

CsI(Li) 단결정의 섬광특성

이우교*, 도시홍*, 노태익**, 김완***, 강희동***, 문병수****

Scintillation Characteristics of CsI(Li) Single Crystals

W. G. Lee*, S. H. Doh*, T. I. Ro**, W. Kim***, H. D. Kang*** and B. S. Moon****

요약

CsI에 lithium을 활성제로 0.02, 0.1, 0.2 및 0.3 mole% 첨가한 CsI(Li) 단결정을 Czochralski 방법으로 육성하였다. 육성한 CsI(Li) 단결정의 격자구조는 bcc구조였으며, 격자상수 a_0 값은 4.568 Å이었다. CsI(Li) 단결정의 흡수단은 245 nm이었으며, 흡수단으로 여기 시킨 발광스펙트럼의 파장범위는 300 ~ 600 nm이었고 중심파장은 425 nm이었다. Li 농도를 0.2 mole% 첨가한 경우 에너지 분해능은 ^{137}Cs (662 keV)에 대해서는 14.5 %, ^{54}Mn (835 keV)에 대해서는 11.4 %이었고 ^{22}Na 의 511 keV와 1275 keV에 대한 에너지 분해능은 각각 17.7 %와 7.9 % 이었다. 그리고, γ 선 에너지와 에너지 분해능 사이의 관계식은 $\ln(FWHM\%) = -0.893 \ln E + 8.456$ 이었으며, 에너지 교정곡선은 $\log E_\gamma = 1.455 \log(ch.) - 1.277$ 이었다. Li를 0.2 mole% 첨가한 CsI(Li) 단결정의 인광감쇠시간은 실온에서 0.51 s이었고, 일정비율 시간분석법(CFT:constant-fraction timing method)으로 측정된 시간분해능은 9.0 ns 이었다.

Abstract

CsI(Li) single crystals doped with 0.02, 0.1, 0.2 and 0.3 mole% lithium as an activator were grown by Czochralski method. The lattice structure of grown CsI(Li) single crystal was bcc, its lattice constant was 4.568 Å. The absorption edge of CsI(Li) single crystal was 245 nm, and the spectral range of luminescence was 300 ~ 600 nm, its maximum luminescence intensity appeared at 425 nm. The energy resolutions of CsI(Li) single crystal doped with 0.2 mole% lithium were 14.5 % for ^{137}Cs (662 keV), 11.4 % for ^{54}Mn (835 keV) and 17.7 % and 7.9 % for ^{22}Na (511 keV and 1275 keV), respectively. The relation formula of γ -ray energy versus energy resolution was $\ln(FWHM\%) = -0.893 \ln E + 8.456$ and energy calibration formula was $\log E_\gamma = 1.455 \log(ch.) - 1.277$. The phosphorescence decay time of CsI(Li) crystal doped with 0.2 mole% lithium was 0.51 s at room temperature, and its time resolution measured by CFT(constant-fraction timing method) was 9.0 ns.

* 부경대학교 물리학과 (Dept. of Physics, Pukyong Nat'l Univ.)

** 동아대학교 물리학과 (Dept. of Physics, Donga Univ.)

*** 경북대학교 물리학과 (Dept. of Physics, Kyungpook Nat'l Univ.)

**** 한국원자력연구소 MMIS팀 (KAERI MMIS Team)

<접수일자 : 1999년 5월 30일>

I. 서론

최근에는 핵 및 고에너지 물리학, 핵단층 촬영 (nuclear tomography), 응용과학 및 응용공학에서 광수율이 크고, 밀도가 크며, 형광감쇠 시간이 짧은(10~30 ns) 섬광체에 대한 관심이 증가되고 있

다. 이러한 섬광체는 고강도·고선량의 γ 선을 검출하고 검출기의 시간분해능을 개량할 수 있을 뿐만 아니라 그 응용분야가 매우 넓다.

