

2020년 2월  
석사학위 논문

원전 해체 슬러지 폐기물  
처분을 위한  
고화체 특성평가 연구

조선대학교 대학원  
원자력공학과  
임 상 현

원전 해체 슬러지 폐기물  
처분을 위한  
고화체 특성평가 연구

A Study on the Characterization of Solidified Waste Form  
for Decommissioned Sludge Waste for Disposal

2020년 2월 25일

조선대학교 대학원  
원자력공학과  
임 상 현

원전 해체 슬러지 폐기물  
처분을 위한  
고화체 특성평가 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함  
2019년 10월

조선대학교 대학원  
원자력공학과  
임 상 현

## 임상현의 석사학위논문을 인준함

위원장    조선대학교    교수    이 경 진    (인)

위    원    조선대학교    교수    송 종 순    (인)

위    원    조선대학교    교수    나 만 균    (인)

2019년 11월

조선대학교 대학원

## 목 차

ABSTRACT .....	1
제1장 서론 .....	3
제2장 이론적 배경 .....	5
제1절 처분부적합 폐기물 .....	5
1. 원전운영 및 해체 방사성폐기물 .....	5
2. 방사성 슬러리/슬러지 폐기물 .....	10
3. 방사성폐기물 처분 관련 규정 .....	14
제2절 처분부적합 폐기물의 처리 방법 .....	20
1. 방사성 폐기물 고화 처리 기술 .....	20
2. 방사성 슬러지 처리 기술 .....	22
제3절 슬러지 분말의 성형 기술 .....	24
1. 롤 압축 성형의 특징 .....	24
2. 롤 압축 성형의 주요인자 .....	25
3. 롤 압축 성형장치 .....	26
제3장 실험재료 및 방법 .....	28
제1절 실험재료 .....	28
1. 모의 해체 슬러지 .....	28
2. 폴리머 .....	40
제2절 실험방법 .....	44
1. 슬러지 분말의 펠렛 성형 .....	44
2. 슬러지 펠렛의 고화체 제작 .....	45
3. 슬러지 펠렛의 고화체 특성평가 .....	46

제4장 연구결과 .....	50
제1절 슬러지 분말의 펠릿 성형 결과 .....	50
1. 성형장치 운전기준의 영향 및 평가 .....	50
2. 성형 펠릿의 제조 및 평가 .....	53
제2절 슬러지 펠릿의 고화체 제작 결과 .....	55
1. 펠릿 고화체 제작 결과 .....	55
2. 펠릿 고화체 감용비 평가 .....	56
제3절 슬러지 펠릿의 고화체 특성평가 결과 .....	58
1. 압축강도 시험결과 .....	58
2. 침수시험 결과 .....	60
3. 열순환 시험결과 .....	62
4. 방사선 조사시험 결과 .....	64
5. 고화체 특성평가 요약 .....	66
제5장 결론 및 제안 .....	67
제1절 결론 .....	67
제2절 제안 .....	69
제6장 참고문헌 .....	70

## 그림 목차

그림 1. 처분부적합 폐기물의 발생모습 - 제염해체 슬러지(L), 제염 후 2차폐기물(R) .....	11
그림 2. Schematic of IAEA radioactive waste classification scheme .....	15
그림 3. 고화매체 종류에 따른 방사성 폐기물 고화 기술 .....	20
그림 4. Schematic diagram of a roll compaction process .....	24
그림 5. 롤 포켓 설계도 - 원형 포켓(위), 사각형 포켓(아래) .....	26
그림 6. 펠렛 성형장치 - 측면도, 입면도, 정면도 .....	27
그림 7. Particle size distribution of bentonite (No.1) .....	35
그림 8. Particle size distribution of soil sludge (No.2) .....	35
그림 9. Particle size distribution of concrete sludge (No.3) .....	35
그림 10. Particle size distribution of sump sludge (No.4) .....	35
그림 11. SEM of soil sludge - (x100, x100) .....	36
그림 12. SEM of concrete sludge - (x1,000, x5,000) .....	37
그림 13. SEM of sump sludge - (x1,000, x5,000) .....	37
그림 14. Uniaxial compressor's concept and its jig for compression of powder .....	37
그림 15. Applied pressure(force) to determine the compressibility .....	38
그림 16. Simulated sludge compressed by uniaxial compressor .....	38
그림 17. 경화 시간에 따른 고화체의 내부 온도변화 .....	43
그림 18. 열전대를 이용한 온도측정 모습 .....	43
그림 19. Pellet forming device - side(L), front(R) .....	44
그림 20. 60 °C의 항온조 내에서 경화모습 .....	45
그림 21. Initial 1 cycle graph of the thermal cycling test .....	48
그림 22. Changes in the mass of the pellets depending on the variables	
- Roll Speed .....	50
그림 23. Changes in the mass of the pellets depending on the variables	
- Feeding Rate .....	51
그림 24. Changes in the mass of the pellets depending on the variables	
- Hydraulic Pressure .....	51

그림 25. Gap distance and compaction depending on the compressive force .....	52
그림 26. 제조된 펠렛의 모습 - Tertragonal shape(L), Circular shap(R) .....	52
그림 27. 고감용화 성형장치를 이용한 펠렛 제조 모습 .....	53
그림 28. 모의 해체 슬러지별 시료분말의 모습 .....	53
그림 29. 제조된 모의 해체 슬러지별 펠렛 모습 .....	53
그림 30. 폴리머 혼합비율별 고화체 모습(007, 008, 009, 010) .....	55
그림 31. 슬러지별 폴리머 고화체 모습 .....	55
그림 32. 고화체의 최상단 부위의 모습 .....	56
그림 33. 압축강도 측정 전·후의 모습 .....	58
그림 34. 침수시험 시편 모습 .....	60
그림 35. 침수시험 후 압축강도 측정 전·후의 모습 .....	60
그림 36. 열순환 시험 후 압축강도 측정 전·후의 모습 .....	62
그림 37. 방사선 조사시험 모습 .....	64
그림 38. 방사선 조사시험 후 압축강도 측정 전·후의 모습 .....	64
그림 39. Compressive strength comparison for the pellet solidification samples .....	66



## 표 목차

표 1. 해체전략에 따른 오염토양 폐기물의 예상 발생량 .....	8
표 2. 고리 1호기 액체 폐기물 및 폐액의 예상 발생량 .....	9
표 3. Bio-shield 콘크리트의 주요 방사성 핵종별 방사능 .....	10
표 4. Radioactive Toxic Substances in Typical Waste Streams at Nuclear Power Plants .....	12
표 5. Waste Type of Low and Medium Level Secondary Waste .....	13
표 6. IAEA Waste Form And Waste Packages Properties .....	14
표 7. Requirements for Disposal of Radioactive Waste(10 CFR 61) .....	16
표 8. 저준위방사성폐기물의 방사능 농도 제한치 .....	17
표 9. 폐기물 포장물 서류검사 판정기준 .....	18
표 10. 처분 안전성을 위한 인수기준 시험 방법 .....	19
표 11. 처분 안전성을 위한 폐기물 고화체 판정기준 .....	19
표 12. Test criteria of the solidification waste sample .....	19
표 13. Roll compaction performance .....	25
표 14. 펠렛 성형장치의 각부 명칭 .....	27
표 15. 펠렛 성형장치의 기술 사양 .....	27
표 16. 고리1호기 발생 예측 슬러지 종류 및 발생원 .....	28
표 17. 슬러지별 무기물 화학적 조성(wt.%) .....	29
표 18. 벤토나이트 시료의 XRD 분석결과와 팽창지수 .....	30
표 19. 토양 입도 분류(mm) .....	31
표 20. 토양 입도 분류에 사용되는 메쉬(MESH) .....	31
표 21. 토양의 무기물 화학적 조성(wt.%) .....	31
표 22. 국내 시판용 포틀랜드 시멘트의 조성 .....	32
표 23. 시판용 포틀랜드 시멘트의 조성별 무게 계산(한일 시멘트) .....	32
표 24. Characteristics of the Sump Sludge .....	33
표 25. Chemical Composition of the Sump Sludge (550 °C, 1hr dried) .....	33
표 26. Sump Sludge의 화학적 조성에 따른 산화물로의 질량 계산 .....	34
표 27. 모의 슬러지별 입자 크기의 누적 분포율 .....	36

표 28. Compressibility of Various Sludge After Compression .....	39
표 29. LGE 첨가량에 따른 점도 측정 결과 .....	40
표 30. 예비시편 제조 - 폴리머 구성물의 혼합비 .....	41
표 31. Specification of the compressive strength test machine .....	46
표 32. Irradiation test condition .....	49
표 33. 토양 펠렛의 감용비 .....	54
표 34. 콘크리트 슬러지 펠렛의 감용비 .....	54
표 35. 선타 슬러지 펠렛의 감용비 .....	54
표 36. Calculated Volume Reduction of Waste Form(3 Sludge) .....	57
표 37. Results of the compressive strength test .....	59
표 38. Acceptable test of the compressive strength test .....	59
표 39. Polymer(Epoxy) solid sate data - Before the water immersion test .....	61
표 40. Results of the compressive strength test after water immersion test .....	61
표 41. Acceptable test of the compressive strength test after water immersion test .....	61
표 42. Polymer(Epoxy) solid sate data - Before the thermal cycling test .....	63
표 43. Results of the compressive strength test after thermal cycling test .....	63
표 44. Acceptable test of the compressive strength test after thermal cycling test .....	63
표 45. Polymer(Epoxy) solid sate data - Before the irradiation test .....	65
표 46. Results of the compressive strength test after irradiation test .....	65
표 47. Acceptable test of the compressive strength test after irradiation test .....	65
표 50. Test results & acceptable test of pellet solidification samples .....	66

## ABSTRACT

### A Study on the Characterization of Solidified Waste Form for Decommissioned Sludge Waste for Disposal

Lim Sanghyun

Advisor : Prof. Jong soon Song, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

The first commercial nuclear power plant in Korea, which started operation in 1978, Kori NPP Unit 1, was permanently shut down in 2017, and now awaits decommissioning. If the wastes from the decommissioning of a nuclear power plant is treated through conventional cement solidification, the volume of final wastes will increase. Also, after the process was changed to paraffin solidification, it was found that paraffin solids cannot be disposed of. So the wastes cannot be solidified, and they are temporarily stored as powder. To solve this problem, some nuclear power plants in Korea are operating both the CTS(Concentrate Treatment System, evaporation and granulation) and polymer coagulation system. As the wastes generated by CTS are particularized and distributed very widely(diameter : a few  $\mu\text{m}$  ~ a few cm), however, pores cannot be formed between fine particles. As a result, it is expected that the disposal cost will increased and the acceptability of disposal facilities will decrease. Accordingly, the technology for treating/dispose of radioactive sludge and slurry unfit to be disposed of, which will be generated in the process of decommissioning nuclear power plants, needs to be developed urgently, and lastly it will also be necessary to develop the technology for reducing the

volume of wastes while satisfying the disposal facility Waste Acceptance Criteria(WAC).

This study deals with the powdered(particulates and dispersibility) wastes that are not treated because there is no treatment technology. They include concentrated waste powder, crushed concrete, slurry/sludge and decontamination sludge, which are generated during the operation and decommissioning of nuclear power plants, and micro-size contaminated soil that is difficult to decontaminate. When these target wastes are polymer-solidified, the powdered radioactive wastes are compacted into high-density pellets of the same size. As uniform pores are formed between pellets, the penetration of polymer will be easy, and as liquid mediums fill the space between pores before solidification, the volume will not increase either. Rather, as the volume density of radioactive wastes is reduced first, and the filling rate inside the drum can be improved, a high volume reduction effect can be achieved. Accordingly, this study will use the pellet forming device, based on the roll compaction system technology, to turn the powdered wastes into pellets to dispose of the sludge wastes generated during the decommissioning of a nuclear power plant, and apply the technology for solidifying wastes with polymer by invaginating highly compacted pellets.

That is, the dry powder of the sludge wastes, generated during the decommissioning of nuclear power plants, were compacted, and a study, focused on evaluation of properties, was conducted for checking if the disposal facility waste acceptance criteria are met so that the pellet solidified waste form, which were made by invaginating the compacted pellets, can be finally disposed of. The experiment was based on the disposal facility waste acceptance criteria and delivery regulation, established by Korea Radioactive Waste Agency, and the solidified waste form judgment criteria for the safety of disposal were based on the testing methods, presented by NRC(Nuclear Regulatory Commission), ANS(American Nuclear Society), and an experiment was conducted for checking and verifying the structural stability.

## 제1장 서론

1978년에 가동을 시작한 국내 첫 상용원전인 고리 1호기는 2017년 영구정지 되었으며 해체를 앞두고 있는 시점이다. 원전해체 시 발생하는 폐기물에 대하여 기존의 시멘트 고화방식으로 처리할 경우에는 최종 폐기물의 부피가 증가하는 단점을 갖게 된다. 또한 파라핀 고화공정으로 변경 후 파라핀 고화체는 처분이 불가능한 것으로 판정되어 고화처리를 하지 못하고 분말상태로 임시저장하고 있는 실정에 있다. 이 문제를 해결하기 위해 한국의 일부 원자력 발전소에서는 CTS (Concentrate Treatment System, 증발 및 과립화)와 고분자 응고 시스템을 모두 운영한다. 하지만 CTS에 의해 생성된 폐기물은 입자화 되어 분포도가 매우 넓으며(직경; 수  $\mu\text{m}$  ~ 수  $\text{cm}$ ), 이 때문에 미세 입자들 사이에 공극을 형성 할 수 없다. 이로 인하여 처분 비용의 증가 및 처분장의 수용성을 감소하는 결과가 예상된다. 따라서 향후 원전 해체과정에서 발생 될 처분부적합한 상태의 방사성 슬러지 및 슬러리 처리/처분 기술 개발이 시급한 상황이며, 최종적으로 처분장 인수기준(WAC, Waste Acceptance Criteria)을 만족하면서, 폐기물 부피 감용 기술 개발 또한 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 처리기술의 미확보로 인해 처리되지 못하고 있는 분말상(입자성 및 분산성) 폐기물을 대상으로 한다. 이러한 대상 폐기물에는 원전운영 및 원전해체과정에서 발생하는 농축폐액분말, 콘크리트 파쇄물, 슬러리/슬러지, 제염슬러지, 제염이 용이치 못한 미세크기의 오염토양 등을 포함하고 있다. 이러한 대상 폐기물을 폴리머 고화 시 분말상의 방사성폐기물을 동일한 크기의 고밀도 펠렛으로 압축한다. 펠렛 사이에 일정한 공극을 형성하여 폴리머의 침투가 수월 할 것이며, 공극 사이를 액상의 매질로 채워 고화하기 때문에 부피 증가도 발생되지 않는다. 오히려 방사성폐기물 부피 밀도를 일차적으로 감소시키고 드럼 내 충전율을 향상 시킬 수 있기 때문에 높은 감용 효과를 달성할 수 있다고 사료된다. 즉, 롤 압축 시스템(Roll compaction system) 기술을 적용한 펠렛 성형장치를 이용해 원전해체 시 발생하는 슬러지 폐기물의 처분을 위해 분말상 폐기물을 펠렛으로 성형시키며, 고압축된 펠렛을 함입해 폴리머로 고화시키는 기술을 적용하고자 한다.

따라서 원전해체 시 발생하는 슬러지 폐기물의 건조 분말을 압축 성형하며, 이를 함입해 제작한 펠렛 고화체가 최종적으로 처분되어질 수 있도록 처분장 인수기준에 대한 충족 여부를 확인하는 특성평가 중심의 연구를 수행하였다. 실험은 국내 한국원자력환경공단에서 작성한 처분장 인수기준 및 인도규정에서 처분 안전성을 위한 고화체 판정 기준은 NRC(Nuclear Regulatory Commission), ANS(American Nuclear Society) 등 에서 제시한 시험 방법에 의거 된 것이며, 이와 같은 관련기준을 참고해 구조적안정성 확인 및 검증하기 위한 실험을 수행하였다.

## 제2장 이론적 배경

### 제1절 처분부적합 폐기물

처분부적합 폐기물이란 원전운영이나 해체 시 고화 및 포장 등 처리과정이 요구되는 방사성폐기물 등을 일컬으며, 대표적으로 분산 특성을 갖는 입자성 방사성폐기물을 예로 들 수가 있다. 이들 폐기물에는 원전운영 과정에서 발생하는 농축폐액의 건조 분말, 슬러리 및 슬러지, 향후 원전해체 과정에서 발생하는 온갖 분말 상태의 폐기물(콘크리트 파쇄물, 제염 슬러지) 등이 있다. 또한 제염이 용이치 못한 미세 크기의 방사능오염 토양도 여기에 포함된다. 그리고 입자성 폐기물을 기존의 고화방식으로 처리할 경우에는 최종 폐기물의 부피가 증가하는 단점을 갖게 되어 처분 비용의 증가 및 처분장의 수용성을 감소하는 결과를 야기할 수가 있다[1].

따라서 제1절에서는 처분부적합 폐기물을 원전운영 및 해체 방사성폐기물로 구분하고 이들 생성원에 따른 방사성 슬러리/슬러지에 대해 분류하였다. 추가적으로 대상폐기물을 처분하기 위하여 국·내외 방사성폐기물 관련 규정 및 처분 안전성을 위한 고화체 판정 기준을 포함해 정리하였다.

#### 1. 원전운영 및 해체 방사성폐기물

##### 가. 원전운영 방사성폐기물

방사성폐기물은 원자력발전소, 한국원자력연구원, 한전원자력연료(주) 및 RI 이용기관에 따라 발생원을 달리한다. 원자력발전소의 경우 핵연료의 붕괴에 따라 발생하는 고준위 및 중준위방사성폐기물과 원자력발전소의 운영과 더불어 발생하는 폐기물로 구분할 수 있다. 원자력발전소의 운영 폐기물로는 잡고체, 농축폐액, 폐수지 및 폐필터 등이 중·저준위방사성폐기물의 주 발생원이 된다. 또한 원자력발전소에서 발생하는 방사성폐기물은 그 형태에 따라 기체, 액체 및 고체폐기물로 나눌 수 있다. 따라서 국내 대부분을 차지하는 가압경수로형(PWR) 폐기물의 발생원을 구분하면 다음과 같다.

### (1) 기체폐기물

기체폐기물의 발생원은 냉각재의 탈기, 체적제어탱크의 Venting, Cover Gas 교환 및 Boron Recycle Process 등이 있다. 이러한 발생원에서 발생된 기체폐기물은 다양한 방사성핵종을 함유하고 있다. 이중 중요한 핵종은 불활성기체(Xe, Kr), Iodine, 부유입자 등이 있으며, 대부분이 반감기가 짧은 핵종이다. 따라서 폐기물을 일정기간 체류시켜 방사능을 자연 감쇄시킨 후 방출시키는 처리법이 주로 이용되고 있다. 체류방법으로는 기체폐기물을 기체 압축기로 압축시켜 대형 감쇠탱크 내에 저장하는 방법, 활성탄 탱크 내에서 활성탄에 흡착시켜 체류시키기는 방법이 있다. 체류시간 경과 후 방사성폐기물의 방사능 농도와 양을 측정하여, 충분히 안전하다고 판단될 때 부유입자 및 Iodine 제거를 위한 고성능여과장치(HEPA Filter)와 활성탄 흡착기를 거쳐 환경으로 방출한다. 이러한 기체폐기물 처리과정에서 폐필터(HEPA), 폐기물 활성탄 등의 고체폐기물이 발생되며, 고체폐기물 처리계통으로 이송시켜 처리한다.

### (2) 액체폐기물

액체폐기물의 발생원은 Reactor Coolant Loops, Pressurizer Relief Tank, Reactor Coolant Pump Seals, Accumulator, Refueling Canal Drains, Equipment Drains and leaks, Radioactive Chemical Laboratory Drains, Radioactive Laundry and Shower Drains, Decon. Area Drain, Demineralizer Flushing and Backwashing, Sampling System 및 Floor Drain 등으로 액체폐기물은 상기 발생원에 따라 그 특성의 차가 심하다. 따라서 발생원 별로 수집해 처리하는 것을 원칙으로 하고 있다.

