

무기 섬광체의 기술동향



· 이우교 ·
한국원자력연구소
Post-Doc



· 도시홍 ·
부경대
물리학과 교수



· 황중선 ·
담양대학
컴퓨터응용전기시스템과 교수

1. 서론

방사선이 조사되었을 때 빛을 발하는 물질을 섬광체(scintillator)라 한다. 섬광체의 종류는 고체, 액체 및 기체 섬광체로 나눌 수 있고, 고체 섬광체는 유기 섬광체(organic scintillator)와 무기 섬광체(inorganic scintillator)로 나눈다. 섬광체에서 발생한 광자(photon)를 계수하여 방사선을 측정하는 검출기를 섬광검출기(scintillation detector)라 한다. 여기서 섬광체는 무기 고체 섬광체만을 한정하여 논하겠다. 최초의 섬광검출기를 1903년 William Crookes가 제작하였다. 이 검출기는 ZnS 형광판과 망원경으로 구성되었으며 α 입자에 의한 섬광을 눈으로 계수하였다. 그 후 NaI(Tl), ZnS(Ag) 및 LiI(Eu)와 같은 무기 섬광체가 개발되어 핵 및 고에너지 물리학, 우주물리학, 핵의학 및 응용과학과 응용공학 등 여러 분야에 넓게 이용되어 왔다. 그리고 섬광체들은 각각 일장일단이 있어 하나의 섬광체가 다양한 응용분야에 이상적으로 적합하게 사용될 수 없다. 섬광체의 특성, 즉 유효 원자번호, 밀도, 광출력, 감쇠시간(decay time), 출력 파장, 조사길이(radiation length), 물리적·화학적 안정성, 광학적 성질 및 경제성 중에서 섬광체의 응용 분야에 따라 고려해야할 섬광체의 특성이 다르므로

응용분야에 적합한 섬광형 방사선 센서를 개발해야 한다. 더욱이 방사선 영상 검출 기술의 확립과 X-CT (X-ray computed tomography), PET (positron emission tomography)와 같은 방사선 사용의료기구의 대중화 등에 의해 새로운 섬광체의 개발과 특성 향상에 대한 연구는 더욱 필요하게 되었다.

2. 섬광체의 일반적인 특성조건

지난 수10년 간 고에너지 물리학이나 의료영상 장비의 정밀 열량계로 사용된 섬광물질은 질적 양적으로 증가되었다. 섬광체의 발견은 3단계로 나눌 수 있다. 첫 번째 단계는 초기 섬광체로 Roentgen이 X 선을 발견할 당시 사용한 $CaWO_4$, Becquerel 이 1896년 방사능을 발견할 때 사용한 우라늄 염과 Rutherford가 alpha 입자 산란실험에 사용한 ZnS 등이 있다. 이때는 PMT없이 눈으로 시각적인 효과만을 나타낼 수 있었다. 두 번째 단계는 1948년 Hofstadter가 개발한 NaI(Tl) 섬광체가 시초가 된다 [1]. 몇 년안에 순수 alkali halide 단결정과 활성화시킨 alkali halide 단결정이 개발되었고, 중성자를 검출할 수 있는 Li가 포함된 섬광체와 Ce가 포함된 유리 섬광체가 1950년대에 개발되었다. 그리고 약 20년

이 지난 후 세 번째 단계로 접어들게 된다. 이 단계는 고에너지 물리학에서 요구되는 정확한 열량계로 필요한 섬광체, 의료영상장비에서 필요한 섬광체와 수많은 과학분야와 산업분야에서 필요로 하는 섬광체에 대한 연구와 개발로 섬광체의 르네상스를 이룬다. 중성자 검출기로서 Ce를 첨가한 $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$ [2], LiBaF_4 [3]와 $\text{Li}_2\text{Gd}(\text{BO}_3)_4:\text{Ce}$ [4] 등이 있다. 현재는 방사광과 laser 스펙트로스코피 등을 이용하여 섬광체 내의 복잡한 물리적인 과정을 많이 이해하게 되었다. 섬광체의 발광은 섬광체 호스트 물질자체 내에서 발광중심이 생성되는 본질적인 것과 활성제의 첨가로 인하여 발광이 생성되는 것이 있다. 섬광체가 처음으로 발견되고 난 후 100년 정도가 지난 현재는 여러 가지의 응용분야에 필요한 여러 가지의 섬광체가 개발연구 되었다. 그러나 섬광체의 여러 가지 물리적 화학적인 성질(밀도, atomic number, 발광파장, decay time, 녹는점, photons/MeV, radiation length, after glow, refractive index, 안정성)이 섬광체마다 각각 다르므로 응용분야에서 맞는 적절한 섬광체를 선택해야한다.