현재 CsI(Tl)은 밀도(4.51 g/cm^3)와 유효원자번호($Z_{\text{eff}}=54$)가 크고, radiation length($=1.86 \text{ cm}$)가 짧으며, 광수율과 에너지 분해능이 좋으므로 방사선 검출기에 이용되어 왔다. 그러나 섬광감쇠시간(약 $1 \mu\text{s}$)이 길고, 방사선 손상을 받기 쉬우므로 고에너지·고선량 방사선 검출에는 한계성이 있다. 이 점에서 CsI(pure) 단결정의 자외선 발광(intrinsic ultraviolet luminescence)^[1,2,3]은 매우 매력적이며 자외선 발광에 대한 연구는 계속되어 왔다^[4]. CsI(pure)의 형광감쇠시간은 10 ns 정도^[2]이고, 방사선 손상을 적게 받는다. 그러나 CsI(pure)의 광수율은 NaI(Tl)의 1 ~ 4 % 정도이다^[5]. CsI(pure)와 같이 방사선 손상을 적게 받고 시간 특성이 좋으면서 광수율이 CsI(pure) 보다 높은 CsI를 기초로 한 섬광체 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다^[6]. X선 CT(X-ray Computed Tomography)나 PET(Positron-Emission Computed Tomography) 등의 의료기에 사용하는 검출기의 특성은 (1)광출력이 크고, (2) decay time이 짧으며, (3) 방사선에 대한 흡수계수가 커야하고, (4) 동시계측의 시간분해능(time resolution)이 좋아야 한다. PET의 공간분해능(space resolution)을 높이기 위해서는 가능한 더 많은 섬광 검출기를 사용해야 하기 때문에 흡수계수가 특히 중요하다. 또한 광출력이 크면 시간분해능을 개량할 수 있으므로 광출력이 큰 것이 좋다.

본 연구에서는 X선 CT나 PET에 사용되는 방사선센서를 개발하기 위한 기초적 실험으로 CsI에 알칼리 금속이온 Li⁺를 활성제로 첨가하여 CsI(Li) 단결정을 육성하고, 육성한 단결정들의 흡수곡선, 여기 및 발광스펙트럼, γ 선에 대한 에너지 분해능, 에너지 교정곡선, 인광특성 및 시간분해능 등과 같은 광 및 섬광 특성을 측정하였다.

II. 실험

1. CsI(Li) 단결정 육성

본 연구에서 CsI(Li) 단결정들은 Czochralski 방법으로 육성하였다. 출발 물질은 99.999 %의 CsI(Aldrich)분말을 사용하였고, 그리고 활성제로는 순도 99.999 %의 LiI를 0.02, 0.1, 0.2 및 0.3 mole%첨가하였다.

CsI분말에 포함되어 있는 음이온 불순물과 물질을 취급하는 동안 공기로부터 유입된 불순물(H_2O 등)을 제거하기 위하여 원료분말을 10^{-2} torr의 진공 속에서 온도 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 60분간 가열한 후 용융시켰다.

일반적으로 단결정을 Czochralski 방법으로 육성하는 경우 보이드(void)와 격자결함의 발생은 성장계면의 형태와 변화에 밀접한 관계가 있다. 그리고 성장계면의 형태는 전위밀도, 균질성, 뒤틀림 등 단결정의 품질에 큰 영향을 미친다^[7, 8]. 그 때문에 여러 연구자들은 성장계면의 형태에 관하여 많은 실험을 하였고, 또한 인상속도, 온도 분포, 성장분위기와 압력 및 결정회전속도 등의 영향 등을 조사하였다^[9,10].

본 연구에서는 성장계면의 온도변화를 최소화하기 위하여 고주파 유도가열 코일을 내경 26 cm, 길이 30 cm의 원통형 스텐레스통(챔버) 속에 장치하고, 발열체인 백금도가니를 석영관(내경 52.8 mm, 두께 3 mm)과 알루미늄관(내경 62 mm, 두께 3.8 mm) 및 알루미늄 덮개(두께 7 mm)로 감쌌다. 그리고 챔버내에 발열체를 대칭적으로 장치하여 챔버내의 온도변화를 최소화하였다.

성장분위기는 아르곤(Ar)가스를 사용하였으며, 결정육성시 CsI와 활성제의 증발을 막기 위하여 챔버내 아르곤 가스의 압력을 2 atm으로 유지하였다. 그리고 인상속도와 결정회전속도는 앞의 연구^[11]에서와 같이 각각 8 mm/h , 40 rpm으로 하였다. 그리고 결정성장 초기에 결함의 전파방지와 결정성장 축으로의 성장을 유도하기 위해 목을 만들었다.

그림1은 Li를 0.2 mole% 첨가하여 육성한 CsI(Li) 단결정과 시편을 나타낸다. 육성된 단결정들은 활성제의 농도에 관계없이 무색투명 하였으며 크기는 일반적으로 직경 13 mm, 길이 45 mm 정도이었다.

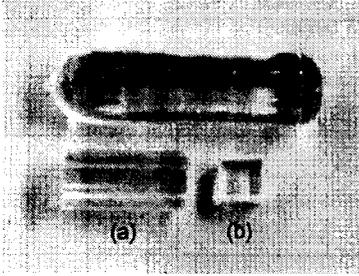


그림 1. CsI(Li) 단결정과 시편 : (a) 원통형($\phi=10$ mm, H=20 mm), (b) $6\times 7\times 7$ mm³.

