또한 원전 해체 시에도 예기치 못하게 토양오염이 발생할 수 있으며, 대표적인 사례로는 Connecticut Yankee 원전이 있다. Connecticut Yankee 원전은 1979년 방사성 액체와 증기가 1차 환기 장치 쪽에서 유출되어 토양오염이 대량으로 발생하였으며, 이로 인해 해체공정이 지연되었다[3].

이와 같이 원전 사고 및 해체에 의하여 오염토양은 상당량이 발생되기 때문에 이들을 직접 처분장에 처분하는 것은 비경제적이므로 최대한 감용할 목적으로 제염을 실시하게 된다. 오염토양의 제염 후, 처분 규제치 이하의 토양은 자체처분을 통해 환경으로 복원시키고, 처분규제치 이상(극저준위 이상)의 오염토양은 영구처분하는 것이 바람직할 것이다.

오염토양으로부터 세슘 등의 방사성물질을 제염하기 위해 적용할 수 있는 기술로는 크게 토양세척법, 동전기법, 앞의 연계 병용법(Integrated Technology) 및 기타 방법(자연저감, 식물재배, 토양경작법 등)으로 분류할 수가 있다. 그리고 토양세척법은 단순 물리적 방법인 토양세정법(Soil Washing)과 화학적 추출법(Chemical Extraction ; 산, 킬레이트,

계면활성제, Redox agents 등)으로 대별할 수가 있다. 산업통상자원부 결과보고서[4]에 의하면 기술의 적용성(오염토양의 양, 처리속도, 현장 활용성 등), 경제성 및 환경 복원성 등을 고려하여 토양세척법이 가장 적합하다고 하였다. 이 기술은 단기간의 토양제염이 가능하고 활용도가 높은 반면에 슬러지/슬러리 상태의 2차 폐기물이 발생한다는 단점을 갖고 있다. 이들을 건조하는 경우 유동성을 갖고 있기때문에 처분장에 바로 처분할 수 없으며, 이로인해 처분부적합 폐기물로 분류되어진다. 따라서 이들을 처분하기 위해서는 처분장 규정에 부합될수있도록 적절한 고화매질로 안정화 시킬 수 있다. 보통 모든 방사성폐기물의 처분을 위하여서는 처분인수조건에 부합되게 고화매질로 고화하게 되는데 재래식 기술로는 고화로 인하여 초기의 방사성폐기물의 부피보다 증가하는데 시멘트의 경우는 최대 초기부피의 5 ~6 배로 증가되는 것으로 알려져 있다[5]. 따라서 본 연구에서는 초기의 방사성폐기물 부피 이하로 줄이면서 고건전성, 내침출율을 갖는 감용화 기술에 따른 최적의 고화기술을 도출하고자 하였다.

먼저, 모의오염토양은 0.1 mmol/L 세슘수용액( $CsNO_3$ )에 38  $\mu m$  미만 토양과 J-AF 응집제(Jeon Tech.Co.,Ltd)를 1:0.1 비율로 교반하여 제조하였다. 이후 모의 시료를 열풍건조기 내에서 48시간 동안 건조하여, 수분함유도를 약 7 % 수준으로 조절하였다. 건조된 오염토양은 유동성을 갖고 있으므로 비유동성을 갖으면서 부피감용화가 이루어지도록 롤 컴팩터를 이용하여 일정한 크기의 펠렛으로 성형되도록 하였다. 이때, 최적의 성형조건을 도출하기 위해 롤의 회전속도, 성형압축력, 분말의 공급속도를 달리해 실험하였다. 성형된 펠렛의 건전성을 평가하기 위하여 압축강도를 측정하였으며, 분말의 펠렛화에 따른 부피감용 정도를 평가하기도 하였다. 이어서 고화체 몰드에 펠렛을 충전시키고 폴리머를 주입하여 고화를 수행하였다. 최종적으로, 펠렛이 함유된 폴리머 고화체를 대상으로 압축강도, 열순환, 침수, 침출 시험을 수행하였다. 특성평가를 통해 고화체의 구조적 안정성을 평가하였으며, 해당 결과를 종합해 국내 처분장 인수기준에 대한 충족 여부를 평가하였다.

## 제2장 이론적 배경

### 제1절 방사성 오염토양의 발생과 처분

#### 1. 원전 사고 및 해체 시 발생하는 오염 토양

오염토양의 발생은 원전부지 외에서는 원전 사고, 그리고 원전부지 내에서는 방사성 액체폐기물의 관리소홀, 원전의 해체 및 해체폐기물의 부주의한 관리 등에 기인한다. 원자력발전소 사고 시 세슘(Cs), 아이오딘(I), 스트론튬(Sr) 등의 다양한 핵분열성 방사성물질들이 자연 대기환경으로 방출된다. 이들은 구름 등에 부착되어 방사성 낙진으로서 지표면에 떨어지게 되며, 이로 인해 광역의 토양오염이 발생한다. 누출된 방사성 핵종들 중에서 감마선을 방출하고 반감기가 다른 물질들에 비해 30년으로 긴 세슘이 가장 위험하다. 세슘은 비점(670 °C)이 매우 낮아 원전 사고 및 해체시 증기형태로 누출되며, 비금속 물질과 결합하여 수용성 화합물을 쉽게 형성하는 등의 화학적 반응성이 매우 높다. 그리고 세슘은 자연환경에 유출되었을 때 토양에 강하게 흡착하게 되는데, 38 μm 이하의 미세토양에 가장 많이 흡착되어 있다고 알려져 있다[6].

광역의 오염토양이 발생한 대표적인 사례로는 체르노빌과 후쿠시마 원전 사고가 있다. 1986년에 발생한 체르노빌 원전 사고로 인해 대량의 방사성핵종이 광역으로 유출되었다. 이러한 유출된 기체가 거대하게 이동하는 가운데 비가 오면서 광역의 토양이 오염되었다. 이로 인해 유럽의 약 20만 km<sup>2</sup>에 이르는 지역이 방사선 세슘으로 오염이 되었다. 또한, 2011년에 발생한 일본 후쿠시마 원전 사고시 방출된 방사성 세슘은 광역의 토양을 오염시켰으며, 그 양은 산정하기 어려우나 제염을 위하여 수집된 오염토양의 양은 대략 약 14 km<sup>2</sup> 정도로 보고되어 있다.

원자력발전소 운영과 해체 시에도 오염토양이 발생할 수 있다. 주로 원전



운영시 방사성 액체의 누수와 액체폐기물의 관리 소홀, 원전 해체시 해체폐기물 보관 등의 관리 소홀에 기인하는 것으로 판단된다. 오염토양의 발생량은 폐기물 감용화에 대한 기술기준, 토양(부지)내 잔류방사능 기준(부지 개방기준), 유해폐기물 처리기준 등에 의해 크게 영향을 받을 것으로 생각된다.

## 2. 처분부적합 방사성폐기물

처분부적합 방사성폐기물은 원자력발전소 운영 또는 해체과정에서 발생하는 폐기물로서, 발생한 상태로는 처분이 불가능하기 때문에 폐기물을 안정화시킬 목적으로 전처리, 처리, 고화 및 특수 포장이 요구되는 폐기물이라 할 수 있다. 대표적으로 유동 및 분산 특성을 갖는 액상 또는 입자상 방사성폐기물이 있다. 입자상 폐기물은 원전 운영과정에서 발생하는 농축폐액 또는 그의 건조 분말, 슬러리와 슬러지, 그리고 원전 해체과정에서 발생하는 분말 상의 폐기물, 그리고 제염이 용이치 않은 미세크기의 방사성 오염토양 등이 있다. 따라서 이들 입자상 물질들은 반드시 비분산성이 되도록 처리 후 포장되어야 하므로, 시멘트 또는 폴리머 등의 고화매질을 사용하여 고화 처리되어야 한다. 이처럼 고화처리 할 경우에는 방사성 분말들을 유동성 및 분산성이 없도록 안정화시키기 위하여 고화매질로 둘러싸야하기 때문에 고화처리 후 최종 처분되는 방사성고화체의 부피는 증가하게 된다. 이로 인해 처리, 분비용의 증가와 처분장의 수용량을 빠르게 포화시키는 결과를 야기시킬 수 있게 된다.

## 3. 방사성폐기물 처분 관련 규정

### 가. 중·저준위 방사성폐기물 인도규정 [7]

원자력안전위원회고시 제2020-11호 ‘중·저준위 방사성폐기물 인도규정’

에서는 폐기물 내에 포함되어있는 핵종들의 방사선 특성 및 방사성폐기물 포장물의 구조적 건전성에 관한 규정이 기술되어있다. 그리고 표 1은 처분농도 제한치로 폐기물 분류기준의 범위 내에서 처분시설에 처분할 수 있는 방사성 핵종별 방사능 농도의 상한값을 나타내었다.

표 1. 방사성 핵종별 처분농도 제한치

핵 종	처분 농도제한치 (Bq/g)
H-3	1.11E+6
C-14	2.22E+5
Co-60	3.70E+7
Ni-59	7.40E+4
Ni-63	1.11E+7
Sr-90	7.40E+4
Nb-94	1.11E+2
Tc-99	1.11E+3
I-129	3.70E+1
Cs-137	1.11E+6
전알파	3.70E+3

## 나. 원자력환경공단(KORAD) 인수기준 [7]

표 2에 경주처분장에 처분되어지기 위한 폐기물의 중요한 처분 요구사항들을 요약하여 나타내었다. 따라서 모든 폐기물을 처분하기 위하여서는 이들 요구사항들을 충족시키거나, 충족되도록 처리 및 고화되어져야 한다.

표 2. 폐기물 특성기준[7]

구분	소분류	특성기준
일반 요건	폐기물 형태	폐기물은 취급 시와 처분 후 안전성을 확보할 수 있도록 고체 형태 이어야하며, 물리·화학적으로 안정하고, 유동성이 없어야함
	포장, 포장용기	- 총 방사능량, 고유번호, 폐기물 발생일자 및 발생장소, 표면선량을 등의 주요 정보를 읽기 쉽고 내구성이 있도록 표시 - 취급, 운반 및 처분설비에 적합하게 표준화되어야 하며, 크레

		<p>인과 지게차 사용이 용이하도록 제작, 폐기물을 담는 용기는 사전에 운영자 승인 받아야함</p>
	<p>규격 제한 (중량, 크기 등)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 콘크리트 포장물의 경우 10톤 이하, 강재드럼 포장물은 1톤 이하</li> <li>- 폐기물 포장물의 단위크기 최소 0.5 m(L)×0.5 m(W)×0.8 m(H), 0.5 m(D)×0.8 m(H) 이상이어야 하고 최대 1.5 m(L)×1.5 m(W)×1.5 m(H), 1.5 m(D)×1.5 m(H) 이하</li> </ul>
고형화 요건	고형화	<p>균질폐기물(농축폐액, 폐수지, 슬러지 등)은 고형화해야 하며, 유동성이 있는 폐기물을 고형화 하는 경우, 유동성 폐기물은 균질하게 고형화</p>
	고정화	<p>비균질폐기물(폐필터 및 잡고체 등) 중 반감기가 20년 이상인 핵종의 총 방사능 농도가 74,000 Bq/g(2 μCi/g) 이상인 경우 고정화해야 하며, 고정화 재료는 안전성이 입증된 물질 사용</p>
방사선적 요건	핵종 및 방사능 농도	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 폐기물 포장물에 포함되어있는 전체 방사능량의 95% 이상을 구성하는 방사성핵종을 규명하여야 하며, H-3, C-14, Fe-55, Co-58, Co-60, Ni-59, Ni-63, Sr-90, Nb-94, Tc-99, I-129, Cs-137, Ce-144 및 전알파에 대하여는 그 농도가 규명되어야 함</li> <li>- 전알파의 경우 2년마다 1회 단위 시설별(원전별 또는 유사노형별), 폐기물 종류별로 알파방출 방사성핵종에 대하여 핵종별로 농도가 규명되어야 함</li> <li>- 그러나 폐기물 조성에 변화를 줄 수 있는 요인이 발생한 경우에는 그때마다 알파방출 방사성핵종의 핵종별 농도가 규명되어야 함</li> </ul>
	처분농도 제한	<p>폐기물 포장물 내의 방사성핵종 농도는 핵종별 처분농도 제한치를 초과해서는 안됨</p>
	표면 선량률	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 최대 표면선량률은 작업자의 방사선피폭 허용수준이 유지되도록 10 mSv/hr를 초과하지 않아야 함</li> <li>- 단, 별도의 운반용기를 사용할 경우 운반용기의 표면선량률을 적용해야 함</li> </ul>
	임계안전	<p>핵분열성물질의 함유는 임계조건이 일어나지 않도록 제한되어야함</p>
	표면오염	<p>외부표면에 대한 제거성 표면오염도는 임의의 표면 300 cm<sup>2</sup> 이상에 대하여 측정된 평균값이 베타·감마 방출체 및 저독성 알파 방출체는 4 Bq/cm<sup>2</sup>, 그 외의 모든 알파 방출체는 0.4 Bq/cm<sup>2</sup>를 초과하지 않아야 함</p>
물리적 요건	입자성 물질	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 비분산성이 되도록 처리하여 포장</li> <li>- 직경 0.01 mm 이하의 입자가 폐기물 무게의 1 % 이상 구성되어 있거나 직경 0.2 mm 이하의 입자가 15 % 이상 구성되어있는 폐기물을 말함</li> </ul>

	재용률	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고건전성용기를 제외한 모든 폐기물 포장물은 폐기물 내 빈 공간 및 폐기물과 용기 사이 공간이 가능한 최소화</li> <li>- 용기 내부 부피의 85 % (용기 상부 빈 공간 15 % 이하) 이상이 어야 함</li> </ul>
	유리수	<p>폐기물 포장물 내 유리수는 최대한 제한되어야 하며, 고건전성 용기의 경우는 폐기물 부피의 1 %, 그 외의 포장물은 0.5 %를 초과해서는 안됨</p>
화학적 요건	킬레이트	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 킬레이트제 및 킬레이트 화합물을 함유하는 포장물은 핵종 이동 저감화를 위해 제거해야 하며, 0.1 % 이상 잔존하는 킬레이트제 등은 화학명과 존재량 명시</li> <li>- 킬레이트제 및 킬레이트 화합물이 폐기물 무게의 1 % 이상을 함유하는 폐기물은 고형화해야 하며, 8 % 이상 함유하지 않아야 함</li> </ul>
	부식성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 제거하거나 감소시키도록 처리해야함</li> <li>- 부식성 산류 및 부식성 염기류 등의 물질은 부식성 물질로 간주함</li> </ul>
	폭발성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 폭발, 고온 및 고압에서 폭발적인 분해 또는 반응, 물과의 접촉 시 폭발성 반응이 일어나지 않아야 함</li> <li>- 질산에스테르류, 니트로 화합물, 니트로소 화합물, 유기과산화물 등의 물질은 폭발성 물질로 간주</li> </ul>
	인화성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 제거하거나 감소시키도록 처리하여 포장해야 함</li> <li>- 에틸에테르, 가솔린, 아황산탄소 및 기타 인화점이 - 30 ℃ 미만인 물질 등은 인화성 물질로 간주</li> </ul>
	발화성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 불연성이 되도록 처리되고 포장되어야 함</li> <li>- 리튬, 칼륨·나트륨, 황, 황인, 셀룰로이드류, 마그네슘 분말, 알칼리금속, 유기금속화합물, 금속의 수소화물 및 인화물 등은 발화성 물질로 간주</li> </ul>
	기체발생	<p>폐기물 포장물 내 기체발생은 포장물 용기 건전성이나 처분시설 성능을 저하시켜서는 안됨</p>
	화학적 유해성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 독성 기체, 증기 등 인체나 환경에 좋지 않은 영향을 일으킬 수 있는 물질을 함유하거나 생성하지 않아야 함</li> <li>- 잠재적 위험성을 최대한 줄이기 위해 제거되어야 함</li> <li>- 유해화학물질관리법에 의해 유해그림이 표시된 물질로서 고독성, 유독성, 유해성 및 자극성 물질은 유해성 물질로 간주</li> </ul>
생물학적 요건	생물학적 유해성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 생물, 병원균 및 감염 물질은 제거되어야 함</li> </ul>

## 다. 고화체 처분 안전성평가 항목

방사성폐기물 고화체를 처분장에 처분하기 위해서는 악조건이 예상되는 처분조건에서도 구조적인 안정성을 가져야 한다. 따라서 이러한 고화체들은 처분장 인수기준 및 인도규정을 충족하여야 하며, 내용은 표 3과 4에 나타내었다. 방사성폐기물 고화체는 표 3에 기재되어있는 시험기준으로 시험을 진행해야 하며, 시험 후의 결과값은 표 4의 판정기준을 모두 만족해야한다.