### (3) 고체폐기물

고체폐기물의 발생원은 다음 내용과 같다. 액체폐기물을 증발 처리 시 발생하는 증발기 농축물, 이온교환 시 발생하는 폐이온 교환수지, 여과 처리 시 발생하는 폐필터 카트리지가 있다. 기체폐기물 처리 시 발생하는 HEPA 필터 등이 있다. 그리고 기타 발



전소 고장의 제염, 보수 작업 시 발생하는 종이, 피복, 장갑, PVC, 오염된 기기 등의 잡고체가 있다. 이러한 폐기물 중 폐이온교환수지, 증발기 농축폐액, 폐필터 카트리리지 등은 고화처리하고 잡고체 폐기물은 소각처리하기도 한다.

즉 기체폐기물 및 액체폐기물의 처리과정 모두 최종적으로 고체형태의 폐기물을 발생시킨다. 이를 구분하면 습윤 고체폐기물(폐이온 교환수지, 증발기 농축폐액 등)과 건조 고체폐기물(HEPA 필터, 잡고체 등)로 구분할 수 있다.

## 나. 원전해체 방사성폐기물

스웨덴의 SKI(Swedish Nuclear Power Inspectorate, 스웨덴 원자력 검사기구)는 1992년에 ‘원전 해체에서 발생하는 폐기물’ 보고서에서 800 ~ 1,000 MWe의 용량을 가진 경수로에 대한 내용이 언급되어있다. 해당 부분은 원전운영 및 원전해체 과정에서 발생하는 폐기물의 종류, 부피, 방사성 핵종, 방사능 준위들에 대하여 비교되어있다. 결론적으로 원전운영 폐기물과 해체 폐기물간에는 유사성이 매우 높다는 내용이다. 따라서 원전 운영폐기물에 적용되는 기준이나 권고사항을 그대로 해체 폐기물에 적용하는 것은 매우 자연스럽다. 또한 원전운영 폐기물에 적용해 작성되어야하는 문서도 동일하거나 유사하게 해체폐기물에 적용하는 것도 바람직하다고 언급되어있다[2].

국내 고리 1호기의 해체폐기물의 방사학적 특성은 고리 1호기 설계 및 약 40년 동안의 운전특성에 따라 크게 영향을 받을 것으로 사료된다. 이 중에서도 방사선학적 특성은 40년 동안 발전소의 운전 특성에 의해 대부분이 결정된다. 하지만 이외에도 향후 이루어질 계통 제염(System decontamination)에 의해서도 영향을 받을 것으로 예상된다. 원전 해체폐기물 인수기준(안) 설정 연구 최종보고서에서 원전운영 시 발생하는 방사성폐기물의 특성을 정확히 평가하는 방법이 다음과 같이 언급되어있다. 방사성오염 물질의 종류와 방사능량, 오염정도 등을 포함하는 방사선학적 특성자료(Radiological Characterization Data) 조사가 선행되어야 한다. 그리고 이러한 방사선학적 특성자료 조사방법은 일반적으로 미국 정부가 발행한 MARSSIM 보고서에서 제시한 부지이력평가(Historical Site Assessment), 부지개략조사(Scoping Survey), 부지특성조사(Site Characterization Survey), 오염정화 조사 및 최종상태조사 등의 다양한 방법 등에 의해 얻을

수가 있다고 언급되어 있다. 따라서 본 연구의 주요 대상인 콘크리트, 토양 및 액체 폐기물 등에 대하여, 그의 특성을 살펴보면 다음과 같다[3].

### (1) 오염토양

국내 고리 1호기에서 예기치 못한 사건 및 사고가 발생되지 않았기에 토양에 대하여 방사능 해제준위를 초과하는 방사성오염은 전혀 없는 것으로 가정하였다. 단, 미국에서 해체 완료 원전을 대상으로 특성 조사한 내용을 근거로 개발된 상관식에 기초하였으며, 예상되는 오염토양 폐기물 발생량을 평가하였다. 따라서 토양 오염에 영향을 미치는 인자 및 참조 값 그리고 이에 대한 가중치를 가정하여 오염토양에 따른 발생량을 예측하였으며, 그 결과를 표 1에 나타냈다.

표 1. 해체전략에 따른 오염토양 폐기물의 예상 발생량

구분	DCGL <sup>2)</sup> 기준	토양오염폐기물발생량(ft <sup>3</sup> )	
		즉시해체	지연해체
고리1호기 <sup>1)</sup>	0.10mSv/yr	322,113	317,981
	0.25mSv/yr	267,579	263,448
	0.30mSv/yr	249,401	245,270

1) 보수적으로 영향 받은 부지는 고리 1발전소 부지 면적(38,315 m<sup>2</sup>)을 가정함.  
 2) 잔류방사능 유도농도

### (2) 제염폐액 및 액체폐기물

일차계통 제염은 원전해체 시 발전소 내 작업자 접근성과 ALARA 관점에서 방사선량을 줄이기 위해 수행된다. 이어서 해체폐기물의 감용을 위하여 모든 설비에 대하여 제염을 수행하게 된다. 이때 다양한 종류의 폐액이 발생되므로 이들을 이온교환수지와 필터를 이용하여 처리하게 된다. 처리되어도 액체 내에 남아 있게 되는 방사물은 증발기를 이용하여 처리할 수도 있다. 이러한 과정을 거치게 되면 최종적으로는 폐수지, 폐필터 및 온갖 유기 또는 무기화합물을 내포한 슬러지가 발생하게 된다. 아래 표 2에 고리 1호기 해체 시 발생하는 액체폐기물 및 폐액의 예상 발생량을 나타냈다[4,5].

표 2. 고리 1호기 액체폐기물 및 폐액의 예상 발생량

폐액 소스	설명	부피 (gal)	고체 폐기물 발생량(ft <sup>3</sup> )		
			필터	수지	슬러지
1) 고순도 & 저전도성 폐액					
재장전 수조	- 원자로 내부 수중 분획 - 하청업자가 공급하는 이동 정화 계통 사용 가정	353,015	2.6	141.2	-
사용후핵연료 수조	- 사용후핵연료 냉각 후 배수 - 사용후핵연료 냉각 중 발생된 페필터/폐수지 미포함	327,177	2.4	130.9	-
2) 저중순도 & 고전도성 폐액					
개인 제염을 위한 샤워	- 10%의 작업자에 대해 21gpd <sup>1)</sup> - 10%의 작업자는 개인 제염을 위해 샤워 가정	642,302	4.8	256.9	-
바닥 배수	- 해체 활동 중 침투수 - 2단계 해체활동 중 40gpd 가정	87,600	0.6	35.0	-
기타	- 기타 폐액 -2단계 해체활동 중 20 gpd 가정	219,000	16	87.6	-
3) 고전도성 화학 폐액					
일차계통 제염	- 일차계통 체적 두 배 가정 - 별도 평가	0.0	0.0	0.0	-
기타 계통 제염	- 일반적으로 기기 연결 시 300 gal/decon <sup>1)</sup> - 별도 평가	0.0	0.0	0.0	-
표면 세척	- 일반적으로 10 ft <sup>2</sup> 당 1 gal <sup>1)</sup> - 플랜트 재고량 내에서 별도 평가	0.0	0.0	0.0	-
고압 폐기물 표면제염	- 일반적으로 1 ft <sup>2</sup> 당 50 ~75 gal <sup>1)</sup> - 플랜트 재고량 내에서 별도 평가	0.0	0.0	0.0	-
4) 세정 폐기물					
세정 폐액	- 건고체 폐기물에 포함	0.0	0.0	0.0	-
5) 계통 배수					
기존 계통 배수	- 정지 후 계통에 남아 있는 모든 공정 유체는 운영 폐기물로 분류	0.0	0.0	0.0	-
합 계		1,629,093	12.1	651.6	-

1) AIF/NESP-036, "Guideline for Producing Commercial Nuclear Power Plant Decommissioning Cost Estimate", Vol.1, 1986

2) US DOE, "Decommissioning Benchmarking Study", Jan.15, 1997

### (3) 생체 차폐용 콘크리트 벽

고리 1호기의 원자로를 둘러싸고 있는 생체 차폐용 콘크리트의 총 부피는 957,474 kg (2,202 m<sup>3</sup>) 으로 평가되고 있으며, 정지 후 10년을 기준으로 핵종 재고량을 평가한 결과를 표 3에 나타냈다.

표 3. Bio-shield 콘크리트의 주요 방사성 핵종별 방사능

방사성 핵종	방사능(Bq)	비율 (%)
H-3	1.02E+16	89.3
Eu-152	4.82E+14	4.2
Co-60	3.35E+14	2.9
Ar-39	1.89E+14	1.6
Fe-55	8.00E+13	0.7
Eu-154	7.40E+13	0.6
Ba-133	1.33E+13	0.1
Cs-134	8.21E+12	0.07
C-14	7.34E+12	0.07
Ni-63	6.86E+12	0.06
Rest	5.25E+13	0.4
Total	1.14E+16	100

## 2. 방사성 슬러지/슬러리 폐기물

세계적으로 수많은 원자력발전소가 여러 사유로 인하여 해체되었거나 해체 중에 있다. 본 논문의 대상 폐기물인 원전해체(또는 원전운영)시 발생하는 슬러지 폐기물이다. 이에 대한 구체적인 자료들인 슬러지 발생량, 슬러지의 물리화학적 특성 및 슬러지의 방사능 등의 자료를 수집하기가 어려운 실정이다. 이러한 이유는, 슬러지 폐기물은 일종의 습윤 상태에 있는 고체입자로서 원전 운영이나 원전 해체과정에서 발생하는 제2차 또는 제3차의 부산 폐기물(secondary waste)로 발생하는 것에 기인하기 때문으로 판단된다. 이는 원전 운영과정에서 LRS나 RCS 및 그의 구성물들에 대한 제어에 의해 발생될 것이다. 또한 통상적인 운영폐기물 처리과정과 원전 유지보수 과정에서 발생하게 된다. 원전 해체과정에서는 원전 운영과정에서 발생하는 것 이외에 오염된 콘크리트 구조물의 표면제염(연마 등), 원전 구성물의 절단, 토양의 오염으로 발생될 것으로 파악하고 있다. 그리고 슬러지의 화학적 특성과 방사학적 특성은 사용된 화학제와 발생장소에 따라 크게 달라질 것으로 판단된다.



그림 1. 처분부적합 폐기물의 발생모습 - 제염해체 슬러지(L), 제염 후 2차 폐기물(R)

### 가. 방사성 슬러지/슬러지의 정의

IAEA에서는 방사성 슬러지(sludge)를 수용액 중에서 액상부분을 제거한 후에 흡착되지 않아 여과로 제거되지 않은 침전물 그리고 기타 잔류 고형성분으로 정의하고 있다. 한편 슬러리(slurry)는 수용액상(또는 유기상)에 고형물들이 현탁되어 유동성을 갖는 상태를 일컫는다. 따라서 슬러리상의 고형입자들을 응집제 등으로 침전시키거나 기타 방법으로 수분 함량을 줄여 침전시키거나 케이크 상으로 만들게 되면 이를 슬러지라 할 수가 있다. 결국, 넓은 의미에서 슬러지를 습윤 상태에 있는 입자상의 고체라 할 수가 있다. 일반적으로 슬러지 폐기물을 방사성폐기물 처리 관점에서 고체폐기물로 분류 한다. 반면에 슬러리는 액체 방사성 폐기물 슬러리라 칭하기도 하는데 폐기물 처리 관점에서는 액체폐기물로 분류한다. 한편 한국수력원자력(KHNP)에서는 원전운영이나 해체과정에서 발생하는 슬러지들을 자체적으로 분류하고 있다. 슬러지는 부식성 슬러지 폐기물, 바닥 슬러지, Sump 슬러지, 탱크 슬러지, 오일 슬러지, 유기성 슬러지, 콘크리트 슬러지, 토양 슬러지 및 혼합 슬러지 등으로 분류하고 있다[6].

### 나. 방사성 슬러지의 발생원

방사성 슬러지의 대부분은 원자력시설의 운영과 해체과정에서 수 처리나 제염처리과정에서 불가피하게 발생하게 되며, 이를 2차 폐기물(secondary waste)이라 칭한다. 즉

방사성 핵종을 함유한 액체나 슬러지 방사성폐기물이 발생하는 곳에서 슬러지 폐기물이 발생된다고 할 수 있다. 방사성 폐기물은 비방사성 물질과 방사성 물질간의 불필요한 접촉, 폐기물 스트림에서 해당 폐기물이 재사용가능한 물질임에도 불구하고 재사용이나 재활용하지 않는다. 또한 발생한 폐기물을 제염할 것인지 아니면 그대로 처분할 것인지를 분류하지 않는다. 그리고 재활용, 재사용 목적으로 제염할 수도 있는데도 불구하고 이를 제염하지 않음으로 인하여 대량으로 발생하게 되는 것이다(표 4 참조)[7].

표 4. Radioactive Toxic Substances in Typical Waste Streams at Nuclear Power Plants (Life Cycle Estimate)

Waste	Waste volume (m <sup>3</sup> )	Toxic substance	Concentration (kg · m <sup>-3</sup> )	Mass of substance (kg)
Operational low level waste	200,000	Cd	-	4,000
		Hg	-	4,000
		Be	-	20,000
		Se	-	8,000
Evaporator concentrates	3,300	B	45	150,000
Ion exchange resins	1,000	Cr	0.5	500
		Ni	0.7	800

일반적으로 원자력발전소의 운영과정에서 중·저준위 방사성폐기물은 액체 폐기물의 침전이나 여과로 인한 슬러지와 미세 입자들, 물의 정화계통에서 사용된 페이온교환수지, 증발기의 농축폐액, 잡다한 건조 상태의 고체폐기물과 같이 발생하게 된다[8].

#### 다. 방사성 슬러지의 특성

스웨덴 원자력발전소의 해체에서 발생하는 폐기물은 방사화 및 오염 철제류, 방사화 및 오염 콘크리트 그리고 2차 폐기물 등의 그룹 3으로 대별할 수가 있다.

- Group 1 - Activated and contaminated steel
- Group 2 - Activated and contaminated concrete
- Group 3 - Secondary waste

여기서 그룹 1은 해체폐기물중의 총 방사능의 99 % 이상, 무게로는 66 % 정도이다. 그룹 2는 방사능량이 0.02 %, 무게로는 26 % 정도이다. 그룹 3은 방사능량이 0.05 % 이하이면서 무게는 약 7 % 정도로 분석하고 있다. 본 연구는 해체슬러지 폐기물의 처리와 관련되어 있음에 따라 그룹 1에서 발생 가능한 슬러지는 원자로 내부 및 각종 철제류의 절단과정에서 발생할 수가 있다. 그룹 2에서 발생 가능한 슬러지는 생체 차폐용 콘크리트의 해체과정에서 발생하는 콘크리트 파쇄물 등으로 판단된다. 이들 내에 함유된 핵종들로는 비교적 저반감기인 Co-60이 주가 될 수 있다. 또한 비교적 장반감기들인 Ni-59, Ni-63, Tc-99, Nb-94, 그리고 C-14 들이 주요 핵종들일 것이다. 한편 그룹 3은 정상적인 세정설비에서 발생하는 필터 슬러지와 폐이온교환수지 등이지만 해체과정에서 공정설비와 건물의 표면을 제염에서 발생되어질 것이다.

결론적으로 해체과정에서 발생하는 슬러지를 포함한 폐기물은 H형태인 중·저준위 2차 폐기물(low and medium level secondary waste)로 분류하고 있다. 이와 같이 스웨덴에서는 단순히 원자로의 정상운영에서 발생된 슬러지와 해체과정에서의 해체폐기물에 대한 제염으로 발생하는 것만을 고려한 것으로 보인다. 그러나 실제로 이들에게 철제류의 절단과 콘크리트 파쇄과정에서 발생하는 슬러지 등을 함께 고려할 필요가 있다. 더 나아가서 본 연구와 관련하여 스웨덴에서 해체 시 발생하는 폐기물을 분류한 결과를 표 5에 나타내었다.

표 5. Waste Type of Low and Medium Level Secondary Waste

Waste type		Materials and components
C	Medium level activated concrete	Parts of biological shield at core level
D	Low level activated and contaminated concrete and sand	Residual parts of biological shield and concrete surface in contaminated areas. Sand from off-gas filter
H	Low and medium level secondary waste	Concentrates, filter sludge, ionexchange resins etc. from decontamination operations

### 3. 처분부적합 방사성폐기물 처분 관련 규정

#### 가. 해외 처분규정 및 인수조건

모든 방사성폐기물은 효율적인 관리를 위하여 어느 한곳에 모아서 중앙 집중관리하게 되는데, 이를 처분장이라고 한다. 처분장은 약 300 년간의 제도적 관리기간 동안 처분장의 성능목표(performance objectives)를 유지하도록 관리하게 된다. 이를 위하여 처분장내에 처분되는 방사성폐기물은 처분장의 성능목표를 위하여 드럼 당 함유되는 방사능이 제한되게 되며, 이로써 처분장의 수용능력(처분 드럼 수)이 결정되게 된다. 처분장의 환경조건(dry site, wet site) 및 사회 문화적인 요건들을 포함하여 방사성폐기물 관리에 대한 국가 정책 등을 고려하여 해당 처분장에서는 고유한 방사성폐기물 인수기준을 설정하게 된다[9].

처분장에서 기본적으로 요구하는 사항들인 방사성 고화체의 방사학적 특성과 물리화학적 특성을 표 6에 나타냈다. 참고로 IAEA에서 방사성폐기물 분류에 따른 방사능 준위별로 적합한 처분방식을 제안한 바가 있으므로 이를 그림 2에 나타냈다[10].

표 6. IAEA Waste Form And Waste Packages Properties

Property	Role/Significance of the property
1. Radiological properties	
-Total activity -Radionuclide composition -Surface dose rate -Surface contamination -Thermal power -Radiation stability -Fissile content	<ul style="list-style-type: none"> <li>- To comply with licensing limits of a disposal facility</li> <li>- To meet transport regulations</li> </ul> Optimize final waste form activity determination methods. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimension, density, shape, etc. should support efficient determination process:               <ul style="list-style-type: none"> <li>o Define handling conditions.</li> <li>o Select appropriate conditioning and packaging technologies.</li> <li>o Minimize waste generation (including secondary waste).</li> <li>o Design the facility for either long term storage or disposal.                   <ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimizing radiological protection, design of shielding, etc.</li> </ul> </li> <li>o To prevent inadvertent criticality</li> </ul> </li> </ul>



2. Physical and chemical properties

<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mass and weight</li> <li>-Structural and dimensional stability</li> <li>-Permeability and porosity</li> <li>-Density</li> <li>-Voidage</li> <li>-Mechanical Strength/ Load Resistance</li> <li>-Impact resistance</li> <li>-Homogeneity</li> <li>-Chemical stability (leachability)</li> <li>-Chemical composition</li> <li>-Corrosivity</li> <li>-Explosiveness</li> <li>-Gas generation</li> <li>-Toxicity</li> <li>-Fire resistance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-To maintain the physical integrity of the waste form and/or package, during handling, transportation, storage and disposal</li> <li>-To prevent deformation or cracking of the waste forms and packages</li> </ul> <p>A categorization of conditioned waste based on the physical and chemical properties is an adequate tool to define:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>o Waste conditioning techniques, technologies and equipment design.</li> <li>o Operational processing parameters.</li> <li>o Waste form and package compatibility.</li> <li>o Waste packages.</li> <li>o Dimensions, weight, materials, etc.</li> <li>o Handling and transport conditions.</li> <li>o Compatibility between waste form and WAC.</li> <li>o Chemical, thermal, structural, mechanical and radiation stability.</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- To prevent the dispersion of long lived radionuclides in the repository</li> <li>- To undertake special measures to preclude ignition during transportation and storage</li> </ul>
---	--

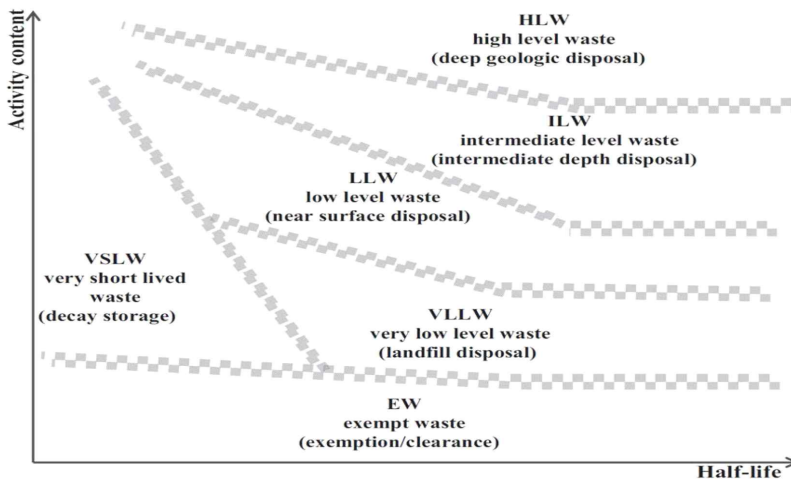


그림 2. Schematic of IAEA radioactive waste classification scheme

현재 미국은 방사성폐기물 발생원에 따라 적용되는 규정은 10 CFR 61과 DOE 435.1으로 양분되어 있다. 처분대상 폐기물을 처분하는 처분장의 인수기준도 해당 규정에 따라 설정되어 있다[11,12].

