

전기전도성 New Glass의 개발과 응용

The development and application of Electric Conductive Glasses

강 원 호, 이 명 원
(W.H.Kang, M.W.Lee)

1. 서 론

현재 electronics와 광 electronics등 전자 기 관련 분야를 제외하고는 모든 산업을 지탱할 수 없을만큼 그 이용에는 가히 엄청나다고 할 수 있겠다.

특히 높은 경도를 갖으며 우수한 성형성을 갖지만 전기를 잘 통하지 않는 glass를 기능재료로서 전도성을 높으려는 시도는 중요한 과제라고 생각되어진다.

이러한 관점에서 전기 자기적 기능을 가진 New glass의 개발과 전도성에 따른 분류, 즉 전자 전도성 glass와 이온 전도성 glass, 초전도용 glass등의 응용에 대해서는 논하고자 한다. 전도성은 하전체의 종류에 따라 크게 전자전도와 이온 전도로 크게 나눌 수 있으며 그림 1에 여러물질의 전도도를 나타내고 있다.

2. 전자 전도성 glass

전자 전도성에 따른 분류로는 칼코겐화물 glass와 전도성 산화물 glass가 있다.

2.1 칼코게나이드 glass와 그 응용

Amorphous Semiconductor, 이것은 1960년대 후반부터 70년대 전반에 걸쳐 전자 재료 분야의 하나의 선품이 되었는데 미국의 Ovshinsky가 주기율표의 VI족 원소에 해당 하는 Se, Te, (이들은 칼코겐이라 부른다)로 만든 Te-As-Si-Ge로 된 chalcogenide계의 비정질(CG) 반도체로 전기적 스위치소자의 기억소자로서의 응용 가능성을 주장하는 논문을

1968년에 발표하였다. 그 후 최근에는 Si, Se, GaAs, As₂S₃등의 유리질과 천이원소 산화물 유리질 반도체 연구에 박차를 가하고 있으며 이와 관련하여 1969년에 Journal of Noncrystalline Solid가 정기 간행물로 발간되게 되었으며 수 많은 연구 결과가 발표되고 있다. 그러나 CG는 진성 P형 반도체이고 도핑에 의한 p-n전이가 어렵기 때문에 기억소자 또는 스위치소자 이외의 전자소자로 이용 가능성 여부에 대한 연구는 그리 활발하지 못했으나 CG는 결정체에 비하여 유리 성분의 변화에 따른 반도체의 연속적인 특성변화로서 제작이 용이하며 전자 산업 발전에 기여할 수 있는 점을 고려하여 연구되어져 왔다.

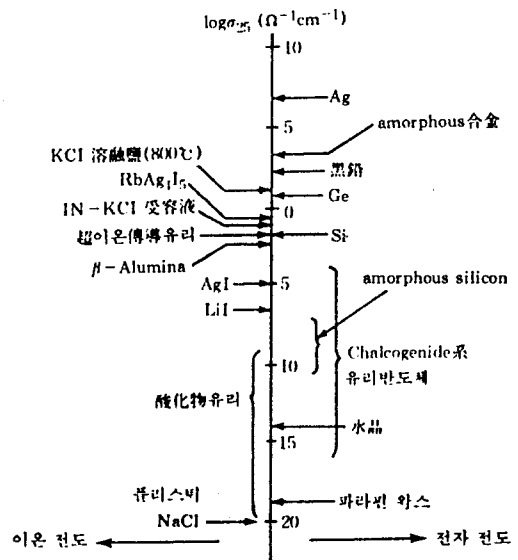


그림 1 여러 물질의 전도도 비교

또한 근래에 와서 비정질 Chalcogenide 박막 중 Bi₂Se₃, Ge₂₀Se_{80-x}Bi_x(x=11 at %) 등의 박막에서 n형 전도가 일어나는 것으로 보고 되고 있다.