표 3. 폐기물 고화체 시험기준[7]

구분	시험 항목	관련기준	
		경질 고화체	연질 고화체
구조적 안정성	압축강도 시험	KS F2405	KS F2351
	침수 시험	NRC 'Technical Position on Waste Form, Rev.1'	
	열순환 시험	ASTM B553	
	방사선조사 시험	NRC 'Technical Position on Waste Form, Rev.1'	
침출성	침출 시험	ANS 16.1	
유리수 측정	살물크기 시험	ANS 55.1과 유사한 방법 적용	
	시편 및 잡고체	EPA Method 9095B(Paint Filter Liquid Test)	

표 4. 폐기물 고화체 시험요건 및 판정기준[7]

시험 항목	판정기준	
	경질 고화체	연질 고화체
압축강도	3.44 MPa(500 psig) 이상	수직변형율이 3%일 때 0.41 MPa(60 psig) 이상
방사선조사	이온교환수지 폐기물 고화체 시편은 $1.0 \times 10^6$ Gy, 그 이외 고화체 시편은 $1.0 \times 10^7$ Gy 범위에서 방사선 조사시험을 실시한 후 압축강도 만족	
침출	폐기물 고화체로부터 방사성핵종 누출은 충분히 낮아야 하며 고화체 시편에 대한 침출지수는 Cs, Sr, Co 핵종에 대해 6 이상	
침수	폐기물 고화체는 습기나 물에 접촉되어도 안정된 상태여야 하며, 최소 90일 이상 시험을 실시한 후 압축강도 만족	
열순환	폐기물 고화체는 온도 변화에 저항성이 있어야 하며, 열순환 시험 후 압축강도 만족	

## 제2절 방사성 오염 토양의 제염 및 처리 방법

### 1. 방사성 오염토양 제염 방법[3]

방사성 물질로 오염된 토양을 제염하는 방법으로는 처리방법에 따라 열적 처리기술, 물리·화학적 처리기술, 생물학적 처리기술로 분류할 수 있다. 생물학적 처리기술은 토양 중의 오염물질을 식물의 흡수작용, 미생물의 분해작용 등과 같이 생물의 대사과정을 이용하여 분해 및 제거하는 기술이다. 열적 처리기술은 오염토양에 열을 가해 산소존재 하에서 오염물질을 무해화, 고형화, 탈착시키는 기술이다. 마지막으로 물리·화학적 기술은 토양 내의 오염물질을 흡착, 세척, 산화, 추출, 환원 등의 물리·화학적 원리를 이용하여 토양입자로부터 분리/추출하는 기술이다. 아래 그림 1에 대표적인 오염토양 제염 방법의 공정도를 각각 나타내었다.

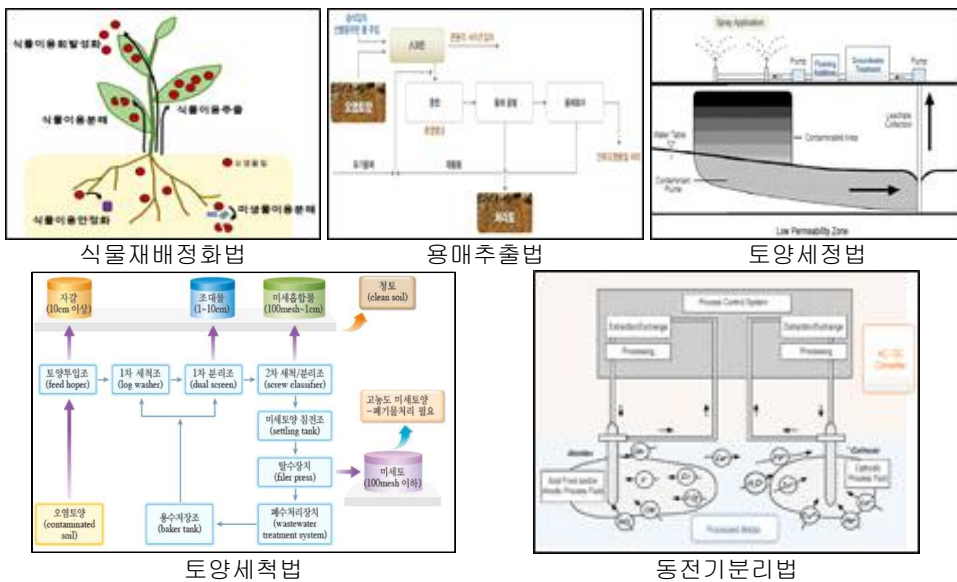


그림 1. 방사성 오염토양의 제염방법

## 가. 토양세척법

토양세척법은 적절한 세척제를 사용하여 토양입자에 결합되어 있는 유해한 유기오염 물질의 표면장력을 약화시키거나 중금속을 액상으로 변화시켜 토양입자로부터 유해한 유기오염물질 및 중금속을 분리시켜 처리하는 지상처리(Ex-situ) 기술이다[8]. 토양세척법은 세정제를 사용하여 오염물질을 제거하고 세정용액을 다시 재사용하는 방법을 사용하고 있다. 토양세척법은 유해화학물질 등을 단 시간 내에 처리할 수 있는 장점을 갖고 있으며, 이 때문에 긴급하게 처리해야 할 경우 적용될 수 있는 기술이다.

국내의 적용 사례로는 서울 공릉동에 위치한 TRIGA-Mark II, III 연구로와 대전 원자력연구소의 우라늄 변환시설이 있다. 연구용원자로와 우라늄 변환시설을 해체하는 과정에서 발생된 오염토양에 대해 토양세척법 등의 제염방법을 적용한 경험이 있다. 아래 표 5는 미국에서 오염된 토양의 제염 공정 중 하나인 토양세척 공정을 이용한 오염토양부지의 실제 토양정화 사례이다. 그중 Oak Ridge National Lab에서는 세슘으로 오염된 토양을 세척장비로 제염하여 약 70%의 부피감량을 수행하였다.

표 5. 미국의 토양세척법 실제 사례[3]

부지	목표 핵종	처리 전 방사능	처리 후 방사능	부피 감소비
Montclair-West Orange, New jersey, 1996	Ra-226, U-235 U-238, Th-230	40 pCi/g	11 pCi/g	54 %
Oak Ridge National Lab	Cs-137	Not available	Not available	70 %
Brunei Site, Texas	U, Ra	70 ppm (U)	20.7	99 %
Maywood, Superfund Site, New Jersey	Th-232, Ra-226, U-238	34 pCi/g (Th) 8 pCi/g (Ra) 7 pCi/g (U)	1 pCi/g (Th) 1 pCi/g (Ra) 1 pCi/g (U)	Not available
Newpark Environment, Texas	Ra-226	100-700 pCi/g	< 5	85 %

## 나. 토양세정법

토양세정법은 물 또는 오염물질 용해도를 증대시키기 위한 첨가제(계면활성제 등)가 함유된 물을 관정을 통하여 토양공극 내에 주입함으로써 토양에 흡착된 오염물질을 탈착시켜 지상으로 추출하는 지중처리(In-situ) 기술이다. 토양세정법은 생분해 과정이 불가능한 중금속의 경우 활용도가 높지만 살충제, 휘발성 유기화합물, 준 휘발성 유기화합물질의 처리시 높은 세정제 비용으로 인해 타 공정에 비해 경제성이 떨어진다. 또한 투수성이 낮은 토양의 경우 세정용액의 이동에 제약을 받기 때문에 처리효율이 떨어지며 계면활성제와 같은 세정용액에 의해 2차오염이 발생할 가능성이 있다.

## 다. 식물재배정화법

식물재배 정화법은 식물의 성장에 따라 토양 내의 오염물질을 분해·흡착·침전 등을 통해 오염토양을 정화하는 방법으로서 식물을 이용하여 오염토양 및 지하수를 정화시키는 자연친화적인 기술이다. 식물재배 정화법은 기타 물리·화학적 기술에 비해 확실히 경제적인 방법이고, 2차 부산물 발생이 적은 자연친화적인 기술이라는 장점을 가지고있다. 그러나 고농도 유기물질인 경우 독성으로 인해 처리의 한계가 있으며, 기타 물리·화학적 처리공정에 비해 처리기간이 오래 소요된다. 또한 오염원이 소수성인 경우에만 효과적이며, 분해생성물의 독성여부 및 생분해도의 규명이 명확하지 않다는 단점을 가지고 있다. 식물재배 정화법은 현재까지도 많은 연구가 국내외에서 진행되고 있다. 2000년 Brookhaven 국립 연구소에서는 미 농무부 주관 하에 실험을 수행하여 식물의 발육기간 3개월 동안 전체 오염량의 3 %를 제거하였다. 1999년에는 실험실 실증시험 단계에서 약 6개월 동안 전체 Cs, Sr에 의한 오염량을 각각 71.7, 88.7 % 제거한 것을 확인하였다. 또한 1996년에는 DEO의 주관 하에, Idaho 주 국립 공학 및 환경연구소에서 Sr에 의해 오염된 토양을 약 2개월간의 실험을 통해 약 2 %의 제거 효율을 달성하였다.



## 라. 동전기 분리법

토양내의 동전기 현상(Electrokinetics)은 포화된 점토질 간극 매체에 전위가 가해지면 물의 흐름이 일정한 방향으로 발생함과 동시에 이온 및 전하를 띤 입자들이 이동되는 현상을 의미한다. 이 현상은 크게 전기삼투와 전기영동 현상으로 구분되어진다. 그러나 실제로는 이 두 가지 현상 이외에 이온이동(Electromigration)과 전기압력이동에 의해서도 이온 및 전하를 띤 입자들은 이동하게 된다. 즉, 전기삼투는 토양의 공극 내 유체에 가해진 전기장과 토양 표면의 이중층(stern Layer) 사이의 상호작용에 의해 세공내에서 수화된 물분자와 함께 전하 입자들이 이동하는 것을 일컬으며, 전기영동은 세공내의 전하를 띤 입자(콜로이드)들이 특정 전극의 방향으로 이동하는 것을 말한다.

보통 토양세척 방법은 비교적 물의 투수성이 좋은 토양에서는 적용하기가 용이하지만 표면전하가 높고, 투수성이 낮은 점토질 토양에서는 적용하기가 어려운 것으로 알려져 있으며, 반면에 동전기 방법은 토양내의 세공을 따라 물, 입자, 이온들을 이동시키는 개념이므로 오염토양 세척방법보다는 점토성 토양에서의 적용성이 우수하다고 할 수가 있다[9]. 하지만 동전기법은 상용화하기에는 많은 문제점들을 해결하여야 하는데, 이들에게는 장기간 운전시 토양의 전기저항이 커져서 직류 전원 공급장치의 출력이 저하되고, 전극의 용출현상으로 전극의 표면저항(전극 부식)이 증가하는 등의 문제로 인하여 근본적으로 처리 효율감소 및 운전비용이 증가하게 된다는 점이다.

## 2. 방사성폐기물 처리 방법

일반적으로 균질성 방사성폐기물은 고형화하거나 HIC(High Integrity Container)에 넣어져 영구처분하게 된다. 이때 고려하여야 할 사항은 고화체나 HIC용기의 장기 건전성과 내침출성을 고려하여야 한다. 또한 처분 비용의 절감화와 처분장의 조기 포화를 예방할 수 있도록 방사성폐기물의 감용화도 고려하여야 한다. 이들 고려사항을 바탕으로 방사성폐기물 처리를 위해 사용되는 방법들을 그림 2에, 표 6에 현재 국내외적으로 널리 활용되고 있는 방사성폐기물의 고화공정과 그들의 고화체에 대하여 상호 비교한 내용을 나타내었다.

시멘트 등과 같은 재래식 고화매질에 의한 균질 폐기물의 고형화 방법은 폐기물 분말을 시멘트 등의 고화매질과 혼합한 후, 이들 혼합물을 일정시간동안 양생시키거나 또는 경화시켜 단일 고화체로 만드는 방법이다. 이때 폐기물 분말을 고화매질로 둘러싸야하고, 제조된 고화체는 높은 강도를 가지면서 고화체 내에 함유된 핵종이 누출되지 않도록 하기 위하여 폐기물의 함유율에 제한을 받게 된다. 이러한 이유로 인하여 최종적으로 제조되는 고화체의 부피는 당초의 폐기물 부피보다 커지게 된다. 이는 처분장을 조기에 포화시키는 결과를 초래할 수가 있고, 처분 비용도 크게 증가시키는 결과를 초래할 수가 있게 되는 것이다. 따라서 본 연구에서는 폐기물의 처분을 위하여 감용화와 처분비용의 절감화를 목적으로 분말을 펠릿화하고 이들 펠릿들을 폴리머로 고화하는 방법을 고려하였다.



시멘트 고화

아스팔트 고화

폴리머 고화

유리화

그림 2. 방사성폐기물 처리방법

표 6. 방사성폐기물 고화공정과 고화체의 비교

	Cements	Polymers	Bitumen	Glass
Waste types	Granular & particulate solids & solid objects, Aqueous liquids & sludges, Organic liquids	Granular & particulate solids & wet solids, Aqueous & organic liquids	Granular & particulate solids & wet solids, Aqueous liquids & sludges	Aqueous liquids, IX resins, sludges, particulate solids
Waste loading	up to 25% dry weight	up to 50% dry weight	up to 50% dry weight	up to 25% dry weight
Application methods	Ex-container or in-container mixing. Waste encapsulation in container.	Ex-container or in-container mixing. Extruder for thermoplastic materials	Ex-container using an extruder or stirred evaporator.	One-step or two step melting processes.
Scale	Small to large scale	Small to large scale	Small to large scale	Small to large scale
Compressive strength	Low to high (1to>10MPa)	Moderate to high depending on polymer and waste loading 2-10 MPa)	Low(material is plastic and softens upon heating)	High
Dimensional Stability	Good	Moderate to good	Moderate, may swell or flow with time & condition	Very good if annealed
Biodegradation resistance	Good	Moderate to Very good	Moderate	Good
Thermal stability	Good	Low to moderate	Low-can melt and ignite	Very good
Leach resistance	Depends on formulation and radionuclides	Depends on formulation and radionuclides	High for most radionuclides	Very high
Radiation resistance	High(>10 <sup>8</sup> Gy)	Low to Moderate (10 <sup>4</sup> to 10 <sup>6</sup> Gy)	Moderate (10 <sup>5</sup> to 10 <sup>6</sup> Gy)	High(>10 <sup>8</sup> Gy)
Radiolytic gas generation	Depends on formulation, radionuclides and water content	Depends on formulation, radionuclides and water content	Moderate to High	Very low
Usage	Widely used in many countries	Used in a few countries	Used in many countries; discontinued in a few countries	Used in a few countries

## 가. 시멘트 고화

시멘트 고화는 현재 가장 많이 적용되는 고화방법으로 농축폐액, 슬러지, 소각재 등을 처리하는데 주로 이용되고 있다. 이때 사용되는 시멘트는 ASTM Type I, II의 규정을 따르고 있으며, 시멘트에 대한 방사성폐기물의 중량비는 20 ~ 30 %정도 이다. 방사성핵종이 Sr, Pu인 경우에는 핵종이 시멘트 내에 잘 결합되기 때문에 시멘트 고화방법이 적합하지만, Cs, Ru인 경우에는 침출율이 높아 이에 대한 대책이 필요한 실정이다. 따라서 이를 위해 시멘트 혼합물에 Clay를 가하여 Cs, Sr의 침출율을 감소시켜야한다. 포틀랜드 시멘트는 적절한 고화를 위해 폐기물의 pH가 높아야 한다. pH 8 이상의 폐기물에 대해서는 시멘트가 폐기물의 성분에 적응할 수 있으나 borate 성분이 존재하면 고화가 지연되게 된다. 따라서 시멘트 및 폐기물의 비율을 증가시키고 이를 혼합하여야 한다. 이어서 혼합물에 첨가제를 넣거나 혼합하기 전에 시멘트와 sodium metasilicate를 혼합하면 시멘트 고화시 지연 문제를 해결할 수 있다.

## 나. 아스팔트 고화

아스팔트 고화는 고화매질로서 아스팔트를 사용하는 고화방법으로 유럽에서 개발되어 광범위한 운전 경험을 통하여 입증되었다. 아스팔트 고화는 100 ℃이상의 아스팔트와 방사성폐기물을 혼합하여 고화한다. 이때 폐기물 내에 함유된 수분은 거의 모두 증발되고 나머지 폐기물과 아스팔트만 포장되어 냉각된다. 최종적으로 생성되는 폐기물 및 아스팔트의 조성은 아스팔트:폐기물 = 60:40 정도이다. 아스팔트 고화체의 표면선량율은 시멘트 고화체보다 높으나, 감용비가 크고, 침출율은 작다. 하지만 아스팔트 고화체는 강도가 낮으며, 물과 접촉 시 팽윤 현상이 일어나 단점으로 지적되고 있다. 현재 대표적으로 사용되는 아스팔트 고화방법은 회분식 공정, 방사성폐기물 처리시설에서 운영하고 있는 박막증발공정이 있다.

## 다. 유리화

유리화는 사용후핵연료 재처리과정에서 발생하는 고준위폐액을 고화하기 위해 사용되는 공정으로 미국, 영국, 프랑스 및 일본에서 개발 또는 사용 중에 있다. 일반적으로 고준위폐액의 고화처리 공정은 증발, 탈질산 또는 가스 및 유리화의 3 단계로 나뉜다. 재처리 과정중 증발과정에서 발생하는 폐액의 원소는 주로 질산화합물로 용해되어 있기 때문에 탈질산 공정인 2단계 공정을 거쳐야한다. 1 단계와 2단계에서 얻어지는 고화체를 500 ~ 800 °C에서 가스반응을 시키고, 3 단계에서 분말상의 가스물을 첨가제와 혼합하여 900 ~ 1000 °C에서 유리와 함께 용융시켜 고화시키는 방법이다. 유리화를 위한 첨가제는 폐기물의 조성에 따라 선택되며 silicon, boroncalcium 등이 사용된다.

