

## Development of Prototype Liquid Scintillator System for Monitoring Liquid Radioactive Waste

Uk-Won Nam · Kwang-II Seon · Kyoung-Nam Kong ·  
Chang-Kyu Kim\* · Dong-Myung Lee\* · Sang-Kook Lee\*

Korea Astronomy Observatory, \*Korea Institute of Nuclear Safety

### 배수 모니터링 액체섬광검출시스템의 프로토 타입 개발

남옥원 · 선광일 · 공경남 · 김창규\* · 이동명\* · 이상국\*

한국천문연구원, \*한국원자력안전기술원

(2003년 4월 2일 접수, 2003년 7월 15일 채택)

**Abstract** - A prototype liquid scintillator system for measurement of multiple beta-labeled mixtures was developed and its characteristic was investigated. The signal processing system consists of two photomultiplier tubes and the coincident count circuit. The characteristic of the system was analyzed using 4 beta-labeled samples ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  and  $^{90}\text{Sr}$ ). Beta spectra from the samples were obtained without radiation shielding, and the detection limits for each nuclides were estimated based on the spectra. The estimated detection limits were compared to the legal regulation values. It is found that the liquid radioactive nuclides are detectable well below the legal regulation values.

**Key words** : Monitoring system of liquid radioactive waste, Multiple beta-labeled samples, Liquid scintillator, Detection limit, Radioassay

**요약** - 베타선 방출 핵종 측정을 위한 프로토 타입(prototype) 액체섬광검출기를 개발하고 이의 특성을 분석하였다. 액체섬광계수시스템의 신호처리부는 2개의 광전자증배관(photomultiplier tube, PMT)과 동시 계수 회로를 이용하여 구성하였다. 제작한 프로토 타입 시스템의 특성 분석을 위하여 4종류의 베타 핵종 ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ )에 대한 샘플을 조제하여 베타 스펙트럼을 측정하였다. 차폐체를 전혀 사용하지 않은 상태에서 측정된 4종류의 핵종에 대한 베타 스펙트럼을 구하고, 최소 검출 한계를 계산한 다음, 법적 규제치 및 계산된 검출한계와 비교하였다. 이들 대부분의 선원들은 수분이내의 측정으로 배수중 방사선물질에 대한 법적 규제치 이하로 충분히 검출 가능함을 확인하였다.

**중심어** : 배수 모니터 시스템, 다중 베타선 핵종 혼합물, 액체섬광계수기, 검출한계, 핵종분석

### 서 론

일반적으로 방사선동위원소 사용시설에서 배출물 감시는 배출물 저장탱크의 샘플을 일시적으

로 채취하여 분석하는 방법이다. 그러나 이러한 기존의 방법은 배출물에 대한 상시 감시가 곤란하며, 매번 샘플을 채취하는 번거로움이 있다. 또한, 여러 종류의 베타 방출 핵종이 혼재되어 있는

배출물을 액체섬광계수기를 이용하여 측정하는 기존의 방법에서는 샘플로부터 얻어지는 베타선의 연속스펙트럼이 서로 중첩되기 때문에 핵종별로 별도로 화학분리해서 각각의 핵종을 정량 분석해야 하는 단점이 있다. 따라서 이와 같은 기존의 방사성동위원소 배출물 감시방법의 단점을 보완하고 효율화하기 위하여 배출물 감시를 실시간 연속 및 자동으로 감시할 수 있는 배수 모니터 시스템을 개발하여 실용화하고자 한다. 이 연구의 일환으로써, 여러 종류의 베타선의 중첩된 연속스펙트럼으로부터 베타선 핵종을 개별 정량분석을 할 수 있는 분석 알고리즘을 연구하였으며[1], 배수 모니터 시스템의 개념 설계 및 동시 MCA (Multichannel Analyzer) 회로[2], 동시 계수 신호 처리회로[3]를 개발하였다.

개발 중인 배수시료중 베타선 방출핵종의 연속 모니터 시스템은 환경준위의 저준위 방사능 측정보다는 비교적 방사능 준위가 높은 배수시료내 베타선 방출 핵종을 자동적으로 감시할 수 있는 장비로서, 시스템의 경량화와 샘플 측정의 안정화 및 재현성에 연구의 초점을 맞추었다. 본 논문에서는 배수 연속 모니터링을 위해 개발된 프로토타입 액체섬광검출시스템에 대하여 소개하고, 프로토타입

타입 시스템을 이용하여 측정된 표준 시료의 베타 스펙트럼으로부터 이 시스템의 안정성과 시스템의 최소 검출 한계를 구하여 시스템의 특성을 조사하였다.

### 프로토타입 액체섬광검출시스템 제작

#### 배수 연속 모니터링 시스템 개념 설계

배수 연속 모니터링 장치의 액체섬광검출기는 기존의 저선량 측정을 위한 액체섬광검출기와는 달리 저선량을 측정하는 것이 아니고 배수의 베타 핵종 규제치를 제한하고자하는 목적에 따라 시스템의 경량화와 샘플 측정의 안정화 및 재현성에 초점을 맞추었다. 따라서, 배수 모니터 시스템의 최적화를 위해 다음 사항을 고려하였다. (1) 납 차폐만 사용하며, 백그라운드 레벨은 기존의 액체섬광검출기보다 100배정도 높은 수준의 선량을 측정할 수 있도록 한다. (2) 또한 백그라운드를 줄이기 위해 2개의 광전자증배관을 이용한 동시 회로를 적용한다. (3) 핵종의 계수 효율을 외부 표준 선원비(ESCR)법에 따라 결정하며 이를 위해 <sup>137</sup>Cs 선원을 사용한다. (4) 샘플 교환장치,