2.1 밀도

섬광체의 고밀도와 atomic number는 가장 일반적인 요구사항이다. 이른 사항을 충족시키는 화합물은 cerium이 활성제로 첨가된 lutetium 화합물로 고밀도와 많은 광수율(light yield)을 발생시킨다. 이들 화합물의 예로 $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LSO)[5, 6]는 7.35 g/cm^3 , $\text{LuAlO}_3:\text{Ce}$ (LuAP)[7, 8]는 8.34 g/cm^3 등이 있고 가격이 비싸다는 단점이 있다. 고원자번호인 Pb, Bi 등이 사용된 화합물로 $\text{Bi}_2\text{Ge}_2\text{O}_7$ (BGO)[9, 10, 11]는 7.1 g/cm^3 , PbWO_4 [12, 13]는 8.2 g/cm^3 등이 있다. 이와 같이 Lu, Pb 혹은 Bi 등이 포함된 화합물은 밀도가 9-10 g/cm^3 정도가 된다. 그러나 이들 화합물들이 밀도가 높다하더라도 섬광효율, 단결정 성장 방법과 크기 그리고 광학적인 성질 등이 문제가 될 수 있다.

2.2 광수율(Light yield)

섬광체내에서 섬광현상은 보통 세단계로 나눌 수 있다. 첫단계는 섬광체내의 방사선이 전자에게 에너지를 전달하는 흡수과정이고, 두 번째는 전자와 정

공이 발광중심을 형성하는 과정이고, 세 번째 단계는 발광과정이다. 본질적인 양자 효율 η 는

$$\eta\left(\frac{E_e}{E_r}\right) = \left(\frac{E_e}{\alpha E_r}\right)SQ$$

로 나타나고 여기서 S는 전이효율, Q는 발광중심의 방사효율이고, E_e , E_r 및 E_s 는 각각 섬광에너지, 입자에너지 및 밴드갭 에너지이며 α 는 상수로 2-7범위이다. 일반적인 반도체와 절연체는 2-3 정도이고 우수한 섬광체의 에너지 효율은 20-30% 정도이다[14]. 표 1은 실온에서 무기 섬광체의 에너지 효율을 나타낸 것이다. 활성제가 첨가된 화합물의 에너지 효율이 높다는 것을 알 수 있다. 효율이 높은 CsI(Tl) 섬광체에서 섬광에너지는 밴드갭 에너지의 절반 정도이고 S와 Q는 거의 1임을 알 수 있다.

2.3 Decay time

감쇠시간은 섬광체의 특성 중 현재 방사선 응용분야에서 요구하는 가장 중요한 요인이다. 3가인 Ce의 5d-4f전이 방사수명은 약 10^{-8} s 정도이고 모체의 굴절률과 방사파장에 따라 조금 변할 수 있다. 활성화된 절연체에서 가시광선의 감쇠시간은 일반적으로 10ns 정도이다. 전자-정공 재결합과 단일 엑시톤의 감쇠시간은 모체와 엑시톤의 형태에 따라 조금은 달라지나 감쇠시간은 ns 영역으로 빨라질 수 있다. 그리고 불순물에 약하게 결합되어있는 엑시톤의 진동력이 본질 엑시톤의 진동력보다 수십배 크면 감쇠시간은 picosecond로 빨라질 수 있다[15]. 섬광체 내에서 비방사 과정이 증가하면 감쇠시간은 빨라질 수 있지만 양자효율과 광출력이 감소할 수 있다. Picosecond 시간대의 감쇠시간을 갖는 섬광체가 가능하지만 섬광체내에서 광자의 다른 이동길이나 내부의 반사 등으로 인하여 시간분해능이 저하될 수 있다. 전이원소와 분자화합물의 감쇠시간과 발광 강도는 열 quenching의 정도에 의존하고 모체의 화학결합과 구조에 따라 크게 변한다.

2.4 가격 및 상태

고에너지 물리학 실험에서 거대한 검출기에 사용

표 1. 실온에서 무기 섬광체의 에너지 효율.

섬광체	Photons/MeV	Wavelength (nm)	Efficiency (%)
CsI	2,000	315	0.8
NaI(Tl)	38,000	415	11.3
CsI(Tl)	65,000	540	13.7
LSO:Ce	25,000	420	7.4
CaF ₂ :Eu	24,000	435	6.8
RbGd ₂ Br ₇ :Ce	56,000	410	16.9
Gd ₂ O ₂ S:Tb	70,000	545	16.0
LaOBr:Tb	67,000	425	19.5
CdWO ₄	15,000	480	3.6
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	8,200	480	2.1

되는 섬광체의 양은 수 만개를 넘고 수 십톤을 초과한다. 그러므로 고에너지 물리학 실험에서 섬광체의 가격은 무시할 수 없을 만큼 중요한 요인이다. 그리고 의료영상장비인 SPECT와 PET에 사용되는 섬광체의 양도 수천개이상이다[10]. 섬광체의 가격은 모체의 시료물질가격과 생산 및 제작 가격을 포함한다. 높은 밀도를 가지는 Lu 화합물은 섬광체 모체로 이상적이다. 그러나 Lu의 가격이 조금 높아도 섬광체의 양이 많이 필요한 곳에서는 가격이 엄청나게 비싸진다. 무기 섬광체는 단결정, 세라믹, 유리 및 유리세라믹 등이 있다. 유리는 낮은 가격과 크기에 아주 매력적이지만 점 결함(point defect)을 가지고있어 섬광효율이 낮고 방사선 손상을 받기 쉬운 단점이 있다.

