

Figure 9. 평판에서 용융염의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 회수 농도(총류)

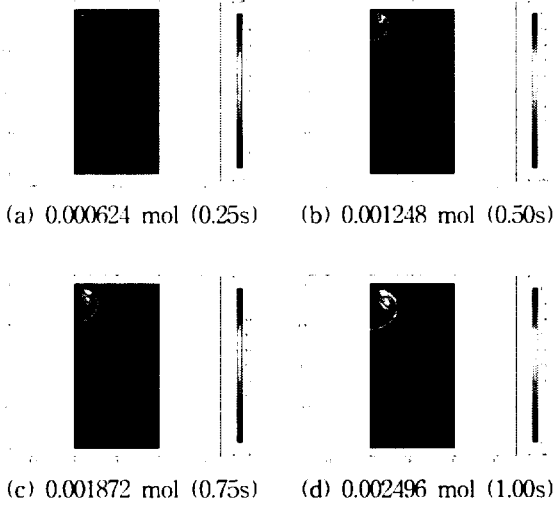


Figure 10. 평판에서 용융염의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 유동 양상(총류)

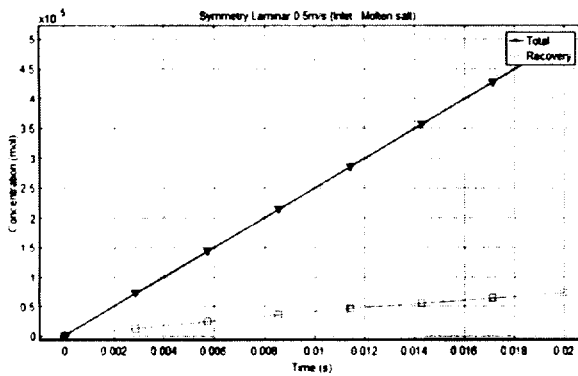


Figure 11. 평판에서 용융염의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 회수 농도(총류)

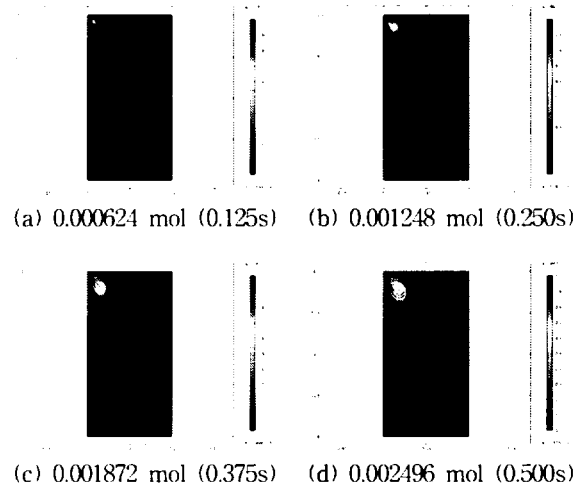


Figure 12. 평판에서 용융염의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 유동 양상(총류)

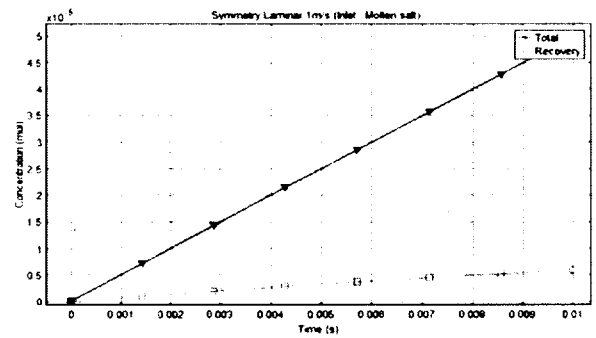


Figure 13. 평판에서 용융염의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 회수 농도(총류)

2. 원통형 (총류)

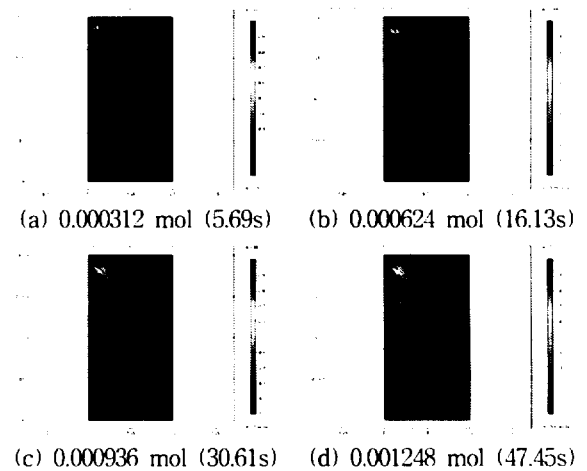


Figure 14. 원통에서 액체금속의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 유동 양상(총류)

Fig. 14~25는 원통형 구조의 층류 유동 시스템에서 0.1m/s, 0.5m/s, 1.0m/s의 속도로 액체금속이 주입 될 때 유동의 양상과 시스템 전체 농도 변화 및 회수 농도 변화를 보여준다.

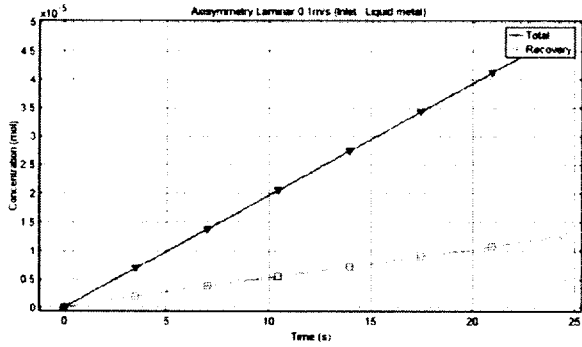


Figure 15. 원통에서 액체금속의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 회수 농도(층류)

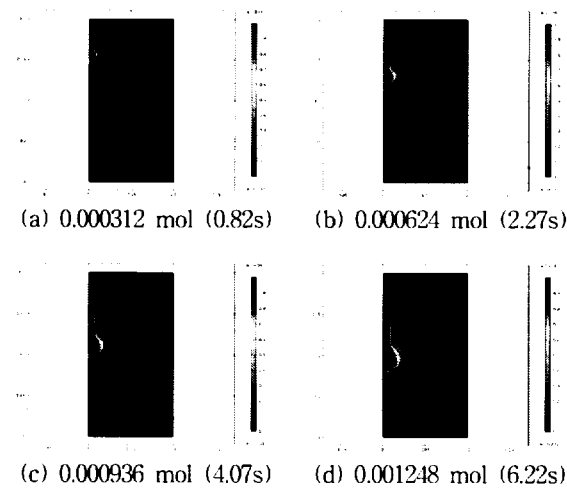


Figure 16. 원통에서 액체금속의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 유동 양상(층류)

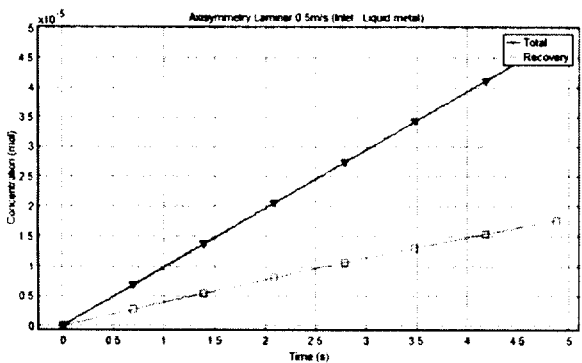


Figure 17. 원통에서 액체금속의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 회수 농도(층류)

