

KINS/HR-592

**다수 베타선 핵종 동시 분석형
배수 모니터 개발 (IV)**

**Development of Monitor for Multiple Beta-Ray
Nuclides in Liquid Radioactive Waste (IV)**

2004. 2.

한국원자력안전기술원

제 출 문

한국원자력안전기술원장 귀하

본 보고서를 “다수 베타선 핵종 동시 분석형 배수 모니터 개발 (IV)”과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2004년 2 월 29 일

연구부서명 : 한국천문연구원
우주과학연구그룹

연구책임자 : 남 욱 원

연 구 원 : 선 광 일
공 경 남
손 종 대
진 호
박 장 현
육 인 수
한 원 용

요 약 문

I. 제 목

다수 베타선 핵종 동시 분석용 배수 모니터 개발

II. 연구 개발 목적 및 필요성

최근, 산업 발전과 더불어 의료, 산업 및 학문 연구 분야에서 방사성동위원소의 활용이 증대됨에 따라 방사성동위원소의 안전관리의 중요성이 강조되고 있다. 의료 진단 및 학문 연구를 목적으로 가장 많이 사용되고 있는 방사성핵종은 대부분 베타선 핵종들이다. 따라서, 방사성동위원소 사용 시설 내에서의 방사성핵종의 안전한 취급 관리도 중요하며, 환경 보전 측면에서 당해 시설로부터의 배출물 관리 역시 중요한 사안이다. 현재, 일반적으로 방사성동위원소 사용 시설에서 배출물 감시는 배출물 저장 탱크의 시료를 일시적으로 채취하여 분석하는 방법이다. 이러한 기존의 방법은 배출물에 대한 상시 감시가 곤란하며, 매번 시료를 채취하는 번거로움이 있다. 또한, 여러 종류의 베타선 핵종이 혼재되어 있는 배출물에 대해서는 핵종별로 별도로 화학 분리 해서 정량 분석해야 하는 단점이 있다. 따라서, 베타선 핵종 사용 시설에 대한 배출물 감시를 실시간 연속 및 자동으로 감시할 수 있는 배수 모니터 시스템의 개발이 필요하다.

이 연구의 최종 목표는 배수 및 액체 폐기물 중 다수 베타선 핵종에 대한 동시 분석용 연속 모니터링 시스템 개발 및 실용화이며 다음과 같이 단계별 목표를 설정하여 진행하고 있다.

제 1 단계 : 다수의 베타선 핵종 동시 분석용 연속 모니터 시스템 개념
및 회로 설계

제 2 단계 : 베타선 핵종 동시 분석용 프로토타입 LSD(Prototype Liquid scintillation Detector) 개발 및 소광(Quenching) 효과 보정 알고리즘 개발

제 3 단계 : 베타선 핵종 동시 분석기의 자동화를 위한 기기 제어부 및 제어 알고리즘 개발

제 4 단계 : 베타선 핵종 동시 분석기의 시료 자동 주입 장치

제 5 단계 : 베타선 핵종 동시 분석용 연속 모니터링 종합 시스템 개발 및 성능 시험

III. 연구 개발 내용 및 범위

각 단계별 연구 개발 내용 및 범위는 다음과 같다. 설정된 연구 개발 단계에 따라 4 단계까지 개발이 완료된 상태이다.

구 분	연구개발목표	연구 개발 내용 및 범위
제 1 단계 (2000년)	다수의 베타선 핵종 동시 분석용 연속 모니터 시스템 개념 및 회로 설계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 베타 모니터 해석법 알고리즘 분석 ○ 베타 모니터 시스템 개념 설계 ○ 시험 모델용 동시 MAC (Multi-channel Analyzer) 시스템 설계 및 제작 ○ 전자회로 기판 설계 및 제작 ○ 동시 MAC 기능 평가 ○ 소광 효과 보정 알고리즘 개발
제 2 단계 (2001년)	베타선 핵종 동시 분석용 프로토타입 LSD 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 차폐체 설계 및 제작 ○ LSD 설계 및 제작 ○ 동시 회로용 전자회로 기판 설계 및 제작 ○ 베타선 핵종 동시 분석법 소프트웨어 구현

제 3 단계 (2002년)	베타선 핵종 동시 분석기의 자동화를 위한 기기 제어부 및 제어 알고리즘 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기기 제어부 설계 및 제작 ○ 기기 제어 알고리즘 개발 ○ 전자회로 기판 설계 및 제작 ○ LSD 와 시스템 통합 구성 ○ 표준 선원에 의한 LSD 성능 평가 ○ 자동제어 성능 평가
제 4 단계 (2003년)	베타선 핵종 동시 분석기의 시료 자동 주입 장치 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시료 자동 주입 장치 설계 및 제작 ○ 시료와 액체 신틸레이터 (Scintillator) 자동 혼합 장치 설계 및 제작 ○ 주요 구성부들의 시스템 통합 ○ 표준 선원에 의한 종합 성능 평가
제 5 단계 (2004년)	베타선 핵종 동시 분석용 연속 모니터링 종합 시스템 개발 및 성능 시험	<ul style="list-style-type: none"> ○ 베타선 핵종 동시 분석용 연속 모니터링 종합 시스템 시제품 제작 ○ 실제 환경에서의 성능 시험

IV. 연구 개발 결과

이 연구는 다수 베타선 핵종 동시 분석용 배수 모니터 개발을 위해 5년 계획으로

- 1) 제 1 단계에서는 다수의 베타선 핵종 동시 분석용 배수 연속 모니터링 시스템 개념 및 회로 설계를 완료하였다. 이 단계에서 또한 "소광 효과 보정 알고리즘 개발"이 미리 선행되어 수행 되었다.
- 2) 제 2 단계에서는 베타선 핵종 동시 분석용 프로토타입 LSD의 개발을 완료

하였다. 이 연구에서는 본격적인 LSD를 구현하기 위한 프로토타입 LSD를 시험 제작하여 납 차폐체 없이 검출 가능한 한계치를 조사해보았는데 ^{90}Sr 을 제외한 시료에 대해서는 모두 검출 가능성을 알 수 있었다. 그렇지만 ^{90}Sr 의 경우에도 시간을 길게 주어 20분 이상 측정하거나 적당한 수준의 납 차폐체를 적용한다면 충분히 검출한계를 낮출 수 있음을 확인하였다.

- 3) 제 3 단계에서는 베타선 핵종 동시 분석기의 자동화를 위한 기기 제어부를 제작하였고 이의 제어 알고리즘을 개발하였다. 3차년도에 수행된 자동화를 위한 기기 제어부는 자동 샘플 측정 시스템 구현에 초점을 맞추었다.
- 4) 4차년도에서는 현재까지 개발된 시스템의 특성을 더 안정화시키고, 자동 샘플 교환 장치로써 시료와 액체 섬광체의 자동 혼합 장치를 설계 및 제작하여 연속 모니터링이 가능하도록 하였다. 그리고 시료의 자동 이송 및 주입, 샘플 병(sample bottle)의 밀봉 및 검출부에 자동 장착 등의 기계적인 부분을 설계 및 제작하여 완전히 통합 시스템으로 구축하였다. 또한 RS-232통신 방식을 이용하여 모든 측정 자료를 중앙 컴퓨터로 전송하고 또한 중앙 컴퓨터에서 조작 및 제어가 가능하도록 PC용 다수 베타선 핵종 동시 분석 및 제어 프로그램을 개발하였다.
- 5) 5차년도에서는 계획한 대로 연속 모니터링 시스템을 시제작하고, 환경에서 다수 베타선 핵종 동시 분석 및 제어 프로그램으로 통합된 연속 모니터링 시스템의 종합 성능 평가 시험을 실시하도록 할 예정이다.

V. 연구 개발 결과의 활용 계획

- o 본 연구에서 개발한 다수 베타선 핵종 동시 분석형 배수 모니터 시스템은 원자력 관련 시설 및 RI 사용 시설의 환경 감시 업무 수행에 유용하게 활용될 것이며, 규제 기관 입장에서는 검사 대상 관련 시설에 대한 방사성물질 방출 관리에 관한 검사 업무에 적극 활용할 수 있을 것임.
- o 배수 중에 존재하는 다수의 베타 핵종으로부터 얻어지는 중첩된 베타선

연속스펙트럼을 분별 정량하는 스펙트럼 해석 알고리즘 및 자동 시료 주입 구동 시스템은 방사성핵종의 분석 외에 다른 분석 방법에도 적용 가능할 것으로 판단됨.

4th fiscal year (2003)	Development of automatic sample injection system	<ul style="list-style-type: none"> o Design and development of automatic sample injection system o Development of automatic mixing system of waste sample with liquid scintillator o Development of quenching correction algorithm o Main system integration o Function test using standard sources.
5th fiscal year (2004)	Function test of the developed monitoring system	<ul style="list-style-type: none"> o Manufacture of the first trial product o Function test under real environment

IV. Results

This research is a 5 year project for the development of the monitor system for multiple beta-ray nuclides in liquid radioactive waste.

- 1) The concept design and the circuit design of the continuous monitor system was finished in the first fiscal year. An algorithm for quenching correction have be developed in advance in the stage.
- 2) Prototype LSD(Liquid Scintillation Detector) for the analysis of beta-ray nuclides have been developed in the second fiscal year. The prototype LSD was made without Pb shield, and the detection limits were predicted for the system before the development of real LSD system. It was found that all the nuclide samples except ⁹⁰Sr is detectable with a few minutes measurement. For ⁹⁰Sr, the detection level of government

regulation limit can be achieved by measuring rather long 20 mins, or by applying some Pb shield.

- 3) Mechanical control part for automation of beta-ray radioassay and its control algorithm were developed in the third fiscal year. The mechanical control part was focused on the automatic sample measurement.
- 4) In the 4th fiscal year, the performance of the system developed in previous year have been stabilized. An automatic mixer system to mix the liquid radioactive waste with the liquid scintillator was designed and manufactured to make continuous monitoring possible. Mechanical systems for the automatic transfer, injection of radioactive samples, and for sealing sample bottle and its attachment on detector system have been designed and developed for completely integrated system. The measured data are transferred to central computer, which controls the monitoring system, through the RS-232 communication protocol. A software for host personal computer was developed for the control of the integrated system.
- 5) In the next year, the first trial product of the continuous monitoring system will be manufactured, and its performance integrated with the radioactive analysis and control systems will be tested at the real radioactive environment.

V. Applications of the Results

- o The monitoring system for the multiple beta-ray nuclides developed in this research is applicable to the environmental monitoring of nuclear facilities and RI application equipments, and is applicable to the management of the effluence of radio active materials from the related equipment under inspection.
- o The analysis algorism of overlapped and continuous beta-ray spectrum from mixed beta nuclides in liquid radioactive waste as well as the

automatic sample injection control system for radioassay will be useful for even other analysis system more than radioassay system.

표 목차

- 표 3-1. 소광 보정 곡선법과 표준시료 대비법의 특징.
- 표 3-2 샘플 자동 교환 및 혼합 장치의 motion unit에 대한 설명.
- 표 3-3. 시료를 구성하는 성분의 표준 선원의 특성.
- 표 3-4. 시료 조제.
- 표 3-5. 측정 방법.
- 표 3-6. 측정 샘플의 데이터 양식.
- 표 3-7. 소광 효과 보정을 위해 사용된 표준 시료와 표준 시료의 소광 정도 값(SQP).
- 표 3-8. Multiple Gamma Rays Emitted in the Decay of ^{152}Eu .
- 표 3-9. 실험 I, II, III, IV에 대한 각 혼합 시료에 대해 계산된 방사능 값 (Activity)

그림 목차

- 그림 3-1. 액체 섬광계수기의 원리.
- 그림 3-2. 베타선 에너지 스펙트럼에 대해 소광이 미치는 효과.
- 그림 3-3. 소광 효과 보정 곡선.
- 그림 3-4. 소광의 정도를 정의하는 변수, SQP(I).
- 그림 3-5. 소광의 정도를 정의하는 변수, SQP(E).
- 그림 3-6. 시스템의 전체적인 시스템의 구성도.
- 그림 3-7. 시스템의 기계부의 설계도 구조.
- 그림 3-8. 표준 랙에 설치된 전체적인 시스템의 모습.
- 그림 3-9. 왼쪽 그림은 캡핑 유닛의 설계안이며 오른쪽 그림은 제작된 실물 사진이다.
- 그림 3-10. 왼쪽 그림은 에어 척, 이중 행정 실린더, 그리고 리니어 스테이지로 구성된 샘플의 상하 운동과 캡핑을 위한 시료 자동 주입 장치 하단부의 설계안이며 오른쪽 그림은 제작된 실물 사진이다.
- 그림 3-11. 왼쪽 그림은 폐수 시료와 액체 신틸레이터 자동 혼합 장치의 설계안이며 오른쪽 그림은 제작된 실물 사진이다.
- 그림 3-12. 설계 제작되어 표준 랙 안에 설치된 디스펜서와 정량펌프.
- 그림 3-13. 광전자 증배관을 포함한 챔버와 프리 앰프 박스.
- 그림 3-14. 동시 계수 회로를 포함한 블럭도.

- 그림 3-15. 시스템 노이즈 감소를 위해 개선한 DSP 보드.
- 그림 3-16. 메인 컨트롤러로 사용된 MBPC-300 산업용 PC.
- 그림 3-17. 샘플 자동 측정을 위한 측정부의 제어 알고리즘.
- 그림 3-18. 샘플 자동 측정을 위한 샘플 혼합부의 제어 알고리즘.
- 그림 3-19. 핵종 분석용 측정/ 제어/ 분석 통합형 프로그램 개발.
- 그림 3-20. 소광 보정 곡선 작성 알고리즘.
- 그림 3-21. 핵종별 Activity 계산 알고리즘.
- 그림 3-22. 실험 I - Background의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-23. 실험 I - ^3H 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-24. 실험 I - ^{14}C 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-25. 실험 I - ^{36}Cl 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-26. 실험 I - ^{90}Sr 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-27. 실험 II - Background의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-28. 실험 II - ^3H 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-29. 실험 II - ^{14}C 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-30. 실험 II - ^{36}Cl 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-31. 실험 II - ^{90}Sr 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-32. 실험 III - Background의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-33. 실험 III - ^3H 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한

- 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-34. 실험 III - ^{14}C 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-35. 실험 III - ^{36}Cl 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-36. 실험 III - ^{90}Sr 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-37. 실험 IV - Background의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-38. 실험 IV - ^3H 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-39. 실험 IV - ^{14}C 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-40. 실험 IV - ^{36}Cl 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-41. 실험 IV - ^{90}Sr 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽).
- 그림 3-42. 실험 I - 60개의 채널을 사용하여 ^3H , ^{14}C 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선.
- 그림 3-43. 실험 I - 60개의 채널을 사용하여 ^{36}Cl , ^{90}Sr 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선.
- 그림 3-44. 실험 I - 혼합 시료 Mix2에 대한 스펙트럼.
- 그림 3-45. 실험 I - 혼합 시료 Mix3에 대한 스펙트럼.
- 그림 3-46. 실험 I - 혼합 시료 Mix4에 대한 스펙트럼.
- 그림 3-47. 실험 II - 60개의 채널을 사용하여 ^3H , ^{14}C 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선.
- 그림 3-48. 실험 II - 60개의 채널을 사용하여 ^{36}Cl , ^{90}Sr 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선.
- 그림 3-49. 실험 II - 혼합 시료 Mix2에 대한 스펙트럼.
- 그림 3-50. 실험 II - 혼합 시료 Mix3에 대한 스펙트럼.

- 그림 3-51. 실험 II - 혼합 시료 Mix4에 대한 스펙트럼.
- 그림 3-52. 실험 III - 60개의 채널을 사용하여 ^3H , ^{14}C 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선.
- 그림 3-53. 실험 III - 60개의 채널을 사용하여 ^{36}Cl , ^{90}Sr 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선.
- 그림 3-54. 실험 III - 혼합 시료 Mix2에 대한 스펙트럼.
- 그림 3-55. 실험 III - 혼합 시료 Mix3에 대한 스펙트럼.
- 그림 3-56. 실험 III - 혼합 시료 Mix4에 대한 스펙트럼.
- 그림 3-57. 실험 III의 ^3H 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-58. 실험 III의 ^3H 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-59. 실험 III의 ^3H 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-60. 실험 III의 ^{14}C 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-61. 실험 III의 ^{14}C 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-62. 실험 III의 ^{14}C 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-63. 실험 III의 ^{36}Cl 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-64. 실험 III의 ^{36}Cl 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-65. 실험 III의 ^{36}Cl 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-66. 실험 III의 ^{90}Sr 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-67. 실험 III의 ^{90}Sr 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-68. 실험 III의 ^{90}Sr 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-69. 실험 III의 Mix2의 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-70. 실험 III의 Mix3의 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-71. 실험 III의 Mix4의 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-72. The relative importance of the three major types of gamma ray interaction.
- 그림 3-73. 보정된 실험 III - 60개의 채널을 사용하여 ^3H , ^{14}C 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선.
- 그림 3-74. 보정된 실험 III - 60개의 채널을 사용하여 ^{36}Cl , ^{90}Sr 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선.
- 그림 3-75. 보정된 실험 III - 혼합 시료 Mix2에 대한 스펙트럼.
- 그림 3-76. 보정된 실험 III - 혼합 시료 Mix3에 대한 스펙트럼.

- 그림 3-77. 보정된 실험 III - 혼합 시료 Mix4에 대한 스펙트럼.
- 그림 3-78. 실험 IV의 ^3H 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-79. 실험 IV의 ^3H 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-80. 실험 IV의 ^3H 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-81. 실험 IV의 ^{14}C 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-82. 실험 IV의 ^{14}C 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-83. 실험 IV의 ^{14}C 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-84. 실험 IV의 ^{36}Cl 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-85. 실험 IV의 ^{36}Cl 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-86. 실험 IV의 ^{36}Cl 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-87. 실험 IV의 ^{90}Sr 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-88. 실험 IV의 ^{90}Sr 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-89. 실험 IV의 ^{90}Sr 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-90. 실험 IV의 Mix2의 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-91. 실험 IV의 Mix3의 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-92. 실험 IV의 Mix4의 시료의 SQP(E)값.
- 그림 3-93. 실험 IV - 60개의 채널을 사용하여 ^3H , ^{14}C 의 스펙트럼에 대한
각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선.
- 그림 3-94. 실험 IV - 60개의 채널을 사용하여 ^{36}Cl , ^{90}Sr 의 스펙트럼에 대한
각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선.
- 그림 3-95. 실험 IV - 혼합 시료 Mix2에 대한 스펙트럼.
- 그림 3-96. 실험 IV - 혼합 시료 Mix3에 대한 스펙트럼.
- 그림 3-97. 실험 IV - 혼합 시료 Mix4에 대한 스펙트럼.

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	3
제 3 장 연구 개발 수행 내용 및 결과	4
제 1 절 액체 섬광계수기 및 소광 효과	4
1. 액체 섬광계수기의 원리	4
2. 소광 효과	6
3. 소광 효과 보정	9
4. 소광의 정도 측정	12
제 2 절 시료 자동 주입 장치 설계 및 제작	14
1. 샘플 캡핑(sample capping) 장치 설계 및 제작	17
2. 혼합 장치 설계 및 제작	19
제 3 절 연속 모니터링 시스템 구성부들의 통합	21
1. 신호 검출부 및 동시 계수 신호 처리 회로부	21
2. 메인 컨트롤러 (PC)	23
3. 자동 샘플 교환 및 시료 혼합 장치	25
4. 샘플 자동 측정을 위한 제어 알고리즘	26
5. 베타선 핵종 분석용 통합 프로그램	31
제 4 절 표준 선원에 의한 시스템 종합 성능 평가	33
1. 실험 구성	33
2. 실험 I	42
3. 실험 II	45
4. 실험 III	48
5. 실험 IV	51
6. 실험 결과 및 분석	54
제 4 장 연구 개발 목표 달성도	101
제 5 장 연구 개발 결과의 기대성과 및 활용 계획	105
제 6 장 참고 문헌	106

제 1 장 서 론

근대사회에 접어들면서 산업은 급속히 발전하였고, 그 발전과 더불어 의료, 산업 및 학문 연구 분야에서 방사선이 널리 이용되고 있으며 그중에서도 방사성 동위원소의 활용이 증대됨에 따라 방사성 동위원소의 관리의 중요성이 강조되고 있다. 따라서 방사성 동위원소 사용 시설 내에서의 방사성 핵종의 안전한 취급 관리도 중요하며, 환경 보전 측면에서 당해 시설로부터의 배출물 관리 역시 중요한 사안이다. 그리고 현재 우리가 알고 있는 방사성 동위원소 사용 시설에서의 배출물 감시 방법은 배출물 저장 탱크의 시료를 일시적으로 채취하여 분석하는 방법이다. 이러한 방법은 배출물에 대한 상시 감시가 곤란하며, 매번 시료를 채취하는 번거로움이 있다.

이렇듯 배출물 뿐만 아니라 우리가 학문을 연구할 목적으로 가장 많이 사용하고 또 의료 진단 목적으로 사용하는 방사성 핵종은 대부분 베타선 핵종들이다. 또한, 여러 종류의 베타선 핵종이 혼재되어 있는 배출물에 대해서 핵종별로 별도의 화학 분리를 통해 정량분석을 해야 할 필요성이 있다. 따라서 이와 같은 기존의 방사성 동위원소 방출물 감시 방법의 단점을 보완하고 효율화하기 위해서 배출물 감시를 실시간 연속 및 자동으로 감시할 수 있는 배수 모니터 시스템의 개발이 필요하였다.

베타선 핵종 동시 분석용 연속 모니터 시스템은 환경 준위의 저준위 방사능 측정정보는 환경 시료에 비해 비교적 방사능 준위가 높은 배수 시료내 베타선 핵종을 자동적으로 감시할 수 있는 장비로서, 시스템의 경량화와 시료 측정의 안정화 및 재현성 연구에 초점을 맞추었다. 본 연구에서 개발하는 여러 가지 베타선 핵종이 혼합된 배수 시료의 연속 모니터 시스템은 시료 채취, 시료 제조 및 시료 측정 과정을 연속적으로 자동화 한 장치이다.

장치의 제작은 베타선 핵종 동시 분석용 모니터링 시스템의 개념 설계를 거쳐, 동시 계수 회로 개발이 이루어졌다. 이어서 프로토타입(prototype) 액체 섬광 검출기 시스템의 개발이 진행되어, 시료를 액체 섬광 검출기 챔버 내로 이송시키는 반자동 형식의 시료 이송 장치를 제작하였고, 이 때 시료 이송을 위해 한 개의 구동 모터를 사용하였다.

본 연구에서는 프로토타입에서 사용한 광차폐 방법을 새로운 공압기 사용 방

식으로 개선하였고, 시스템의 신호 특성을 안정화하기 위해 디지털 신호 처리 회로와 ADC(Analog-to-Digital Converter) 및 증폭(amplifier)회로를 개선하였다. 또한 프로토 타입에서는 적용되지 않았던 시료 자동 교환 장치를 공압 펌프와 공압 척 그리고 스테핑 구동 모터를 사용하여 구현하였으며, 시료 자동 교환 장치 및 시료 자동 혼합 장치 제작 후 자동 동작을 위한 시료 자동 교환 및 혼합 시퀀스 알고리즘을 완성하였다. 또한 실험을 통하여 베타선 방출 핵종 연속 모니터 시스템의 핵종 분석 성능을 조사하였다.

제 2 장 국내 · 외 기술개발 현황

1) 외국의 경우

국외의 경우 일본 동경 의치대의 isotope 종합 센터에서 핵종 분석 모니터를 구축한 사례가 있다(1999). 기술 개요는 다음과 같다. 액체 섬광(liquid scintillation) 측정법을 이용하여 β 선 방출 핵종을 대상으로 하는 핵종 동시 분석형 모니터를 시험 제작하였다. 핵종의 분석법으로는 섬광 펄스(scintillation pulse)파의 파고 분포에서 구한 관측 방정식에 최소 자승법을 적용하고 여기서 얻은 정규 방정식을 풀어 줌으로써 각 핵종 분석과 각 방사능 값을 결정하는 방법을 사용하였다. 이 이외의 다른 외국에서의 사례는 거의 없다.

2) 국내의 경우

국내의 경우는 베타선 핵종 연속 감시기는 개발된 바가 없으며, 공간감마선 감시기는 일부 산업체 및 연구소에서 개발한바 있다.

- 산업체 : 삼창 기업, 한국 전력 등
- 연구소 : 원격환경감시기(한국 원자력 안전기술원)

제 3 장 연구 개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 액체 섬광계수기 및 소광 효과

1. 액체 섬광계수기의 원리

액체 섬광 계수 기법(Liquid Scintillation Counting)은 ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl 을 비롯하여 ^{32}P , ^{35}S , ^{56}Fe 등과 알파, 베타 입자와 같은 투과율이 매우 낮은 방사선을 측정하기에 적합한 측정 기술이다.

액체 섬광 계수를 위한 시료는 방사능 시료와 용매(solvent) 및 섬광체(flur, scintillator)의 세 가지로 구성되며 액체섬광계수기의 원리는 다음과 같다. 방사능 물질에서 방출된 베타선은 용매를 여기 시키고, 여기된 용매는 다시 섬광체 분자에게로 에너지를 전달한다. 여기된 섬광체 분자는 빛의 형태로 에너지를 방출하게 되고, 이 빛은 광전자 증배관(PhotoMultiplier Tube, PMT)에서 감지되어 전기신호로 바뀐 후 증폭되어 최종적으로 방사능 붕괴를 계수하게 된다. 그림 3-1은 액체 섬광계수기의 원리를 보여준다.

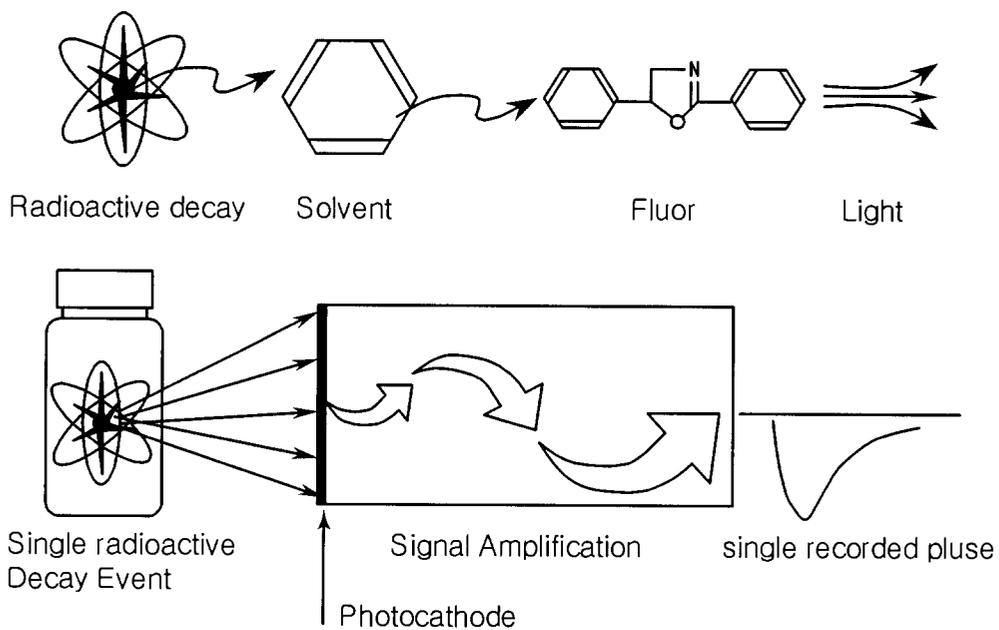


그림 3-1. 액체 섬광계수기의 원리.

이때 생성된 형광 빛의 파장은 350-400 nm 정도이다. 방출되는 빛이 광전자 증배관의 특성과 항상 일치하지 않기 때문에 2차 섬광체(secondary scintillator)를 사용하기도 한다. 2차 섬광체는 방출되는 빛을 흡수하여 광전자 증배관 반응에 적절한 빛의 파장으로 다시 방출한다.

액체 섬광계수기 내부의 시료에서 방출되는 베타선은 모든 방향으로 튀어 나갈 수 있지만, 방사능 시료가 콕테일(cocktail)에 모두 녹아 있고 콕테일이 검출기 역할을 한다고 볼 수 있으므로 액체 섬광계수기는 거의 4π 방향의 모든 베타선을 검출할 수 있다.

베타 붕괴에 의해서 생성되는 광자의 수인 빛의 세기는 방출되는 베타선의 에너지에 비례하며, 광전자 증배관의 광전 음극(photocathode)에서 생성되는 광전자(photoelectron)는 광전자 증배관으로 들어오는 광자의 수에 비례한다. 따라서 광전자 증배관의 펄스 크기는 방출되는 베타선의 에너지에 비례한다. 따라서 펄스의 크기를 이용하여, 액체 섬광계수기로부터 베타선의 에너지를 구별할 수 있다.

다른 일반적인 방사선 측정법과 비교하면 다음과 같은 장점과 단점이 있다.

< 장점 >

- 계측용 시료의 조제가 간단하다.
- 자기 흡수(self absorption)가 거의 없다.
- 기하학적 효율(geometric efficiency)이 거의 100 %에 가깝다.
- 여러 개의 시료를 동시에 자동적으로 계측할 수 있다.
- 알파선과 베타선을 동시에 계측할 수 있다.
- 배경 잡음(background noise)이 알파선 계측기보다 높다.

< 단점 >

- 방사성 시료 자체, 첨가물, 불순물 등에 의하여 소광(Quenching)이 생겨 계측 효율이 떨어진다.
- 측정 시료를 용매에 녹이기 어려울 경우에는 시료 제조상의 대책이 필요하다.
- 시료에 따라서는 측정을 방해하는 화학 발광(Chemical luminescence)의 발생을 초래하는 수가 있다.

2. 소광 효과

베타 입자를 방출하는 방사선 물질을 분석하기 위해 액체 섬광계수기를 많이 사용하는 이유는 단순한 방법으로 높은 계수 효율을 얻을 수 있기 때문이다. 이러한 높은 계수 효율은 주로 베타입자 - 용액 - 섬광체 사이의 에너지 전달이 효율적이며, 기하학적 효율이 거의 100 %에 이르기 때문이다. 그러나 생성된 빛이 광전자 증배관까지 가는 경로에는 빛의 세기, 즉 광자 (photon)의 개수를 감소시키는 요인들이 존재한다. 이러한 요인들을 소광 효과(quenching effect)라 한다. 결과적으로 소광 효과로 인하여 에너지 전환 과정에서 에너지 손실이 일어나고 시료 중의 광자수가 감소하며, 광전자 증배관의 전기적 펄스의 크기가 감소된다. 이러한 효과는 스펙트럼의 피크(peak)를 낮은 에너지 쪽으로 이동시킴으로써 베타 에너지 스펙트럼의 모양과 동시에 총 계수율(total count rate)을 감소시켜서 계측 효율이 떨어지는 결과를 초래한다.

다음은 소광 효과의 종류를 간단히 설명하였다.

가. 화학 소광

섬광 기작이 일어나려면 용매에서 섬광체로 에너지가 전달되어 섬광체의 여기(excitation)가 일어나야 하는데 화학 소광(chemical quenching)은 여러 형태로 섬광체의 여기를 방해한다. 특히, 할로젠 원소와 같이 전기 음성도가 큰 원소는 화학 소광이 잘 일어난다(electronegative element). 이들 원소는 전자를 끌어 당겨 자신의 최외각에 채우는 경향이 있으며, 이들 원소들이 베타선의 에너지를 없애 버림으로 해서 베타선은 더 이상 섬광 병(vial)안에서 빛을 생성시키지 못한다. 또 화학 소광에는 희석 소광 (dilution quenching)과 억제 소광(inhibition quenching)이 있다.

화학 소광은 편의상 소광 세기에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

- Weak Quenching : 염화수소, 에텔, 에스텔, 알코올, 물, 불소 화합물, 시안화물.

- Mild Quenching : 케톤, 브롬화물.
- Strong Quenching : 옥소화물, 아민류, 알데히드, 페놀, 니트로 화합물.

나. 색소 소광(Color quenching)

빛이 광전자 증배관으로 가기 전에 색소 물질 등에 의해서 흡수되는 현상이다. 실제로 모든 물질들은 흡수 스펙트럼을 가지고 있다. 용질의 발광 스펙트럼대에 다소에 관계없이 중첩되는 흡수 스펙트럼대를 갖는 물질이 조제 시료중에 있으면 용질에서 생긴 형광의 일부분이 흡수되어 색소광이 일어난다. 색의 종류 및 농도에 의해 색소광은 좌우되며 일반적으로 적색 또는 황색의 경우 색소광 작용이 심하며 청색은 약하다.

다. 광학 소광(Optical quenching)

빛의 산란 때문에 결과적으로 광전자 증배관으로 가는 빛의 양이 줄어 든다. 시료에 입자가 있거나 침전물이 존재할 경우, 시료 병의 재질 또는 시료 병에 남아 있는 지문 등에 의한 굴절에 의해서 광학 소광이 일어난다.

라. 산소 소광

액체 섬광체 중의 용존산소로 인하여 소광 작용이 일어나는 것을 말한다. 산소 분자는 강한 전자 수용성이므로 방사선 에너지에 의해 여기된 용매 분자와 여기합체를 만들기 쉬우므로 소광이 일어난다.

마. 농도 소광

액체 섬광체의 발광 효율은 용질 농도에 좌우되며 제1용질의 농도가 높을수록 농도 소광이 일어나 발광 효율이 떨어진다. 농도 소광은 자기 소광 또는 자기흡수 때문에 발생한다.

바. 물리적 소광

빛의 산란 때문에 결과적으로 광전자 증배관으로 가는 빛의 양이 줄어 든다. 시료에 입자가 있거나 침전물이 존재할 경우, 시료 병 재질에 의한 굴절 등에 의해서 물리적 소광이 일어난다. 방출하는 베타선의 에너지가 높은 핵종들(^{14}C , ^{32}P , 알파 핵종)은 소광에 의해서 주로 스펙트럼의 이동이 일어나고 계수(count)의 변화는 매우 작게 일어난다. 그러나 ^3H 와 같은 저에너지 핵종들은 큰 계수의 변화와 스펙트럼의 이동이 동시

에 일어난다.

사. 인광

시료에 따라서 인광을 내는 것이 있다. 특히 생물 조직에서 많이 볼 수 있는데 인광은 하룻밤 어두운 곳에 보관하게 되면 대부분 감쇠되는데 이 방법으로도 줄어들지 않거나 빛을 쬐이면 다시 인광을 발산하는 경우에는 산 처리하여 감쇠할 수 있다.

아. 침전에 의한 소광

시료를 만들 때 완전하게 용해되었다고 여기지는 시료일지라도 오랜 시간 방치하면 다시 침전이 생기는 것이 있을 수 있다. 이와 같은 시료는 침전이 생기기전에 측정하든지 다른 용해법으로 바꾸든지 해야 한다.

이와 같은 여러 가지 소광에 의한 효과는 액체 섬광계수기를 사용하여 베타선을 측정하는 스펙트럼에서 다음과 같은 현상으로 나타난다.

- 펄스의 수를 감소시킨다. 즉, 계수 효율을 줄이게 된다.
- 펄스 높이(pulse height) 스펙트럼을 아래쪽으로 이동시키고, 평균 펄스 높이 값을 줄인다.

그림 3-2는 소광에 의한 효과로 인해 베타선 에너지 스펙트럼 및 펄스 높이 분포가 변화하는 현상을 보여주며, 소광 효과가 개입되지 않았을 때 샘플(unquenched sample)의 스펙트럼에 대해 소광 효과를 포함하는 샘플(quenched sample)의 스펙트럼이 에너지가 낮은 쪽으로 이동하며, 평균 펄스 높이도 낮아지는 모습을 나타내고 있다.

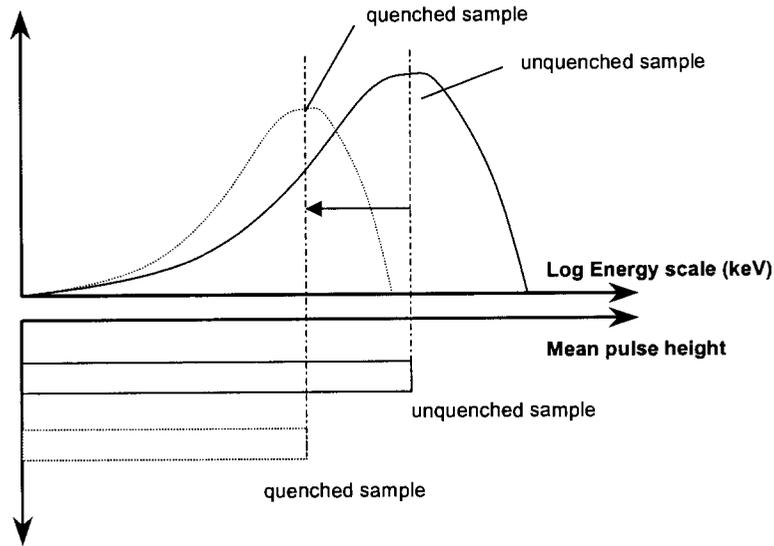


그림 32. 베타선 에너지 스펙트럼에 대해 소광이 미치는 효과.

3. 소광 효과 보정(Quenching Correction)

소광 정도에 따라서 시료의 방사능값(activity)을 제대로 계측할 수 없다는 것이 핵종 분석을 하는데 있어서 가장 큰 문제점이다. 모든 시료에는 항상 소광이 존재하기 마련이며 소광의 정도는 시료에 따라 모두 다르게 나타나므로 각각의 시료에 대해 소광 보정을 해야 한다. 소광 정도가 다른 여러 가지 표준시료에 대해서 소광과 계측 효율간의 상관관계를 구하는 것이 가장 좋은 방법이라고 생각하고, 이 때의 계수 효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Counting Efficient} = \frac{\text{Count Rate}}{\text{Activity}}$$

액체 섬광계수기를 이용한 시료 계측에서 계측 시료에 대한 소광 효과를 보정하기 위하여 소광 보정 곡선법과 표준시료 대비법을 사용한다.

소광 보정 곡선법은 방사능 농도가 동일하면서 소광 정도가 다른 일련의 표준시료를 만들어 그림 3-3과 같이 소광의 정도를 나타내는 소광 계수(quenching parameter)와 계측 효율간의 상관관계 곡선(quenching correction curve)을 작성한 다음 그 상관 곡선을 이용하여 실제 시료의 소광 계수로부터 계측 효율을 구하여 시료의 방사능을 계산하는 방법이다.

표준시료 대비법은 계측하고자 하는 시료와 동일한 조성으로 배경 측정

을 위한 시료와 표준시료를 만들어 세 가지 시료를 동시에 계측한 후 표준시료의 계수율을 기준으로 하여 시료의 방사능을 계산하는 방법이다.