3. 상용 무기 섬광체

현재 상용 무기 섬광체로는 NaI(Tl)[1, 9]를 비롯하여 대표적으로 CsI(Tl)[10, 11, 16], BGO[9, 10, 11], PbWO₄ 등이 있다. 표 2는 상용화된 무기 섬광체의 특성을 나타낸 것이다.

NaI(Tl) 섬광체는 1948년 Hofstadter에 의해 발표된 이후 X선과 γ 선 검출기로 널리 사용되어 왔으며, 핵물리학의 기초적 물리현상 연구에 크게 기여하였다. 그러나 NaI(Tl) 섬광체는 광수율(light yield)이 크다는 장점은 있지만 형광감쇠시간이 길고, 유효원자번호(Zeff=51)가 작아서 센서의 소형화에 어려운 단점을

가지고 있다. 그리고 흡습성이 크기 때문에 섬광체를 밀봉하여 사용해야하며 벽개면이 존재하여 외부의 물리적 충격이나 온도변화에 결정이 벽개면을 따라 갈라지는 현상이 있다. 의료영상장비인 PET의 초기형태에 잠시 사용되어 왔으나 밀도가 작고 온도에 민감하여 사용이 중지되었다. 그러나 현재까지 개발 연구된 섬광체중에서 광수율이 제일 크며 다른 섬광체의 광수율의 기준이 된다. CsI(Tl) 섬광체는 NaI(Tl) 섬광체의 발견시기와 비슷한 시점에서 발견되었다. 그러나 CsI(Tl) 섬광체는 NaI(Tl) 섬광체에 비해 광수율과 에너지 분해능이 나빠 사용이 제한되었다. 그러나 CsI(Tl) 섬광체의 다른 특성 즉 밀도, 조사길이(radiation length), 흡습성, 굴절률 등이 NaI(Tl) 섬광체보다 우수하고 실리콘 다이오드의 응답파장과 잘 일치하여 고에너지 물리학 및 우주선 물리학 등에 널리 사용되기 시작하였다. 우주선 물리학에서는 우주의 암흑물질 측정에 CsI(Tl) 섬광체를 수백 톤씩 사용하고 있다.

BGO(Bi₄Ge₃O₁₂)는 진성섬광물질이며 높은 흡수력을 가지고 있다. 또 BGO는 상용되는 섬광체 중에서 밀도가 가장 크며 단단하고 흡습성이 없으며 벽개면이 없어 기계적인 충격에도 강하다. 높은 원자번호를 가지고 고밀도(7.13 g/cm³)의 섬광체 물질이다. 고밀도와 bismuth(Z=83)가 높은 원자번호를 가지기 때문에 BGO는 감마선의 흡수체로서 아주 효율이 높아, 높은 저지능을 요구하는데 적합하다. 감마선의 흡수가 아주 높아 광분율(Compton 와 photopeak의 비)이 아주 좋다. BGO의 발광파장은 480 nm로 표준 PMT의 반응 파장과 잘 일치하고 광출력(photon/MeV γ)은 NaI(Tl) 섬광체의 20-25% 이다. BGO 섬광체의 decay time은 실온에서 300 ns 정도이고 잔광은 3ms 후에 약 0.005%정도로 매우 낮다. 의료영상장비인 X선 CT에 사용할 수 있는 섬광체의 특성으로는 (1)광출력(light output)이 크며, (2)섬광감쇠시간이 짧고, 잔광(afterglow)이 작아야 한다. 그리고 (3)X선에 대한 흡수계수가 커야한다. BGO 섬광체가 발견될 당시 이와 같은 조건을 만족하는 섬광체는 없었고 가장 적절한 섬광체로 인정받아 CT 뿐만 아니라 PET 등에 방사선 검출기로 가장 많이 사용되고 있다. 그리고 높은 밀도와 높은 저지능으로

표 2. 상용화된 무기 섬광체의 특성.