그림 2은 CG의 특성과 응용을 나타내고 있으며 그림 3은 그들의 구성성분을 보여주

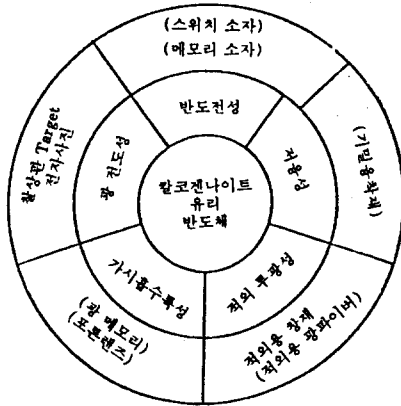


그림 2 칼코겐나이트 유리 반도체 고유의 특성과 그 응용

고 있다. CG는 그림 1에서 볼 수 있듯이 적외투과성이 뛰어나다. 따라서 이 특징을 살려서 적외선용의 기판, 적외선 투과용 광 filter나 레이저 베스, 레이저 가공 등의 에너지 전송용 filter로서 주목을 받고 있다.

그림 4는 칼코겐나이트 Glass의 온도에 따른 전기전도도의 변화를 나타내고 있으며 이들 유리에서 주목할만한 특징은 같은 조성의 결정 형태의 것보다 유리의 전기 저항이 높은 특징이 있음을 나타내고 있다.

그림 5에서는 결정질과 유리질 형태에서 여러 칼코겐나이드 물질의 전도도를 비교하고 있는데 이 효과는 유리의 비 주기성 구조에서 발생하는 것으로 생각되는 전자의 산란 때문에 일어난다고 해석하는 것이 타당할 것이다.

2.2 전자전도성 산화물 glass

V₂O₅, Fe₂O₃, FeO, WO₃와 같은 천이금속 산화물이 함유되어 있는 산화물계 유리가 일반적으로 상온에서 반도체성을 나타내며 온도 및 주파수에 따라서 이들 유리의 전기전도도값이 변화하며 유전 특성을 갖고 있음이 알려져 있다.

1954년 Denton등이 천이금속 산화물인 V₂O₅를 다량으로 함유하고 있는 V₂O₅-TeO₂, V₂O₅-TeO₂-BaO계 유리가 n형 반도체성을 갖는다는 것을 처음 발견한 이후 바나듐 유리계에 대한 전기적 성질의 연구가 활발히 수행되어 왔는데 이들 유리의 직류 전도도는 실온에서 10⁻³-10⁻⁷(ohm cm)⁻¹이고 활성화 에너지 E는 0.3-0.5 eV라고 보고하였다. 또한 유리속에서는 V⁴⁺이온과 V⁵⁺이온이 공존하며 전기전도는 전자가 V⁴⁺이온에서 V⁵⁺이온으로 hopping함으로써 일어난다고 보았다.

즉 천이금속 산화물계 유리의 전자 전도는 처음에 저원자가 이온에 규제되어 있던 전자가 phonon의 도움으로 고 원자가 이온으로 뛰어넘는 polaron hopping전도로 이루어 진다.

그림 6은 TiO₂-V₂O₅-P₂O₅계 유리의 온도

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0
1	H															He
2	▲Li	Be									▲B	C	N	▲O	F	Ne
3	▲Na	Mg									Al	▲Si	▲P	▲S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	×Mn	×FeCoNi	▲Cu	×Zn	▲Ca	▲Ge	▲As	▲Se	▲Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	RuRhPd	▲Ag	▲Cd	▲In	×Sn	▲Sb	▲Te	▲I	Xe
6	Cs	Ba		Hr	Ta	×W	Re	OsIrPt	×Au	▲Hg	▲Tl	▲Pb	▲Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra														

● 유리중에 다량함유 ▲ 소량함유 × 미량함유

그림 3 칼코겐유리의 구성성분

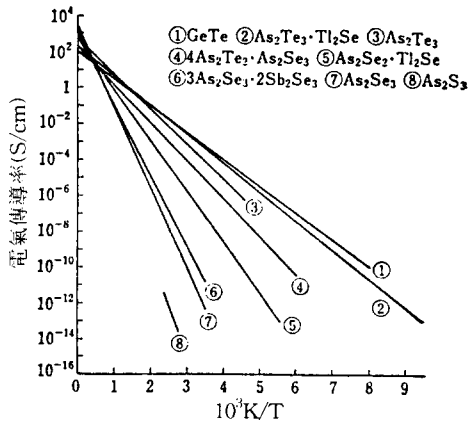


그림 4 칼코게나이드 유리의 온도에 따른 전기전도도의 변화

Composition	Conductivity, $\text{ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$	
	Glass	Crystal
$2\text{As}_2\text{Sc}_3 \cdot 3\text{As}_2\text{Te}_3$	2.5×10	10^2
$\text{As}_2\text{Sc}_3 \cdot 2\text{Tl}_2\text{Se}$	7.5×10	7.2×10^{-3}
$2\text{As}_2\text{Se}_3 \cdot \text{Sb}_2\text{Se}_3$	1.0×10	2.5×10^{-6}
$\text{Tl}_2\text{Tc} \cdot \text{As}_2\text{Tc}_3$	5.3×10	4.6×10^{-1}
$\text{Tl}_2\text{Se} \cdot (5/6\text{As}_1/6\text{Sb})\text{Se}_3$	2.2×10	2.0×10^{-8}