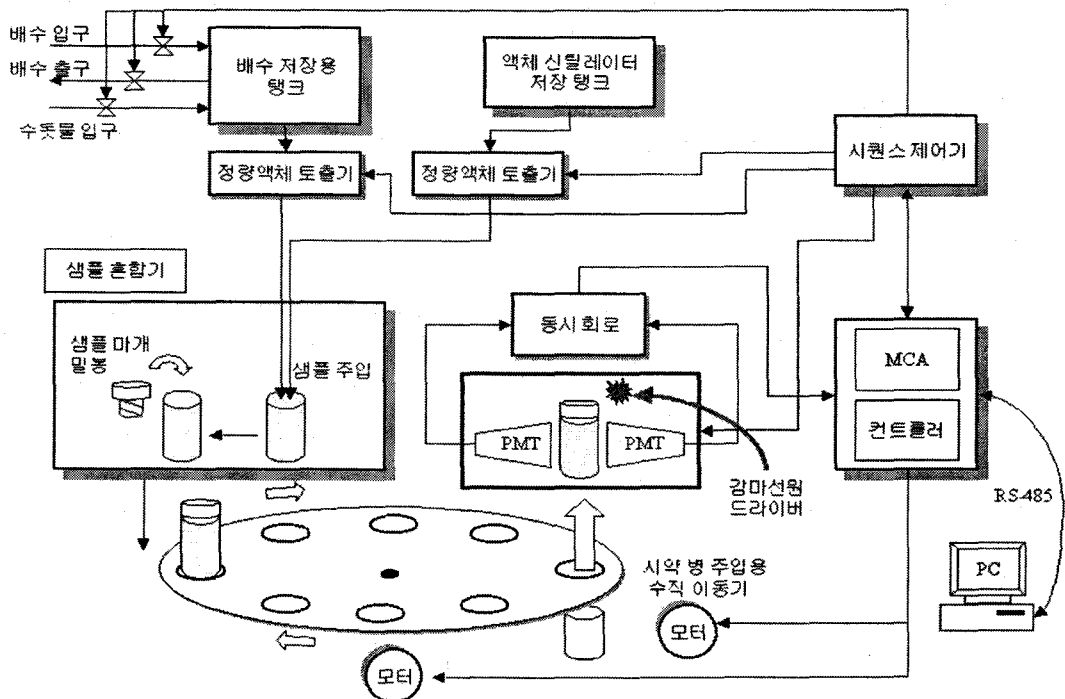


Fig. 1. Block diagram of continuous Beta-ray monitor system

샘플 제조 및 샘플 측정을 자동화한다. (5) 모니터링 장치를 이용한 핵종 분석 및 데이터 가공을 자동화한다. (6) 시스템 설치 공간을 고려하여, 설치 용이성을 높인다.

이러한 기능을 갖는 배수 모니터 시스템의 기본 구성은 그림 1과 같다. 배수 저장 탱크에는 배수의 입구와 출구가 있으며 측정후 세척을 위한 용액 유입 부분도 포함하도록 설계하였다. 또한, 이를 제어하기 위한 전자 밸브를 갖추어야 한다. 배수 저장 탱크에서 정량 토출기를 사용하여 20 ml의 배수시료를 용량 50ml의 플라스틱 용기에 담는다. 이 용기에 액체섬광체 보존 용기로부터 정량 토출기를 사용하여 30ml의 액체섬광체를 분사하여 배수 시료와 균일하게 혼합하여 샘플을 제조한다. 제작된 샘플을 담은 용기는 측정할 때마다 교환하도록 하여 오염에 의한 백그라운드 최소화 되도록 한다. 제조된 측정 시료는 자동 전송 장치를 이용하여 액체섬광검출기로 삽입한다. 섬광검출부는 보통의 액체섬광측정장치와 마찬가지로 2개의 광전자증배관을 사용하여 동시 계수 회로를 구성한다. 이렇게 함으로써 광전자증배관으로부터 들어오는 잡음펄스를 제거하고 백그라운드에 의한 계수율을 줄일 수 있으며,  $^3\text{H}$ 등과 같은 낮은 에너지를 갖는  $\beta$ 선원에 대한 계수효율을 향상시킬 수 있도록 하였다. 동시계수회로에서 나오는 출력펄스는 512채널이상의 MCA를 이용하여 에너지 스펙트럼을 구한 후 핵종 분석법에 따라 핵종과 각 핵종별 방사능의 세기를 결정한다. 또 각 영역에서 각 핵종의 계수효율을 외부표준 선원비법에 따라 결정하기 때문에, 이를 위해 액체섬광 측정 장치에는 약 10 MBq의  $^{137}\text{Cs}$  밀봉  $\gamma$  선원을 삽입할 수 있도록 고려하였다. 측정 종료 후 샘플 교환 장치를 이용하여 액체섬광검출기로부터 샘플을 회수하고 새로운 샘플을 측정하도록 한다. 샘플 하나당 측정소요 시간은 약 1 시간정도 이므로 12개/1일 이상의 빈 용기를 설치할 수 있도록 샘플 교환 장치를 설계하였다. 또한, 비교적 작은 공간에 여러 개의 샘플을 교환할 수 있도록 샘플 교환 장치를 원형으로 설계하였다.

**프로토타입 액체섬광검출시스템**

제작된 프로토타입 챔버는 그림 2와 같이 19인치 표준랙에 설치하였으며, 이의 주요 구성 부분들은 다음과 같다.