Scintillator	Density (g/cm ³)	Max. Emission (nm)		Decay Constant (ns)		Photons/MeV gamma		Radiation Length (cm)	$\Delta E/E$ (662keV) FWHM%	Refractive Index at peak emission	Hygroscopicity
		fast	slow	fast	slow	fast	slow				
NaI:Tl	3.67		415		230		40,000	2.59	5.6	1.80	Very
CsI:Tl	4.51		550		900		52,000	1.86	4.3	1.78	Slightly
CsI:Na	4.51	420		630		40,000	1.8	7.4	1.84	Very	
BGO	7.13		480		300		8,500	1.13	9.0	2.15	No
CdWO ₄	7.90		470		20,000		13,000	1.00	6.8	2.25	No
BaF ₂	4.89	220	310	0.9	630		12,000	2.06	7.7	1.5	No
GSO:Ce	6.71	440		60		10,000		1.39	7.8	1.91	No
CsF	4.11	390		2.9		2,000		2.0		1.48	Very
CeF ₃	6.16	285		5/31		4,000		1.7		1.62	No
CsI	4.51	305, 320	450	6/28	1,000	2,000	200	1.8		1.95	Slightly
YAP:Ce	5.5	350		30		21,000		2.9	4.4	1.93	No
LSO	7.4	420		40		25,000			7.4	1.82	No
PbWO ₄	8.3	420		5-15		250		0.9		2.16	No

인하여 고에너지 물리학 실험의 입자 검출기로 사용되고 있다. 그림 1은 CERN에 있는 L3muon 입자 검출기이며 여기에 BGO 섬광체는 고에너지 입자의 열량계로 22 cm 길이의 BGO 단결정이 11,400개가 사용되었다[17].

PbWO₄ 섬광체는 현재까지 상용화된 섬광체중 밀도가 가장 높은 섬광체이고 밀도가 높음에도 불구하고 radiation hardness를 가지고 있다. 고에너지 물리 실험에서 요구되는 radiation hardness의 수준은 10⁶ rad 이상이고 많은 입자다발의 충돌로 인해 짧은 감쇠시간을 요구한다. 그러나 높은 입자에너지를 검출하므로 낮은 섬광효율을 갖는 섬광체가 요구된다. 이들의 조건을 거의 완벽하게 충족하는 섬광체가 바로 PbWO₄ 섬광체이다. 현재 CERN에 건설중인 CMS 검출기에는 25 cm의 PbWO₄ 단결정이 80,000 개가 사용될 예정이다[13, 18]. 그림 2는 CMS 검출기에 사용될 PbWO₄ 섬광체를 나타낸 것이다.

섬광체의 수요는 의료영상장비분야에만 매년 175 톤 정도가 사용된다. 의료영상장비인 PET에 사용하는 섬광체의 특성은 (1)γ선에 대한 검출효율(detection efficiency)을 높이기 위하여 흡수계수가 커야하며, (2)광출력이 크고, (3)동시계측의 시간분해능(time resolution)이 좋아야 한다. PET의 공간분해능

(space resolution)을 높이기 위해서는 가능한 한 많은 검출기를 사용해야하기 때문에 흡수계수가 특히 중요하다. 또한 광출력이 크면 시간분해능을 개량할 수 있으므로 광출력이 큰 것이 좋다. PET 개발 초기에는 NaI:Tl이 잠시 사용되었으나 곧 BGO로 대체되었다. 그 후 Time-of Flight(TOF) PET라고 불리는 다른 방식의 장치가 출현되었으며, 이 검출기에서는 CaF₂[19] 혹은 BaF₂[20, 21] 등과 같이 감쇠시간이 특히 짧은 섬광체가 사용되었다. 현재의 거의 모든 섬

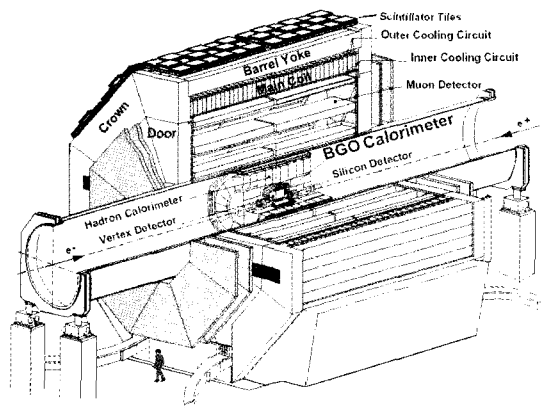


그림 1. CERN에 있는 L3 muon 입자 검출기.

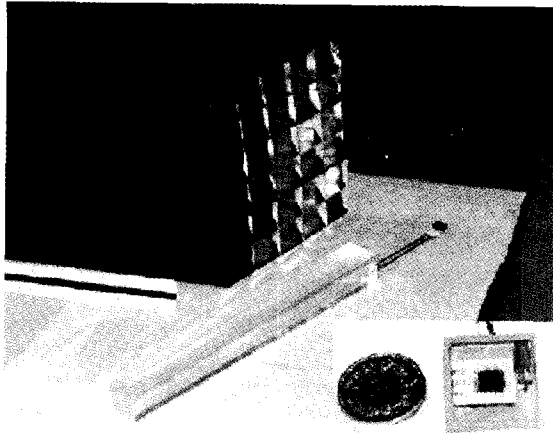


그림 2. CERN의 CMS 검출기에 사용될 PbWO₄ 섬광체.