Fig. 1. Photographs of CsI(Li) single crystal and specimens : (a) cylinder($\phi=10$ mm, H=20 mm), (b) $6\times 7\times 7$ mm³.

2. 시편제작 및 측정

인광, 흡수 및 발광스펙트럼을 측정하기 위한 시편의 크기는 $6\times 7\times 7$ mm, γ 선 파고 스펙트럼을 측정하기 위한 시편은 직경 10 mm, 높이 20 mm의 원통형으로 제작하였다(그림 1). 그리고 이 원통형 CsI(Li) 섬광체와 광전자 증배관 R374 (HAMAMATSU)를 광결합시켜 CsI(Li) 섬광 검출기를 제작하였다.

CsI를 기초로 하여 제작한 섬광체는 흡습성이 약간 있으므로 시편의 모든 면은 $Al_2O_3(0.02 \mu m)$ 분말로 연마한 후 polishing cloth(Buehler, No. 40-7218) 위에서 메칠알콜과 ZnO분말을 사용하여 표면을 투명하게 연마하였다.

섬광체 표면은 광출력을 크게 하는데 매우 중요하다. 검출기의 광수집 효율(light collection efficiency)은 주로 섬광체와 광전자 증배관(혹은 광다이오드)의 접촉부분의 처리와 면적에 의존한다. 만약 섬광체와 광전자 증배관(혹은 광다이오드)의 접촉부분에 요철이 있다면 상당히 큰 광손

실이 일어날 수 있다. 입사방사선에 의해 섬광체 내에서 발생한 빛을 광전자 증배관으로 집속하고, 광손실을 최대한 막기 위하여 γ 선 에너지 스펙트럼 측정용 시편의 옆면과 윗면은 Polytetrafluorethylene(PTFE) 테이프를 반사체로 사용하여 6번 감았다. 그리고 밑면은 광전자 증배관과 시편의 직접적인 접촉을 피하고 습기로부터 시편을 보호하기 위하여 식품 포장용 랩(LLD-PE)으로 1회 감았다. 이 랩의 광투과율의 감소는 200~800 nm사이에서 약 2 %정도였다.

제작한 섬광체들의 발광스펙트럼은 Fluorescence Spectrometer(HITACHI F4500)로 측정하였고, 광투과율과 흡수곡선은 분광광도계(HITACHI U-3210)로 측정하였다. 그리고 광투과율은 공기를 기준으로 하여 측정하였으며, 측정시 시편의 표면에서 일어나는 반사와 산란에 의한 손실에 대해서는 보정하지 않았다.

γ 선 파고 스펙트럼은 펄스파고 분석법으로 측정하였고, 고전압 전원은 3120 (CANBERRA), 주 증폭기는 TC245(TENNELEC), 그리고 MCA card는 SIERRA MICROFAST MCA를 사용하였다.

본 연구에서 제작한 CsI(Li) 섬광 검출기들의 시간 분해능은 그림 2에 나타난 일정비율 시간분석법(CFT; constant-fraction timing method)으로 측정하였다. 여기서 플라스틱 검출기(NE2022)는 펄스성형이 빠르므로 기준시간을 만들기 위하여 사용하였다. 플라스틱 검출기에 공급한 인가전압은 -1900 V이었고, 제작한 CsI(Li) 섬광 검출기에 공급한 인가전압은 -690 V이었다. 플라스틱 검출기에서 나온 다이노드(dynode)신호는 Fast-Filter-Amp에 입력되고, 다시 출력된 신호는 Constant-Fraction-Discriminator에 입력하였다. 시간분석법에 의해서 출력된 신호는 TAC의 start에 입력시켰다. CsI(Li) 검출기의 다이노드(dynode)에서 나온 신호는 플라스틱 검출기와 동일하게 하여 TAC의 stop에 입력하였다. 그리고 CsI(Li) 검출기의 양극(anode)에서 나온 펄스는

전치증폭기를 거친 후 주증폭기에 입력하고, 주증폭기에서 나온 신호는 T-SCA에 입력하였다. 그리고 그 출력 신호는 BNC Tee connector를 사용하여 하나는 Linear-Gate-Stretcher의 Gate신호로 하고, TAC의 출력신호는 Linear-Gate-Stretcher의 linear신호로 입력하였다. 그리고 출력은 MCA에 입력하여 스펙트럼을 측정하였다. T-SCA에서 나온 또 다른 하나는 다른 Linear-Gate-Stretcher의 Gate신호로 입력하고, 여기서 나온 신호는 MCA에 입력하여, ^{22}Na 의 붕괴에서 양전자 소멸로 인하여 발생한 에너지(511 keV)를 관찰하면서 T-SCA로 조정할 수 있도록 하였다.