## 라. 폴리머 고화

폴리머 고화는 고화매질로서 폴리머를 사용하는 고화방법이다. 이때 사용되는 폴리머는 UreaFormaldehyde, Polyester/Epoxy, Styrene Diphenyl Benzene, Polyethylene 등 여러 종류가 있으며, 폴리머 고화는 다른 고화기술에 비해 방사성폐기물 함유량을 크게 할 수 있고, 처분 후에도 미생물 침해에 대한 저항성이 크다. 또한 방사성폐기물의 화학적 특성에 대해 민감하지 않고 내화학적/내침출성이 크다. 폴리머를 방사성폐기물의 고화에 널리 이용하는 국가는 프랑스와 미국이다. 프랑스는 건조 상태의 폐수지나 금속류의 잡기재들의 고화에는 스타이렌계열을, 습윤 상태의 소각재와 폐수지를 고화하는데는 에폭시 수지를 사용하고 있다. 반면에 미국은 비교적 저렴한 폴리머를 사용하고 있다. 대표적인 회사로는 DTS(Diversified Technologies Service)사로서 비닐 스타이렌 계열, 비닐 에스테르 계열이다.

## 제3절 응집제를 적용한 토양세척 공정

### 1. 토양세척 공정의 개념

산업용 유기폐액 및 중금속에 의해 오염된 대용량의 토양을 복원하기 위해 토양세척법이 일반적으로 많이 활용되고 있다. 토양세척법은 토양의 세척 및 입도 분리를 통해 오염된 미세입자를 제거하고, 기준 입도 이상의 토양은 환경에 복원하는 기술이다. 하지만 세슘과 같이 미세토양에 강하게 흡착되는 성질을 갖는 오염물질은 토양 세척의 방법으로는 제염이 어려운 상황이다. 따라서 유기물은 토양으로부터 분리한 후 소각, 산 처리 등의 방법을 활용하여 부피감용 작업을 수행해야 한다. 토양세척공정은 그림 1과 같으며, 일차적으로 토양의 환경복원율을 향상시킬 목적으로 사전에 핵종제거가 가능한 입도로 토양을 분리하면서 세척하는 공정, 이어서 발생된 2차폐기물에 응집제를 투입하여 세척액을 재사용할 수 있도록 하는 공정으로 구성된다.



그림 3. 토양세척법의 공정도

### 2. 토양세척 공정의 구성요소

#### 가. 1, 2차 토양세척 및 분류

그림 2에 오염토양 제염의 기본 공정 개념도를 나타내었다. 이 공정도에서 보듯이 우선 오염토양을 토양 투입조에 투입하여, 투입된 오염토양을 대상으로 회전과정과 고압 분사를 통하여 토양세척과 입도분리를 동시에 수행한다. 공정

최초 투입 시 15 mm 이상 자갈을 분리하고, 세척수를 사용한 고압 분사로 토양을 세척하며 1차에서 3 mm, 2차에서 0.75 mm까지 입도분리한다.

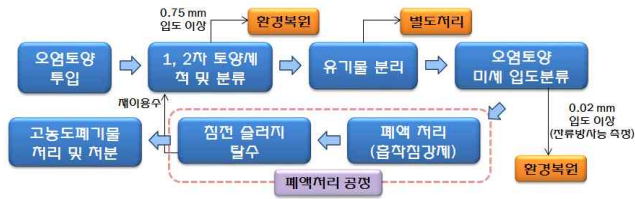


그림 4. 오염토양 제염 기본 공정도 구성

## 나. 유기물 분리

앞서 2차적으로 입도분리된 0.75 mm 토양에 함유된 유기물을 분리하기 위한 공정이다. 유기물이 포함된 폐액을 수조에 모아 부유시킨 후 수조 외부로 오버플로우시켜 여과함으로써 분리한다.

## 다. 오염토양 미세 입도분류

유기물이 분리된 토양에 강한 진동을 주어 0.5 mm 이하로 입도분리한다. 입도분리된 토양은 하이드로 사이클론 장치를 이용해 원심력으로 분리시킨다. 폐액을 고압펌프를 이용하여 1차에서 75  $\mu\text{m}$ , 2차에서는 20  $\mu\text{m}$  이하로 분리한다. 1차 하이드로 사이클론에 투입된 75  $\mu\text{m}$  이상의 토양은 하부로 배출되고 그 이하의 입자는 2차 하이드로 사이클론으로 재차 투입된다. 이후 2차에서 걸러진 20  $\mu\text{m}$  이상의 입자는 하부로 배출되고 그 이하의 실트 및 점토 입자는 폐수처리 공정으로 이송된다.

## 라. 폐수처리 공정

폐수처리 공정으로 이송된 실트 및 점토 입자는 응집제(흡착침강제)를 사용한 침전 및 탈수 방식의 슬러지 제거공정을 거쳐 최종 폐기물로 처리된다. 이때, 정화된 폐액은 세척수로서 재사용된다.

## 제4절 분말상의 방사성폐기물 감용화 기술

### 1. Roll compaction의 특징

분산성/입자성의 미세분말을 펠릿(Pellets), 과립(Granules) 등으로 성형하기 위해서는 분말과 성형제재를 혼합하여 성형틀 내에서 이들 혼합물을 가압하는 방식이 널리 이용되고 있다. 이러한 방법으로는 Roll Compaction, Granulation 등이 있다. 본 실험에서는 부피감용 및 성형체의 건전성 확보 등을 위하여 아래 사항들을 만족하는 roll compaction 기술을 선정하였다[10].

- ① 성형제재를 사용하지 않으면서 성형 가능성
- ② 성형된 펠릿 크기의 균일성 유지 여부
- ③ 고밀도 및 고강도의 펠릿 성형 가능성(고감용화)
- ④ 설치, 유지, 보수가 용이한 크기 및 구조로의 제작 가능성
- ⑤ 펠릿화 전·후 처리용 부대장치가 필요하지 않는 조건 등

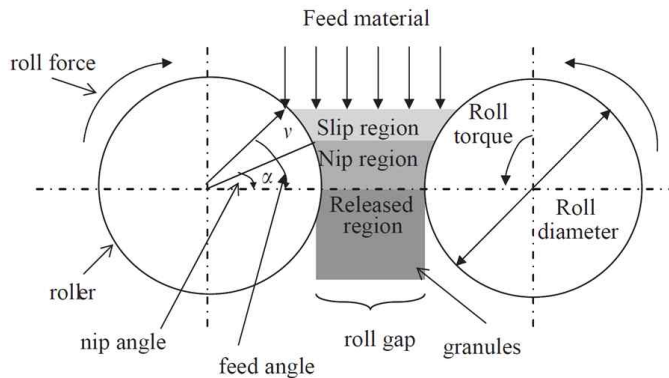


그림 5. 롤 컴팩션(Roll compaction) 개념도

일반적으로 분말의 펠릿화공정은 건조와 습윤 공정으로 나뉜다. 건조 펠릿화 공정은 건조 분말만을 roll compaction이나 일축 다이 컴팩션(uniaxial die compaction) 방식을 이용하여 압축한다. 이 공정은 용액상태의 결합제나 건조과정을 거치지 않아 일반산업에 이용되고 있는 추세이다. 또한 경제성이 높고,



수분에 민감한 물질의 취급에 용이하다. Roll press compaction은 1960년대에 금속판을 제조하는데 이용되다가 분말의 브리케트 제조가 요구되자 Johanson[11]은 장치의 설계 및 운전을 위해 물질의 특성, 장치의 운전변수들에 대한 수학적 모델을 만들었으며 성형과정의 기본 개념도(그림 5)를 확립하였다. 그는 그림 5에서 보듯이 롤 컴팩션을 3개 영역으로 나누었는데, 이 현상이, 분말이 펠렛으로 성형되는 롤 컴팩션의 기본 과정이 되는 것이다.

① 미끄러짐 영역 (Slip region) : 분말이 반대방향으로 회전하는 두 롤 사이로 들어가면서 공급압력과 롤 회전에 의해 롤 벽면에 대하여 가압되기 시작하지만 분말이 미끄러질 만큼의 압력은 아니다. 미끄러짐 영역에서 분말은 약간의 전단변형을 겪게 된다.

② 잘림 영역 (Nip region) : 롤 표면의 일부분에서 분말은 미끄러지고, 롤의 회전속도로 움직이기 시작한다. 이 부분을 잘림 영역이라 하며, 잘림 영역이 시작되는 점, 또는 각도를 잘림 각이라고 한다. 즉 잘림 각은 잘림 영역(Nip region) 또는 압축 영역(Compaction region)의 시작점이다. 여기서 분말은 압력이 가해지는 지점에서 두 개의 롤 사이로 이끌려지며, 이어서 롤 사이의 가장 작은 영역(Gap size)과 동일한 두께로 압축될 때까지 전단변형이 일어난다. 이 영역에서 분말은 막대기(Stick)로 가정되며, 이동속도는 롤과 동일한 속도를 갖게 된다.

③ 배출 영역 (Released region) : 분말이 일정한 형태로 압축된 이후에 성형된 펠렛은 롤의 회전속도보다 빠른 속도로 출구 영역으로 들어가게 되어 롤 외부로 배출하게 된다.

## 2. Roll compaction의 주요인자

본 실험에 이용된 분말의 roll compaction에 영향을 미치는 인자들은 장치의 운전 변수, 장치의 기하학적 형태, 그리고 분말 물질과 장치재료의 특성으로 나누어 표 7에 나타내었다. 실제로 분말의 성형과정에서는 반대로 회전하는 두개의 롤간의 간격(Gap), 롤 회전속도(Roll speed), 분말의 공급속도(Feeding rate) 및 성형압축력(Hydraulic pressure) 등이 분말의 성형, 즉 성형상태, 펠렛의 강도, 분말의 감용정도에 커다란 영향을 미치게 된다. 그 외의 변수들은

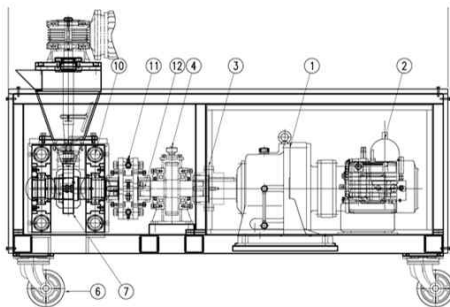
장치의 크기, 성능, 분말의 취급 등에 영향을 미치지만 이들 변수들은 장치 설계 및 제작에 반영되어진다. 공정 운전변수들은 분말의 특성에 의해 크게 영향을 받게 되므로, 분말의 종류와 특성에 따라 최적화되어야 한다.

표 7. Roll compaction의 주요 인자

Process Parameters	Geometric Parameters	Material properties
<ul style="list-style-type: none"> <li>- roll force</li> <li>- roll torque</li> <li>- roll speed</li> <li>- Feed pressure</li> <li>- Gravity</li> <li>- Inertia</li> <li>- roll surface</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- roll diameter</li> <li>- roll width</li> <li>- roll gap</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- particle size</li> <li>- mixture composition</li> <li>- internal friction</li> <li>- wall friction</li> <li>- compressibility</li> <li>- permeability</li> </ul>

### 3. Roll compaction 장치

본 연구에 활용된 Roll compaction 장치를 그림 6에 나타내었다. 이어서 성형장치에 의해 실제로 분말이 펠렛으로 성형되어지는 롤의 설계도를 그림 7, 그리고 성형되는 펠렛의 형태와 크기를 그림 8에 나타내었다. 롤 표면에 각인되는 펠렛의 포켓은 주입되는 분말이 펠렛으로 성형되는 부위이고, 성형과정이 두 롤간의 포켓에 의해 완료되면 이 포켓으로부터 성형펠렛이 잘 탈착되어야 한다. 위 사항을 고려한 성형장치의 주요 사양을 표 8에 나타내었다.



1	Cyclo Reducer Motor	8	Feed Bin
2	Hydraulic Pressure Unit	9	Worm Reducer
3	Gear Coupling	10	Roll Frame
4	Gear Box	11	alignment Coupling
5	Hydraulic Pressure Cylinder	12	Gear Coupling
6	Caster	13	Lower Base
7	Roll Tire		

그림 6. 펠렛 성형장치의 측면도와 각부 명칭

표 8. 연구용 성형장치의 주요 사양

Process parameters		Process conditions	
Effective angle of friction	42 °	Roll gap	3 mm
Radius of the rollers	21 cm	Hydraulic pressure	29.42 MPa
Compact surface area	360 cm <sup>2</sup>	Roll speed	20 rpm
Roll width	6 cm	Feed speed	35 rpm
Roll pockets: - Length	0.95 cm		
- Height	0.8 cm		

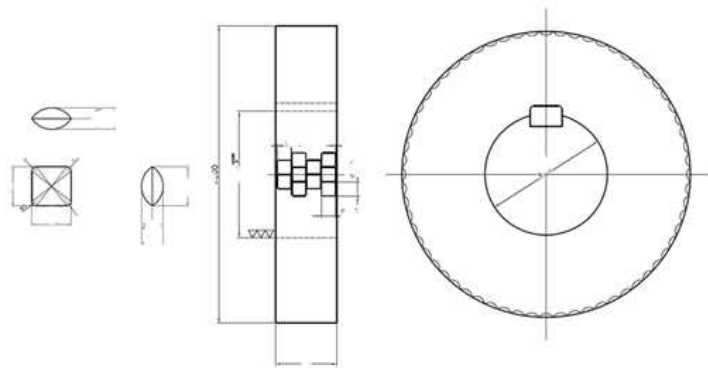


그림 7. 펠릿 성형장치의 롤 설계도

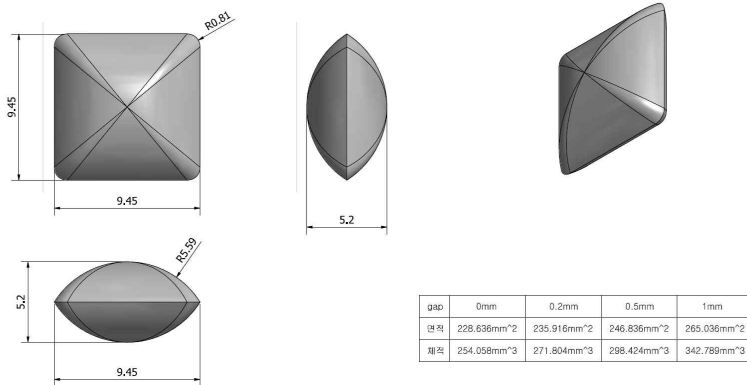


그림 8. 성형 펠릿의 형태와 크기

## 제3장 실험재료 및 실험방법

### 제1절 실험재료

#### 1. 토양시료

본 실험에 사용된 토양은 원자력발전소 인근 부지에서 채취하였으며, 육안상으로 보이는 나뭇잎, 돌 등은 체로 걸러 채취 당시 제거하였다. 토양은 약 48시간 동안 실온에서 자연건조 후 체 진동기(Sieve shaker, Daewha Tech, Analysette 3 Pro)를 사용하여 입도분류 하였다. 이때 분류된 토양의 입도는 500, 250, 150, 75, 38, 38  $\mu\text{m}$ 미만이며, 입도분류 후 토양을 아래 그림 9에 나타내었다. 또한, 사용된 체 진동기는 그림 10과 같으며, 장치의 사양은 표 9에 나타내었다.

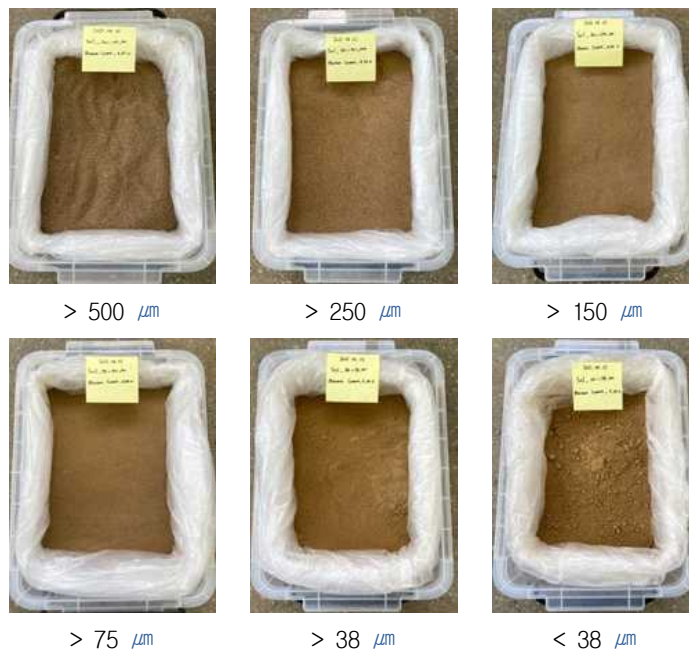


그림 9. 입도별 토양시료



그림 10. 체 진동기의 모습

표 9. 체 진동기의 사양

Operation	Vibration
Amount of sample	1.5 kg
Dimension	370W * 400D * 200H mm
Moving	Up & Down Action
Motor	200~240 V, 60 Hz, 115 Watt

## 2. 응집제(J-AF)

본 실험에 사용된 J-AF(응집제)는 광역의 오염토양 제염을 위해 정부과제의 일환으로 전테크(Jeon Tech.Co.,Ltd)에서 개발한 응집제이다. 해당 응집제의 성분을 알아보기 위해 MSDS(Material Safety Data Sheets)분석을 수행하였으며 결과는 표 10과 같다.