소광 보정 곡선법을 사용할 경우에 조제 시료 외부에 외부 표준체(감마선원)를 놓아서 소광을 보정한다. 감마선은 시료 병의 벽을 통과하여 조제 시료에 입사하게 된다. 여기서 물질과 상호작용을 일으키게 되는데 감마선은 베타선과 마찬가지로 물질과의 상호작용을 한다. 표 3-2는 소광 보정 곡선법과 표준시료 대비법의 장점과 단점을 설명하였다. 특히 소광 보정 곡선법은 매번 시료 측정 시 표준시료가 필요하지 않다는 장점 때문에 연속적이며 자동으로 배수 시료를 모니터하는 시스템에 적용하기 좋은 측정 방법이 될 수 있다.

광전효과는 보통 감마선 에너지 범위에서 원자번호 (Z)의 4~5승에 비례하는 확률로 발생한다. 따라서 수소나 탄소 등의 원자번호가 낮은 원자로 되어 있는 탄화수소가 주성분인 액체 섬광체 용액 (~15ml)에서는 광전효과는 거의 무시할 정도이다. 또 전자쌍생성은 1.022 MeV이상의 감마선 에너지에 비례하여 증가하고 원자번호의 자승에 비례하여 일어난다. 액체 섬광체 용액의 조성 원자에서는 전자쌍생성이 일어날 확률은 거의 영(zero)이다.

결국 감마선과 액체 섬광체 용액과의 상호작용은 콤프턴 산란 효과이다. 콤프턴 산란 효과로 콤프턴 산란 전자가 생겨나게 되고 이 전자는 에너지 0에서부터 최대 에너지까지 연속 분포를 이루고 있다.

액체 섬광체 용액은 콤프턴 산란 전자로 발생하는 발광 광자수나 펄스 파고는 조제 시료의 소광에 따라 달라진다. 이처럼 감마선과 물질과의 상호작용에서 나타나는 현상들을 보정해야 한다.

액체 섬광 계측에서는 자연 방사능에도 신경을 써서 소광 정도를 보정해야 하는데 자연방사능의 원인으로는 다음과 같은 것을 말한다.

가. 우주선이 검출기 부분의 주변물에 부딪혀 2차 전자를 방출 하든가 또는 우주선이 시료 병에 부딪혀 체렌코프광을 발생한다. 이것이 우주선에 의한 자연방사능의 원리라고 볼 수 있다.

나. 실험실 내부의 환경 및 계측 장치의 재질 중의 천연 방사성 물질에 의한 자연 방사능으로서 라듐(Radium, Ra) 혹은 토륨(Thorium, Th)의 붕괴 생성물과 K(Potassium)-40 에 의한 것이다.

다. 계측 장치에는 잡음을 억제하기 위하여 동시 계수회로가 되어 있으나 이것으로도 완벽하게 잡음을 제거할 수가 없다. 우발 동시 계측으로는 잡음을 계측할 수 없다.

라. 광전자증배관 2개를 180°방향으로 서로 대치시키면 한쪽의 광전자증배관중에서 발생한 빛이 다른 쪽 광전자증배관에 검출될 수 있다. 이것을 크로스 톡(cross talk)현상이라 말한다. 이 현상이 자연 방사능의 대부분을 차지하고 있다.

표 3-1. 소광 보정 곡선법과 표준시료 대비법의 특징.

방법	장점	단점
소광 보정 곡선법	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소광 보정 곡선을 한 번 작성하면 매번 시료 측정 시 표준시료가 필요하지 않음. ○ 방사능 농도가 다소 높고 환경 모니터링과 같이 다량의 시료를 단순 반복적으로 신속히 측정. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소광 정도가 다른 표준시료를 여러개 필요. ○ 소광 계수와 계측 효율간의 상관 곡선 작성시 오차 발생
표준시료 대비법	<ul style="list-style-type: none"> ○ 계측 후 FWHM값이 가장 높은 최적의 측정영역을 인위적으로 설정. ○ 소광 보정 곡선법 보다 검출 하한치가 낮음. ○ 방사능 농도가 매우 낮고 높은 분석 정밀도가 요구되는 시료의 경우에 사용. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 계측 시료, 배경 측정용 시료 및 표준 시료의 소광 정도가 다른 경우는 측정 결과의 오차를 유발 ○ 시료 계측시마다 매번 표준 시료를 만듦.

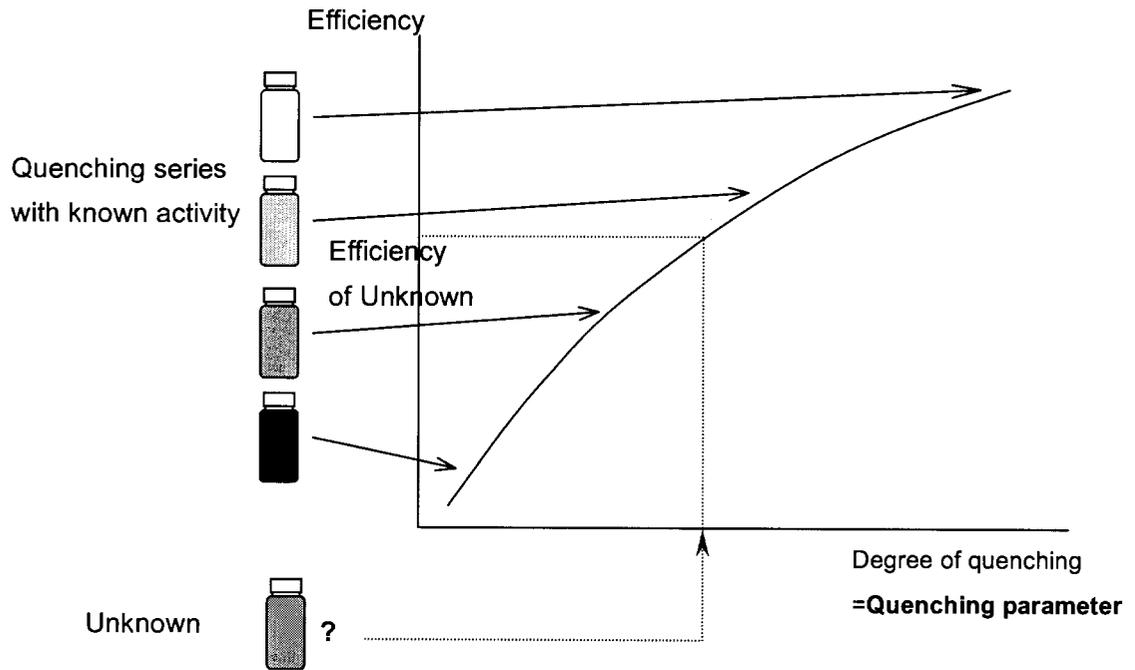


그림 3-3. 소광 효과 보정 곡선.

4. 소광의 정도 측정

소광의 정도를 측정하는 방법 중 SQP(I)(Spectral Quenching Parameter of isotope)는 스펙트럼의 피크 부분의 채널 번호를 나타낸다(그림 3-4). 또한 SQP(E)(Spectral Quenching Parameter of external standard method)는 컴프턴 전자(Compton electron)에 의해 생성된 섬광 스펙트럼의 총세기(intensity)의 1%인 지점의 채널 번호이다(그림 3-5). 시료를 계측하기 전에 액체 섬광계수기 내부에 장착된 외부 감마 표준 선원(External standard capsule)으로부터 나오는 감마선을 시료에 주어진 시간 동안 조사시켜 발생하는 컴프턴 전자의 섬광 스펙트럼으로부터 SQP(E)를 계산하는 것이다. SQP(I)가 매우 낮은 준위의 시료에서는 소광 정도를 잘 평가하지 못하는 데 반하여 SQP(E)는 매우 낮은 준위의 시료에서도 매우 효과적이며 빠르게 소광 정도를 측정한다. 그래서 여기서 논하는 소광의 정도는 섬광 스펙트럼의 총 세기의 1%인 지점의 채널 번호인 SQP(E)를 말한다.

$SQP(I) = \text{channel number of gravity weight point of spectrum}$

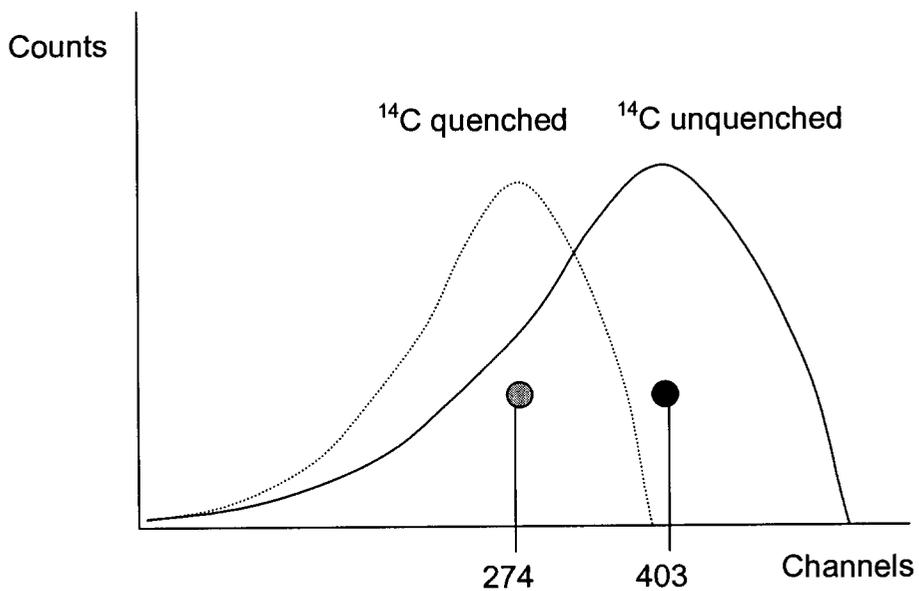


그림 3-4. 소광의 정도를 나타내는 변수 ($SQP(I)$).

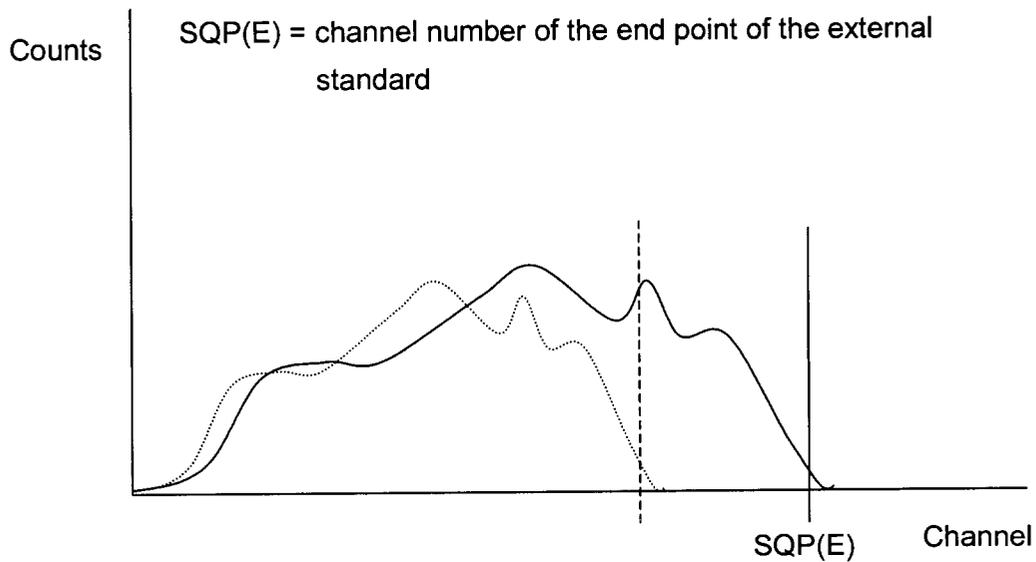


그림 3-5. 소광의 정도를 나타내는 변수 ($SQP(E)$).

제 2 절 시료 자동 주입 장치의 설계 및 제작

그림 3-6은 베타선 방출 핵종 연속 모니터 시스템의 전체적인 구성도이다. 메인 컨트롤러 부분과 데이터 획득용 컨트롤러 부분, 샘플 자동 교환 장치 그리고 액체 섬광 검출기 부분은 이미 제작되었고, 이어서 샘플 혼합을 위한 시료 자동 주입 장치의 설계와 제작이 이루어졌다. 그림 3-7은 시스템의 기계부의 설계 모습으로, 맨 위에 액체 섬광 검출기 챔버가 위치하고, 그 아래에 샘플 교환 및 혼합을 위한 장치들(XY 스테이지(XY stage), 샘플(Sample Holder), 샘플 테이블(Sample Table), 로딩 실린더>Loading Cylinder), 샘플 실린더(Sample Cylinder), 이중 실린더(Dual Cylinder), 바틀 스테이지(Bottle Stage), 바틀 척(Bottle Chuck), 그리고 캡핑 유닛)을 탑재하였다. 그림 3-8은 설계 및 제작된 시스템을 19인치 표준 랙에 설치한 모습이다.

샘플 혼합을 위한 시료 자동 주입 장치의 설계 시 신중하게 고려되었던 것은, 시료를 자동으로 주입하기 위해서는 샘플 병의 뚜껑을 열고 닫을 수 있는 장치와 적량의 폐수와 액체 섬광체를 주입할 수 있는 장치가 필요한 점이었다. 또한 폐수와 액체 섬광체를 주입 한 후, 폐수 라인에 남아 있는 잔류 폐수의 세척 기능을 갖추어야 하며, 이들 기능 및 장치들은 이전에 제작된 장치의 구동에 영향을 미치지 않아야 한다.

설계 초기부터 목적하였던 19인치 표준 랙에 장치의 설치가 가능하도록 하기 위해서 구조물의 소형화에 중점을 두어 설계 제작하였다. 병뚜껑의 개폐와 시료 혼합 및 주입 장치는 그림과 사진에서와 같이 기존 장치의 뒤쪽 공간에 배치하고, 폐수 정량을 주입하기 위한 액체 펌프와 액체 섬광체를 주입하기 위한 디스펜서 (Akku-drive 50ml)를 장치의 여백 공간에 배치함으로써 전년도에 제작한 자동 교환 장치의 프레임을 그대로 사용할 수 있었다.

샘플 병을 뒤쪽까지 이동시키기 위해서 기존의 230mm의 행정을 갖고 있는 XY motion guide의 Y축 motion guide를 430mm 행정의 motion guide로 교체하고, 남게 된 motion guide는 뒤쪽에서 샘플 병을 좌우로 이동시키는데 활용하였다.

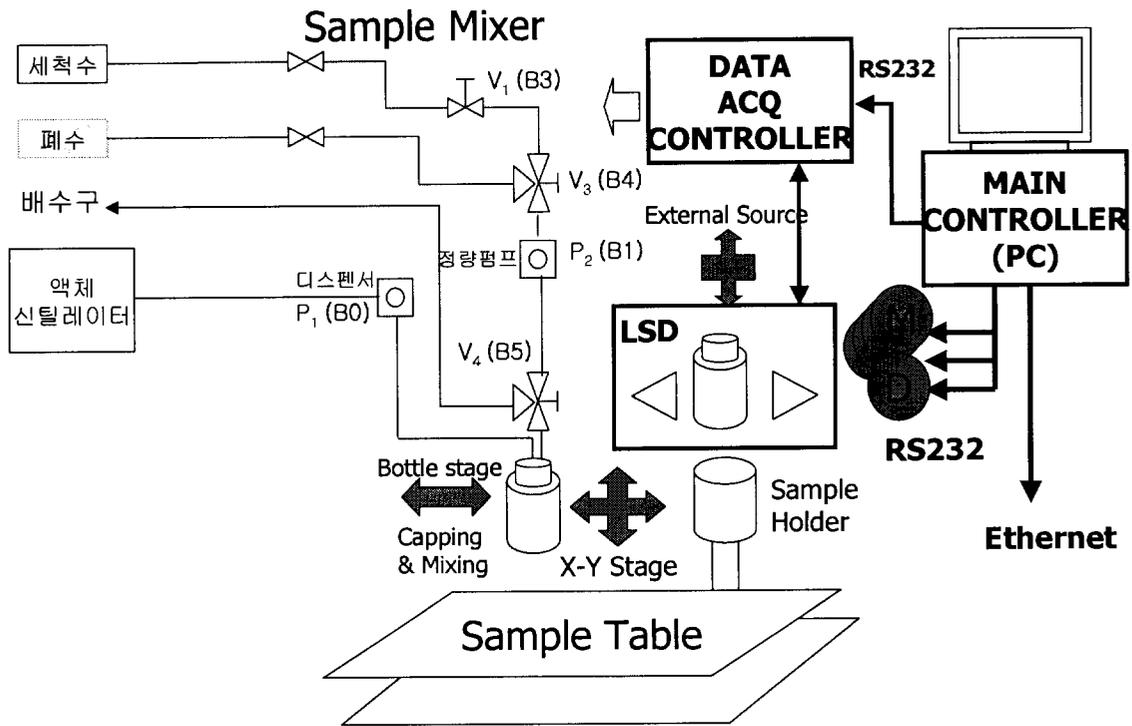


그림 3-6. 시스템의 전체적인 시스템의 구성도.

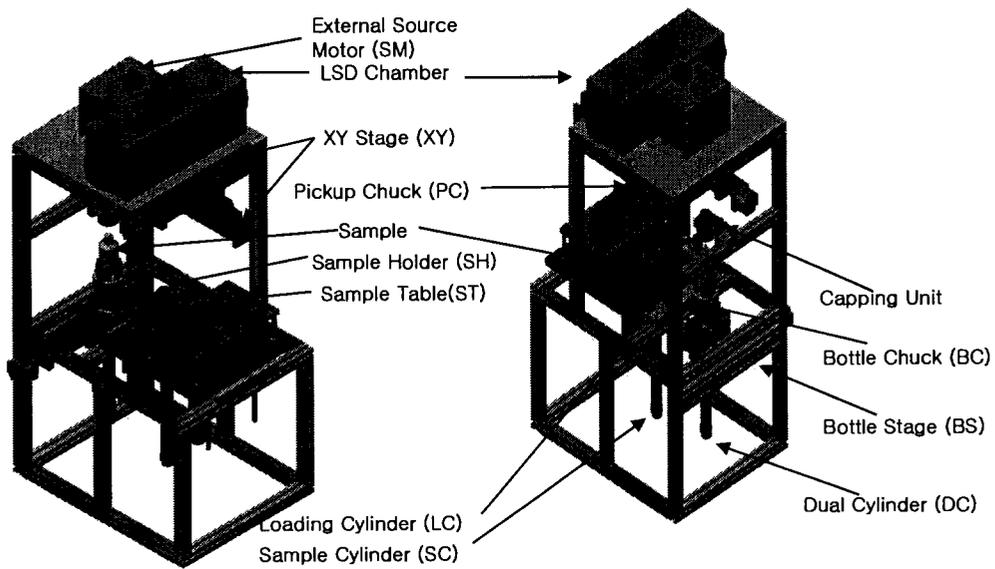


그림 3-7. 시스템의 기계부의 설계도 구조.

제작한 시스템은 두 개의 표준 랙에 설치되었으며, 그림 3-8에 보이는 바와 같이 왼쪽 랙에는 액체 섬광 검출기를 포함한 시료 자동 교환 및 혼합 장치를 두었다. 아래쪽에 액체 펌프와 디스펜서 그리고 디스펜서에 연결된 액체 섬광체 병이 위치해 있다. 오른쪽 랙에는 메인 컨트롤러와 LCD 모니터, 모터 제어용 모터 컨트롤러, 데이터 획득용 컨트롤러와 ADC 신호 처리 보드가 탑재되어 있다. 아래쪽에는 공압기를 위한 공압 펌프가 놓여 있다.

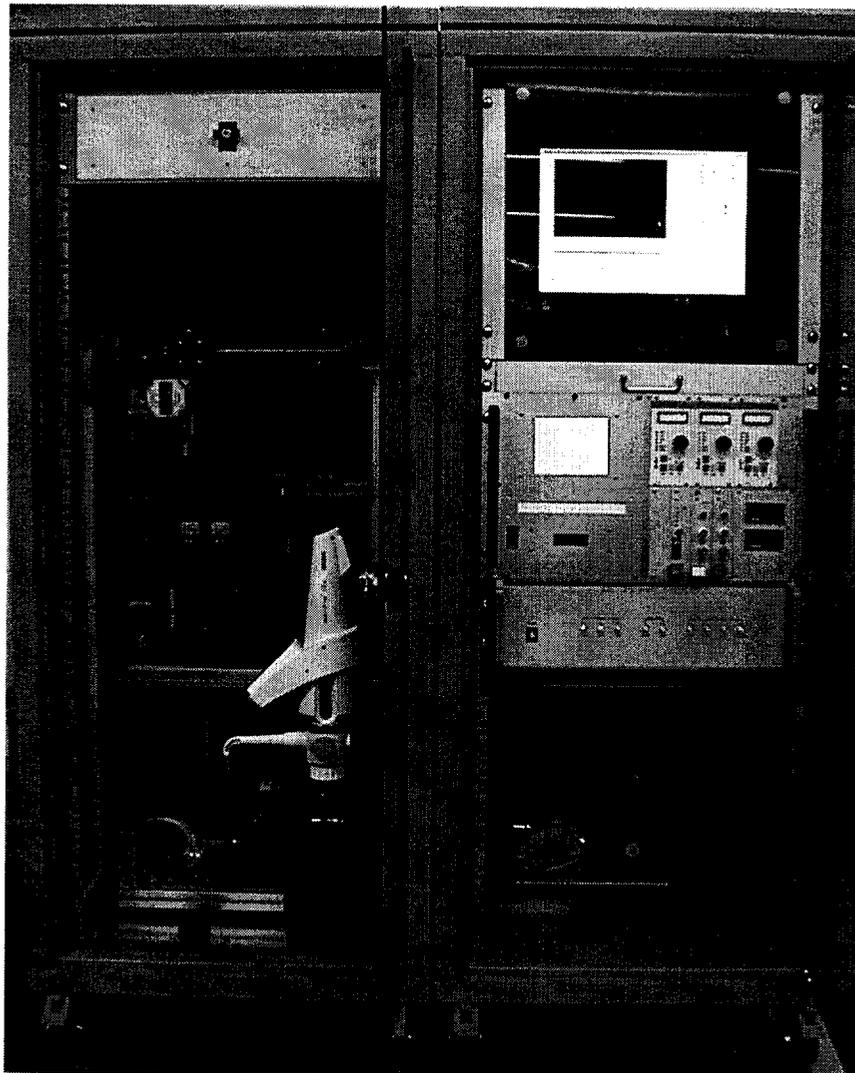


그림 3-8. 표준 랙에 설치된 전체적인 시스템의 모습.

1. 샘플 캡핑(sample capping) 장치의 설계 및 제작

시료 계측 용기는 오염의 방지를 위해 뚜껑이 닫힌 상태로 보관 및 사용해야 하므로 시료의 주입을 위해서는 샘플 병의 뚜껑을 열고 닫을 수 있는 장치가 필요하다. 뚜껑을 열고 닫기 위해서는 병의 몸통과 뚜껑이 상대적 회전운동을 할 수 있도록 적절한 토크와 파지력이 가해져야 하며, 회전할 때 발생하는 상하 운동도 고려하여야 한다. 또한 과도한 잠김이 발생하여 장치에 무리가 가하지 않도록 하여야 한다. 이들 사항들을 고려하여 캡핑 장치를 설계 제작하였다.

그림 3-9와 그림 3-10은 설계 및 제작한 캡핑 장치를 보여주며, 이 장치는 이중 행정 에어 실린더(air cylinder), 에어척(air chuck), 캡핑 유닛(capping unit), 그리고 소형 DC 모터로 구성되어 있다. 회전운동의 전달은 그림 3-9와 같이 타이밍 벨트를 이용하였다.

캡핑 유닛은 4개의 핀과 탄성력을 제공하는 오링으로 구성되어 있으며, 각 핀은 병뚜껑을 회전시키고 열린 뚜껑을 잡거나 과도한 잠김을 방지하는 역할을 한다.

에어 실린더는 이중 행정이 가능한 것으로 Y축 motion guide로부터 병을 받는 위치와 뚜껑의 개폐 및 시료 주입 위치를 선택하여 구동할 수 있으며, 필요시 실린더를 개방하여 압력이 가해지지 않도록 하였다. 또한 에어척은 병뚜껑이 회전할 때 병이 정지 상태를 유지하도록 중형급을 채택하였다.

병뚜껑을 여는 과정은 먼저 motion guide가 캡핑 유닛 위치로 이동한 후 실린더가 병을 밀어 올린다. 병뚜껑이 캡핑 유닛으로 삽입되면 각 핀이 뚜껑의 돌기 사이에 위치하도록 적절한 유격을 제공하였다. 이어서 모터의 회전 시작과 동시에 실린더를 개방하여 회전시 자유롭게 병이 아래로 이동하도록 하였다. 시료의 주입 후 뚜껑을 닫는 경우에는 모터의 회전을 시작한 다음 병을 밀어 올리고 상승 속도를 조절하여 자연스럽게 닫게 된다.

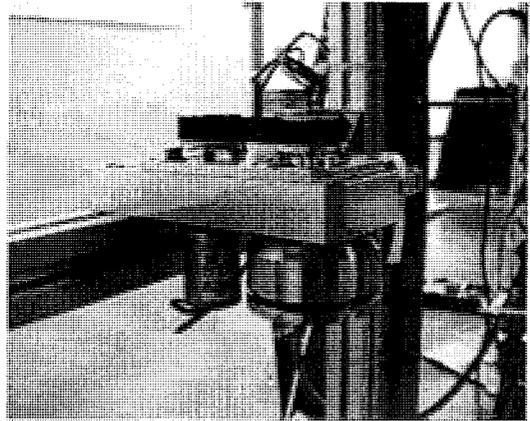
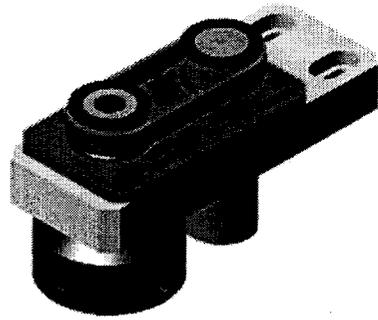


그림 3-9. 왼쪽 그림은 캡핑 유닛의 설계안이며 오른쪽 그림은 제작된 실물 사진이다.

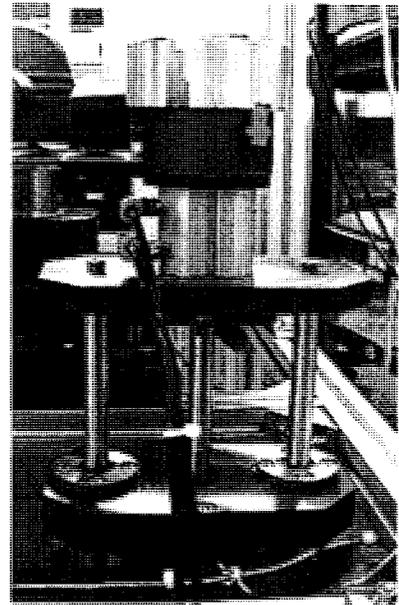
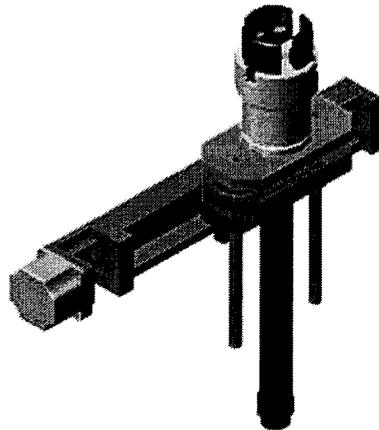


그림 3-10. 왼쪽 그림은 에어척, 이중행정실린더, 그리고 리니어 스테이지로 구성된 샘플의 상하운동과 캡핑을 위한 시료자동 주입장치 하단부의 설계안이며 오른쪽 그림은 제작된 실물 사진이다.

2. 혼합 장치의 설계 및 제작

액체 섬광체와 폐수 혼합에 있어서 정확한 양의 주입이 중요하다. 주입량의 조절을 위해 폐수와 세척수의 공급은 정량펌프를 채택하고, 동작 시간을 제어함으로써 샘플 병에 들어가는 공급량을 조절하였다. 액체 섬광체는 공급라인의 세척이 필요 없으므로 정량 디스펜서를 채택하여 직접 주입하였다. 두 개의 3-way 밸브는 폐수/세척수의 입력 선택과 샘플병/배수구의 출력 방향을 결정한다. 액체 공급용 튜브는 실리콘과 C-Flex를, 섬광체는 유기물질을 포함하고 있으므로 테프론 튜브를 사용하였다. 설계 제작된 장치는 그림 3-11, 그림 3-12(정량펌프 및 디스펜서 사진)와 같다.

샘플 병에 폐수와 섬광체의 혼합 과정은 먼저 3-way 밸브(V3)의 입력을 폐수로 선택한 다음 정량펌프를 가동하여 세척수로 채워진 액체 튜브를 폐수로 채운다. 이때 종단의 3-way 밸브의 방향은 배수구 쪽이며 디스펜서의 동작을 시작한다. 디스펜서가 병으로 액체 섬광체를 방출하는 순간 종단의 3-way 밸브(V4)의 방향을 병쪽으로 전환하여 두 액체가 동시에 투입되며 섞이도록 한다. 샘플 병의 용량이 100ml이므로 각각 50ml를 투입한다. 폐수의 경우 50ml가 투입되면 종단의 3-way 밸브의 방향을 배수구 쪽으로 전환하고 입력단의 3-way 밸브의 방향을 세척수로 하여 일정 시간 동안 튜브를 세척한 후 정량펌프의 동작을 중지한다.

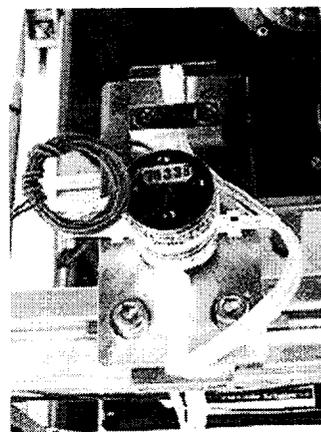
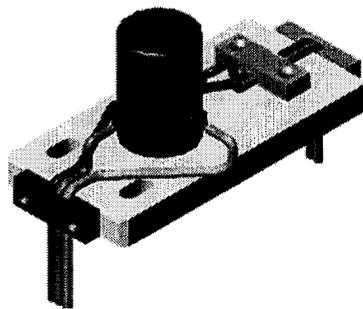


그림 3-11. 왼쪽 그림은 폐수 시료와 액체 섬광체 자동 혼합 장치의 설계안이며 오른쪽 그림은 제작된 실물 사진이다.

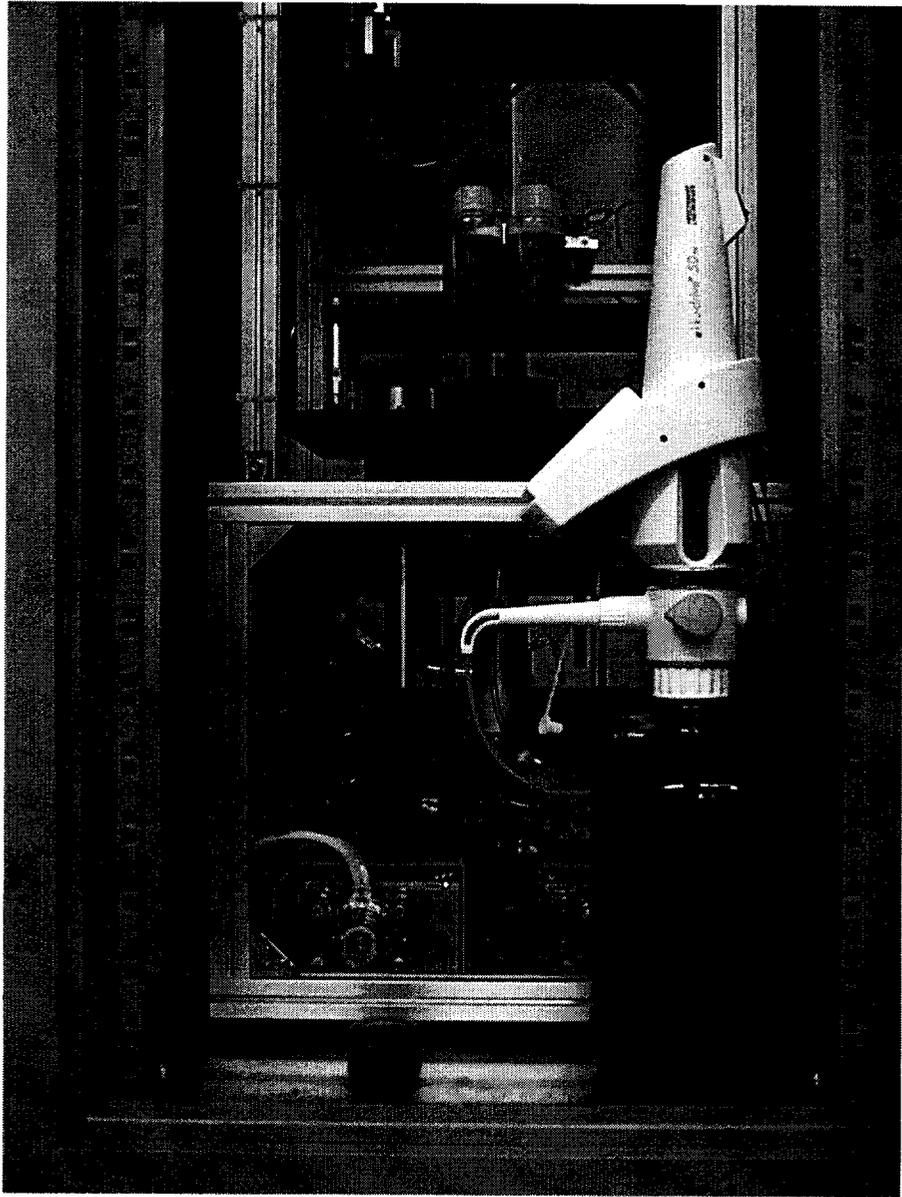


그림 3-12. 설계 제작되어 표준 랙 안에 설치된 디스펜서와 정량펌프.

제 3 절 연속 모니터링 시스템 구성부들의 통합

연속 모니터링 시스템은 두 개의 광전자 증배관으로 구성된 검출부와 동시 계수 신호 처리 회로부, 자동 모니터 시스템 제어를 위한 메인 컨트롤러 PC, 그리고 시료 자동 교환 장치 및 혼합 장치로 이루어졌으며, 제작된 각 구성부들을 하나의 연속 모니터링 시스템으로 통합하였다.

1. 신호 검출부 및 동시 계수 신호 처리 회로부

베타선 방출 핵종 측정을 위한 액체 섬광계수기의 검출부 구성은 샘플을 중심에 두고 광전 증배관을 양쪽에 설치하여 동시 회로를 통해 동시에 검출된 신호에 대해서만 신호 처리를 하는 회로로 구성되었다. 이 연구에서는 회로의 복잡성과 난이도를 해소하기 위해 광증배관의 양극(anode) 출력 단자에서 나오는 신호를 전치증폭기(preamp)와 신호 정형 회로를 통해 얻은 신호를 이용하여 고속 동시 회로를 구성하였다. 동시 회로 구성은 FPGA(Field Programmable Gate Arrays)를 사용하여 구현하였다. 그림 3-13은 실제 제작된 광전 증배관을 포함하는 챔버와 프리 앰프 보드를 내장한 프리 앰프 박스를 옆에서 본 모습이다. 또한 그림 3-14는 동시 계수 회로를 포함한 신호 처리 회로의 블록도이다.

베타 핵종 분석용 MCA 회로는 디지털시그널프로세서(DSP, Digital Signal Processor)회로를 활용하여 동시 계수 방식을 구현하도록 하였다. MCA(Multichannel Analyzer) 회로는 시스템의 업그레이드, 유지 보수 등에 편리하도록 (1)전치 증폭회로, (2) ADC(Analog to Digital Converter) 회로, (3)디지털 신호 처리를 담당하는 DSP 회로 등으로 분리하여 제작하였다. 특히 ADC 회로는 MAIN과 SUB 회로로 나누어 제작하여 2 채널 MCA 회로가 가능하도록 하였다. 따라서 좌우의 광전자 증배관으로부터 독립적인 스펙트럼 분석이 가능할 뿐만 아니라 신호의 크기의 비에 따라 시료가 아닌 영역에서 나오는 이상 신호를 차단하는 PAC(Pulse Amplitude Comparison)기능이 가능하도록 하였다. 또한, 에너지 측정을 위해 4096 채널의 다중 채널이 형성되도록 12 비트 ADC를 사용하였으며,

사용된 ADC는 약 3 μ s의 변환 시간을 갖고 있다. 이 시스템은 20 μ s의 고정된 불감 시간(dead time)을 갖도록 설계하였다. 원 설계대로라면 에너지 측정에서 4096 채널을 사용할 수 있지만, 실제 실험에서는 512 채널 정도로 스케일을 줄여서 사용하였다.

디지털 신호 처리 회로에서는 시스템 노이즈 감소를 위해 저가형 고속 DSP인 TMS320VC33을 사용하여 DSP 보드를 개선하였다. 개선된 보드는 그림 3-15와 같다.

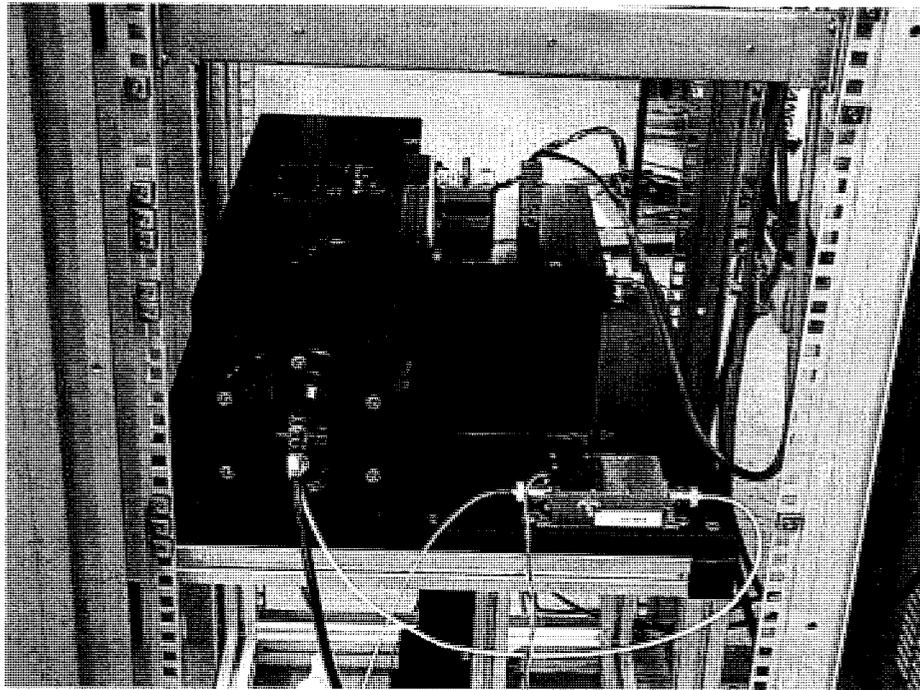


그림 3-13. 광전자 증배관을 포함한 챔버와 프리 앰프 박스.