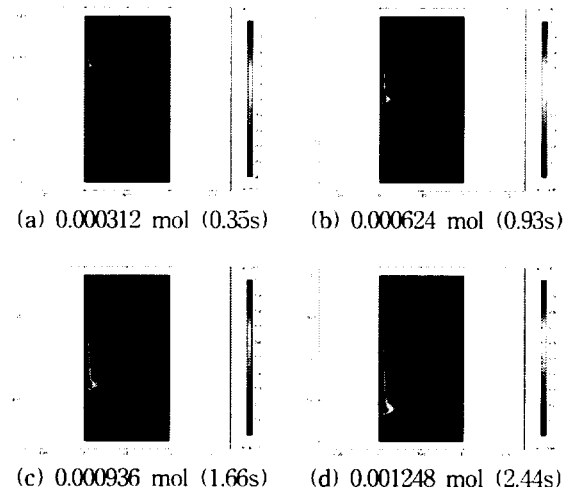


Figure 18. 원통에서 액체금속의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 유동 양상(층류)

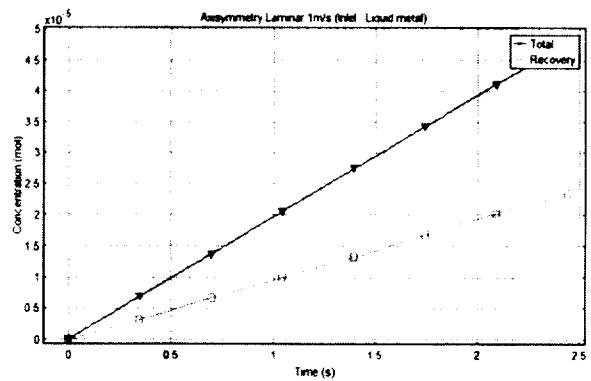


Figure 19. 원통에서 액체금속의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 회수 농도(층류)

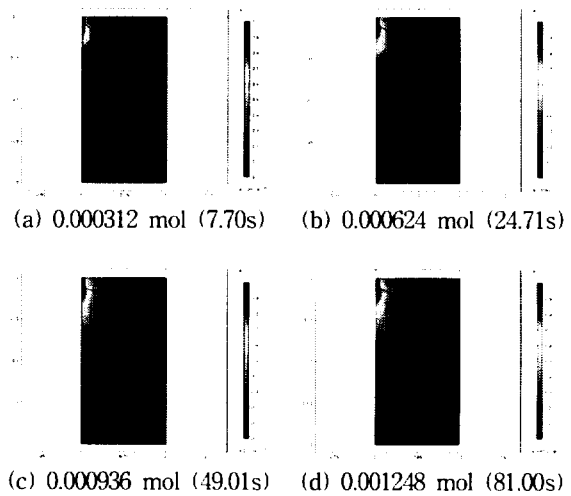


Figure 20. 원통에서 용융염의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 유동 양상(층류)

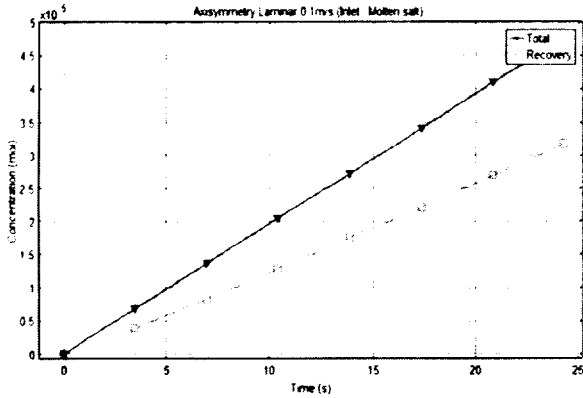


Figure 21. 원통에서 용융염의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 회수 농도(총류)

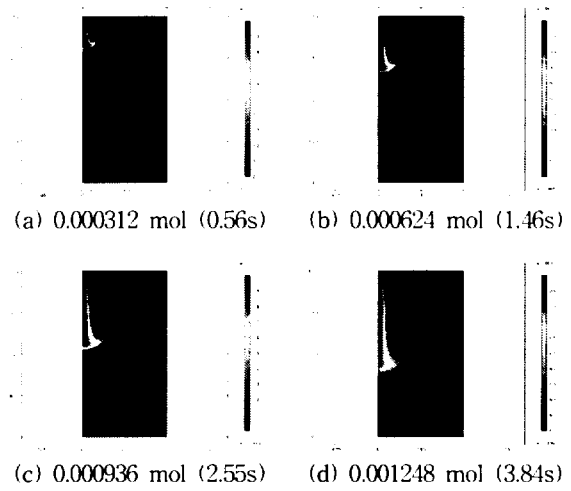


Figure 24. 원통에서 용융염의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 유동 양상(총류)

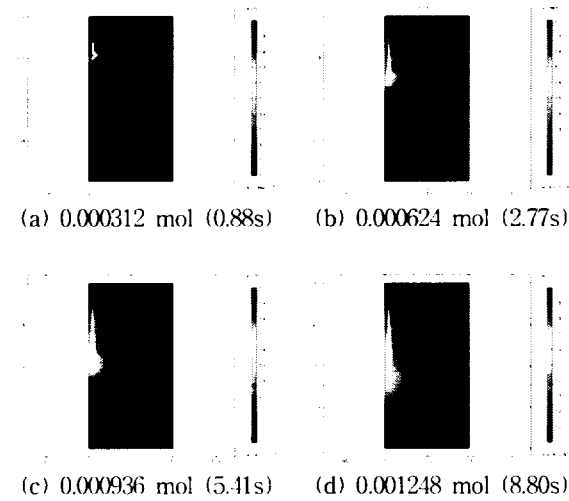


Figure 22. 원통에서 용융염의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 유동 양상(총류)

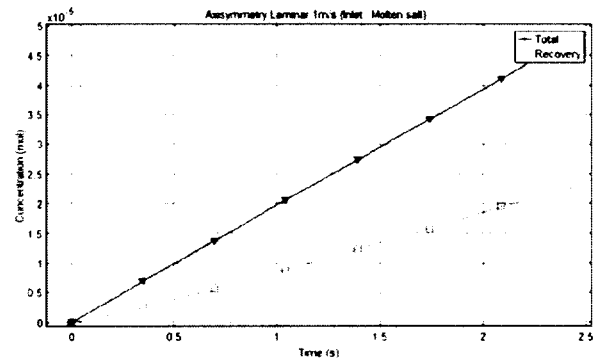


Figure 25. 원통에서 용융염의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 회수 농도(총류)

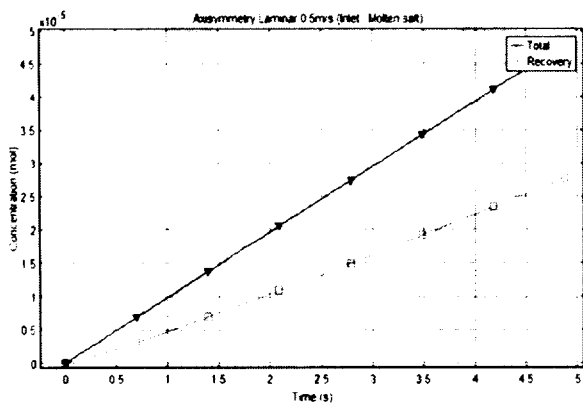


Figure 23. 원통에서 용융염의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 회수 농도(총류)

