

Measurement of the Optical and the Physical Parameters in a LAB-based Liquid Scintillator for a Reactor Neutrino Experiment

Sun Heang So · Kyung Kwang JOO*

Department of Physics, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received 11 July 2014 : revised 18 July 2014 : accepted 18 July 2014)

For detecting neutrinos from a nuclear power plant, we use the inverse beta decay reaction which produces a positron and a neutron after a neutrino collision. For a neutrino experiment to be successful, several characteristics of the liquid scintillator (long attenuation length, good absorbcency, chemically stability, steady concentration) are important. Because the physical and the optical properties of the scintillator should remain unchanged over several years, we measured the absorbcency of the liquid scintillator by using an UV spectrometer and the Gd concentration of the sample by using EDTA titration regularly.

PACS numbers: 25.30.Pt, 42.25.Gy

Keywords: Liquid scintillator, Gd, Absorbcency, Concentration, LAB

원전 중성미자 실험을 위한 액체섬광검출용액의 개발 연구

소선행 · 주경광*

전남대학교 물리학과, 광주 500-757

(2014년 7월 11일 받음, 2014년 7월 18일 수정본 받음, 2014년 7월 18일 게재 확정)

역베타 붕괴반응을 이용하여 원전에서 방출되는 중성미자를 검출할 수 있다. 역베타 붕괴란 중성미자가 표적에 충돌한 후 양전하와 중성자를 생성하는 반응이다. 성공적인 실험을 위해서는 검출기 내부에 채워진 액체섬광검출 용액의 특성을 파악하고 있어야 한다. 중요한 액체섬광 검출용액의 특성으로는 감쇠 거리가 길고, 흡광도가 낮아야 하며, 화학적으로 안정하여 농도가 변하지 않아야 한다. 이를 위해 본 실험에서는 가시광선 분광광도계를 이용해 흡광도를 측정하고 EDTA 적정법을 이용해 가돌리늄 농도를 측정하였다. 또한 실험이 수년에 걸쳐 진행되기 때문에 장기적으로도 물리광학적인 특성이 유지되어야 한다. 이를 위해 흡광도와 가돌리늄 농도를 2주마다 주기적으로 측정하면서 변화를 모니터링 하였다.

PACS numbers: 25.30.Pt, 42.25.Gy

Keywords: 액체섬광검출용액, 가돌리늄, 흡광도, 농도, 선형알킬벤젠

*E-mail: kkjoo@chonnam.ac.kr



I. 서 론

1. 액체섬광 검출 용액의 구성

여러 실험에서 중성미자 검출의 위해 액체섬광검출용액 (LS, liquid scintillator)을 사용하고 있다 [1]. 일반적으로 액체섬광검출용액은 용매 (base solvent)를 기반으로 오일 (oil)을 혼합하고, 빛을 낼 섬광체 가루 (fluor)를 넣는다. 방출될 빛의 파장을 광증폭관 (PMT, photomultiplier)의 최대 양자 효율에 맞추기 위해 파장 변경 물질 (wavelength shifter)을 첨가하기도 한다 [2].

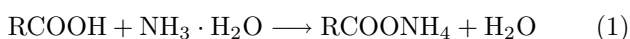
빛 방출량이 많아서 가장 많이 쓰이는 용매는 PC (pseudocumene, C_9H_{12} , 1,2,4-trimethylbenzene)이다. 하지만 발화점이 낮고 ($48^\circ C$) 환경과 인체에 매우 유해한 단점이 있어 유해성을 감소시킬 목적으로 희석 (diluent) 용액을 사용하는데, dodecane ($C_{12}H_{26}$)이나 mineral oil (MO, C_nH_{2n+2} , where $n = 11 \sim 44$)을 쓴다 [3].

빛을 내기 위한 섬광체 가루로는 PPO (2,5-diphenyloxazole, $C_{15}H_{11}NO$)나 BPO (2-(4-biphenyl)-5-phenyloxazole), p-terphenyl (PTF) 등이 사용되고 파장 변경 물질인 1,4-bis(5-phenyl-2-oxazolyl)-benzene (POPOP, $C_{24}H_{16}N_2O_2$), 1,4-bis(2-methylstyryl)-benzene (bis-MSB, $C_{24}H_{22}$)를 첨가한다.