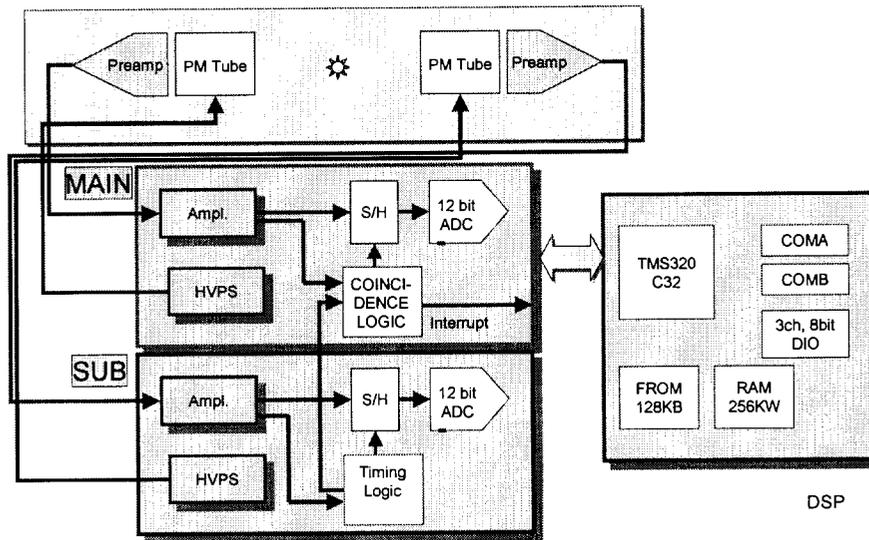


그림 3-14. 동시 계수 회로를 포함한 블럭도.

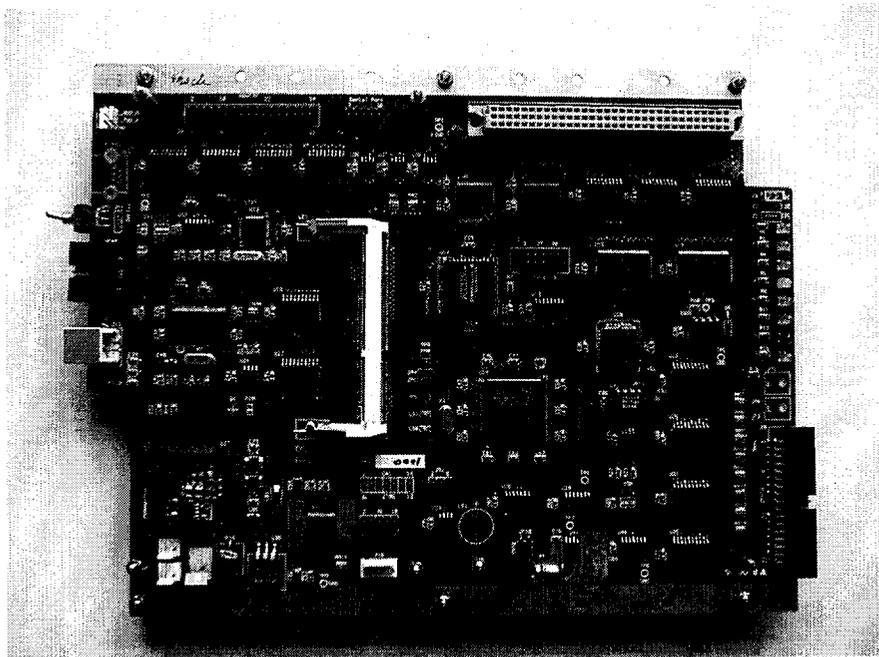


그림 3-15. 시스템 노이즈 감소를 위해 개선한 DSP 보드.

2. 메인 컨트롤러 (PC)

4개의 내장된 RS-232통신 포트를 이용하여 모든 측정 자료를 메인 컨트롤러 PC로 전송하고 또한 메인 컨트롤러에서 조작 및 제어가 가능하도록

록 PC용 프로그램을 개발하였다. RS-232 통신 (또는 RS-485 통신)으로 제어하는 구성부는 검출부 및 동시 계수 처리 회로를 포함하는 MCA 컨트롤러부, 스테핑 모터를 구동 제어하는 4개의 모터 컨트롤러, 액체 섬광체 주입용 디스펜서, 그리고 기타 상태 모니터용 센서들을 위한 예약 포트 등이다.

메인 컨트롤러는 산업용 PC로써 모델명은 MBPC-300이다. 주요 사양은 다음과 같고, 그림 3-16은 메인 컨트롤러로 사용된 MBPC-300 산업용 PC 모습을 보여주고 있다.

- 가. CPU - CentaurHauls 사, 800MHz
- 나. 메모리 - 삼성, 256MB SDRAM
- 다. HDD - 20 GB
- 라. 통신 - 4ch x RS232
 - 2ch x USB
 - Ethernet
- 마. 프린터 포트
- 바. 전원 공급 장치 - Vin : 100 ~ 240 Vac/50 ~ 60Hz
 - Vout : +5V/8A, +12V/1.5A

MBPC-300

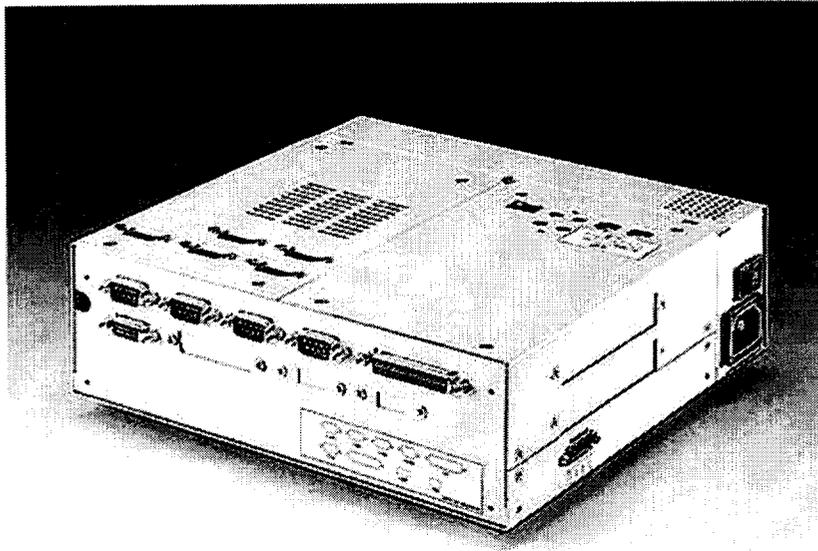


그림 3-16. 메인 컨트롤러로 사용된 MBPC-300 산업용 PC.

3. 자동 샘플 교환 및 시료 혼합 장치

자동 샘플 교환 장치 중에서 모터 컨트롤러에 의해 제어되는 XY-motion 유닛(unit)의 두 개의 스텝핑 모터와 외부 표준 선원의 ON/OFF용 스텝핑 모터 그리고 캡핑 유닛의 소형 DC 모터는 메인 컨트롤러 PC의 하나의 RS-232 통신 포트를 통하여 RS-485 통신 방식으로 제어할 수 있도록 연결하였다.

또한, MCA 회로를 포함한 DSP 보드의 24 비트 디지털 I/O (Input/Output)를 이용하여 +24V 릴레이를 제어함으로써 공압 펌프에 연결된 로딩 실린더, 샘플 실린더, 샘플 클램퍼(Sample clamper), 샘플 바디 척(sample body chuck), 그리고 이중 행정 에어 실린더 등의 동작을 제어할 수 있도록 연결 하였다.

시료 혼합 장치 중에서 병뚜껑의 개폐와 시료 혼합 및 주입 장치는 기존 장치의 뒤쪽 공간에 배치하고, 폐수 정량을 주입하기 위한 액체 펌프와 액체 섬광체를 주입하기 위한 디스펜서는 기존에 설치한 장치의 여백

공간에 배치함으로써 전년도에 제작한 자동 교환 장치의 프레임 그대로 사용하였다. 여기에 사용된 디스펜서로 RS-232 통신 방식으로 메인 컨트롤러인 PC에서 제어할 수 있다.

캡핑 유닛은 캡핑 툴(capping tool), DC 모터, 타이밍 벨트 등으로 구성되어 있으며, 공간의 최소화를 위해서 타이밍 벨트를 이용하여 회전력이 전달되도록 하였다. 캡핑 툴은 병뚜껑을 열었을 때 뚜껑을 잡고 있어야 하며 또한 과도하게 뚜껑이 잠기지 않도록 하여야 한다. 이를 위해 4개의 핀과 각각의 핀에 적절한 탄성력을 가할 수 있도록 설계하여 구현하였다. 또한 병뚜껑을 열고 닫는 과정에서 병의 상하 운동이 발생하므로 이를 고려하지 않게 되면 샘플 병이나 캡핑 툴에 과도한 스트레스(stress)가 가해지게 되어 파손이 발생하게 된다. 이 문제는 이중 행정 실린더를 사용하고 모터가 회전하는 순간 실린더의 공기압을 제거하여 자유롭게 상하 운동을 하도록 함으로써 해결하였다.

폐수와 섬광체의 주입에 있어서는 적량 주입과 오염의 방지가 중요하다. 따라서 정량펌프와 밸브 등을 이용하여 적량 주입과 폐수 라인의 세척이 가능하도록 설계 제작하였다. 폐수와 세척수의 공급을 위해서는 정량펌프의 동작 시간을 제어하여 구현하였다.

혼합 과정은 먼저 입력 단의 3-way 밸브에서 세척수를 선택하고 투입구 직전단의 3-way 밸브를 통하여 drain 라인으로 흘려보내어 폐수 라인을 세척한 다음 입력단의 3-way 밸브를 폐수로 전환한다. 일정 시간 폐수를 drain 라인으로 흘려보낸 다음 투입구 직전단의 3-way 밸브를 샘플 병 쪽으로 전환하는 동시에 액체 섬광체의 디스펜서를 구동하여 샘플 병에 폐수와 섬광체가 동시에 주입됨으로써 두 액체가 혼합되도록 하였다.

4. 샘플 자동 측정을 위한 제어 알고리즘

샘플 자동 측정 제어 알고리즘은 샘플 병의 초기 위치에서 샘플 병을 3열에 전달한 후 x축 방향으로 이동하여, cap/uncap 위치로 이동한 다음 샘플 병의 뚜껑을 열어 샘플 주입이 가능하도록 한다. x축 방향으로 다시 이동하여 시료를 주입한 다음, 이동하여 뚜껑을 닫은 다음 load/unload 위치로 이동하여 측정을 대기하도록 한 샘플 주입 과정과 주입된 샘플을 LSD 챔버 내로 넣어서 측정 후 다시 샘플의 원 위치로 돌아오는 과정을 도식화한 것이다.

그림 3-17은 스테핑 모터, 공압 장치, 공압 척을 이용하여 측정할 샘플을 LSD로 이동하여 측정하고 되돌려 놓는 과정을 예로서 순서대로 나타낸 것이다. 그림 3-18은 이것 역시 앞의 장치와 자동 혼합 장치인 캠핑 tool, 디스펜서, 정량 펌프, 3-Way 밸브 등을 이용하여 샘플의 빈병을 제 3열의 capping / uncapping 부분에 가서 뚜껑을 열고 닫고 Filling부분에 가서 샘플 병뚜껑이 열린 상태에서 폐수와 섬광체를 혼합하여 채우고 돌아오는 과정을 예로서 순서대로 나타낸 것이다. 또한 표 3-2는 샘플 자동 교환 및 혼합 장치의 motion 유닛에 대한 설명을 보여주고 있다.

이러한 샘플 주입에서부터 시료가 주입된 샘플을 가지고 측정 분석해내는 일련의 과정을 PC에서 LabWidows/CVI로 구현한 베타선 핵종 분석용 통합 프로그램을 이용하여 구현하였다.

표 3-2. 샘플 자동 교환 및 혼합 장치의 motion 유닛에 대한 설명.

motion unit	position	description
XY stage	pxy_nm	sample position(n,m)
	pxy_org	origin position
	pxy_test	test position
	pxy_trans	transmit position for filling
F stage	pf_tans	transmit position
	pf_cap	capping position
	pf_fill	filling position
ST (sample table)	top	
	bottom	
SH (sample holder)	top	bottle at chamber
	bottom	
BH (bottle holder)	top	transmit
	middle	capping
	bottom	move
	free	vent
CF (cap finger)	open	open position
	close	close position
BF (bottle finger)	open	in F stage
	close	
V3 (3-way valve)	clean	세척수
	sample	폐수
V4 (3-way valve)	drain	
	injection	병입
P1 (dispensor)	run	
	stop	
P2 (dispensor)	run	
	stop	
CU (Capping unit)	capping	start motor (CCW)
	uncapping	start motor (CW)
	stop	

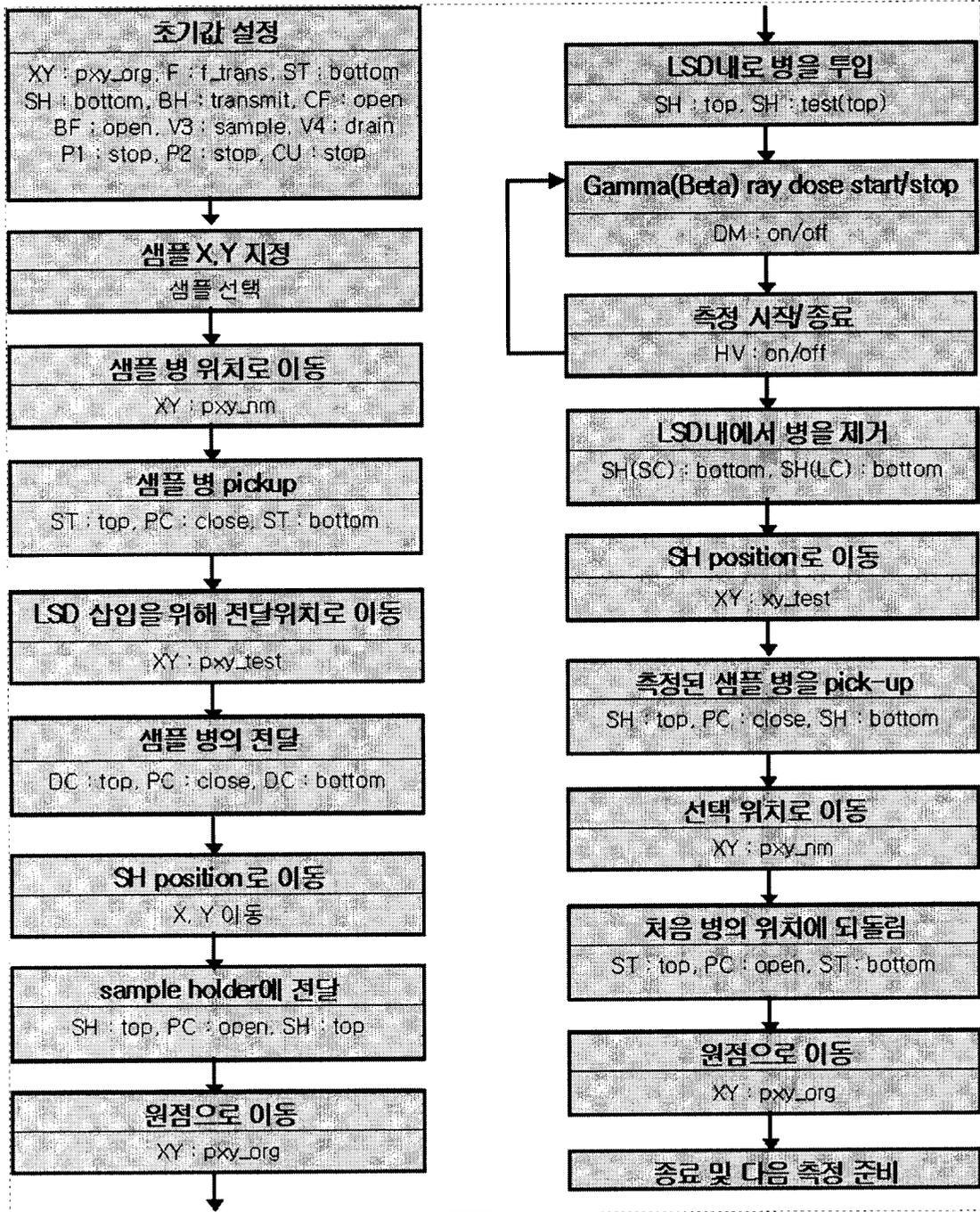


그림 3-17 샘플 자동 측정을 위한 측정부의 제어 알고리즘.

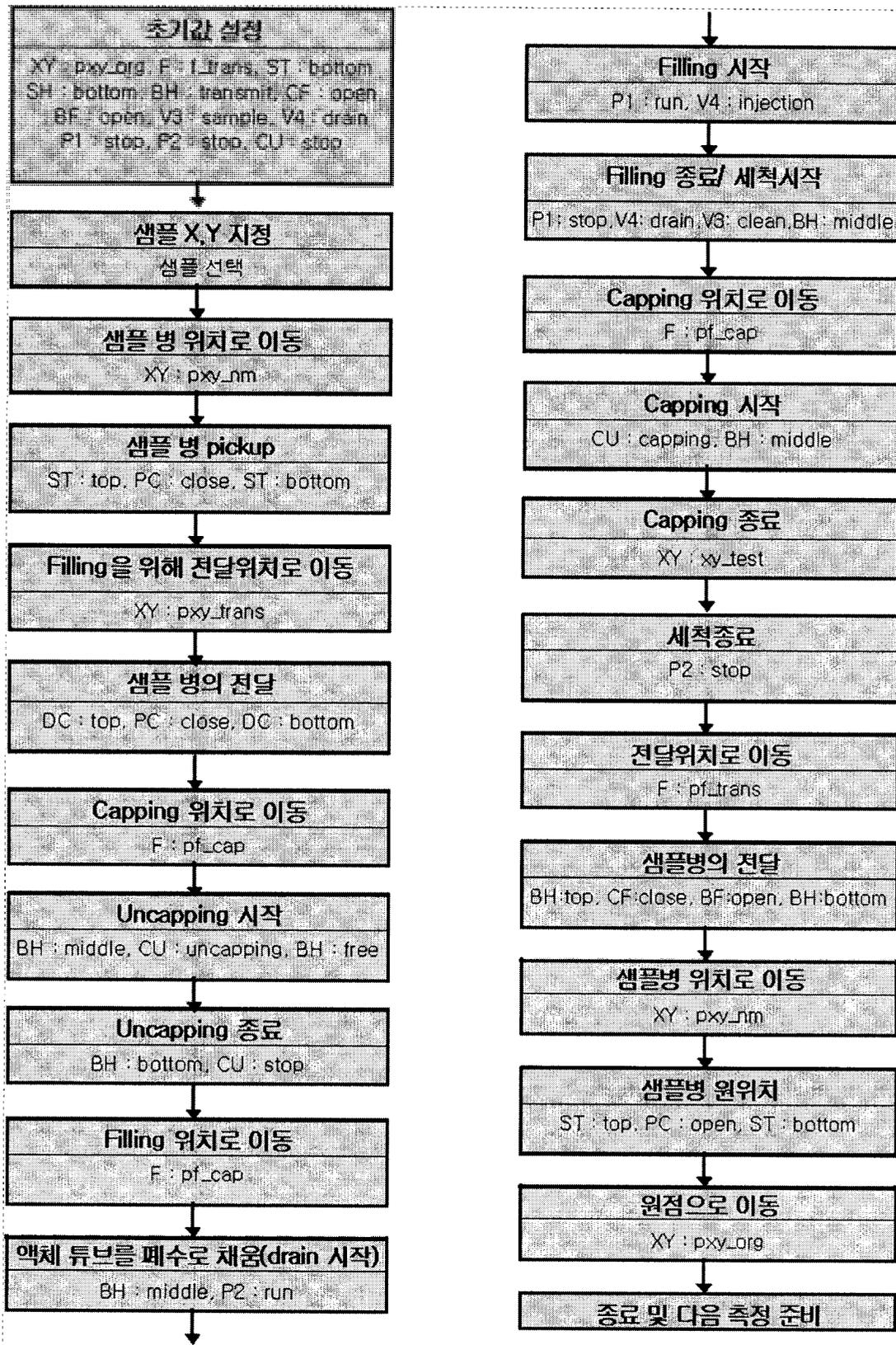


그림 3-18 샘플 자동 측정을 위한 샘플 혼합부의 제어 알고리즘.

5. 베타선 핵종 분석용 통합 프로그램

디지털 보드에 내장된 시리얼 통신인 RS-232를 통하여 PC로 측정된 데이터를 다운로드 받을 수 있다. 또한 광전자 증배관에 인가하는 고전압은 PC에서 시리얼 명령어를 조작하여 프로그램할 수 있다. 이러한 일련의 제어 동작과 데이터 획득 등을 윈도우즈 프로그램에서 총괄할 수 있도록 실험실용 소프트웨어를 개발하여 사용하였다. 그림 3-19는 사용중인 소프트웨어로서 측정해서 분석까지 자동으로 구현할 수 있는 자동 모드와 샘플 이동, 샘플 캡핑(capping)과 혼합(mixing), 고전압(High Voltage, HV) on/off, 선원 조사 등 각각의 동작으로 나누어 구현할 수 있는 수동 모드를 갖추고 있으며, 고전압 조절 기능과 측정 시간 설정 기능 그리고 PAC을 적용한 데이터 획득 기능이 가능하고, 핵종별 방사능 값 알고리즘 통합으로 인해 핵종별 소광 곡선 계산, 핵종별 방사능 값 계산, 핵종별 검출한계 계산이 가능하도록 구현되었다.

이번 연구에서는 데이터 측정부, 자동화 제어부 및 핵종별 방사능 값 계산 알고리즘이 포함된 핵종 해석부 등을 포함한 통합 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램과 통합된 연속 모니터링 시스템을 이용하여 자동 측정 시스템의 성능 평가를 수행하였다.

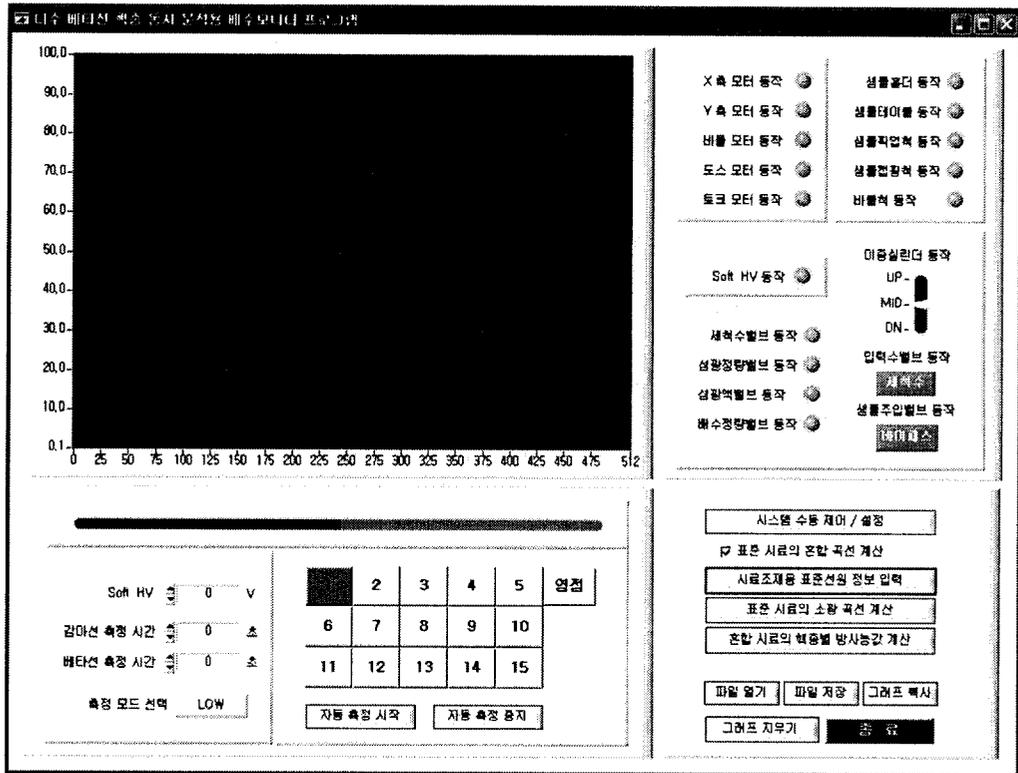


그림 3-19 핵종 분석용 측정/ 제어/ 분석 통합형 프로그램 개발.

제 4 절 표준 선원에 의한 시스템 종합 성능 평가

1. 실험 구성

가. 시료 조제

측정을 위해 준비한 시료는 두 번에 걸쳐 조제 되었으며, 실험 I, 실험 II 그리고 실험 III은 2001년 11월 26일, 실험 IV의 경우에는 2004년 1월 3일과 1월 13일에 조제된 시료를 사용하였다. 그 세부 조제 내용은 표 3-4에 요약하였다. 한편, 시료를 구성하는 핵종들의 표준 선원의 특성은 표 3-3과 같다.

외부 표준 감마선원은 ^{152}Eu 를 사용하였다.

표 3-3. 시료를 구성하는 성분의 표준 선원의 특성.

Nuclides	The date of manufacture. (YY-MM-DD)	Half Life (Year)	Activity Value
^3H (kit)	2000. 5. 1.	12.34	204,800 dpm/kit (0.0923 μ Ci, 3.41 kBq, \pm 0.47 %)
	2001. 9. 1*		202,900 dpm/kit (0.0914 μ Ci, 3.38 kBq, \pm 0.51 %)*
^{14}C (kit)	1999. 2. 1.	5730	101,700 dpm/kit (0.0458 μ Ci, 1.69 kBq, \pm 0.1 %)
^{36}Cl (sol'n)	1993. 8. 1.	3.01×10^5	106,362 dpm/g (sol'n in 0.5M NaCl) (1,772.696 Bq/g \pm 1.2 %)
^{90}Sr (sol'n)	1998. 12. 7.	28.8	105,606 dpm/g (sol'n in 0.5M HCl) (2,760.1 Bq/g)

* 실험 IV에 사용된 시료로써 2004년 1월 3일에 제조됨

나. 측정 시스템 구성

- 액체 섬광 검출기 챔버와 2개의 광전자 증배관
- 2 개의 전치 증폭기 보드 외부 장착
- 외부 표준 감마선원 조사 및 차폐 장치
 - 모터 컨트롤 보드
 - 모터로 구동

- 샘플 교환 장치
 - 모터 컨트롤 보드
 - 모터와 공압으로 구동
- Main 증폭 회로 및 동시 회로 보드 / 고전압 공급
- Sub 증폭 회로 및 동시 회로 보드 / 고전압 공급
- MCA용 DSP 보드
- DC 전원 공급 장치

다. 측정 방법

실험의 방법은 표 3-5의 조건과 순서에 따라 진행하였다. 즉 실험 I, 실험 II, 실험 III 그리고 실험 IV의 순서로 진행하였다. 각 실험에 있어서 시료의 측정 순서는 백그라운드, ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , 그리고 ^{90}Sr 순으로 진행하였다.

표 3-4. 시료 조제 (2000년 11월 26일, Background와 혼합시료 시료조제 - 2001년 12월 3일)

Nuclides	Order	kit(ea)	H ₂ O(g)	Ultimagold-LLT(ml)	Total (ml)
³ H	H-1	1	2 (10)	18 (90)	20 (100)
	H-2	1	3 (15)	17 (85)	20 (100)
	H-3	1	5 (25)	15 (75)	20 (100)
	H-4	1	8 (40)	12 (60)	20 (100)
	H-5	1	10 (50)	10 (50)	20 (100)
¹⁴ C	C-1	1	2 (10)	18 (90)	20 (100)
	C-2	1	3 (15)	17 (85)	20 (100)
	C-3	1	5 (25)	15 (75)	20 (100)
	C-4	1	8 (40)	12 (60)	20 (100)
	C-5	1	10 (50)	10 (50)	20 (100)
³⁶ Cl	Cl-1	0.9996 (1.0108)	1 (9)	18 (90)	20 (100)
	Cl-2	0.9982 (1.0102)	2 (14)	17 (85)	20 (100)
	Cl-3	1.0008 (1.0143)	4 (24)	15 (75)	20 (100)
	Cl-4	0.9987 (1.0077)	7 (39)	12 (60)	20 (100)
	Cl-5	0.9988 (1.0061)	9 (49)	10 (50)	20 (100)
⁹⁰ Sr	Sr-1	0.5002 (0.5013)	1.5 (9.5)	18 (90)	20 (100)
	Sr-2	0.5038 (0.4946)	2.5 (14.5)	17 (85)	20 (100)
	Sr-3	0.5037 (0.4936)	4.5 (24.5)	15 (75)	20 (100)
	Sr-4	0.5021 (0.4928)	7.5 (39.5)	12 (60)	20 (100)
	Sr-5	0.5018 (0.4878)	9.5 (49.5)	10 (50)	20 (100)
혼합 시료	Mix-2	³ H kit 1ea + ¹⁴ C kit 1ea + ³⁶ Cl 1.0015g (1.0125) + ⁹⁰ Sr 0.5005g(0.4890)	1.5 (13.5)	17 (85)	20 (100)
	Mix-3	³ H kit 1ea + ¹⁴ C kit 1ea + ³⁶ Cl 1.0006g(1.0121) + ⁹⁰ Sr 0.5022g(0.4856)	3.5 (23.5)	15 (75)	20 (100)
	Mix-4	³ H kit 1ea + ¹⁴ C kit 1ea + ³⁶ Cl 0.9991g(1.0043) + ⁹⁰ Sr 0.4997g(0.4853)	6.5 (38.5)	12 (60)	20 (100)
	Background	BKG-1		2 (10)	18 (90)
	BKG-2		3 (15)	17 (85)	20 (100)
	BKG-3		5 (25)	15 (75)	20 (100)
	BKG-4		8 (40)	12 (60)	20 (100)
	BKG-5		10 (50)	10 (50)	20 (100)

() 실험 IV에 사용된 시료로써 2004년 1월 3일과 13일에 제조됨.

표 3-5. 측정 방법.

Order (No)	External standard Gamma-ray	Time (Sec)	Beta-ray	Time (Sec)	Volt
1	Bkg-1 ext.	30 (300*)	Bkg-1	300	1200V
2	Bkg-2 ext.		Bkg-2		
3	Bkg-3 ext.		Bkg-3		
4	Bkg-4 ext.		Bkg-4		
5	Bkg-5 ext.		Bkg-5		
6	H-1 ext.		H-1		
7	H-2 ext.		H-2		
8	H-3 ext.		H-3		
9	H-4 ext.		H-4		
10	H-5 ext.		H-5		
11	C-1 ext.		C-1		
12	C-2 ext.		C-2		
13	C-3 ext.		C-3		
14	C-4 ext.		C-4		
15	C-5 ext.		C-5		
16	Cl-1 ext.		Cl-1		
17	Cl-2 ext.		Cl-2		
18	Cl-3 ext.		Cl-3		
19	Cl-4 ext.		Cl-4		
20	Cl-5 ext.		Cl-5		
21	Sr-1 ext.		Sr-1		
22	Sr-2 ext.		Sr-2		
23	Sr-3 ext.		Sr-3		
24	Sr-4 ext.		Sr-4		
25	Sr-5 ext.		Sr-5		
26	Mix-2 ext.		Mix-2		
27	Mix-3 ext.		Mix-3		
28	Mix-4 ext.		Mix-4		
29	Bkg-1 ext.		Bkg-1		
30	Bkg-2 ext.		Bkg-2		
31	Bkg-3 ext.		Bkg-3		
32	Bkg-4 ext.		Bkg-4		
33	Bkg-5 ext.		Bkg-5		

* 실험 III과 IV경우의 외부 표준 감마 선원 조사 시간을 말한다.

라. 측정 자료

측정 자료는 위에 언급했듯이 2001년 11월 26일에 만들어진 시료를 가지고 2003년 10월 13일, 10월 17일, 10월 30일 3일 간 액체 섬광 검출기 시스템의 구성으로 측정한 것과 2004년 1월 3일과 13일에 새로 제조된 시료를 가지고 측정하여 얻은 자료를 사용하였다. 측정된 자료들은 소프트웨어적으로 로그 스케일로 변환한 후 저장한다.

(1) 기본 데이터 형식

기본 데이터는 ASCII 형식으로 저장되며, 저장 형식은 표 3-6과 같고, 파일의 이름은 다음과 같다.

표 3-6. 측정 샘플의 데이터 양식.

	Item	Value
1	Scale 유닛	log or linear
2	Nuclides measuring device	LSD(Liquid Scintillation Detector)
3	Nuclides	pure nuclides : ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{90}Sr Background : BKG Mixture: MIX
4	Samples order	a positive number
5	PAC(Pulse Amplitude Comparison)*	pac
6	External source or internal source	ext : Gamma-ray
7	Volts	1200V
8	The number of times	a positive number

* PAC의 스펙트럼을 구하는 식은 각각의 광전자 증배관에서 나오는 신호가 정형화되고 증폭되어 $X_{channel}$ 과 $Y_{channel}$ 로 그 크기를 나타낼 때 PAC값 $P_{channel}$ 은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$X_{channel} < Y_{channel} \text{인 경우 : } P_{channel} = \frac{X_{channel}}{Y_{channel}} \times 4096$$

$$X_{channel} > Y_{channel} \text{인 경우 : } P_{channel} = \frac{Y_{channel}}{X_{channel}} \times 4096$$

(2) 기초 utility

- 측정된 스펙트럼을 로그 스케일(log scale)로 디스플레이(display)한다.
- 측정된 표준 시료의 제조 연월일로부터 측정 시각의 방사능 값 계산하고 디스플레이 한다.
- 측정된 시료의 총 계수율(total count rate; counts/min)을 디스플레이 한다.

(3) 소광 보정 곡선 작성

소광 효과를 보정하기 위한 기본 개념은 소광 정도가 다른 여러 가지 표준시료를 준비하여 소광과 계측 효율간의 상관관계를 구하는 것이다. 본 연구에서는 외부 소광 보정(External Quenching Correction) 방법과 소광 보정 곡선법을 함께 사용하였다. 소광 보정 곡선 작성 알고리즘은 그림 3-20과 같다. 그 내용을 다시 쓰면 다음과 같다.

- 핵종별, 소광별 방사능 값이 알려진 표준 시료와 백그라운드 측정 시료를 준비한다.
- 각각의 표준 시료에 대한 베타선 스펙트럼을 측정 한다.
- 각각의 표준 시료에 표준 감마 선원을 조사하여, 이때 발생하는 섬광 스펙트럼을 측정한다.
- 백그라운드 스펙트럼을 이용하여 표준시료의 베타선 및 섬광 스펙트럼에서 백그라운드를 제거.
- 모든 표준시료에 대하여 섬광 스펙트럼의 끝에서 1%인 지점의 채널 번호를 계산하고, 계산된 값이 각각의 표준시료에 대한 소광 값이 된다.
- 모든 표준시료에 대하여 각 채널별로 계수 효율(count efficiency)을 계산한다.
- 소광 값에 대한 각 채널별 계수 효율 대응 관계를 핵종별로 분류하여 메모리 또는 미리 지정된 파일로 저장한다.

(4) 핵종별 방사능 값 계산

핵종별 방사능 값은 다음과 같이 결정된다.

- 핵종별 방사능 값을 측정하기 위한 혼합 시료를 준비한다.
- 혼합 시료의 베타선 스펙트럼 및 감마선에 의한 섬광 스펙트럼을

측정한다.

- 섬광 스펙트럼의 끝에서 1 %인 지점(SQP(E))을 혼합 시료의 소광값으로 결정한다.
- 각 핵종별, 채널별로 계수 효율을 소광 값의 함수로 보고 혼합 시료의 소광 값에 대응하는 지점에서의 계수 효율을 내삽법(interpolation method)을 통하여 각 핵종별로 채널별로 계산한다.
- 혼합 시료의 소광 값에 대응하는 각 핵종별, 채널별 계수 효율을 이용하여 각 핵종에 대한 방사능 값이 된다.

액체 섬광 검출기의 핵종별 방사능 값의 계산 알고리즘은 그림 3-20과 그림 3-21의 알고리즘에 따른다.