3. 평판형 (난류)

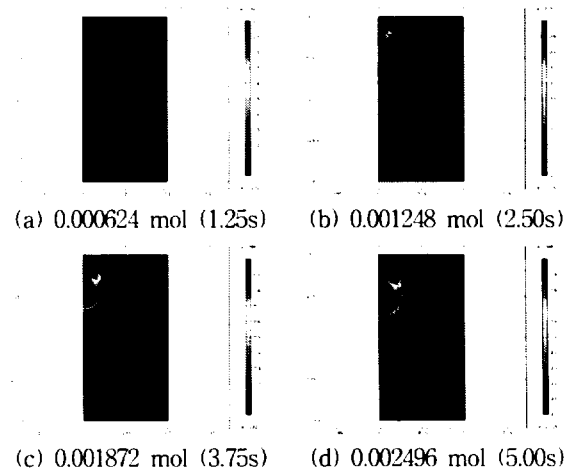


Figure 26. 평판에서 액체금속의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 유동 양상(난류)

Fig. 26~37은 평판형 구조의 난류 시스템에서 일정 속도로 액체금속 또는 용융염이 주입되는 경우를 보여 주는데 앞서 계산한 층류 시스템과 유사하게 두 경우 모두 시간에 따라 시스템 전체 농도 및 회수 농도가 주입 유체의 속도에 따라서 증가하는 경향을 보인다.

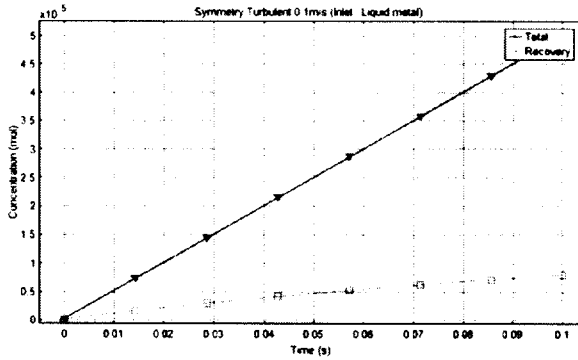


Figure 27. 평판에서 액체금속의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 회수 농도(난류)

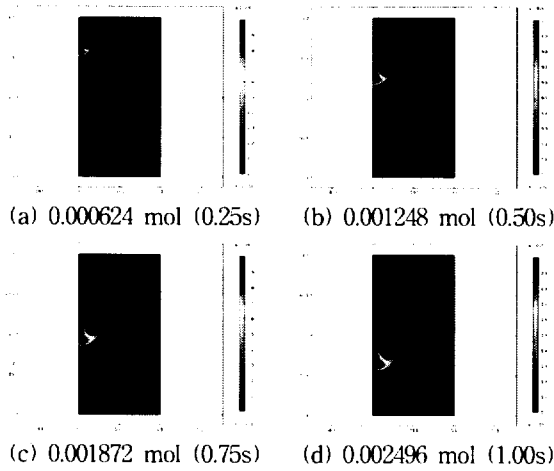


Figure 28. 평판에서 액체금속의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 유동 양상(난류)

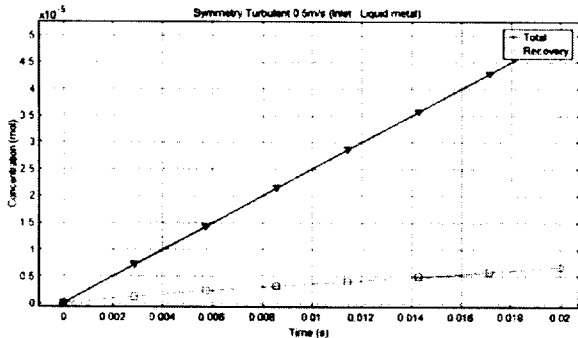


Figure 29. 평판에서 액체금속의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 회수 농도(난류)

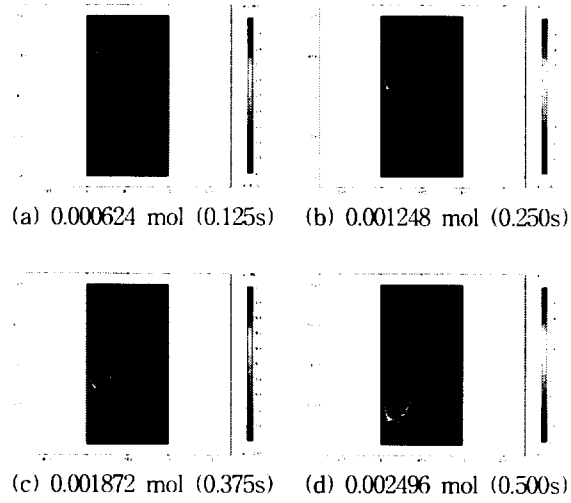


Figure 30. 평판에서 액체금속의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 유동 양상(난류)

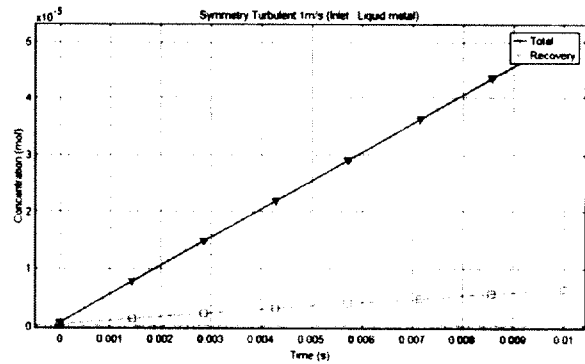


Figure 31. 평판에서 액체금속의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 회수 농도(난류)

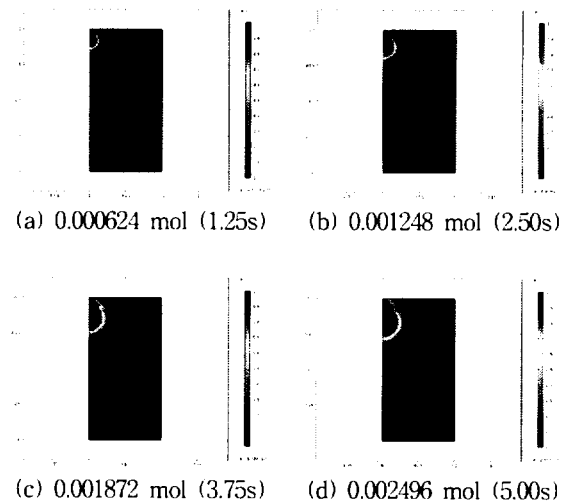


Figure 32. 평판에서 용융염의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 유동 양상(난류)

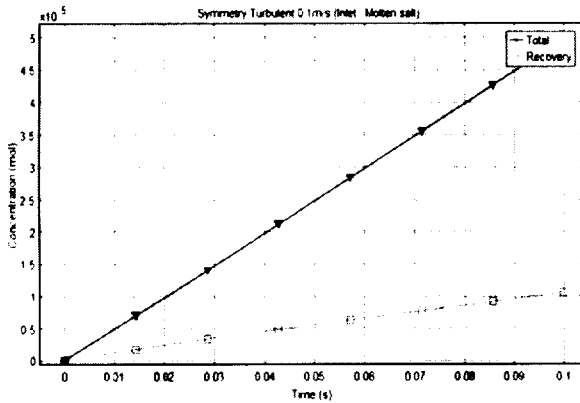


Figure 33. 평판에서 용융염의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 회수 농도(난류)