표 10. 응집제의 구성 성분

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl	OH
21.74	0.12	18.75	18.01	8.13	2.12	11.62	6.29	0.13	13.08

### 3. 폴리머

펠렛의 고화체를 제조하기 위하여 고화매질로서 사용된 폴리머는 소수성 및 강력한 접착력을 갖는 에폭시 수지이다. 실험에 사용된 에폭시 수지는 국도화학에서 구매하였으며, 주제 YD-128, 경화제 G-1034, 희석제로는 LGE를 사용하였다. 희석제인 LGE는 주제와 경화제의 점도를 조절하고, 혼합을 용이하게 하여 펠렛 사이의 공극을 채움에 있어 유동성을 부여하는 역할을 한다. YD-128은 Bisphenol-A로부터 유도된 표준 액상 수지로서 접착력이 매우 우수하고, 내열성 및 내화학성이 매우 우수하다. 다만 점도가 11,500 - 13,500 cps로 높기 때문에 점도를 낮출 필요가 있다. YD-128의 점도는 그림 11에서 보듯이 온도에 취약하며, 온도의 증가에 따라 점도가 감소함을 확인할 수 있다. 경화제인 G-1034는 점도가 10,000 - 20,000 cps를 갖는 폴리아미드 수지이며, YD-128의 액상 수지와 혼합하여 접착제, 그라우트, 몰딩 등에 사용된다. G 1034는 상온에서 경화성이 우수하고, 자극과 독성이 적으며 접착력이 좋다. 또한, 희석제, 용제 및 유연제 등과의 상용성이 우수하다. LGE는 폴리머의 점도를 낮추기 위해 사용되는 반응성 희석제로서 C-12 ~ C-14의 지방족 알코올 혼합물의 글리시딜 에테르이다. LGE는 점도가 20 ~ 50 cps로 독성, 증기압 및 휘발성 성분이 낮다.

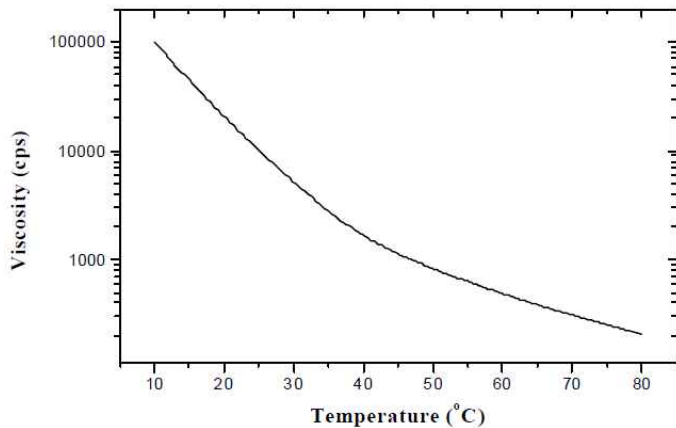


그림 11. 온도에 따른 YD-128의 점도 변화

## 제2절 실험 전처리 및 방법

### 1. 모의 방사성 오염토양의 제조

#### 가. 세슘 용액, 응집제와 토양의 교반

본 실험에서는 토양세척 후 발생하는 미세토양 대신에 모의 시료를 제조하여 사용하였다. 먼저 토양에 세슘수용액을 혼합하고, 이후 응집제 (J-AF, Jeon Tech.Co.,Ltd)를 투입해 교반하였다. 이때 세슘 수용액의 농도는 0.1 mmol/L, 토양과 응집제는 10:1의 비율이다. 또한 입도분리한 토양 중 38  $\mu\text{m}$ 미만의 입자 크기를 사용하였다. 이후 모의 시료를 열풍건조기(Jongro Industrial CO., LTD, VTEC-75) 내에서 48 hr 동안 건조했으며, 수분 함유도는 약 7 %로 조절하였다. 이어서 고압축 펠렛으로 성형하기 위해, 시료를 파쇄하여 분말화 하였다. 표 11에 토양시료를 구성하고 있는 화학조성과 모의 방사성 오염토양의 화학조성을 나타내었다.

표 11. 토양시료와 모의 방사성 오염토양의 화학조성

구성성분	토양시료 (wt.%)	모의 방사성 오염토양 (wt.%)
O	48.166	45.133
Fe	4.011	3.539
Si	28.05	31.681
Al	12.883	10.053
Ca	0.724	0.435
Ti	0.251	0.161
C	1.793	1.546
Zn	0.109	0.055
Mg	0.87	0.896
K	1.324	1.53
Na	1.78	3.606
S	0.017	1.137
Cs	0.023	0.227

## 나. SEM(Scanning Electron Microscope) 분석 결과

SEM 분석을 통해 모의 방사성 오염토양과 그의 제조에 사용된 시료들의 물리화학적 특성을 확인하였다. 그림 12에 38  $\mu\text{m}$ 미만 토양, J-AF, 모의 방사성 오염토양의 SEM 분석결과를 비교하여 나타내었다.

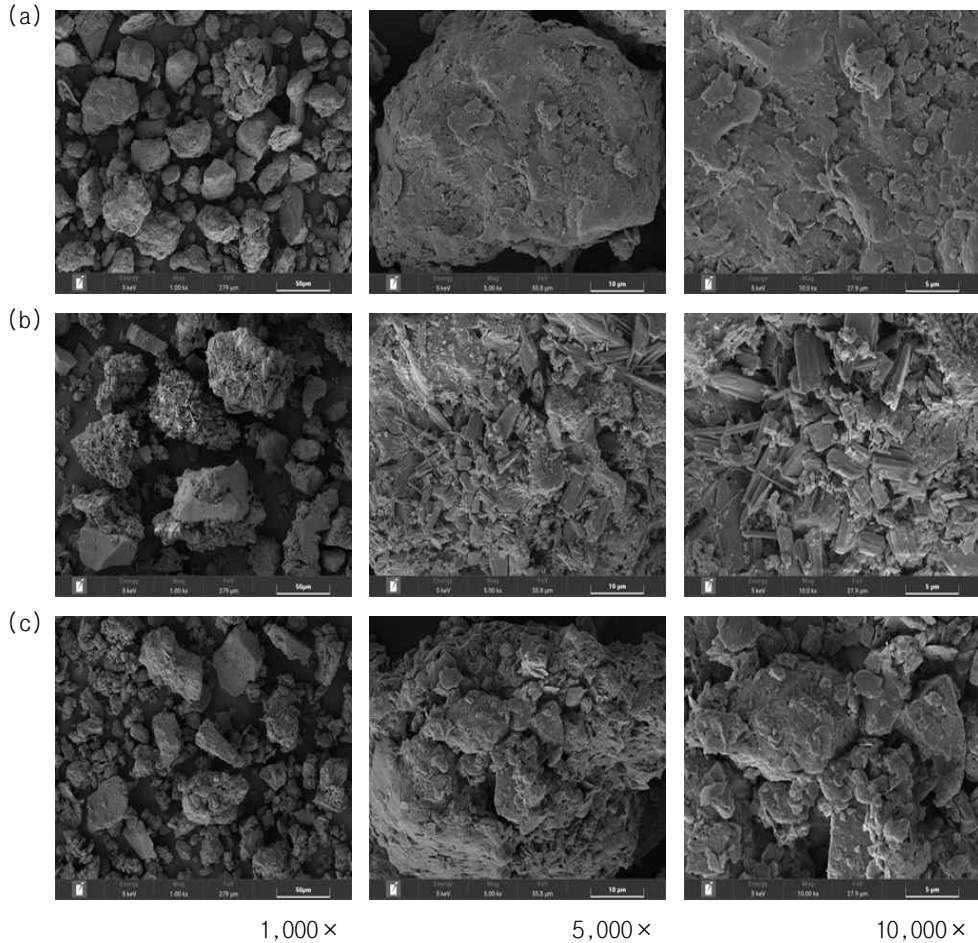


그림 12. 토양 38  $\mu\text{m}$ 미만(a), J-AF(b), 모의 방사성 오염토양(c)의 SEM 분석 결과

그림 12에서 38  $\mu\text{m}$ 이하의 토양 입자(a)와 필라이트 기반 흡착제인 J-AF(b)를 혼합해서 제조한 모의 오염토양 시료인 Contaminated soil(c)를 보여주고 있다.



이때, 제조된 Contaminated soil(c)의 경우 일반 토양과 마찬가지로 모두 위치 상에서 turbulent이 있는 자연 미세구조(natural microstructure) 보다는, 다공성 (high porosity)을 가지는 무질서한 skeletal의 미세구조를 보였다. 그리고 J-AF (b)의 분말 형태는 입자들끼리 서로 뭉쳐지기에 어려운 부서진 나무조각형으로 보이며, 이는 Cs, 응집제, 토양시료의 혼합 과정에서 수분(물)에 의해 잘 용해된 것으로 판단되었다. 따라서 토양세척공정 중 폐수처리 공정에서 응집제를 투여함으로써 방사성물질의 응집 효과가 뛰어났다고 판단된다. 또한, 결정구조를 확인해본 결과 펠릿화가 잘 될 것으로 판단되었다.

## 2. 토양 분말의 펠릿화

### 가. 압축성 실험

토양분말의 펠릿 성형 실험에 앞서 모의 시료에 대한 펠릿화 가능성을 알아보고자 일축 압축기를 사용해 압축성 평가를 수행하였다. 압축성 실험에 사용된 일축 압축기는 면압에 의한 압축이고, 펠릿화를 위해 사용된 roll compaction 장치는 선압에 의한 압축이다. 따라서 면압에 의한 압축으로는 선압에 의한 압축가능성을 판단하기는 사실상 어렵다. 하지만 펠릿화 실험 전, 압축성을 예상할 수 있는 자료로 활용하기 위해 면압에 의한 압축성 평가를 수행하였다. 사용된 일축 압축기는 최대 35 MPa의 성능을 가지고 있지만, 압축 시 분말에 적용된 압력의 범위를 10 ~ 30 MPa로 설정하였다. 그리고 일정한 부피를 갖는 원통형 다이 내에 모의시료를 자유낙하시켜 주입하고, 이어서 상부 가압판을 하부로 이동시켜 분말을 압축하였다.

그림 13에서 보듯이 10 ~ 20 MPa 압력에서도 충분히 높은 압축성을 보였다. 그리고 표 12에서 보듯이 성형장치의 압축력과 비슷한 압력(30 MPa)을 가했을 경우, 압축된 토양부피는 초기 토양부피에 비해 1/3.5로 감용되었다. 이는 그의 압축성이 350 %로 매우 높은 것으로 확인되었기 때문에 성형장치에 의해서도 오염토양은 용이하게 펠릿으로 성형되어질 것으로 판단하였다.

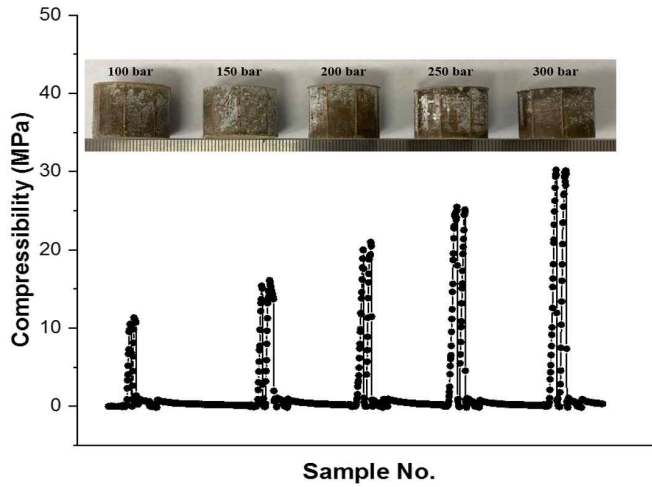


그림 13. 압력변화에 따른 모의 오염토양 시료의 압축성 실험

표 12. 압축성 측정 결과

시료	압력 (MPa)	압축 전/후 밀도		압축성 (%)
		압축 전 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	압축 후 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	
모의오염토양시료	10	0.6479	2.0839	322
	15		2.2200	343
	20		2.2402	346
	25		2.2491	347
	30		2.2706	350

## 나. 장치 운전 조건

사전에, 실험을 통해 일반토양의 일축압축을 통하여 토양의 펠릿화 가능성에 대하여 확인하였으며, 그림 14 (a)의 개념처럼 토양을 롤 콤팩션하여 그림 14 (b)와 같은 토양을 얻게 된다. 따라서 앞서 기술하였듯이 토양펠릿의 성형상태, 펠릿의 강도, 분말의 감용정도에 커다란 영향을 미치게되는 롤 회전속도(Roll speed), 분말의 공급속도(Feeding rate) 및 성형압축력 (Hydraulic pressure)을 다양하게 변화시키면서 최적의 성형 조건을 찾고자 하였다.

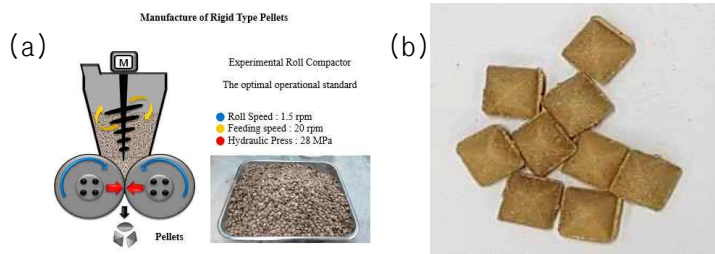


그림 14. (a) Roll compaction 장치의 개념도, (b) 토양 펠렛의 모습

(1) 롤의 회전속도

성형 압축력을 28.44 MPa, 분말 공급 속도를 25 rpm으로 고정시키고, 롤의 회전속도 변화에 따라 모의 오염토양을 성형결과를 그림 15에 나타내었다. 그림 15에서 보듯이 롤 회전속도가 증가하면 증가할수록 성형된 펠렛의 강도와 밀도가 낮아졌다. 그러나 롤 회전속도가 4.0 rpm에서 성형된 펠렛의 상태는 매우 양호하였다. 이러한 이유는 롤의 회전속도가 낮은 경우에는 롤 포켓내로 토양분말이 일정량 이상으로 주입되고, 롤의 회전속도가 높은 경우에는 롤이 빠르게 회전하기 때문에 상대적으로 롤 포켓내로 주입되는 분말(토양)의 양이 적어지게 되기 때문이다.

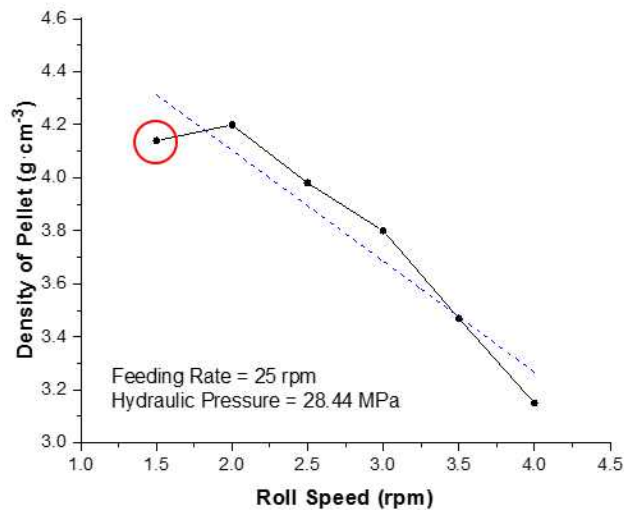


그림 15. 롤 회전속도에 따른 펠렛의 밀도 변화

## (2) 분말의 공급속도

성형 압축력을 28.44 MPa, 롤 회전속도를 2.0 rpm으로 고정시키고, 오염토양 분말의 공급속도를 변화시키면서 얻어진 성형결과를 그림 16에 나타내었다. 분말의 공급은 서로 반대방향으로 회전하는 두 개의 롤 상부에 분말 공급장치 내부의 스크류 회전에 의해 이루어진다. 그림 16에서 보듯이 분말의 공급속도가 높으면 성형되는 펠렛의 밀도는 증가하며, 이와는 반대로 분말 공급속도가 낮아지면 성형 펠렛의 밀도가 낮아짐을 알 수가 있었다. 이는 분말 공급속도가 높게 되면 스크류 회전에 의해 분말은 두 개의 롤 상부와 롤 주입부분까지 이르는 공간에서 다져지면서 많은 양의 분말이 공급되기 때문이다. 반대로 분말 공급속도가 낮아지면 분말의 다짐정도가 약해 상대적으로 공급되는 분말의 양은 적어지기 때문이다.