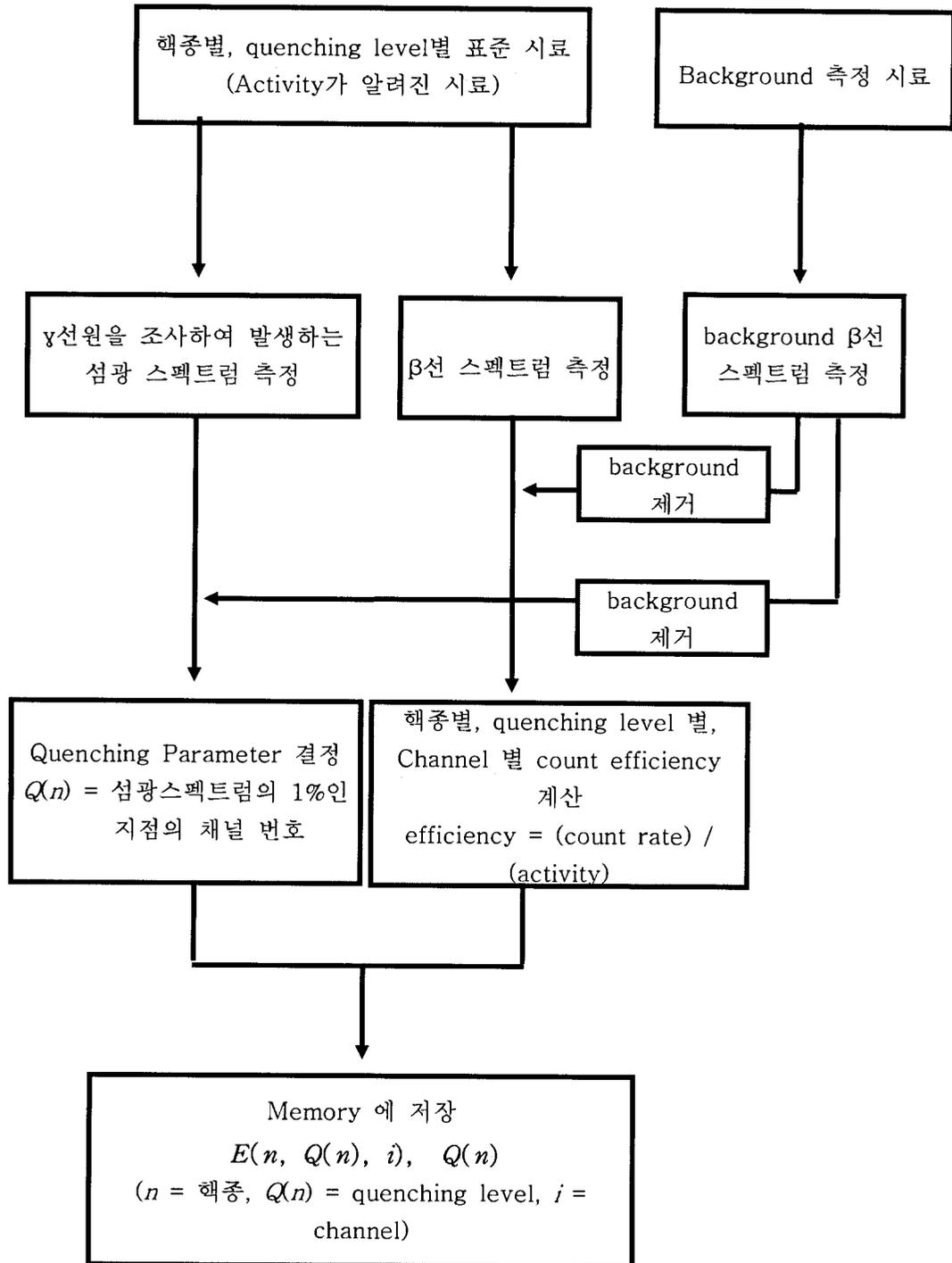


그림 3-20. 소광 보정 곡선 작성 알고리즘.

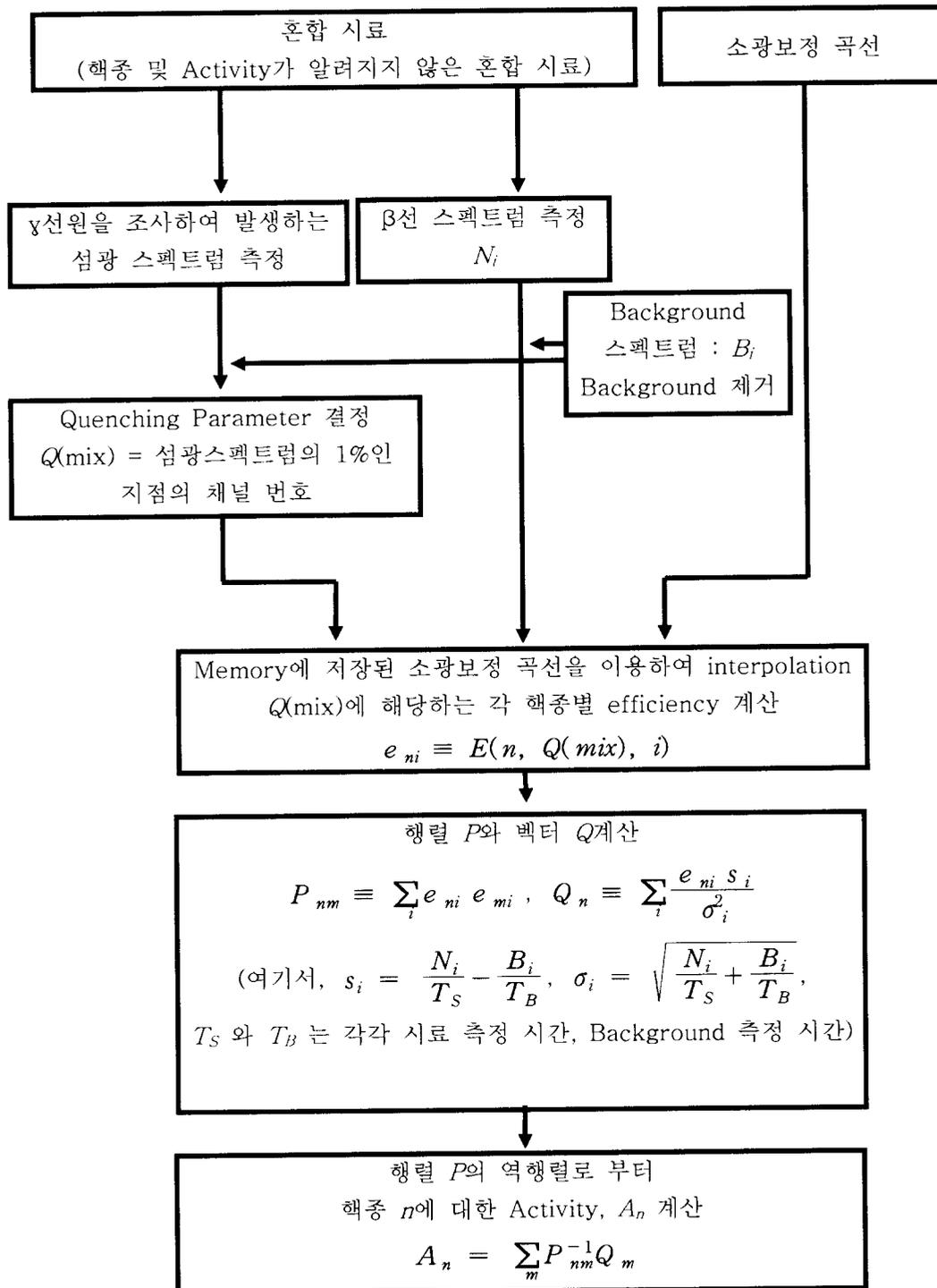


그림 3-21. 핵종별 방사능 값 계산 알고리즘.

2. 실험 I

액체 섬광 검출기의 성능 평가를 위한 첫 번째 실험으로 행해졌다. 검출기의 인가 고전압은 1200V이고, 표준 시료에 외부 표준 감마 선원(^{152}Eu)을 조사하였으며 스펙트럼 측정 시간은 30초로 설정하였다. 한편, 베타선은 300초간 측정하였다.

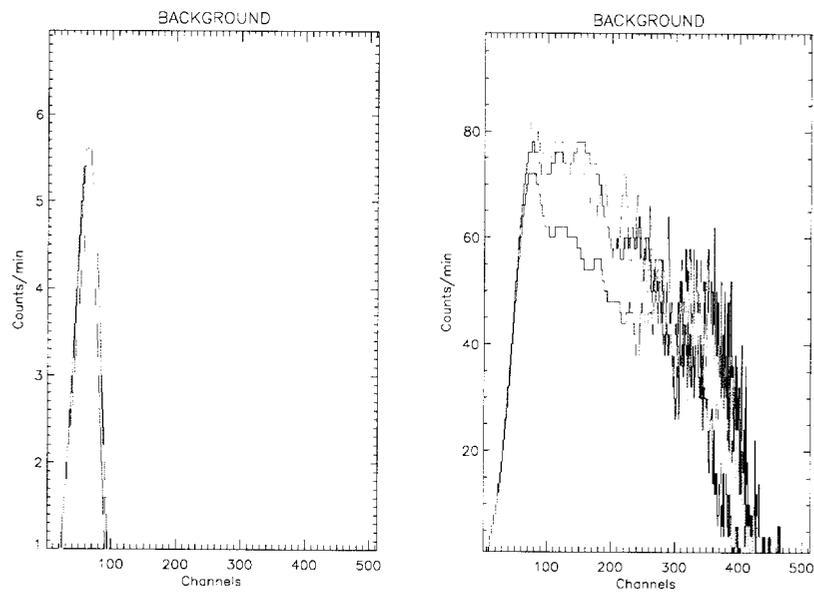


그림 3-22. 실험 I - Background의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (Background-1), 빨간색 (Background-2), 오렌지색 (Background-3), 노란색 (Background-4), 파란색 (Background-5).

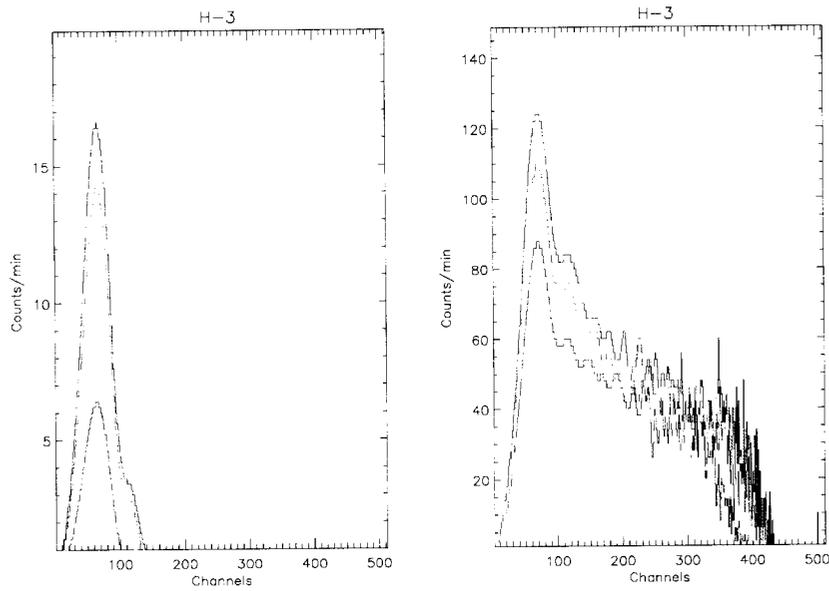


그림 3-23. 실험 I - ^3H 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 ($^3\text{H-1}$), 빨간색 ($^3\text{H-2}$), 오렌지색 ($^3\text{H-3}$), 노란색 ($^3\text{H-4}$), 파란색 ($^3\text{H-5}$).

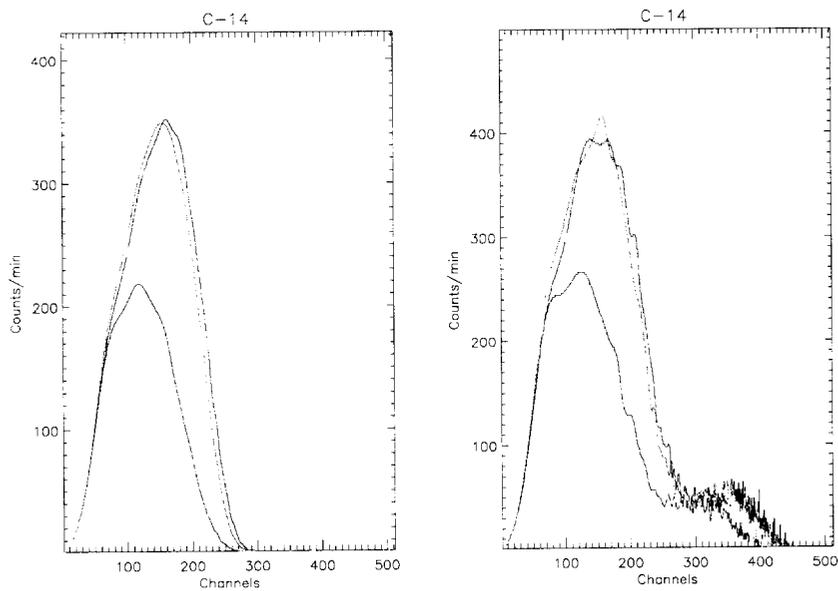


그림 3-24. 실험 I - ^{14}C 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 ($^{14}\text{C-1}$), 빨간색 ($^{14}\text{C-2}$), 오렌지색 ($^{14}\text{C-3}$), 노란색 ($^{14}\text{C-4}$), 파란색 ($^{14}\text{C-5}$).

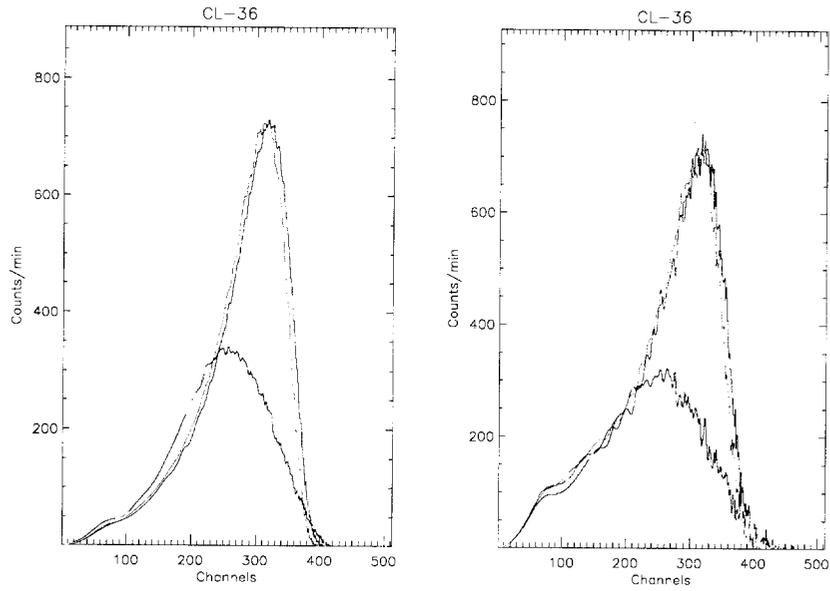


그림 3-25. 실험 I - ^{36}Cl 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (^{36}Cl -1), 빨간색 (^{36}Cl -2), 오렌지색 (^{36}Cl -3), 노란색 (^{36}Cl -4), 파란색 (^{36}Cl -5).

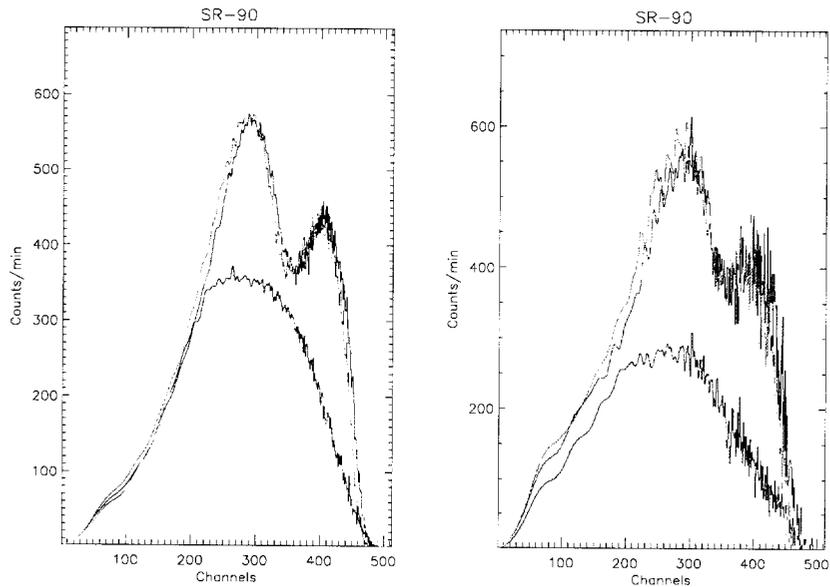


그림 3-26. 실험 I - ^{90}Sr 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (^{90}Sr -1), 빨간색 (^{90}Sr -2), 오렌지색 (^{90}Sr -3), 노란색 (^{90}Sr -4), 파란색 (^{90}Sr -5).

3. 실험 II

액체 섬광검출기의 성능 평가를 위한 두 번째 실험으로서 첫 번째 실험과 동일한 조건으로 행해졌다. 즉, 검출기의 인가 고전압은 1200V이고, 표준 시료에 외부 표준 감마 선원(^{152}Eu)을 조사하였으며 스펙트럼 측정시간은 30초로 설정하였다. 한편, 베타선은 300초간 측정하였다.

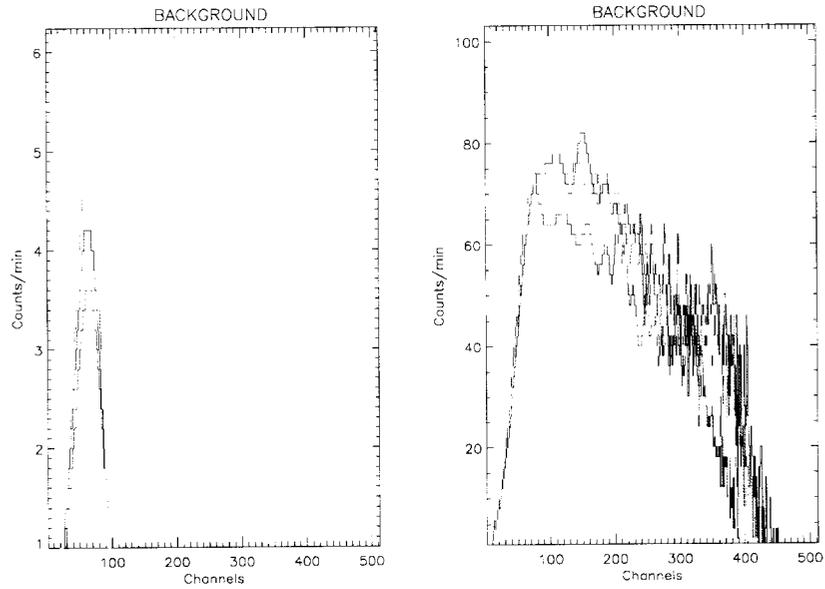


그림 3-27. 실험 II - Background의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (Background-1), 빨간색 (Background-2), 오렌지색 (Background-3), 노란색 (Background-4), 파란색 (Background-5).

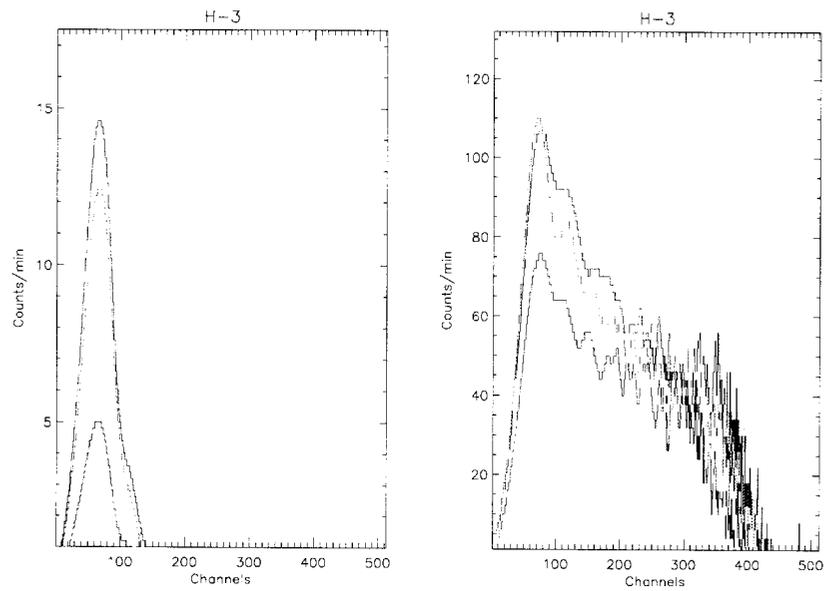


그림 3-28. 실험 II - ^3H 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 ($^3\text{H-1}$), 빨간색 ($^3\text{H-2}$), 오렌지색 ($^3\text{H-3}$), 노란색 ($^3\text{H-4}$), 파란색 ($^3\text{H-5}$).

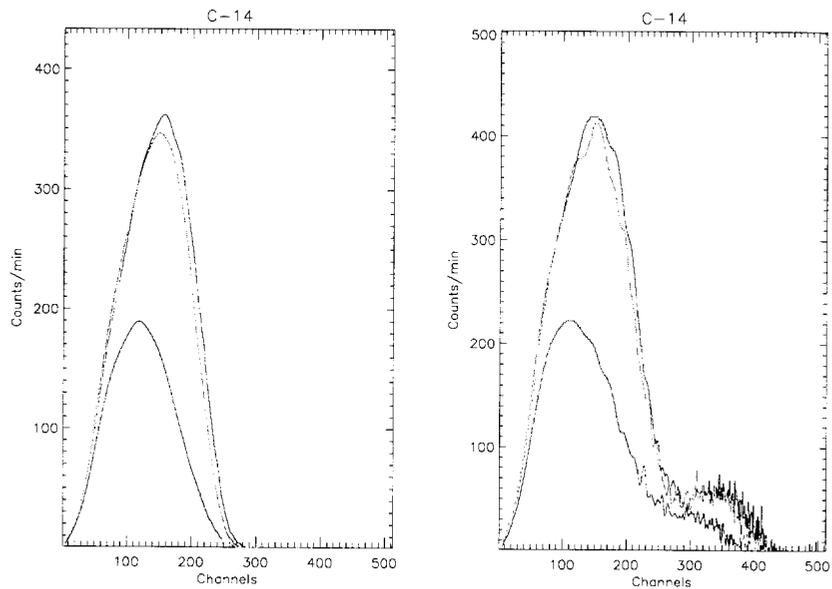


그림 3-29. 실험 II - ^{14}C 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 ($^{14}\text{C-1}$), 빨간색 ($^{14}\text{C-2}$), 오렌지색 ($^{14}\text{C-3}$), 노란색 ($^{14}\text{C-4}$), 파란색 ($^{14}\text{C-5}$).

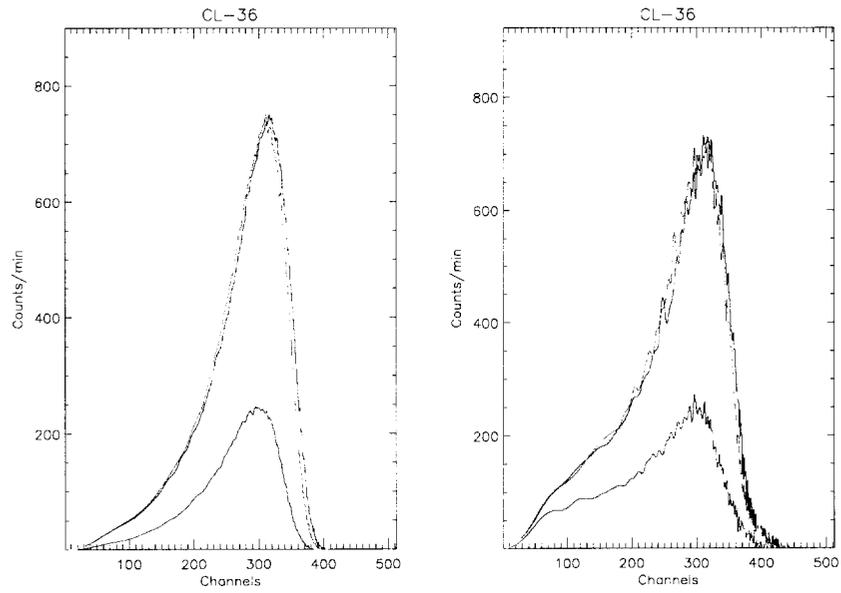


그림 3-30. 실험 II - ^{36}Cl 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (^{36}Cl -1), 빨간색 (^{36}Cl -2), 오렌지색 (^{36}Cl -3), 노란색 (^{36}Cl -4), 파란색 (^{36}Cl -5).

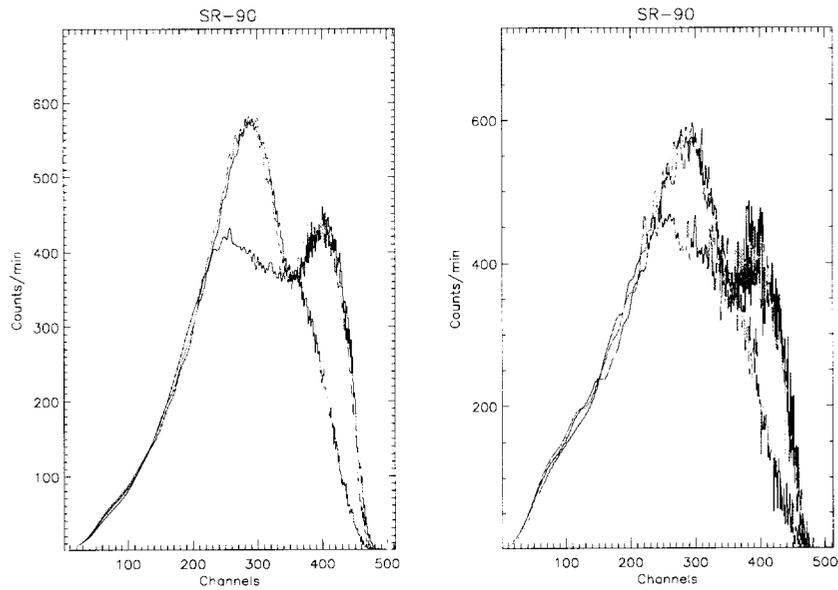


그림 3-31. 실험 II - ^{90}Sr 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (^{90}Sr -1), 빨간색 (^{90}Sr -2), 오렌지색 (^{90}Sr -3), 노란색 (^{90}Sr -4), 파란색 (^{90}Sr -5).

4. 실험 III

액체 섬광검출기의 성능 평가를 위한 세 번째 실험으로 행해졌다. 검출기의 인가 고전압은 1200V이고, 표준 시료에 외부 표준 감마 선원(^{152}Eu)을 조사하고 스펙트럼 측정시간은 300초로 설정하였다. 또한, 베타선도 300초 측정하였다. 이것은 측정 시간을 달리한 실험 I과 실험 II의 결과를 분석하는데 있어서 측정 시간을 같은 조건으로 비교하는 불필요한 오차를 내포한 과정을 거쳐야 하는 단점이 있기 때문이었다.

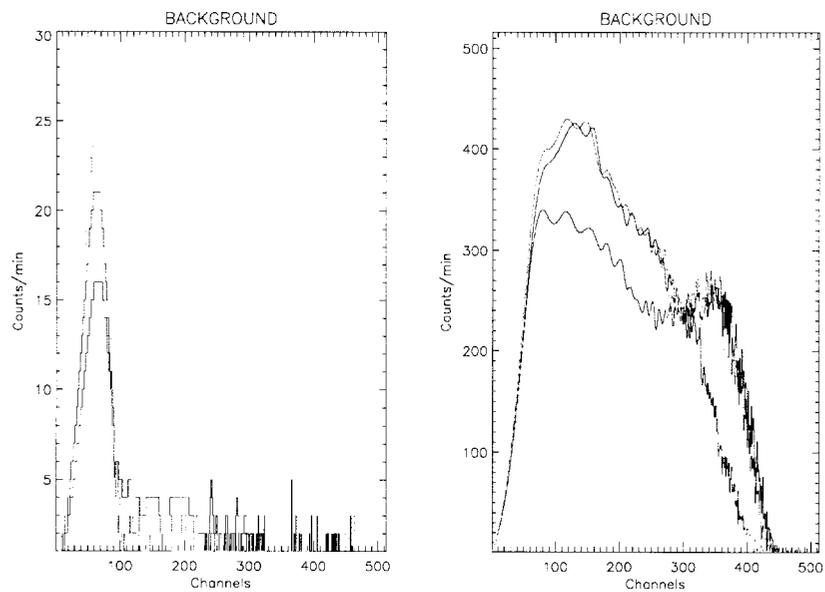


그림 3-32. 실험 III - Background의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (Background-1), 빨간색 (Background-2), 오렌지색 (Background-3), 노란색 (Background-4), 파란색 (Background-5).

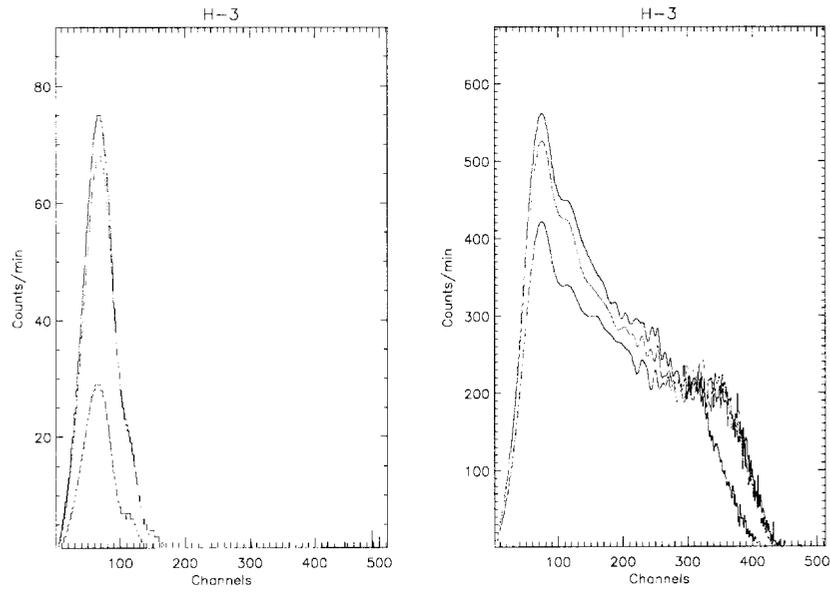


그림 3-33. 실험 III - ^3H 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 ($^3\text{H-1}$), 빨간색 ($^3\text{H-2}$), 오렌지색 ($^3\text{H-3}$), 노란색 ($^3\text{H-4}$), 파란색 ($^3\text{H-5}$).

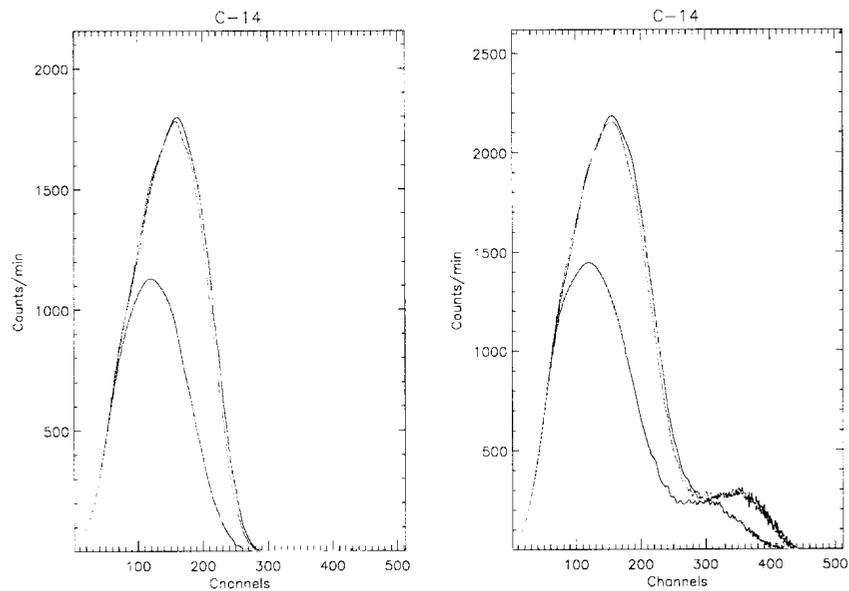


그림 3-34. 실험 III - ^{14}C 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 ($^{14}\text{C-1}$), 빨간색 ($^{14}\text{C-2}$), 오렌지색 ($^{14}\text{C-3}$), 노란색 ($^{14}\text{C-4}$), 파란색 ($^{14}\text{C-5}$).

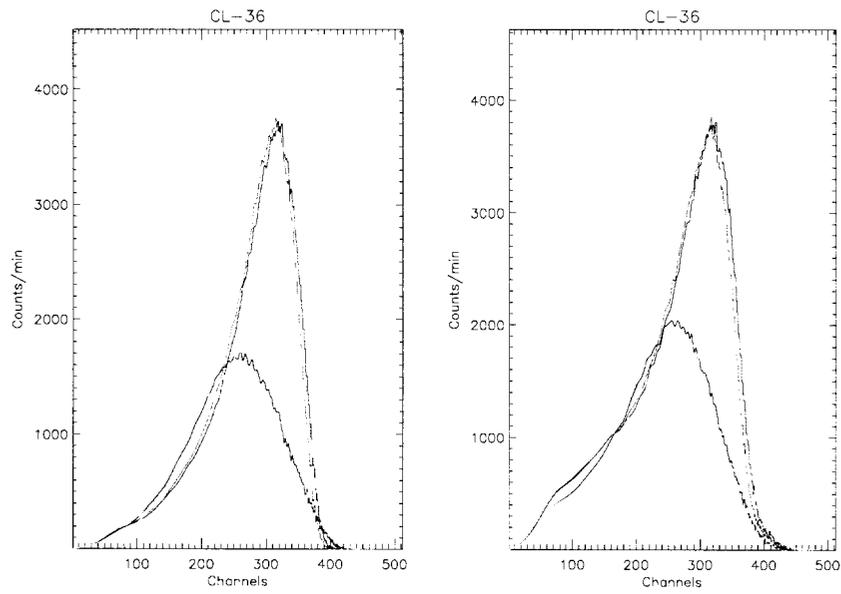


그림 3-35. 실험 III - ^{36}Cl 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (^{36}Cl -1), 빨간색 (^{36}Cl -2), 오렌지색 (^{36}Cl -3), 노란색 (^{36}Cl -4), 파란색 (^{36}Cl -5).

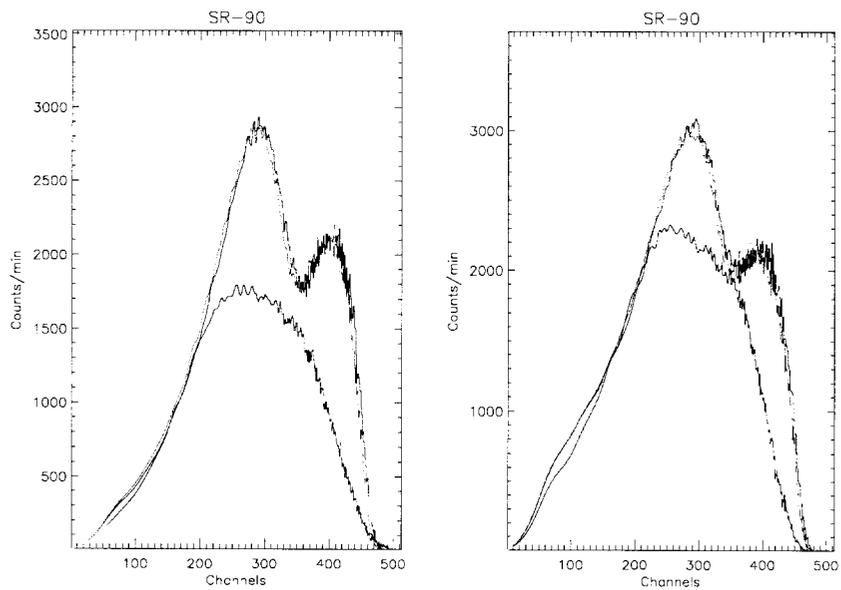


그림 3-36. 실험 III - ^{90}Sr 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (^{90}Sr -1), 빨간색 (^{90}Sr -2), 오렌지색 (^{90}Sr -3), 노란색 (^{90}Sr -4), 파란색 (^{90}Sr -5).

5. 실험 IV

액체 섬광검출기의 성능 평가를 위한 네 번째 실험으로 행해졌다. 검출기의 인가 고전압은 1200V이고, 표준 시료에 외부 표준 감마 선원(^{152}Eu)을 조사하고 스펙트럼을 측정하는 시간은 300초로 설정하였다. 또한 베타선 측정을 위한 측정 시간 역시 300초로 두었다.

실험 I, 실험 II, 실험 III에서는 모두 20ml 시료에 대하여 측정이 이루어졌으나, 실험 IV에서는 시료 용량이 100ml로 5배 증가한 상태에서 측정이 이루어졌다. 이 시료의 용량은 개발한 연속 모니터링 시스템에서 자동으로 주입 및 혼합하여 사용할 샘플 용량과 같다.

이 실험은 시료의 조제 여건 상 두 부분으로 이루어졌다. 즉, ^3H , ^{14}C 에 대한 조제를 하여 측정이 먼저 이루어지고, 이어서 ^{36}Cl , ^{90}Sr 에 대한 시료 조제와 측정을 하였다.

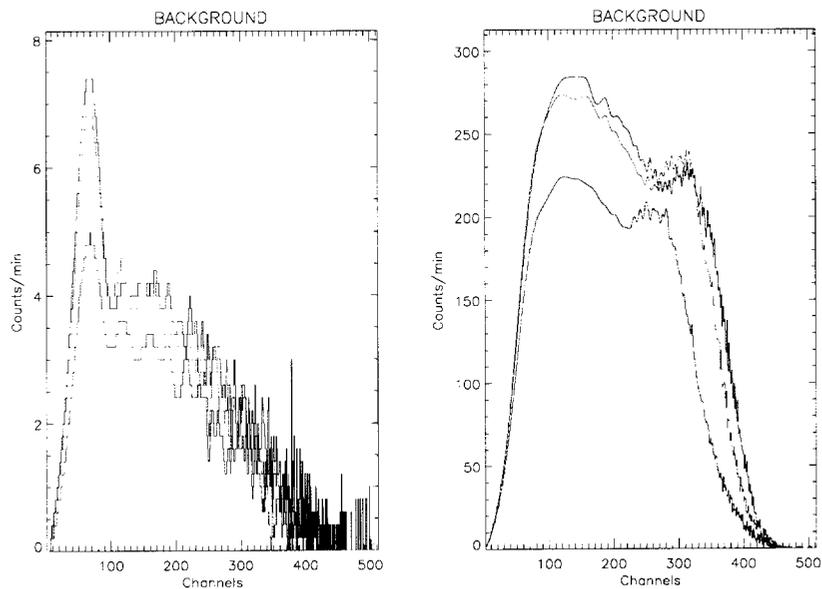


그림 3-37. 실험 IV - Background의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (Background-1), 빨간색 (Background-3), 파란색 (Background-5).