그림 5 결정질과 유리질에서의 칼코게나이드 물질의 전도도 비교

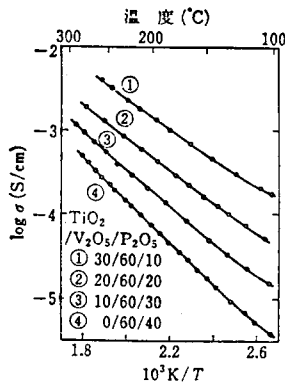


그림 6 $\text{TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5\text{-P}_2\text{O}_5$ 계 유리의 온도에 따른 전기전도도의 변화

에 따른 전기 전도도율을 나타내고 있다.

3. 이온 전도성 glass

최근들어 고체 고속이온 전도체(fast ion conductor(FIC))의 이온 전도성에 관한 기초 연구 뿐만 아니라, 이것을 응용한 1, 2차 고체전지, microbattery, 가스검지기, 연료전지 연구가 활발히 진행되고 있다. 주요 연구 대상이 되고 있는 FIC는 β -alumina, α -AgI, stabilized ZrO_2 등의 결정계와 B_2O_3 , P_2O_5 , SiO_2 등의 기초로하는 유리계와 PEO(Poly-Ethylene OXIDE)를 중심으로 하는 고분자계이다. SIC에 대한 가장 기본적인 연구과제는 온도에 따른 이온전도도의 변화를 조사하여 물성을 연구하는 것 뿐만아니라 사온에서 보다 나은 이온 전도체를 발견 혹은 합성하는 것이다. 그러나 상온에서 만족할만한 이온 전송(transport)성질을 갖는 고체이온전도체가 현재까지도 개발이 되지 않아 상업적 응용은 아직도 미비한 실정이다.

1980년대 이후에 결정계의 이온전도체보다 유리계의 전도체에서 보다 큰 이온 전도성을 갖는 물질들이 발견된 이후 최근까지 유리전해질(glass electrolytes)에 대한 많은 연구 결과가 발표되었다. 유리 전해질은 넓은 조성범위에서 제조할 수 있으므로 물성을 조정할 수 있고, 물리적으로 등방성이며, grain boundary가 없이 bulk형태로 제조가 가능하고, 나아가서 여러 모양으로 제조할 수 있을 뿐만 아니라 박막 형성도 가능하다는 장점이 있으므로 응용연구에 보다 적합하다.

유리전해질에서는 부정렬된 구조에 의한 aperiodic potential fluctuation때문에 전자의 전도도가 이온전도도값에 비해 무시할 수 있을 만큼 적다. 또한 금속 불순물이 포함되더라도 불순물 자체가 유리구조속에서 local environment속에 놓이게 되므로 전자에 의한 전도는 증가되지 않는다.

유리계에서 큰 이동도를 갖는 이온중에서 대표적인 이온은 Ag^+ 와 Li^+ 이다. 많은 연구가 이루어진 대표적인 유리계는 $\text{AgI}/\text{Ag}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$, $\text{AgI}/\text{Ag}_4\text{P}_2\text{O}_7$, $\text{LiI}/\text{Li}_2\text{S}/\text{B}_2\text{S}_3$ 등이 있으며, 상온에서 이온 전도도가 10^{-2} S/cm에 이른다. 이 값은 보통의 절연체 유리보다 대략 10^{10} 배 정도 큰 값이다. 주요 연구대상이 되는 유리계의 망목형성자(network-

former)는 oxide계인 B_2O_3 , P_2O_4 , SiO_2 등과 sulphide계인 B_2S_3 , P_2S_5 , SiS_2 , GeS_2 등이다. 이온전도도가 큰 2계(binary), 3계(ternary) 유리의 제조에서 기본적인 원칙은 전도이온(예로서 Li^+)의 수를 증가시키고 유리구조의 "opening"의 수가 많아서 전도이온이 diffusion이 용이하도록 하는 것이다.