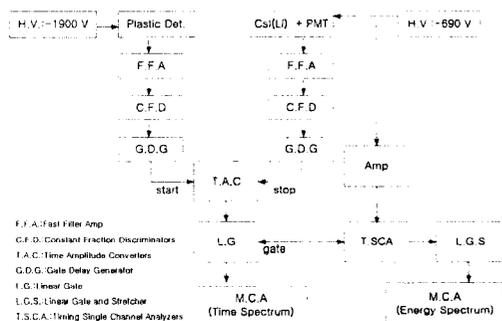


그림 2. 시간분해능 측정 회로도.

Fig. 2. Block diagram of the electronic system used to measure the time resolution.

III. 실험 결과 및 논의

1. XRD 분석

CsI에 활성제로 알칼리 금속이온 Li^+ 를 첨가하여 육정한 여러 가지 CsI 단결정의 격자상수와 구조를 확인하기 위하여 XRD(X-ray diffraction) 법으로 결정분말의 X선 회절상을 측정하였다. X선원은 nickel 필터를 통과시켜 얻은 $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 과 $\text{CuK}_{\alpha 2}$ 이었고, software(RINT 2100, Rigaku)를 사용하여 $\text{CuK}_{\alpha 2}$ 를 제거한 $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 의 파장은 1.5406 Å이었으며, 이때 필라멘트 전류는 30 mA, 가속 전압은 40 kV이었다. 그리고 주사속도는 $2^\circ/\text{min}$ 로

하였으며, 2θ 각은 20° 에서 80° 까지 하였다.

Li를 0.1 mole% 첨가하여 육정한 CsI(Li) 단결정 분말에 대해 측정된 회절무늬는 그림 3과 같이 (110), (200), (211), (220), (310), (222) 및 (321)면 등에서 피크가 나타났다. 이 Miller지수 (hkl)값들은 JCPDS card를 통해 조사해본 결과 육정한 CsI(Li) 단결정은 CsCl 구조와 같은 체심 입방체로 성장되었음을 확인할 수 있었다. 그리고 XRD분석을 통해 계산한 격자상수 a_0 값은 4.568 Å이었다.

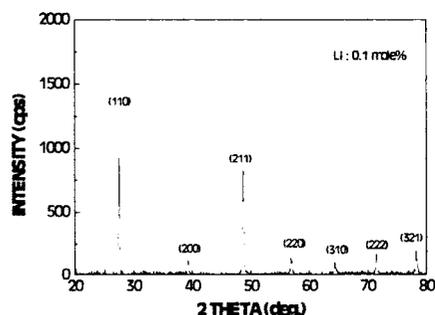


그림 3. CsI(Li) 단결정의 X선 회절상.

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of grown CsI(Li) crystal.

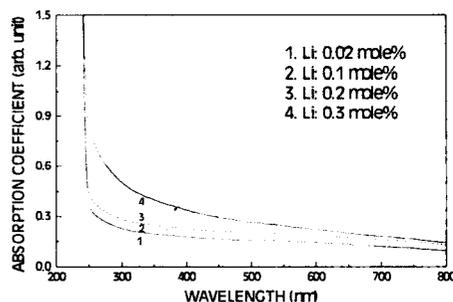


그림 4. 여러 가지 농도를 첨가시킨 CsI(Li) 단결정의 흡수스펙트럼.

Fig. 4. Absorption spectra of CsI(Li) crystals doped with various concentrations.

2. 흡수곡선

그림 4는 Li의 농도를 0.02, 0.1, 0.2 및 0.3 mole% 첨가한 CsI(Li) 단결정의 흡수곡선이다.

그림에서 보는 바와 같이 측정영역 200~800 nm 사이에서 광의 흡수는 첨가한 활성제의 농도가 증가함에 따라 파장이 짧은 영역에서 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 흡수단은 활성제의 농도에 관계없이 일정하였으며, 그 값은 245 nm이었다. 이것은 CsI의 금지대폭(6.2 eV)이 첨가한 활성제의 농도에 따라 변하지 않음을 의미한다.

3. 여기 및 발광스펙트럼

여기스펙트럼은 발광(luminescence)의 성질을 명백히 하는데 매우 유용하며, 재결합 과정에서 발광이 나타나는 조건을 연구하는 것은 재결합 메커니즘을 이해하는데 많은 기여를 한다. 그림 5는 활성제로 Li⁺를 첨가한 CsI(Li) 단결정의 여기 및 발광스펙트럼이다. 그림 4에서 CsI(Li) 단결정의 흡수단이 모두 245 nm이었으므로 이 단결정들을 흡수단 245 nm로 여기시켰을 때, CsI(Li) 발광스펙트럼의 파장범위는 그림 5에서 보는바와 같이 모두 300~600 nm 사이이었고, 중심 파장은 425 nm이었다. 또한 이 단결정들의 발광스펙트럼의 중심파장에 대한 여기파장을 측정된 결과 여기파장 영역은 그림 5와 같이 약 240~250 nm이었으며, 여기 피크 파장은 245 nm이었다. 또한 동일한 여기파장에 대한 발광강도는 일반적으로 활성제 농도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다.