**(1) 10 CFR 61(Land Disposal of Radioactive Waste)** : 방사성폐기물의 운반과 관련하여서는 10 CFR 20.2006[29]이 있다. 10 CFR 61. 56에는 처분하고자하는 모든 등급(10 CFR 61. 55 항에 규정됨)의 방사성폐기물에 대하여 지켜져야 할 최소 요건을 기술되어 있다. 또한 처분장에서 폐기물의 취급을 용이하게 하며, 작업자의 보건 및 안전에 기여하기 위한 요건들을 표 7과 같이 규정하고 있다.

**(2) DOE 0 435.1 (구 5820.2A, Radioactive Waste Management)** : 이외에 고준위 폐기물이나 국방관련 폐기물은 미국의 NRC가 아닌 DOE가 별도로 운영하고 있다. DOE 0 435.1, 폐기물관리 요구사항 중에서 폐기물 처분하기 위한 폐기물의 특성조건과 인수기준이 기술되어져 있다.

표 7. Requirements for Disposal of Radioactive Waste(10 CFR 61)

관련조항	내 용
§ 61.55 폐기물 분류 (a) 천층처분의 경우	(1) 폐기물 등급 : 핵종농도에 근거한 Class A, B, C (2) 장반감기 핵종에 따른 분류 : 7개 핵종 (3) 단반감기 핵종에 따른 분류 : 5개 핵종 (4) 폐기물내 핵종농도 결정 - Scaling factor를 이용하거나 계산에 의한 간접적인 방법으로 결정할 수 있음 - 간접적인 방법이 실제 값과의 타당성 검증
§ 61.56 폐기물 특성 (a) 최소요건	(1) 판지나 섬유판 등으로 포장되지 않아야 함 (2) 액체폐기물은 고화되거나 액체부피의 2배를 흡수할 수 있는 충분한 흡수재로 포장 (3) 유리수는 폐기물 부피의 1 % 이하 (4) 폭발, 폭발적 분해, 상압상온에서 반응, 물과의 폭발적 반응이 일어나지 않아야 함 (5) 유독성기체, 증기, 연기를 일으키는 물질을 함유하거나 생성하지 않아야 함 (6) 발화성이 아니어야 함 (7) 기체폐기물은 20 ° C에서 1.5기압을 넘지 않는 포장 (8) 위해성, 생물, 병원, 전염성폐기물은 처리되어야 함
(b) 안전성과 관련된 요건	(1) 폐기물은 구조적으로 안정 - 압축, 습도, 미생물활동, 방사선효과, 화학변화, 예상되는 처분조건에서 물리적 제한과 형태를 유지 - 구조적 안정성은 폐기물 고화체 자체, 안정한 형태로 처리, 처분용기 혹은 처분후 안정성을 제공하는 처분구조물속에 위치함으로 제공 (2) 유리수는 HIC용기에 포장시 1 % 안정한 형태로 처리시 0.5 % 이하
§ 61.57 표지	(1) 각 폐기물 포장물은 방사성폐기물 분류기준에 따라 Class A, B, C 인지를 확인하기 위해 명확하게 표시

## 나. 국내 처분규정 및 인수조건

### (1) 중·저준위 방사성폐기물 인도규정

원자력안전위원회 고시 2015-004 “중·저준위 방사성폐기물 인도규정”에서는 방사선 특성 및 포장물의 구조적 건전성에 관한 조건을 기술 하고 있다. 표 8에서 방사선 특성에 해당하는 저준위방사성폐기물의 방사능핵종별 농도 제한치를 보여준다.

표 8. 저준위방사성폐기물의 방사능 농도 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

### (2) 원자력환경공단의 인도 기준

표 9. 폐기물 포장물 서류검사 판정기준

구분	검사 항목	판정기준
일반요건	폐기물포장물 정보 표시	총 방사능량, 고유번호, 폐기를 발생일자 및 발생장소, 표면 선량을 등이 읽기 쉽고 내구성 있도록 표시
	폐기물용기/ 폐기물포장물 종량	취급, 운반 및 처분설비에 적합하게 표준화되어야 하며, 크레인과 지게차 사용이 용이하도록 제작되어야 하고, 폐기물을 담는 용기는 사전에 처분자의 승인을 받아야함. - 콘크리트 포장물 10톤 이하, 강재드럼 포장물 1톤 이하 - 폐기물 포장물 단위크기 최소 0.5m(L) × 0.5m(W) × 0.8m(H), 0.5m(D) × 0.8m(H) 이상, 최대 1.5m(L) × 1.5m(W) × 1.5m(H), 1.5m(D) × 1.5m(H) 이하
고형화요건	고화체의 구조적 건전성	- 경질 고화체: 시편의 압축강도 500 psig 이상 - 연질고화체: 수직변형률이 3 % 일 때 시편의 고화체의 압축강도 60 psig 이상 - 이온교환수지 폐기물 고화체 시편은 1.0E+6 Gy, 그 이외 고화체 시편은 1.0E+7 Gy 범위에서 방사선조사 시험을 실시한 후 상기 압축강도를 만족해야함.

	비균질 폐기물의 고정화	비균질 폐기물의 반감기가 20년 이상인 핵종의 총 방사능 농도가 74,000 Bq/g 이상은 고정화해야함.	
방사선적 특성	핵종 함유량	핵종별 처분농도 제한치 이하여야 함.	
	핵종 규명	- 폐기물 포장물에 포함된 총 방사능량의 95% 이상을 차지하는 핵종을 규명해야 함. - H-3, C-14, Fe-55, Co-58, Co-60, Ni-59, Ni-63, Sr-90, Nb-94, Tc-99, I-129, C3-137, Ce-144 및 전알파에 대하여는 그 농도가 규명되어야한다. 단, 전알파의 경우 2년마다 1회 단위시설별(원전별 또는 유사노형별), 폐기물 종류별로 알파방출 방사성핵종에 대하여 핵종별로 그 농도가 규명되어야 한다. 그러나 폐기물 조성에 변화를 줄 수 있는 요인이 발생한 경우에는 그때마다 알파 방출 방사성핵종의 핵종별 농도가 규명되어야 함.	
방사선적 특성	표면 선량률	- 10 mSv/hr 초과하면 안됨.	
	임계 안전	폐기물 포장물내의 핵분열성 물질의 함유는 임계조건이 일어나지 않도록 제한해야 함.	
	표면오염도	베타·감마 방출체 및 저독성 알파 방출체는 4 Bq/cm <sup>2</sup> , 그 외 모든 알파 방출체는 0.4 Bq/cm <sup>2</sup> 를 초과하면 안됨.	
물리적 특성	구조적 특성	입자성 물질을 포함하는 폐기물	- 비분산성이 되도록 처리하여 포장 - 입자성 물질을 포함하는 폐기물이란 직경 0.01 mm 이하의 입자가 폐기물 무게의 1 % 이상 구성 되어 있거나 직경 0.2 mm 이하의 입자가 15 % 이상 구성되어 있는 폐기물
		채움률	고건전성 용기를 제외한 모든 포장물은 용기 내부 부피의 85 % 이상(용기 상부 빈공간 15 % 이하)
	유리수	고건전성용기의 경우 1 %, 그 외는 0.5 % 를 초과하면 안됨.	
	킬레이트제 등	- 이 폐기물 무게의 0.1 % 이상 함유 시 화학명과 존재량 명시 - 1 % 이상 함유 시 고형화 - 8 % 이상 함유 시 처분 불가	
화학적 특성	발화성 물질	폐기물 포장물 내에 포함된 발화성 물질은 불연성이 되도록 처리되고 포장	
	유해성물질	- 폐기물 포장물은 운반, 취급 혹은 처분 시 독성 기체, 증기 또는 인체에 해로운 연기 등을 일으킬 수 있는 물질을 함유하거나 생성되지 않아야 함. - 유해성 물질을 포함하는 폐기물 포장물은 잠재적 위험성을 최대한 줄이기 위해 제거	
	폭발성 물질	폐기물 포장물은 폭발, 고온 및 고압에서 폭발적인 분해 또는 반응, 물과의 접촉시 폭발성 반응이 일어나지 않아야 함.	
	부식성 물질	- 폐기물을 포장하는 용기는 부식에 대한 저항력을 가지고 있어야 함. - 제거하거나 감소시키도록 처리하여 포장	
	기체 발생	포장물 용기 건전성이나 처분시설 성능을 저해 지켜서는 안 됨.	
	인화성 물질	제거하거나 감소시키도록 처리하여 포장	
	생물, 병원균 및 감염물질	제거되어야함.	

## 다. 고화체 처분 안전성 평가 항목

방사성폐기물은 종합적으로 안전하게 관리하기 위하여 국가에서 특수하게 설계되어 건설된 곳에 집중시켜 관리하게 된다. 이를 “방사성폐기물을 처분장에 처분” 한다고 한다. 이러한 방사성폐기물들은 처분장 인수 기준 및 국가 인도 규정을 충족하여 안전성이 확보되어야 하며, 내용은 표 10과 표 11에 나타내었다[13,14]. 또한 표 12에 나타낸 ‘중·저준위 방사성폐기물 처분시설 안전성분석보고서(KORAD)’에 기술 되어 있는 고형화 시편에 대한 판정기준을 만족해야 처분이 가능하다[15].

표 10. 처분 안전성을 위한 인수기준 시험 방법

구분	시험 항목	관련 기준
○ 구조적 안정성	압축강도 시험	경질의 경우 : KS F 2405 / 연질의 경우 : KS F 2351
	침수시험	NRC/Technical Position on Waste Form, Rev.1
	열순환시험	ASTM B553
	유리수 측정	ANS 55.1와 유사한 방법 적용
○ 침출성	방사선조사시험	NRC/Technical Position on Waste Form, Rev.1
	침출시험	ANS 16.1

표 11. 처분 안전성을 위한 폐기물 고화체 판정기준

번호	시험 항목	판정 기준	
		경질 고화체	연질 고화체
1	압축강도 시험	3.44 MPa(500 psig) 이상	시편의 수직변형률이 3%일 때 0.41 MPa(60 psig) 이상
2	침수시험1)후 압축강도 시험		
3	열순환시험후 압축강도 시험		
4	방사선조사시험2)후 압축강도 시험		
5	침출시험	시편의 침출지수는 Cs, Sr, Co 핵종에 대하여 6 이상	
6	유리수 측정	고건전성용기의 1%, 그 외는 0.5%를 초과하면 안됨.	

표 12. Test criteria of the solidification waste sample

Category	Test item	Standard	Criteria
Structural stability	Compressive strength test	KS F 2405	≥ 35.2 kgf/cm <sup>2</sup> (3.44 MPa) (500 psi)
	Water immersion test	NRC	≥ 35.2 kgf/cm <sup>2</sup>
	Thermal cycling test	ASTM B553	
	Irradiation test	NRC	
Free standing test	Sample(7days)	EPA	< 0.5 vol.%
	Full-scale size	ANS 55.1	
Leachability	Leaching test	ANS 16.1	Leachability Index(LX) : ≥ 6

## 제2절 처분부적합 폐기물의 처리방법

### 1. 방사성 폐기물 고화처리 기술

액체 방사성폐기물은 폐액 증발기를 통하여 폐기물 내의 물은 증발 처리되고 증발기에 남아있는 농축폐액은 저장탱크로 이송되어 고화처리 된다. 원심분리기의 슬러지와 배수조의 바닥슬러지 같은 응집침전 슬러지들은 고화제를 혼합하여 고화처리 된다. 즉 이들 폐기물들이 수송하기에 용이하고 보관하기 좋도록 철제 드럼 또는 전용 용기에 넣어 혼합해 고화 처리한다. 방사성폐기물을 안정화 된 형태로 전환시키기 위한 고화공정은 그림 3과 같이 고화매체의 종류에 따라 시멘트고화, 아스팔트고화, 파라핀고화, 유리화, 폴리머고화 등으로 구분하고 있다[1].



그림 3. 고화매체 종류에 따른 방사성 폐기물 고화 기술

#### 가. 시멘트 고화(Cementation)

시멘트 고화방법은 중·저준위 방사성폐기물의 고화방법으로 가장 많이 사용되고 있으며, 주로 고체를 많이 함유하고 있는 슬러지, 농축폐액, 소각재, 이온교환수지 등을 처리하는데 적합하다. 이때 사용되는 시멘트는 ASTM Type I, II의 규정을 따르며 시멘트에 대한 폐기물의 중량비는 20 ~ 30 %정도 이다. 시멘트 고화 시 방사성핵종이 Sr, Pu, Am 인 경우에는 핵종이 시멘트 내에 잘 결합되어 있기 때문에 좋으나 Cs, Ru인 경우에는 핵종의 침출율이 상당히 높아 이에 대한 대책이 필요하다. 시멘트 혼합물에 Clay를 가하면 Cs, Sr의 침출율을 감소시킬 수 있다. 포틀랜드 Type I 및 Type II 시멘트는 적절한 응고

를 위하여 폐기물의 pH가 비교적 높아야 한다. pH 8 이상으로 전처리된 폐기물에 대해서는 시멘트가 폐기물의 화학성분에 잘 적응할 수 있으나 borate성분이 폐기물에 존재하면 시멘트의 응고가 지연된다. 이와 같은 문제점은 시멘트/폐기물의 비율을 증가시키고 시멘트와 폐기물을 혼합한 후 이 혼합물에 액체의 sodium silicate와 같은 첨가제를 넣거나 또는 혼합하기 전에 시멘트와 Sodium metasilicate를 혼합하여 해결한다.

## 나. 아스팔트 고화(Bituminization)

아스팔트 고화공정은 폐기물의 고화매체로서 아스팔트를 사용하는 공정으로서 주로 유럽에서 개발되어 광범위한 운전 경험을 통하여 입증되었다. 이 공정은 100℃이상의 아스팔트와 방사성폐기물을 혼합시켜 고화시킨다. 이때 폐기물 내에 함유된 수분의 99.5% 이상이 증발되고 나머지 폐기물과 아스팔트가 저장용기에 포장되어 냉각된다. 최종생성물의 조성은 아스팔트 60%, 폐기물 40%정도이다. 최종 고화체의 표면선량율은 시멘트 고화체 보다 높으나, 시멘트 고화체에 비해 감용비가 훨씬 크고 침출율은 훨씬 작다. 반면에 아스팔트 고화체는 융점이 낮고(60℃), 기계적 강도가 낮으며, 물과 접촉 시 팽윤 현상을 나타내는 점이 단점으로 지적되고 있다. 현재 사용되고 있는 아스팔트 고화공정 중 대표적인 것은 회분식 공정, Extruder 공정 및 방사성폐기물처리시설에서 운영하고 있는 박막증발공정(Thin film process)이 있다.

## 다. 폴리머 고화(Polymerization)

이 공정은 고화매체로 폴리머를 사용한다. 이때 사용되는 폴리머는 Polyester/Epoxy, UreaFormaldehyde, Polyethylene, Styrene-Dephenyl Benzene 등 여러 종류가 있으며, 사용되는 폴리머에 따라 다른 온도에서 서서히 Monomer의 중합반응이 일어난다.

## 라. 유리화

유리화 공정은 사용후핵연료의 재처리과정에서 발생된 고준위폐액을 고화하기 위한 공정으로 프랑스, 영국, 일본 및 미국에서 개발 중 또는 사용하고 있다. 일반적으로

고준위폐액의 고화처리 공정은 증발, 가소 또는 탈질산 및 유리화의 3단계로 나누어 생각할 수 있다. 재처리과정에서 얻어지는 폐액 중 대부분의 원소는 질산화물로 용해되어 있기 때문에 2단계 공정을 탈질산공정이라 한다.

제1~2단계에서 얻어지는 고화체는 가소물(calcine)이라고 하는데 이 가소반응은 500~800℃에서 종료된다. 제3단계에서는 제2단계에서 얻어진 분말상의 가소물 첨가제와 혼합하여 900~1,000℃에서 유리(주로 Borosilicate glass)와 함께 용융시켜 고화체를 제조하는 공정이다. 유리화를 위한 첨가제는 폐기물의 조성과 공정에 따라 선택되며 silicon, boroncalcium, titanium 등이 사용된다.

## 2. 방사성 슬러지 처리 기술

슬러지는, 원전운영 과정에서는 일차 냉각수를 처리하는 공정, 원전의 유지보수 과정 등에서 다양한 종류의 액체 폐기물이 발생되므로 이를 처리하는 단계에서 이차적으로 슬러지가 발생된다. 원전해체 과정에서는 모든 곳에서 액체폐기물이 발생되기 때문에 필연적으로 슬러지가 발생하게 된다. 또한 원전해체과정에서는 액체폐기물 처리단계에서 발생하는 슬러지 외에도 구조물의 절단이나 제염과정에서 분진과 슬러지가 발생되며, 오염토양도 발생하게 된다. 발생한 슬러지를 처분하기 위하여 감용 및 고화에 의해 안정화시키게 되는데 이를 위하여서는 사전에 처리나 컨디셔닝을 하여야만 한다. 따라서 슬러지 폐기물의 안정화를 위한 사전 처리방법과 컨디셔닝 방법을 기술하고, 이어서 슬러지의 안정화 기술의 선정을 위한 처분 요건을 살펴보고자 한다[16, 17].

### 가. 드럼 건조기술

이 기술은 습윤 상태의 폐기물을 건조 상태로 하여 부피를 줄이고 저장이나 처분이 용이하게 하여주는 매우 단순한 기술이다. 다양한 형태의 시스템이 있지만 근본적으로는 동일한 시스템이다. 폐기물을 200 리터 드럼 내에 주입하고 이어서 드럼을 캐비닛 내에서 가열하여 수분을 제거하는 기술이다. 가열은 뜨거운 공기를 순환시키거나 드럼 주변을 전기 히터 재킷을 둘러싸게 하여 수행한다. 건조 속도를 증가하기 위하여 진공을 적용할 수도 있다. 개별 드럼으로 하거나 공정 처리속도를 높이기 위하여 여러 드



량을 한꺼번에 수행할 수도 있다. 제거된 물은 공기 순환계통을 통하여 배출하고, 향 후 처리나 처분하기 전에 응축시켜 방사능을 측정하게 된다.