(1) 광전자증배관을 광차폐시키고 샘플 병을 광차폐시키는 검출기 챔버 부분 :

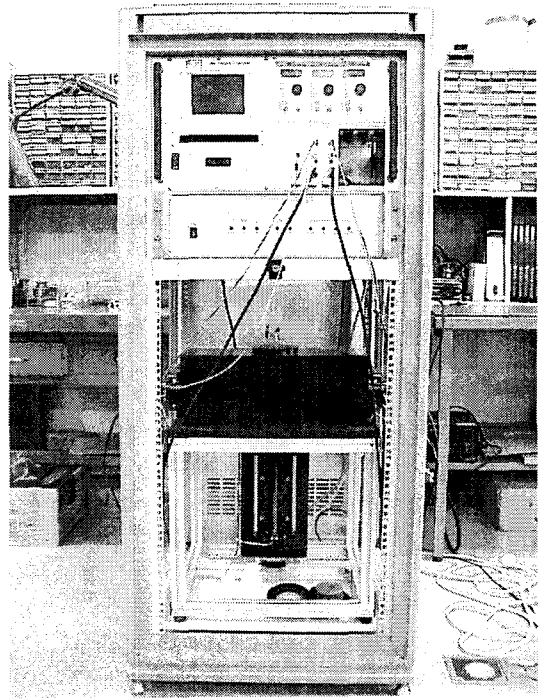


Fig. 2. Prototype Liquid Scintillation Counter System

액체섬광계수기를 본격적으로 제작하기 이전에 개발하고자 하는 액체섬광계수기의 기본적인 특성을 구하기 위해 납 차폐체가 없는 시험용 액체섬광계수기 챔버를 그림 2와 같이 제작하였다. 이 챔버에는 동시 계수를 형성하는 2개의 광전자증배관과 이와 관련된 회로가 수납되도록 광차폐형으로 제작하였다. 이 실험의 목적은 납 차폐가 없는 시스템에서 백그라운드가 베타 동시 측정에 얼마나 영향을 미치는지 살펴보고자 함에 있으므로 납 차폐는 고려하지 않았다. 이 실험에 사용된 광전자증배관은 하마마츠사의 Head-On type인 R331-05를 사용하였다. 광전자증배관의 파장 반응대는 300 - 650 nm이고, 피크 파장대는 420 nm 이다.

(2) 외부 표준 감마 선원 조사 및 차폐를 위한 납 차폐물 부분:

핵종의 계수 효율을 측정하기 위해 외부 표준 선원비법을 채택하고 있으므로 외부 표준 감마 선원을 조사할 수 있는 구조가 필요하다. 이를 위해 외부 표준 감마 선원을 매달고 있는 회전 막대를 샘플에 조사시키는 위치로 옮겼다가 다시 차폐 위치로 이동시키는 동작을 수행하도록 하여 이동 공간의 거리를 줄이고 차폐 납의 무게를 줄

이도록 고안하였다. 이 동작을 수행하기 위해 스테핑 모터를 사용하였으며, 두 개의 리미트 스위치를 180도 위치에 두어, 외부 표준 감마 선원 조사와 차폐가 원활하게 되도록 하였다. 차폐체로서는 납과 구리를 사용하였으며, 납의 경우 1 MeV의 감마선이 99.9% 차단되도록, 구리의 경우 80 keV의 X-선이 99.9% 차단되도록 설계하였다.

(3) 샘플을 검출기 챔버내로 이송시키는 이동부(모터 구동 부분):

샘플 병 이송 장치는 구동 모터가 구동 모터 컨트롤러에 의해 상하 수직으로 이동하면서 측정하고자하는 샘플 병을 챔버 안까지 밀어 올려주어 광차폐시키고, 측정 후 샘플 교체시 샘플 병을 챔버에서 꺼내주는 역할을 한다. 현재는 반자동 형식으로 설계했지만 추후 샘플 자동 교환 장치로 대체할 예정이다.

회로의 구성

베타선 방출 핵종 측정을 위한 액체섬광계수기의 검출부 구성은 그림 3과 같이 샘플을 중심에 두고 광전자증배관을 양쪽에 설치하여 동시 회로를 통해 동시에 검출된 신호에 대해서만 신호처리를 하는 회로로 구성된다. 일반적으로 고속 동시 회로를 구성하기 위해서 광전자증배관 출력부터 고속 로직신호가 필요하지만, 본 연구에서는

광전자증배관의 양극(anode) 출력단자에서 나오는 신호를 전치증폭기와 신호 정형 회로를 통해 먼저 증폭하여 정형시킨 후 이로부터 얻은 타이밍 신호를 이용하여 동시 신호를 분석함으로써 고속 동시 회로의 복잡성과 난이도를 해소하였다.