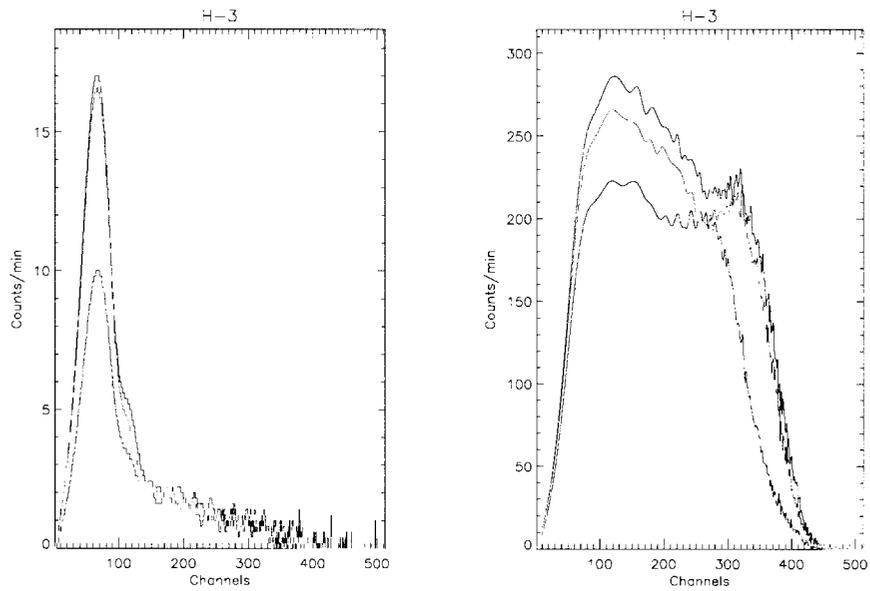


그림 3-38. 실험 IV - ^3H 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (^3H -1), 빨간색 (^3H -2), 오렌지색 (^3H -3), 노란색 (^3H -4), 파란색 (^3H -5).

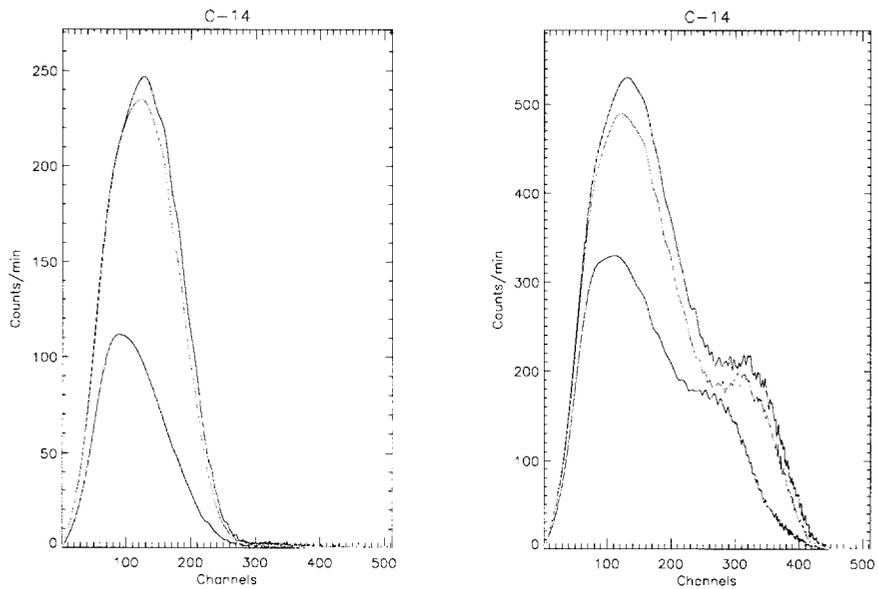


그림 3-39. 실험 IV - ^{14}C 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (^{14}C -1), 빨간색 (^{14}C -2), 오렌지색 (^{14}C -3), 노란색 (^{14}C -4), 파란색 (^{14}C -5).

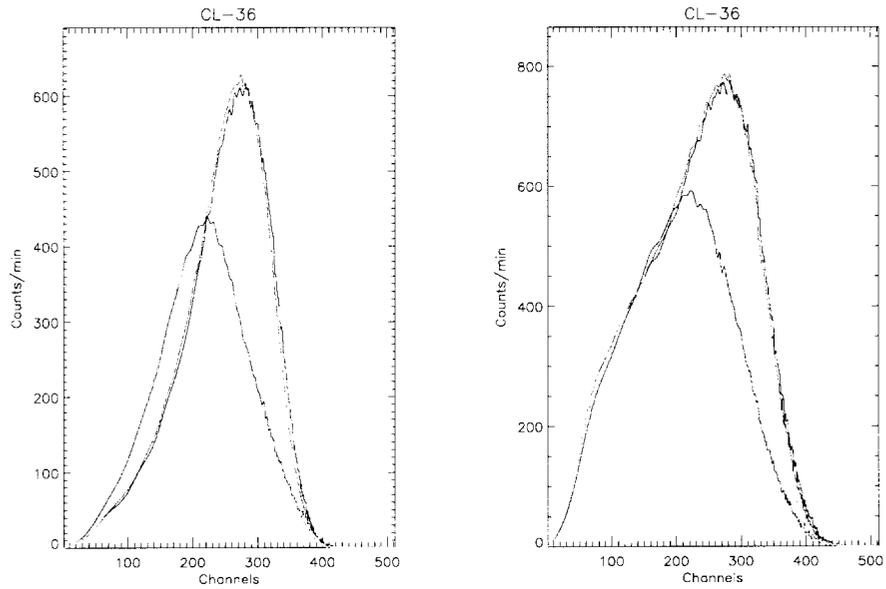


그림 3-40. 실험 IV - ^{36}Cl 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (^{36}Cl -1), 빨간색 (^{36}Cl -2), 오렌지색 (^{36}Cl -3), 노란색 (^{36}Cl -4), 파란색 (^{36}Cl -5).

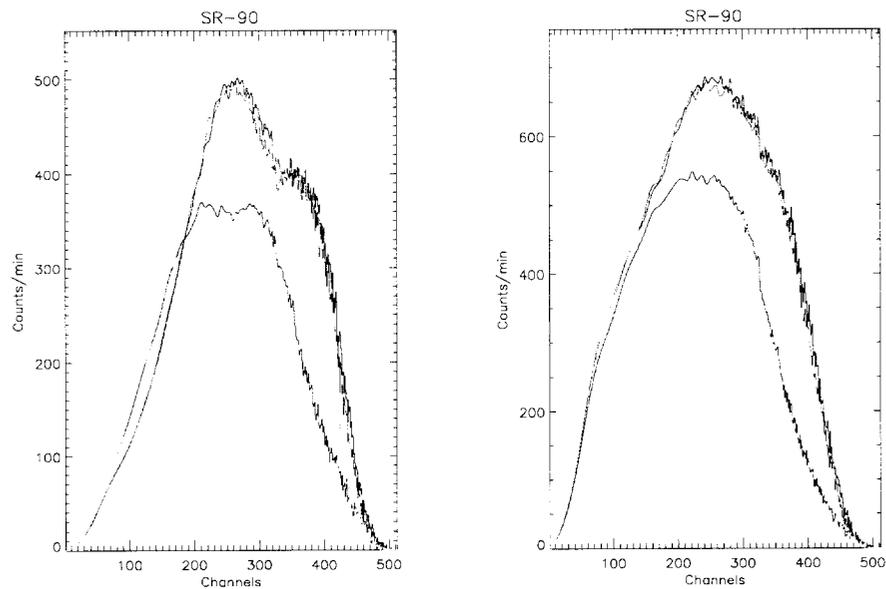


그림 3-41. 실험 IV - ^{90}Sr 의 베타 스펙트럼 (왼쪽)과 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼 (오른쪽); 보라색 (^{90}Sr -1), 빨간색 (^{90}Sr -2), 오렌지색 (^{90}Sr -3), 노란색 (^{90}Sr -4), 파란색 (^{90}Sr -5).

6. 실험 결과 및 분석

실험에서 각 시료에 대한 SQP(E) 값이 소광 보정 곡선 계산 알고리즘에 의해서 결정되었다. 소광 보정 곡선에서 소광 Parameter는 감마선 섬광스펙트럼의 총 세기의 1%인 지점의 채널 번호를 스펙트럼의 끝점(endpoint)으로 삼았다. 그런데 실험 I에서는, 측정 데이터를 분석하는 과정에서 섬광스펙트럼의 총세기 1%지점에서 채널 번호가 크게 변동하므로, 끝점 결정 지점을 6%까지 내려서 SQP(E)값을 결정하였다.

실험 I과 II의 경우 핵종 분석을 위해서는 혼합 시료의 SQP(E)값을 포함하는 각 시료의 SQP(E)값이 결정되어야 하는데 혼합 시료 (Mix 2, Mix 3, Mix 4)의 SQP(E)값이 각 시료의 SQP(E)값 범위에 포함되지 않고 표 3-7에서 볼 수 있듯이 Mix 2와 Mix 3은 작고 Mix 4는 대단히 크다. ^{90}Sr 은 다른 시료의 SQP(E)값처럼 약 370근처에서 그 값이 결정되어야 하는데 SQP(E)값이 175에서 418까지 넓게 분포하는 점도 분석이 잘 이루어지지 않았다.

실험 III는 실험 I, II과는 달리 감마선원과 베타선원 모두에 대해서 300초 동안 외부 표준 선원과 베타 선원을 조사하여서 측정하였다. 그 결과 표 3-7에서 볼 수 있듯이 혼합 시료 SQP(E)값은 각 시료의 SQP(E)값 범위에 포함됨을 알 수 있었다.

그림 3-42, 그림 3-43은 60개의 채널을 사용한 실험 I의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선이며, 그림 3-47, 그림 3-48은 실험 II의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선이고, 그림 3-52, 그림 53은 실험 III의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선, 그림 3-73, 그림 74은 실험 IV의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광 보정 곡선이다.

소광 보정 곡선 계산 알고리즘으로 계산된 각 핵종별 방사능 값은 표 3-9에 나타나 있다. 표 3-9의 실험 I, II, III, IV은 각 혼합 시료(Mix 2, Mix 3, Mix 4)에 대한 스펙트럼 분석 결과를 보여주고 있다. 표에 나타난 오차는 최소자승법 알고리즘에 의해 계산된 값과 이미 알려진 기준값과의 차이를 기준값에 대한 %오차를 나타낸다.

그림 3-44, 그림 3-45, 그림 3-46는 실험 I에 대해, 그림 3-49, 그림 3-50, 그림 3-51는 실험 II에 대해, 그림 3-54, 그림 3-55, 그림 3-56는 실험 III에 대해, 그림 3-95, 그림 3-96, 그림 3-97는 실험 IV에 대해 혼합 시료의 측정 스펙트럼과 최소자승법으로 계산된 스펙트럼을 보여준다.

혼합 시료의 SQP(E)값이 각 시료의 SQP(E)값을 포함한 값을 찾았지만 소광 정도가 심하지 않은 Mix 2의 ^3H 경우 분석 오차의 범위가 300 %가 넘어가고 ^{14}C 는 5 %이하로 고르게 분포하지 않았고, 측정된 각 표준 시료 및 혼합 시료의 스펙트럼이 어떤 이유로 예상치 못한 소광 기여분이 작용한 것으로 보인다. 먼저 소광이 일어나지 않는 섬광체 용액만을 측정하여 표준 감마선을 조사하여 섬광 스펙트럼을 측정하였다. 측정된 섬광 스펙트럼과 각 시료의 섬광 스펙트럼을 비교해 본 결과 ^3H , ^{14}C 는 거의 차이가 없었고, ^{36}Cl 과 ^{90}Sr 은 채널 300과 420지점에서 움푹 패인 스펙트럼으로 나타났다.

그림 3-57에서 그림 3-62를 보면 ^3H 와 ^{14}C 는 일정한 패턴을 가지고 그림이 변화하고 있고, 감마선원과 베타선원에 의한 채널별 카운트의 피크를 기준으로 해서 시료의 소광 정도에 따라 감마, 베타선의 카운트 수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 광전효과와 콤프턴 산란 보다는 소광 정도에 의한, 즉 화학 소광과 색소광으로 인한 광자의 흡수로 카운트 수가 감소함을 알 수 있었다. 또 콤프턴 전자에 의해 생성된 섬광 스펙트럼의 총세기의 1 %지점의 채널 번호인 SQP(E)값이 채널 420 근처에 있는 것을 확인할 수 있었다.

그림 3-63에서 그림 3-68을 보면 ^{36}Cl 과 ^{90}Sr 은 앞의 그림과 달리 채널 300과 420지점에서 순수 감마선원에 대한 채널별 카운트 수가 감소하는 부분을 볼 수 있었고, 이것은 시료의 소광 정도에 따른 효과보다는 광전효과와 콤프턴 산란에 의해서 카운트 수가 감소한다. 그것은 채널 300과 420근처가 외부 표준 감마선원인 ^{152}Eu 의 121.8 keV과 244.7 keV의 붕괴에너지에 해당하기 때문이다. 즉, ^{152}Eu 의 붕괴에너지에 해당되는 부분에서 더욱 많은 에너지를 방출하고, 감마선원에 대한 광전효과와 콤프턴 산란을 증가 시켜서 상대적으로 채널별 카운트 수를 감소 시켰다. 또한, 각 시료의 4번째와 5번째는 상대적으로 이러한 효과보다는 화학 소광과 색소광으로 인한 광자의 흡수로 본래의 스펙트럼이 나타나지 않고 상대적으로 낮은 에너지 채널

쪽으로 피크가 이동하고 있다.

이러한 결과들은 그림 3-72와 표 3-8으로 부터 알 수 있다. 또 그림 3-69에서 그림 3-71까지를 보면 두 번째 혼합 시료는 화학 소광과 색소광보다는 광전효과와 콤프턴 산란의 효과가 더 크며, 네 번째와 다섯 번째 시료는 위와 반대로 화학 소광과 색소광이 더 크다.

^3H 와 ^{14}C 같은 경우는 광전효과는 거의 무시되며 약간의 콤프턴 산란만이 작용하였고, ^{36}Cl 과 ^{90}Sr 은 광전효과와 콤프턴 산란이 많이 작용하여 SQP(E)값을 결정하는 데에도 영향을 주었다.

이처럼 광전효과와 콤프턴 산란이 SQP(E)값을 결정하는데 영향을 주는 것을 알았다. 그래서 이 효과를 보정하기 위해 소광이 없는 섬광 스펙트럼에 비슷한 기울기를 가지도록 근사적으로 값을 보정하여 분석을 하였고, 그 결과를 기존의 표3-7, 3-9에 함께 기술하였다. 결과 값을 가지고 핵종 분석한 결과를 그림 3-73에서 그림 3-77까지 나타내었다.

결국 광전효과를 고려하지 않고 계산한 결과보다 더욱 잘 분석이 이루어졌고, SQP(E)의 섬광스펙트럼의 끝점이 6%이었던 것을 처음 끝점 설정치인 1%로 낮추었으며, 분석 오차 또한 Mix 2에 대해서는 15%, Mix 3은 35% 이내로 줄었다. 그에 반해 Mix 4는 위에 언급한 광전효과와 콤프턴 산란 효과 보다는 우리가 잘 알지 못하는 또 다른 효과들에 대한 보정을 못한 결과 핵종 분석이 잘 이루어지지 않았다.

실험 IV의 경우는 시료 조제에 있어서 예전 실험(실험 I - 실험 III)에 20ml의 샘플 병에 Ultimagold, 증류수(H_2O), 각 핵종의 Kit를 넣어서 Ultimagold와 증류수(H_2O)의 양을 조절하여 측정 분석하였다. 그에 반해, 실험 IV의 경우는 총 100ml의 병에 예전 실험과 동일한 Kit를 사용했으며 이 Kit에 대한 Ultimagold와 증류수(H_2O)의 양을 조절하여 측정 분석하였다

그림 3-37에서부터 그림 3-41까지 보면 예전 실험보다 분당 카운트수가 약간 감소한 것을 알 수 있다. 또 피크의 모양도 예전의 피크와 비슷함을 알 수 있었고, 전체적으로 실험하여 분석한 결과 예전과 ^3H 와 ^{14}C 의 채널 300에서 400사이의 피크가 두드러졌다는 점을 빼고는 특별히 다른 점을 발견할 수 없었다.

^3H 의 경우 스펙트럼의 낮은 채널에 위치하며, 이 위치에서는 시스템 노이즈에 혼재하여 나타나므로 ^3H 기여분을 증가시키려면 하드웨어적인 시스템 튜닝으로 노이즈와 시그널을 적절하게 분리하는 과정이 필요하다. Mix 4는 여기서 보정한 광전효과와 콤프턴 산란 효과 보다는 화학 소광과 색소광 등의 영향이 커서 제대로 분석이 이루어지지 않았다는 것이다. 그것을 제외하고는 Mix 2는 ^3H 를 제외하고 15 % 이내로 분석이 잘 이루어졌고 Mix 3 역시 ^3H 를 제외하면 30 % 이내로 분석이 이루어지고 고르게 분포하는 것을 보았다.

그림 3-78에서 그림 3-97까지는 실험 IV에 대한 결과를 나타낸 것이다.

앞으로 좀 더 개선된 종합적인 성능 실험을 위해서는 몇 가지 내용에 대한 준비가 필요 할 것이다. 첫째, ^3H 핵종의 중요도가 대단히 크므로, 이 핵종의 기여분을 현재보다 증가시키려면 하드웨어적인 시스템 튜닝으로 노이즈와 시그널을 적절하게 분리하는 과정이 필요하다. 이를 위해 개선된 DSP 보드를 활용하고, 개선된 ADC 신호 처리 회로 보드를 적용하여 시스템 노이즈를 최소한으로 줄이는 시도를 할 예정이다. 둘째, 시료 조제 후 일정 기간이 지나면 시료의 성분비에 따라 시료 자체의 특성이 달라질 수 있다는 점을 유의하여, 가능한 한 시료 조제 후 1주일 이전에 표준 시료 측정을 수행하도록 한다. 셋째, 원자 번호가 큰 핵종이 포함된 시료를 측정할 경우에는 소광 효과와 함께 광전 효과가 중요해져서 콤프턴 산란으로 생기는 광자의 일부를 핵종이 흡수함으로써 특정한 위치에서 소광 정도가 더 심해진다. 이에 대한 보정 관계를 분명히 해 두어야 한다. 이와 같은 내용들은 5차년도에서 체계적으로 수행될 예정이다.

표 3-7. 소광 효과 보정을 위해 사용된 표준 시료와 표준 시료의 소광 정도값(SQP(E)).

Nuclides	Samples	SQP(E) of Experiment I	SQP(E) of Experiment II	SQP(E) of Experiment III	Corrected SQP(E) of Experiment III	SQP(E) of Experiment IV
³ H	H-1	365.548	361.627	363.973	405.649	400.974
	H-2	359.601	355.178	362.135	402.362	396.870
	H-3	356.845	352.678	358.522	397.926	392.585
	H-4	340.513	337.893	344.069	381.848	387.955
	H-5	327.728	330.474	332.499	375.147	383.177
¹⁴ C	C-1	381.306	377.113	377.503	412.712	401.469
	C-2	377.953	369.450	373.021	407.942	394.727
	C-3	366.905	365.095	366.097	400.140	388.678
	C-4	351.727	351.912	351.609	387.945	387.850
	C-5	345.476	342.326	341.006	382.324	379.385
³⁶ Cl	Cl-1	390.010	221.685	385.080	414.805	402.819
	Cl-2	382.670	383.670	382.386	411.151	398.641
	Cl-3	377.173	378.740	374.648	402.477	394.137
	Cl-4	309.203	369.630	364.901	434.123	391.143
	Cl-5	122.163	365.868	329.533	386.761	393.985
⁹⁰ Sr	Sr-1	175.725	176.068	341.858	412.035	404.037
	Sr-2	192.707	190.698	332.013	404.574	398.314
	Sr-3	211.500	209.790	320.012	414.918	385.502
	Sr-4	193.130	291.748	316.540	412.829	380.751
	Sr-5	418.941	262.810	364.266	392.171	383.077
Mixture	Mix-2	57.8728	134.788	351.813	393.043	399.561
	Mix-3	77.8675	60.5838	338.596	395.164	395.583
	Mix-4	435.679	142.734	361.218	411.939	393.874
Background	BKG-1	376.748	376.678	377.867	415.161	402.323
	BKG-2	369.268	367.873	371.041	407.397	-
	BKG-3	359.013	357.778	359.696	395.597	392.885
	BKG-4	348.013	348.468	347.195	383.992	-
	BKG-5	337.850	336.208	339.496	382.789	384.048

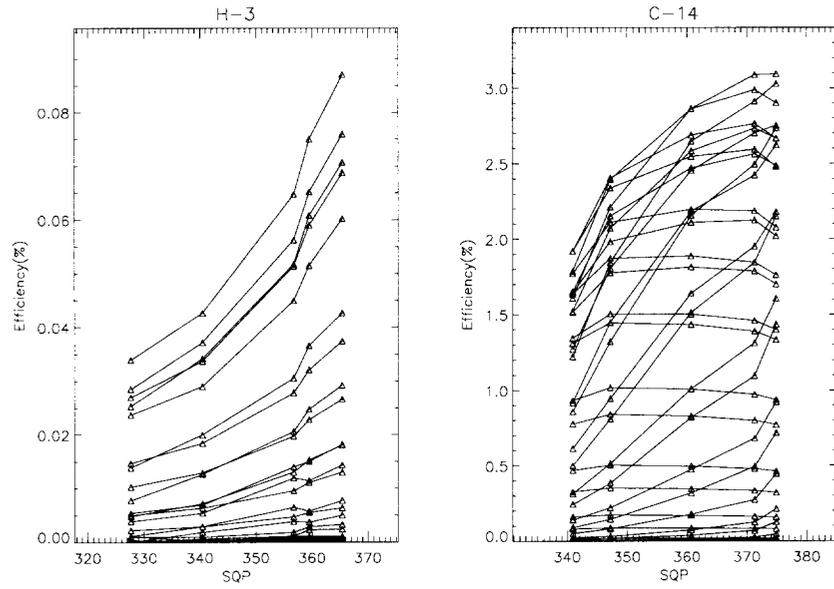


그림 3-42. 실험 I - 60개의 채널을 사용하여 ^3H , ^{14}C 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광보정곡선; SQP(E) 값.

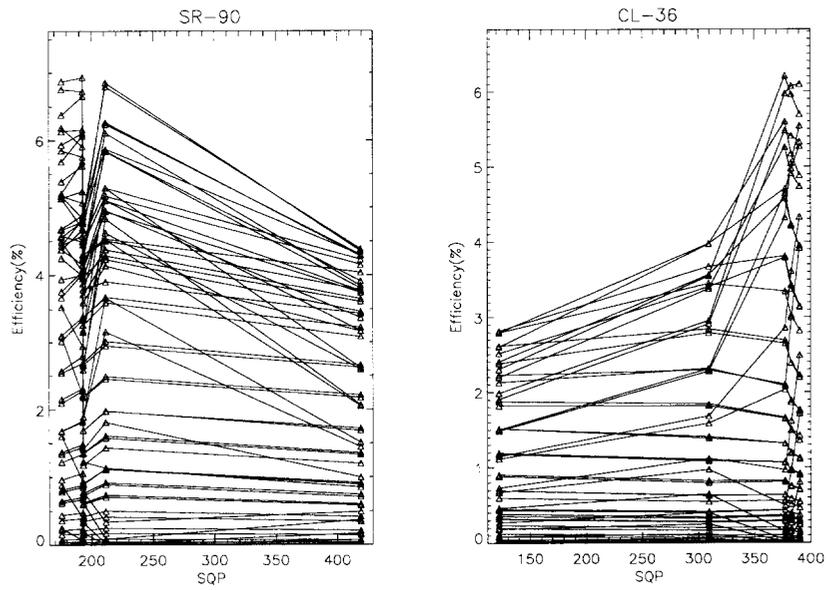


그림 3-43. 실험 I - 60개의 채널을 사용하여 ^{36}Cl , ^{90}Sr 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광보정곡선; SQP(E) 값.

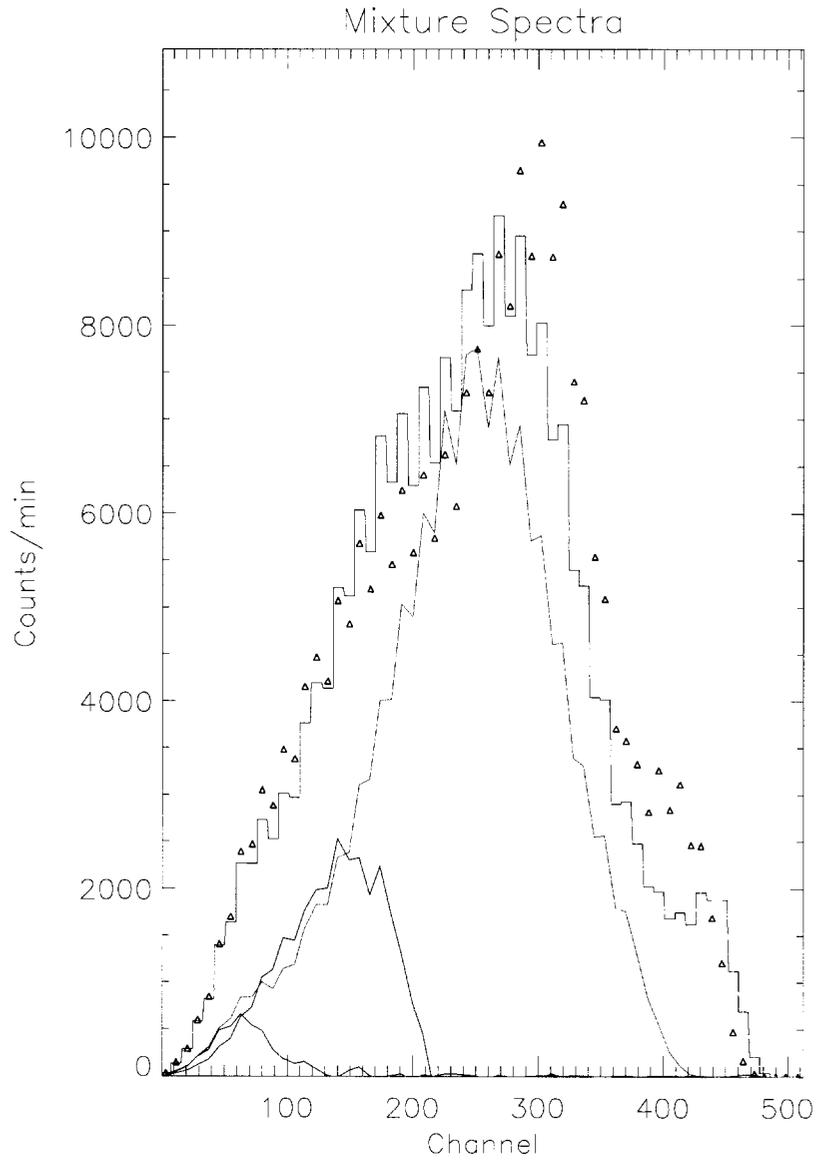


그림 3-44. 실험 I - 혼합시료 Mix2에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix2의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix2에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

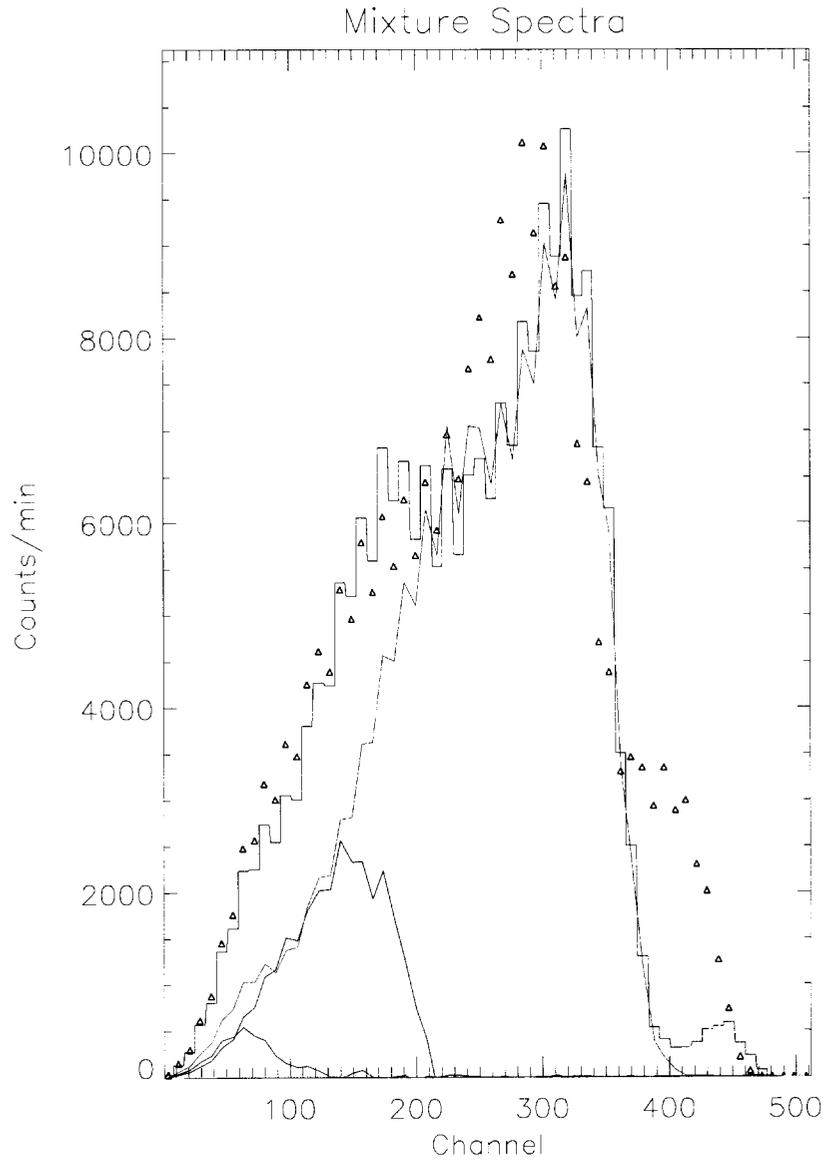


그림 3-45. 실험 I - 혼합시료 Mix3에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix3의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix3에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

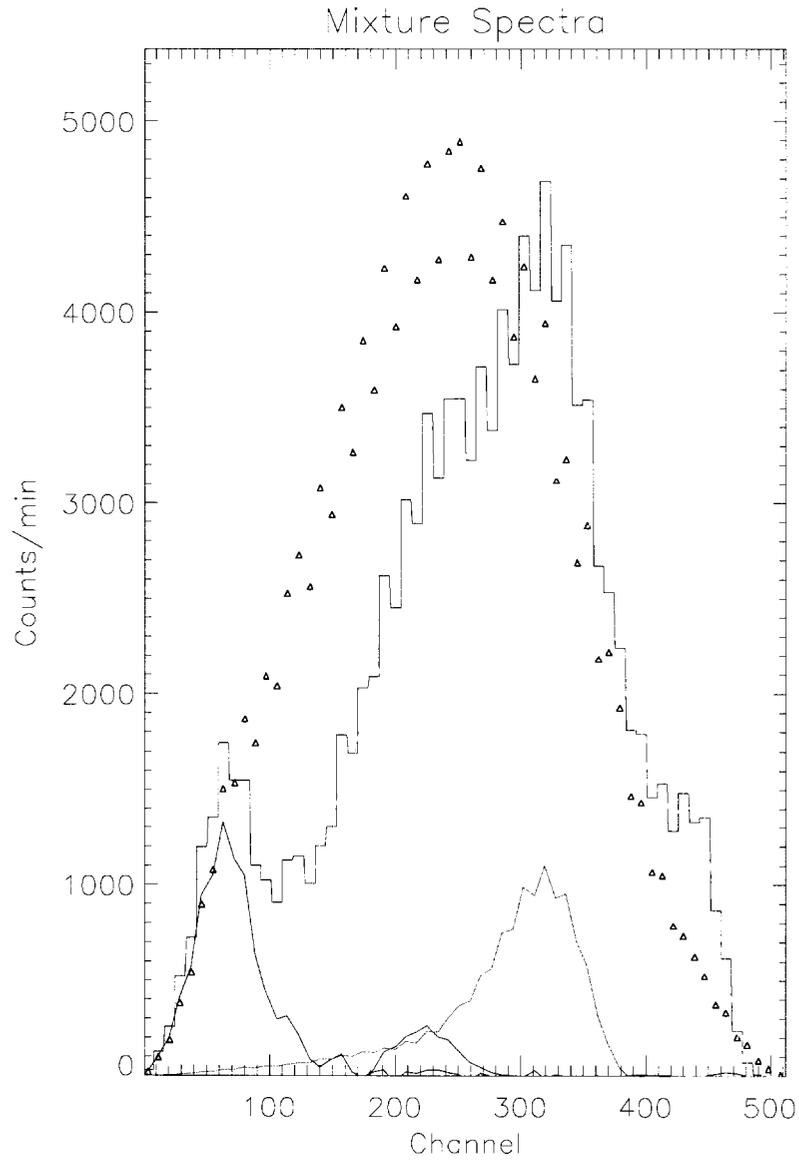


그림 3-46. 실험 I - 혼합시료 Mix4에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix4의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix4에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

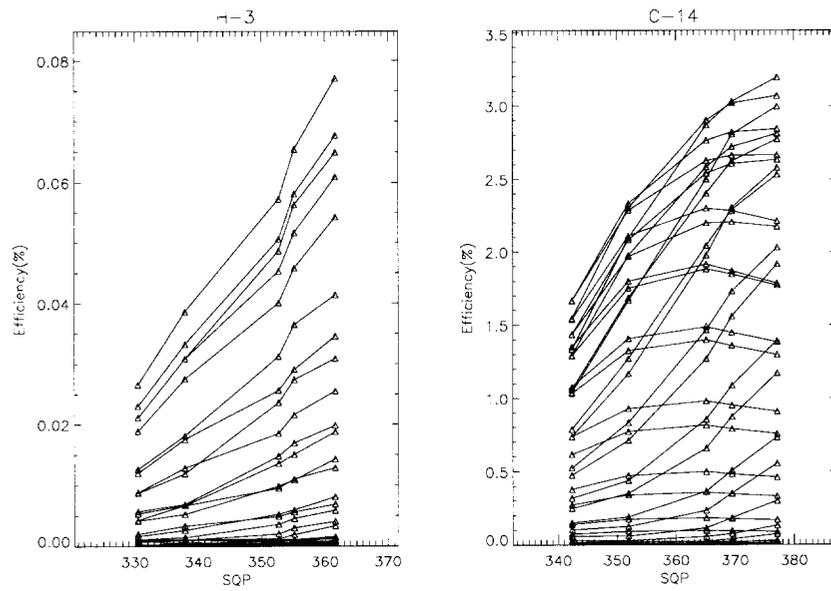


그림 3-47. 실험 II - 60개의 채널을 사용하여 ^3H , ^{14}C 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광보정곡선; SQP(E) 값.

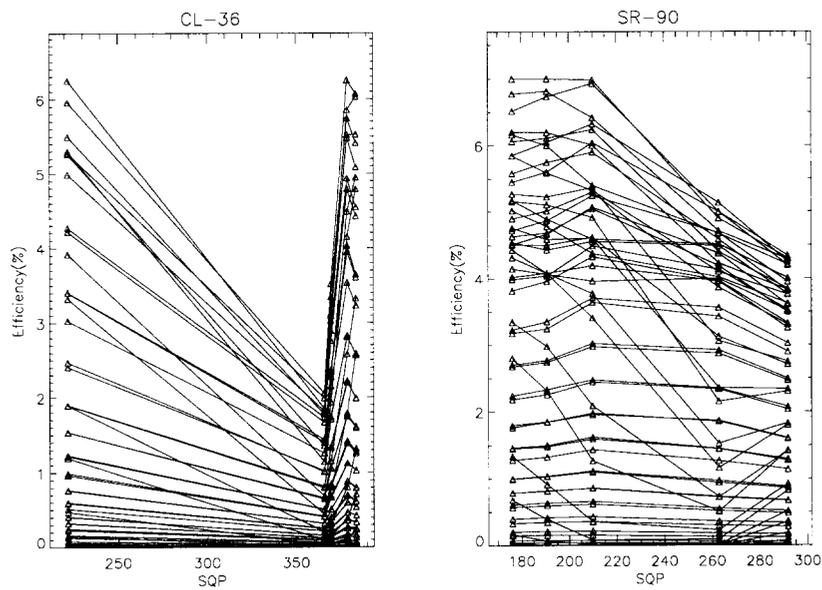


그림 3-48. 실험 II - 60개의 채널을 사용하여 ^{36}Cl , ^{90}Sr 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광보정곡선; SQP(E) 값.