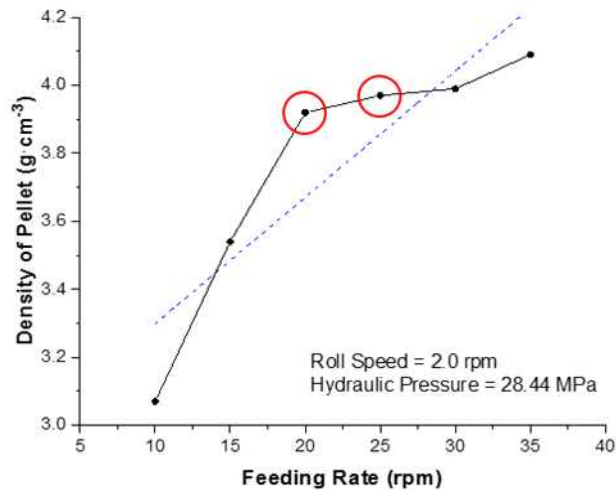


그림 16. 분말공급속도에 따른 펠렛의 밀도변화

## (3) 성형압축력

본 연구에서 활용한 롤 컴팩션 기술은 두 개의 회전롤 간의 접촉선에서 분말을 압축하여 성형하는 선 가압방식이다. 이때 적용되는 성형 압축력은 두 개의 롤

중에서 한 롤은 고정축 상태에서 회전하게 되며, 나머지 롤은 일정한 간격내에서 움직일 수 있는 이동축 상태에서 회전하게 된다. 이 일정한 간격을 롤 간격(Roll Gap, Gap Distance)이라 한다. 따라서 분말공급과 성형과정 중에서 최대한 이 간격이 벌어지지 않도록 하기 위하여 롤 이동축에 일정한 압력을 가하게 된다. 보통 성형된 펠렛의 형태는 일정한 롤 회전속도에서 분말의 과잉공급, 일정한 분말 공급속도에서는 롤의 회전속도가 극도로 낮을 경우에는 롤간의 간격이 벌어져서 성형된 펠렛은 본래의 설계형태를 유지하지 못하고 두터운 상태가 된다. 또한 펠렛의 강도가 극도로 강하거나, 매우 약하게 된다. 이를 방지하기 위해서는 성형 압축력을 적용하되 분말의 공급속도와 롤의 회전속도에 최적화 되어져야만 한다.

### 다. 압축강도 시험

Roll compaction 장치를 사용하여 성형된 펠렛의 강도를 확인하기 위해 표준시험법[12]에 의한 압축강도 시험을 수행하였다. 압축강도를 측정하기 위해서는 시편의 상·하면이 서로 평행하면서 평평하여야 한다. 하지만 성형된 펠렛의 형태는 사면체(그림 8 참조)이기 때문에 강도 측정시험을 위해서는 강도측정이 가능한 시편으로 가공하여야 한다. 이를 위하여 그림 17과 같이 펠렛 표면처리를 위한 지그를 제작하였다. 이어서 펠렛의 상·하면에 펠렛의 강도보다 매우 높을 것으로 판단되는 특수 에폭시 수지를 주입하여 상·하면 평행하도록 하였다.

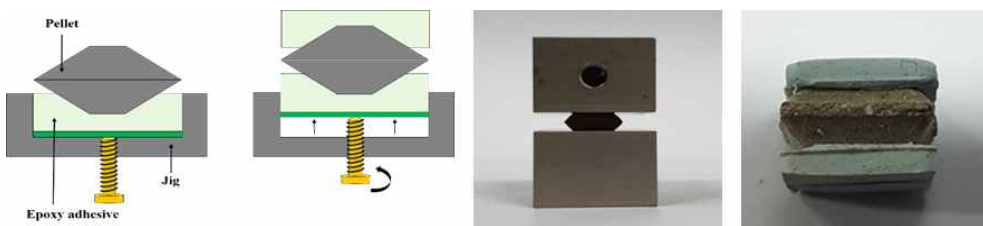


그림 17. 압축강도 측정용 지그 모습

### 3. 폴리머 고화체 제작 및 특성평가

#### 가. 폴리머 고화체 제작

##### (1) 폴리머 고화체의 고화조건

본 연구에서 성형된 오염도양 분말의 펠릿을 고화하는데 있어서 ①일정크기 이상의 펠릿을 고화할 수 있으며, ②고화에 있어서도 감용화를 이룰 수가 있고, ③압축강도가 기대되며, ④내침출율을 극대화할 수 있고, ⑤상온에서 고화 가능한 매질을 고려하게 되었다. 이들 조건들과 관련하여 기존의 시멘트 고화매질은 펠릿을 고화할 수가 없으며, 부피 감용화보다는 부피 증대화가 발생되며, 아스팔트 등의 고화매질은 상온에서 고화가 불가능함과 동시에 강도가 전혀 기대할 수가 없다. 따라서 위 조건들을 만족하는 고화매질로서는 폴리머를 고려하게 되었으며, 폴리머 중에서 내수성과 접착력이 매우 우수한 에폭시 수지를 본 성형펠릿의 고화매질로 선정하게 되었다. 즉, 펠릿은 일정 크기를 가진 형태를 취하기 때문에 펠릿과 고화매질의 혼합물을 교반(mixing)할 수 없으며, 교반 방식이 아닌 방법으로 펠릿을 고화시키는 방법을 강구해야 했다.

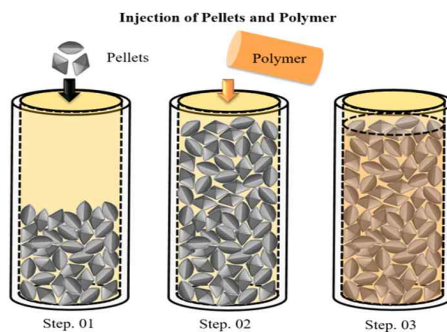


그림 18. 폴리머 고화체 제작 과정

따라서 그림 18에서 보듯이 펠릿을 용기 내에 충전시키고 고화용기 상부로 유동성 고화제를 주입하거나 반대로 고화용기 바닥으로부터 고화제를 주입하는 방식을 도출하였다.

## (2) 폴리머 혼합물의 혼합비

본 실험에 사용된 폴리머의 제조사인 국도화학에서는 주제(YD-128) : 경화제(G-1034) = 65 : 35 phr로 혼합하기를 권장하고 있다. 따라서 국도화학에서 권장하는 비율에 따라 혼합비율을 결정하되, 주제의 점도를 낮추어야 하므로 희석제인 LGE의 첨가량을 고려해야 한다. 따라서 주제의 점도를 조절하기 위해 LGE 첨가량에 따른 점도를 측정하여 표 13에 나타내었다. 이때 점도 측정은 Brookfield사의 Digital viscometer를 사용하여 측정하였다. LGE의 첨가량을 고려하여 경화제의 양을 결정하였으며 최종적으로 도출된 최적 혼합비율은 YD-128 : G-1034 : LGE = 100 : 60 : 10 이었다.

표 13. LGE 첨가량에 따른 주제의 점도 변화

	LGE 첨가량					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
YD-128+LGE - 점도 (cp)	19,050	5,850	2,700	1,080	810	450

## (3) 폴리머 고화체의 양생

경화중인 고화체의 내부와 외부 주변 온도사이에 커다란 차이가 있게 되면 그 고화체는 균열되기 쉽다. 따라서 본 실험에서는 고화체의 균열을 방지하기 위해 고화체의 주변 온도를 60 °C로 선정하였고, 그림 19와 같이 고화체내의 일정한 간격과 높이를 고려하여 열전대를 삽입하여 60 °C의 항온조 내(그림 20 참조)에서 경화하면서 고화체내 발열온도를 측정하였다. 고화체 주변온도의 상승은 폴리머 고화체의 경화를 촉진시키는 의미도 갖고 있다. 앞서 측정 결과를 통해 대략 경화되기 시작한 후 100분 정도에서 경화는 완료되었을 것으로 판단된다. 하지만 고화체의 균열을 방지하기 위해 폴리머 경화의 완료 시점은 고화체 주변온도와 고화체 내부의 온도가 같아지는 시점인 5시간 이후로 하였다.



그림 19. 60 °C의 항온조 내에서 경화모습

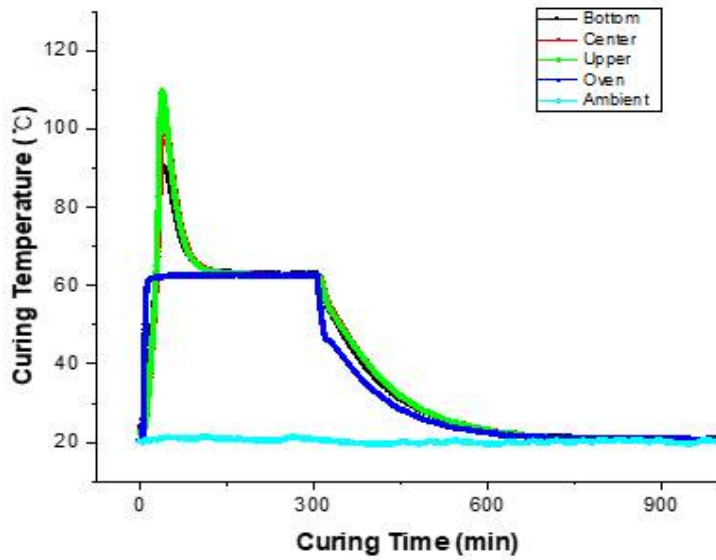


그림 20. 60 °C 항온조에서 경화시간에 따른 고화체 발열온도 측정



## 나. 폴리머 고화체 특성평가

### (1) 압축강도 시험

압축강도 시험은 처분되는 고화체의 구조적 안전성을 평가하는데 가장 기본적이며 중요한 시험 항목이다. 처분장 인수조건에서는 고화체의 열순환 시험, 방사선조사 시험, 그리고 침수시험 후에도 고화체의 압축강도 시험을 수행하도록 하고 있다. 압축강도 시험은 처분장 인수기준에서 요구하는 압축강도 표준시험법인 KS F 2405에 따라 한국화학융합시험연구원(KTR)에서 측정하였다. 표 14는 측정에 사용된 압축강도 시험장치의 사양이다 [12].

표 14. 압축강도 시험장치의 사양

Name of the machine	Tension/compression testing machine
Manufacturer & type	DACELL / 1000 kN
Machine No.	D1604001
Capacity	1000 kN
resolving power	0.1 kN
Test institute	Korea construction testing Lab.

### (2) 열순환 시험

처분장 인수기준에서 요구하는 열순환 시험은 ASTM B553인 Thermal cycling test for evaluation of electroplated plastics 시험법에 따라 수행할 것을 요구하고 있다[13]. ASTM B553 시험법은 당초 전기 도금된 플라스틱 물질의 내구성 평가 시험을 위한 것으로서, 열순환 주기를 고려한 시험절차와 장치들을 기술하고 있다. 이 시험법의 열순환 주기를 고화체에 적용하는데 있어서 고화체 시험시편을 초기 시험온도인  $22 \pm 3$  °C의 온도에서 1 시간동안 이 온도를 유지하고, 이어서 10 °C/h의 속도로 60 °C까지 상승시켜 이 온도에서 1 시간동안 방치한 후 다시 10 °C/h의 속도로 영하 30 °C까지 하강시켜 이 온도에서 1 시간동안 방치하는 주기를 1 주기로 하여 총 30 회를 반복토록 한다. 그리고 ASTM B553에서 시험에 적용하는 고온과 저온의 온도 범위는 4 가지로 구분하고 있는데, 온도 범위의 선정은 시험의뢰자와 협의하에 수행되도록 권고하고 있다. 그러나

미국의 NRC BTP에서는 ASTM B553에서 설정한 상한 및 하한 온도와는 달리 온도를 각각 60 °C, - 40 °C로 변경하여 시험을 수행하도록 권고하고 있다. 이를 근거로 NRC BTP에서 변경하여 제시한 열순환 주기를 그림 21에 나타내었다. 에폭시 고화체의 열순환 시험은 ASTM B 553에 따라 한국화학융합시험연구원(KTR)에서 수행하였으며, 열순환 시험이 완료된 고화체에 대하여 그들의 외관을 관찰한 후, 압축강도를 측정하였다.

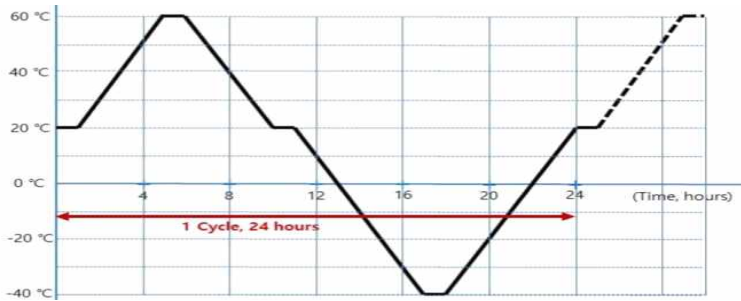


그림 21. 열순환 시험의 사이클에 대한 시간, 온도 변화

### (3) 침수시험

침수시험에 대한 표준시험법은 없기 때문에 미국의 NRC[14]에서는 침수시험은 침출시험법인 ANS 16.1과 연계하여 수행할 것을 권고하였다. 따라서 본 연구에서도 미국의 NRC 권고에 따라 수행하였는데, 침수용액은 탈이온수를 사용하였으며, 90일간 PTFE재질의 침수용기(그림 22 참조)에 침수시켜 수행하였다. 침수시험이 완료된 고화체(그림 23 참조)의 외관을 관찰한 후, 압축강도 시험을 수행하였다.

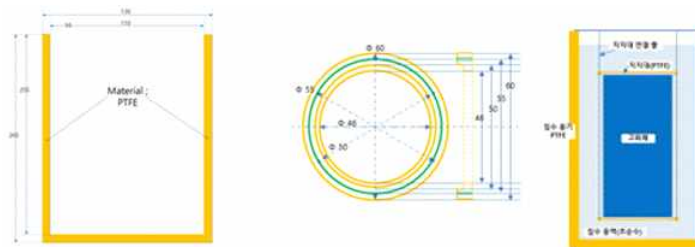


그림 22. 침수용기 설계도 및 개념도



그림 23. 침수시험 시작(좌) 및 종료(우) 후 모습

#### (4) 방사선조사 시험

방사성 고화체가 처분시설에 300 년간 영구처분 됐을 때, 고화체가 흡수할 수 있는 총 누적 흡수선량을 고려하여 방사선 조사시험을 수행하게 된다. 방사선 조사시험은 미국의 NRC[14]에서 권고한 방법에 따라 한국원자력연구원 정읍센터에서 수행하였다. 표 15에 방사선 조사시험의 조건을 나타냈다. 방사선조사 시험이 완료된 고화체의 외관을 관찰한 후, 압축강도를 측정하였다.

표 15. 방사선조사 시험 조건

Item	Condition	
Room condition	Temperature	- start(0 hr): 25.0 °C - stop(110 hr): 22.3 °C
	Pressure	~ 1 atm
	Medium	air
Irradiation Period	2021.10.25.(13:34) ~ 2021.11.03.(09:10), Lose Time: 1h 32 min	
Irradiation condition	Type	- Gamma-ray - Energy spectrum : 1.17 & 1.33 MeV(Ave.:1.25MeV)
	Total absorbed dose	$1.0 \times 10^6$ Gy( $1.0 \times 10^8$ rad)
	Absorbed dose rate	$9.091 \times 10^3$ Gy/hr( $9.091 \times 10^6$ rad/hr)
	Irradiation time	110 hr
	Dosimeter	Alanine dosimeter

(5) 침출시험

고화체로부터 핵종의 선원항(Source term)을 결정하게 되는 침출 시험은 처분장에서 제시한 표준시험법인 ANS 16.1[15] 절차에 따라 수행하였다. 침출시험은 총 90 일간 수행하게 된다. 고화체 제조 시 폴리머의 혼합비율은 동일하며, 성형 펠렛은 침출시험만을 위하여 별도로 제조하였다. 그리고 펠렛 성형은 비방사성 물질로 하되, 방사성폐기물의 대표핵종인 Co, Cs, Sr을 대신할 수 있도록 그들의 chloride form으로 함유시켰으며, 함유된 화학종의 초기농도는 표 16와 같다. 그리고 이들 화학종은 tracer로서 역할을 담당하게 된다.

표 16. 침출 시험시편별 화학종의 초기 농도

시료번호	펠렛성분	Co(mg)	Cs(mg)	Sr(mg)
J-19	모의오염토양 <sup>1)</sup>	482.00	603.44	391.34
J-20	모의오염토양 <sup>1)</sup>	482.81	604.39	391.95

1)모의오염토양: CsNO<sub>3</sub>+Soil+J-AF

침출시험을 위하여 사용된 용기는 그림 24의 (a)와 같다. 침출용기의 재질은 고화체로부터 누출된 핵종들이 용기 내부 표면에 부착되지 않도록 하기 위해 PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene)으로 하였으며, 침출수는 탈염수를 사용했다.