베타 핵종 분석용 MCA 회로는 디지털 시그널 프로세서 (DSP, Digital Signal Processor, TMS320C32) 회로를 활용하여 동시 계수 방식을 구현하도록 하였다. MCA 회로는 시스템의 업그레이드, 유지 보수 등에 편리하도록 (1)전치증폭 회로, (2) ADC(Analog to Digital Converter) 회로, (3)디지털 신호처리를 담당하는 DSP 회로 등으로 분리하여 제작하였다. 특히 ADC 회로는 주 ADC와 보조 ADC로 회로를 나누어 제작하여 2 채널 MCA 회로가 가능하도록 하였다. 각 ADC 회로는 광전자증배관을 인가하기 위한 고전압 모듈과 자체의 증폭기 및 피크홀드 및 AD 변환을 위한 타이밍 펄스를 만들어 내는 기능을 갖추고 있다. 보조 ADC 회로에서 나오는 동시신호 분석을 위한 타이밍 펄스는 주 ADC로 연결되며, 주 ADC 회로에서 동시신호 분석을 수행한다. 만약 동시 신호이면 DSP로 인터럽트 신호를 보내어 각 회로로부터 ADC 값을 읽어 파고분석스펙트럼을 만들도록 하였다. 이러한 방식을 통해 좌우의 광전자증배관으로부터 독립적인 스펙트럼 분석이

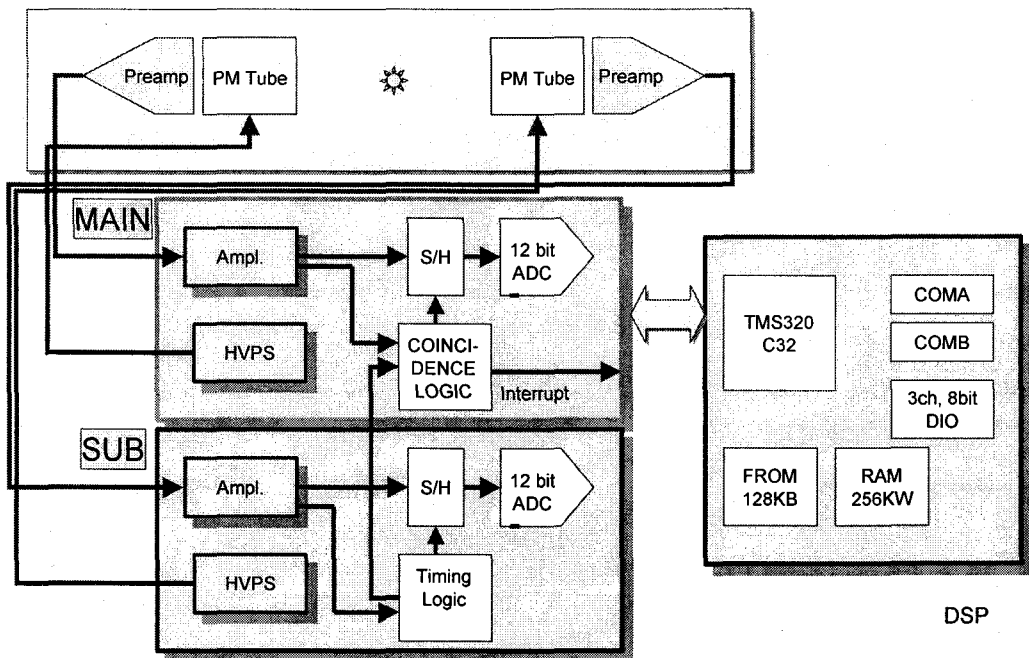


Fig. 3. Blockdiagram of Improved Coincidence Circuits

가능할 뿐만 아니라 PAC(Pulse Amplitude Comparison) 기능이 가능하도록 하였다.

에너지 측정을 위해 4,096 채널의 다중 채널이 형성되도록 12 비트 ADC를 사용하였으며, 사용된 ADC는 약 3μs의 변환시간을 갖고 있으며, 시스템은 20 μs의 고정된 불감시간 (dead time)을 갖도록 설계하였다. 따라서 이 ADC를 이용하여 MCA(다중과도분석회로)를 구성하면 4,096 채널이 형성되지만, 베타 핵종 분석 시험에서는 512 채널 정도로도 충분히 스펙트럼 분석이 가능하므로 512 채널로 스케일을 줄여서 사용하여 데이터 처리속도 증가와 데이터 관리의 효율성을 높였다.

### 시험 결과 및 분석

#### 검출한계 계산 방법

표준 시료의 측정 스펙트럼과 백그라운드 스펙트럼으로부터 개발된 액체섬광계수시스템의 검출한계를 통계적인 방법에 의해 예측할 수 있다. 검출한계 계산을 위해  $N_i$ ,  $B_i$  및  $S_i$  를 각각  $i$ 번째 채널에서 측정된 시료의 백그라운드가 포함된 총 계수값(counts), 백그라운드의 측정 계수값 및 백그라운드를 제외한 시료만의 예상 계수값이라고 정의하고,  $T_s$ ,  $T_b$  를 각각 시료와 백그라운드 측정시간(분)으로 정의하자. 또한  $N_i$ ,  $B_i$ ,  $S_i$  에 대응하는 계수율(count rate, counts/min)을 각각 소문자  $n_i$ ,  $b_i$ ,  $s_i$ 로 나타내기로 한다.

엄밀한 의미에서 Poisson statistics를 처리하기 위해서는 chi-square statistics를 이용할 수 없지만, Poisson statistics에 대한 통계 처리 방법이 잘 알려져 있지 않고, 또한 계수값이 충분히 많은 경우에 Poisson statistics는 정규분포를 따르게 되어 이때는 chi-square statistics를 이용할 수 있다. 따라서 편의상 chi-square statistics를 이용하기로 하고, 채널의 개수를  $\nu$ 라고 나타내면 chi-square statistic  $\chi^2$ 값은

$$\begin{aligned} \chi^2 &\equiv \sum_{i=1}^{\nu} \left( \frac{S_i}{\sigma_{S_i}} \right)^2 \\ &= T_s \sum_{i=1}^{\nu} \frac{[n_i - b_i(T_b/T_s)]^2}{n_i + b_i(T_b/T_s)} \end{aligned}$$

으로 정의되며, 이때, 만약  $N_i$  와  $B_i$  가 완전히 동일한 분포함수를 따르는 데이터라면 데이터로

부터 계산되는  $\chi^2$ 값이 특정한  $\chi_0^2$ 값 보다 클 확률은  $Q(\chi_0^2|\nu) = Q(\nu/2, \chi_0^2/2)$ 으로 표현되며, 이때  $Q(\nu/2, \chi^2/2)$ 는 incomplete gamma function 이다[4].