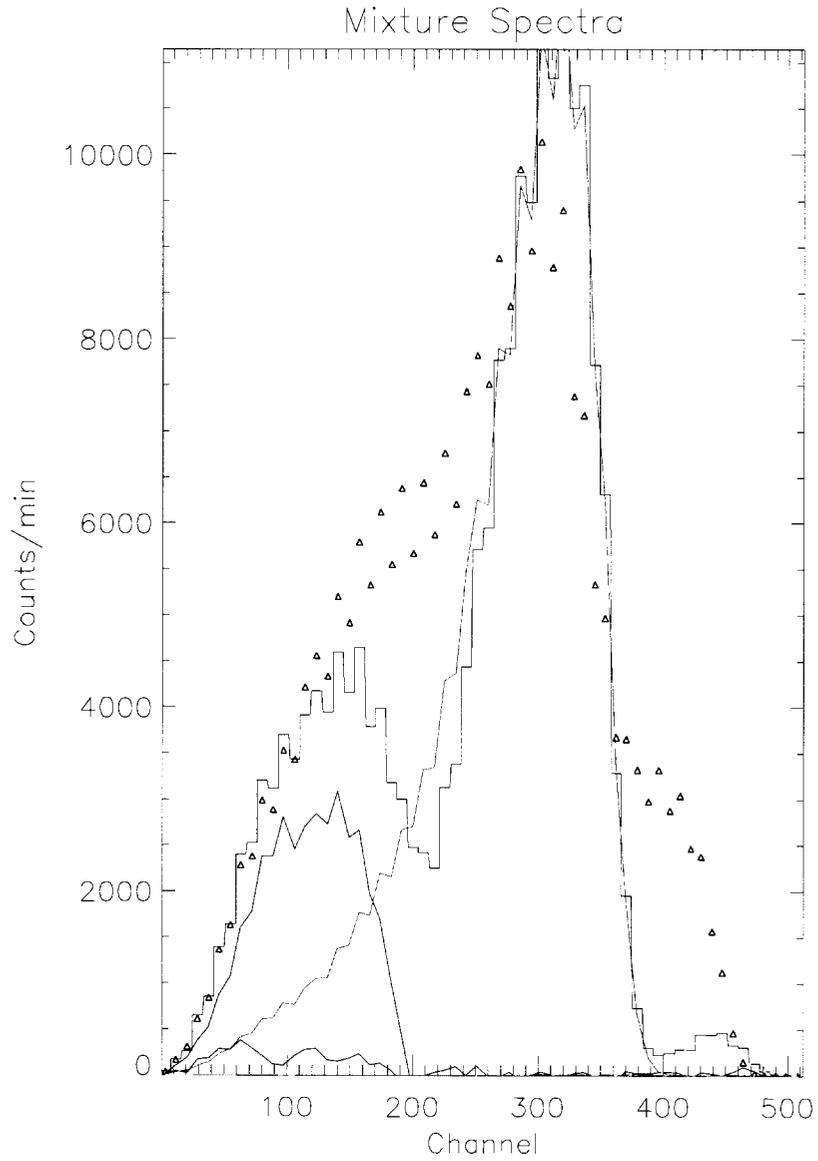


그림 3-49. 실험 II - 혼합시료 Mix2에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix2의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix2에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

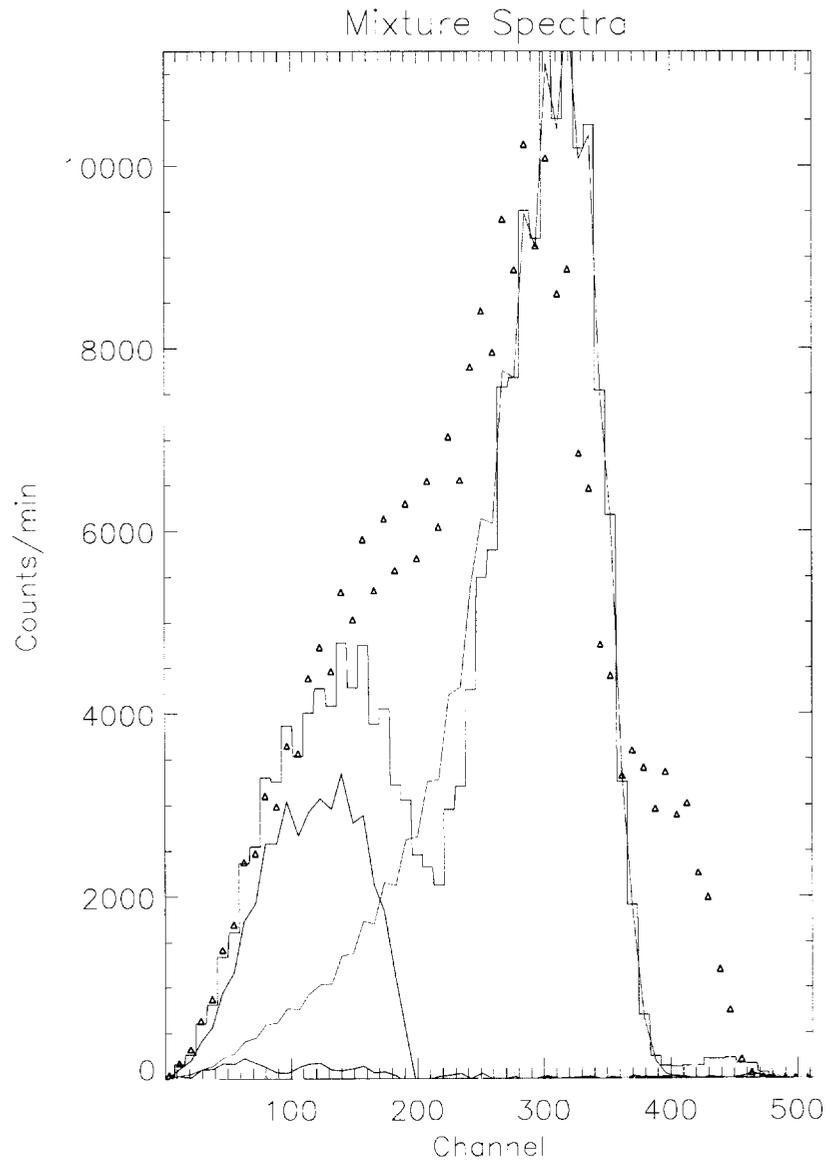


그림 3-50. 실험 II - 혼합시료 Mix3에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix3의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix3에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

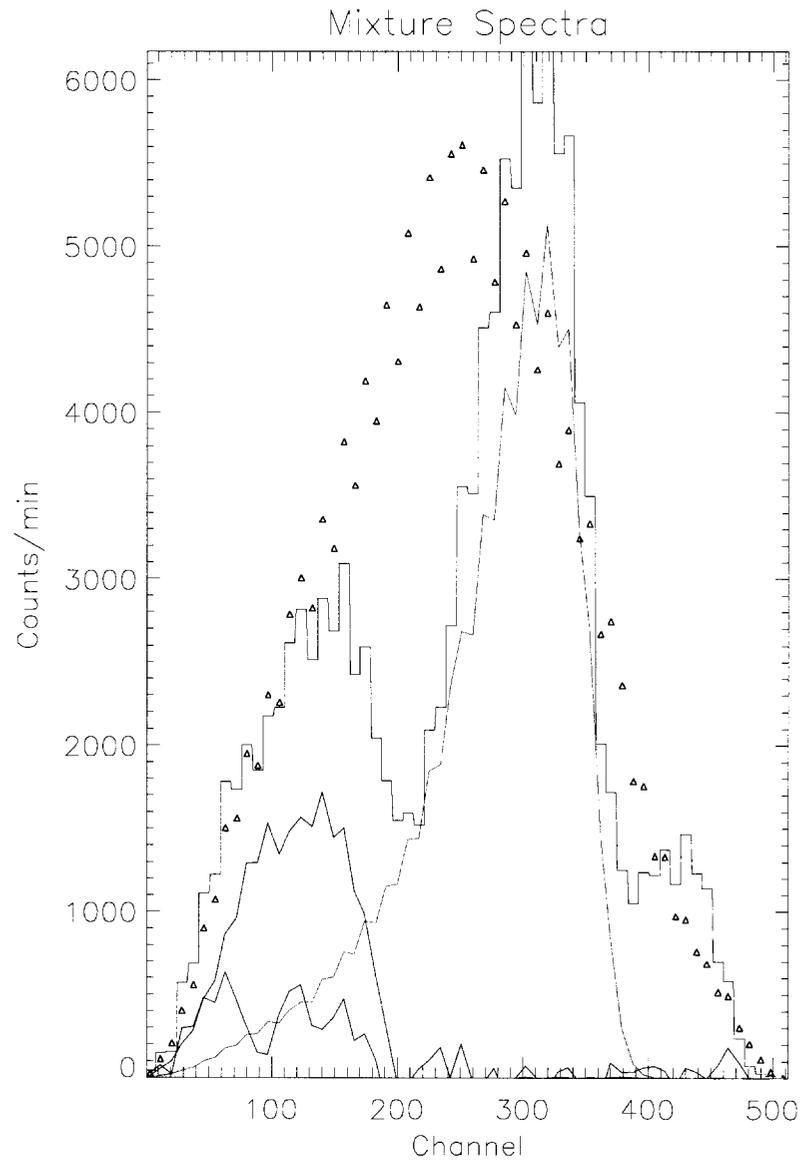


그림 3-51. 실험 II - 혼합시료 Mix4에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix4의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix4에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

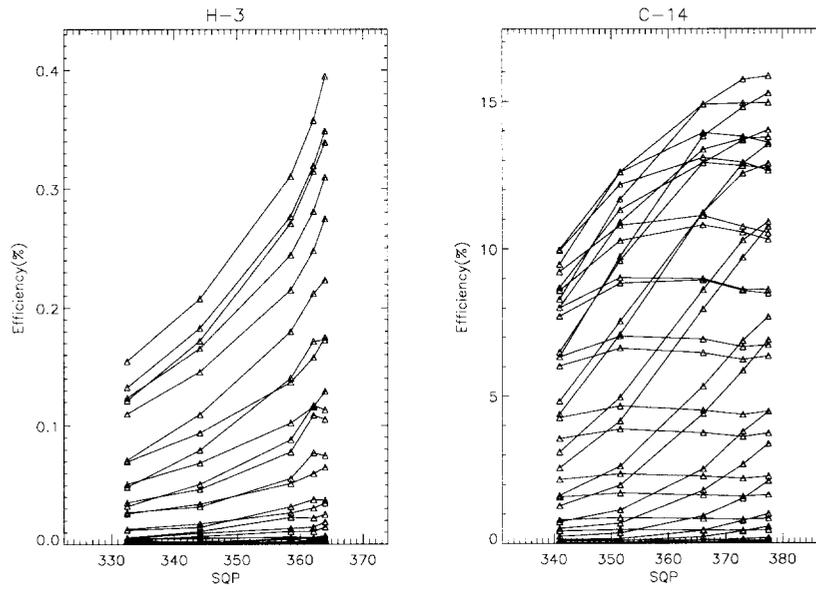


그림 3-52. 실험 III - 60개의 채널을 사용하여 ^3H , ^{14}C 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광보정곡선; SQP(E) 값.

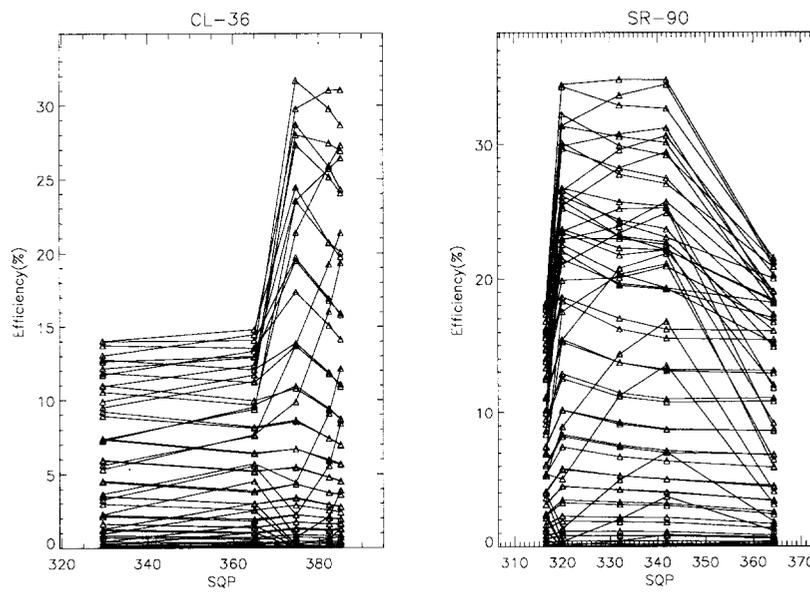


그림 3-53. 실험 III - 60개의 채널을 사용하여 ^{36}Cl , ^{90}Sr 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광보정곡선; SQP(E) 값.

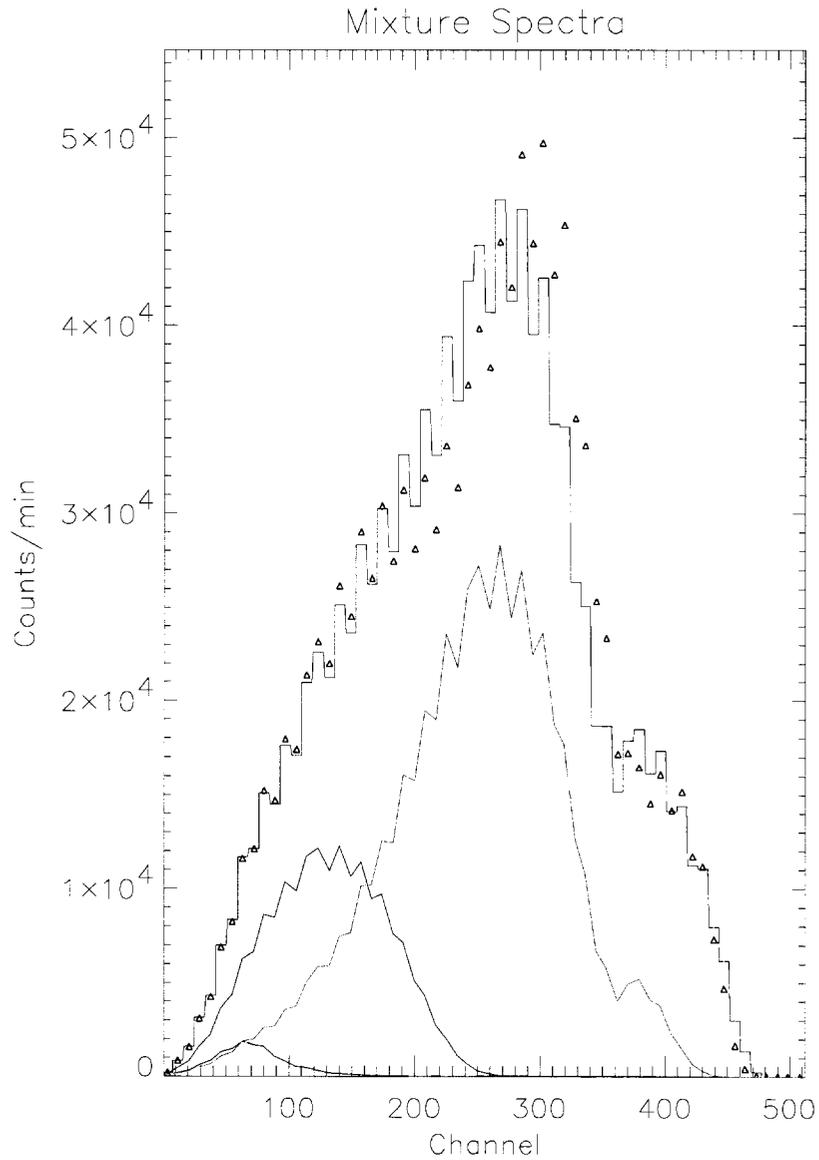


그림 3-54. 실험 III - 혼합시료 Mix2에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix2의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix2에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

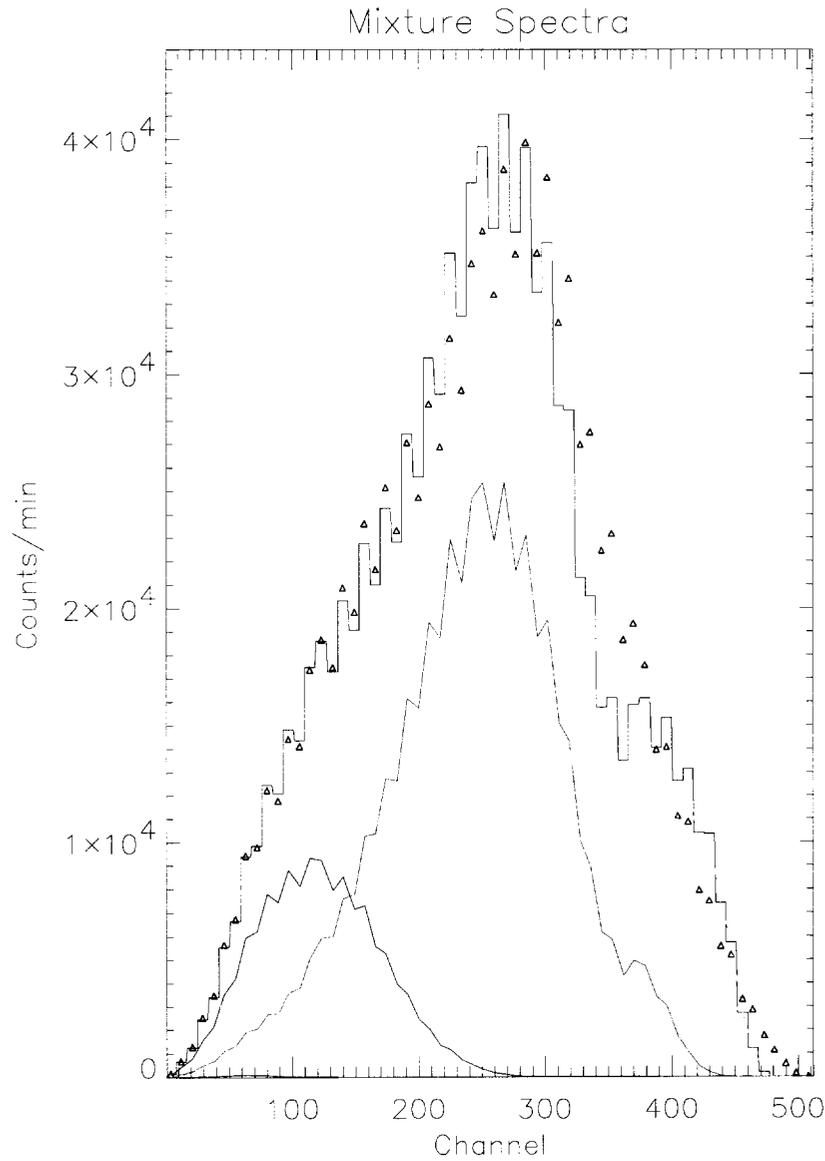


그림 3-55. 실험 III - 혼합시료 Mix3에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix3의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix3에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

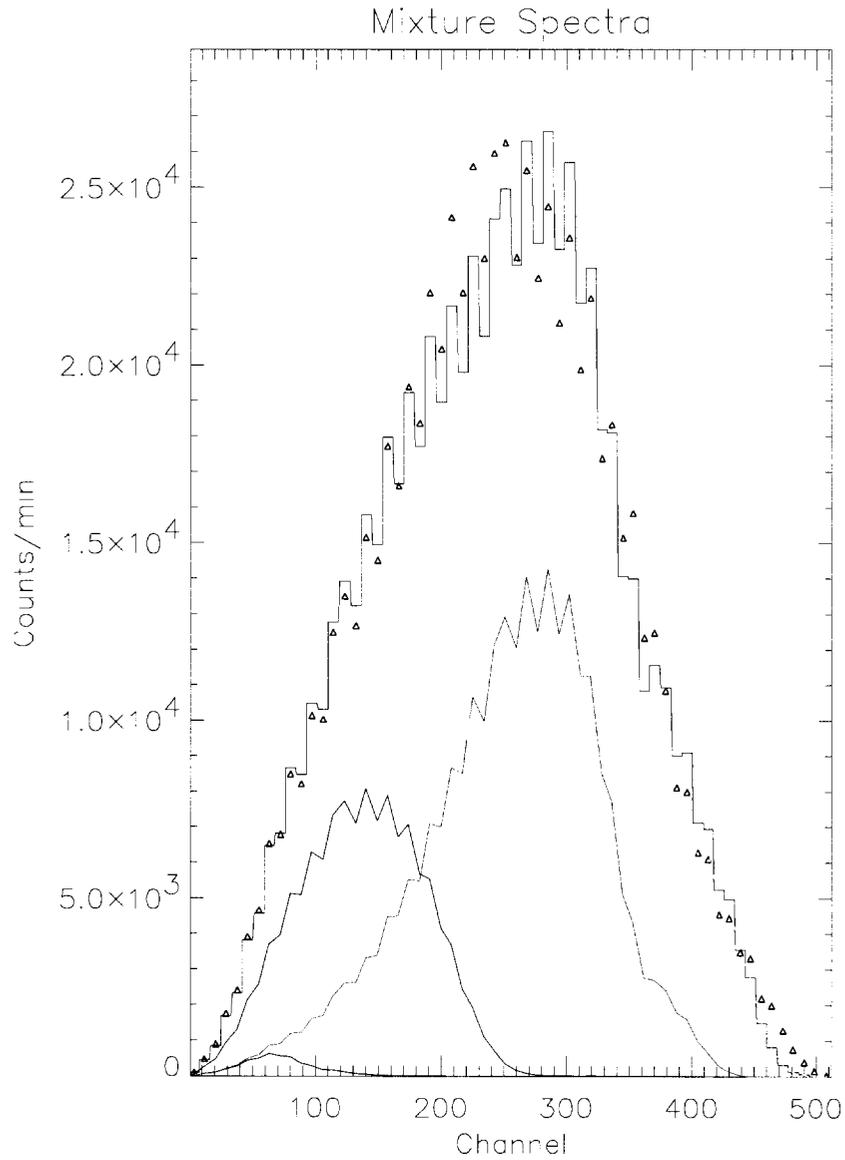


그림 3-56. 실험 III - 혼합시료 Mix4에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix4의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix4에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

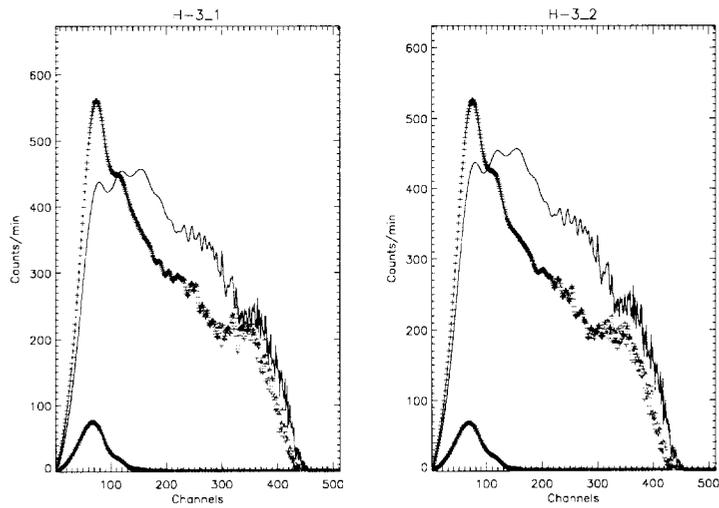


그림 3-57. 실험 III의 ^3H 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

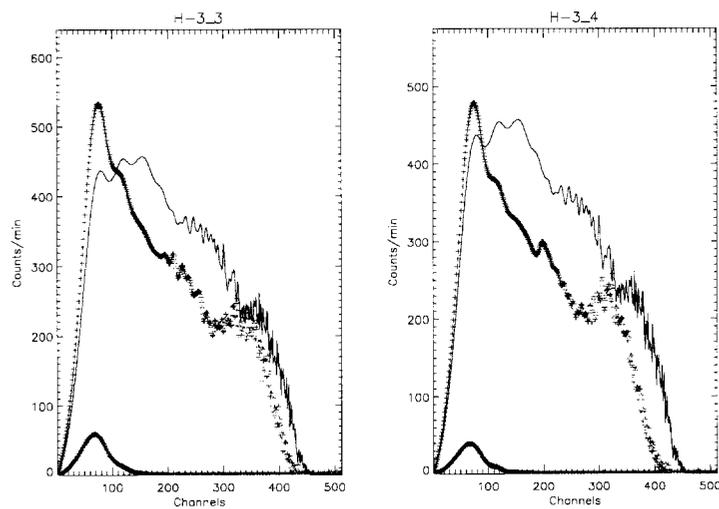


그림 3-58. 실험 III의 ^3H 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

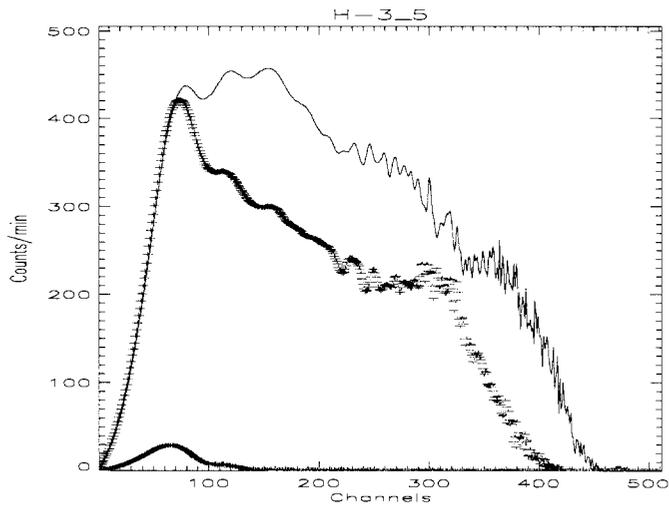


그림 3-59. 실험 III의 ^3H 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

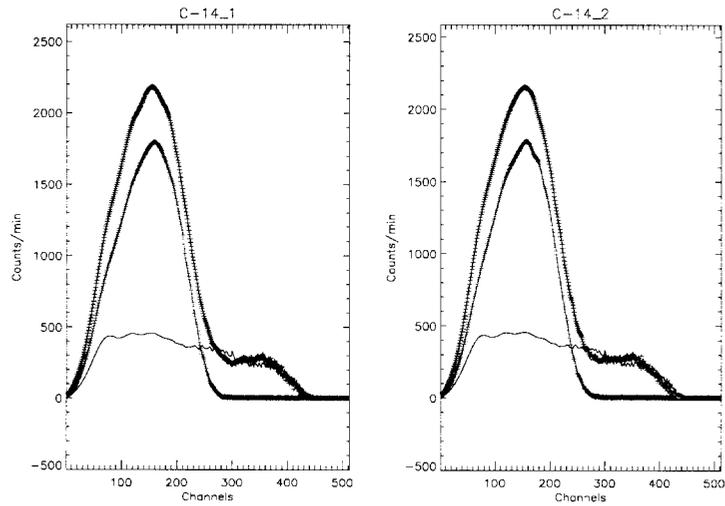


그림 3-60. 실험 III의 ^{14}C 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

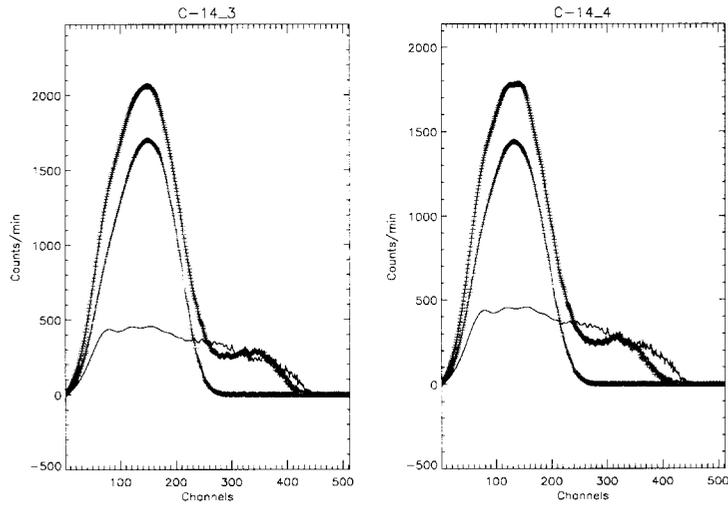


그림 3-61. 실험 III의 ^{14}C 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

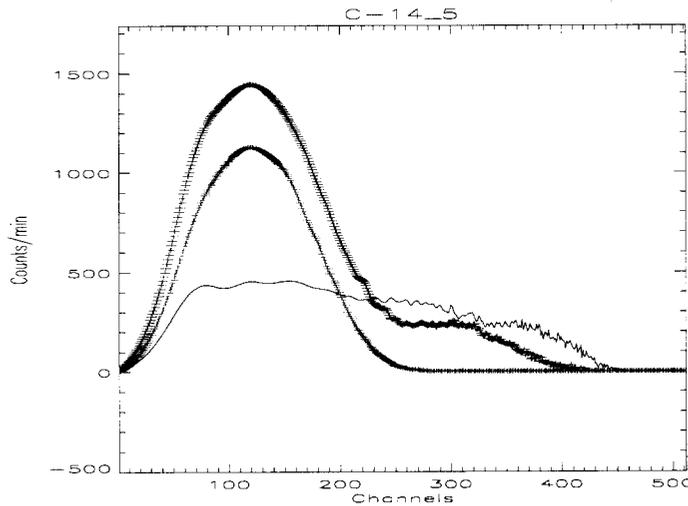


그림 3-62. 실험 III의 ^{14}C 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

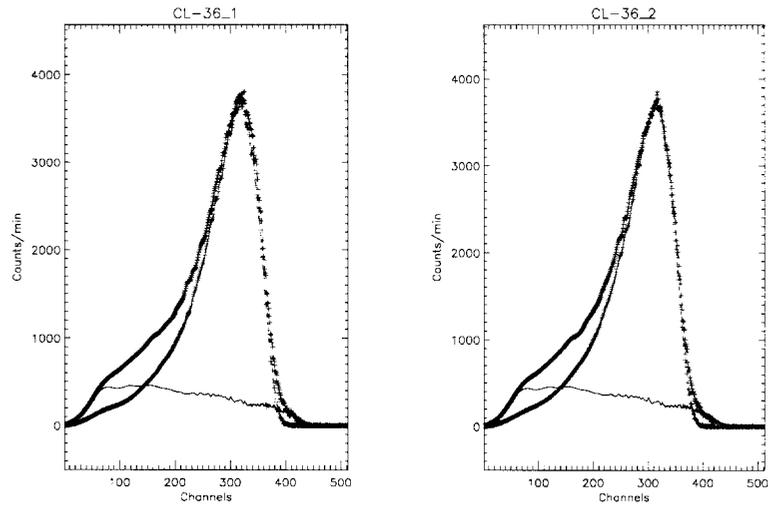


그림 3-63. 실험 III의 ^{30}Cl 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

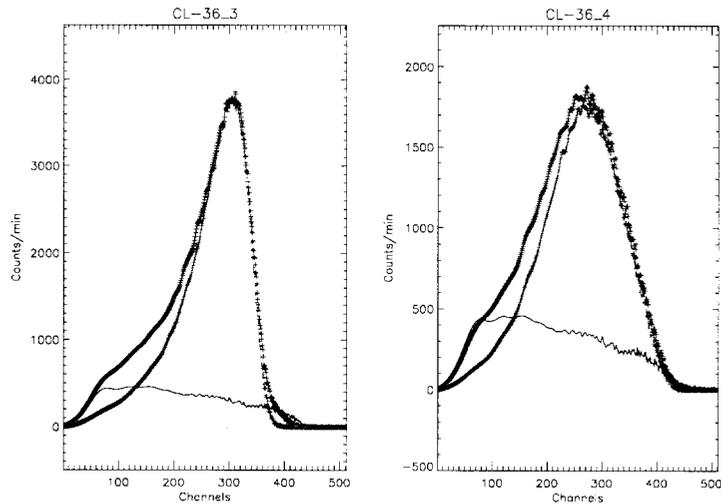


그림 3-64. 실험 III의 ^{30}Cl 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

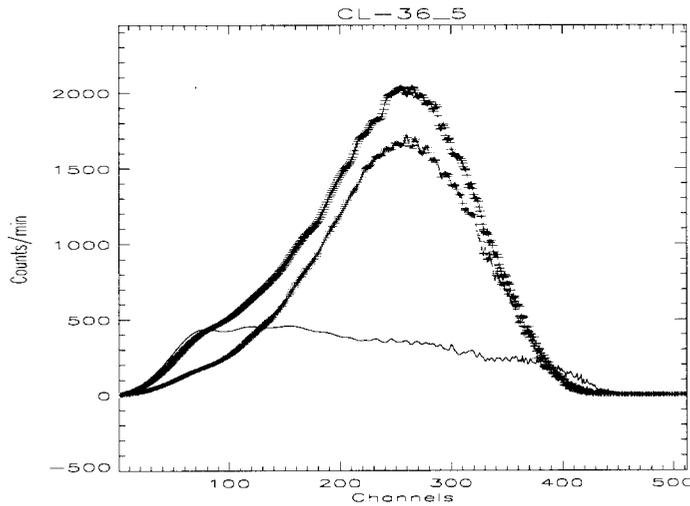


그림 3-65. 실험 III의 ^{36}Cl 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

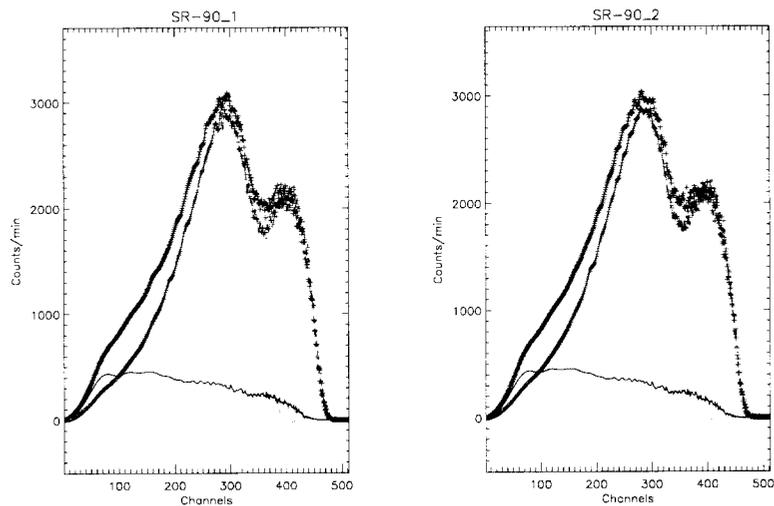


그림 3-66. 실험 III의 ^{90}Sr 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

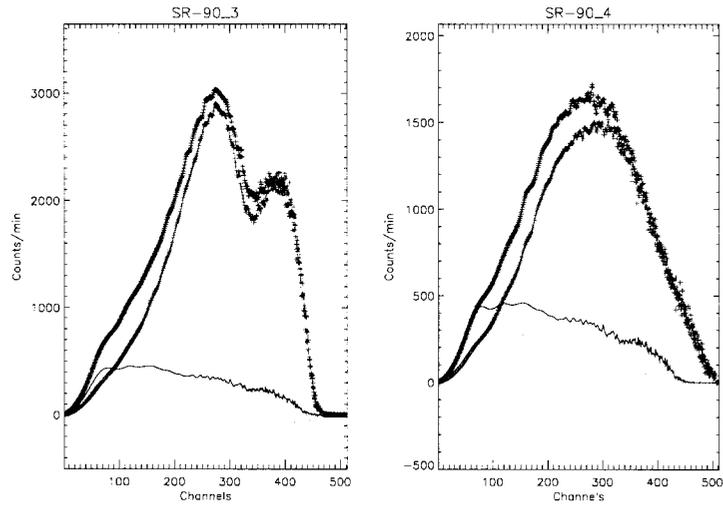


그림 3-67. 실험 III의 ^{90}Sr 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

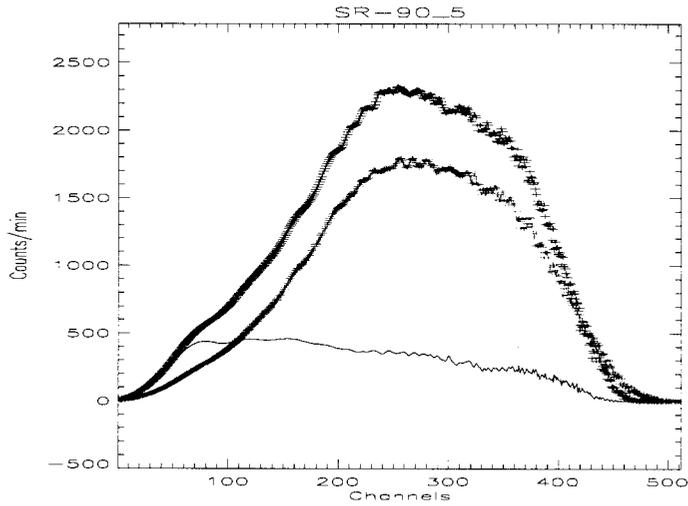


그림 3-68. 실험 III의 ^{90}Sr 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

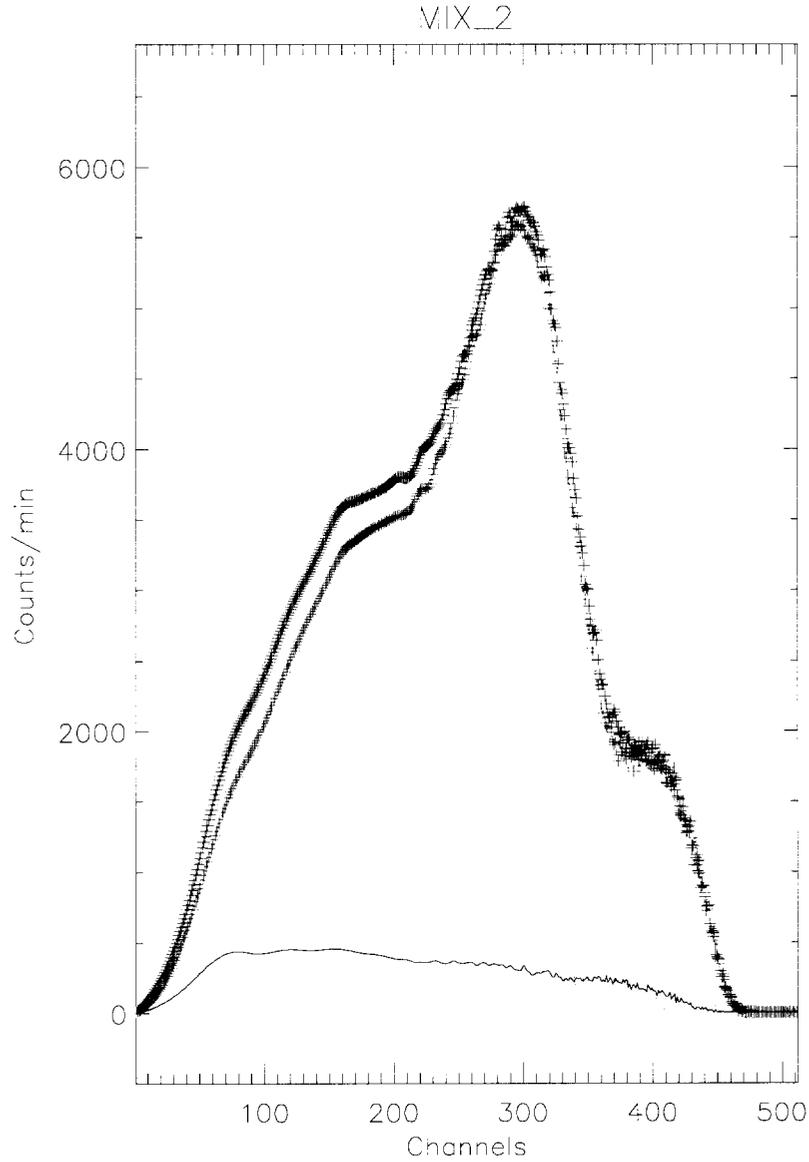


그림 3-69. 실험 III의 Mix2의 시료의 SQP(E)값을 나타냄.-
 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 :
 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼
 의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

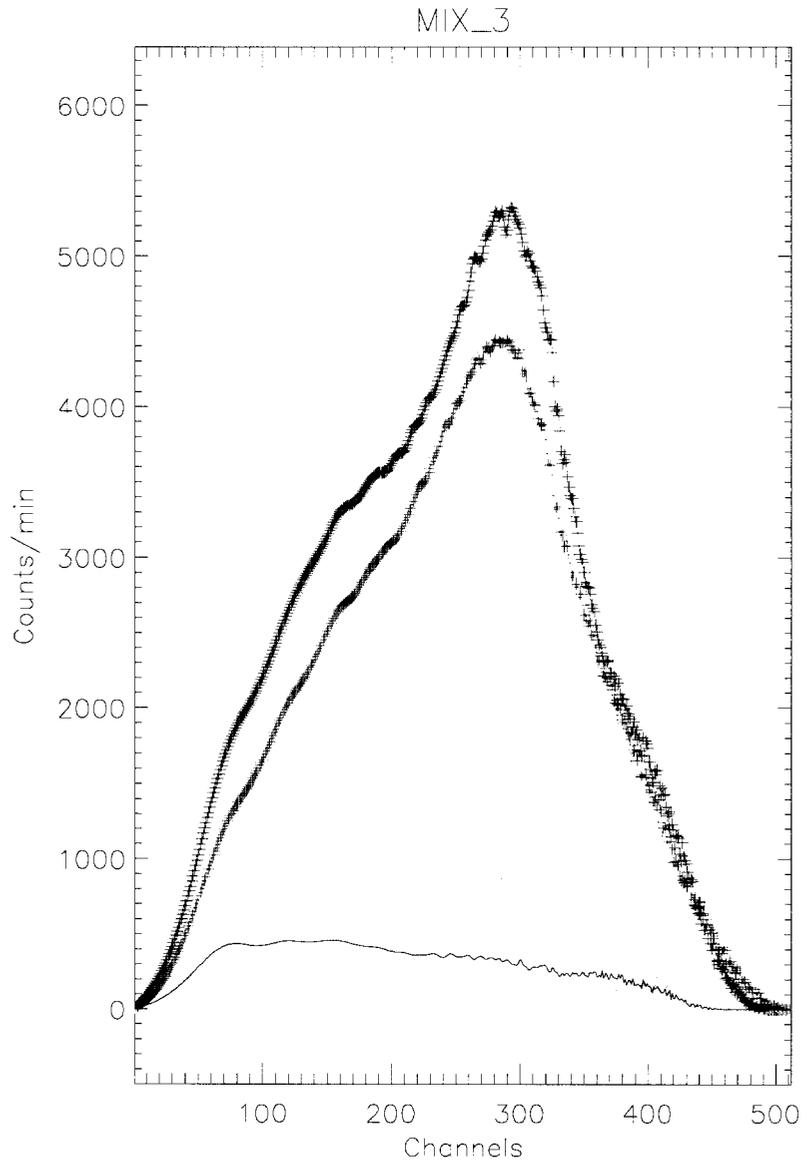


그림 3-70. 실험 III의 Mix3의 시료의 SQP(E)값을 나타냄.-
파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 :
베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼
의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

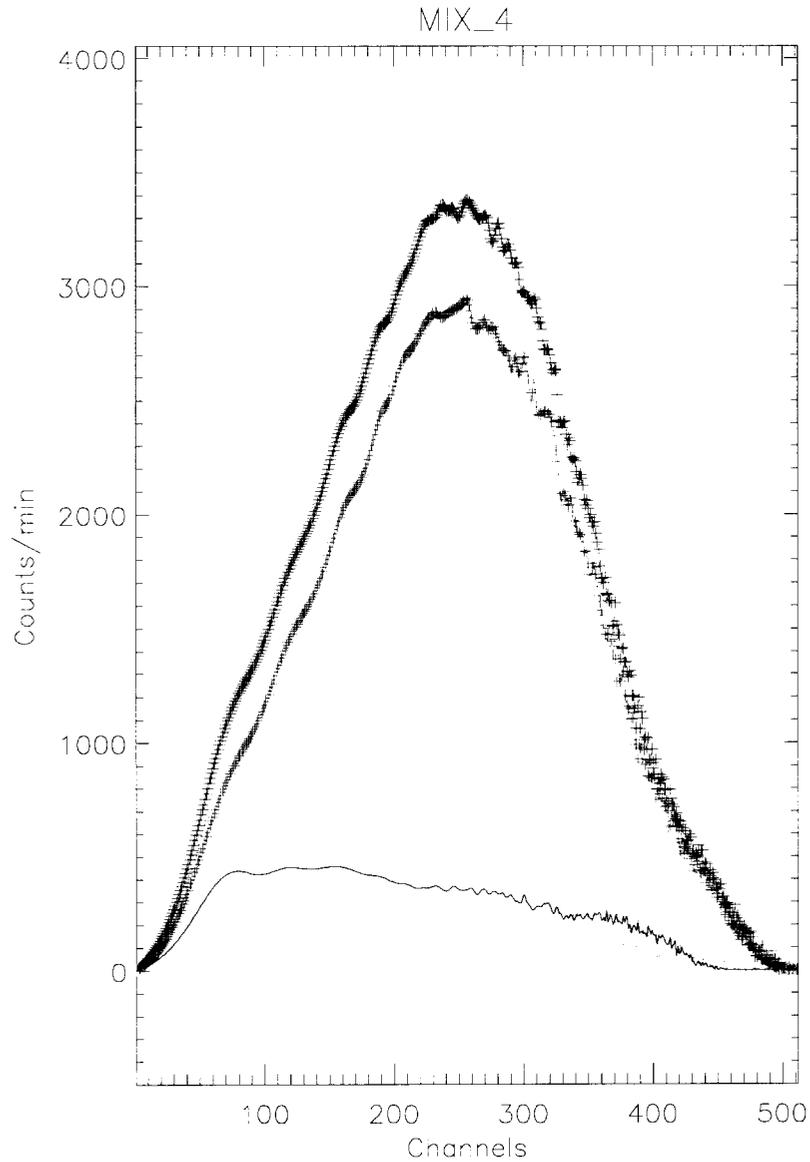


그림 3-71. 실험 III의 Mix4의 시료의 SQP(E)값을 나타냄.-
 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 :
 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼
 의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

표 3-8. ^{152}Eu 의 에너지별 상대 밀도.