## 나. 고온 소각기술

고온소각기술(High temperature incineration, HTI)은 진일보한 기술이다. 종래의 소각기술은 자기 스스로 유지되는 기술(폐기물의 열량을 이용하는 의미)이므로 반드시 연소가 가능한 폐기물만을 처리할 수가 있다. 고온소각기술은 매우 강력한 버너가 있어서 1,500 ℃에서 운전되고(종래의 소각로 운전 온도 : 700 ~ 1,000 ℃), 약간의 금속류, 공기 필터 및 단열재도 다른 연소 가능한 폐기물과 함께 소각될 수가 있다. 폐기물은 회전하는 연소로 내에서 녹아 물분사기로 일정한 속도로 배출되면서 냉각되어 덩어리(granular) 상태의 생성물로 전환되어 진다.

## 다. 고압축기술 및 펠렛 성형 기술

본 공정에서 우선 폐수지의 수분 함량이 12 % ~ 50 % 이 되도록 건조기로 폐수지를 건조한다. 서로 다른 폐수지는 건조 용기 내에서 타 폐기물과 혼합될 수 있다. 때에 따라서 여기에 슬러지와 농축폐액처럼 수분이 많은 폐기물들을 첨가할 수도 있다. 건조 후에는 이 폐기물을 뚜껑이 달린 특수 금속용기에 넣어서 즉시 고압축기로 이동시킨다. 최종 발생하는 펠렛의 선량을, 높이와 무게를 측정한 후에는 저장 또는 처분용기에 주입하다. 이 폐기물은 수분과 접촉 시에 수지가 팽윤되는 것을 방지할 수 있도록 반드시 밀폐용기로 포장하여야 한다[18].

펠렛 성형기술은 습윤 폐기물을 건조 고체폐기물로 전환하는데 적합한 기술이다. 이 공정을 이용하기 위해서는 발생 폐기물을 분말 형태로 건조시키고, 이어서 이를 고체 형태로 만들기 위해 몰드 내에서 압축한다. 펠렛 성형기술은 조그마한 펠렛으로 보이는 최종 형태로부터 그 이름이 유래되었다. 이온교환수지의 펠렛 성형에는 화학적 결합제가 필요하지만 다른 폐기물들에게는 필요치 않다.

### 제3절 슬러지 분말의 성형기술

#### 1. 롤 압축 성형의 특징

일반적으로 입자성 미세분말을 펠렛, 과립 및 정제 등으로 성형하기 위해서는 분말과 성형제재(바인더)를 사전에 혼합하여 이들을 고압축력으로 가압하는 방식(Single Station/Rotary Tablet Press, Roller Compaction, Granulation 등)이 이용되고 있다. 이들 방법들은 각각의 장단점들을 갖고 있지만 본 연구개발에서는 부피감용 및 성형체의 건전성 확보 및 원자력시설 내에서의 활용을 위하여 아래 사항들을 충족시키는 roll compaction system을 선정하였다.

- ① 성형제재를 사용하지 않으면서 성형의 가능성
- ② 성형된 덩어리(펠렛으로 약칭) 크기의 균일성 유지 여부
- ③ 고밀도의 펠렛 성형 가능성(고감용화)
- ④ 설치 및 유지보수가 용이한 크기 및 구조로의 제작 가능성
- ⑤ 펠렛화 전·후처리용 부대장치가 필요치 않는 조건 등

보통 분말의 과립화공정은 건조와 습윤 공정으로 나눌 수가 있다. 건조 과립화 공정은 건조 분말만을 롤 콤팩션(roll compaction)이나 일축 다이 콤팩션(uniaxial die compaction) 방식을 이용하여 압축하게 된다. 이 공정은 용액상태의 결합제나 건조과정이 필요치 않아 일반산업에 널리 이용되고 있다. 또한 저렴하고 간단한 장치를 이용하게 되므로 인하여 경제성을 갖고 있기도 하며 수분에 민감한 물질의 취급에 장점을 갖기도 한다.

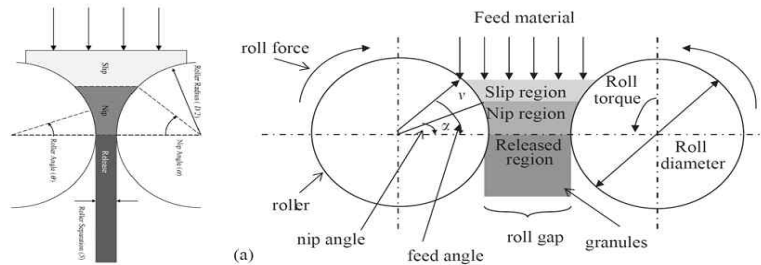


그림 4. Schematic diagram of a roll compaction process

롤 프레스 컴팩션 1960년대에 금속판을 만드는데 널리 이용되었다. 이어서 분말의 브리케트 제조가 요구되자 롤 프레스의 설계와 운전을 위하여 Johanson은 물질의 특성, 프레스 크기 및 운전변수들에 대한 수학적 모델을 만들었다. Johanson은 가하학적 변수와 롤 사이에서 연속적인 전단변형을 겪는 물질의 소성 항복 법칙들과 관련하여 응력 함수를 설명하였다. 그의 이론은 분말 거동이 분명하거나 쉽게 결정할 수 있는 방식으로 거동을 갖는 몇 개의 영역(그림4 참조)으로 나눌 수 있다는 사실에 기초하였다[19].

## 2. 롤 압축 성형의 주요인자

본 연구개발에 이용된 롤 컴팩션에 영향을 미치는 인자들은 두 개의 롤 간의 간격(roll gap), 롤 회전속도, 분말의 공급량 및 마찰율(friction ratio) 등이 있으며, 표 13에 나타내었다. 특히 마찰율(두 개의 롤 회전속도의 비, front roller speed / back roller speed)은 분말과 롤 표면 사이의 slip-stick 거동에 영향을 준다. 그리고 간접적으로 펠렛 성형에 매우 중요한 접착력이나 마찰력에 영향을 줄 수도 있다. 따라서 롤 직경, 롤에 가해지는 힘, 그리고 롤 토크 등의 롤의 설계에 대한 것과 롤 간격, 롤 회전속도, 분말의 공급량 그리고 마찰 비율 등의 롤 운전 변수들은 롤 압축 공정의 성능에 지대한 영향을 준다고 할 수 있다. 또한 압축 인자, 내부 마찰의 유효 각도 그리고 벽면 마찰 각도 등과 같은 물질 특성도 매우 중요하다.

표 13. Roll compaction performance

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 (Angle of) friction</li> <li>- wall friction</li> <li>- compressibility</li> <li>- permeability</li> </ul>



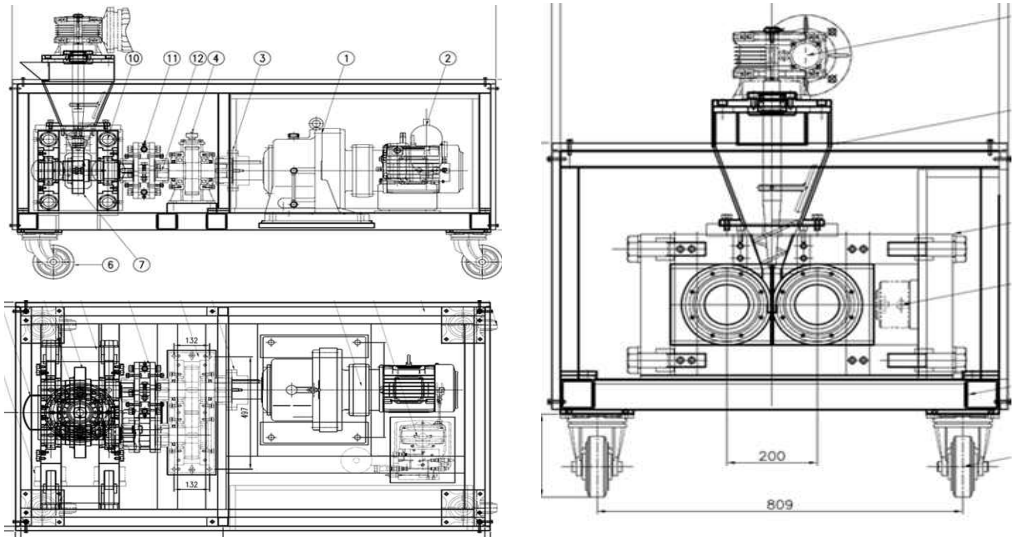


그림 6. 펠릿 성형장치 - 측면도(좌측 상), 입면도(좌측 하), 정면도(우)

표 14. 펠릿 성형장치의 각부 명칭

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

표 15. 펠릿 성형장치의 기술 사양

펠릿 성형장치의 Specification	
Feeder	Electricity : AC220V, 60Hz, 3φ Power : 1.5 KW(2HP), 4P, MTWM75F Max Out RPM : 58 RPM(Ratio : 1/30)
Pelletizing	Electricity : AC220V, 60Hz, 3φ Power : 1.5 KW(2HP), 4P, MTWM75F Max Out RPM : 58 RPM(Ratio : 1/30) Coupling : Gear Coupling (GS20)
Gear Box	Type : Gear (2 Axis) Max Out RPM : 58 RPM(Ratio : 1/30) Coupling : Gear Coupling (GS20)
Roll Tire	Roll Speed(Max) : 56.52mm/sec(5.4RPM) Capacity : 0.06m <sup>3</sup> /hr-Max
Hydraulic Pressure Unit	Oil Compress : Max : 350 kgf/cm <sup>2</sup> Operating : 150 ~ 350 kgf/cm <sup>2</sup> Power : 0.4 KW(0.5HP), 4P, 220V
Cylinder	Type : Ram Cylinder, Stroke : 16mm Rod Speed : 1.0mm/sec Capacity : Max 50Ton x 2 EA

## 제3장 실험재료 및 방법

### 제1절 실험재료

#### 1. 모의 시료

본 논문에서 사용될 해체 슬러지의 종류 선정은 원전해체 시 발생 가능한 슬러지 종류를 조사 후 수행하였다. 이를 위해 현재 고리 1호기를 비롯하여 모든 원전의 운영과 해체 시에 발생 가능한 슬러지를 조사해보았으며, 표 16과 같이 분류할 수가 있다.

표 16. 고리1호기 발생 예측 슬러지 종류 및 발생원

구분	발생원	비고
폐기물	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 증기발생기 2차측에서 발생된 부식성 슬러지</li> <li>○ 배관표면에서 떨어져 배관 하부에 침전된 부식성 슬러지</li> </ul>	S/G 2차측
바닥 슬러지	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 구조물 등의 바닥 아래 침전된 슬러지</li> </ul>	Floor Drain, Tank 등
Sump 슬러지	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Sump 하부 침전된 슬러지</li> </ul>	
탱크 슬러지	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 탱크류 내 하부에 침전된 슬러지</li> </ul>	Waste Hold-up, 탱크 등
오일 슬러지	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 오일/윤활유 탱크 등 하부에 존재하는 슬러지</li> </ul>	Oil Tank 등
유기성 슬러지	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 화학 세정 등을 통해 발생된 유기 물질을 포함한 슬러지</li> </ul>	EDTA 세정
콘크리트 슬러지	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 콘크리트 해체 시 제염작업 시(Scabblor 제염 등) 발생되는 슬러지</li> <li>○ 콘크리트 절단 후 잘게 잘라 재활용을 위해 준비된 dehydrated 슬러지</li> </ul>	Fine Concrete 류
토양 슬러지	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 적정 크기이하의 Soil(2.5mm)</li> <li>○ 액체폐기물 계통 등에서 방출되어 침사지에 침전된 토사 슬러지</li> </ul>	Soil류, 미세 자갈류, 안트라사이트류
혼합슬러지	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 여러 성분의 슬러지가 혼재된 슬러지 (오일, 유기성, 활성탄 등 )</li> </ul>	

각종 문헌 및 발표 자료를 참고하여 원전해체 시 발생 가능한 슬러지의 종류 선정 및 무기화학적 조성을 조사하여 그 결과를 표 17에 나타냈다. 표 17에서 보듯이 콘크리트와 토양 슬러지에는 상대적으로 철 성분이 적었다. 그리고 셴프와 토양 슬러지에서는 실리카가 주를 이루고 있었다. 셴프 슬러지의 경우에 실리카 성분이 많은 것은 원전의 벽자체가 콘크리트로 구성되었기 때문이라 판단된다[20].

표 17. 슬러지별 무기물 화학적 조성(wt.%)

성분	토양	콘크리트	섬프
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4 ~ 9	5.61	24.05
CoO			0.78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16 ~ 24	5.31	21.17
SO <sub>2</sub>		2.00	2.29
SiO <sub>2</sub>	50 ~ 65	21.03	38.65
CaO		63.38	1.08
TiO <sub>2</sub>			0.55
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			0.032
Na <sub>2</sub> O		0.07	5.74
K <sub>2</sub> O	1 ~ 3		4.18
MgO	0.6 ~ 2.5	2.60	1.83
ZnO			0.24
CuO			0.20
합계	100.0	100.0	100.0

## 가. 모의 시료의 구성물

원전해체 시 발생 가능한 슬러지의 종류 중 토양(Soil), 콘크리트(Concrete), 섬프(Sump) 총 3가지 모의 슬러지로 선정하였다. 토양과 콘크리트는 채취하고 섬프는 무기물 화학적 조성비를 참고해 직접 제조 및 건조하여 사용하였다. 또한 예비 실험 및 기본 실험에 사용할 재료로 벤토나이트(Bentonite)가 선정 되었으며, 이와 관련해 시료 구성물의 내용을 아래에 기술 하였다.

### (1) 벤토나이트 (Bentonite - No.1)

한국원자력연구원에서는 2019년 ‘벤토나이트 방사성폐기물처분장 방벽재’ 라는 제목으로 책을 발간했다. 연구 내용에 따르면 벤토나이트는 주로 물의 존재 하에서 화산재가 풍화되어 생성된 소성이 높고, 팽창성과 흡착성이 양호한 가소성 점토로 언급되어 있다. 주성분은 몬모릴로나이트(montmorillonite) 혹은 스멕타이트(smectitic) 이다. 이러한 주성분은 물이나 습도가 높은 공기와 접촉하면 물이나 공기 수분이 침투하여 부피 팽창시킨다. 따라서 습윤 상태에 있는 벤토나이트는 건조 상태에 있는 벤토나이트보다 부피가 크게 증가한다. 이와 같이 수분과 접촉한 벤토나이트의 부피가 증가하는 현상을 팽윤(Welling)이라 한다고 나와 있다.

또한 고려대학교에서는 2010년 국내에서 유통되고 있는 3종의 벤토나이트 시료에 대해 XRD(X-ray Diffraction) 시험과 Free Swell 시험(ASTM D5890)을 수행하였다. 이를 통해 몬모릴로나이트의 함유량이 높을수록 팽창지수가 크다는 사실을 확인했으며, 결과는 표 18와 같다. 따라서 이 팽윤 특성을 이용해 고화체 내에 수분 침투를 육안으로 확인이 용이 할 것으로 판단되어 모의 해체 슬러지로 선정 하였으며, 일반 시중에서 판매하는 일성케미칼사의 Active Bentonite를 사용하였다[21,22].

표 18. 벤토나이트 시료의 XRD 분석결과와 팽창지수

성분	Bentonite 1	Bentonite 2	Bentonite 3
Qtz	4.1	3.1	6.8
Pl	58.0	52.1	29.2
K-f	-	-	-
Hbl	-	-	9.0
Cal	1.9	0.3	2.0
Mnt	30.6	38.8	42.8
Ill	-	-	-
Kln	-	-	-
Op	3.8	5.5	3.3
Py	-	-	0.9
Syl	1.7	0.2	6.0
팽창지수 (Swelling index, ml/2g)	13.5	15	24.5

\* Qtz(Quartz:석영), Pl(Plagioclase:사장석), K-f(K-feldspar:정장석), Hbl(Hornblende:각섬석), Cal(Calcite:방해석), Mnt(Montmorillonite:몬모릴로나이트), Ill(illite:일라이트), Kln(Kaolinite:고령토), Op(Opal:단백석), Py(Pyrite:황철석), Syl(Sylvite:실바이트)

## (2) 토양 슬러지 (Soil sludge - No.2)

토양의 대부분은 점토(Clay)<sup>1)</sup>, 실트(Silt)<sup>2)</sup> 그리고 모래 등으로 구성되어 있으며, 이를 입도별로 구분해 각 구성분의 입도 크기를 표 19에 나타냈다. 본 실험에 사용된 토양은 영광발전소 인근 원전 부지외의 토양을 사용하였으며, 이들을 분류하기 위해 사용된 체는 아래 표 20과 같다.

- 1) 점토(Clay)는 입자지름 0.002 mm 이하 미세토. 단위 무게당 표면적이 가장 넓으므로 수분 및 양분 보유력 강함.
- 2) 실트(Silt)는 입자지름이 0.002 mm 이상, 0.02 mm 미만의 흙. 소성이 낮고 기선 상태에서의 강함이 작음.



표 19. 토양 입도 분류(mm)

점토	실트	모래	
		세사	조사
0.002 이하	0.002 ~ 0.02	0.02 ~ 0.2	0.2 ~ 2.0

표 20. 토양 입도 분류에 사용되는 메쉬(MESH)

MESH	선경(Wire diameter)		Opening
	mm	SWG	
400	0.03	49	0.034
500	0.025	50	0.026

황진연은 국내의 34곳에서 적갈색 토양을 채취하여 분석한 결과를 종합하여 표 21과 같이 국내의 토양을 구성하는 화학성분을 발표하였다. 그는 적갈색 토양은 황색토에 비하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O가 많은 반면에 CaO, MgO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O가 다소 적게 함유되어 있다고 하였다. 그리고 입도분석에서 적갈색 토양은 sand = 15 ~ 40 %, silt = 20 ~ 50 %, clay = 30 ~ 60 %이고, 황갈색 토양은 sand = 40 ~ 80 %, silt = 10 ~ 30 %, clay = 10 ~ 40 %임을 발표하였다[23].

표 21. 토양의 무기물 화학적 조성(wt.%)

화학 성분	함유율(%)
SiO <sub>2</sub>	50 ~ 65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16 ~ 24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4 ~ 9
MgO	0.6 ~ 2.5
K <sub>2</sub> O	1 ~ 3
H <sub>2</sub> O	5 ~ 15
기타	10 ppm 이상 (Co, Ni, Cu, Rb, Y, Nb, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Dy, Pb 등)

### (3) 콘크리트 슬러지 (Concrete sludge - No.3)

한국원자력연구원에서는 1988년도 방사성폐기물 고화공정 프로그램 개발과제를 수행하는 과정에서 시중에 판매되는 포트랜드 I형 시멘트의 화학적 조성을 조사했으며, 내용은 아래 표 22와 같다[24].

표 22. 시판용 포틀랜드 시멘트의 조성(wt.%)

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Ig. Loss	Sum
쌍용	61.5	21.7	6.3	2.8	3.3	0.16	2.0	1.2	100.0
동양	62.7	21.0	6.0	2.8	2.6	0.06	2.1	1.5	99.9
한일	63.3	21.0	5.3	5.6	2.6	0.07	2.0	1.1	100.0
성신	62.5	21.4	6.0	3.0	2.7	0.11	2.2	1.0	100.0
현대	61.7	21.3	5.9	3.4	3.3	1.00	2.1	1.1	99.9
아세아	62.3	21.5	5.8	3.2	0.07	1.22	1.9	1.4	100.0

콘크리트 슬러지나 시멘트 슬러지들은 주로 시설의 해체과정이나 방사성 관리구역의 건물 보수작업과정에서 발생되며, 일부는 제염과정에서도 발생할 수가 있다. 엄밀히 말하면 콘크리트 슬러지와 시멘트 슬러지는 다르다. 시멘트 슬러지는 시멘트를 조성하는 모르타르 성분만으로 구성되어 있는 반면에 콘크리트 슬러지는 시멘트 모르타르에 첨가제로 모래나 조악한 자갈들이 포함되어 있기 때문이다. 따라서 본 평가실험에서는 이들을 분리하여 각각에 대하여 실험하고자 한다. 표 23에 일반적으로 사용되는 한일시멘트의 시멘트 조성별로 약 10 kg의 시멘트를 얻기 위한 시멘트조성 원소별로 무게를 각각 계산하여 나타냈다.