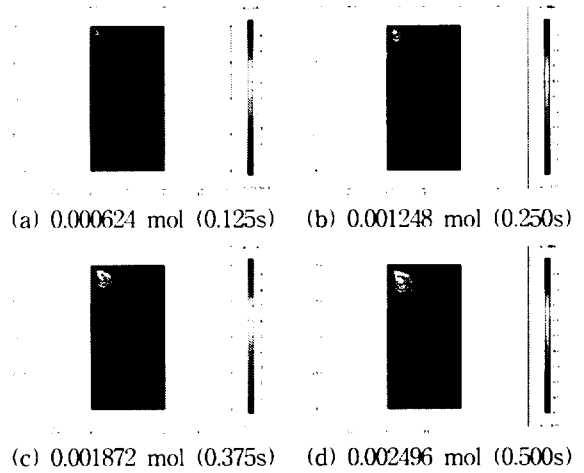


Figure 36. 평판에서 용융염의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 유동 양상(난류)

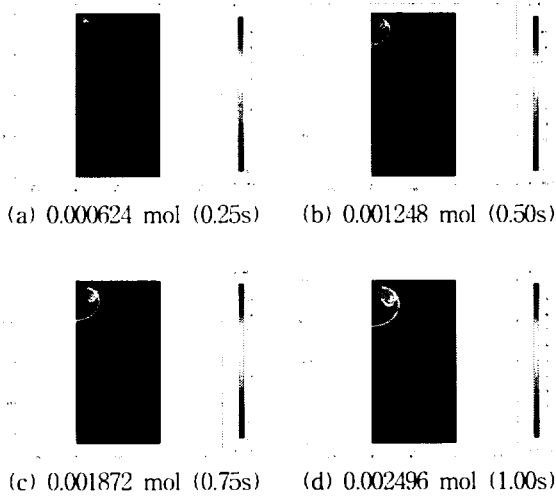


Figure 34. 평판에서 용융염의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 유동 양상(난류)

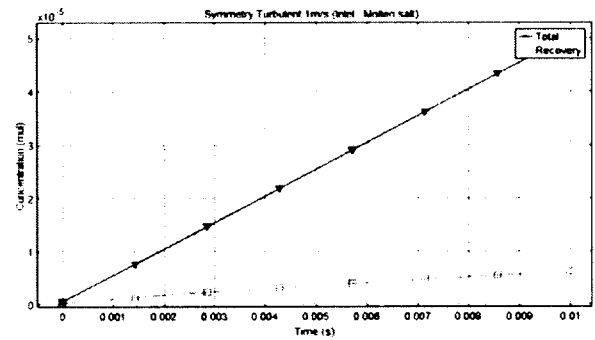


Figure 37. 평판에서 용융염의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 회수 농도(난류)

4. 원통형 (난류)

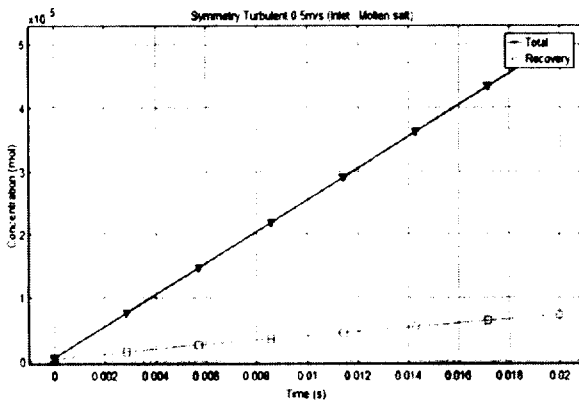


Figure 35. 평판에서 용융염의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 회수 농도(난류)

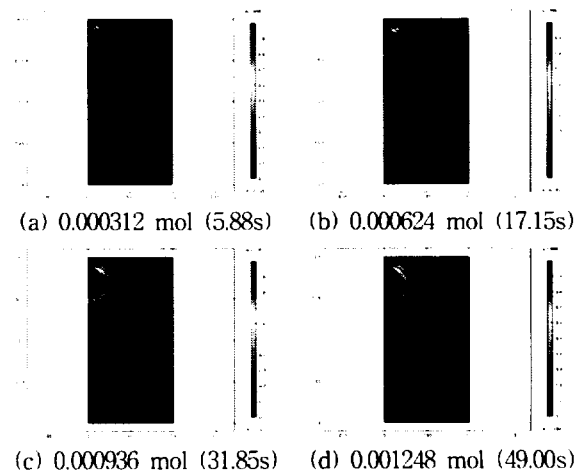


Figure 38. 원통에서 액체금속의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 유동 양상(난류)

Fig. 38~49는 원통형 난류 시스템에서 액체금속 또는 용융염이 0.1m/s, 0.5m/s, 1.0m/s의 속도로 주입되는 경우이다. 예상했던 바와 같이 시간에 따라 시스템 전체 농도 및 회수 농도가 선형적으로 증가하고 주입 속도에 따라 회수 농도가 증가함을 알 수 있다.

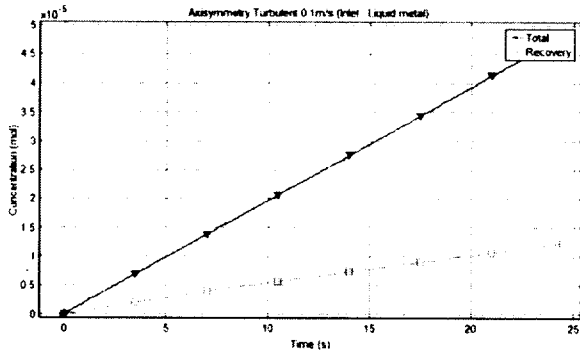


Figure 39. 원통에서 액체금속의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 회수 농도(난류)

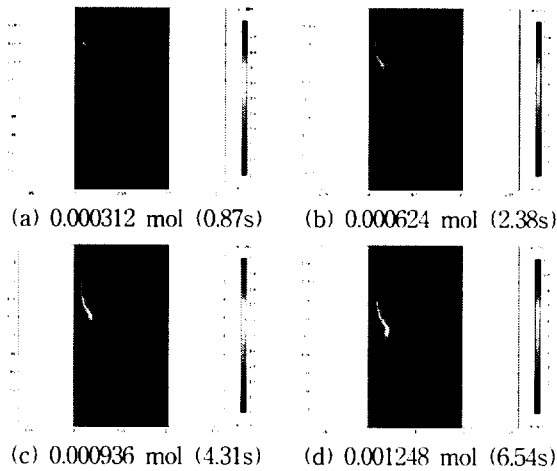


Figure 40. 원통에서 액체금속의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 유동 양상(난류)

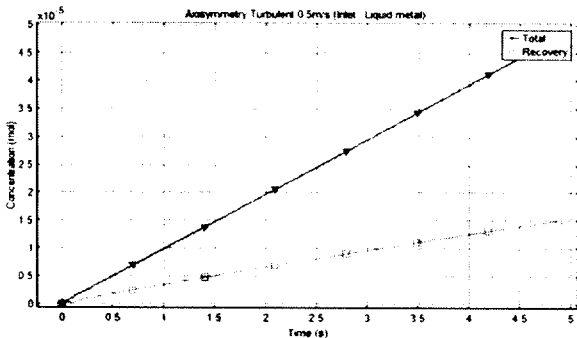


Figure 41. 원통에서 액체금속의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 회수 농도(난류)