Energy (keV)	Relative Intensity
121.8	141. \pm 4. ^a
244.7	36.6 \pm 1.1
344.3	127.2 \pm 1.3
367.8	4.19 \pm 0.04
411.1	10.71 \pm 0.11
444.0	15.00 \pm 0.15
488.7	1.984 \pm 0.023
586.3	2.24 \pm 0.05
678.6	2.296 \pm 0.028
688.7	4.12 \pm 0.04
778.9	62.6 \pm 0.6
867.4	20.54 \pm 0.21
964.0	70.4 \pm 0.7
1005.1	3.57 \pm 0.07
1085.8	48.7 \pm 0.5
1089.7	8.26 \pm 0.09 ^b
1112.1	65.0 \pm 0.7
1212.9	6.67 \pm 0.07
1299.1	7.76 \pm 0.08
1408.0	100.0 \pm 1.0 ^c
1457.6	2.52 \pm 0.09

- a. In order to use this line, no ^{154}Eu should be present.
- b. Not intended for use in calibrations because of the proximity to the more intense nearby energy.
- c. The absolute yield of this line is 0.2101 per decay.

Source: Data taken from Gehrke et al, 1977.

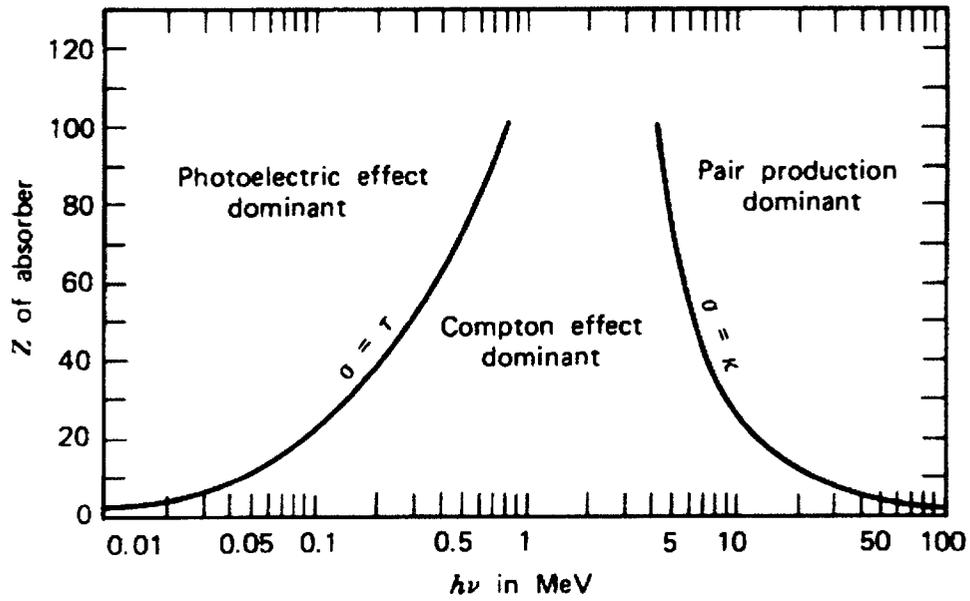


그림 3-72. The relative importance of the three major types of gamma-ray interaction. The lines show the values of Z and $h\nu$ for which the two neighboring effects are just equal.(From The Atomic Nucleus by R. D. Evans. Copyright 1955 by the McGraw-Hill Book Company. Used with permission.)

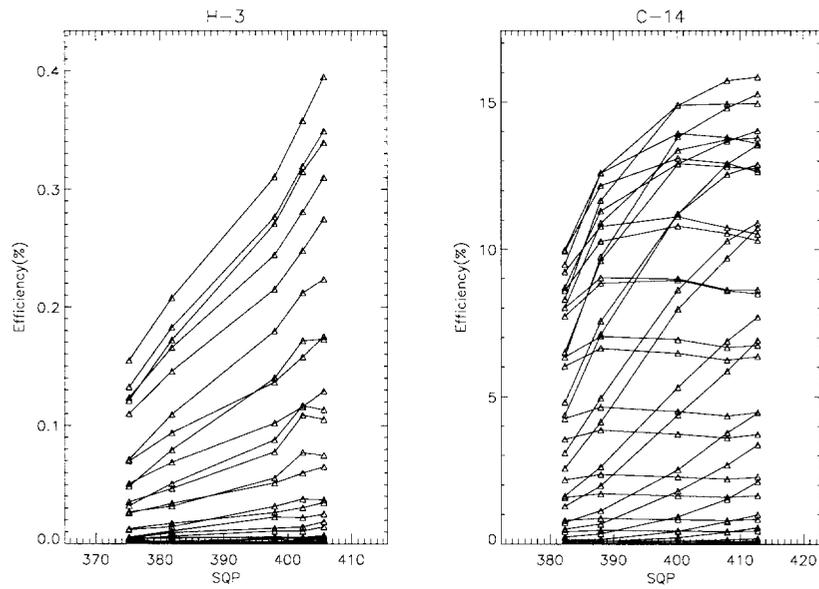


그림 3-73. 보정된 실험 III - 60개의 채널을 사용하여 ^3H , ^{14}C 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광보정곡선; SQP(E)값.

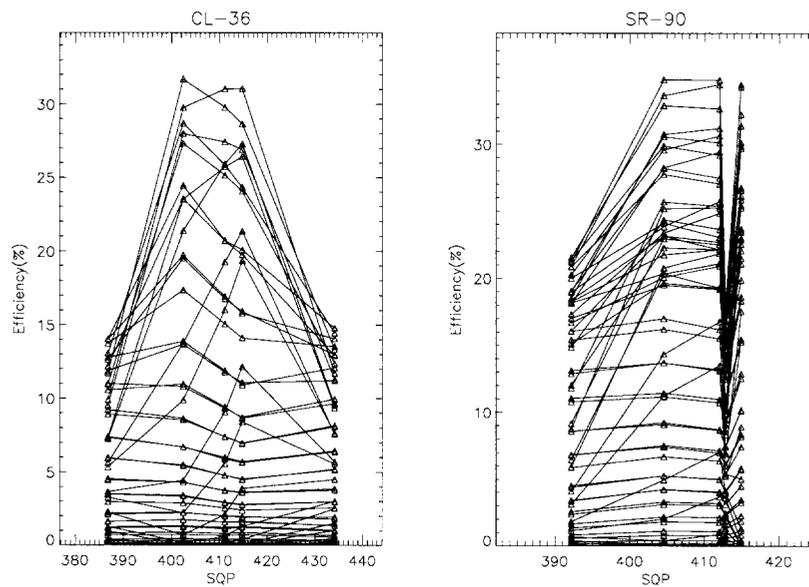


그림 3-74. 보정된 실험 III - 60개의 채널을 사용하여 ^{36}Cl , ^{90}Sr 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광보정곡선; SQP(E)값.

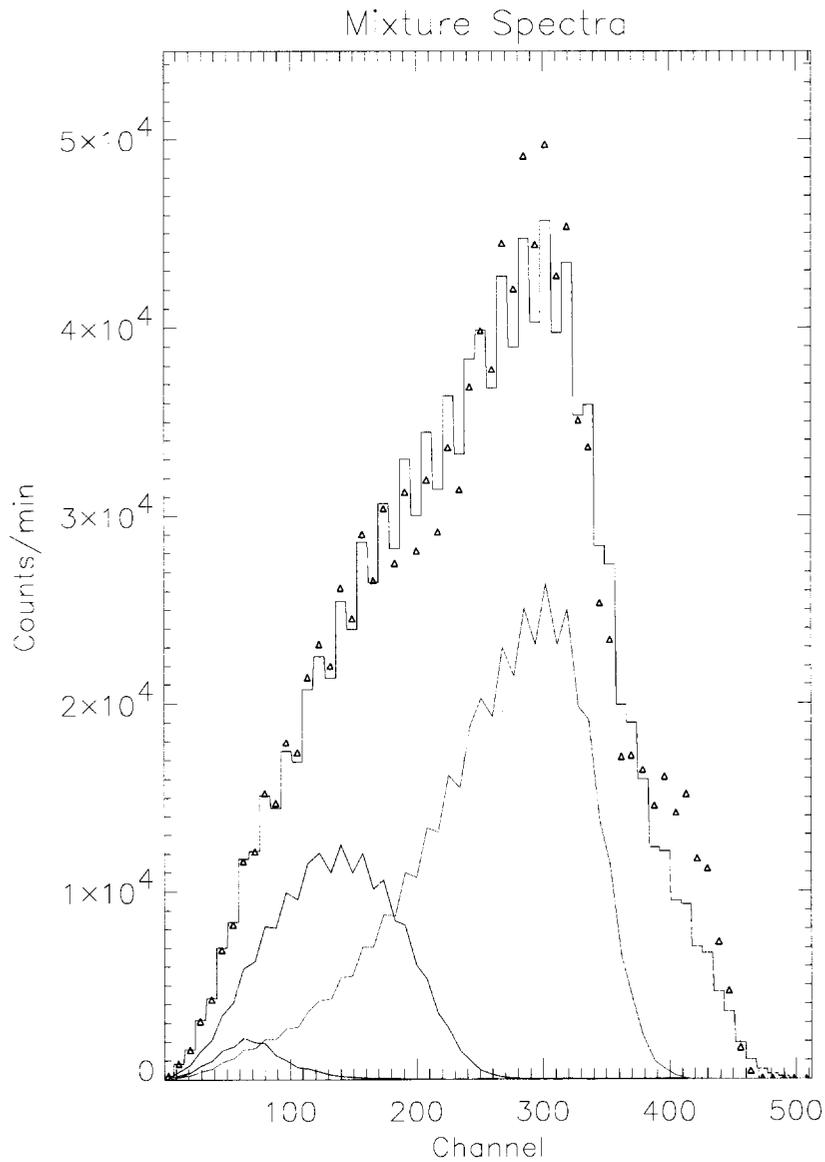


그림 3-75. 보정된 실험 III - 혼합시료 Mix2에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix2의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix2에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

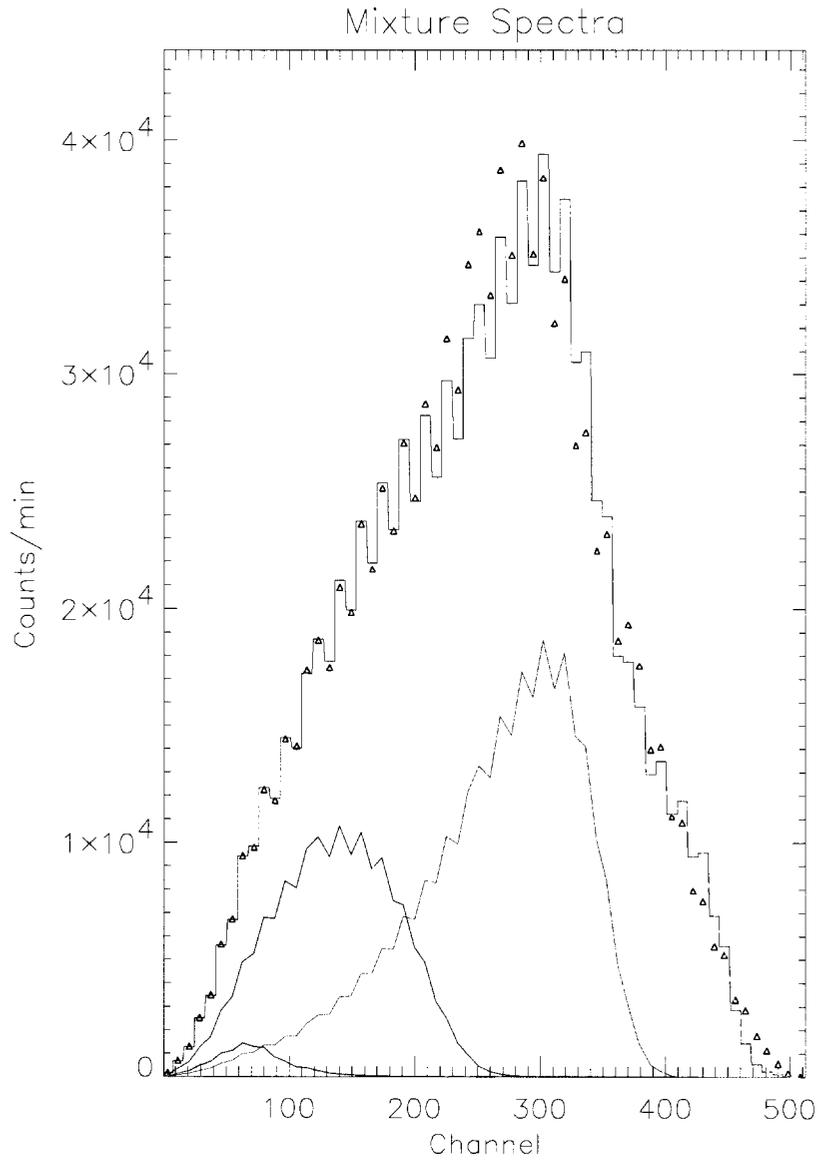


그림 3-76. 보정된 실험 III - 혼합시료 Mix3에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix3의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix3에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

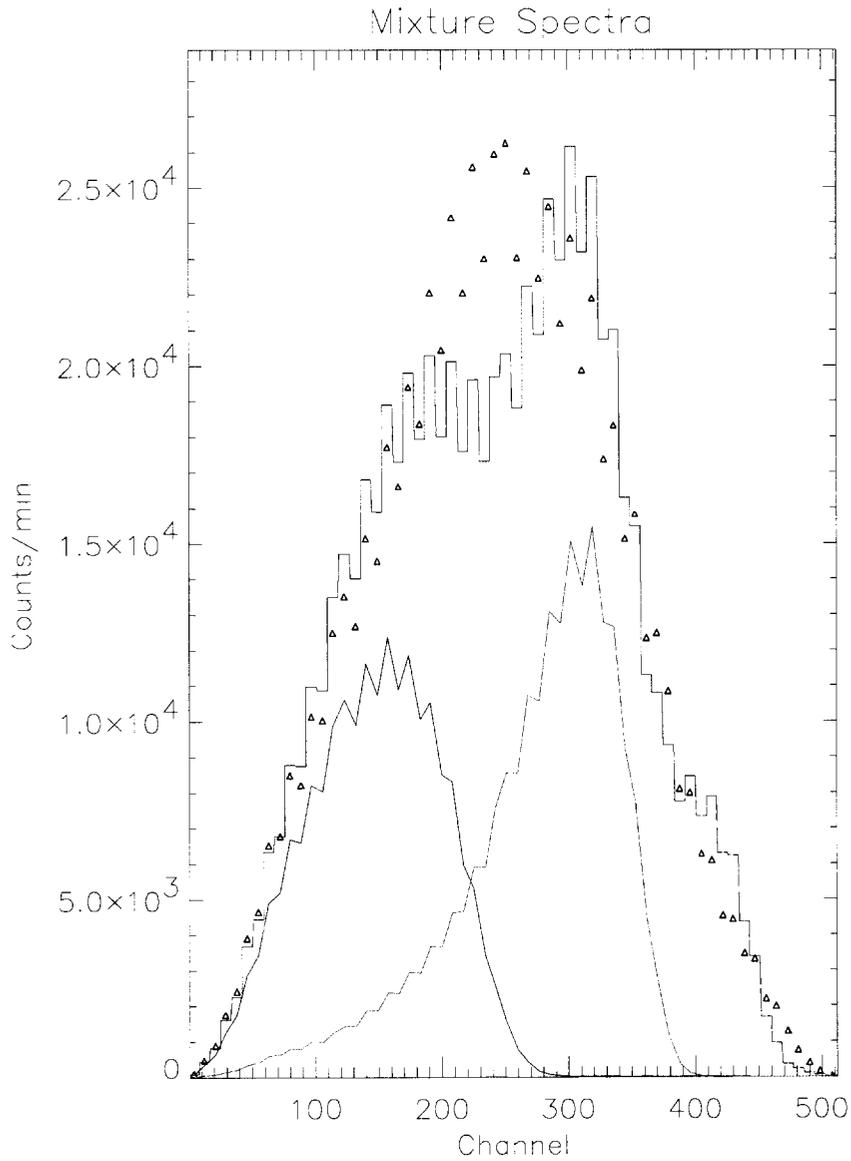


그림 3-77. 실험 III - 혼합시료 Mix4에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix4의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix4에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

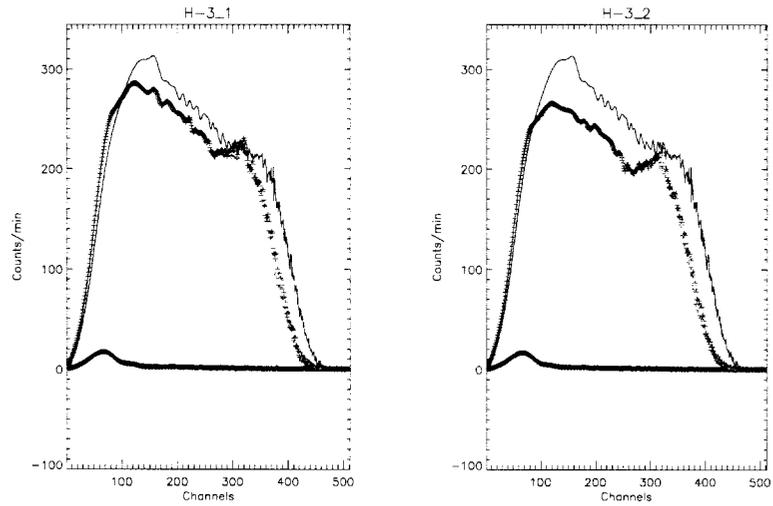


그림 3-78. 실험 IV의 ^3H 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

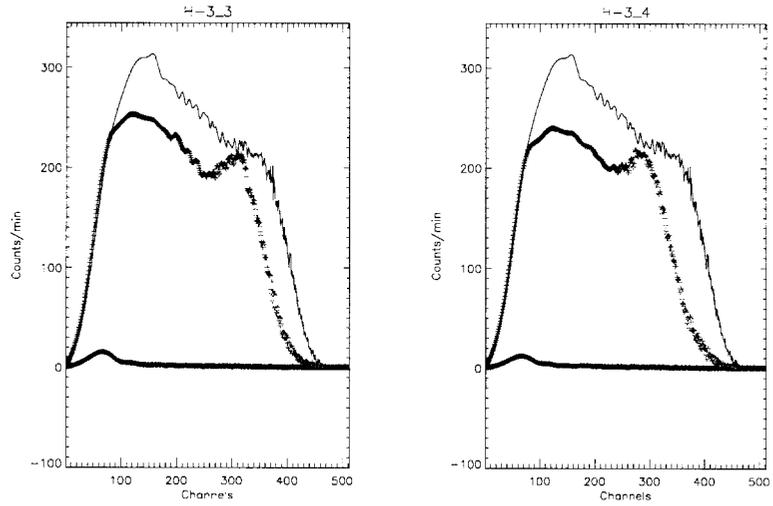


그림 3-79. 실험 IV의 ^3H 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

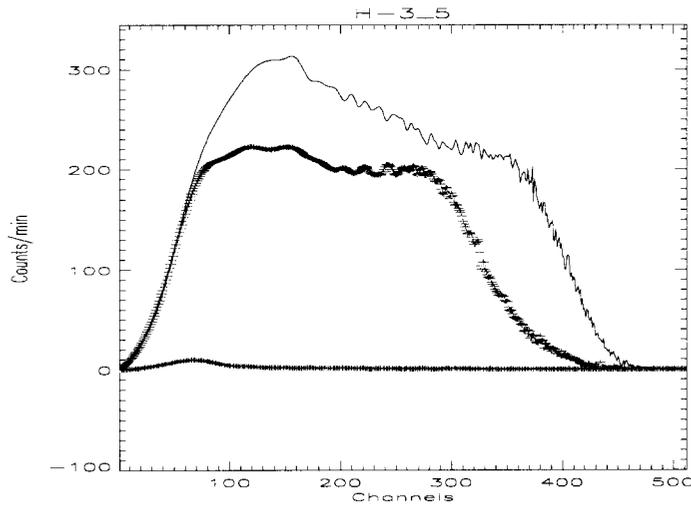


그림 3-80. 실험 IV의 ^3H 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 선평체).

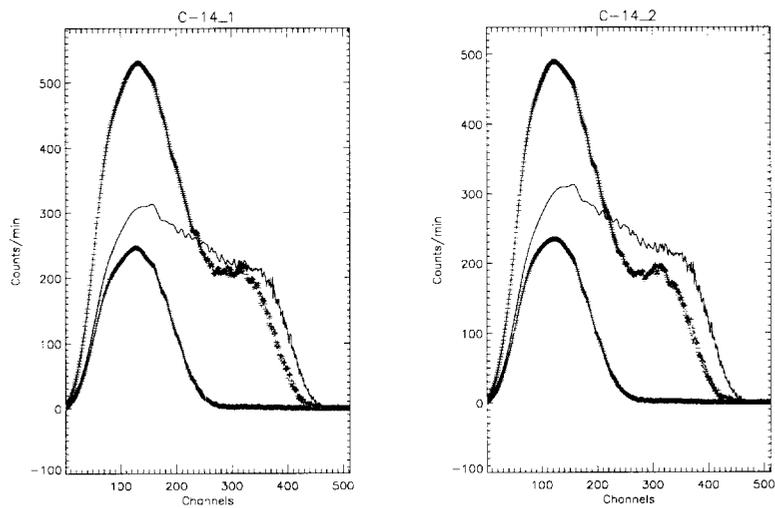


그림 3-81. 실험 IV의 ^{14}C 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 선평체).

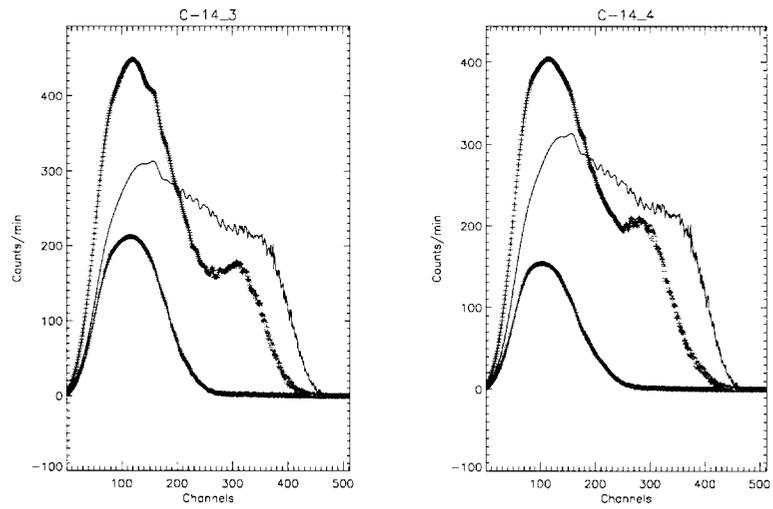


그림 3-82. 실험 IV의 ^{14}C 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

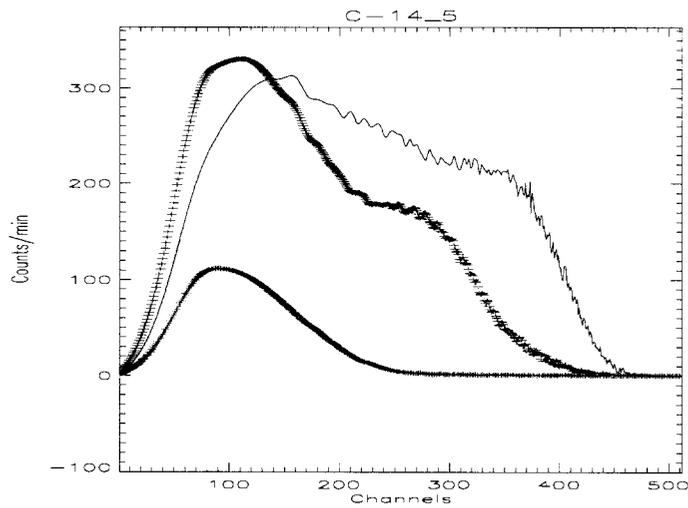


그림 3-83. 실험 IV의 ^{14}C 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

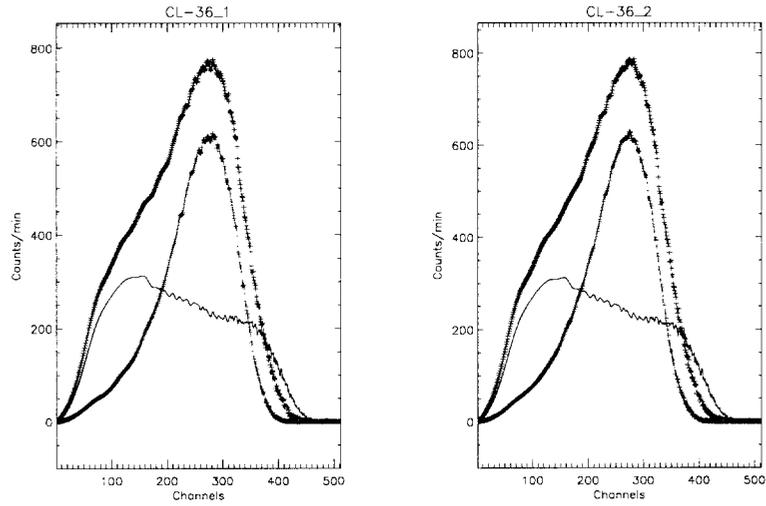


그림 3-84. 실험 IV의 ^{36}Cl 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

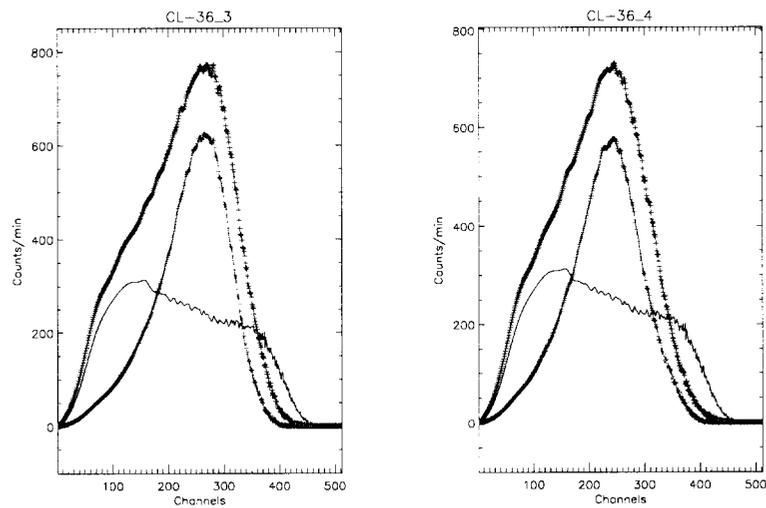


그림 3-85. 실험 IV의 ^{36}Cl 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

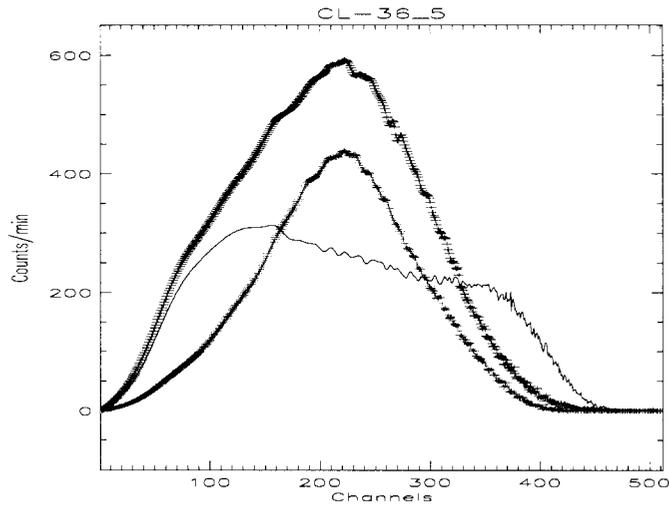


그림 3-86. 실험 IV의 ^{36}Cl 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

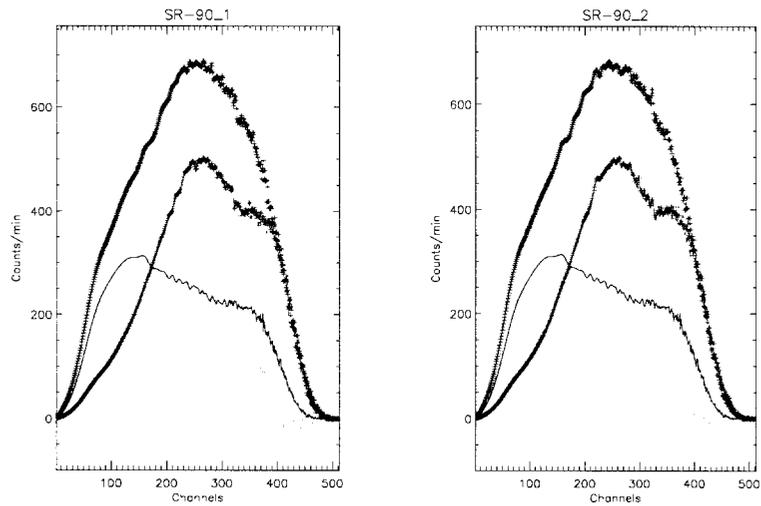


그림 3-87. 실험 IV의 ^{90}Sr 의 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

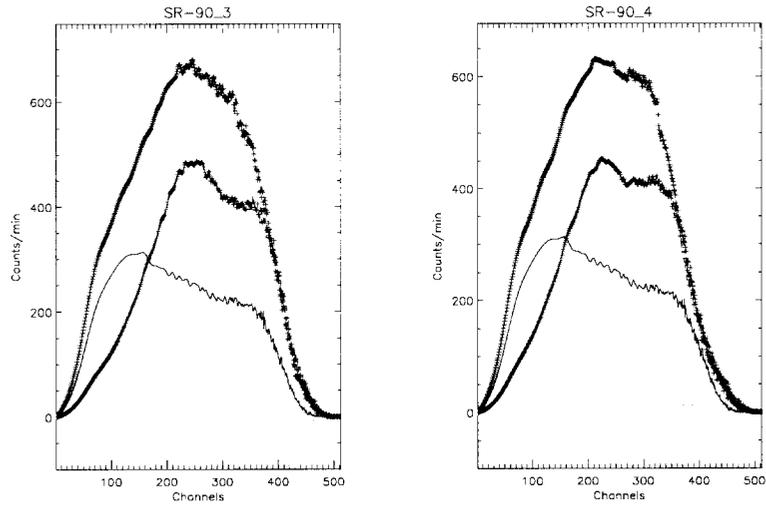


그림 3-88. 실험 IV의 ^{90}Sr 의 세 번째 시료와 네 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

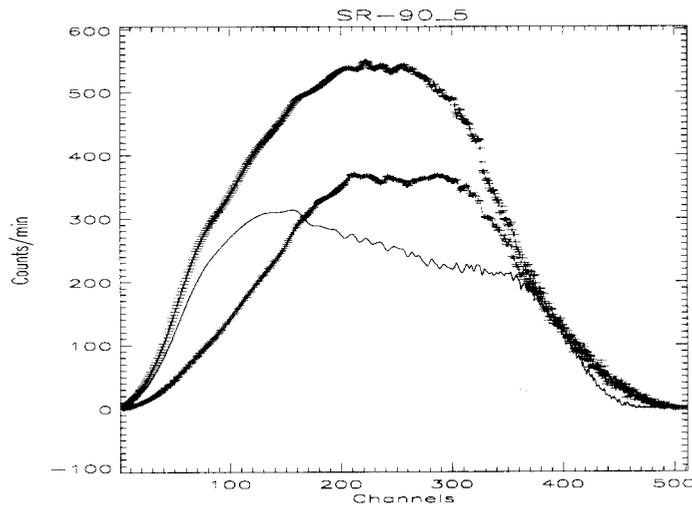


그림 3-89. 실험 IV의 ^{90}Sr 의 다섯 번째 시료의 SQP(E)값을 나타냄.- 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 : 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

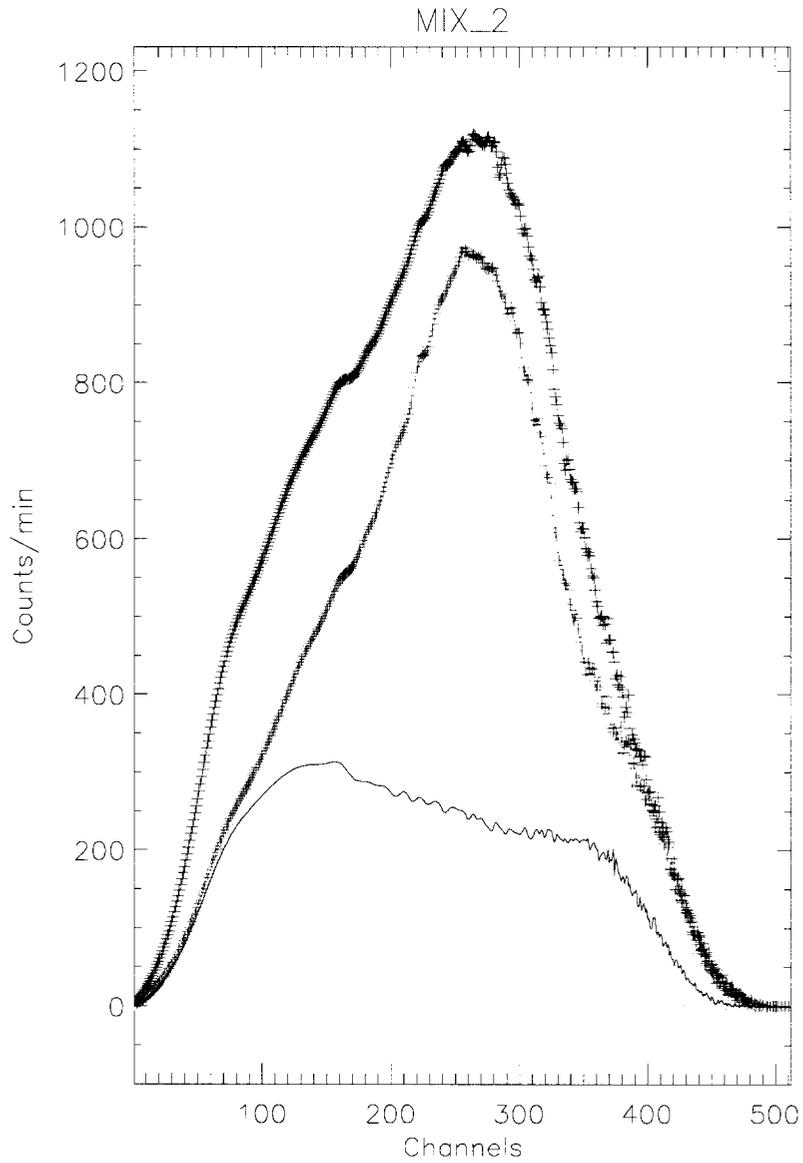


그림 3-90. 실험 IV의 Mix2의 시료의 SQP(E)값을 나타냄.-
 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 :
 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼
 의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

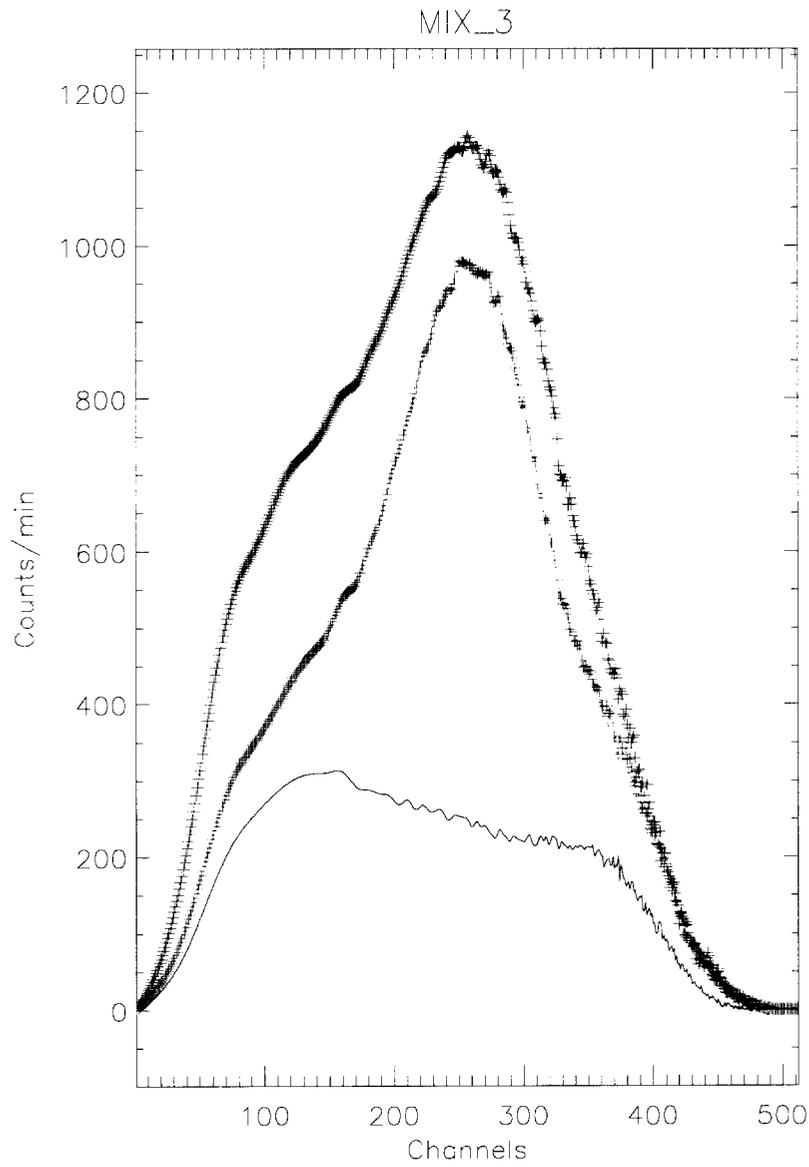


그림 3-91. 실험 IV의 Mix3의 시료의 SQP(E)값을 나타냄.-
 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 :
 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼
 의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 섬광체).