표 23. 시판용 포틀랜드 시멘트의 조성별 무게 계산(한일 시멘트)

원소명	원자량	원소의 산화물	산화물의분자량	산화물 함유율(%)* <sup>1</sup>	산화물 함유율 (%)	산화물 함유율(%)* <sup>2</sup>
Ca	40.08	CaO	56.08	63.3	63.3	63.38
Si	28.09	SiO <sub>2</sub>	60.09	21	21	21.03
Al	26.98	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	101.96	5.3	5.3	5.31
Fe	55.85	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	159.7	5.6	5.6	5.61
Mg	24.31	MgO	40.31	2.6	2.6	2.60
Na	22.99	Na <sub>2</sub> O	61.98	0.07	0.07	0.07
S	32.06	SO <sub>3</sub>	80.06	2	2	2.00
Ig.Loss				1.1		
				100.97	99.87	100.00

\*1. 강열감량(Ig.Loss)을 포함할 경우의 시멘트 조성  
 \*2. 강열감량(Ig.Loss)을 제외하였을 때의 시멘트 조성

#### (4) 성프 슬러지 (Sump sludge - No.4)

성프 슬러지는 일반적으로 액체 방사성폐기물 저장탱크의 누수, 방사성 구역의 바닥이나 벽면의 제염과정 유입된 슬러지를 일컫는다. 또는 일부 장치의 표면제염 등의 작업에 의해 발생되어 건물바닥 밑에 설치된 성프내로 유입된 슬러지를 일컫는다. 2003년도 폐기물학회지에 발표된 논문에 영광 1발의 재포장 드럼(H940 x D660 (mm), 82 gal)에 재포장되어 있는 Sump 슬러지에 대한 물리화학적 특성은 표 24와 같다.

표 24. Characteristics of the Sump Sludge

항목	수분, %	pH	밀도, g/ml	유분, %	비고
함량	41	8.4	1.3	3.1	유분은 상등액

아래 Sump Sludge에 대한 표 25의 화학적 조성은 원소별로 기술되어 있어서 향후 실험을 위하여 원소별로 산화물로 전환할 필요가 있다. 이는 원소별로 분석되어 있으나 실제로는 이들은 산화물형태로 존재할 것이다. 모의 폐기물을 제조하기 위해서도 산화물 형태로 구입해야하기 때문이다. 이에 따라 원소별로 조사된 함유율을 산화물로 전환하여 표 26에 나타냈다. 이때 성프 슬러지의 건조, 건조슬러지의 펠릿 성형화 및 폴리머 고화체 제조를 위하여 약 10 kg 의 산화물을 제조토록 하였다[25].

표 25. Chemical Composition of the Sump Sludge (550 °C, 1hr dried)

항목	Fe	Ti	S	B	Na	K	Si	Mg	Ca	Al	Zn	Cu
	(%)	(%)	(%)	( $\mu\text{g/g}$ )	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
함량	10.66	0.42	1.6	63	2.7	2.2	22.9	1.4	0.98	7.1	0.24	0.2

표 26. Sump Sludge (550℃, 1hr dried)의 화학적 조성에 따른 산화물로의 질량 계산

원소명	원자량	함유율 (%)	원소별 함유율 (%)	원소별 함량, g*1	산화물	산화물 분자량	산화물 함유율 (%)
초기 슬러지 분석 결과			슬러지 건조후의 슬러지내 원소 및 산화물별 함유율				
Fe	55.85	10.66	21.15	211.48	Fe2O3	159.7	24.05
Ti	47.88	0.42	0.83	8.33	TiO2	79.88	0.55
S	32.06	1.6	3.17	31.74	SO2	58.06	2.29
B	10.81	0.0063*2	0.0125	0.1250	B2O3	69.62	0.032
Na	22.99	2.7	5.36	53.56	Na2O	61.98	5.74
K	39.1	2.2	4.36	43.65	K2O	94.2	4.18
Si	28.09	22.9	45.43	454.31	SiO2	60.09	38.65
Mg	24.31	1.4	2.78	27.77	MgO	40.31	1.83
Ca	40.08	0.98	1.94	19.44	CaO	56.08	1.08
Al	26.98	7.1	14.09	140.86	Al2O3	101.96	21.17
Zn	65.39	0.24	0.48	4.76	ZnO	81.39	0.24
Cu	63.55	0.2	0.40	3.97	CuO	79.55	0.20
소계		50.4063	100	1,000			100
H2O	18	41					
유분	-	3.1					
기타	-	5.5					
소계		49.6					
합계		100	100	1,000			100

\*1 : 슬러지의 완전 건조 후 슬러지의 무기 산화물별 함유율을 계산하기 위하여 base를 1,000 g 으로 설정

\*2 : 붕소 원소의 단위는  $\mu\text{g/g}$  으로 표현

## 나. 모의 시료의 물리적 특성

### (1) 분말 입자 크기

모의 해체 슬러지의 압축성과 성형성을 사전에 살펴보기 위하여 모의 해체슬러지 폐기물의 입도 분포(Particle size distribution)를 살펴보았다. 모의 썬프 슬러지는 표 27을 참조하여 시중에 일반 시약 또는 특급시약으로 판매되는 것을 구입하였다. 이들을 물속에서 혼합한 후 건조 장치를 이용하여 건조시키는 방법으로 제조하였다. 한편 토양 슬러지는 고리 원전 주변의 토양을 채취하여 사용하였다. 그리고 콘크리트 슬러지는 건물 건축에 사용한 후에 골재로 사용되는 것을 채취하여 체로 걸러 사용하였다. 제조된 모의 슬러지들의 입자크기는 S사의 CILAS 1190 LIQUID로 측정하였으며, 슬러지의 무기화학적 조성을 고려하여 슬러지별 입도분포를 아래 그림 7 ~ 10에 나타냈다.

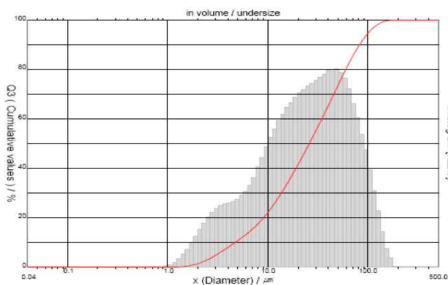


그림 7. Particle size distribution of bentonite (No.1)

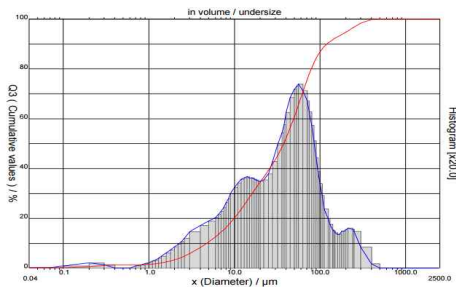


그림 8. Particle size distribution of soil sludge (No.2)

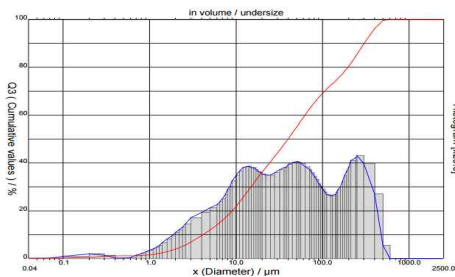


그림 9. Particle size distribution of concrete sludge (No.3)

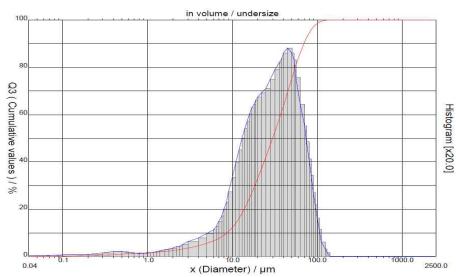


그림 10. Particle size distribution of sump sludge (No.4)

입자크기 분포 측정 결과로부터 각 슬러지별 입자 크기의 비교를 위하여 슬러지별 입자 누적 분포율을 정리하여 그 비교를 표 28에 나타냈다. 표 27에서 50 %의 누적 분포율에서 철 산화물이 비교적 많이 함유된 선프 슬러지의 입자 크기는 토양과 콘크리트 슬러지의 것에 비하여 비율이 낮았다. 그리고 입자 분포 및 크기를 고려하여 볼 때, 토양과 콘크리트 슬러지 입자는 압축 성형이 잘 될 것으로 보였다. 주된 이유는 슬러지의 겉보기 밀도(bulk density)가 워낙 낮기 때문이다.

표 27. 모의 슬러지별 입자 크기의 누적 분포율

누적 분포율(%)	10	50	100	평균입자 ( $\mu\text{m}$ )
토양 (No.2)	4.71	37.58	121.05	56.10
콘크리트 (No.3)	4.15	39.92	303.55	99.53
선프 (No.4)	8.64	29.89	69.64	35.12

## (2) 분말 입자 형태(Mopology, SEM)

슬러지 종류별로 제조한 분말 상태의 사진과 함께 SEM 사진(x1,000, x5,000)을 아래 그림 11 ~ 그림 13에 나타냈다. 단 토양의 경우 SEM 사진은 x100 이상은 장비의 한계로 인해 촬영이 불가능했으며, 구매한 벤토나이트는 촬영에서 제외하였다.

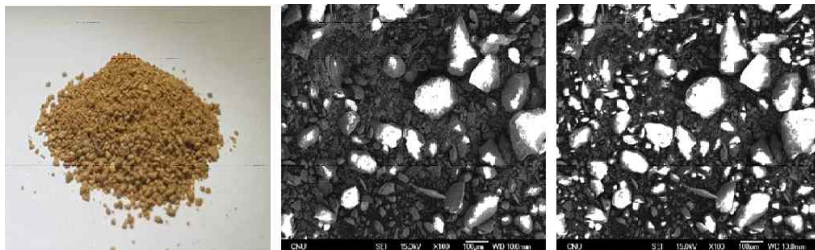


그림 11. SEM of soil sludge - (x100, x100)

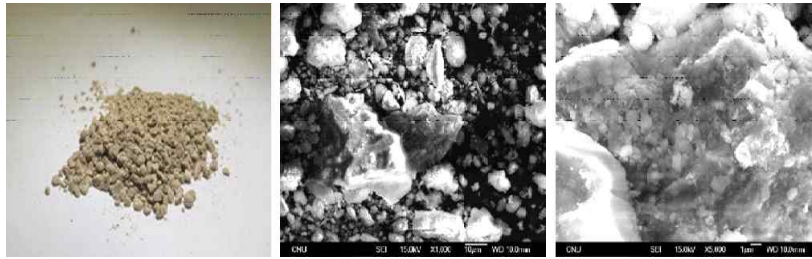


그림 12. SEM of concrete sludge - (x1,000, x5,000)

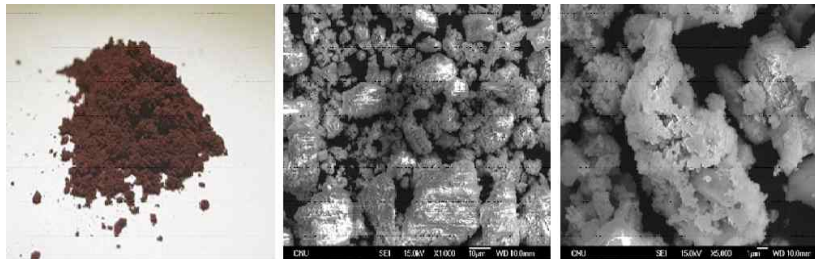


그림 13. SEM of sump sludge - (x1,000, x5,000)

#### 다. 모의 시료의 압축성

슬러지별 분말 입자를 그림 14의 일축 압축기(용량 20톤)의 원통형(cylindrical stainless steel die)내에 자유스럽게 낙하시켜 주입한 후에 측정하였다. 즉 일축압축기의 상부로부터 하부로 상부 가압판을 이동시키면서 분말을 압축하여, 원통형 분말체로 만들어 그의 압축정도를 나타내는 압축성(compressibility)을 평가하였다.



그림 14. Uniaxial compressor's concept for compression of powder

각 슬러지별 분말에 가해진 압력을 그림 15에 나타냈다. 그림 16에서 보듯이 분말의 압축에 적용된 힘은 300 bar 이지만 이를 가압 판의 넓이를 고려하였다. 즉 환산하면 실제로 분말에 가해진 힘은 13.5 톤(13,460 kg<sub>f</sub>)이었다. 그리고 원통 홀의 직경은 20 mm, 높이는 53 mm이며, 그의 부피는 16.642 cm<sup>3</sup>이었다.

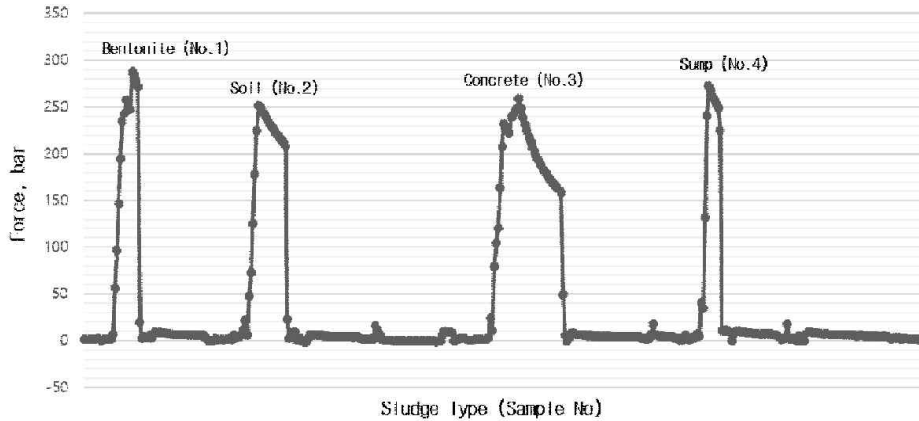


그림 15. Applied pressure(force) to determine the compressibility

13.5 톤의 힘으로 각 슬러지를 압축한 결과를 표 28에 나타냈으며, 압축하여 얻은 원통형 압축 분말체의 형상을 그림 16에 나타냈다.



1. Bentonite      2. Soil sludge      3. Concrete sludge      4. Sump sludge

그림 16. Simulated sludge compressed by uniaxial compressor



그림 16 및 표 29에서 보듯이 모든 슬러지가 압축이 가능한 것으로 보였다. 이는 어디까지나 면압에 의한 압축이기 때문 선압에 의해 압축이 가능한지는 판단하기가 사실 어렵다. 벤토나이트가 가장 압축성이 높은 것으로 나타났으며, 모든 슬러지들은 초기 부피의 1/2 이상으로 압축되었다.

표 28. Compressibility of Various Sludge After Compression

종류	수분 함유율 (%)	분말 상태	무게 (g)	높이 (cm)	압축 전후의 부피 (cm <sup>3</sup> )	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	압축성 (%)
벤토	10.2	분말	12.82	5.30	16.64	0.77	293.95
		압축 분말		1.80	5.66	2.26	
토양	2.5	분말	20.53	5.30	16.64	1.23	232.86
		압축 분말		2.28	7.15	2.87	
콘크리트	7.3	분말	16.83	5.30	16.64	1.01	219.55
		압축 분말		2.41	7.58	2.22	
섬프	5.1	분말	16.90	5.30	16.64	1.02	214.43
		압축 분말		2.47	7.76	2.18	

벤토나이트의 경우 겉보기 밀도가 다른 슬러지에 비하여 낮고 압축된 부피가 작은 것으로 보아 분말 사이의 공극이 많은 것으로 보인다. 이는 압축을 위한 원통형에 주입할 때 자유 낙하시켜서 주입하였다. 그래서 안식각이 매우 커서 분말 입자들 사이사이에 상대적으로 공극을 많이 형성하였기 때문일 것으로 예측되었다.

## 2. 폴리머

### 가. 고화매질

폴리머 고화매질로 사용한 폴리머는 소수성을 갖으면서 매우 강력한 접착력을 갖는 에폭시 수지이다. 에폭시 수지는 국도화학 제품으로서, 주제는 YD-128, 경화제로는 G1034, 그리고 희석제로는 LGE 이었다.

LGE는 주제와 경화제의 혼합을 용이하게 하고, 또한 펠렛과 펠렛 사이의 공극을 채우는 데 유동성을 부여하는 기능을 담당한다. YD-128는 Bisphenol-A로부터 유도된 표준 액상 수지로서 접착력이 매우 우수하고, 내열성과 내화학성도 매우 우수한 수지이다. 다만 점도가 11,500 ~ 13,500 cps 로서 작업성을 위해서는 점도를 낮출 필요가 있다. 경화제인 G1034는 중간정도의 점도(10,000 ~ 20,000 cps)을 갖는 폴리아미드 수지이다. LGE는 에폭시 수지의 점도를 낮추기 사용되는 반응성 희석제로서 C12 ~ C14의 지방족 알코올 혼합물의 글리시딜 에테르이다. 따라서 독성, 증기압 및 휘발성 성분이 낮다(점도, 50 ~ 20 cps).

### 나. 점도 조절 및 혼합비율

YD-128의 에폭시 주제에 LGE 희석제를 5 ~ 25 % 를 첨가하여 각각의 경우에 혼합물의 점도를 측정하였다. 점도 측정은 Brookfield사의 Digital viscometer(모델 : LVDV-E)로 측정하였다. 실험한 결과는 아래 표 29와 같다.

표 29. LGE 첨가량에 따른 점도 측정 결과

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

주제, 경화제 및 희석제의 혼합비율 결정은 제조된 폴리머 고화체의 기계적 강도 및 침수/침출 특성에 많은 영향을 주게 되므로 신중히 결정하여야 한다.

### (1) 혼합비율에 따른 비교군

폴리머 고화체의 처분적합성 평가에 앞서 기존에 사용하던 YD-128 및 G-1034 폴리머와의 비교 군을 형성하기 위해 기존 K사의 씰링계열 에폭시인 KSR(주제)과 KH(경화제), 해외에서 유통 중인 YD-134(주제)와 KMH(경화제), 그리고 D사의 THC 계열의 에폭시를 사용하였다. 즉 폴리머 구성물의 혼합비를 달리하여 예비 시편을 제조하였다. 표 30에서는 에폭시의 주제/경화제/희석제별 혼합 비율을 W%로 보여주고 있다. 각 실험을 들어가기 전, 여분의 시편을 만들어 경화시간, 고화상태, 간이 침수시험 등 다양한 테스트 결과를 비교하였다. 따라서 007부터 010번 시편이 실험에 가장 적합하다는 결과를 얻게 되었다. 따라서 해당 혼합비율로 고화체를 제조해 1차적으로 압축강도, 열순환, 침수시험을 통해 구조적 안정성을 확인한다.

표 30. 예비시편 제조 - 폴리머 구성물의 혼합비

구분	에폭시 혼합				
	시료번호	주제	비율(W%)	경화제	비율(W%)
	001	THC-4001L	100	THC-4001L	100
	002	THC-4001M	100	THC-4001M	100
	003	KSR-177	65	G-1034	35
	004	KSR-177	100	KH-700	100
	005	KSR-276M70	45	G-1034	55
	006	KSR-276M70	30	KH-700	70
	007	YD-128	65	G-1034	35
	008	THC-4001L	100	THC-4001L	50
	009	THC-4001M	100	THC-4001M	50
	010	YD-134X80	40	KMH-153XB80	60

## (2) 혼합비율의 최종 선정

우선 YD-128의 EEW<sup>3)</sup>(에폭시 당량, epoxy equivalent weight), 경화제인 G-1034의 AHEW<sup>4)</sup>(아민의 활성수소당량, active hydrogen equivalent weight)을 고려하여 아래 식으로부터 혼합 비율<sup>5)</sup>이 결정된다.

$$\text{화제 주입량 } (phr) = \frac{AHEW}{EW} \times 100$$

국도화학에서는 YD-128 : G-1034 = 65 : 35 phr 로 혼합하기를 권고하고 있다. 따라서 국도화학에서 권고한 비율대로 혼합비율을 결정하되, 실제로는 주제의 정도를 낮추어야 하므로 LGE의 첨가량을 고려하여야 한다. 첨가된 LGE의 양(YD-128의 10 %)을 고려하여 경화제의 양을 결정하였는데, 도출된 혼합비율은 YD-128 : G-1034 : LGE = 100 : 60 : 10 이었다.