따라서,  $S_i$  가 백그라운드의 통계적인 fluctuation이 아닌 의미 있는 값일 확률(즉,  $N_i$  와  $B_i$ 가 서로 다른 분포함수를 따를 확률)은 측정치로부터 계산된 chi-square statistic 값이  $\chi^2$ 일 때,  $Q(\chi^2|\nu)$  이 된다. 따라서 다음과 같은 방법으로 검출한계 값을 계산할 수 있다.

- 1) 충분히 오랜 시간동안 표준시료 및 백그라운드를 측정하여 시료 및 백그라운드에 대한 스펙트럼을 충분히 정확하게 측정하였다고 가정하면, 백그라운드를 제거한 표준시료의 계수율은  $s_i = n_i - b_i(T_b/T_s)$ 가 된다.
- 2)  $s_i$ 는 표준시료의 방사능 값(activity)  $A_0$ 에 대한 스펙트럼이므로 방사능 값이  $A$ 일 때 예상되는 시료의 스펙트럼은  $(A/A_0)s_i$ 가 된다.
- 3) 시료의 측정시간과 백그라운드 측정시간이 같다면 시료의 방사능 값이  $A$ 일 때 예상되는  $\chi^2$ 은 아래와 같다.

$$\chi^2 = T_s \sum_{i=1}^{\nu} \frac{[(A/A_0)s_i]^2}{(A/A_0)s_i + 2b_i} \quad (1)$$

- 4) 시료의 방사능 값이  $A$ 일 때 의미 있는 데이터를 검출할 확률 또는 검출 신뢰도는  $Q(\chi^2|\nu)$ 값이 된다.
- 5) 3  $\sigma$ (99.73%)의 신뢰도로 의미 있는 검출을 하기 위해서는  $Q = 0.9973$ 가 되는  $\chi^2$ 로부터 시료의 방사능 값  $A$ 를 구하면, 이 값이 검출한계값이 된다.

$\chi^2$ 값이 측정시간에 비례하므로 만약 백그라운드 및 시료의 계수율이 시간에 따라 일정하다면 이상적으로는 아무리 계수율이 약한 시료라 하더라도 충분한 시간 동안 측정을 하면 검출 가능하다. 그러나 실제로는 백그라운드 및 시료의 계수율이 시간에 따라 변하고 측정 가능한 시간의 제약이 있으므로 검출 한계가 이에 따라 결정된다.

측정한계 예상값의 대략적인 경향은 자유도가 1인 경우를 예를 들면 쉽게 알 수 있다.  $s$ 를 소광(quenching) 효과에 의한  $A_0$ 의 감소율을 나타낸다고 했을 때, 백그라운드 측정시간과 시료의 측정시간이 같고  $3\sigma$ 의 신뢰도를 구한다고하면  $\chi^2 = 9$ 로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$(A/A_0)s = \frac{9 + 3\sqrt{9 + 8bT_s}}{2T_s}$$

따라서 의미 있는 시그널이 충분히 큰 경우(시그널이 높고 측정시간이 작아도 되는 영역)에서는 측정시간에 반비례하는 경향을 보이고, 백그라운드가 큰 경우(시그널이 낮고 측정시간이 많이 필요한 영역)에서는 측정시간의 제곱근에 반비례하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 실제 측정된 스펙트럼으로부터 얻어지는 검출한계의 측정시간에 따른 변화 그래프로부터 확인할 수 있다(그림 7b).

시험 및 분석

$^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  4개의 시료에 대해 20ml의 샘플병을 이용하여 5개의 소광 수준(quenching level)을 갖는 표준시료를 제조하였으며, 그 중 소광 수준이 가장 작은 표준시료들에 대해서 얻은 표준 스펙트럼을 이용하여 검출한계를 계산하였다. 표 1은 검출한계를 계산하기 위해 제조된 샘플의 혼합비율을 보여준다. 그림 4는 1,300V의 고

Table 1. Preparation of samples

|                  | kit(ea) | H <sub>2</sub> O(g) | Ultimagold-LLT(ml) | Total(ml) |
|------------------|---------|---------------------|--------------------|-----------|
| $^3\text{H}$     | 1       | 2                   | 18                 | 20        |
| $^{14}\text{C}$  | 1       | 2                   | 18                 | 20        |
| $^{36}\text{Cl}$ | 0.9996  | 1                   | 18                 | 20        |
| $^{90}\text{Sr}$ | 0.5002  | 1.5                 | 18                 | 20        |