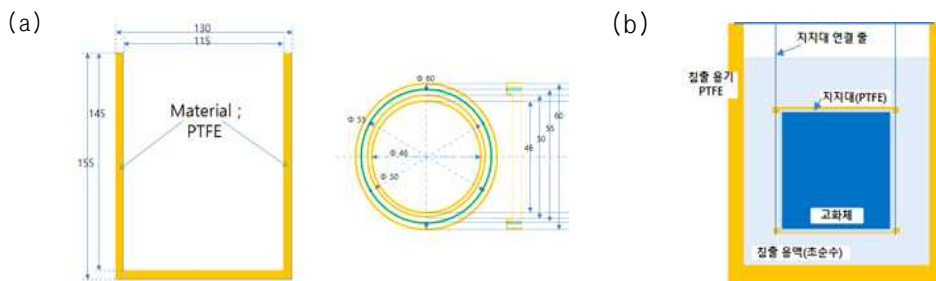


그림 24. (a) 침출용기 설계도, (b) 침출시험 개념도

침출시험 수행은 시험 시편을 침출수내에 넣기 전, ①침출 시험시편을 지지할 수 있는 시편 하부 지지대 위에 올려놓는다. ②시편 상부에도 상부 지지대를 끼워

놓으면서 하부와 상부의 지지대 홀을 서로 연결하고, 이어서 상부 지지대 위로 나온 줄을 잡아당겨 시편이 상하부의 지지대내에 고정되도록 하였다. 마지막으로 그림 24의 (b)처럼 시험시편을 용기 중앙에 위치시킨 후, 침출액의 증발을 방지토록 침출용기 상부를 밀폐시키고, 이어서 침출용기의 덮개로 덮었다. 표준 침출시험법에 따라 고화체 시험시편을 침출수내에서 90 일간 침수시키며, 총 10 회의 침출액을 교체하게 된다. 침출시험을 시작한 후 누적 시간으로 2, 7, 24, 48, 72, 96, 120, 456, 1128, 2160 시간마다 침출수를 교체하고, 교체된 침출액의 pH와 전도도를 측정하였다(그림 25 참조).



그림 25. 침출수 교체 및 침출액의 pH 및 Conductivity 측정

## 제4장 연구결과

### 제1절 토양 분말의 펠릿화 결과

#### 1. 제조된 오염토양 펠릿의 상태

수분함유율 7 wt.%인 모의 오염토양 분말시료들에 대하여 25 rpm의 분말 공급속도, 1.5 rpm의 롤 회전속도, 그리고 성형압축력은 28.44 MPa의 조건으로 펠릿을 제조하였다. 그림 26과 27에서 펠릿은 매우 양호한 상태임을 알 수가 있고, 설계 롤 포켓과 동일한 크기와 모양을 갖추고 있음을 보여주고 있다. 제조된 펠릿은 매우 단단한 상태이며, 표면 역시 매우 매끄러운 상태이었다.



그림 26. Roll compactor를 이용한 펠릿 제조 모습

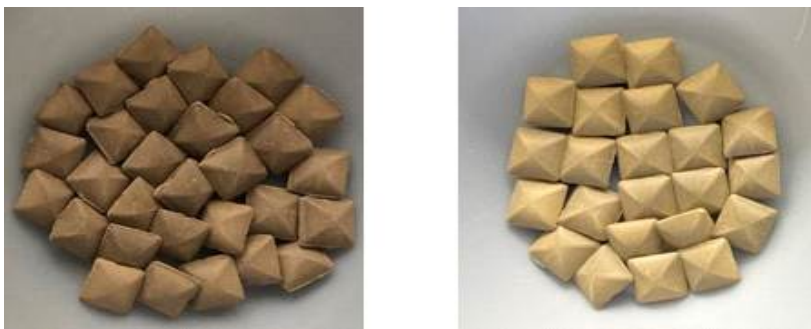


그림 27. 제조된 펠릿 모습. 일반 펠릿(좌), 침출용 펠릿(우)

## 2. 펠렛의 압축강도 측정 결과

본 실험에서는 최적 조건과 타 조건을 비교할 목적으로 분말 공급속도와 성형 압축력을 변화하며 펠렛을 제조하였다. 그리고 제조된 펠렛들은 에폭시 수지를 이용하여 강도측정을 위한 시료로 가공하였다. 성형펠렛의 강도를 측정한 결과를 표 17에 나타내었다. 표에서 보듯이 모든 운전 조건에서 강도가 4 MPa 이상이었으며, 최대는 19 MPa이었다. 분말 공급속도가 20 rpm인 경우에서의 펠렛강도가 25 rpm보다 높고 균일한 결과를 얻게 되었는데 이는 분말 공급상태, 즉 분말 공급장치내 분말의 주입높이의 차이에 기인한 것으로 보이며, 동일한 운전 조건에서 강도 값에 차이가 보이는 것은 롤 내로 주입되는 분말의 공급분포가 균일하지 못하기 때문으로 보인다. 즉 두 롤내의 마주보는 포켓은 한 열에 대하여 4개 포켓으로 구성되어 있는데 가운데 2개의 포켓에 의해 성형되는 펠렛의 강도는 매우 높지만 바깥쪽의 포켓으로 성형되는 펠렛의 강도는 다소 낮은 것으로 보였다. 이에 따라서 2개 롤 포켓내로의 분말 공급은 각 포켓으로 균일하게 공급해야함을 확인하였다.

표 17. 펠렛의 압축강도 측정결과

시료	장치운전조건			압축강도 (MPa)
	롤 회전속도 (rpm)	분말 공급속도 (rpm)	성형압축력 (MPa)	
토양 펠렛 <sup>1)</sup>	1.5	20	27.45	11.14
				10.12
				15.43
	1.5	25	27.45	4.46
				19.28
				10.48
	1.5	25	28.44	5.89
				13.37
				4.03

1) 세슘수용액과 응집제가 포함된 모의오염토양

### 3. 펠렛의 감용비 평가

폐기물의 감용비는 ‘최종 폐기물부피/폐기물 초기부피 x 100 (%)’ 로 정의된다. 분말과 펠렛의 부피 측정은 매우 어렵기 때문에, 초기의 폐기물 부피는 일정 부피의 용기에 분말을 자유 낙하시켜 무게를 측정하여 그의 겉보기 밀도를 계산하였다. 그리고 펠렛의 부피는 포켓 설계시의 포켓 부피로 계산하였으며, 이어서 펠렛의 무게를 측정하여 펠렛의 겉보기 밀도를 계산하였다. 물질의 부피는 그 물질의 밀도와 직결되어 있다. 따라서 오염토양 분말의 성형화에 따른 감용비는 성형펠렛의 밀도를 오염토양의 밀도로 나누어 계산하였으며, 그 결과를 표 18에 나타내었다.

표 18. 분말기준 감용비 측정 결과

시료번호	펠렛 무게 (g)	펠렛 밀도 (g·cm <sup>-3</sup> )		VRF <sup>3)</sup>		감용비	
		Gap <sup>1)</sup> 0 mm	Gap <sup>2)</sup> 1 mm	Gap 0 mm	Gap 1 mm	Gap 0 mm	Gap 1 mm
Pellet-1	0.6116	2.41	1.75	0.27	0.37	3.72	2.70
Pellet-2	0.6318	2.49	1.81	0.26	0.36	3.84	2.79
Pellet-3	0.6549	2.58	1.88	0.25	0.35	3.98	2.90

1) Roll gap이 0mm인 경우 펠렛의 부피 = 0.254 cm<sup>3</sup>  
 2) Roll gap이 1mm인 경우 펠렛의 부피 = 0.349 cm<sup>3</sup>  
 3) VRF = Volume Reduction Factor (감용인자)

Roll gap이 없는 경우에는 펠렛의 밀도는 2.41 ~ 2.58 g·cm<sup>-3</sup>, 1 mm인 경우에 펠렛의 밀도는 1.75 ~ 1.88 g·cm<sup>-3</sup>이었다. 그리고 오염토양의 겉보기 밀도는 0.6479 g·cm<sup>-3</sup>이었다. 이들로부터 오염토양 분말의 펠렛성형으로 인한 감용비를 계산한 결과를 표 17에 나타내었다. 표에서 보듯이 롤 간격이 없는 경우에는 VRF가 0.25 ~ 0.27, 롤 간격이 1 mm 인 경우에 0.35 ~ 0.37로 계산되었다. 즉, 보수적인 관점에서 롤 간격을 1 mm 이라 할 때, 오염토양 분말을 펠렛으로 성형하면 VRF는 0.36 이 된다는 의미이고, 이는 초기 오염토양 부피가 대략 1/2.8 배로 감소됨을 의미한다.



## 제2절 폴리머 고화체 제작 결과

### 1. 제조된 폴리머 고화체의 상태

본 실험에서 사용된 폴리머 고화매질은 분자들간 화학적 결합이 매우 강하고 소수성을 갖는 에폭시 수지로서 주제는 YD-128, 경화제로는 G-1034, 희석제로는 LGE 이었다. 에폭시 수지의 경화 혼합비율은 무게 비율로 YD-128 /G1034/LGE = 1/0.6/0.1 이었다. 이의 선정은 에폭시 수지와 펠렛간의 결합을 강화시켜 압축강도가 증진될 것이고, 소수성이기에 물과의 접촉시에도 용해되지 않아 핵종들의 내침출성이 기대되기 때문이었다. 펠렛의 고화를 위하여 우선 펠렛을 고화 몰드내에 충전시키고, 이어서 주제, 경화제, 그리고 희석제의 혼합물을 고화몰드 상부로 부어서 펠렛들간의 공극사이로 흘러 내려가게 하였으며, 이 흐름을 증진시키기 위하여 고화 몰드를 진동기 위에 올려놓아 진동시켰다. 에폭시가 완전 주입된 후에는 60 °C의 항온조 내에 넣어 에폭시 수지가 경화되도록 하였다. 이어서 5시간의 경화시간이 지난 후, 에폭시 고화체를 원통형 몰드로부터 꺼냈으며 그의 상태를 그림 28에 나타내었다. 그림에서 보듯이 외관적으로는 에폭시 경화체는 표면이 매우 매끄러웠으며, 단단하였고, 균열 등의 결함이 전혀 없었다. 이어서 각종 특성평가 시험을 위하여 에폭시 고화체의 상·하단 면을 평평하게 연마하였으며, 시험대상 시편의 각종 제원(높이, 직경, 무게, 밀도 등)을 측정하였다.



그림 28. 제조된 고화체 모습

## 2. 펠릿 고화체의 감용비 평가

본 연구의 목적은 처분부적합 오염토양의 처분을 위한 고화연구와 이를 위한 감용화 연구에 있으므로 분말기준의 감용비를 계산하였다. 고화 후 원통형 몰드로부터 폴리머 고화체를 제거한 다음 고화체의 상부를 고화체 밀면과 수평이면서, 펠릿이 외부로 노출되지 않도록 표면처리 하였다. 표면처리 후 폴리머 고화체의 각종 재원을 측정하였으며 평균값을 계산하였다. 감용비 계산은 분말의 부피를 펠릿을 함유한 폴리머 고화체의 부피로 나누어 계산할 수가 있다. 또한 폴리머 고화체 제조를 위하여 주입된 분말의 무게를 주입된 펠릿의 무게로 나누어서 감용비를 계산할 수가 있다. 이는 무게 자체가 밀도와 밀접하며, 밀도는 부피를 고려한 것이기 때문이다. 아래 그림 29처럼 고화체의 최상단 부위에 펠릿보다 오직 폴리머만이 차지하는 부피가 크기 때문에 감용비 계산이 어렵고, 오히려 실제 감용비 보다 작게 평가될 것이다.



그림 29. 고화체 표면처리 후 최상단 부위 모습

고화 단계에서의 감용화 달성은 고화용기에 주입하여 고화할 때 주입되는 폐기물의 부피를 증가시키지 않는 것으로 평가할 수가 있다. 본 연구에서의 분말 기준 감용비는 2.8이지만, 고화단계에서의 감용비는 1.8임을 확인하였다. 이와 같은 차이를 보이는 것은 일정크기와 형태를 갖는 펠릿을 고화용기내에 충전함에 따라 펠릿사이의 공극이 발생하기 때문이다. 따라서 종합적인 감용비를 계산하기 위하여서는 고화용기 부피에 해당하는 오염토양의 무게를 계산하고, 또한 고화용기내에 충전된 펠릿의 무게를 측정하여 계산해야한다. 토양분말과 펠릿의 무게를 밀도로 환산하여 감용비를 계산한 결과를 표 19에 나타내었다.

표 19. 고화체 기준 감용비 측정 결과

시료 번호	고화체 무게 (g)	고화체 부피 (cm <sup>3</sup> )	고화체 밀도 (g·cm <sup>-3</sup> )	펠릿 무게 (g)	분말 무게 (g)	VRF <sup>1)</sup>	감용비
J-01	301.85	196.61	0.9673	190.18	127.38	0.73	1.5
J-02	306.34	197.03	1.0093	198.87	127.66	0.70	1.6
J-03	314.08	197.13	1.0656	210.06	127.72	0.66	1.6
J-04	303.68	196.44	0.9673	190.02	127.27	0.73	1.5
J-05	308.43	196.77	1.0144	199.61	127.49	0.69	1.6
J-06	311.99	195.20	1.0760	210.04	126.47	0.66	1.7
J-07	299.28	194.77	0.9624	187.44	126.19	0.73	1.5
J-08	310.29	196.80	1.0205	200.84	127.51	0.69	1.6
J-09	309.77	196.37	1.0698	210.08	127.23	0.66	1.7
J-10	307.51	197.13	0.9693	191.07	127.72	0.73	1.5
J-11	309.69	196.05	1.0218	200.32	127.02	0.69	1.6
J-12	312.39	195.59	1.0673	208.75	126.72	0.66	1.6
J-13	299.45	196.12	0.9312	234.28	127.47	0.54	1.8
J-14	310.60	196.57	1.0688	233.57	126.66	0.54	1.8
J-15	309.94	197.19	1.0073	236.12	128.32	0.54	1.8

1)VRF = Volume Reduction Factor (감용인자)

표 19에서 보듯이 오염토양 분말을 폴리머로 고화하였을 때의 VRF는 약 0.54 ~ 0.73 정도이었음을 알 수가 있었다. 이 의미는 오염토양의 처분을 위하여 분말을 펠릿으로 성형시키고 이를 폴리머로 고화하였을 경우에는 초기 오염토양 부피는 약 1.8배로 줄어든다는 의미이다.

## 제3절 폴리머 고화체 특성평가 결과

### 1. 압축강도 시험

압축강도 시험은 고화체가 처분장 내에서 적재된 상태로 상부 고화체들로부터 수직하중을 직접 받기 때문에 처분장의 안전성을 평가하는데 중요한 사항이다. 압축강도 시험은 처분장 인수기준 절차서에 제시된 KS-F 2405(2017)에 의해 압축강도를 측정하였다. 한국화학융합시험원에서 수행된 펠렛이 함유된 폴리머 고화체의 압축강도 시험 전, 후의 사진 및 결과를 그림 30과 표 20에 나타내었다.



그림 30. 압축강도 측정 전(좌), 후(우) 고화체의 모습

표 20. 각 고화체의 압축강도 측정결과

시편번호	무게(g)	직경(mm)	높이(mm)	부피(cm <sup>3</sup> )	압축강도(MPa)
J-01	302.00	50.00	100.20	196.64	29.70
J-02	306.50	50.00	99.80	195.86	31.20
J-03	314.20	50.00	100.10	196.45	29.30

표 20에서 보듯이 고화체의 압축강도는 29.3 - 31.2 MPa의 범위였으며, 이는 처분장 인수기준값인 3.44 MPa (500 psig)보다 훨씬 상회하였다. 보통 단단한 물체의 압축강도는 그 물체 내부에 존재하는 결함에 크게 의존하게 되는데, 본 폴리머 고화체내에는 고강도의 펠렛이 함유되어 있고, 에폭시 수지와 펠렛간의 접착력이 매우 높았기 때문으로 판단하였다.

## 2. 열순환 시험

열순환 시험을 수행한 후, 각 고화체 시편에 대하여 외관(균열, 깨짐, 부분 파쇄 등)을 관찰하고, 외관에 아무런 변화가 없는 시편들에 대하여 압축강도를 측정하였다. 시험 전, 후의 시험시편의 재원을 측정하여 고화체의 부피 및 무게 변화율을 표 21에 나타내었다. 표 21에서 보듯이 고화체의 무게는 다소 증가하였지만 그 증가율은 미미하였고 부피 변화율 또한 매우 미미하였다.