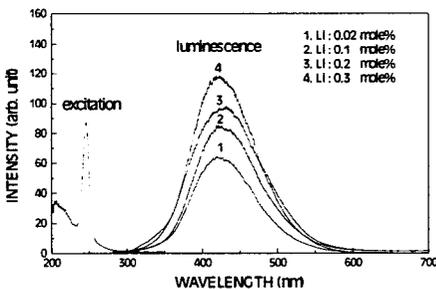


그림 5. 실온에서 측정된 CsI(Li) 단결정의 여기 및 발광 스펙트럼.

Fig. 5. Excitation and emission spectra of CsI(Li) crystals at room temperature.

4. 발광량과 에너지분해능

그림 6은 Li의 농도를 여러 가지로 변화시켜 제작한 CsI(Li) 섬광체들의 ¹³⁷Cs, ⁵⁴Mn 및 ²²Na γ 선에 대한 파고 스펙트럼이다. 광봉우리의 채널 값을 광출력으로 보았을 때 그림 6과 표 1에서 보는 바와 같이 Li의 농도가 증가할수록 섬광체의 광출력은 증가하였으며, 광출력은 Li의 농도가 0.2 mole%일 때 가장 컸고, 0.3 mole%부터는 감소하였다. 측정시 검출기에 걸여준 바이어스 전압은 -690 V이었고, 주증폭기의 펄스형성시간은 3 μ s로 하였다.

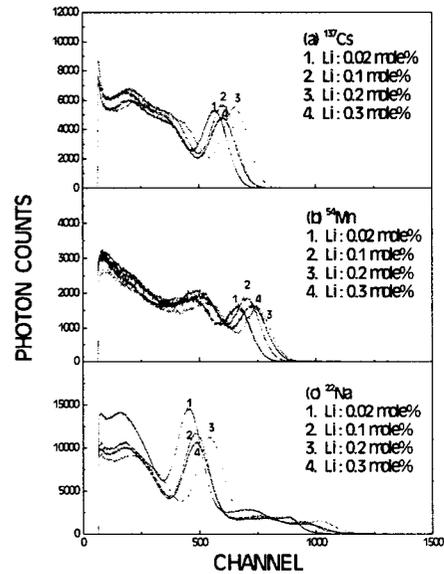


그림 6. CsI(Li) 섬광체의 (a) ¹³⁷Cs, (b) ⁵⁴Mn 및 (c) ²²Na의 γ 선에 대한 파고 스펙트럼.

Fig. 6. Pulse height spectra of the CsI(Li) scintillators to (a) ¹³⁷Cs, (b) ⁵⁴Mn and (c) ²²Na gamma radiations.

표 1은 활성제 Li를 0.02, 0.1, 0.2 및 0.3 mole% 첨가한 CsI(Li) 섬광체들의 ¹³⁷Cs, ⁵⁴Mn 및 ²²Na γ 선에 대한 에너지 분해능이다. Li의 농도를 증가시킬수록 에너지 분해능이 향상되다가 Li 농도가 0.2 mole%일 때 가장 좋았으며 0.3 mole%에서는 에너지 분해능이 저하되었다.

Li 농도가 0.2 mole%의 경우 ^{137}Cs (662 keV)에 대한 에너지 분해능은 14.5 %이었고, ^{54}Mn (835 keV)에 대한 에너지 분해능은 11.4 %이었다. 그리고 ^{22}Na 의 붕괴에서 양전자 소멸로 인하여 발생한 511 keV에 대한 에너지 분해능은 17.7 %이었고, ^{22}Na 딸핵종에서 방출하는 1275 keV의 에너지에 대한 분해능은 7.9 %이었다.

표 1. PMT와 광결합된 CsI(Li) 섬광체의 광붕우리 채널과 에너지분해능.

Table 1. Energy resolutions and maximum channels obtained from CsI(Li) scintillators coupled to PMT.