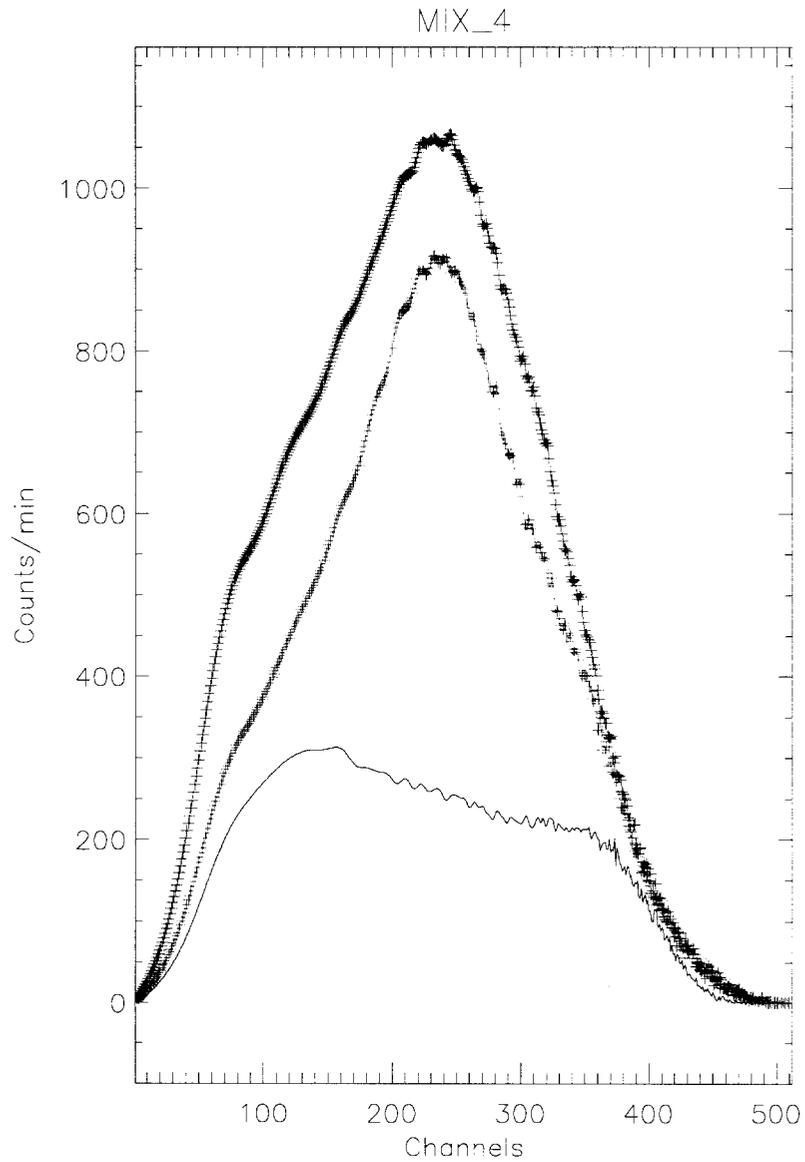


그림 3-92. 실험 IV의 Mix4의 시료의 SQP(E)값을 나타냄.-
 파란색 : 외부 표준 선원에 의한 감마 스펙트럼, 빨간색 :
 베타 스펙트럼, 오렌지색 : 감마 스펙트럼과 베타 스펙트럼
 의 차이, 즉 SQP(E)값, 검정색은 선평체).

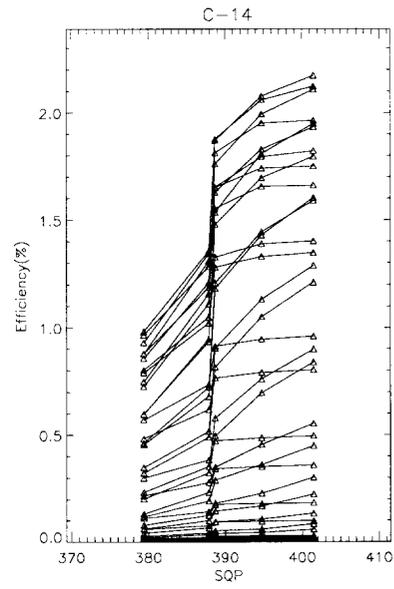
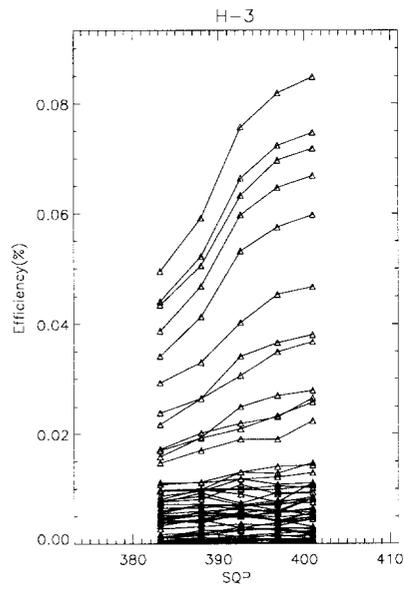


그림 3-93. 실험 IV - 60개의 채널을 사용하여 ^3H , ^{14}C 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광보정곡선; SQP(E)값.

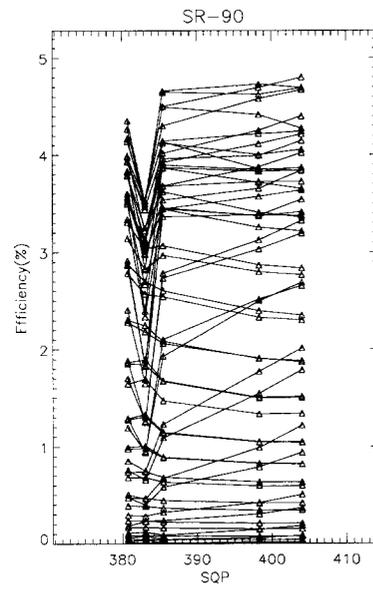
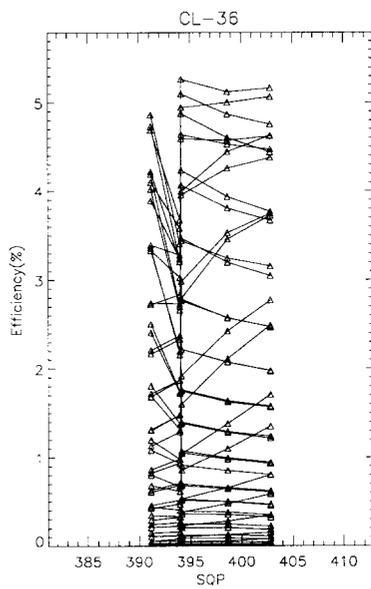


그림 3-94. 실험 IV - 60개의 채널을 사용하여 ^{36}Cl , ^{90}Sr 의 스펙트럼에 대한 각 채널별 외부 표준 소광보정곡선; SQP(E)값.

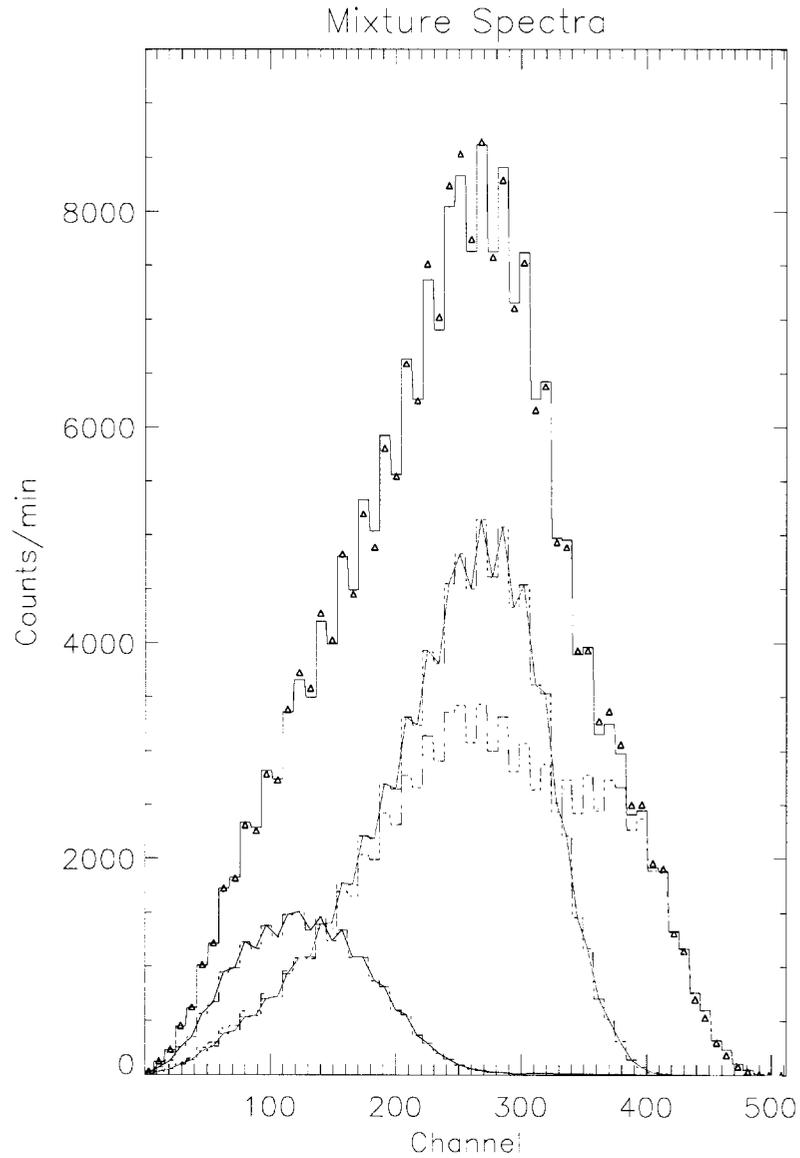


그림 3-95. 실험 IV - 혼합시료 Mix2에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix2의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix2에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

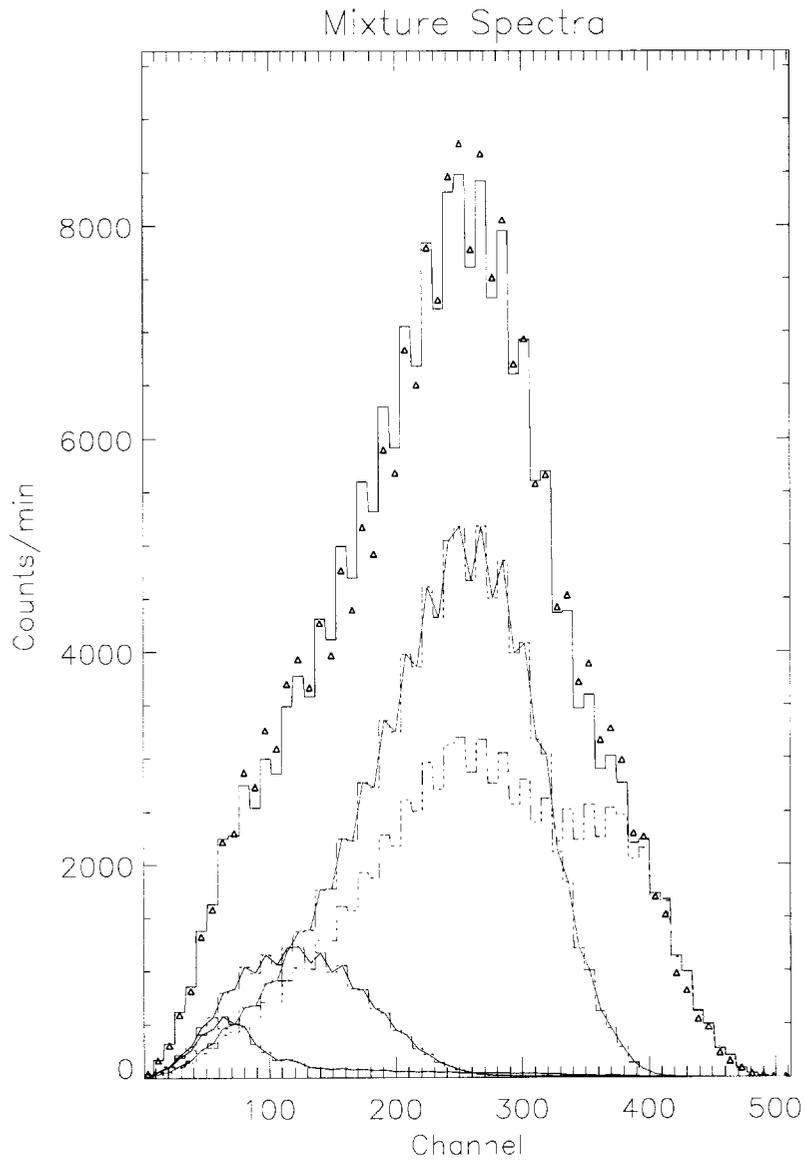


그림 3-96. 실험 IV - 혼합시료 Mix3에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix3의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix3에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

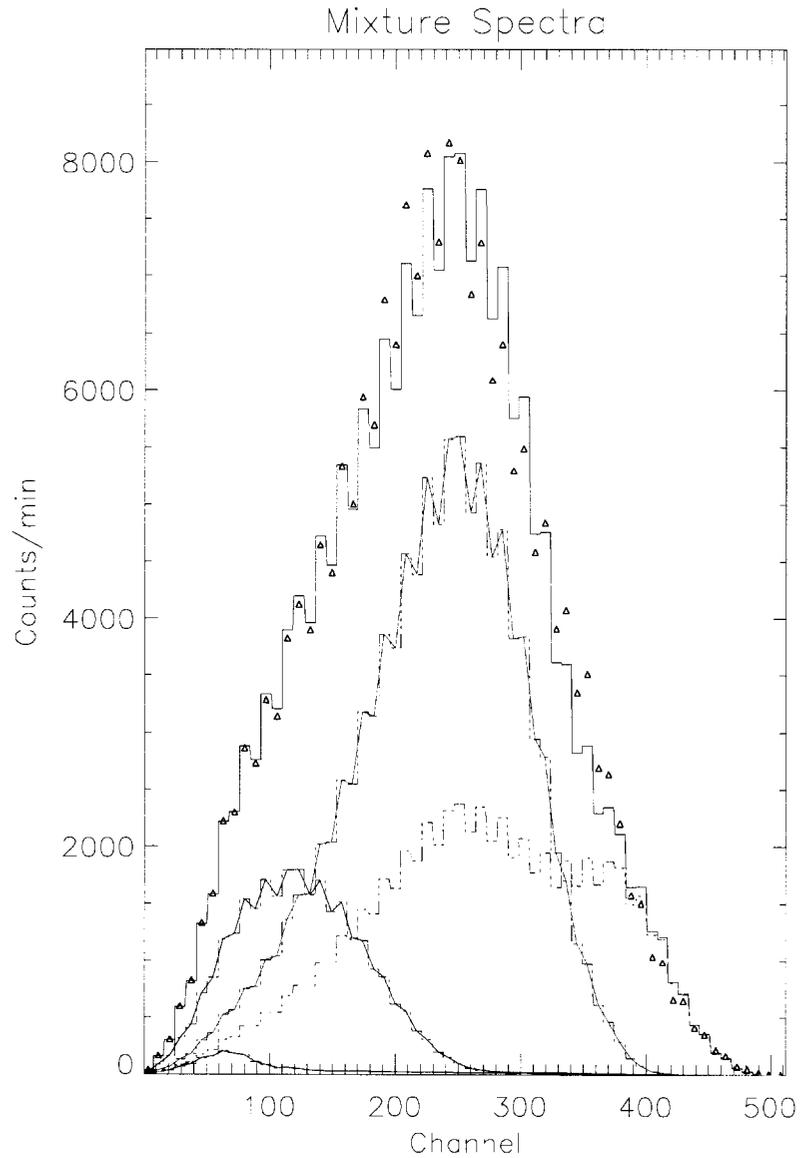


그림 3-97. 실험 IV - 혼합시료 Mix4에 대한 스펙트럼. 삼각형은 혼합시료 Mix4의 측정값을 나타내고, 최소자승법에 의해 계산된 값은 혼합시료 Mix4에 대해서는 연속선으로 된 히스토그램이다. 연속선 히스토그램 아래의 점선들은 분석을 위해 60채널을 사용한 경우에 대한 각 핵종별로 구해진 스펙트럼 모양이다. (파란색: ^3H , 보라색: ^{14}C , 빨간색: ^{36}Cl , 노란색: ^{90}Sr).

표 3-9. 실험 I, II, III, IV에 대한 각 혼합시료에 대해 계산된 방사능값 (Activity).

Experiment	Mixture	Ref Activity (dpm)	Nuclides	Mix Activity (dpm)	Difference (%)*
I	2	167901	^3H	56779.750	66.183
		101642	^{14}C	-3122.933	103.072
		106360	^{36}Cl	263089.930	147.359
		73680.8	^{90}Sr	31934.571	56.658
	3	167901	^3H	28254.414	83.172
		101642	^{14}C	-2039.558	102.007
		106360	^{36}Cl	314169.570	195.385
		73680.8	^{90}Sr	5126.849	93.042
	4	167901	^3H	313811.610	86.903
		101642	^{14}C	5168.771	94.915
		106360	^{36}Cl	12170.542	88.557
		73680.8	^{90}Sr	79874.110	8.406
II	2	167798	^3H	51628.215	69.232
		101642	^{14}C	-2309.629	102.272
		106360	^{36}Cl	12450.663	88.294
		73661.3	^{90}Sr	2755.950	96.259
	3	167798	^3H	30792.067	81.649
		101642	^{14}C	-2546.5063	102.505
		106360	^{36}Cl	12495.547	88.252
		73661.3	^{90}Sr	1370.883	98.139
	4	167798	^3H	211713.410	26.172
		101642	^{14}C	-2436.918	102.398
		106360	^{36}Cl	13404.004	87.398
		73661.3	^{90}Sr	20223.957	72.545
III	2	167463	^3H	716848.140	328.065
		101642	^{14}C	96643.189	4.918
		106359	^{36}Cl	176960.690	66.380
		73598.2	^{90}Sr	59047.479	19.771
	3	167463	^3H	46914.944	71.985
		101642	^{14}C	99771.702	1.840
		106359	^{36}Cl	174653.040	64.210
		73598.2	^{90}Sr	45180.427	38.612
	4	167463	^3H	180456.180	7.759
		101642	^{14}C	56312.037	44.597
		106359	^{36}Cl	81101.863	23.747
		73598.2	^{90}Sr	50373.039	31.557

표3-9. (계 속).

Corrected III	2	167463	³ H	778640.82	78.493
		101642	¹⁴ C	90654.125	12.120
		106359	³⁶ Cl	126014.08	15.597
		73598.2	⁹⁰ Sr	85336.891	13.755
	3	167463	³ H	482532.20	65.295
		101642	¹⁴ C	75103.214	35.336
		106359	³⁶ Cl	80523.705	32.085
		73598.2	⁹⁰ Sr	80818.126	8.934
	4	167463	³ H	-56089.439	-398.563
		101642	¹⁴ C	78367.033	29.699
		106359	³⁶ Cl	48849.234	117.730
		73598.2	⁹⁰ Sr	37466.093	96.439
IV	2	167463	³ H	-28961.090	-713.778
		101642	¹⁴ C	69654.869	45.918
		106359	³⁶ Cl	105732.960	0.593
		73598.2	⁹⁰ Sr	71964.715	29.797
	3	167463	³ H	822558.01	78.389
		101642	¹⁴ C	59997.740	69.405
		106359	³⁶ Cl	117623.560	9.576
		73598.2	⁹⁰ Sr	67628.755	38.118
	4	167463	³ H	307303.18	42.156
		101642	¹⁴ C	91423.886	11.173
		106359	³⁶ Cl	127200.060	16.384
		73598.2	⁹⁰ Sr	50657.922	84.389

* Difference (%) = (Calculated dpm - reference dpm) × 100 / reference dpm [Fujii et al, 1999]

제 4 장 연구개발 목표 달성도

이 연구는 다수 베타선 핵종 동시분석용 배수모니터 개발을 위해 5년 계획으로

- 1) 다수의 베타선 핵종 동시분석용 배수 연속모니터링 시스템 개념 및 회로설계 (1차년도)
- 2) 베타선 핵종 동시분석용 프로토타입 액체 섬광 검출기의 개발 (2차년도)
- 3) 베타선 핵종 동시분석기의 자동화를 위한 기기제어부 및 제어 알고리즘의 개발 (3차년도)
- 4) 베타선 핵종 동시분석기의 시료 자동주입장치 개발 및 표준 선원에 의한 종합 성능 평가 (4차년도)
- 5) 베타선 핵종 동시분석용 연속모니터링 종합 시스템 개발 및 성능시험 (5차년도)

의 순서대로 개발이 진행되고 있다.

이들 계획 중 “소광 효과 보정 알고리즘 개발“ 과제의 진도에 따라 1차년도 혹은 2차년도에서 미리 선행되어 수행 되었고, 2차년도 프로토타입 액체 섬광 검출기 개발에 이어 3차년도에서는 샘플 자동 측정 장치를 개발 완료하였다. 개발된 액체 섬광 검출기의 성능평가는 2차년도에 이미 수행되었으며, 그 결과 차폐체를 전혀 사용하지 않은 상태에서 수분동안의 측정만으로 법적 규제치 미만으로 충분히 검출 가능함을 확인하였다. 3차년도에 수행된 자동화를 위한 기기 제어부는 자동 샘플 측정 시스템 구현에 초점을 맞추었으며, 4차년도에서 시료 자동 주입장치를 추가 개발함으로써 배수 모니터 개발 하드웨어 부분을 완료하였다.

이러한 과정에서 수행된 연구 결과는 다음과 같다.

- 최소 자승법을 이용한 다수의 베타선 핵종 동시 분석법 알고리즘을 모의 실험 및 실제 혼합시료를 제조하여 연구

- 배수 모니터 시스템의 최적화 및 자동화를 위한 개념 설계
- 액체 섬광 검출기의 전체 구조체를 제작하기 이전에 개발하고자 하는 액체 섬광 검출기의 기본적인 특성을 구하기 위하여 납 차폐체가 없는 시험용 액체 섬광 검출기 챔버를 제작하였다. 이 챔버에는 동시 계수를 형성하는 2개의 광전자 증배관과 이와 관련된 회로가 수납되도록 광 차폐형으로 제작하였다. 이 챔버에 동시 회로용 전자회로를 연결하여 광전자 증배관의 기본적인 특성과 액체 섬광 검출기의 기본적인 특성을 구하였다.
- 액체 섬광 검출기의 전체 구조체의 설계 및 제작이 완료되었다. 설계, 제작 완료된 액체 섬광 검출기의 특성은 다음과 같다.
 - 배경 잡음을 줄이기 위한 차폐체 두께 조정 가능
 - 외부 선원(external source) 조사를 포함한 시료 측정 반자동화
 - 고전압 차단 회로를 이용한 광전자 증배관 보조 회로
- 동시 회로용 전자회로 기판 설계 및 제작
 - 2차년도 연구에서는 본격적인 액체 섬광체를 이용한 동시회로를 구성하기 위해 아날로그 회로 부분에서 1차년도에 제작하지 않았던 전치 증폭기 회로부를 설계 제작하였고, 증폭회로/동시회로 부분은 2개의 보드로 분리하고, 1차년도에 없었던 광전자 증배관 튜브 인가용 고압회로를 추가하여 회로를 완성하도록 하였다. 또한 시스템의 전원을 독립적인 방법으로 안전하게 공급할 수 있도록 DC/DC 변환 전원회로를 이용하여 독립적인 보드를 제작하였다.
 - 전치 증폭기 회로는 광전자 증배관의 양극 신호를 입력받아서 적당한 전하 증폭과 신호처리를 하기 위한 회로로 구성되어 있다. 또한 이 회로는 알파/베타 신호 분리를 위해 사용할 수 있는 타이밍 증폭회로를 추가하였다. 입력 전원은 +15V, -15V를 공급받고 회로의 크기는 37.5 × 63.5 mm 크기로 제작하였다.
 - 1차년 도에 제작되었던 증폭회로는 2채널 증폭, 동시 회로로 구성되었다. 그러나 광전자 증배관에 인가할 고전압 회로의 설치 및 이 값을 조정할 수 있는 보드가 추가로 필요하게 되었으며, 시스템의 복잡성을 피하고, 소규모로 다용도로 활용할 수 있는 증폭 및 고전압 회로를 포함하는 보드를 만들었다. 이렇게 함으로써 1채널 증폭회로를 사용할 수 있는

- 시스템에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 2채널을 사용할 경우 2개의 보드를 활용한 동시회로를 구성할 수 있는 개념을 추가하여 새로운 보드를 만들었다.
- 전원 회로 시스템에는 +15, -15V의 아날로그 전원과 +5V 디지털 전원이 필요하다. 시스템의 단순성을 위해 각 전원을 10W급 전력을 만들 수 있는 DC/DC 변환 전원 모듈을 이용하여 하나의 보드를 제작하였고, 또한 메인 DSP 회로가 가지지 못한 시스템 모니터링을 위한 ADC를 추가하여 자체 점검이 용이하도록 설계 제작하였다.
 - o 1차년도에 개발된 베타 핵종 방사능 분석 알고리즘을 실제 상황에 적용하기 위한 Windows 프로그램, LabWindows/CVI를 이용하여 사용자 편의를 위한 기초 프로그램을 다음과 같이 개발하였다.
 - 데이터 분석 자동화를 위한 기본 데이터 형식 결정
 - 데이터 획득 및 스펙트럼 view를 비롯한 기초 utility 개발
 - 표준 시료로부터 소광 보정 곡선 작성 프로그램 개발
 - GUI(Graphic User Interface)를 통하거나, 미리 정의된 채널 창(channel window)을 통하여 샘플링(re-sampling) 하기 위한 기초 프로그램 개발
 - 베타 핵종 분석 및 분석 결과 디스플레이를 위한 기초 프로그램 개발
 - o 차폐체를 전혀 사용하지 않은 상태에서 측정된 베타 스펙트럼으로부터 chi-square 추정 방법을 이용하여 검출 한계를 계산하였다. 법적 규제치 및 계산된 검출 한계와 비교하였고 ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl 의 경우는 유효한 전체 채널을 이용했을 때 수분 동안의 측정만으로 법적 규제치 미만으로 충분히 검출 가능하였다. ^{90}Sr 의 경우는 채널의 수를 10개미만으로 줄이고, 측정 시간을 20분 이상으로 하였을 때, 법적 규제치 미만으로 검출 가능함을 알 수 있다.
 - o 1차년도 연구를 통해 채널의 개수가 8개인 경우도 충분히 핵종별 방사능 값을 구할 수 있었으므로 ^{90}Sr 이 포함된 혼합 시료에 대해서도 20분 이상 측정을 수행한다면 충분히 베타 핵종 분석이 가능함을 보았다.
 - o 3차년도의 연구를 통해 기기 제어부 설계 및 제작이 완료 되었으며, 2차년도에 제작된 액체 섬광 검출기 시스템과 통합 구성이 완료되었다. 기기 제어부는 스테핑 모터와 공압을 이용한 자동 샘플 측정 시스템이며 소스

이동, 샘플 이동, 외부 감마선 조사 제어 등을 위한 공압 및 모터를 이용한 위치 제어부로 구성되며 제어를 위한 알고리즘을 개발하였다.

- 4차년도 연구를 통해 모터와 공압기기를 이용한 시료 캠핑 장치 설계 및 제작 완료하였고, 또 공압기기, 위치 이동계 제어용 시스템 설계 및 제작, 정량펌프 및 밸브를 이용한 배수 시료와 액체 섬광체 자동 혼합 장치 설계 및 제작하였다. 시스템의 구성적 측면에서는 전자부, 메인 컨트롤러, 시료 자동 주입 장치, 배수 시료와 액체 섬광체 자동 혼합부인 기계부, 제어부를 연속 모니터링 시스템으로 통합 구성하였고, 데이터 획득과 주변 기기 제어를 위한 다수 베타선 핵종 동시 분석 프로그램을 제작하여 통합 구성된 연속 모니터링 시스템에 적용하였다. 또한 시스템의 종합 성능을 위한 평가 실험을 수행하였다.
- 5차년도 연구에서는 베타선 핵종 동시 분석용 연속 모니터링 종합 시스템 시제품을 개발하고, 종합 성능 평가 시험에서 도출된 개선 사항을 보완하여 종합 성능 시험을 실제 환경에서 실시하도록 할 예정이다.

제 5 장 연구 개발 결과의 기대성과 및 활용 계획

- 국내에서는 처음으로 배수 중 다수 베타선 핵종을 동시 분석할 수 있는 배수 모니터를 개발함으로써 국산화에 따른 외화 절감 효과가 기대됨.
- 국내 방사선 감시기 개발 분야의 기술 향상을 기대할 수 있을 것임.
- 원자력 관련 시설 및 RI 사용 시설 등 현장에 직접 활용함으로써 원자력 관련 시설에 대한 환경 감시 업무를 효율화하여 환경 감시에 필요한 인력 및 시간을 절감할 수 있을 것으로 기대됨.
- 원자력 관련 시설 및 RI 사용 시설에 대한 실시간 연속 감시가 가능하여 보다 정확하고 철저한 규제가 가능할 것으로 기대됨.
- 본 연구에서 개발한 다수 베타선 핵종 동시 분석형 배수 모니터 시스템은 원자력 관련 시설 및 RI 사용 시설의 환경 감시 업무 수행에 유용하게 활용될 것이며, 규제 기관 입장에서는 검사 대상 관련 시설에 대한 방사성물질 방출 관리에 관한 검사 업무에 적극 활용할 수 있을 것임.
- 방사선사고 발생시 방사능 농도가 높은 특정 지역의 방사선 준위를 실시간으로 모니터링에 효율적으로 활용될 것임.
- 배수 중에 존재하는 다수의 베타 핵종으로부터 얻어지는 중첩된 베타선 연속스펙트럼을 분별 정량하는 스펙트럼 해석 알고리즘 및 자동 측정 구동 시스템은 방사성 핵종 분석 외에 다른 분석 방법에도 적용 가능할 것으로 판단됨.

제 6 장 참고문헌

1. Bevington, P. R., Robinson, D. K. (1992) *Data Reduction and Error Analysis for The Physical Sciences*, 2nd ed., pp115-140, McGraw-Hill, Inc., New York
2. Glass, D. S. (1970) *Int. J. Appl. Radiat. and Isot.* 21, 531
3. Oller, W. L., Plato, P. (1972) *Int. J. Appl. Radiat. and Isot.* 23, 481
4. Plato, P., Oller, W. L. (1975) *Nucl. Instr. and Meth.* 125, 177
5. Snipes, M. B., Lengemann, F. W. (1971) *Int. J. Appl. Radiat. and Isot.* 22, 5136
6. Veen, H. (1974) *Int. J. Appl. Radiat. and Isot.* 25, 355

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호		
	KINS/HR-592		
제목/부제	다수 베타선 핵종 동시 분석형 배수 모니터 개발 (IV)		
연구위탁기관 과제명 및 과제책임자	방사능 방재 환경 규제 기술개발/김창규		
연구자 및 부서명	남육원/한국천문연구원 우주과학그룹		
발행지		발행기관	한국천문연구원
		발행일	2004. 2. 29
페이지	p.	도표	유 (○), 무 ()
		크기	cm.
참고사항			
비밀여부	공개(○), 비공개()	보고서 종류	
연구위탁기관	한국원자력안전기술원	계약 번호	
초록 (200단어 내외)	<p>1) 4차년도에서는 현재까지 개발된 시스템의 특성을 더 안정화시키고, 자동 샘플 교환 장치로써 시료와 액체 섬광체의 자동 혼합 장치를 설계 및 제작하여 연속 모니터링이 가능하도록 하였다.</p> <p>2) 시료의 자동 이송 및 주입, 샘플 병(sample bottle)의 밀봉 및 검출부에 자동 장착 등의 기계적인 부분을 설계 및 제작하여 완전히 통합 시스템으로 구축하였으며, 실험을 통하여 통합 시스템의 핵종 분석 성능을 조사하였다.</p> <p>3) RS-232통신 방식을 이용하여 모든 측정 자료를 중앙 컴퓨터로 전송하고 또한 중앙 컴퓨터에서 조작 및 제어가 가능하도록 PC용 다수 베타선 핵종 동시 분석 및 제어 프로그램을 개발하였다.</p>		
주제명키워드(10단어 내외)	<p>액체섬광계수기 (Liquid Scintillator Dector), 배수 연속 모니터 시스템, 다중 베타 핵종 동시 분석, 시료 자동 교환 장치, 시료 자동 혼합 장치</p>		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.		
	KINS/HR-592		
Title/Subtitle	Development of Continuous Monitor of Multiple Beta-Ray nuclides in Liquid Radioactive Waste (IV)		
Sponsoring Org. Project and Project Manager	Development of radioactive protection environment control technology/Chang-Kyu Kim		
Researcher and Dept.	Uk-Won Nam/ Korea Astronomy Observatory Space Science Research Group		
Pub. Place	Pub. Org.	Korea Astronomy Observatory	Pub. Date 2004. 2. 29
Page	p. Il. and Tab.	Yes (<input type="radio"/>), No (<input type="radio"/>)	Size cm.
Note			
Classified	Unclassified(<input type="radio"/>), Classified(<input type="radio"/>)	Report Type	
Sponsoring Org.	Korea Institute of Nuclear Safety	Contract No.	
Abstract (About 200 Words)	<p>1) In the 4th fiscal year, the performance of the system developed in previous year have been stabilized. An automatic mixer system to mix the liquid radioactive waste with the liquid scintillator was designed and manufactured to make continuous monitoring possible.</p> <p>2) Mechanical systems for the automatic transfer, injection of radioactive samples, and for sealing sample bottle and its attachment on detector system have been designed and developed for completely integrated system. The experimental has been performed for the radioactive analysis by using the system.</p> <p>3) The measured data are transferred to central computer, which controls the monitoring system, through the RS-232 communication protocol. A software for host personal computer was developed for the control and analysis of the integrated system.</p>		
Subject Keywords (About 10 Words)	Liquid scintillation detector, Continuous monitor system of liquid radioactive waste, Simultaneous radioassay of multiple beta-ray nuclides, Mechanical systems for the automatic transfer of samples, Mechanical systems for the automatic mixing of radioactive of samples		