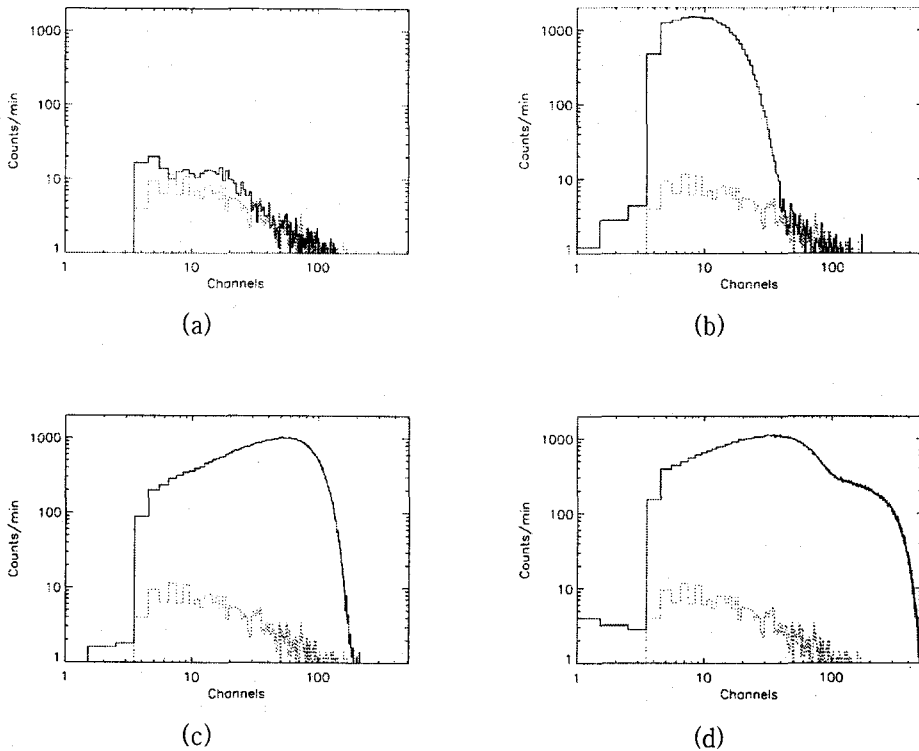


Fig. 4. Beta Spectra of (a)  $^3\text{H}$ , (b)  $^{14}\text{C}$ , (c)  $^{36}\text{Cl}$  and (d)  $^{90}\text{Sr}$ , which are measured using the prototype liquid scintillator system. Dashed lines represent the background spectrum for all spectra.

전압을 가한 경우, 각 표준선원에 대해 300초간 측정된 스펙트럼을 보여준다. 각 스펙트럼의 채널은 512 채널로 설정하였으며, 각 그림에서 실선은 백그라운드가 포함된 표준시료의 스펙트럼이고, 점선은 백그라운드의 스펙트럼이다. 그림 4의  $^3\text{H}$ 의 경우 표준선원과 백그라운드의 스펙트럼이 서로 비슷한 수준으로 나타나고 있지만 다른 시료에 대하여는 백그라운드가 선원의 최대 피크 계수값의 1/100정도임을 볼 수 있다.

표 3은 측정시간 별로 각각의 핵종에 대해 계산된 측정한계치를 나타낸다. 검출한계 계산을 위하여 전체 스펙트럼 채널의 512 채널을 전부 사용하지 않고 표 2에 나타난 바와 같이 피크 채널에 해당하는 부분 스펙트럼만을 사용하였다.  $^{90}\text{Sr}$ 을 제외한 다른 시료는 binning하지 않고 해당되는 채널을 그대로 사용하였으며,  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우는 500개의 채널을 그대로 사용한 경우(SR-90a)와 채널을 re-binning해서 채널의 수를 줄이고 통계를 좋게 만든 3가지 경우(SR-90b, c, d)에 대하여 검출 한계 계산을 수행하였다 (표 2). 채널을 re-binning하면 한 채널당 계수값이 증가하게 되어 신호 대 잡음비가 커지기 때문에 검출한계를 낮출 수가 있다. 그러나 스펙트럼 정보가 손실되기 때문에 지나치게 채널을 줄이게 되면 혼합시료의 스펙트럼으로부터 핵종분석이 불가능해진다 [1].

검출한계 계산의 예를 들자면 SR-90b의 경우 자유도는  $\nu = 10$  이고,  $3\sigma$ 의 검출한계에 대하여

요구되는  $\chi^2$ 값은  $Q(\chi^2|\nu) = 0.9973$ 으로부터 최소한  $\chi^2 = 26.90$  이상이어야 한다. 그림 5는 표 2의 SR-90b에 대하여 검출한계를 계산하기 위해 activity에 대하여 예상되는  $\chi^2$ 값을 나타내며 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 그림 5를 이용하면 측정시간( $T_s$ )이 1분일 때  $3\sigma$ 의 검출가능성을 갖기 위한 최소한의 activity는  $A/A_0 = 1.08 \times 10^{-3}$  으로부터 약 83 Bq/l ( $A_0 = 7.7 \times 10^4$  Bq/l)임을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 표 3을 계산하였다.

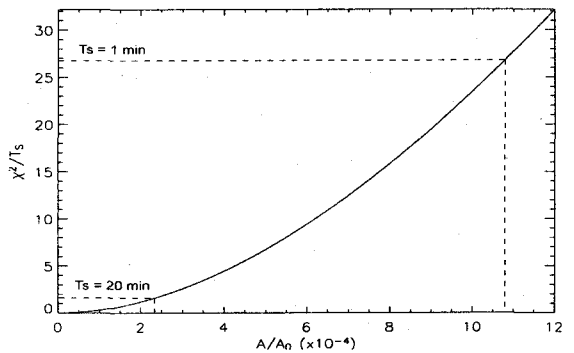


Fig. 5. Chi-square value versus activity for the sample SR-90b in table 2.