본 실험에서는 선형알킬벤젠 (LAB, Linear Alkyl Benzene, $C_nH_{2n+1}-C_6H_5$, $n = 10 \sim 13$)을 용매로 이용하고 섬광체 가루 3 g/l의 PPO와 파장 변형 물질 30 mg/l의 bis-MSB를 녹여 사용하였다 [4].

2. 액체섬광검출 용액 제조

중성미자 검출을 위해 역베타 ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$) 붕괴 반응을 이용하기 때문에 이 반응에서 발생하는 중성자를 잘 포획하는 것이 중요하다 [5]. 이를 위해 중성자 포획 단면적이 높은 가돌리늄 (Gd)을 $\sim 0.1\%$ 용해한 액체섬광검출용액 (Gadolinium-loaded LS, GdLS)을 만들어 사용하지만 금속인 가돌리늄을 유기 용매에 첨가 용해하는 것은 간단하지 않다. 유기 용매에 금속원소를 녹이기 위해 금속과 유기용매에 녹는 유기 리간드를 결합시켜 유기금속 (organometallic)을 만드는 법을 이용했다. 유기 리간드로는 카르복실산 (carboxylic acid) 중의 하나인 TMHA (3,5,5-trimethylhexanoic acid)을 선택했다. 유기 금속인 Gd-TMHA는 다음과 같은 반응식을 이용하여 제조할 수 있다 [6].



(1)번은 카르복실산에 암모니아수를 첨가해서 중화시키는 반응식이다. (2)번은 (1)번 반응에 의해 만들어진 중화된 카르복실산을 $GdCl_3$ 수용액과 혼합하여 유기금속을 합성하는 것을 나타 낸다 [7]. 본 실험에서는 Gd-TMHA를 이용하여 액체섬광검출용액에 가돌리늄을 0.1% 용해시킨 샘플을 사용하였다.

3. 액체섬광용액의 요구 조건

역 베타 붕괴과정에서 발생한 빛이 광증폭관에 잘 도달하려면 가돌리늄이 용해된 액체섬광검출 용액 내에 불순물이 없고 빛 방출량이 커야한다. 따라서 흡광도 값이 작아야 하며 긴 감쇠거리를 가지고 있어야 한다. 여기서 감쇠거리는 검출기를 통과할 정도로 충분히 길어야 한다. 물체를 마찰시키거나 가열하여 어느 정도의 온도가 되면 타기 시작하는데 이 발화점은 높을수록 좋다. 검출기 자체와 직접적인 반응현상이 일어나서는 안된다. 중성미자 검출 실험은 대량의 액체섬광검출용액을 사용하는 경우가 많기 때문에 사후처리나 연구원의 안전을 위해서도 환경이나 인체에 무해할수록 좋다.

II. 본 론

1. 흡광도 (Absorbency) 측정 결과

감쇠거리를 계산하기 위해 Shimadzu UV-1800을 사용하여 흡광도 값을 측정하고 장기적인 안정성을 알아보기 위해 2주에 1회씩 측정하여 주기적으로 살펴보았다 [8]. 측정에 이용한 샘플은 원통형 셀 (cylindrical cell)에 넣고 입구와 출구를 파라핀 랩으로 감아 밀봉보관 하였다. 흡광도를 A, 측정 셀의 길이를 L 이라고 할 때 감쇠거리 λ 는 Beer-Lambert 식에 의해 $\lambda = 0.4343 (L/A)$ 로 계산할 수 있다 [9]. 흡광도 A는 광증폭관의 양자효율이 최대일 때의 파장 420 nm일 때 측정하였다. 시간에 따른 흡광도 측정결과를 Fig. 1에 나타냈다. 2년 이상 측정해오며 샘플의 안정성을 모니터링하고 있는데 spectrometer의 오차 범위 내에서 변하지 않았음을 알 수 있다.