광체의 연구개발의 목적은 PET에 적합한 섬광체를 개발하는 것이다. PET에 사용되는 섬광체의 특성은 아주 이상적인 섬광체(고밀도, 고 원자번호, 높은 광 출력, afterglow 없는 짧은 감쇠시간, 적당한 영역의 발광파장, 역학적인 단단함, 좋은 시간분해능, radiation hardness, 낮은 가격)이기 때문이다.

4. 전망

모든 응용분야에 맞는 섬광체는 없다. 그러나 섬광체를 개선·개발하는 연구는 계속되고 있다. 섬광체는 (1) 우연한 발견, (2) 수많은 시도와 에러, (3) 계획

표 3. Ce를 첨가한 섬광물질의 섬광특성.

Host	Ce concen. mole%	Emission wavelength (nm)	Light yield photons/MeV X ray	Decay time ns(μ s) (intensity in %)	Density g/cm ³	Ref.
LuF ₃	0.04	310	8,000	23, ~ μ s	8.3	22
LiBaF ₃	-	190, 225, 290	3,000	1, 13 μ s	5.3	3
LiBaF ₃	0.08	190, 225, 290, 320	5,000	1, 57, 13 μ s		23
LiBaF ₃	0.3+K	190, 225, 320	5,000	1, 34, 2.1 μ s		24
LiBaF ₃	0.3+Rb	190, 225, 320	4,500	1, 34, 2.4 μ s		25
LiYF ₄	0.1	310, 325	6,000	35, >10 μ s	4.0	26
CsGd ₂ F ₇	20	335	7,300	20, 3 μ s	5.5	27
K ₂ LaCl ₅	0.7	350, 370	26,000	18, ~ μ s, long	2.9	28
K ₂ LaCl ₅	10		50,000	140-10 μ s, long		29
Cs ₂ NaLaC ₁₆	1	370, 400	9,400	80, 600, 4 μ s, long	3.2	30
Cs ₂ NaCeC ₁₆	100	400	12,000	60, 400, 4 μ s, long	3.2	30
Cs ₂ NaLuC ₁₆	0.8	370, 400	23,000	80, 300, 5 μ s, long	3.7	30
Cs ₃ LuC ₁₆	0.4	375, 405	24,000	-, long	3.8	31
RbGd ₂ Cl ₇	0.4	370	40,000	455, 1.3 μ s, 4.4 μ s, long	3.7	32
RbGd ₂ Cl ₇	2.5	390	40,000			32
Cs ₃ Lu ₂ Cl ₆	0.1	410	7,500	> 10 μ s	4	31
RbGd ₂ Br ₇	0.9	410		63(56), 430(41), ~20 μ s(3)	4.8	33
RbGd ₂ Br ₇	4	415		50(60), 440(36), ~25 μ s(4)	4.8	33
RbGd ₂ Br ₇	10	420		43(56), 400(40), ~20 μ s(4)	4.8	34
YAlO ₃ (YAP)	0.2	360		~30/10 μ s	5.6	35, 36
GdAlO ₃ (GAP)	1	335, 358	~11,000	30/180/long	7.5	37, 38
LuAlO ₃ (LuAP)	<1	365	~24,000	~17.5/ >10 μ s	8.3	7, 8
Gd ₃ Sc ₂ Al ₃ O ₁₂	1	560	~10,000	120/long	5.6	39
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂	1	300, 510	~14,000	~100/long	6.7	40
Y ₂ SiO ₅ (YSO)		420	10,000	37/82	4.5	41, 42
Gd ₂ SiO ₅ (GSO)	0.5	440	9,000	60/600	6.7	10, 43
ScBO ₃	1	385, 420	10,000			44
Rb ₃ Lu(PO ₄) ₂	1	410	~25,000	34/ ~ μ s	4.7	44
K ₃ Lu(PO ₄) ₂		410	~40,000	37/ > μ s	4.0	45
Gd ₂ O ₂ S	Pr, Ce, F	510	40,000	~ μ s	2.5	46