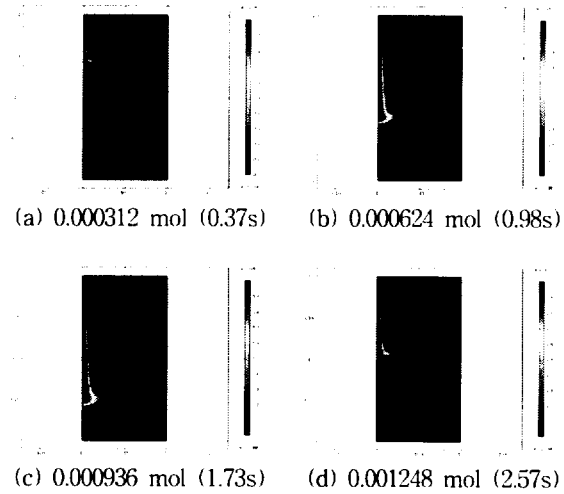


Figure 42. 원통에서 액체금속의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 유동 양상(난류)

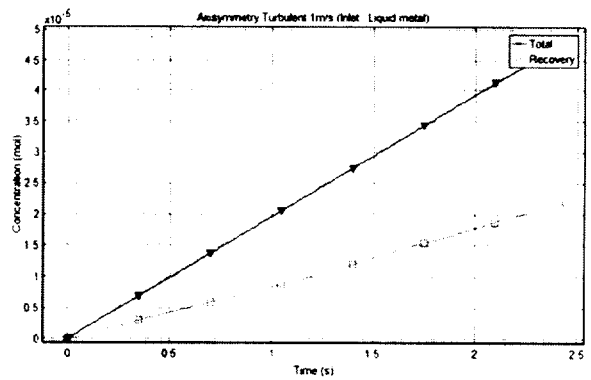


Figure 43. 원통에서 액체금속의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 회수 농도(난류)

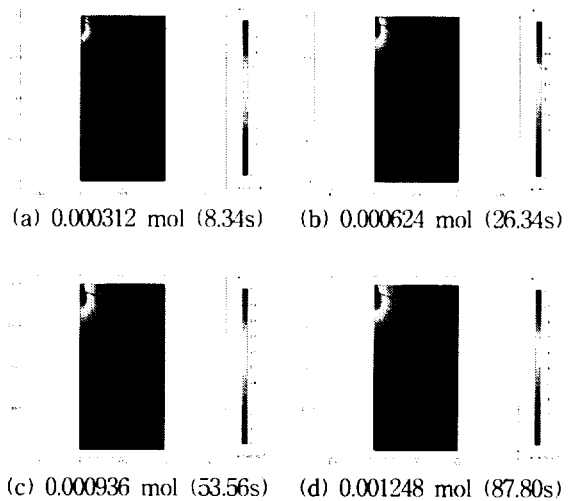


Figure 44. 원통에서 용융염의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 유동 양상(난류)

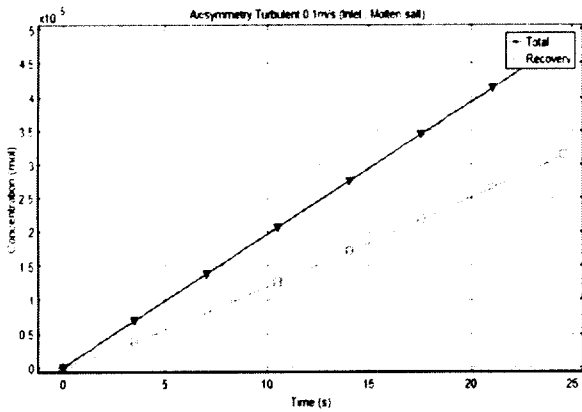


Figure 45. 원통에서 용융염의 주입속도가 0.1m/s 인 경우 회수 농도(난류)

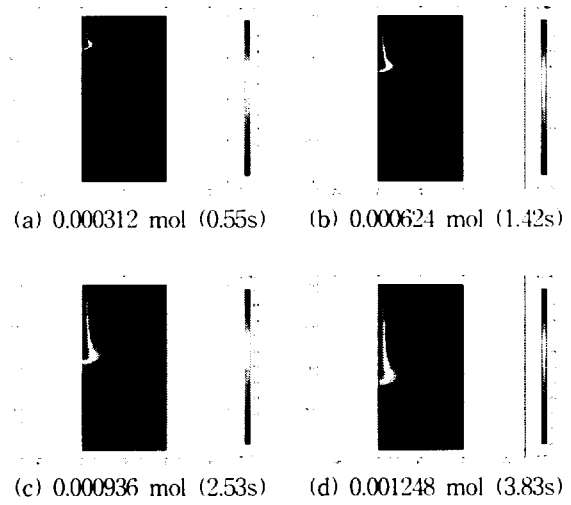


Figure 48. 원통에서 용융염의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 유동 양상(난류)

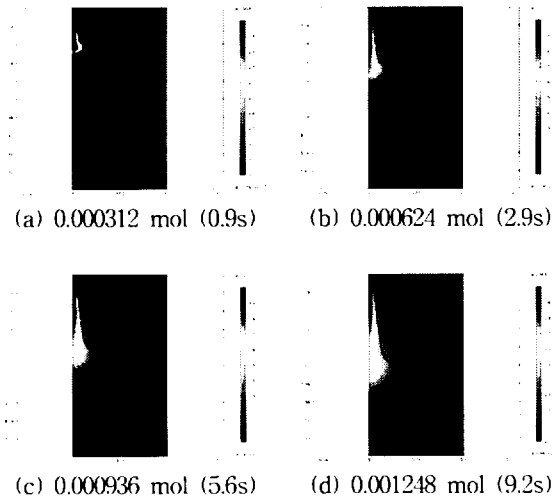


Figure 46. 원통에서 용융염의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 유동 양상(난류)

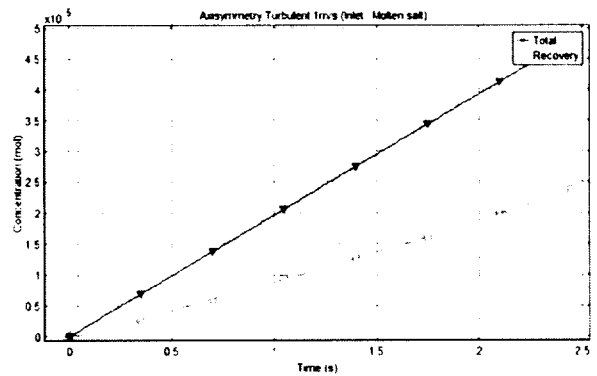


Figure 49. 원통에서 용융염의 주입속도가 1.0m/s 인 경우 회수 농도(난류)

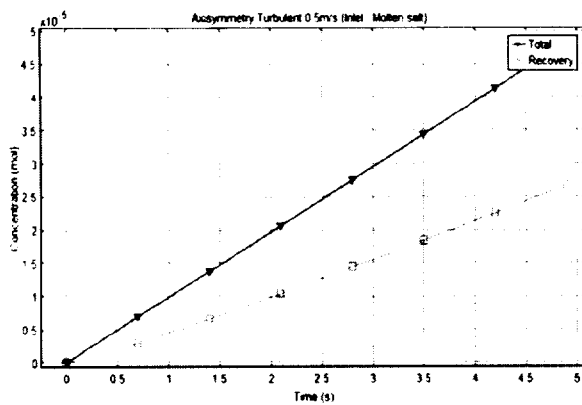


Figure 47. 원통에서 용융염의 주입속도가 0.5m/s 인 경우 회수 농도(난류)