표 21. 열순환 시험 전, 후의 각 시험시편별 재원, 부피 및 무게 변화율

시편번호		무게 (g)	직경 (mm)	높이 (mm)	부피 (cm <sup>3</sup> )	부피 변화율 (%)	무게 변화율 (%)
J-04	시험전	303.68	50.18	99.37	196.44	0.60	0.04
	시험후	303.80	49.90	99.90	195.27		
J-05	시험전	308.43	50.13	99.73	196.77	0.36	0.06
	시험후	308.60	50.00	99.90	196.05		
J-06	시험전	311.99	50.08	99.13	195.20	0.14	0.07
	시험후	312.20	50.00	99.60	195.47		

After the thermal cycling test

The compressive strength test after thermal cycling test

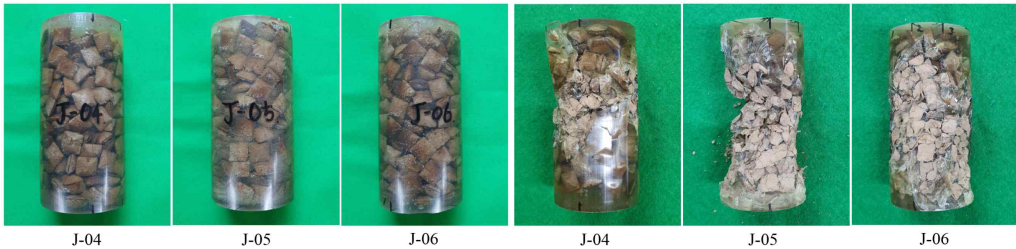


그림 31. 열순환 시험 후 고화체 모습(좌) 및 압축강도 측정 후 모습(우)

그림 31에서 보듯이 열순환 시험 후 시험시편에는 외관상으로 균열, 파쇄 및 깨짐과 같은 현상은 전혀 없었다. 외관상 통과한 고화체를 대상으로 압축강도 시험을 수행하였고, 표 22에서 보듯이 평균 압축강도는 처분장의 인수기준치인 3.44 MPa을 상회한 28.10 MPa을 보였다.

표 22. 각 고화체의 열순환 시험 후 압축강도 측정 결과

시편번호	무게(g)	직경(mm)	높이(mm)	부피(cm <sup>3</sup> )	압축강도(MPa)
J-04	303.90	50.10	100.00	197.04	28.44
J-05	308.60	50.00	100.40	197.04	28.85
J-06	312.20	50.20	99.80	197.43	27.00

### 3. 방사선조사 시험

방사선조사는 한국원자력연구원에 의뢰하여 수행하였으며, 방사선조사는 총 200 시간 동안 수행하였다. 방사선조사 후 고화체의 외관을 관찰하여 아무런 변화가 없는 시편들을 대상으로 압축강도를 측정하였다. 시험 전, 후의 시험시편의 재원을 측정하여 고화체의 부피 및 무게 변화율을 표 23에 나타내었다. 표 23에서 보듯이 고화체의 무게는 다소 증가하였지만 그 증가율은 미미하였고 부피 변화율 또한 매우 미미하였다.

표 23. 방사선조사 시험 전, 후의 각 시험시편별 재원, 부피 및 무게 변화율

시편번호		무게(g)	직경(mm)	높이(mm)	부피(cm <sup>3</sup> )	부피 변화율(%)	무게 변화율(%)
J-07	시험전	299.28	50.10	98.85	194.77	0.55	0.07
	시험후	299.50	49.90	99.10	193.71		
J-08	시험전	310.29	50.18	99.55	196.80	0.78	0.07
	시험후	310.50	49.90	99.90	195.27		
J-09	시험전	309.77	50.20	99.27	196.37	1.06	0.04
	시험후	309.90	49.90	99.40	194.29		

After the irradiation test



J-07

J-08

J-09

The compressive strength test after the irradiation test



J-07

J-08

J-09

그림 32. 방사선조사 시험 후 모습(좌) 및 압축강도 측정 후 모습(우)

그림 32에서 보듯이 방사선조사 시험 후, 시험시편에는 외관상으로 균열, 파쇄 및 깨짐과 같은 현상은 전혀 없었다. 외관상 통과한 고화체를 대상으로 압축강도 시험을 수행하였으며, 표 24에서 보듯이 평균 압축강도는 처분장의 인수기준치인 3.44 MPa를 상회한 26.37 MPa를 보였다.

표 24. 각 고화체의 방사선조사 시험 후 압축강도 측정 결과

시편번호	무게(g)	직경(mm)	높이(mm)	부피(cm <sup>3</sup> )	압축강도(MPa)
J-07	299.50	49.90	99.10	193.71	29.30
J-08	310.50	49.90	99.90	195.27	26.70
J-09	309.90	49.90	99.40	194.29	23.10

#### 4. 침수시험

90 일간의 침수시험 후, 고화체를 약 24시간 동안 자연건조 시켰다. 건조 후 시험시편의 외관을 육안상 관찰하였으며, 그 결과 고화체에는 미세한 균열, 파쇄 및 깨짐 등은 전혀 없었다. 시험 전, 후의 시험시편의 제원을 측정하여 고화체의 부피 및 무게 변화율을 표 25에 나타내었다. 표 25에서 보듯이 고화체의 무게는 다소 증가하였지만 그 증가율은 미미하였고 또한 부피 변화율도 매우 미미하였다.

표 25. 침수시험 전, 후의 각 시험시편별 제원, 부피 및 무게 변화율

시편번호		무게(g)	직경(mm)	높이(mm)	부피(cm <sup>3</sup> )	부피 변화율(%)	무게 변화율(%)
J-10	시험전	307.51	50.08	100.12	197.13	0.25	0.19
	시험후	308.13	49.90	100.60	196.64		
J-11	시험전	309.69	50.13	99.37	196.05	0.20	0.16
	시험후	310.28	50.00	99.70	195.66		
J-12	시험전	312.39	50.12	99.20	195.59	0.06	0.16
	시험후	312.99	50.00	99.60	195.47		



그림 33. 침수시험 후 고화체 모습(좌) 및 압축강도 측정 후 모습(우)

그림 33에서 보듯이 침수시험 후, 시험시편에는 외관상으로 균열, 파쇄 및 깨짐과 같은 현상은 전혀 없었다. 외관상 통과한 고화체를 대상으로 압축강도 시험을 수행하였으며, 표 26에서 보듯이 평균 압축강도는 처분장의 인수기준치인 3.44 MPa을 상회한 29.83 MPa을 보였다.

표 26. 각 고화체의 침수시험 후 압축강도 측정 결과

시편번호	무게(g)	직경(mm)	높이(mm)	부피(cm <sup>3</sup> )	압축강도(MPa)
J-10	308.10	49.90	100.60	196.64	31.90
J-11	310.20	50.00	99.70	195.66	29.20
J-12	312.90	50.00	99.60	195.47	28.40

## 5. 침출시험

침출시험은 처분장 인수기준 절차서에서 제시한 침출시험 표준시험법인 ANS 16.1[15]에 따라 수행하였다. 이에 따라 고화체 시험시편을 침출수내에서 90 일간 침수시키고, 침출시험을 시작한 후 누적 시간마다 총 10회에 걸쳐 침출수를 교체하고, 교체된 침출액의 pH, Conductivity, 그리고 핵종 농도를 측정하였다. 여기서, 침출수는 국내에서 시판되는 탈염수를 구매하여 사용하였다. 시험 시편은 그림 34와 같이 직경과 높이 모두 50 mm인 크기였다. 핵종 농도 측정은 그림 35과 같이 유도결합 플라즈마 시스템(Inductively Coupled Plasma System)을 사용하여 측정하였다.





그림 34. 침출 시험을 위한 시험 시편



그림 35. 침출액 내 화학종 분석 장치

90 일간의 침출시험 후, 침출 시험시편의 제원을 측정하고 시험 전의 시편과 비교한 결과를 표 27에, 침출 시험 후의 시험시편을 그림 36에 나타내었다. 표 27에서 보듯이 침출 시험 후 고화체 시편의 무게 및 부피 변화율은 매우 미미하였다. 침출 시험 전후의 고화체 시편의 무게 및 부피 변화율은 큰 의미가 없는데 이는 고화매질 자체가 소수성이기 때문이다.



그림 36. 침출 시험 후의 고화체 시편

표 27. 침출시험 후의 각 시험시편별 제원 및 부피 및 무게 변화율

시편 번호		무게 (g)	직경 (mm)	길이 (mm)	부피 (cm <sup>3</sup> )	부피 변화율 (%)	무게 변화율 (%)
J-19	실험전	149.68	49.98	49.53	97.14	0.10	0.34
	실험후	150.19	50.00	49.55	97.24		
J-20	실험전	150.24	50.00	49.42	96.98	0.10	0.23
	실험후	150.59	50.02	49.43	97.08		

표 28. 침출 시험 후의 교체된 침출액의 pH 및 EC(전기전도도) 측정결과

번호	누적일수(일)	J-19		J-20	
		pH	EC <sup>1)</sup>	pH	EC <sup>1)</sup>
0	0	6.62	1.18	6.62	1.18
1	0.083	7.73	8.89	7.57	17.60
2	0.292	7.07	2.21	6.82	1.82
3	1	6.91	5.40	6.72	5.97
4	2	6.61	1.83	6.92	1.70
5	3	6.69	1.87	6.83	2.64
6	4	6.31	1.37	6.23	1.55
7	5	6.54	1.91	6.66	2.05
8	19	6.72	2.08	6.64	1.97
9	47	7.26	2.53	7.08	2.38
10	90	6.80	2.65	7.19	2.32

1) EC = Electronic Conductivity(전기전도도)

침출 시험과정에서 침출수 교체마다 교체된 침출액의 pH와 전기전도도(Orion Star A215 사용)를 측정하여 표 28에 나타냈으며, 이를 도식화하여 그림 36과 그림 37에 나타내었다. 표 28와 그림 37, 38에서 보듯이 pH 농도는 6 ~ 8사이, 전기전도도(EC)는  $20 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 이하로 매우 양호한 값을 보였다.

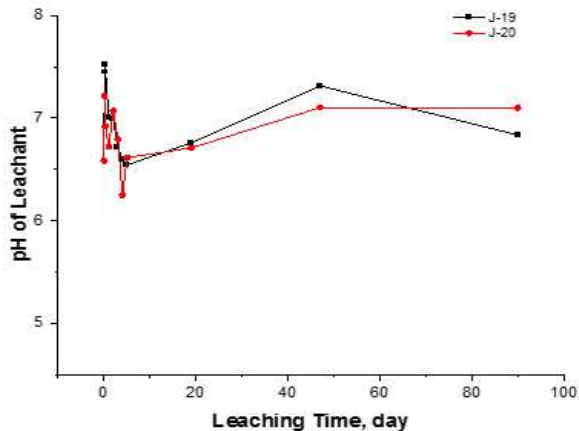


그림 37. 침출액 교체에 따른 침출액의 pH

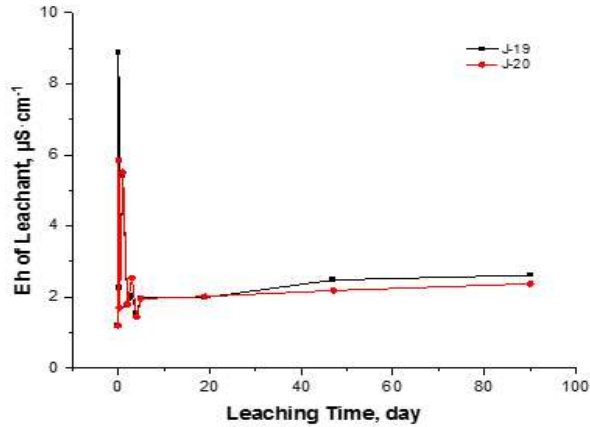


그림 38. 침출수 교체에 따른 침출액의 conductivity

또한 ANS 16.1에서 요구하는 시간에 침출액을 새로운 침출수로 교체하면서 각 교체시기마다 교체된 침출액으로부터 일정량의 시료를 채취하여 분석한 농도를 시험시편별로 표 29, 30에 나타내었다.

표 29. 침출수 교체시 침출액의 화학종 농도(J-19)

번호	누적일수 (일)	pH 및 EC		농도 (mg)		
		pH	EC	Co	Cs	Sr
0	0	6.62	1.18	481.9977	603.4400	391.3384
1	0.083	7.73	8.89	0.0001	0.0004	0.0065
2	0.292	7.07	2.21	0.0001	0.0002	0.0054
3	1	6.91	5.40	0.0001	0.0003	0.0055
4	2	6.61	1.83	0.0001	0.0003	0.0067
5	3	6.69	1.87	0.0001	0.0002	0.0052
6	4	6.31	1.37	0.0001	0.0002	0.0053
7	5	6.54	1.91	0.0001	0.0001	0.0046
8	19	6.72	2.08	0.0001	0.0004	0.0046
9	47	7.26	2.53	0.0001	0.0013	0.0043
10	90	6.80	2.65	0.0001	0.0012	0.0004

표 30. 침출수 교체시 침출액의 화학종 농도(J-20)

번호	누적일수 (일)	pH 및 EC		농도 (mg)		
		pH	EC	Co	Cs	Sr
0	0	6.62	1.18	482.8148	604.3946	391.9464
1	0.083	7.57	17.60	0.0001	0.0002	0.0060
2	0.292	6.82	1.82	0.0001	0.0001	0.0054
3	1	6.72	5.97	0.0001	0.0001	0.0037
4	2	6.92	1.70	0.0001	0.0001	0.0059
5	3	6.83	2.64	0.0001	0.0001	0.0055
6	4	6.23	1.55	0.0001	0.0001	0.0052
7	5	6.66	2.05	0.0001	0.0001	0.0055
8	19	6.64	1.97	0.0001	0.0002	0.0044
9	47	7.08	2.38	0.0001	0.0002	0.0042
10	90	7.19	2.32	0.0001	0.0002	0.0004

폴리머 고화체로부터 누출된 화학종이나 핵종의 침출지수(leachability index)는 다음과 같은 절차에 의해서 계산되어 진다. 우선 침출된 핵종이나 화학종의 농도를 분석한 후, 아래 식을 이용하여 유효 확산계수(effective diffusivity, diffusion coefficient)를 구한다.

$$D = \pi \left[ \frac{a_n/A_o}{(\Delta t)_n} \right]^2 \left[ \frac{V}{S} \right] T$$

여기서, D = 유효확산계수 ( $cm^2/s$ )

V = 시편의 체적 ( $cm^3$ )

S = 시편의 표면적 ( $cm^2$ )

$$(\Delta t)_n = t_n - t_{n-1} \quad n\text{번째 침출구간에서의 시간 (s)}$$

$$T = \left[ \frac{1}{2} (t_n^{1/2} + t_{n-1}^{1/2}) \right]^2 \quad n\text{번째 침출구간의 평균시간을 나타내는 침출시간 (s)}$$

이어서, 앞서 구한 각 침출구간에서의 유효 확산계수들을 아래 식처럼 합하여 10으로 나누어 평균 침출지수를 구한다.

$$Li = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} [\log(1/Di)]_n$$

이들 침출지수 산출을 위한 계산식으로부터 구한 시험시편별 및 화학종별로 구분하여 그림 39과 표 32, 33에 나타내었다. 이를 근거 각 시편에서의 화학종별 평균 침출지수를 아래 표 31에 나타내었다.

표 31. 화학종별 평균 침출 지수

시편번호	펠렛성분	침출지수		
		Co	Cs	Sr
J-19	모의오염토양 <sup>1)</sup>	17.76	17.02	14.00
J-20	모의오염토양 <sup>1)</sup>	17.76	17.74	14.07

1)모의오염토양: CsNO<sub>3</sub>+Soil+J-AF

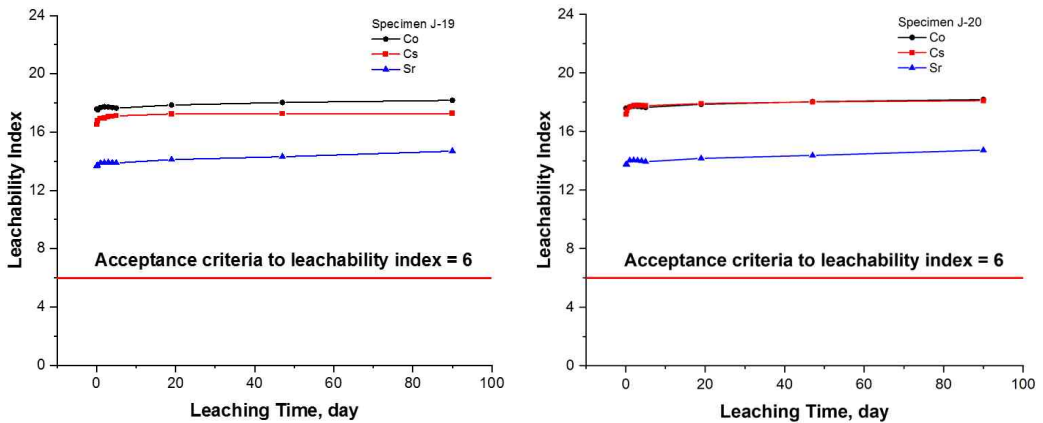


그림 39. J-19, J-20의 누적 침출지수 그래프

표 32. 침출지수 계산(J-19)