적인 화합물로부터 발견된다. 섬광체의 가장 기본적인 밀도와 높은 원자번호를 생각하여 Pb, Lu 혹은 Bi 화합물을 이용하여 섬광특성 조사를 한 후 섬광체의 다른 특성을 조사한다. 그리고 좋은 시간 특성을 갖는 섬광체를 개발하기 위하여 Ce를 첨가한 화합물의 섬광특성을 조사한다. 이와 같이 체계적인 화합물의 섬광특성 조사는 X선과 gamma선 그리고 중성자 입자 등을 측정할 수 있는 이상적인 섬광체를 개발할 수 있다. 또한 컴퓨터와 software 이용하여 프로그램에 원소를 대입하여 만든 화합물을 시뮬레이션하면 찾고자하는 섬광체의 물질을 많이 빨리 찾을 수 있게 된다. 이렇게 시뮬레이션 하여 찾은 물질이 완벽한 섬광체가 되지는 못한다. 그러나 섬광체가 발견되고 100년이 지난 지금 이제까지의 섬광체를 개발하는 방법과는 달리 컴퓨터를 이용함으로써 지난 10년의 섬광체 역사를 2-3년으로 단축시킬 것이다.

표 3은 연구개발중인 섬광체를 나타낸 것이다. Ce가 첨가된 fluoride계 섬광체는 시간특성이 좋아 감쇠시간이 비교적 짧다. 반면 광수율은 chloride나 oxide계 화합물 섬광체에 비해 약간 떨어진다. Chloride계 화합물 섬광체는 광수율은 우수하나 가장 기본적인 물질의 밀도가 적은 단점이 있다. 그리고 oxide계 화합물의 섬광체는 밀도와 광수율 감쇠시간 등이 비교적 좋으나 산화물인 관계로 화합물을 정확히 조성비로 만드는데 힘들고 화합물의 녹는점이 비교적 높아 단결정으로 성장시킬 때 어려운 점이 있다. 그리고 희토류 원소가 포함되어 화합물의 가격이 높은 단점이 있다.

참고 문헌

- [1] R. Hofstadter, *Phy. Rev.*, Vol. 74, p. 100, 1948.
- [2] G. Huber, A. R. H. F. Ettema, J. C. Van't Spijker, P. Dorenbos, C. P. Allier, and C. W. E. Van Eijk, "Lu₂S₃:Ce³⁺, a new red luminescing scintillator", *Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. B*, Vol. 134, p. 304, 1998.
- [3] M. J. Knitel, et al., "LiBaF₃, a thermal neutron scintillator with optimal n-γ discrimination", *Nucl. Instr. and Meth.*, Vol. A374, p. 197, 1996.
- [4] V. V. Chernikov, M. F. Dubovik, V. P. Gavrylyuk, B. V. Grinyov, L. A. Grin, T. I. Korshikova, A. N. Shekhovtsov, E. P. Sysoeva, A. V. Tolmachev, and O. V. Zelenskaya, "Peculiarities of scintillation parameters of some complex composition borate single crystals", *Nucl. Inst. Meth. in Phys.*, Vol. A498, p. 424, 2003.
- [5] J. S. Iwaczyk, B. E. Patt, C. R. Tull, L. R. MacDonald, Eric Bescher, S. R. Robson, J. D. Mackenzie, and E. J. Hoffman, "New LSO based scintillators", *IEEE Tran. Nucl. Sci.*, Vol. 47, p. 1781, 2000.
- [6] M. Balcerzyk, M. Moszynski, M. kapusta, D. Wolski, J. Pawelke, and C. L. Melcher, "YSO, LSO GSO and LGSO A study of energy resolution and nonproportionality", *IEEE Tran. Nucl. Sci.*, Vol. 47, No. 4, p. 1319, 2000.
- [7] A. Lempicki, M. H. Randles, D. Wisniewski, M. Balcerzyk, C. Brecher, and A. J. Wojtowicz, "LuAlO₃:Ce and other aluminate scintillators", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. NS-42, p. 280, 1995.
- [8] W. W. Moses, S. E. Derenzo, A. Fyodorov, M. Korzhik, A. Gektin, B. Minkov, and V. Aslanov, "LuAlO₃:Ce - a high density, high speed scintillator for gamma detection", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. NS-42, p. 275, 1995.
- [9] M. Moszynski, C. Gresset, J. Vacher, and R. Odru, "Timing properties of BGO scintillator", *Nucl. Instr. and Meth.*, Vol. 188, p. 403, 1981.
- [10] E. Sakai, "Recent measurements on scintillator-photodetector systems", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. NS-34, p. 418, 1987.
- [11] I. Holl, E. Lorenz, and G. Mageras, "A measurement of the light yield of common inorganic scintillators", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. NS-35, p. 105, 1988.
- [12] C. L. Woodt, J. A. Kierstead, S. P. Stoll, R. Y. Zhu, D. A. Ma, and H. B. Newman, "A study of the optical and radiation damage properties of Lead Tungstate crystals", *IEEE Nucl. Sci. Sym. and Med. Imaging Con. Record*, Vol. 2, p. 847, 1995.
- [13] Egidio Longo, "PbWO₄ calorimeter in CMS", *Nucl. Inst. Meth. in Phy. Res.*, Vol. A384, p. 225, 1996.
- [14] R. H. Bartram and A. Lempicki, "Efficiency of