현재까지 발표된 결과에 의하면 sulphide계 유리전해질의 전도도가 oxide계보다 크다. 그러나 sulphide계의 유리는 매우 흡수성이 강하므로 시료제조에 상당한 주의가 필요하며 응용에도 문제가 있다.

일반적인 방법으로 제조된 유리중에서 전도도가 가장 큰 종류는 아직까지도 Ag^+ 나 Cu^+ 이온을 함유한 유리이다. 가장 많은 연구가 이루어진 FIC유리는 AgI 가 포함되어 있는 Ag_2O 와 Lewis acid(P_2O_5 나 B_2O_3)로 이루어진 oxide glass이다. 유리형성자로서 B_2O_3 가 더 나은 것으로 알려져 있는데 그 이유는 decoupling index가 클 뿐만 아니라 유리 전이온도가 상대적으로 높기 때문이다. GeO_2 , Bi_2O_3 , TeO_2 등의 유리형성자를 기초로 한 혼합유리도 꽤 연구가 되어 있다. 근래에는 Li유리계에서 기록을 경신할만한 유리가 합성될 것이 기대된다. 또한 F^- 나 Cl^- 같은 음이온이나 Pb^{2+} 같은 2가 양이온이 전도의 주체가 되는 유리에 대한 결과도 자주 보고되고 있다.

Li^+ 이온 전도유리계에서 가장 많이 연구가 진행된 유리는 $LiI/LiPO_3$ 와 LiI/LiP_2S_7 이다. 그러나 이 계통의 유리는 매우 흡수성이 강한 단점이 있기 때문에 최근에는 흡수성이 덜한 Chloroborate유리가 연구대상으로 더 선호되고 있다. $LiCl/Li_2O/B_2O_3$ 유리의 경우 $LiCl$ 의 함량이 최대가 되는 유리 형성한계에서 전도도가 최대가 된다. $LiCl$ 이 선호되는 또 다른 이유는 같은 계열이 $LiBr$ 이나 LiI 에 비해 Li_2O/B_2O_3 에 훨씬 더 잘 섞이기 때문에 이 계통의 유리중에서 최대의 전도도 값을 갖는다.

응용면에 있어서 상온고체전지의 제작을 위하여 상당히 많은 연구가 수행되어 왔다. 고체 전지 경우에는 봉합된 전지로 부터의 전해질 누출이 없고 액체 전해질에서 문제

가 되는 기화현상이 없으며, 저온상전이 없으므로 저온에서의 성능이 우수하며, 축전 안정성(storage stability)가 우수하고, 소형 박형의 구조로 전지를 만들 수 있다는 장점이 있다. 상온고체전지의 성능개선에는 여러 가지 문제가(고체전해질, 경계면, 전극) 많이 있지만, 만족할 만한 이온 전도성을 갖는 물질이 아직 개발되지 못하고 있는 실정이다.

3.2 초 Ion 전도 glass

앞서 서술한 내용과 중복되는 부분이 있겠지만 Ion전도에는 보통의 전도보다 높은 전도도를 나타내는 초이온 전도체가 있다. Ion은 전하를 갖는 것 뿐만 아니라 상당한 반경과 질량을 갖기 때문에 고체중에서 이동하는 것은 일반적으로 곤란하다. 그렇기 때문에 높은 ion전도성은 여러종류의 특별한 조건이 충만한 때에 처음으로 관측되는 것이 된다. 이것들의 조건으로서 다음의 3가지가 잘 알려져 있다.

(1) 격자결함이 존재하는 것: 예를 들면 ZrO_2 에 CaO 를 첨가하면, 4가의 Zr 위치에 2가의 Ca 가 들어간다. 이대로는 전기적 중성을 만족할 수 없기 때문에 산소의 격자차를 만든다. 그 때문에, 산소 ion이 움직일 수 있을 것 같이 된다.