5. 시간에 따른 회수 농도

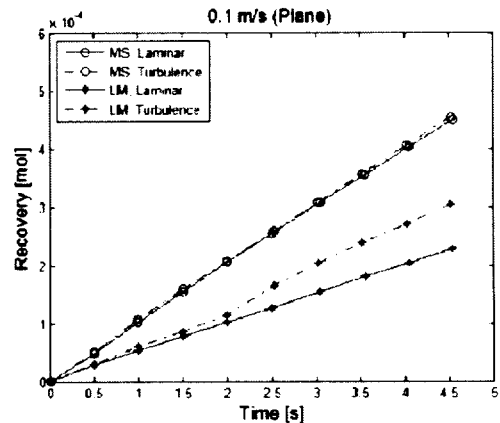


Figure 50. 주입 속도가 0.1m/s 인 평판 구조에서 시간에 따른 회수 농도

Fig. 50~52는 평판 구조에서 0.1m/s, 0.5m/s, 1.0m/s의 주입 속도별 각 주입 유체에 따른 회수 농도를 나타낸다. 이 그래프들은 주입 속도가 빠를수록 동일 시간 내에서 회수 농도가 증가하고 평판에서는 난류 모델의 경우가 회수 농도가 높다는 것을 확인 할 수 있다.

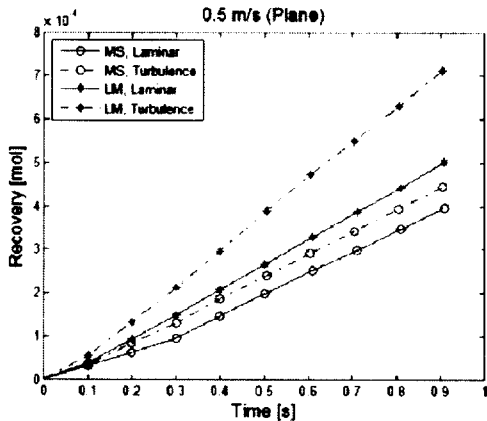


Figure 51. 주입 속도가 0.5m/s 인 평판 구조에서 시간에 따른 회수 농도

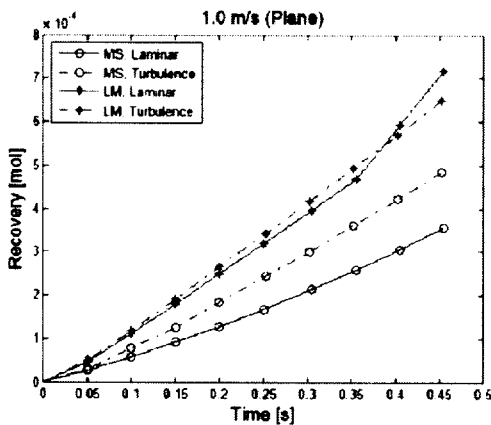


Figure 52. 주입 속도가 1.0m/s 인 평판 구조에서 시간에 따른 회수 농도

Fig. 53~55는 원통형 구조에서 주입 속도에 따른 회수 농도를 보여 주고 있다. 평판 구조와 비교해볼 때 원통형 구조의 주입구 면적이 상대적으로 더 작기 때문에 평판 구조보다 더 낮은 회수 농도를 보인다.

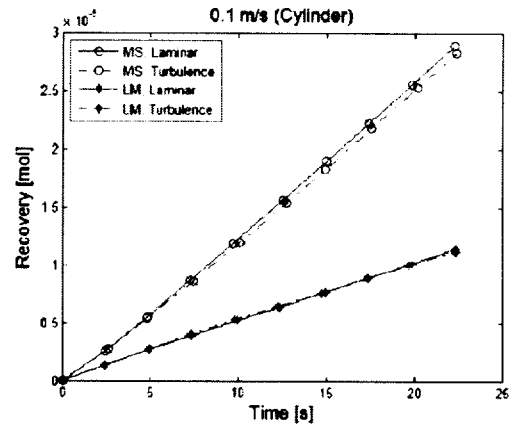


Figure 53. 주입 속도가 0.1m/s 인 원통 구조에서 시간에 따른 회수 농도

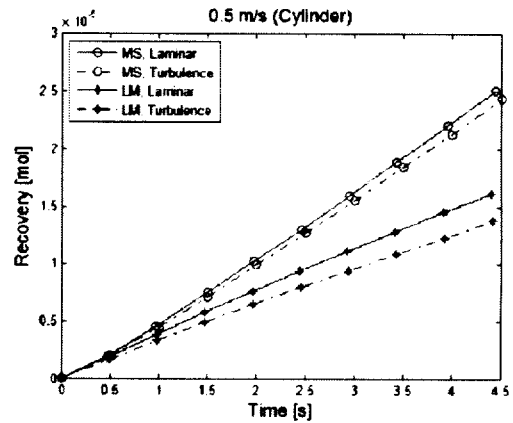


Figure 54. 주입 속도가 0.5m/s 인 원통 구조에서 시간에 따른 회수 농도

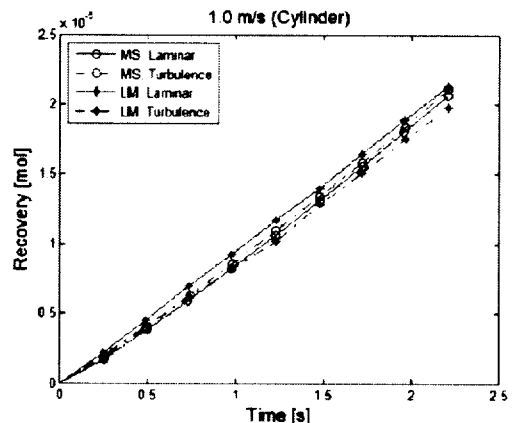


Figure 55. 주입 속도가 1.0m/s 인 원통 구조에서 시간에 따른 회수 농도

평판형 구조의 결과로서 난류의 형태로 유체가 주입될 때 층류인 경우보다 다소 회수 농도가 많음을 확인

할 수 있다. 하지만 원통형 구조에서 유동 형태에 따른 회수 농도의 변화가 거의 없는 것을 볼 수 있는데 원통형 구조의 주입구 면적은 매우 작기 때문에 유체 분산의 정도가 증류와 난류가 크게 차이가 나지 않아 이러한 결과가 나온 것이라 생각된다. 따라서 단 시간 내에 원활하고 많은 양의 환원 추출 공정을 위해서는 주입 유체의 속도를 빠르게 하고, 주입구의 면적을 크게 설계해야 한다. 또한, 이 결과는 중력을 고려하지 않고 계산한 결과로서 중력을 고려한다면 밀도가 높은 액체금속을 주입 유체로 사용 할 시 회수 농도는 더욱 증가 할 것이라 예상된다.