따라서 여기서 선택된 에폭시 및 에폭시 혼합비율에 따라 고화체를 추가로 제작한다. 그리고 해당시험을 통해 구조적 안전성 확인 및 평가를 수행해하며, 처분장의 인수기준에 적합한 고화체의 특성을 종합 평가한다.

## 다. 폴리머 고화

펠릿은 일정한 크기와 형태를 갖고 있으므로, 액체나 유동성 분말 고체입자를 고화매질과 혼합하듯이 교반 등의 방법으로 혼합할 수가 없다. 즉 분말로 성형된 펠릿을 드럼 내에 충전 한 후에는 교반하면서 펠릿과 고화매질을 혼합할 수가 없다는 의미이다. 따라서 펠릿을 드럼 내에 충전 한 후에는 특별한 방법으로 펠릿과 펠릿 사이의 공극내로 액상의 고화매질을 주입하여 경화시키는 안정화 방법을 이용할 수밖에 없다.

대표적인 시료(부피가 1.2 L 인 시료)를 채택하여, 고화체 내부에 대한 온도 변화

3) Epoxy Equivalent Weight, 에폭시기를 1 당량 함유하는 에폭시 수지의 중량

4) Active Hydrogen Equivalent Weight, 아민의 분자량/아민의 활성 수소수

5) phr = parts per hundred parts of resins (에폭시 수지 100에 경화제를 얼마 첨가는 의미)

를 살펴보았다. 이때 보통 폴리머 경화 시 발열반응이 일어나는데 고화체 중심부의 온도와 고화체 주변 온도의 차가 크면 고화체의 내부 및 외부에 많은 균열이 발생기 때문이다. 이에 대한 내용을 그림 17과 그림18에 정리하였다.

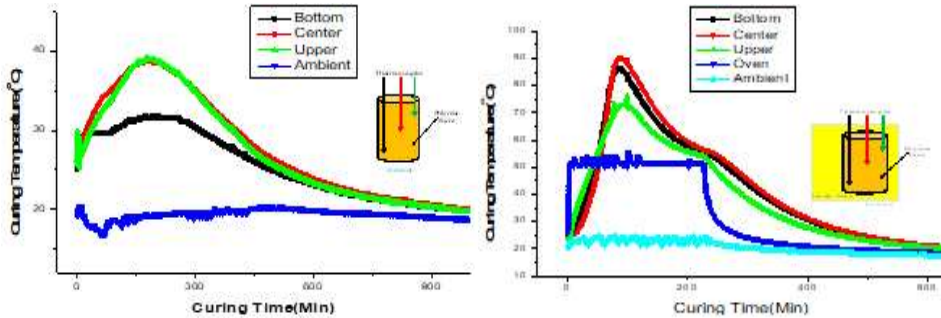


그림 17. 경화 시간에 따른 고화체의 내부 온도변화 - 상온 경화(L), 50°C 경화(R)



그림 18. 열전대를 이용한 온도측정 모습 - 상온 경화(L), 항온조 내의 50°C 경화(R)

즉, 고화체가 경화 시에 열이 많이 발생하는 경우에는 열 발생에 따른 내부 온도를 추정하여, 그 열을 쉽게 발산시키게 하거나 열을 흡수할 수 있는 열 흡수 물질을 사전에 주입하여 열에 의해 고화체가 균열되는 것을 예방하여야 한다. 또는 고화체 주변의 온도를 높여서 고화체 내부의 온도가 자연스럽게 주변온도로 떨어지도록 하여야만 고화체에 균열이 가지 않게 된다. 따라서 펠렛과 에폭시 수지의 안정화를 위한 혼합물의 경화는 빠른 시간 내에 완전히 경화시키기 위하여 60 °C 로 유지되는 항온조 내에서 수행하기로 결정되었다.

## 제2절 실험방법

### 1. 슬러지 분말의 펠릿 성형

본 논문에서는 고화처리 시 충진을 향상시키기 위해 고감용화 성형장치의 최적운전 기준을 선정하였다. 그리고 압축 성형된 펠릿의 건전성을 확보하기 위한 실험을 진행하고자 한다. 보통 고체 입자들의 압축성은 면압으로 평가하는데 본 실험에서 적용된 펠릿 성형은 롤 압축기를 사용하기 때문에 압축력은 선압에 의존하고 있다. 즉, 면압과 선압의 기구에는 실제로 그 차이는 매우 크다. 왜냐하면 분말의 압축은 슬러지 내에 존재하는 공기를 높은 압력으로 배출시키기 때문이다. 면압에 의한 압축은 분말의 상부면 전체를 압축하기 때문에 공극내의 공기를 배출시킴으로 인한 압축이 비교적 용이한 반면에 선압은 문자 그대로 롤과 롤이 접촉하는 선에 의해 압축이 되는 것이기 때문에 공극내의 공기를 배출시키는 데에는 한계를 가질 수밖에 없기 때문이다. 즉, 입자성 미세분말을 펠릿으로 성형하기 위해 앞서 설명한 Roll Compaction System을 적용하여 고감용화 성형장치를 제작해 사용하였으며, 장치의 모습은 그림 19와 같다.

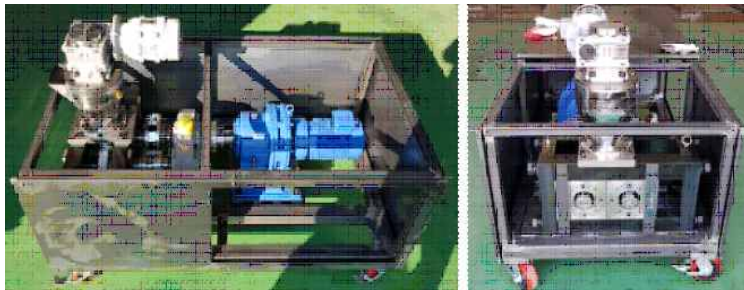


그림 19. Pellet forming device - side(L), front(R)

따라서 슬러지 분말의 펠릿 성형 실험에서는 첫째 성형장치의 운전기준을 정하기 위해 롤 회전속도, 분말 공급속도, 성형 압축력 등 운전 변수를 변화시켜 상황에 따른 펠릿의 질량 변화와 상태를 확인한다. 실험에 사용되는 입자분말은 L사에서 판매하는 입도크기가 85~100  $\mu\text{m}$ 인 Active Bentonite 만 사용하였다. 둘째 성형 펠릿의 제조 및 평가를 위하여 생산된 슬러지별 성형 펠릿을 육안으로 확인하고, 분말기준 감용비 평가를 확인한다.

추가적으로 롤 압축에 의한 성형은 분말의 크기가 작을수록, 또한 철 성분이 많을수록 성형이 잘 수행되지 않는 것으로 알려져 있다. 이를 해결하기 위하여서는 분말의 크기를 일정 크기 이상으로 조절해야한다. 철성분이 많은 경우에는 펠렛의 성형 포켓의 크기를 크게 하여야 하는 것으로도 알려져 있다. 물론 두 가지 모두에서 성형 압축력을 크게 할 필요가 있다. 하지만 이렇게 되면 장치의 크기가 커지게 되는 문제가 발생하게 됨을 인지하고 실험을 수행하였다.

## 2. 슬러지 펠렛의 고화체 제작

본 실험에서 고화체의 균열 방지를 위하여 고화체 주변 온도를 60 °C로 하였다. 또한 폴리머 경화를 촉진시켜 완전히 경화가 이루어지도록 한 측면도 있다. 폴리머 경화의 완료 시점은 고화체의 주변온도와 고화체 내부의 온도가 같아지는 시점으로 하였다. 앞서 폴리머 경화를 모니터링 한 결과를 통해 대략 경화되기 시작한 후 100분정도에서 경화는 완료되었을 것으로 판단된다. 하지만 고화체의 균열을 방지하기 위해 폴리머 경화의 완료 시점은 고화체 주변온도와 고화체 내부의 온도가 같아지는 시점인 5시간 이후로 하였다.



그림 20. 60 °C의 항온조 내에서 경화모습

따라서 슬러지 펠렛의 고화체를 육안으로 먼저 확인하고, 각각의 특성 시험 전 고화체 기준 감용비 평가를 수행한다. 이때 감용비 계산은 아래의 1), 2) 같이 슬러지 분말의 부피를 펠렛을 함유한 폴리머 고화체의 부피로 나누어 계산할 수가 있고, 또한 폴리머 고화체 제조를 위하여 주입된 분말의 무게를 주입된 펠렛의 무게로 나누어서 감용비를 계산할

수가 있다. 이는 무게 자체가 밀도와 밀접하고, 밀도는 부피를 고려한 것이기 때문이다.

- 1) 펠렛 고화체내 분말무게 / 분말 고화체내 분말 무게
- 2) 슬러지 분말의 부피 / 펠렛을 함유한 폴리머 고화체의 부피

### 3. 슬러지 펠렛의 고화체 특성평가

제조된 고화체는 압축강도, 열순환, 방사선조사, 침수시험을 수행해 구조적 건전성 및 처분장의 인수기준에 적합한 고화체의 특성을 종합 평가한다. 또한 인수기준에 의거한 구체적인 시험 방법, 압축강도 측정 시 고화체 각각의 압축강도를 최소·최대·평균으로 구하였다. 이러한 중·저준위 방사성폐기물 인수기준에 따른 합격 유무의 판정하는 방법은 충남대학교에서 발간한 ‘방사성 오염토양 영구처분을 위한 시멘트 고화체 특성평가 연구’ 라는 제목의 논문의 내용을 참고하였다[26].

#### 가. 압축강도 시험(Compressive strength test)

압축강도 시험(Compressive strength test)은 고화체의 압축강도 시험과 열순환시험, 방사선조사시험, 침수시험이 완료 된 고화체를 대상으로 각각 실시한다. 제조한 폴리머 고화체를 한국화학융합시험연구원(KTR)에 압축강도 측정을 의뢰하였으며, 처분장 인수기준에 명시되어 있는 KS F 2405의 절차에 따라 수행하였다. 압축강도 시험장치의 사양은 표 31에 나타내었다[27].

표 31. Specification of the compressive strength test machine

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.



각 시편의 압축강도 시험방법(KS F 2405)은 다음과 같다.

- ① 고화체 시편의 상·하면과 시험기 압축판의 이물질 부착여부를 확인하여 제거한다.
  - ② 고화체 시편의 중심축과 시험기 압축판 중심이 일치하도록 한다.
  - ③ 고화체 시편에 급격한 충격을 주지 않도록 일정한 속도로 압축하중을 가한다.
  - ④ 고화체 시편이 파괴되는 시험에서 시험기를 정지하고, 시험기에 기록된 최대하중을 확인한다.
- ※사용된 압축기는 파괴점에서 자동으로 정지되며, 최대하중, 압축강도, 파괴 곡선이 자동으로 기록

## 나. 침수시험(Water immersion test)

침수시험용 시편은 폴리머 구성물과 혼합비율별 총 7개이며, 'Technical position on waste form, Rev.1 - NRC(Nuclear Regulatory Commission)' 에 기술된 Water immersion test 방법에 따라 수행하였다. 침수액은 탈염수(Demineralized water)를 사용하였으며, 침수시험이 완료된 시편은 압축강도 측정을 실시한다[28,30].

침수시험은 다음 절차는 다음과 같다.

- ① 각각의 침수시험용 용기(5ℓ)에 3개씩 시편을 넣고 침수액을 용기의 벽면을 따라 천천히 붓는다. 침수액은 시편이 완전 히 잠길 수 있도록 시편의 윗면에서 10 ± 2 cm 높이까지 채운다.
- ② 침수 액의 수온은 20 ± 3 °C 로 유지하고, 침수상태는 90일 동안 유지한다.
- ③ 침수시간이 종료되면, 각각의 시편은 침수 액에서 꺼내어 최소 48시간(2일) 동안 실온에서 건조시킨다.
- ④ 실온 건조된 시편은 균열 및 부스러짐 등 육안검사를 실시하고, 버니어 캘리퍼스와 저울을 이용하여 시편의 직경과 높이를 측정하여 부피를 산출하고 무게를 측정한다.
- ⑤ 침수시험 전후의 체적과 중량의 변화유무를 검사한다.
- ⑥ 침수시험이 완료된 건조시편은 압축강도 시험을 실시한다.

## 다. 열순환 시험(Thermal cycling test)

열순환 시험용 고화체 시편의 수는 4개로 하였다. 한국화학융합시험원에 의뢰하여, 'Standard test method for thermal cycling of electroplated plastics - ASTM; American Society for Testing and Materials' 에 기술된 Thermal cycling test 방법에 따라 수행하였다. 열순환 시험이 완료된 시편은 압축강도 측정을 실시한다[29].

열순환 시험 장치는 다음과 같은 요건을 구비해야 한다.

- ① 시험시편이 소정의 동결 용해 사이클(cycle)을 받도록 충분한 열량공급, 보온 및 조절이 가능한 순환식 가열 챔버와 냉각 챔버로 구성되어야 하며, 소정의 요구 온도 사이에서 연속성과 자동적인 재현성 있는 사이클(cycle)이 발생될 수 있어야 한다.
- ② 온도의 상승률과 하강률이 10℃/hr로써, -40℃에서 +60℃까지 조절이 가능하여야 하며, 그 온도에서 24시간 동안 유지되어야 한다.

대표시료의 열순환 시험은 다음과 같은 절차는 다음과 같다.

- ① 시험 시작 후, 시험시편은 1시간동안 22 ± 3℃의 온도를 유지 한다.
- ② 이어서 시험시편은 10℃/hr의 속도로 60℃까지 상승시킨다.
- ③ 1시간동안 60℃를 유지하고, 다시 10℃/hr의 속도로 영하 30℃까지 하강시켜 1시간동안 영하 30℃를 유지한다.
- ④ 다시 10℃/hr의 속도로 60℃까지 상승시킨다.
- ⑤ 위의 ③, ④ 과정을 1사이클(cycle)로 총 30회를 반복한다.
- ⑥ 열순환 시험의 완료 시에는 10℃/hr의 속도로 온도를 내려서 시험온도가 22 ± 3℃로 하고, 이 온도에서 1시간동안 유지시킨 후 시험을 종료한다.
- ⑦ 열순환 시험이 완료되면 각각의 시편은 최소 48시간(2일) 동안 실온에서 건조시킨다.
- ⑧ 시편의 균열 및 부스러짐 등 육안검사를 실시하고, 버니어 캘리퍼스와 저울을 이용하여 시편의 직경과 높이를 측정하여 부피를 산출하고 무게를 측정한다.
- ⑨ 열순환 시험 전후의 체적과 중량의 변화유무를 검사한다.
- ⑩ 열순환 시험이 완료된 시편은 압축강도 시험을 실시한다.

그림 21은 열순환 시험의 초기와 1사이클(cycle)에 대한 시간 과 온도의 변화를 나타낸 것이다. 열순환 시험의 초기는 시편을 1시간동안 상온(22℃)으로 유지하고, 10℃/hr의 속도로 60℃까지 상승시킨다. 따라서 열순환 시험의 초기는 5시간이 소요된다. 열순환 시험의 1사이클(cycle)은 20시간이 소요되며, 30회 반복에 소요되는 시간은 총 600시간(20시간/cycle×30cycle)이다. 열순환 시험의 완료 시 상온(22℃)으로 돌아오는 시간 까지 고려했을 때 5시간이 추가 된다. 따라서 열순환 시험은 약 25.5일 (610시간)이 소요된다.

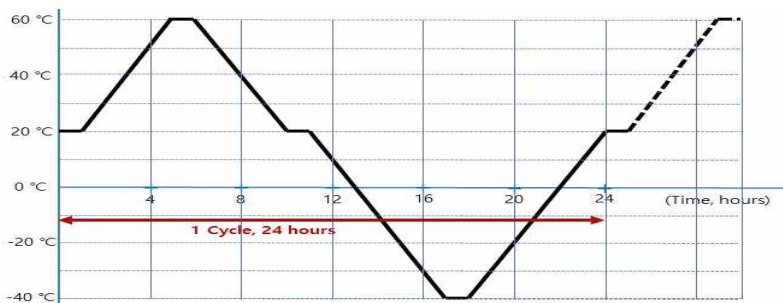


그림 21. Initial 1 cycle graph of the thermal cycling test

## 라. 방사선 조사시험(Irradiation test)

방사선 조사시험은 고화드럼이 처분시설에 300년간 영구처분 됐을 때를 가정하여 실제와 유사하게 방사선을 조사한다. 한국원자력연구원에 의뢰하여 ‘Technical position on waste form, Rev.1. - NRC(Nuclear Regulatory Commission)’ 에 기술된 Irradiation test 방법에 따라 수행하였다. 방사선 조사시험의 조건은 표 32와 같다[28].

표 32. Irradiation test condition

Item	Condition	
Room condition	Temperature	- start (0 hr) : 28.2 °C - stop (106.50 hr) : 28.5 °C
	Pressure	~ 1 atm
	Medium	air
Irradiation Period	2019.07.17. 14:31 ~ 2019.07.22. 02:37 (lose time, 1h 36min)	
Irradiation condition	Type	- Gamma-ray : Co-60(210,536 Ci) - Energy spectrum : 1.17 & 1.33 MeV (Ave.:1.25MeV)
	Total absorbed dose	$1.00 \times 10^6$ Gy ( $1.00 \times 10^8$ rad)
	Average Absorbed dose rate	$9.40 \times 10^4$ Gy/hr ( $9.40 \times 10^6$ rad/hr)
	Irradiation time	106.50 hr
	Dosimeter	Alanine dosimeter

## 제4장 연구결과

### 제1절 슬러지 분말의 펠릿 성형 결과

#### 1. 성형장치 운전기준의 영향 및 평가

장치의 운전 기준을 정하기 위해 롤 회전속도, 분말 공급속도, 성형 압축력 등 운전 변수를 변화시켜 상황에 따른 펠릿의 질량과 상태를 확인하였다. 첫째 롤 회전속도가 증가하면 포켓에 주입되는 분말 양의 감소로 그림 22와 같이 펠릿의 무게는 감소할 수밖에 없다. 따라서 단위시간당 처리량을 늘리기 위해 분말 공급속도 또한 증가 시켜야 했다.

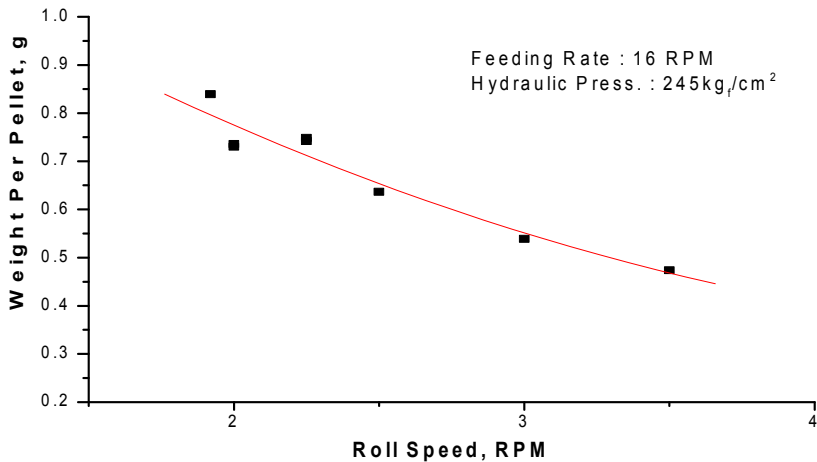


그림 22. Changes in the mass of the pellets depending on the variables - Roll Speed

둘째 분말 공급속도의 증가는 펠릿의 무게와 비례함을 그림 23에서 알 수 있다. 하지만 장치 설계의 한계로 인하여, 분말공급 속도가 19 rpm 이상이면 모터의 토크가 힘을 이기지 못하고 멈춰지게 된다[2].