- electron-hole pair production in scintillators", *J. Lumin.*, Vol. 68, p. 225, 1996.
- [15] E. I. Rashba and G. E. Gurgenishvili, *Sov. Phys. Solid State*, Vol. 4, p. 759, 1962.
- [16] R. Hofstadter, *Nucleonics*, Vol. 6, p. 70, 1950.
- [17] Richard Sumner and the L3 Collaboration, "The L3 BGO electromagnetic calorimeter", *Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 265, p. 252, 1988.
- [18] B. Ille, On behalf of the CMS collaboration, "The Compact Muon Solenoid(CMS) electromagnetic calorimeter", *Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res.*, Vol. A453, p. 210, 2000.
- [19] M. Moszynski, C. Gresset, J. Vacher, and R. Odru, "Properties of CsF, a fast inorganic scintillator in energy and time spectroscopy", *Nucl. Instr. and Meth.*, Vol. 179, p. 271, 1981.
- [20] M. Laval, M. Moszynski, R. Allemand, E. Cormoreche, P. Guinet, R. Odru, and J. Vacher, "Barium fluoride-Inorganic scintillator for subnanosecond timing", *Nucl. Instr. and Meth.*, Vol. 206, p. 169, 1983.
- [21] P. Dorenbos, J. T. M. de Haas, R. Visser, C. W. E. van Eijk, and R. W. Hollander, "Absolute light yield measurements on BaF₂ crystals and the quantum efficiency of several photomultiplier tubes", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. NS-40, p. 424, 1993.
- [22] B. Moine, et al., *Mater. Sci. Forum* Vol. 239, p. 245, 1997.
- [23] C. M. Combes, et al., "Optical and scintillation properties of LiBaF₃:Ce crystals", *J. Lumin.* Vol. 72, p. 753, 1997.
- [24] C. M. Combes, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijk, J. Y. Gesland, and P. A. Rodnyi, "Optical and scintillation properties of LiBaF₃:Ce crystals", *J. Lumin.* Vol. 72-74, p. 753, 1997.
- [25] C. M. Combes, P. Dorenbos, R. W. Hollander, and C. W. E. van Eijk, "A thermal-neutron scintillator with n/γ discrimination LiBaF₃:Ce, Rb", *Nucl. Instr. and Meth.*, Vol. A416, p. 364, 1998.
- [26] C. M. Combes, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijk, C. Pedrini, H. W. den Hartog, J. Y. Gesland, and P. A. Rodnyi, "Optical and scintillation properties of Ce³⁺ doped LiYF₄ and LiLuF₄ crystals", *J. Lumin.*, Vol. 71, p. 65, 1997.
- [27] D. R. Schaart, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijk, R. Visser, C. Pedrini, B. Moine, and N. M. Khaidukov, "Properties of mechanisms in scintillation CsGd₂F₇:Ce³⁺ and CsY₂F₇:Ce³⁺ crystals", *J. Phys.: Condens. Matter*, Vol. 7, p. 3063, 1995.
- [28] J. C. van't Spijker, P. Dorenbos, J. I. M. De Haar, C. W. E. van Eijk, H. U. Gudel, and K. Kramer, "Scintillation properties of K₂LaCl₆ with Ce doping", *Rad. Meas.*, Vol. 24, p. 379, 1995.
- [29] J. C. van't Spijker, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijk, K. W. Kramer, and H. U. Gudel, "Scintillation and luminescence properties of Ce³⁺ doped K₂LaCl₆", *J. Lumin.*, Vol. 85, p. 1, 1999.
- [30] J. C. van't Spijker, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijk, M. S. Wickleder, H. U. Gudel, and P. A. Rodnyi, "Scintillation properties of some Ce doped chloride elpasolites", *J. Lumin.*, Vol. 72, p. 786, 1997.
- [31] J. C. van't Spijker, PhD thesis, Delft University of Technology, Delft University Press, The Netherlands, 1999.
- [32] J. C. van't Spijker, O. W. V. Frijns, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijk, K. Kramer, H. U. Gudel, in: Yin Zhiwen, Feng Xiqi, Li Peijun, and Xue Zhilin (Eds.), *Proceedings of the SCINT97, CAS Shanghai Branch Press, China*, p. 330, 1997.
- [33] P. Dorenbos, J. C. van't Spijker, O. W. V. Frijns, C. W. E. van Eijk, K. Kramer, H. U. Gudel, and A. Ellens, "Scintillation properties of RbGd₂Br₇:Ce³⁺ crystals: fast, efficient, and high density scintillators", *Nucl. Instr. and Meth.*, Vol. B132, p. 728, 1997.
- [34] O. Guillot-Noel, J. C. van't Spijker, J. T. M. de Haas, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijk, K. W. Kramer, and H. U. Gudel, "Scintillation properties of RbGd₂Br₇:Ce Advantages and limitations", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. NS-46, p.1274, 1999.
- [35] M. Kapusta, M. Balcerzyk, M. Moszynski, and J.