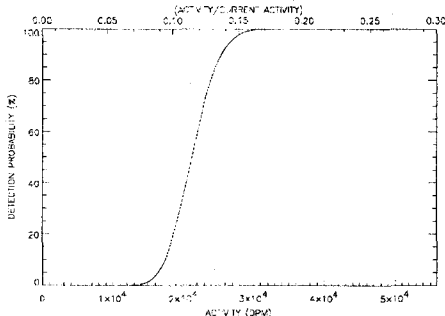
표 3의 마지막 열에는 배수중 방사능 물질에 대해 과학기술고시로 정하고 있는 법적 규제치를

Table 2. Number of channels used for the estimation of detection limits

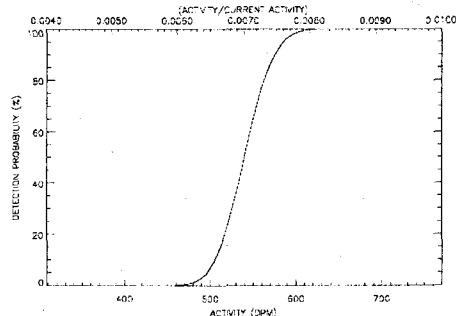
|        | Channel  | Degree of freedom (D.O.F.) (=Channel number) |
|--------|--|--|
| H-3    | 4-33   | 30 (no binning)                              |
| C-14   | 4-39   | 36 (no binning)                              |
| CL-36  | 4-199  | 196 (no binning)                             |
| SR-90a | 4-503  | 500 (no binning)                             |
| SR-90b | 4-6, 7-10, 11-20, 21-30, 31-60, 61-90, 91-140, 141-190, 191-344, 345-500 | 10 (re-binning)                              |
| SR-90c | 4-10, 11-30, 31-90, 91-200, 201-500                                      | 5 (re-binning)                               |
| SR-90d | 4-503  | 1 (re-binning)                               |

Table 3. Comparison of the detection limit with legal regulation values, Ministry of Science and Technology, Regulation 2001-2. in units of Bq/ (dpm/20ml)

|        | Channel             | 1 min              | 5 min              | 10 min           | 20 min           | 30 min           | 60 min           | Legal regulation value |
|--------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------|
| H-3    | 30<br>(no binning)  | 30,783<br>(25,652) | 12,447<br>(10,372) | 8,501<br>(7,084) | 5,884<br>(4,903) | 4,612<br>(3,843) | 3,341<br>(2,784) | 40,000<br>(33,332)     |
| C-14   | 36<br>(no binning)  | 667<br>(555)       | 270<br>(225)       | 186<br>(155)     | 129<br>(107)     | 105<br>(87)      | 73<br>(60)       | 1,000<br>(833)         |
| CL-36  | 196<br>(no binning) | 633<br>(527)       | 196<br>(163)       | 122<br>(101)     | 79<br>(65)       | 65<br>(54)       | 50<br>(41)       | 700<br>(583)           |
| SR-90a | 500<br>(no binning) | 618<br>(515)       | 187<br>(155)       | 130<br>(108)     | 101<br>(84)      | 92<br>(76)       | 82<br>(68)       | 20<br>(16)             |
| SR-90b | 10<br>(re-binning)  | 83<br>(69)         | 34<br>(28)         | 23<br>(19)       | 16<br>(13)       | 13<br>(10)       | 9<br>(7)         |                        |
| SR-90c | 5<br>(re-binning)   | 67<br>(55)         | 28<br>(23)         | 19<br>(15)       | 13<br>(10)       | 11<br>(9)        | 7<br>(5)         |                        |
| SR-90d | 1<br>(re-binning)   | 46<br>(38)         | 20<br>(16)         | 14<br>(11)       | 10<br>(8)        | 8<br>(6)         | 5<br>(4)         |                        |



(a)



(b)

Fig. 6. Detection limits for (a) <sup>3</sup>H Spectrum, (b) <sup>90</sup>Sr Spectrum vs activities.

나타내었다. 배수 중 방사능 물질에 대한 법적 규제치는 과학기술부고시로 정하고 있으며, 1998년도의 과학기술부고시 제98-12호 및 이를 개정한 2001년도의 과학기술부고시 제2001-2호 등이 있다.[5, 6] 본 실험에 사용된 용기의 용량은 20ml이고 법적 규제치는 Bq/l (= disintegration per second/liter)를 단위로 하고 있으므로 법적 규제치와 동일한 단위로 환산하기 위해서는 1 dpm/20 ml = 1/1.2 = 0.8333을 곱해주면 된다. 표 3에서 괄호밖의 수는 Bq/l 단위로 표시한 값이며, 괄호

안의 수는 dpm/20ml 단위로 환산한 값이다.

그림 6는 1분 동안 측정할 때 예상되는 검출 가능한 한계 값을 보여주고 있으며, 대표적으로 <sup>3</sup>H와 <sup>90</sup>Sr시료에 대하여 보여주고 있다. 다른 시료에 대해서도 비슷한 형태의 곡선을 얻을 수 있다. 아래의 X축은 방사능 값을 나타내며, 위쪽의 X축은 제조된 표준시료의 방사능 값에 비하여 몇 배인가를 나타낸다. Y축은 백그라운드와 통계적으로 동일한 분포라고 볼 수 없는 확률을 나타낸다. 즉 Y축은 검출확률 또는 검출신뢰도가 된다.