활성제 Li mole %	^{137}Cs		^{54}Mn		^{22}Na			
	662 keV		835 keV		511 keV		1275 keV	
	Photo peak ch.	분해능 (%)	Photo peak ch.	분해능 (%)	Photo peak ch.	분해능 (%)	Photo peak ch.	분해능 (%)
0.02	568	15.2	674	12.3	458	19.9	889	8.2
0.1	608	15.2	713	12.0	488	19.3	958	8.1
0.2	660	14.5	758	11.4	548	17.7	1031	7.9
0.3	606	15.4	737	12.3	489	19.6	978	8.7
측정 조건	Coarse gain : 5, Fine gain : 0.6, Shaping Time : 3 μs , HV : -690 V							

그림 7은 Li를 0.02, 0.1, 0.2 및 0.3 mole% 첨가한 CsI(Li) 검출기의 γ 선 에너지에 대한 에너지 분해능을 나타낸 것이다. 측정에너지 범위 511 ~ 1275 keV 사이에서 에너지 분해능은 γ 선의 에너지에 선형적이었으며, 그 기울기들의 범위는 -0.889 ~ -0.964 사이이었다. 그리고 에너지 분해능이 가장 좋은 Li 0.2 mole% 첨가한 CsI(Li) 검출기의 γ 선 에너지에 대한 에너지 분해능 사이의 관계식은 $\ln(FWHM\%) = -0.893 \ln E + 8.456$ 이었다.

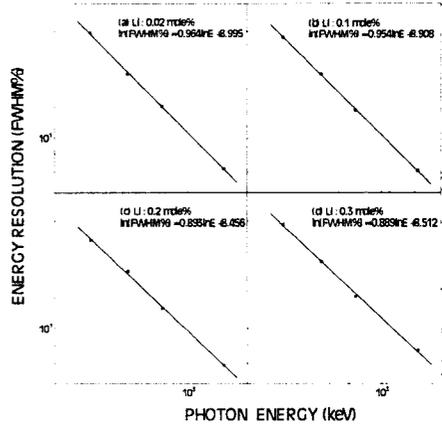


그림 7. CsI(Li) 섬광체의 에너지에 대한 에너지 분해능.

Fig. 7. Energy resolutions of CsI(Li) scintillators as a function of energy.

그림 8은 그림 6의 파고스펙트럼으로부터 구한 CsI(Li) 섬광체의 에너지 교정곡선이다. Li의 농도가 0.02, 0.1, 0.2 및 0.3 mole%일 때, 에너지 교정곡선들의 기울기는 거의 유사하였으며, 기울기의 크기는 1.314 ~ 1.455 사이 이었다. 그리고 Li를 0.2 mole% 첨가한 경우 섬광체의 에너지 교정곡선은 $\log E_p = 1.455 \log(ch.) - 1.277$ 이었으며 이들의 선형성은 매우 좋았다.

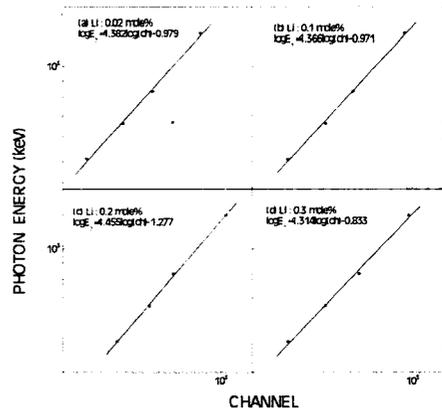


그림 8. CsI(Li) 검출기의 에너지 교정곡선.

Fig. 8. Energy calibration curves for CsI(Li) detectors.

5. 인광(phosphorescence) 특성

잔광(afterglow)은 발광(luminescence)의 자극 에너지 공급(X(γ)선, 하전입자 등)을 중단한 후의 발광을 의미하며 출발물질의 순도, 활성제의 종류와 농도 및 결정육성 방법 등에 의존한다.

섬광체의 잔광특성은 섬광체의 응용분야를 결정하는데 매우 중요하다. 예로서 섬광체를 X선으로 여기시킨 후 그 섬광체로부터 나오는 잔광의 감쇠특성은 이 섬광체를 X선 단층사진 촬영의 응용에 사용할 수 있는지에 대한 적합성 여부를 결정하는데 중요한 특성중의 하나이기 때문이다.

인광과 열형광은 에너지 금지대내에 있는 trap (혹은 metastable levels)에서의 전자 방출에 의해 일어난다. 그리고 trap의 깊이가 0.4 eV보다 큰 deep trap만이 인광에 기여하므로 CsI 섬광체의 인광을 감소시키기 위해서는 0.4 eV 이상의 에너지 준위를 갖는 불순물의 농도를 감소시켜야 한다.