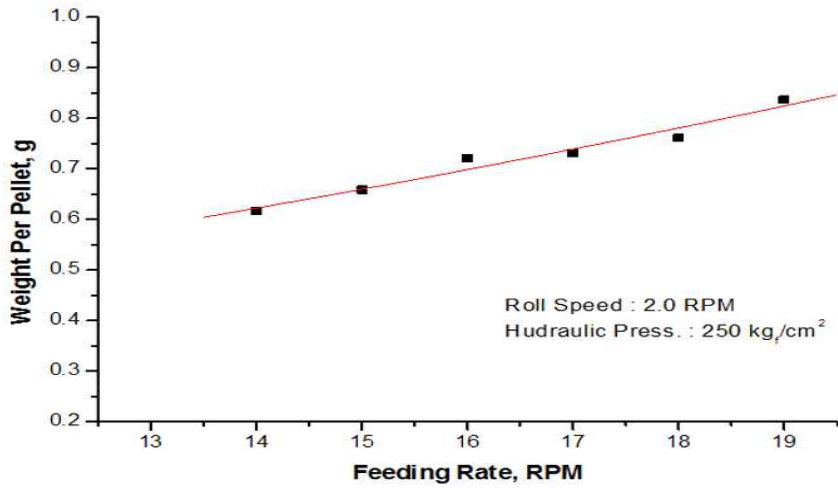


그림 23. Changes in the mass of the pellets depending on the variables - Feeding Rate

셋째 분말 공급속도가 증가할수록 포켓에 공급되는 분말의 양이 증가한다. 이때 롤 간의 Gap이 벌어지는 힘을 유지시킬 수 있도록 성형 압축력을 증가 시켜야 되며, 그림 24 및 그림 25를 보고 알 수 있다.

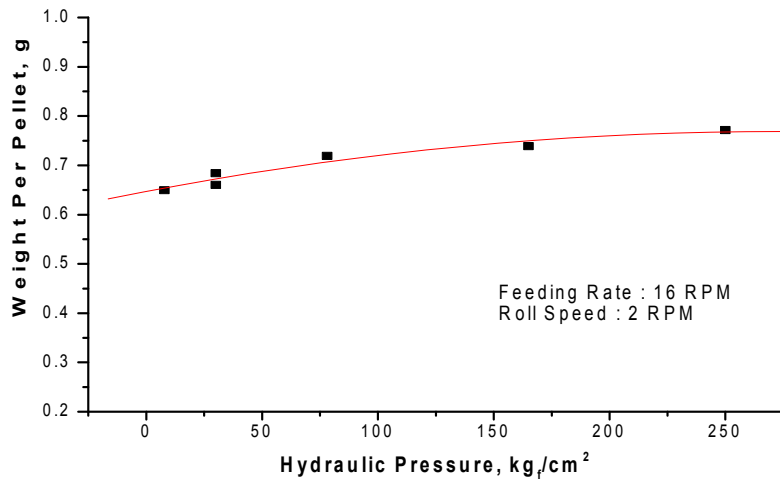


그림 24. Changes in the mass of the pellets depending on the variables - Hydraulic Pressure

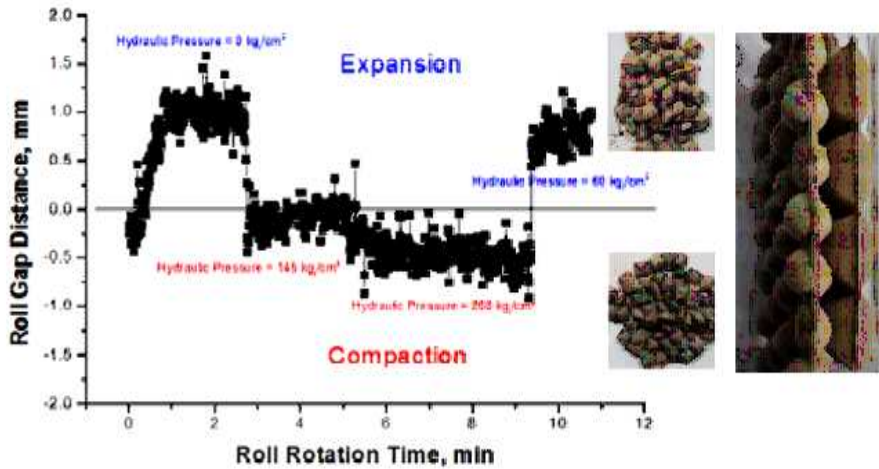


그림 25. Gap distance and compaction depending on the compressive force

실험 내용을 통해 성형장치의 단위시간당 처리량 및 분말의 감용비를 높이면서 펠렛의 건전성을 확보하기 위해 성형 압축력이 매우 중요했다. 이 성형 압축력 증가에 따라 펠렛의 압축상태 및 갭의 벌어짐이 양호해짐을 그림 25를 통하여 알 수 있다. 결과로부터 성형장치의 최적운전기준을 롤 속도 2 rpm, 분말 공급속도 14.0 rpm, 성형 압축력은 245 kgf/cm<sup>2</sup> 로 선정했다. 이와 같은 조건에서 제조된 펠렛의 모습은 그림 26과 같다.



그림 26. 제조된 펠렛의 모습 - Tertragonal shape(L), Circular shap(R)

## 2. 성형 펠렛의 제조 및 평가

### 가. 제조된 성형 펠렛의 상태

실험 결과 고감용화 성형장치의 최적 운전 기준을 적용하여, 감용비가 높은 고건전성 펠렛을 제조할 수 있었다. 장치를 이용한 펠렛 제조 모습은 그림 27, 제조된 모의 해체 슬러지별 펠렛 모습은 그림 28, 그림 29에서 보여주고 있다.



그림 27. 고감용화 성형장치를 이용한 펠렛 제조 모습



그림 28. 모의 해체 슬러지별 시료분말



그림 29. 제조된 모의 해체 슬러지별 펠렛

### 가. 성형 펠렛 감용비 평가

토양, 콘크리트, 성프 슬러지를 펠렛으로 성형한 데이터를 이용해, 분말기준으로 슬러지 분말과 슬러지 펠렛의 감용비를 계산한 결과에 대하여 표 33 ~ 35에 나타냈다. 여기서 슬러지 분말의 밀도는 압축성 평가에서 측정한 밀도 표 29를 참고하였다.

그리고 펠렛의 부피는 설계치와 롤 갭을 1mm하여 각각 계산하였다. 아래 표에서 보듯이 롤 갭이 1 mm 인 경우에 분말기준으로 슬러지의 펠렛화에 따라 계산된 감용비는 9.45 mm 펠렛에 대하여서는 대략 2.2 ~ 3.0 정도였다.

표 33. 토양 슬러지 펠렛의 감용비

시료 번호	펠렛 성형 조건			펠렛 무게 (g)	펠렛의 밀도(g/cm <sup>3</sup> )		감용비	
	Roll, rpm	Force, kgf/cm <sup>2</sup>	Feed, rpm		Gap=0mm (0.254cm <sup>3</sup> )	Gap=1mm (0.349cm <sup>3</sup> )	Gap=0	Gap=1
1	2.5	290	10	0.91	3.61	2.63	3.10	2.25
2	2.5	290	15	1.05	4.16	3.03	3.57	2.60
3	2.5	290	20	1.17	4.60	3.35	3.95	2.87
4	2.5	290	25	1.18	4.67	3.40	4.00	2.91

표 34. 콘크리트 슬러지 펠렛의 감용비

시료 번호	펠렛 성형 조건			펠렛 무게 (g)	펠렛의 밀도(g/cm <sup>3</sup> )		감용비	
	Roll, rpm	Force, kgf/cm <sup>2</sup>	Feed, rpm		Gap=0mm (0.254cm <sup>3</sup> )	Gap=1mm (0.349cm <sup>3</sup> )	Gap=0	Gap=1
1	2.5	290	10	0.88	3.49	2.54	3.25	2.37
2	2.5	290	15	1.04	4.11	2.99	3.83	2.79
3	2.5	290	20	1.07	4.22	3.07	3.94	2.86
4	2.5	290	25	1.10	4.35	3.16	4.05	2.95
5	2.5	290	30	1.05	4.13	3.01	3.85	2.80

표 35. 섀프 슬러지 펠렛의 감용비

시료 번호	펠렛 성형 조건			펠렛 무게 (g)	펠렛의 밀도(g/cm <sup>3</sup> )		감용비	
	Roll, rpm	Force, kgf/cm <sup>2</sup>	Feed, rpm		Gap=0mm (0.254cm <sup>3</sup> )	Gap=1mm (0.349cm <sup>3</sup> )	Gap=0	Gap=1
1	1	290	5	0.93	3.69	2.69	3.62	2.63
2	1	290	10	1.01	3.98	2.89	3.90	2.84
3	1	290	15	1.04	4.11	2.99	4.03	2.93
4	1	290	20	1.06	4.21	3.06	4.12	3.00



## 제2절 슬러지 펠렛의 고화체 제작 결과

### 1. 펠렛 고화체 제작 결과

본 실험에서는 분자들 간의 결합력이 강하고 소수성의 폴리머를 사용하였다. 펠렛의 고화체 이용된 폴리머는 에폭시 수지로서, 주제는 YD-128, 경화제로는 G1074, 희석제로는 LGE이었다. 폴리머에 대한 혼합비율은 YD-128 / G1034 / LGE = 100 / 60 / 10 이었다. 펠렛과 에폭시 수지의 안정화를 위한 경화는 60 °C 로 유지되는 항온조 내에서 수행하였다. 폴리머에 의한 슬러지 경화는 고화시작 시간으로부터 5시간이 경과된 후에 슬러지 고화체를 시편제조 몰드로부터 꺼냈다. 폴리머 혼합비율별 고화체 모습은 그림 30, 슬러지별 폴리머 고화체 모습은 그림 31에 나타냈다.



그림 30. 폴리머 혼합비율별 고화체 모습(007, 008, 009, 010)



그림 31. 슬러지별 폴리머 고화체 모습

그리고 제조된 고화체의 표면을 가공 처리한 후에 고화체의 제반 재원을 측정하였으며, 그 결과는 다음 절인 특성평가 결과 내용에 기술하였다. 따라서 제조된 고화체의 표면가공 및 재원측정 후 각 실험을 수행하였다. 특히 펠렛은 일정한 크기와 형태를 갖고 있으므로, 액체나 유동성 분말 고체입자를 고화매질과 혼합하듯이 교반 등의 방법으로 혼합, 교반할 수가 없기 때문에 펠렛을 드럼 내에 충전 한 후에 펠렛과 펠렛 사이의 공극내로 액상의 고화매질을 주입하여 경화시키는 안정화 방법을 이용하여 고형화 하였다. 이어서 몰드를 제거한 고화체에서 폴리머의 냄새가 전혀 나지 않은 것으로 보아 고화체는 완전히 경화된 것으로 판단하였다.

## 2. 펠렛 고화체 감용비 평가

펠렛의 폴리머 고화 시에 한 번의 크기가 9.45 mm 펠렛을 직경이 50 mm, 높이가 10 7.53 mm 인 원통형 시편 제조 몰드를 사용하였다. 그리고 각 원통형 시편제조 몰드를 각 슬러지 분말로 가득 채워 슬러지 분말의 무게를 측정하였다. 시편제조 몰드로부터 폴리머 고화체를 제거해 고화체의 상부 면을 고화체의 밑면과 수평 되며, 가공 처리 시에 펠렛이 외부로 노출되지 않도록 하였다. 이어서 가공된 폴리머 고화체의 각종 재원을 측정하였으며 산술 평균치를 얻었다.

감용비 계산은 슬러지 분말의 부피를 펠렛을 함유한 폴리머 고화체의 부피로 나누어 계산할 수가 있다. 또한 폴리머 고화체 제조를 위하여 주입된 분말의 무게를 주입된 펠렛의 무게로 나누어서 감용비를 계산할 수가 있다. 이는 무게 자체가 밀도와 밀접하고, 밀도는 부피를 고려한 것이기 때문이다. 아래 그림 32 처럼 고화체의 최상단 부위에 펠렛들은 없고 오직 폴리머만이 차지하는 부피가 크기 때문에 감용비 계산을 하기가 어렵고, 오히려 감용비가 실제의 감용비보다 작게 평가될 것이다.



그림 32. 고화체의 최상단 부위의 모습

표 36. Calculated Volume Reduction of Waste Form(3 Sludge)

시료 번호	펠릿 종류	펠릿 크기 (mm)	고화체 직경 (mm)	고화체 높이 (mm)	고화체 무게 (g)	고화체 부피 (cm <sup>3</sup> )	고화체 밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	펠릿 무게 (g)	분말 무게 (g)	감용비 (% 분말/펠릿)
4-1	섬프	9.45	50.16	103.43	372.69	204.26	1.82	265.58	229.27	0.86
4-2			49.91	101.92	370.35	199.33	1.86	266.39	226.91	0.85
4-3			50.07	102.43	369.98	201.58	1.84	264.88	227.63	0.86
5-1	토양		50.00	99.06	322.61	194.41	1.66	280.39	254.06	0.91
5-2			49.92	98.86	322.54	193.39	1.67	270.18	247.19	0.91
5-3			49.79	99.48	325.32	193.57	1.68	272.46	248.58	0.91
6-1	콘크리트		49.94	100.90	326.03	197.51	1.65	268.18	224.19	0.84
6-2			49.88	98.09	319.82	191.55	1.67	253.83	211.27	0.83
6-3			49.97	105.13	336.26	206.10	1.63	256.46	226.82	0.88

표 36에서 보듯이 슬러지 분말을 펠릿으로 압축 성형하여 고형화 하였을 때의 감용비(분말/펠릿의 비율)는 슬러지 종류에 따라 다르지만 대략 0.83 ~ 0.93 범위 내이다. 다시 말해서 1.3 ~ 1.6 배로 부피가 줄어졌다는 의미이다. 또한 만약에 슬러지 분말을 시멘트나 기타 고화 매질로 고형화 하는 경우에는 슬러지 분말의 자체 부피보다는 커진다. 즉, 만약에 이들 슬러지 분말을 시멘트나 기타의 고화매질로 고화하였을 경우 슬러지 분말의 함유율을 50 %로 한다면 최종 고화체의 부피는 2.2 ~ 3.2 배로 증가하게 될 것이다.

## 제3절 슬러지 펠렛의 고화체 특성평가 결과

### 1. 압축강도 시험결과

압축강도 시험은 시편을 건조기(60 ℃)에서 24시간 이상 양생 후 실시하였으며, 함입된 펠렛의 재료는 벤토나이트를 이용하였다. 또한 제작 시 폴리머 구성물과 혼합비율을 달리 하여 총 7개의 시편 측정값을 구하였다. 그림 33은 한국화학융합시험원에서 압축강도 측정 시 시편이 파단되기 전과 후의 모습이다.



그림 33. 압축강도 측정 전·후의 모습 - 측정 전(위), 측정 후(아래)

각각의 고화체 총 7개의 시편에 대해 압축강도를 측정하였으며, 각각의 시편에 대한 압축강도 결과는 표 37에 정리하였다. 표 38은 국내의 중·저준위 방사성폐기물 인수기준에 따른 합격 유무의 판정을 나타낸 것이다. 최소 압축강도는 95.45 kgf/cm<sup>2</sup>이며, 최대 압축강도는 344.66 kgf/cm<sup>2</sup> 으로 인수기준보다 최소 2.7배에서 최대 9.8배로 기준을 모두 만족하여 고화체의 구조적 안정성이 확보되는 것으로 평가된다.

표 37. Results of the compressive strength test

Sample No	Specimen Size (mm)	Weight (g)	Sample volume (cm <sup>3</sup> )	Cross-section Area (cm <sup>2</sup> )	Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
007-03	H=107.30 D=49.90	325.20	209.73	19.55	260.03
007-08	H=107.00 D=49.90	325.80	209.15	19.55	287.56
008-01	H=97.10 D=49.90	333.40	189.80	19.55	340.59
009-03	H=100.7 D=50.00	323.30	196.25	19.63	344.66
010-03	H=104.80 D=49.60	310.10	202.39	19.31	108.09
010-06	H=100.30 D=49.60	300.60	193.70	19.31	99.01
010-09	H=100.40 D=49.70	301.00	194.68	19.39	95.45

표 38. Acceptable test of the compressive strength test

Sample No	Min (kgf/cm <sup>2</sup> )	Max (kgf/cm <sup>2</sup> )	Avg (kgf/cm <sup>2</sup> )	Pass criterion (kgf/cm <sup>2</sup> )	Comparison criteria	Pass/Fail
007 ~ 010	95.45	344.66	219.34	≥35.2	2.7 ~ 9.8	Pass

## 2. 침수시험 결과

침수시험도 동일하게 시편을 건조기(60℃)에서 24시간 이상 양생 후 실시하였으며, 함입된 펠렛의 재료는 벤토나이트를 이용하였다. 또한 제작 시 폴리머 구성물과 혼합 비율을 달리하여 총 7개의 시편 측정값을 구하였다. 침수액은 탈염수(Demineralized water)를 사용하였으며, 침수기간은 약 90일로 하였다.

침수시험이 완료된 벤토나이트 및 슬러지별 고화체 시편은 실온에서 2일간 건조시킨 후 균열(cracking), 팽윤(swelling), 부스러짐(crumbling) 등의 육안검사를 실시하였다. 침수시험 완료 후의 고화체 시편은 그림 34에서 보여지는 바와 같이 균열, 팽윤, 부스러짐 등이 발견되지 않았으며, 육안검사를 통과 한 시편은 인수기준 만족 여부를 평가하기 위해 압축강도를 측정하였다. 그림 35는 침수시험이 끝난 시편을 한국화학융합시험원에서 압축강도 측정 시 시편이 파단되기 전과 후의 모습이다.



그림 34. 침수시험 시편 모습 - 종료 직 후(L), 실온 건조 후(R)



그림 35. 침수시험 후 압축강도 측정 전·후의 모습 - 측정 전(위), 측정 후(아래)

각각의 고화체 총 7개의 시편에 대한 압축강도 결과는 표 40과 같다. 표 41은 중·저준위 방사성폐기물 인수기준에 따른 합격 유무의 판정을 나타낸 것이다. 최소 압축강도는 84.02 kgf/cm<sup>2</sup>이며, 최대 압축강도는 357.92 kgf/cm<sup>2</sup> 으로 인수 기준보다 최소 2.4배에서 최대 10.2배로 기준을 모두 만족하였고, 고화체의 구조적 안정성이 확보되는 것으로 평가되었다.