Pawelke, "A high-energy resolution observed from a YAP:Ce scintillator", Nucl. Instr. and Meth., Vol. A421, p. 610, 1999.

[36] V. G. Baryshevskaya, M. V. Korzhika, V. I. Moroza, V. B. Pavlenkoa and A. A. Fyodorova, S. A. Smirnovab, O. A. Egorychevab, and V. A. Kachanovc, "YAlO₃:Ce-fast-acting scintillators for detection of ionizing radiation", Nucl. Instr. and Meth., Vol. B58, p. 291, 1991.

[37] S. A. Smirnovaa, L. I. Kazakovaa, A. A. Fyodorovb, and M. V. Korzhik, "Fast and heavy GdAlO₃ Ce scintillators", J. Lumi., Vol. 60-61, p. 956, 1994.

[38] J. A. Mares, Christian Pedrini, Bernard Moine, Karel Blazek, and Josef Kvapil, "Optical studies of Ce³⁺-doped gadolinium aluminium perovskite single crystals", Chem. Phys. Lett., Vol. 206, p. 9, 1993.

[39] A. Kling, D. Kollwe, D. Mateika, "Scintillation properties of cerium-doped gadolinium-scandium-aluminum garnets", Nucl. Instr. and Meth., Vol. A346, p. 205, 1994.

[40] Yu. Zorenko, V. Gorbenko, I. Konstankevych, B. Grinev, and M. Globus, "Scintillation properties of Lu₃Al₅O₁₂:Ce single-crystalline films", Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res., Vol. A486, p. 309, 2002.

[41] A. R. Kuleskii, et al., "Radioluminescence at scintillation properties of Yttrium and rare-earth element Silicate monocrystals", Zh. Prikl. Spektrosk., Vol. 48, p. 650, 1988.

[42] Q. Su, J. Lin, H. Zhang, and S. Wang, "Crystal structure dependence of the luminescence of rare earth ions (Ce³⁺, Tb³⁺, Sm³⁺) in Y₂SiO₅", Mater. Res. Bull., Vol. 31, p. 189, 1996.

[43] H. Ishibashi, K. Shimizu, K. Susa, and S. Kubota, "Cerium doped GSO scintillators and its application to position sensitive detectors", IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 36, p. 170, 1989.

[44] M. Kobayashi, K. Takamatsu, S. Ide, K. Mori, S. Sugimoto, H. Takagi, M. Yuasa, and M. Ishii, "A beam test on a fast EM-calorimeter of gadolinium silicate, GSO(Ce)", Nucl. Instr. and Meth., Vol. A306, p. 139, 1991.

[45] L. Rghioui, L. Benarafa, M. Saidi Idrissi, A. Lorriauxb, and F. Wallartb, "Apport de la spectroscopie de vibration a l'approche structurale des composes de type K₂RbLn(PO₄)₃(Ln est lanthanide)", Spectro. Acta. Vol. A52, p. 419, 1996.

[46] B. C. Grabmaier and W. Rossner, "New scintillators for X-ray computed tomography", Inter. J. Rad. Appli. and Instr., Vol. D21, p. 43, 1993.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 이 우 교

❖ 학 력

- 1987년 2월 동의대 물리학과 이학사
- 1991년 2월 부경대 대학원 물리학과 이학석사
- 2000년 2월 부경대 대학원 물리학과 이학박사

❖ 경 력

- 2000년 4월-현재
한국원자력연구소 Post-Doc

성명 : 도 시 흥

❖ 학 력

- 1969년 2월 경북대 문리대 물리학과 이학사
- 1972년 2월 경북대 대학원 물리학과 이학석사
- 1988년 8월 경북대 대학원 물리학과 이학박사

❖ 경 력

- 1990년 9월-1991년 9월 일본 福井大學 객원교수
- 1980년 11월-현재
부경대 자연과학대학 물리학과 교수

성명 : 황 종 선

❖ 학 력

- 1977년 2월 한양대 전기공학과 공학사
- 1979년 8월 한양대 대학원 산업공학과 공학석사
- 1995년 2월 전북대 대학원 전기공학과 공학박사

❖ 경 력

- 1986년 7월-1998년 2월
한국원자력연구소 책임연구원
- 1998년 2월-현재
담양대학 컴퓨터응용전기시스템과 교수
- 1999년 1월-2002년 12월
국제기능올림픽대회 35회, 36회 국제심사위원
- 1999년 1월-현재
한국전기전자재료학회 기술교육위원회 위원장, 협력이사, 편집위원