결 론

본 연구에서는 용융염과 액체금속의 물성치를 사용하여, 환원 추출을 위한 이상 유동장을 phase field 방법을 통해 모사를 하였으며 평판 및 원통형 격납 용기의 구조와 유체 유동 형태에 따른 회수 농도를 비교하기 위하여 화학종 수송 반응문제를 연동하여 계산, 비교 하였다. 그 결과로 파이로프로세싱 중 환원 추출을 원활히 하기 위해서는 격납 용기의 주입구 면적을 크게 설계하고 밀도가 큰 유체를 빠르게 주입시켜야 활발히 회수될 것이라 예상된다. 실제의 경우 용융염의 온도가 500°C 이상으로 격납 용기의 안정성 문제가 발생하게 된다. 따라서 향후 COMSOL Multiphysic의 열전달 모듈까지 추가 연동 한다면 환원 추출을 위한 격납용기 설계에 유용할 것이라 생각 된다.

감사의 글

이 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 원자력 연구 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (2011-0006338).

참고문헌

- [1] H. J. Dewey, "The Accelerator Transmutation of Waste Concept Overview", Report LA-UR-93-2895, Los Alamos National Laboratory, USA (1993)
- [2] 유길성, 정원명, 구정희, 조일제, 국동학, 권기찬, 이원경, 이은표, 홍동희, 윤지섭, 박성원, "선진원자력발전국의 사용후핵연료 처리기술 및 정책현황과 우리나라의 관련연구 현황", J. of the Korean Radiactive Waste Society, Vol. 5(4), P339-350 (2007)
- [3] 권상운, 안병기, 김우호, 유재형, "환원추출에 의한 장수명핵종과 희토류 원소의 분리 연구", Proceeding of the Korean Radioactive Waste Society, Vol. 1(2), pp. 421-425 (2003)
- [4] 이정성, 고민석, 이보안, 이성용, 김신, "Phase Filed Method를 이용한 파이로프로세싱 환원추출 공정에서 용융염과 액체금속의 유동 모사", Applied Science of Nuclear Energy, Vol. 24, pp. 49-57 (2010)



서 론

무기섬광체를 이용한 감마선 분광용 광섬유 방사선 센서의 제작

한기택¹ · 장경원¹ · 유욱재¹ · 문진수¹ · 전다영¹ ·
이봉수^{1*}

¹건국대학교 의료생명대학 의학공학부,
의공학실용기술연구소

Fabrication of Fiber-optic Radiation Sensor Using Inorganic Scintillator for Gamma-ray Spectroscopy

Ki-Tek Han¹, Kyoung Won Jang¹,
Wook Jae Yoo¹, Jinsoo Moon¹,
Dayeong Jeon¹, Bongsoo Lee^{1*}

¹School of Biomedical Engineering, College of
Biomedical & Health Science, Research Institute of
Biomedical Engineering, Konkuk University

Abstract

In the view of radiation safety controls, measurements of radiative contaminations are very important in the nuclear facility. In this study, we fabricated a fiber-optic radiation sensor with an inorganic scintillator such as LYSO for gamma-ray spectroscopy. Scintillating lights according to the variety kinds of gamma sources were measured using the fiber-optic radiation sensor. As a results, each energy spectrum and peak were obtained.

Keywords : gamma-ray spectroscopy, radiation sensor, inorganic scintillator, optical fiber

최근 원자력발전소, 병원 등 여러 시설에서 방사성 동위원소의 사용이 빈번해짐에 따라 방사성 물질의 환경오염에 대한 관심이 높아지고 있다. 방사성 물질에 대한 오염도 측정은 방사선 안전관리 측면에서 지속적인 감시와 관리가 필요하다. 따라서 방사성 물질의 환경오염을 감시하기 위한 방사능의 실시간 모니터링이 필요하며, 방사선 오염도를 측정하기 위한 다양한 계측기기 및 방법들이 연구 및 개발되고 있다.

광섬유 방사선 센서는 타 계측기에 비해 다양한 형태로 설계 및 제작이 가능하고, 온도, 압력 등으로부터 계측의 독립성, 작은 크기, 유연성, 높은 공간 분해능, 실시간 계측 가능, 전자기파로부터의 무간섭 등 많은 장점을 가지고 있다[1-2].

본 연구에서는 오염도를 측정을 위한 에너지 분광법에 관한 연구를 수행하였다. 실험에 사용한 광섬유 방사선 센서는 무기섬광체와 플라스틱 광섬유를 이용하여 제작하였으며, 광증배관(photo-multiplier tube, PMT)과 파고분석기(multi-channel analyzer, MCA)를 이용하여 Cs-137, Na-22 그리고 Ba-133에서 방출되는 감마선 에너지를 분광 및 분석하였다.

실험재료 및 방법

Table 1. Characteristics of LYSO crystal

Density (g/cm ³)	7.40
Melting Point (°C)	2,050
Radiation Length (cm)	1.14
Refractive Index	1.82
Luminescence (nm)	402
Decay Time (ns)	40
Light output (%) of NaI(Tl)	85

* 380-701 충북 충주시 단월동 건국대학교 의료생명대학 의학공학부
전화 : 043-856-0976, Fax : 043-851-0620, E-mail : bslee@kku.ac.kr

본 연구에서는 무기섬광체인 LYSO(lutetium yttrium orthosilicate, Advanced Microwave Technologies) 결정과 플라스틱 광섬유(CK-120, Mitsubishi Rayon)를 이용하여 광섬유 방사선 센서를 제작하였다. 표 1은 LYSO 섬광체의 물리적 특성을 보여준다. LYSO는 조해성(hygroscopic)이 없고, 감마선에 대해 민감하며 광 효율이 높은 특징을 가진다.

실험에 사용된 광섬유는 계단형 굴절률(step-index)을 갖는 멀티모드(multimode) 플라스틱 광섬유로서 직경은 3 mm, 길이는 2 m이다. 코어(core)와 클래딩(cladding)의 굴절률은 각각 1.492, 1.402이고 개구수(numerical aperture, NA)는 0.5이다.

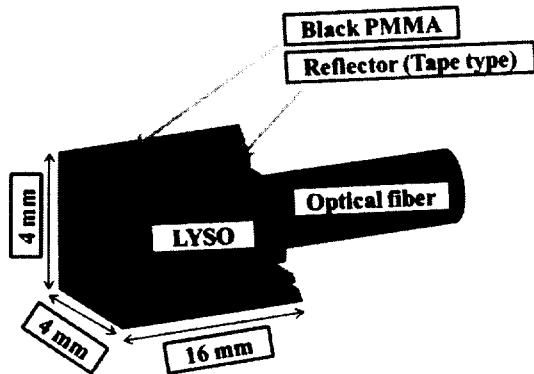


Fig. 1. Structure of a fiber-optic radiation sensor

그림 1은 LYSO 섬광체와 플라스틱 광섬유를 사용하여 제작한 광섬유 방사선 센서의 구조를 보여준다. 섬광체는 광섬유와의 결합이 용이하도록 광섬유와 동일한 직경을 갖는 3×3×15 mm의 정방형(square type) LYSO 결정을 사용하였다. 수광 효율을 높이기 위하여 LYSO의 표면을 이산화 타이타늄(titaniumdioxide, TiO₂) 반사체(BC-642, Saint Gobain)로 감싼 뒤, 두께 1 mm의 검은색 폴리메틸메타크릴레이트(polymethyl methacrylate, PMMA) 홀더(holder)를 부착시켜 외부 광의 간섭을 최소화하였다. 또한 섬광체와 광섬유의 결합 시, 광 감쇄(attenuation)를 최소화시키기 위하여 광학용 그리스(optical grease: BC-630, Saint Gobain)를 사용하였다.