그림 9는 Li를 0.02, 0.1, 0.2 및 0.3 mole% 첨가한 CsI(Li) 섬광체의 인광감쇠곡선이다. 이 인광감쇠곡선에 자연대수를 취하여 직선이 되는 부분을 최소이승법으로 fitting하여 구한 인광감쇠시간은 표 2와 같다. 그림 9와 표 2에서 보는 바와 같이 Li의 첨가량이 0.2 mole%까지는 인광감쇠시간의 빠른 성분(τ_1)만 나타났으나, Li의 농도가 0.3 mole%일 때는 느린 감쇠성분(τ_2)도 나타났다. 그리고 동일한 조건에서 측정된 CsI(Li)의 인광강도는 Li의 농도가 증가함에 따라 증가하다가 0.2 mole%일 때 최대였으며 0.3 mole%에서는 감소하였다.

표 2. CsI(Li) 단결정의 인광 감쇠시간.

Table 2. Phosphorescence decay time in CsI (Li) crystals.

Li mole%	CsI(Li)	CsI(Li)	CsI(Li)	CsI(Li)
감쇠시간	0.02 mole%	0.1 mole%	0.2 mole%	0.3 mole%
τ_1 (s)	0.59	0.51	0.51	0.53
τ_2 (s)	-	-	-	17.00

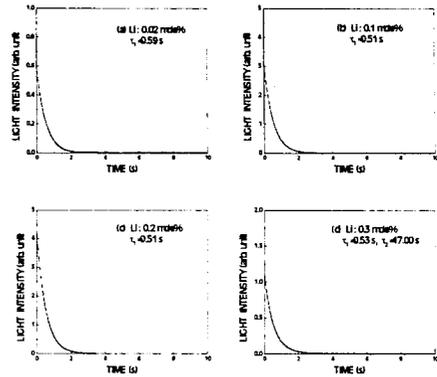


그림 9. CsI(Li) 단결정의 인광 감쇠곡선.

Fig. 9. Phosphorescence decay curves for CsI (Li) crystals.

6. 시간 분해능(time resolution)

측정시 Fast-Filter-Amp의 미분 시정수(D)와 적분 시정수(I)는 각각 100 ns로 하였다. 이때 shaping time은 60 ns이었으며, 1 채널당 시간은 0.488 ns이었다.

그림 10은 Li를 활성제로 0.02, 0.1, 0.2 및 0.3 mole% 첨가한 CsI(Li) 섬광 검출기들의 시간스펙트럼이며, 시간 분해능은 각각 7.9, 8.2, 9.0 및 11.7 ns로 lithium의 첨가량이 증가하였을 때 저하였다.

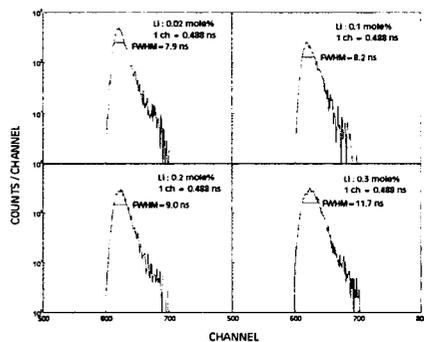


그림 10. ²²Na의 511 keV γ 선에 대한 CsI(Li) 섬광체의 시간 스펙트럼.

Fig. 10. Time spectra measured with CsI(Li) scintillators for 511 keV γ -rays from ²²Na.

IV. 결 론

Lithium을 활성제로 첨가한 CsI(Li) 단결정을 Czochralski 방법으로 육성하였다. 그리고 육성한 CsI(Li) 단결정의 결정구조는 체심입방체였으며, 격자상수 a_0 값은 4.568 Å이었다.

Lithium을 0.02, 0.1, 0.2 및 0.3 mole% 첨가한 CsI(Li) 단결정들의 흡수단은 모두 245 nm 이었고, 흡수단으로 여기시킨 발광스펙트럼의 파장범위는 300 ~ 600 nm였으며 중심파장은 425 nm이었다.

^{137}Cs (662 keV), ^{54}Mn (835 keV) 및 ^{22}Na (511 keV와 1275 keV)에 대한 γ 선 파괴 스펙트럼에서 구한 에너지 분해능은 lithium을 0.2 mole% 첨가하였을 때 가장 좋았으며, 그 값은 각각 14.5%, 11.4% 및 17.7%와 7.9%이었다.

에너지와 분해능과의 관계는 $\ln(\text{FWHM}\%) = -0.893\ln E + 8.456$ 이었고, 에너지 교정곡선은 $\log E_\gamma = 1.455 \cdot \log(\text{ch.}) - 1.277$ 로 매우 선형적이었다.