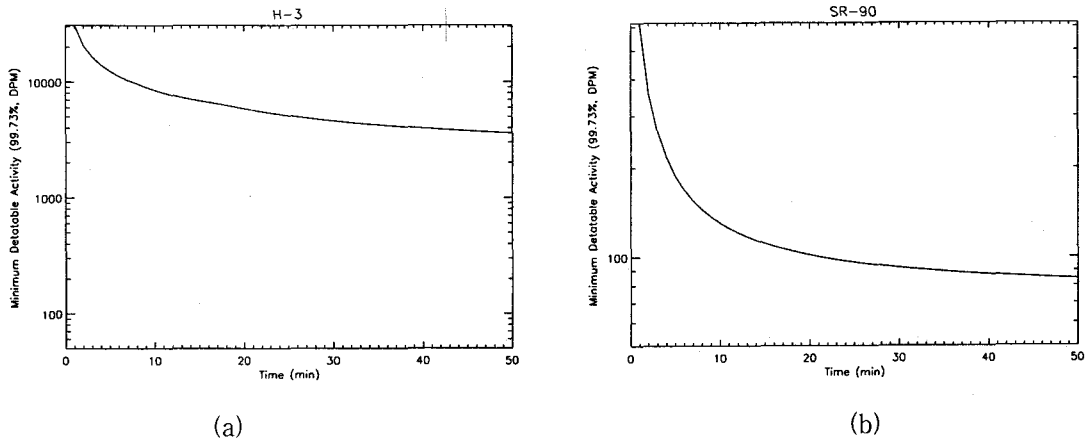


Fig. 7. Detection Limits of (a)  $^3\text{H}$  Spectrum, (b)  $^{90}\text{Sr}$  Spectrum at 99.73% confidence level as a function of observation time.

그림 7은 측정시간에 따른 검출 가능한 한계를 보여주고 있으며, 대표적으로  $^3\text{H}$  와  $^{90}\text{Sr}$  시료에 대해 나타냈으며, 다른 시료에 대해서도 비슷한 모양의 곡선을 얻을 수 있다. 측정시간이 적을 때는 시료에 의한 계수값이 백그라운드에 비해 큰 경우만 검출 가능하므로 검출한계가 시간의 역수에 비례하고, 백그라운드가 큰 경우는 많은 측정시간이 요구되며 검출한계는 시간의 제곱근의 역수에 비례함을 보여 준다.

이들 결과를 보면  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ 와  $^{36}\text{Cl}$ 의 경우 1분 측정으로도 충분히 법적규제치 이하로 측정이 가능하며,  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우는 유효한 모든 채널을 이용하여 분석하는 경우 법적규제치 미만을 측정할 수 없고 10개로 re-binning하여 (SR-90b 경우) 20분 이상 측정한다면, 법적규제치 이하의 선량을 측정할 수 있음을 알 수 있다. 실제로 샘플 하나당 1 시간정도 측정할 예정이므로  $^{90}\text{Sr}$ 을 포함하는 혼합시료에 대해서도 충분히 핵종 분석을 할 수 있다. 또한, 약간의 차폐체를 사용하여 백그라운드를 줄이면, 20분 미만의 측정으로  $^{90}\text{Sr}$ 의 검출이 가능하다.

### 결론 및 토의

프로토 타입 액체섬광검출시스템을 제작하여 이의 최소 검출한계 특성을 구하였다. 차폐체를 전혀 사용하지 않은 상태에서 측정된 베타 스펙트럼으로부터 chi-square 추정 방법을 이용하여 검출한계를 계산하였다. 법적규제치 및 계산된

검출한계와 비교하였고  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ 의 경우는 유효한 전체 채널을 이용했을 때 수분동안의 측정만으로 법적규제치 미만으로 충분히 검출 가능함을 확인하였다.  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우는 채널의 수를 10개 미만으로 줄이고, 측정 시간을 20분 이상으로 하였을 때, 법적규제치 미만으로 검출 가능함을 알 수 있었다. 그러나 이미 선행된 베타 핵종 알고리즘 연구[1]를 통해 채널의 개수가 8개인 경우도 충분히 핵종별 방사능 값을 구할 수 있었으므로  $^{90}\text{Sr}$ 이 포함된 혼합시료에 대해서도 20분 이상 측정을 수행한다면 충분히 베타 핵종 분석이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 현장 적용이 혼합 핵종의 수가 4가지 이상이고  $^{90}\text{Sr}$ 을 포함하고 있다면 20분 정도의 측정시간이 요구된다. 다음 단계로 시스템의 특성을 더 안정화시키고, 샘플 자동 교환 장치를 구현하여 배수모니터의 자동화 시스템으로 연결시켜 나갈 계획이다.

### 참고문헌

1. 선광일, 남옥원, 공경남, 김창규, 이동명, 이상국, "최소자승법을 이용한 다수 베타 핵종 혼합물의 방사능 분석", 대한방사선방어학회지, 26, 375 (2001).
2. 공경남, 남옥원, 선광일, 김창규, 이동명, 이상국, "베타 핵종 분석용 모니터링 시스템 개념 설계 및 동시 MCA 회로 개발", 2001 춘계 학술발표회 논문집, 대한방사선방어학회, 108 (2001).

3. 남옥원, 공경남, 선광일, 김창규, 이동명, 이상국, “베타선 방출 핵종 측정용 동시 계수 신호처리회로 개발”, 2001, 추계 학술발표회 논문집, 대한방사선방어학회, 173 (2001).
4. W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling, B. Flannery, *Numerical Recipes in Fortran*, 2nd ed. p616, Cambridge University Press, New York (1992).
5. 과학기술부고시 제98-12호 『방사선량 등을 정하는 기준』, 제17조 배기 또는 배수에 대한 허용 농도 (1998).
6. 과학기술부고시 제2001-2호 『방사선방호 등에 관한 기준』, 제6조 배출 관리기준 (2001).