본 연구에서는 세 종류의 감마선원을 사용하였다. 첫 번째로 1 μCi의 Cs-137은 30.1년의 반감기와 약 661 keV의 주 피크 값을 갖는 감마선을 방출한다. 두 번째 선원으로는 Cs-137과 동일한 1 μCi의 방사능을 가진 Na-22를 사용하였으며, 2.6년의 반감기와 약 511 keV의

주 피크 값을 갖는 감마선을 방출한다. 세 번째 선원으로는 1 μCi의 Ba-133을 사용하였고, 10.7년의 반감기와 약 355 keV의 주 피크 값을 갖는 감마선을 방출한다.

그림 2는 감마선 에너지 분광을 위한 실험구성을 보여준다. 섬광체에서 발생된 미세한 섬광빛 계측을 위하여 광증배관(H9305-03, Hamamatsu Photonics)을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 광증배관의 측정 파장범위는 300~650 nm이고, 420 nm에서 최대 민감도를 가진다. 또한 광증배관에서 발생된 전류신호를 증폭하기 위해 증폭기(C7319, Hamamatsu Photonics)를 사용하였고, 최종적으로 증폭기에서 출력되는 신호는 파고분석기(Easy-MCA-8k, Ortec)로 전달되어, 전용 프로그램(MAESTRO32, Ortec)을 통해 디스플레이 및 저장된다.

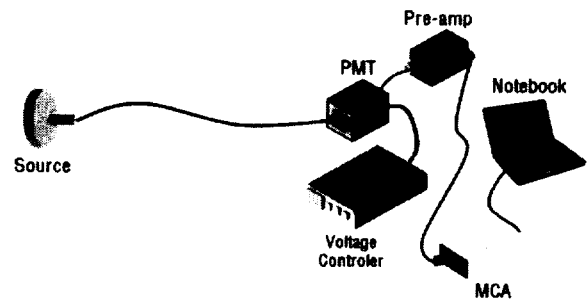


Fig. 2. Experimental setup for gamma-ray spectroscopy

실험 결과

그림 3은 본 연구에서 사용한 감마선원인 Cs-137, Na-22 그리고 Ba-133의 에너지 스펙트럼 측정 결과를 보여준다. 그림 3(a)는 Cs-137의 에너지 스펙트럼을 보여주며, Cs-137의 에너지 주 피크 값인 661 keV가 검출된 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)는 Na-22의 에너지 스펙트럼을 보여주며, Na-22의 주 피크 값인 511 keV가 검출된 것을 확인할 수 있다. Na-22의 경우, 약 1274 keV의 에너지 피크도 존재하지만, 선원의 방사능이 미약하고 광섬유에 의한 광의 감쇄로 인하여 검출되지 않은 것으로 판단된다. 마지막으로 그림 3(c)는 Ba-133의 에너지 스펙트럼을 보여주고 있다. Ba-133의 경우, 약 355 keV의 주 피크 값을 가지며, 앞의 두 선원들과 마찬가지로 주 피크 값이 검출됨을 확인할 수 있다. Ba-133의 경우, 저 에너지 영역인 81 keV에서 다른 피크 값이 존재하지만 저 에너지 영역에서의 노이즈

(noise)로 인해 검출되지 않은 것으로 판단된다. 실험결과, 광섬유 방사선 센서를 이용한 감마선 분광을 통해 각 핵종이 가지는 고유의 에너지 피크를 검출하였고, 이를 통해 핵종확인이 가능한 것으로 판단된다.

결론

본 연구는 감마선 에너지를 분광하기 위한 기초연구로서 무기섬광체인 LYSO와 플라스틱 광섬유를 이용하여 광섬유 방사선 센서를 제작하였고, 파고분석기를 통하여 감마선원인 Cs-137, Na-22 그리고 Ba-133에서 방출되는 에너지 스펙트럼을 분석하였다.

선원의 에너지 분광에 대한 실험을 수행한 결과, 광섬유 방사선 센서를 이용한 감마선 에너지 분광을 통해 감마선원의 핵종 확인이 가능함을 확인하였으나, Cs-137을 제외한 Na-22 및 Ba-133의 주 피크 외 다른 피크 에너지들은 검출되지 않았다. 이는 본 연구에서 사용한 감마선원의 방사능이 미약하고, 광섬유를 통해 섬광빛이 전송되는 과정에서 광 감쇄가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

앞으로의 연구 방향은 다양한 섬광체의 사용과 감지부의 구조 변경을 통해 감마선 및 베타선의 실시간 모니터링 및 보다 정확한 에너지 분광이 가능한 광섬유 방사선 센서를 개발하는 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(20110006337).

참고 문헌

- [1] A. S. Beddar: Plastic scintillation dosimetry and its application to radiotherapy, *Radiat. Meas.*, 41: S124-S133 (2007).
- [2] D. H. Cho, K. W. Jang, W. J. Yoo, B. Lee, H. S. Cho and S. Kim: Fabrication and performance evaluation of onedimensional fiber-optic radiation sensor for x-ray profile irradiated by clinical linear accelerator, *J. Kor. Sensors. Soc.* 16: 33-38 (2007).

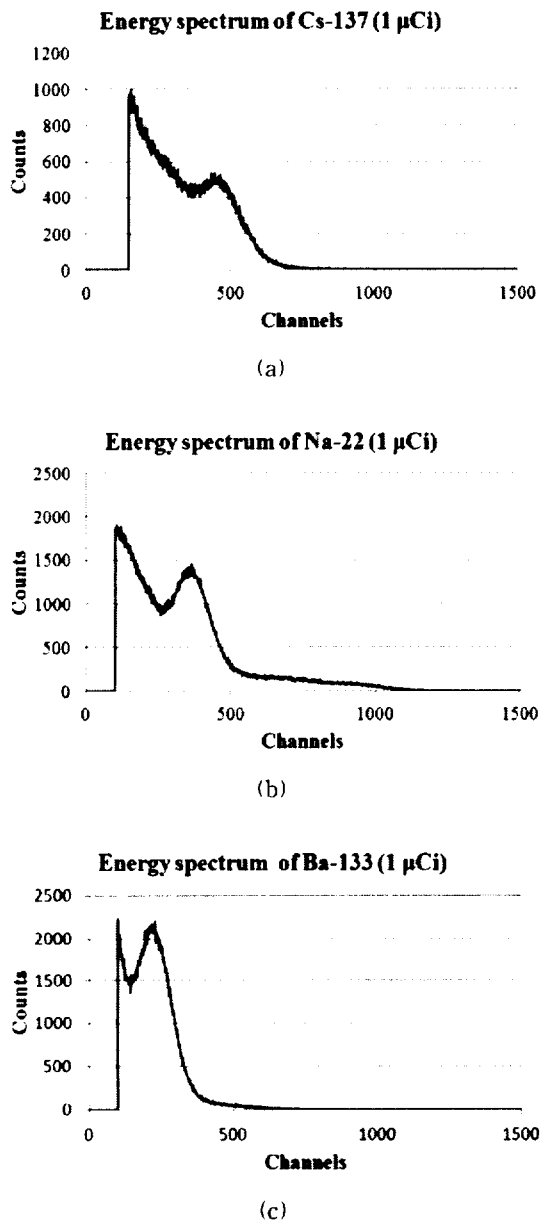


Fig. 3. Energy spectra of gamma-ray (a: Cs-137, b: Na-22, c: Ba-133)