(2) 특별한 결정구조를 취하는 것: 예를 들면 β -Alumina는 $Na_2O_{11}Al_2O_3$ 라고 하는 조성을 가진 층상 결정이다. 그 층과 층사이에는, 층내에 비해서 약하게 결합하고 있다. Na^+ ion은 그와 같은 층간에 존재하기 때문에, 잘 움직일 수 있다. ion이 움직이기 적당한 tunnel이 결정중에 존재하는 코린덤구조라고 불리우는 것도 있다.

(3) 평균구조를 취하는 것: 이것은, 특별한 결정구조를 갖는 별도의 예로 생각하는 것도 가능하지만, (2)와는 꽤 다르기 때문에 별개로 취급한다. 예를 들면 a-Agl는 ion반경이 큰 I-ion이 체심입방격자를 형성한다. 그러면, 이 단위격자 중에는 I ion은 2개 존재한다. AgI라고 하는 화학양론을 만족하기 위해서는 Ag^+ ion도 2개 존재하면 좋은 것이 된다. Ag^+ ion에 의해서 같은 값의 위치가 12개소 있고 Ag^+ ion은 그것들 12개 위

치의 어딘가에 고정되어 있는 것은 아니고 평균적, 통계적으로 분포하기 때문에 Ag⁺ ion으로서는, 실질적으로 응용상태와 같은 정도로 잘 움직일 수 있다.

상기 3가지는, 결정재료에서 높은 ion전도성을 얻는 방법이고 이러한 결정으로 높은 ion전도성을 나타내는 것은『초 ion 전도체』라고 불리운다. 최근 제4의 방법으로서, Amorphous화 또는 Glass화 된 것이 높은 ion전도성을 실현하기에 유리한 것을 나타냈다. Glass상의 초 ion 전도체는 그것들과 구별하기 위해 『초 ion 전도 glass』라고 불려진다.

그림 7에 Ag-I-Ag₂O-P₂O₅계를 예로 하여 glass와 결정의 전도도의 비교를 나타낸다. glass 조성의 전조성역에 걸쳐서 glass의 쪽이 높은 전도도를 나타내고 있고, 높은 ion전도도를 실현함으로써 glass화 되는 것이 유리함을 나타내고 있다. 같은 화학조성의 glass와 결정을 비교한 경우, 예외는 있지만 glass쪽이 일반적으로 ion전도성은 높게된다 어는 크기를 가진 ion이 고체중을 움직일 때, 격자가 흐트러져 모를는 구조가 되어 있는 glass쪽이 결정보다는 ion의 이동에는 유리한 것이라고 설명된다. 더욱, 전자전도체의 경우, amorphous화 하면 전자와 정공이 격자진동에 의해서 보다 심하게 산란되는 것 같이 되기 때문에 전도도는 낮게된다.

위에서 논한 것 같이 glass화하는 것에 의해, 전도도가 높게된다는 것에 첨가해 표 1에 나타낸 것은 glass에 고유의 특질도 겸비하고 있기 때문에 ion전도재료의 분야에 있어서 glass와 amorphous재료는 점점 그 중요성을 더할 것이라고 기대된다.

4. 고온 초전도체의 Glass화

1986년 Bendnorz 및 muller가 Ia-Ba-Cu-O계 세라믹스에서 초전도임계온도 Tc가 30K를 넘을 수 있는 가능성을 발표한 이래로 세라믹스 초전도체와 산화물 고온초전도체가 세계의 주목을 끌고 있다.

그후 Y-Ba-Cu-O계에서 Tc가 액체질소

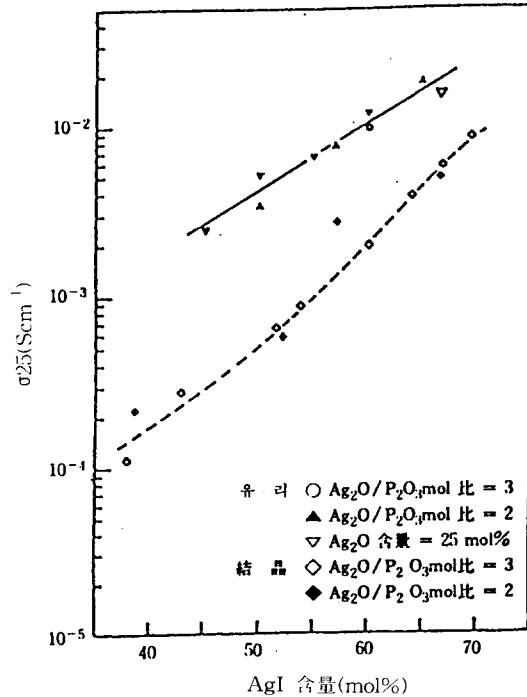


그림 7 AgI-Ag₂O-P₂O₅계 결정유리의 전도도(25℃) 비교

온도인 77K을 넘어서고 Bi-Ca-Sr-Cu-O계 및 Ti-Ba-Ca-Cu-O계에서는 100K이상의 Tc가 보고 되었다.