2. FT-IR을 이용한 측정 결과

FT-IR (Fourier transform infrared spectrum)은 적외선 분광장치로 적외선 흡수 스펙트럼은 분자의 구조에

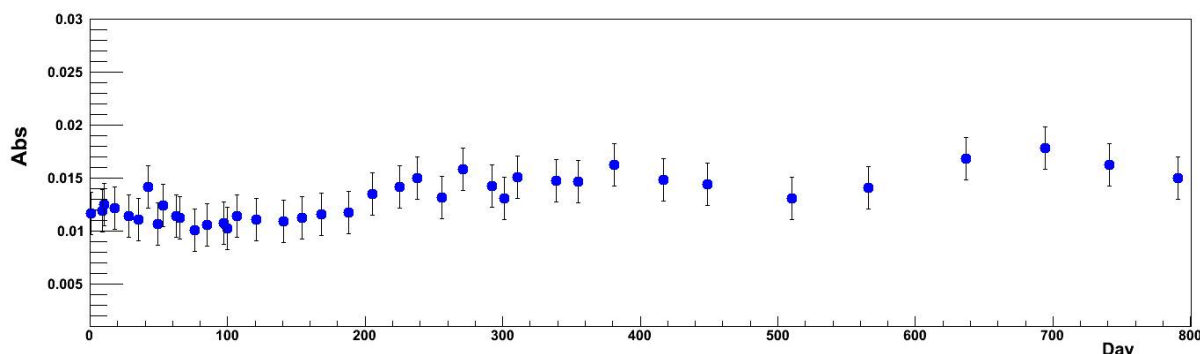


Fig. 1. (Color online) Absorbency (Abs) as a number of days.

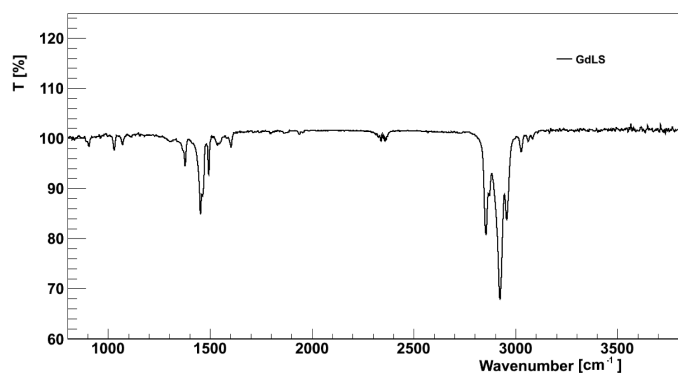


Fig. 2. FT-IR of GdLS (Gd-loaded liquid scintillator).

기초한 특유의 진동 스펙트럼이기 때문에 다른 분석법에서는 알 수 없는 분자의 구조에 대한 중요한 정보를 얻을 수 있다. 사용한 적외 영역은 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 의 범위로 비파괴 분석이며 정성분석에 효과적이다. 샘플을 정성 분석한 그래프를 Fig. 2를 통해 확인할 수 있다. Gd-TMHA peak ($1538, 1429 \text{ cm}^{-1}$)을 관찰할 수 있었으며 물 (H_2O)의 peak ($3200 \sim 3500 \text{ cm}^{-1}$)은 나타나지 않았다.

3. EDTA 적정방법으로 가돌리늄 농도 측정

가돌리늄 농도를 측정하기 위해 EDTA 적정 법을 사용한다 [10]. 샘플은 흡광도 샘플과는 별도로 100 ml 유리병에 보관하고 있는 것을 병 중앙에서 소량씩 채취해 측정하였다. 지시약, buffer solution, GdLS 샘플이 담긴 수용액에 EDTA 용액을 뷰렛으로 한 방울씩 떨어뜨려서 보라색인 지시약의 색깔이 노란색으로 변하는 순간까지, 적정에 사용한 EDTA 용액의 양을 알면 가돌리늄의 농도를 계산할 수 있다. 2주에 1회 가돌리늄의 농도를 주기적으로 측정하여 침전 및 농도 변화 유무를 지속적으로 관찰하였고 Fig. 3은 그 결과를 보여준다.