Leach Interval		Leaching Time(sec)		Released Amount (ppm)			Released ratio (released/initial)			volume/surface ratio	Effective diffusivity (cm <sup>2</sup> /s)			Leachability Index			
		duration time (sec)	mean time of leaching interval (sec)														
No	sec	$(\Delta t)_n$	$T$	$a_n$			$a_n/A_o$			v/s	$D = \pi \left[ \frac{a_n/A_o}{(\Delta t)_n} \right]^2 \left[ \frac{V}{S} \right]^2 T$			$Li = \log(1/Di)$			
				Co	Cs	Sr	Co	Cs	Sr		Co	Cs	Sr	Co	Cs	Sr	
1	7,200	7,200	1,800	9.00E-05	3.80E-04	6.47E-03	1.87E-07	6.30E-07	1.65E-05	0.83	2.62E-18	2.98E-17	2.05E-14	17.582	16.526	13.688	
2	25,200	18,000	14,835	9.00E-05	1.90E-04	5.41E-03	1.87E-07	3.15E-07	1.38E-05	0.83	3.45E-18	9.82E-18	1.89E-14	17.522	16.767	13.705	
3	86,400	61,200	51,231	9.00E-05	2.70E-04	5.53E-03	1.87E-07	4.47E-07	1.41E-05	0.83	1.03E-18	5.92E-18	5.91E-15	17.677	16.920	13.880	
4	172,800	86,400	125,894	9.00E-05	3.00E-04	6.69E-03	1.87E-07	4.97E-07	1.71E-05	0.83	1.27E-18	9.02E-18	1.07E-14	17.731	16.952	13.903	
5	259,200	86,400	213,818	9.00E-05	1.50E-04	5.21E-03	1.87E-07	2.49E-07	1.33E-05	0.83	2.16E-18	3.83E-18	1.10E-14	17.718	17.045	13.914	
6	345,600	86,400	300,849	9.00E-05	1.60E-04	5.31E-03	1.87E-07	2.65E-07	1.36E-05	0.83	3.04E-18	6.13E-18	1.61E-14	17.685	17.073	13.894	
7	432,000	86,400	387,596	9.00E-05	1.20E-04	4.63E-03	1.87E-07	1.99E-07	1.18E-05	0.83	3.92E-18	4.44E-18	1.57E-14	17.645	17.113	13.881	
8	1,641,600	1,209,600	939,462	9.00E-05	4.20E-04	4.58E-03	1.87E-07	6.96E-07	1.17E-05	0.83	4.84E-20	6.73E-19	1.90E-16	17.854	17.245	14.111	
9	4,060,800	2,419,200	2,716,550	9.00E-05	1.25E-03	4.28E-03	1.87E-07	2.07E-06	1.09E-05	0.83	3.50E-20	4.31E-18	1.20E-16	18.032	17.258	14.312	
10	7,776,000	3,715,200	5,768,861	9.00E-05	1.24E-03	3.60E-04	1.87E-07	2.05E-06	9.20E-07	0.83	3.15E-20	3.82E-18	7.65E-19	18.179	17.274	14.693	
														평균	17.76	17.02	14.00

\*  $T = \left[ \frac{1}{2} (t_n^{1/2} + t_{n-1}^{1/2}) \right]^2$ ,  $t = \sum (\Delta t)_n$

표 33. 침출지수 계산(J-20)

Leach Interval		Leach Time(sec)		Released Amount (ppm)			Released ratio (released/initial)			volume/surface ratio	Effective diffusivity (cm <sup>2</sup> /s)			Leachability Index		
		duration time (sec)	mean time of leaching interval (sec)													
No	sec	$(\Delta t)_n$	$T^*$	$a_n$			$a_n/A_o$			V/S	$D = \pi \left[ \frac{a_n/A_o}{(\Delta t)_n} \right]^2 \left[ \frac{V}{S} \right]^2 T$			$Li = \log(1/Di)$		
				Co	Cs	Sr	Co	Cs	Sr		Co	Cs	Sr	Co	Cs	Sr
1	7,200	7,200	1,800	9.00E-05	1.80E-04	6.00E-03	1.86E-07	2.98E-07	1.53E-05	0.83	2.61E-18	6.66E-18	1.76E-14	17.583	17.176	13.754
2	25,200	18,000	14,835	9.00E-05	9.00E-05	5.39E-03	1.86E-07	1.49E-07	1.38E-05	0.83	3.44E-18	2.20E-18	1.87E-14	17.523	17.417	13.741
3	86,400	61,200	51,231	9.00E-05	9.00E-05	3.67E-03	1.86E-07	1.49E-07	9.36E-06	0.83	1.03E-18	6.56E-19	2.59E-15	17.678	17.673	14.023
4	172,800	86,400	125,894	9.00E-05	9.00E-05	5.88E-03	1.86E-07	1.49E-07	1.50E-05	0.83	1.27E-18	8.09E-19	8.21E-15	17.733	17.777	14.038
5	259,200	86,400	213,818	9.00E-05	9.00E-05	5.46E-03	1.86E-07	1.49E-07	1.39E-05	0.83	2.15E-18	1.37E-18	1.20E-14	17.720	17.794	14.015
6	345,600	86,400	300,849	9.00E-05	9.00E-05	5.22E-03	1.86E-07	1.49E-07	1.33E-05	0.83	3.03E-18	1.93E-18	1.55E-14	17.686	17.781	13.981
7	432,000	86,400	387,596	9.00E-05	9.00E-05	5.52E-03	1.86E-07	1.49E-07	1.41E-05	0.83	3.90E-18	2.49E-18	2.23E-14	17.647	17.756	13.934
8	1,641,600	1,209,600	939,462	9.00E-05	1.70E-04	4.37E-03	1.86E-07	2.81E-07	1.11E-05	0.83	4.83E-20	1.10E-19	1.73E-16	17.855	17.906	14.162
9	4,060,800	2,419,200	2,716,550	9.00E-05	2.20E-04	4.17E-03	1.86E-07	3.64E-07	1.06E-05	0.83	3.49E-20	1.33E-19	1.14E-16	18.033	18.014	14.360
10	7,776,000	3,715,200	5,768,861	9.00E-05	2.40E-04	4.10E-04	1.86E-07	3.97E-07	1.05E-06	0.83	3.14E-20	1.43E-19	9.89E-19	18.180	18.097	14.725
													평균	17.76	17.74	14.07

\*  $T = \left[ \frac{1}{2} (t_n^{1/2} + t_{n-1}^{1/2}) \right]^2$ ,  $t = \sum (\Delta t)_n$

## 6. 폴리머 고화체의 특성평가 요약

중·저준위 방사성폐기물 인수기준에 규정된 5가지의 특성평가(압축강도, 열순환, 방사선조사, 침수, 침출 시험)를 수행하였다. 각 특성 시험 후의 고화체를 대상으로 깨짐, 부스러짐, 평윤 등의 현상이 나타났는지를 육안상으로 확인하였다. 이때, 육안검사를 통과한 고화체를 대상으로 압축강도를 측정하였으며, 시험 결과는 아래와 같다(표 34, 그림 40 참조).

오염토양 펠렛이 함입된 폴리머 고화체의 압축강도는 29.3 ~ 36.3 MPa의 범위였으며, 열순환시험 후 압축강도는 27.00 ~ 34.60 MPa, 방사선조사 후 압축강도는 23.10 ~ 29.30 MPa, 침수 시험 후 압축강도는 28.40 ~ 31.90 MPa로 측정되었다. 이는 처분장 인수기준 값인 3.44 MPa보다 훨씬 높은 값이며, 각 특성시험 전과 후의 고화체 무게/부피 변화율은 2% 미만으로 매우 낮았다.

특히, 침출 시험은 ANS 16.1에 따라 90일 동안 수행하였으며, 침출액의 pH는 6.07 ~ 7.95, conductivity는 1.18 ~ 17.60  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  이었다. 또한 침출액 내의 화학종을 분석한 결과, 평균 침출지수는 Co, Cs 그리고 Sr 순으로 각각 17.76, 17.38, 14.04 으로 처분장 인수기준 ( $\geq\text{LX}:6$ )보다 높았다. 최종적으로 각 특성평가 시험 후 고화체의 합격유무 판정시 모두 만족한 것으로 확인되었다.

표 34. 특성평가 시험 후 고화체의 합격유무 판정

특성평가 시험	시험 결과		합격 기준	Pass / Fail
	압축강도 (MPa)	침출지수		
압축강도	30.07	-	$\geq 3.44$ (MPa)	Pass
열순환	28.10			
방사선조사	26.37			
침수	29.83			
침출	-	Co : 17.76 Cs : 17.38 Sr : 14.04	$\geq \text{LX} : 6$	Pass



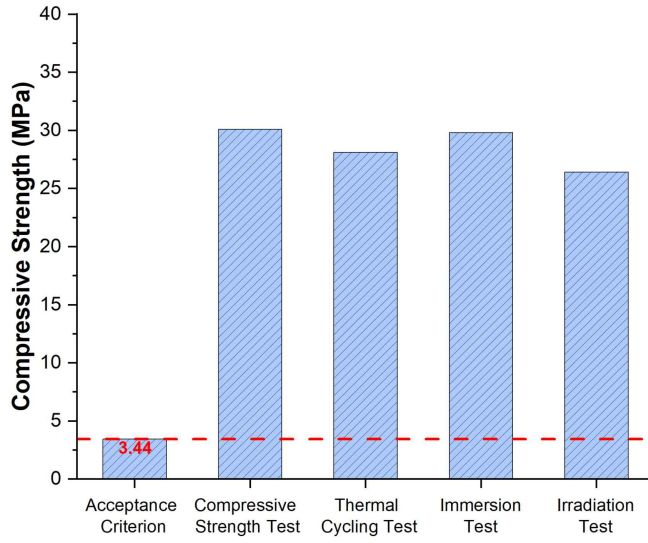


그림 41. 특성평가 후 고화체 압축강도 측정결과

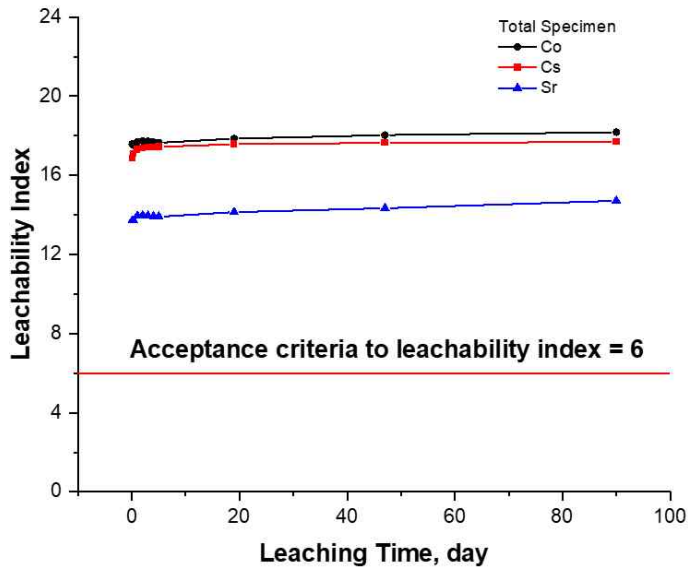


그림 42. 침출시험 후 평균 누적침출지수 결과

## 제5장 결론 및 제안

본 연구에서는 토양세척 후 발생하는 처분부적합한 슬러지 상태의 2차폐기물을 처분하기 위해, 모의방사성오염토양을 제조하여 분말화하였다. Roll compactor를 사용하여 제조된 모의 오염토양 분말시료(수분함유율 7 wt.%)를 펠렛으로 성형압축하였다. 이때 장치의 최적운전조건은 25 rpm의 분말 공급속도, 1.5 rpm의 롤 회전속도, 그리고 성형압축력은 28.44 MPa 이었다. 펠렛의 압축강도는 최대 13.37 MPa로 측정되었고, 분말 대비 성형된 펠렛의 감용비는 대략 2.8배 부피가 감소된 것으로 확인되었다. 이어서 성형된 펠렛을 함유한 폴리머 고화체를 제작하였고, 고화매질로서 사용된 폴리머의 최적 혼합비율은 YD-128:G-1034:LGE = 100:60:10 이었다. 제조된 고화체는 분말 대비 약 1.8배 부피가 감소됨을 확인하였다. 고화체를 대상으로 처분장 인수기준에 규정된 총 5가지의 특성평가를 수행하였다. 각 특성 시험 후 압축강도는 인수기준인 3.44 MPa(500 psig)를 모두 상회하였다. 평균 침출지수는 Co, Cs 그리고 Sr 순으로 각각 17.76, 17.38, 14.04 으로 처분장 인수기준( $\geq LX:6$ )을 충족함을 보였다. 따라서, 본 연구에서 제조된 오염토양(건조된)을 함유한 폴리머 고화체의 특성평가 시험 결과 모든 항목에서 인수기준을 만족하는 것으로 확인되었다.

원전 사고 및 해체시처럼 예기치 못하게 또는 대량의 오염토양이 발생하는 경우에는 단 시간 내에 이를 제염하여 환경복원이 이루어져야한다. 따라서 추가적인 연구와 실험을 통해 수정보완하여 적용한다면 토양세척 후 제염된 토양은 환경으로 복원하고, 제염공정에서 발생하는 미세 크기토양(2차폐기물)은 펠렛화 및 고화처리 과정을 거쳐 처분장에 인도할 수 있다고 판단된다. 따라서 해당 감용기술 및 고화기술을 통하여 다량의 방사성 오염토양을 처리/처분 할 수 있으며, 과도한 처분 비용 및 처분장의 조기 포화문제 해결에 적용할 수 있다고 사료되어진다. 또한, 원전 해체시 발생하는 오염토양을 단 시간 내에 처리하여 해체공정의 지연 및 해체 비용의 증가 문제도 해결 가능하다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 체르노빌 원전사고로 인한 환경영향과 복원, KEITI, 2011
- [2] KNS Committee on the Fukushima Accident, ‘Fukushima Accident a nalysis report’ , (2012)
- [3] 원자력시설 주변 토양의 방사성 관리 기술 조사 보고서, 동국대학교 원전 사고로 인한 광역의 Cs 오염토양 무산(Non-Acid)제염 공정기술 및 장비개발, 산업통상자원부 (2017)
- [4] Korea Electric Power Corporation Research Institute of
- [5] Technology, Development of radioactive waste solidification process program, KRC-87N-J05 (1989).
- [6] Influence of Physicochemical Properties on Cesium Adsorption on to Soil, J.Soil Groundw. Environ., Vol.22(1), p. 27~32, 2017
- [7] 중·저준위 방사성폐기물 동굴처분시설 인수기준, WAC-SIL, 2020-1
- [8] 토양환경센터, <http://www.sec.re.kr>
- [9] 펄스동전기 기술을 이용한 오염토양의 현장 원위치 정화기술 개발, 환경부 (2007)
- [10] A Study on the Pelletization of Powdered Radioactive Waste by R oil Compaction, JNFCWT(2019)
- [11] Johanson, J.R., 1965. A rolling theory for granular solids. J. Appl. Mech. 32, 842-848
- [12] Korean Agency for Technology and Standards, ‘Standard test met hod for compressive strength of concrete, KS F 2405, (2010)
- [13] American Society for Testing and Materials, ‘Standard test method for thermal cycling of electroplated plastics, (1985)
- [14] Nuclear Regulatory Commission, Technical Position on Waste For m, Rev.1, (1991)
- [15] American Nuclear Society, Measurement of the leachability of so lidified low-level radioactive wastes by a short-term test proc edure, ANSI/ANS-16.1, (2003)

## 감사의 글

석사 학위 논문 심사를 마치고 다시금 돌아해보니, 저의 학위논문이 잘 마무리될 수 있게 많은 분들의 도움이 있었습니다. 이 글을 통해 감사의 인사를 드리고자 합니다.

먼저 부족한 저를 받아주시고 아낌없는 지도를 해주신 송종순 교수님께 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 교수님의 격려와 지도덕분에 제가 많이 성장할 수 있었습니다. 더불어 논문을 심사하는 과정에서 아낌없는 조언을 해주신 이경진 교수님, 정운관 교수님께 감사를 표합니다. 그리고 석사과정 동안 많은 지식과 가르침을 주신 김기홍 박사님, 나만균 교수님, 김진원 교수님, 김종현 교수님, 공태영 교수님께도 감사합니다.

약 27개월동안 함께한 핵주기공학 실험실 형, 동생들에게도 감사하다는 말을 하고 싶습니다. 항상 격려해주시고, 챙겨주시고 아낌없는 조언해주신 선일이형, 실험실 잘 적응하도록 먼저 다가와주신 학윤이형, 2년간 많이 챙겨주신 상현이형, 힘들 때마다 먼저 연락주시고 조언해주신 기태형, 제가 무리한 부탁을 해도 항상 웃으면서 도와주신 민호형, 1년동안 많이 도와줬는데 형으로써 챙겨주지 못해 미안한 현성, 영진이에게 감사의 뜻을 전합니다. 특히 2년동안 부족한 저를 이끌어주시고, 많이 챙겨주신 상현이형께 항상 죄송하고 감사하다는 말씀드립니다.

바쁘다고 자주 만나지도 못했지만 만날 때마다 항상 내편들어주는 두암동 친구들(인석, 우석, 병록, 재용, 동호), 대학동기들(상훈, 태의, 영민, 준혁, 명훈, 지원, 명진)에게도 감사를 전합니다. 그리고 연락안해도 먼저 만나자고 연락주는 송화, 은정, 예량, 상민이에게도 감사를 전합니다.

마지막으로 부모님과 동생 그 외 많은 가족분들에게도 감사를 전합니다. 석사 졸업 발표하고 서울로 찾아뵙겠다고 연락드렸는데 먼저 떠나버리신 할아버지께 너무 죄송하고 살아계시는동안 많이 챙겨주셔서 감사의 뜻을 전합니다.

감사해야 할 분도, 미안함을 전해야 할 분도 많지만 지면의 한계를 핑계로 감사의 글을 마칩니다. 감사합니다.