표 39. Polymer(Epoxy) solid state data - Before the water immersion test

Sample No	Specimen Size (mm)	Weight (g)			Sample volume (cm <sup>3</sup> )
		Powder	Epoxy	Total	
007-06	H=103.78 D=49.96	190.09	129.05	319.14	203.24
007-07	H=103.78 D=49.93	190.03	128.58	318.61	203.02
007-09	H=102.37 D=50.00	190.18	135.38	325.56	200.10
008-02	H=98.17 D=49.83	190.20	146.48	336.68	191.33
009-02	H=102.01 D=49.91	190.09	134.87	324.96	199.47
010-02	H=101.91 D=49.64	190.13	119.36	309.49	198.43

표 40. Results of the compressive strength test after water immersion test

Sample No	Specimen Size (mm)	Weight (g)	Sample volume (cm <sup>3</sup> )	Cross-section	Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
				Area (cm <sup>2</sup> )	
007-06	H=104.10 D=50.20	321.20	205.93	19.78	252.89
007-07	H=104.10 D=50.10	321.10	205.11	19.70	246.77
007-09	H=107.70 D=50.10	329.20	212.21	19.70	252.89
008-02	H=98.50 D=50.10	338.40	194.08	19.70	159.08
009-02	H=101.70 D=50.00	326.40	199.59	19.63	357.92
010-02	H=101.50 D=49.50	301.10	195.23	19.23	84.02

표 41. Acceptable test of the compressive strength test after water immersion test

Sample No	Min (kgf/cm <sup>2</sup> )	Max (kgf/cm <sup>2</sup> )	Avg (kgf/cm <sup>2</sup> )	Pass criterion (kgf/cm <sup>2</sup> )	Comparison criteria	Pass/Fail
007 ~ 010	84.02	357.92	225.60	≥ 35.2	2.4 ~ 10.2	Pass

### 3. 열순환 시험결과

열순환 시험도 동일하게 시편을 건조기(60℃)에서 24시간 이상 양생 후 실시하였으며, 함입된 펠렛의 재료는 벤토나이트를 이용하였다. 또한 제작 시 폴리머 구성물과 혼합비율을 달리하여 총 4개의 시편 측정값을 구하였다. 한국화학융합시험원에서 사용한 열순환 시험 장치는 Temperature & Humidity Control Chamber이다. 이 시험 장치는 온도의 상승과 하강을 10℃/hr 로 조절할 수 있으며, 온도는-40℃에서 +80℃ 이상까지 조절이 가능하고, 그 온도에서 24시간 유지할 수 있다. 또한, 열순환시험에서 요구하는 -40℃에서 +60℃ 까지 상승과 하강, 1시간온도유지 등의 과정을 1 사이클(cycle)로 총 30회 반복하도록 프로그램화 되어 있다.

열 순환 시험이 완료된 시편은 실온의 실험실에서 2일간 건조시킨 후 균열, 팽윤, 부스러짐 등의 육안검사를 실시하였다. 열순환 시험 완료 후의 시편 중 010-10 시편의 미세한 팽윤 현상 외에는 균열, 팽윤, 부스러짐 등이 발견되지 않았다. 육안검사를 완료 한 시편은 인수기준 만족여부를 평가하기 위해 압축강도를 측정하였다. 그림 36은 열순환 시험이 끝난 시편을 한국화학융합시험원에서 압축강도 측정 시 시편이 파단되기 전과 후의 모습을 촬영한 사진이다.



그림 36. 열순환 시험 후 압축강도 측정 전·후의 모습 - 측정 전(위), 측정 후(아래)



각각의 고화체 총 4개의 시편에 대한 압축강도 결과는 표 43과 같다. 표 44는 중·저준위 방사성폐기물 인수기준에 따른 합격 유무의 판정을 나타낸 것이다. 최소 압축강도는 139.70 kgf/cm<sup>2</sup>이며, 최대 압축강도는 381.37 kgf/cm<sup>2</sup> 으로 인수 기준보다 최소 4.0배에서 최대 10.8배로 기준을 모두 만족하였고, 고화체의 구조적 안정성이 확보되는 것으로 평가되었다.

표 42. Polymer(Epoxy) solid sate data – Before the thermal cycling test

Sample No	Specimen Size (mm)	Weight (g)			Sample volume (cm <sup>3</sup> )
		Powder	Epoxy	Total	
007-01	H=104.12 D=49.95	190.06	123.42	313.48	195.52
008-03	H=97.93 D=49.85	190.10	145.28	335.38	191.06
009-01	H=97.22 D=49.82	190.07	123.85	313.92	189.48
010-01	H=99.52 D=49.59	190.13	113.03	303.16	192.18

표 43. Results of the compressive strength test after thermal cycling test

Sample No	Specimen Size (mm)	Weight (g)	Sample volume (cm <sup>3</sup> )	Cross-section Area (cm <sup>2</sup> )	Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
007-01	H=101.0 D=49.90	313.60	197.42	19.55	276.34
008-03	H=97.90 D=49.80	335.40	190.59	19.47	353.84
009-01	H=97.30 D=49.80	314.00	189.43	19.47	381.37
010-01	H=99.30 D=49.10	299.60	187.92	18.92	139.70

표 44. Acceptable test of the compressive strength test after thermal cycling test

Sample No	Min (kgf/cm <sup>2</sup> )	Max (kgf/cm <sup>2</sup> )	Avg (kgf/cm <sup>2</sup> )	Pass criterion (kgf/cm <sup>2</sup> )	Comparison criteria	Pass/Fail
007 ~ 010	139.70	381.37	287.81	≥ 35.2	4.0 ~ 10.8	Pass

## 4. 방사선 조사시험 결과

방사선 조사시험은 시편을 건조기(60℃)에서 24시간 이상 양생 후 실시하였다. 함입된 펠렛의 재료는 모의 시료로 선정된 벤토나이트, 토양, 콘크리트, 섬프 총 4가지의 분말 슬러지를 이용하였다. 또한 제작 시 압축강도, 침수, 열순환 시험을 통해 선정된 폴리머 구성물과 혼합비율을 사용한 총 4개의 시편 측정값을 구하였다.

고화체 시편은 1.0E+07 Gy 범위에서 방사선 조사선량이 피폭되도록 방사선조사 장치의 가동시간을 정하여 조사시켰으며, 그림 37은 한국원자력연구원에서 촬영한 방사선 조사시험 모습이다. 방사선 조사시험 완료 후의 시편은 폴리머 구성물의 변색 외에는 균열, 팽윤, 부스러짐 등이 발견되지 않았다. 육안검사를 완료 한 시편은 인수기준 만족여부를 평가하기 위해 압축강도를 측정하였다. 그림 38은 방사선 조사시험이 끝난 시편을 한국화학융합시험원에서 압축강도 측정 시 시편이 파단되기 전과 후의 모습이다.



그림 37. 방사선 조사시험 모습



그림 38. 방사선 조사시험 후 압축강도 측정 전·후의 모습  
 - 측정 전(위), 측정 후(아래)

각각의 고화체 총 4개의 시편에 대한 압축강도 결과는 표 46과 같다. 표 47은 중·저준위 방사성폐기물 인수기준에 따른 합격 유무의 판정을 나타낸 것이다. 최소 압축강도는 243.71 kgf/cm<sup>2</sup>이며, 최대 압축강도는 322.23 kgf/cm<sup>2</sup> 으로 인수 기준보다 최소 6.9배에서 최대 9.2 배로 기준을 모두 만족하였고, 고화체의 구조적 안정성이 확보되는 것으로 평가되었다.

표 45. Polymer(Epoxy) solid sate data - Before the irradiation test

Sample No	Incorporated material type	Specimen Size (mm)	Weight (g)			Sample volume (cm <sup>3</sup> )
			Powder	Epoxy	Total	
IR1	Bentonite pellets	H=99.07 D=49.79	222.68	97.81	320.49	192.80
IR2	Soil pellets	H=101.7 D=49.9	260.39	89.31	349.70	198.79
IR3	Concrete pellets	H=97.99 D=49.87	223.83	95.60	319.43	191.31
IR4	Sump pellets	H=102.16 D=49.79	264.88	104.37	369.25	198.81

표 46. Results of the compressive strength test after irradiation test

Sample No	Incorporated material type	Specimen Size (mm)	Weight (g)	Sample volume (cm <sup>3</sup> )	Cross-section Area (cm <sup>2</sup> )	Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
IR1	Bentonite pellets	H=99.08 D=49.79	320.24	192.81	19.46	297.76
IR2	Soil pellets	H=101.70 D=49.91	349.62	198.87	19.55	311.01
IR3	Concrete pellets	H=98.01 D=49.89	319.27	191.50	19.54	243.71
IR4	Sump pellets	H=102.17 D=49.81	369.02	198.99	19.48	322.23

표 47. Acceptable test of the compressive strength test after irradiation test

Sample No	Min (kgf/cm <sup>2</sup> )	Max (kgf/cm <sup>2</sup> )	Avg (kgf/cm <sup>2</sup> )	Pass criterion (kgf/cm <sup>2</sup> )	Comparison criteria	Pass/Fail
IR1 ~ IR4	243.71	322.23	293.68	≥ 35.2	6.9 ~ 9.2	Pass

## 5. 고화체 특성평가 요약

중·저준위 방사성폐기물 인수기준에 규정된 4개의 항목을 실행한 후에 펠렛 고화체의 압축강도를 측정했으며, 시험전의 강도와 비슷한 압축강도를 보였다. 그림 39는 펠렛 고화체의 각각의 시험 후 압축강도를 비교해 정리했으며, 중·저준위 방사성폐기물 인수기준 보다 훨씬 상회함을 알 수 있다.

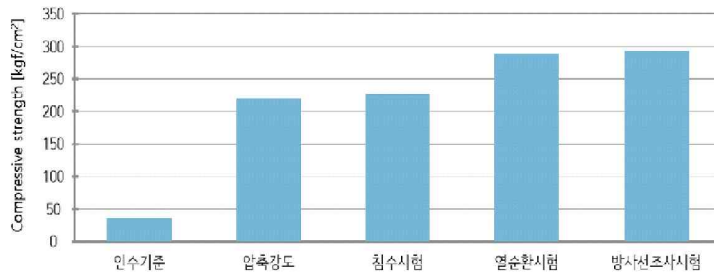


그림 39. Compressive strength comparison for the pellet solidification samples

폴리머 고화체는 중·저준위 방사성폐기물 인수기준에 규정된 6개의 항목에 대한 시험결과 모든 항목에서 인수기준을 충분히 만족 한다. 표 48은 고화체의 시험결과와 합격유무의 판정을 요약해 나타내었다.

표 48 . Test results & acceptable test of pellet solidification samples

Item	Test results			Pass criterion	Pass/Fail
	Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Leachability index	Free Standing water (vol.%)		
1. Compressive strength test	219.34			≥ 35.2 (kgf/cm <sup>2</sup> )	Pass
2. Water immersion test	225.60		--		
3. Thermal cycling test	287.81	-			
4. Irradiation test	293.68				
5. Leaching test	-	Co : 12.3 Cs : 8.6 Sr : 10.41	-	≥ LX : 6	Under testing
6. Free standing test	-		-	< 0.5 (vol.%)	-

## 제5장 결론 및 제안

### 제1절 결론

본 연구에서는 향후 원전해체과정에서 발생하는 슬러지/슬러리 및 분말상 폐기물 그리고 제염에 용치 못한 미세크기의 오염토양을 대상으로 하고, 분말상의 모의 해체 슬러지를 이용해 펠렛으로 압축 성형하였다. 제작된 펠렛을 함입해 고화체를 만들어 처분장 인수기준에 규정된 4개 시험항목을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

1) 분말 성형장치의 최적운전기준을 롤 속도 2 rpm, 분말 공급속도 14.0 rpm, 성형 압축력은 245 kgf/cm<sup>2</sup>으로 선정했다. 이는 펠렛 제조 시 분말의 감용비, 펠렛의 압축상태 및 갭의 벌어짐을 고려해 선정되었다. 펠렛 성형 시 분말의 크기를 일정 크기 이상으로 조절해야 하며, 성형 압축력을 크게 할 필요가 있으나 장치의 크기가 커지게 된다.

2) 토양 및 콘크리트 슬러지를 펠렛으로 성형 후 분말 기준 감용비 측정 결과, 롤 갭이 1 mm 인 경우에 9.45 mm 펠렛에 대하여 대략 2.2 ~ 3.0 배로 측정 되었다. 장치의 성능을 향상 시킬수록 분말 기준 감용비 또한 증가 할 것이다.

3) 슬러지 분말을 펠렛으로 압축 성형하여 고형화 하였을 때의 감용비(분말/펠렛의 비율)는 슬러지 종류에 따라 다르지만 1.3 ~ 1.6 배로 부피가 감소되었다. 만약 이들 슬러지 분말을 시멘트나 기타의 고화매질로 고화하였을 경우 슬러지 분말의 함입율을 50 %로 한다면 최종 고화체의 부피는 2.2 ~ 3.2 배로 증가하게 될 것이다. 또한 고화체의 최상단 부위에 펠렛들은 없고 오직 폴리머만이 차지하는 부피가 크기 때문에 실제의 감용비 보다 작게 평가 되었다.

4) 이용된 폴리머는 에폭시 수지로서, 주제는 YD-128, 경화제로는 G1074, 그리고 희석제로는 LGE 이었다. 폴리머 혼합비율별 고화 시편 중 선정된 혼합비율은 YD-128 / G 1034 / LGE = 100 / 60 / 10(007번 고화시편)이다. 시편을 육안 및 압축강도 측정 시 비교군(008, 009, 010번 고화 시편) 보다 결과가 우수 하였다.

5) 펠릿 고화체의 각각 시험 후 압축강도 측정 결과 인수기준  $35.2 \text{ kgf/cm}^2$  보다 훨씬 상회하는  $225.60 \text{ kgf/cm}^2$  의 평균 압축강도가 측정되었으며, 즉 인수기준의 6.4배 이상이다.

펠릿 폴리머 고화체는 중·저준위 방사성폐기물 인수기준에 규정된 4개의 항목에 대한 시험결과, 모든 항목에서 인수기준을 충분히 만족 한다. 또한 처분장 인수기준에 규정된 침출시험을 통해 침출성도 확인 및 평가가 55필요하며, 해당 실험은 진행 중에 있다.

## 제2절 제안

본 논문에서는 해체 슬러지 폐기물을 대상으로 펠렛 폴리머 고화체를 제조하고, 제조된 고화체로 특성평가 실험을 수행하였다. 대상 물질을 펠렛으로 압축성형 후 고화처리 하는 공정에 대해서 추가적인 실험과 보완이 필요하다고 사료된다. 왜냐하면 앞으로 원자력발전소 해체 시 발생하는 슬러지 폐기물을 본 논문의 실험결과를 바로 적용하는데 한계가 있다. 이러한 이유는 영구처분에 적합한 물리적 특성을 갖는 것이 확인되었지만, 폴리머 혼합 비율과 펠렛의 충전량에 따라 더 좋은 결과를 도출 가능하다고 판단되기 때문이다. 따라서 폴리머의 혼합 비율에 따른 점도 조절 및 펠렛 함입 시 폴리머의 침투가 좀 더 용이할 수 있도록 범위를 좀 더 세밀하게 나누어 추가 실험이 필요할 것으로 생각된다.

또한 폴리머 고화체 강도에 영향을 줄 수 있는 성형 펠렛의 강도를 고려하지 않은 조건에서 실험을 수행하였다. 향후 추가 실험에는 폴리머 고화체에 함입하는 펠렛의 견전성에 영향을 미치는 입도크기별, 수분함유도 조절을 고려한 실험계획 수립이 필요할 것으로 판단된다. 향후 분말의 입자크기 및 입도분포에 따른 영향, 수분 함유율이 펠렛 성형도에 미치는 영향 등 추가적인 실험과 보완점을 개선하여 펠렛 성형체의 견전성을 확보한다면 분말 폐기물의 고화처리 시 높은 충진율 확보로 과도한 처분비용 및 포화문제 해결에 적용할 수 있다고 판단된다.

추가적으로 고리 1호기의 해체 과정에서 발생될 대량의 방사성 폐기물을 고려하여야 한다. 현재 처리되지 못하고 있는 방사성 폐기물을 우선적으로 처리해야 미래의 폐기물저장 상태가 과포화 되는 것을 막을 수 있다고 생각한다. 이와 관련하여 HIC 용기에 슬러지를 압축 성형한 펠렛으로 먼저 주입하고 용기 내 남은 공간에 1)슬러지 분말을 주입하는 방식, 2)폴리머를 주입해 고화하는 방식이 슬러지의 처분을 위한 감용화에 매우 바람직한 것으로 사료된다.

## 제6장 참고문헌

- 1 . J. S. Song, S. H. Lim, M. Y. Jung and K. H. Kim, "A Study on the Pelletization of Powdered Radioactive Waste by Roll Compaction" JNFCWT (Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology) Vol.17, No.2, pp203-212, June (2019)
- 2 . Waste from Decommissioning of Nuclear Power Plants, SKI Technical Report 92:17(1992)
- 3 . 김희근 외, 원전 해체폐기물 인수기준(안) 설정 용역 최종보고서, 한국원자력환경공단 (2018)
- 4 . AIF/NESP-036, "Guideline for Producing Commercial Nuclear Power Plant Decommissioning Cost Estimate", Vol.1, 1986
- 5 . US DOE, "Decommissioning Benchmarking Study", Jan.15, 1997
- 6 . Innovative waste treatment and conditioning technologies at nuclear power plants, IAEA-TECDOC -1504 (May 2006)
- 7 . Considerations for Waste Minimization at the Design Stage of Nuclear Facilities, IAEA TR No. 460 (2007. 12)
- 8 . NRC, Data Base for Radioactive Waste Management, Volume 2, Waste Source Options Report, NUREG/CR1759, (1981)
- 9 . IAEA, "Managing Low Radioactivity Material from the Decommissioning of Nuclear Facilities", Technical Reports Series No. 462
- 10 . IAEA-TECDOC-1817, Selection of Technical Solutions for the Management of Radioactive Waste, July 2017
- 11 . 10 CFR 61, licenses for the disposal of low-level radioactive wastes (LLW)
- 12 . DOE 435.1, Low-level Waste Requirements
- 13 . 한국원자력환경공단, 방사성폐기물 인수검사, LILW-운영-방사-028
- 14 . 한국원자력환경공단, 고형화 방사성폐기물 구조적 건전성 시험 검증, LILW-운영-방사-048
- 15 . Korea radioactive waste agency, 'LILW disposal facility Safety reports' , 4.12A-103, (2008)
- 16 . IAEA-TECDOC-1817, Selection of Technical Solutions for the Management of Radioactive Waste, July 2017
- 17 . IAEA-TECDOC-1096, Review of the factors affecting the selection and implementation of waste management technologies



- 18 .Hiroaki Masuda, Ko Higashitani, Hideto Yoshida, Power Technology Handbook, 3rd Edition, Taylor & Francis(2006)
- 19 .Yus Aniza Yusof, Andrew C.Smithb, Brian J.Briscoe, Roll compaction of maize powder, Chemical Engineering Science 60(2005) 3919-3931
- 20 . 표형렬외 6인, The Characterization of Spherical Particles in Steam Generator Sludge, J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol.4(1), P.59-64, Mar. 2006.
- 21 .Chemical and Physical Influence Factors on Performance of Bentonite Grouts for Backfilling Ground Heat Exchanger, Journal of the Korean Geotechnical Society, Volume 26 Issue 12 (2010)
- 22 . 한국원자력연구원, 벤토나이트 방사성폐기물처분장 방벽재, KAERI/GP-535/2019(2019)
- 23 . 황진연 외 5인, “우리 나라 황토(풍화토)의 구성광물 및 화학성분”, 한국광물학회지 제13권 제3호, pp.147 ~ 163 (2000)
- 24 . 한국전력공사기술연구원, 방사성폐기물고화공정프로그램개발, KRC-87N-J05(1989.7)
- 25 이지훈외 3인, 원전 집수조 발생슬러지 처리연구, 한국폐기물학회지 제20권 제8호, 758-764(2003)
- 26 . 충남대학교, 방사성 오염토양 영구처분을 위한 시멘트 고화체 특성평가 연구 (2017)
- 27 .Korean Agency for Technology and Standards, ‘Standard test method for compressive strength of concrete, KS F 2405, (2010)
- 28 .Nuclear Regulatory Commission, Technical Position on Waste Form, Rev.1, (1991)
- 29 .American Society for Testing and Materials, ‘Standard test method for thermal cycling of electroplated plastics, (1985)
- 30 .American Nuclear Society, Measurement of the leachability of solidified low-level radioactive wastes by a short-term test procedure, ANSI/ANS-16.1, (2003)