4. Karl-fisher 방법으로 수분함량 측정

액체-액체 교환방법을 통해 유기금속과 가돌리늄 수용액을 뷰렛으로 소량씩 떨어뜨려서 가돌리늄을 유기용매에 용해시키고 층 분리를 시켜서 물을 분리한다. 그렇기 때문에 최종 샘플에 물이 함유되는 것을 아예 막을 수는 없지만 샘플을 완성하고 질소 purging을 통해서 수분을 함량을 최소화 시킬 수는 있다. Karl-fisher 방법은 시약속의 요오드가 OH^- 와 만나 이온화되어 해리되는 과정을 이용해 수분함량을 측정할 수 있다. 이 원리를 적용한 Mettler Toledo사의 측정기로 수분함량을 ppm 단위로 측정하였다. 측정결과는 $78.3 \pm 5.0 \text{ ppm}$ 으로 실험 결과에는 영향을 미치지 않을 수준이다 [11].

III. 요약

중성미자 검출에 쓰이는 LAB 기반 액체 섬광 검출 용액 (LAB-based LS)을 만든 후, 액체-액체 추출방법으로 가돌리늄을 용해시켰다. 수년간의 성공적인 실험을 위해 GdLS의 장기적 안정성과 수분함량이나 흡광도 등 물리광학적인 특성들이 중요하다. 주기적으로 흡광도와 Gd 농도를 측정하여 오차 범위 내에서 일정함을 확인하였다. 또한 FT-IR을 통해 샘플의 구조적인 정보를 확인하고 수분함량 측정을 통해서 최종샘플이 중성미자 실험에서 요구하는 조건을 충족하는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구 사업 지원 (2012-0007850, 2012M2B2A6030210, 2009-0083526, 2012-0001177)을 받아 수행된 것임.

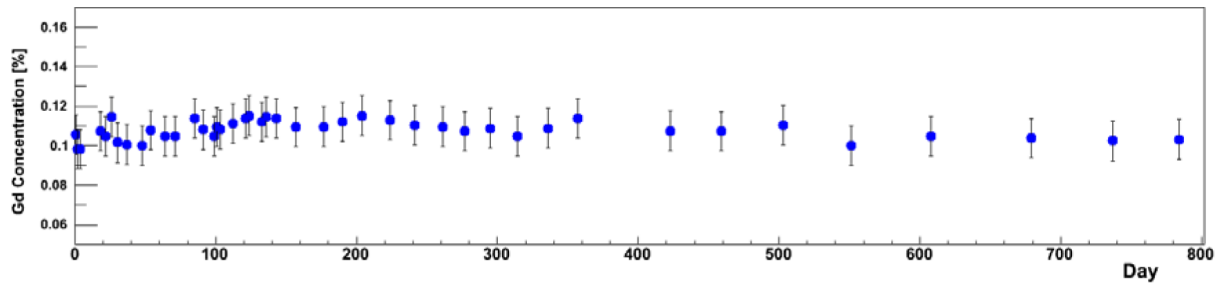


Fig. 3. (Color online) Gd concentration as a number of days.

REFERENCES

- [1] K. Eguchi, S. Enomoto, K. Furuno, J. Goldman and H. Hanada *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 021802 (2013).
- [2] J. K. Ahn, S. R. Baek, S. Choi, Y. Choi and I. S. Chung *et al.*, hep-ex, arXiv:1003.1391 (2010).
- [3] J. S. Park, S. B. Kim, J. S. Lee, B. C. Kim and S. H. Kim *et al.*, Sae Mulli **58**, 62 (2009).
- [4] I. S. Yeo and K. K. Joo, New Phys.: Sae Mulli **61**, 739 (2011).
- [5] S. B. Kim, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **24**, 235 (2013).
- [6] J. S. Park, J. Lee, I. S. Yeo, W. Q. Choi and J. K. Ahn *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **707**, 45 (2013).
- [7] I. S. Yeo, J. H. Jang, M. S. Kim, J. K. Ahn and S. R. Baik *et al.*, Phys. Scr. **82**, 065706 (2010).
- [8] S. H. So and K. K. Joo, New Phys.: Sae Mulli **62**, 9 (2012).
- [9] F. Baldini and A. Giannetti, SPIE **5826**, 485 (2005).
- [10] S. H. So and K. K. Joo, New Phys.: Sae Mulli **63**, 1019 (2013).
- [11] S. H. Song and K. K. Joo, New Phys.: Sae Mulli **63**, 1015 (2013).