Li를 0.2 mole% 첨가한 CsI(Li)의 인광감쇠시간은 실온에서 0.51 s이었다. 그리고 일정비율 시간 분석법(CFT: constant-fraction timing method)으로 측정된 CsI(Li)의 시간분해능은 Li를 0.002, 0.1, 0.2 및 0.3 mole% 첨가하였을 때 각각 7.9, 8.2, 9.0 및 11.7 ns이었다. 이러한 특성의 섬광체는 X-CT, PET와 같은 의료진단기기의 방사선센서 제작에 활용할 수 있는 가능성이 있다고 생각된다.

감사의 글

※ 본 연구는 1999년도 과학기술부에서 시행한 원자력 중장기 사업의 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

- [1] C. H. Chen, M. P. McChann and J. C. Wang, "Room Temperature Two-Photon Induced Luminescence in Pure CsI", *Solid State Commun.*, vol. 61, pp. 559, 1987.
- [2] S. Kubota, Sh. Sakuragi, S. Hashimoto et al., "A New Scintillation Material : Pure CsI with 10 ns Decay Time", *Nucl. Instr. and Meth.*, vol. A268, pp. 275~277, 1988.
- [3] S. Kubota, M. Murakami, J. Z. Murakami, N. Iwasa, Sh. Sakuragi and S. Hashimoto, "The New Scintillation Material CsI and its Application to position Sensitive Detectors", *Nucl. Instr. and Meth.*, vol. A273, pp. 645~649, 1988.
- [4] R. Gwin and R. B. Murrug, "Scintillation Process in CsI(Tl). I. Comparison with Activator Saturation Model", *Phys. Rev.*, vol. 131, pp. 501~508, 1963.
- [5] M. Ishii and M. Kobayashi, "Single Crystals for Radiation Detectors", *Prog. Crystal Growth and Charact. Matter*, vol. 23, pp. 245~311, 1992.
- [6] A. V. Gektin, A. I. Gorelov, V. I. Rykalin, V. I. Selivanov et al., "CsI-Based Scintillators in γ -Detection System", *Nucl. Instr. and Meth.*, vol. A294, pp. 591, 1990.
- [7] J. A. M. Dikhoff, "Cross-Sectional Resistivity Variations in Germanium Single Crystals", *Solid State Electronics*, vol. 1, pp. 202~210, 1960.
- [8] B. Cokayne and J. M. Roslington, "The Dislocation-Free Growth of Gadolinium gallium Garnet Single Crystals", *J. Mater. Sci.*, vol. 8, pp. 601~605, 1973.
- [9] B. Cokayne, M. Chesswas, P. J. Born and J. D. Filby, "The Morphology and Defect Characteristics of Vertically Pulled MgAl_2O_3 Single Crystals", *J. Mater. Sci.*, vol. 4, pp. 236~241, 1969.

[1] C. H. Chen, M. P. McChann and J. C.

[10] B. Cokayne, M. Chesswas, P. J. Born and J. D. Filby, "Facetting and Optical Perfection in Czochralski Grown Garnet and Ruby", *J. Mater. Sci.*, vol. 4, pp. 450~456, 1969.

[11] 도시홍, 이우교 외6인, "CsI 단결정 섬광체의 열형광 특성과 육성조건", *센서학회지*, 제 7권, 제4호, pp. 10, 1998.

著 者 紹 介

이 우 교

『센서학회지 제7권 제4호』 논문98-7-4-02 p.234 참조
 현재 부경대학교 자연과학대학 물리학과 박사과정

김 완

『센서학회지 제7권 제3호』 논문98-7-3-05 p.179 참조
 현재 경북대학교 방사선과학연구소 연구원

도 시 홍

『센서학회지 제3권 제2호』 논문94-3-2-02 p.11 참조
 현재 부경대학교 자연과학대학 물리학과 교수

강 희 동

『센서학회지 제1권 제1호』 논문92-07 p.59 참조
 현재 경북대학교 자연과학대학 물리학과 교수



노 태 익

1955년 5월 12일생
 1979년 부산대학교 물리학과 졸업 (이학사), 1983년 부산대학교 대학원 졸업(이학석사), 1993년 부산대학교 졸업(이학박사), 1985년~현재 동아대학교 자연과학대학 물리

학과 교수, 1999년 3월 ~ 현재 동아대학교 부설 기초 과학연구소 소장

문 병 수

1944년 2월 10일생
 1961~1963년 서울대학교 금속공학과 수학, 1969년 Utah State University 졸업(이학사), 1970년 University of Illinois 수학과 졸업 (이학석사), 1974년 University of Illinois 수학과 졸업(이학박사), 1974~1978년 Sargent & Lundy Engineering, USA 근무, 1978년~현재 한국원자력연구소 책임연구원, 주관심분야 : 방사선검출기, 방사선계측, Fussy이론