산화물 고온 초전도체는 Cu를 함유하고 페로브스카이트 구조를 기본으로 하는 결정 구조를 갖고 있다. 이것은 산화물 초전도체 중에 Bi-Ca-Sr-Cu-O계는 glass화가 가능하며 생성된 glass를 결정화시켜 초전도체를 얻을 수 있다.

초전도체의 합성 process 및 이와같은 glass화 법이 주목적으로 되는 이유의 하나는 fiber화등에 응용을 기대할 수 있기 때문이다. 산화물 초전도체는 금속계 초전도체에 비해 가공이 어려운 반면 glass는 적당한 점도에서 여러가지 형상으로 가공이 가능하며 fiber화 할수가 있다. glass화 법에는 분말을 소결시킬 경우에 비해 초전도체를 생성시키기 쉬우며 적당한 원소를 첨가하여 초전도 결정상의 석출과정을 제어할 수 있는 특징을 가지고 있다.

주지의 사실과 같이, 산화물계의 고온 초

표 1 각종 Glass의 이온 전도율

ガラス組成	(mol%)	$\sigma_0(10^4SK/cm)$	$E(eV)$	$\sigma_{25^\circ C}(S/cm)$
산화물 및 Oxyhalogen화물 Glass				
$Li_2O-B_2O_3$	(42.5-57.5)	27	0.60	7.1×10^{-6}
$Li_2O-LiCl-B_2O_3$	(31.8-12.3-65.9)	23	0.50	3.0×10^{-6}
Li_2O-SiO_2	(40-60)	11	0.63	9.2×10^{-9}
Na_2O-SiO_2	(45-55)	13	-0.57	1×10^{-7}
Rb_2O-SiO_2	(40-60)	8.9	0.65	2.6×10^{-9}
$Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$	(25-25-50)	26	0.72	6.2×10^{-10}
$Li_2Si_2O_7-Li_2SO_4$	(71.5-28.5)	250	0.70	1.3×10^{-8}
$LiI-LiPO_3$	(33-67)	81	0.56	1.0×10^{-6}
$Li_2O-Nb_2O_5$	(50-50)	1.2	0.44	1.6×10^{-8}
$LiNbO_3-SiO_2$	(65-35)	12	0.57	7.5×10^{-8}
초이온전도 Glass				
$AgI-Ag_2SeO_4$	(75-25)	2.1	0.20	3×10^{-2}
- Ag_2MoO_4	(80-20)	12.0	0.29	$6 \times 10^{-3}(23^\circ C)$
- $Ag_4F_2O_7$	(85-15)	4.1	0.23	1.8×10^{-2}
$AgBr-AgPO_3$	(48-52)	5.3	0.31	1.0×10^{-1}
유화물 Glass				
$Ag_2S-As_2S_3$	(66.7-33.3)	4.2	0.36	$9 \times 10^{-3}(20^\circ C)$
$Ag_2S-GeS-GeS_2$	(50-5-45)	29.0	0.38	$3 \times 10^{-1}(20^\circ C)$
Na_2S-GeS_2	(50-50) ^{*)}		0.43	1.2×10^{-3}
불화물 Glass				
$ZrF_4-BaF_2-ThF_4$	(58.7-31.3-10)	91	0.79	1.3×10^{-10}
$ZrF_4-BaF_2-YF_3$	(60-33-7)	2.6	0.65	1.1×10^{-9}

전도체가 화제를 불러 일으키고 있는데 그 응용으로서 박막화와 선재화가 활발히 연구되고 있다. 특히 선재화가 중요한 문제로 생각될 수 있다. 통신용 광 fiber가 단시일내에 실용화가 가능하게 되 하나의 큰 원인은 소재가 glass였던 것이다. glass가 갖는 성형 가공성이라고 하는 특징이 100% 살려졌다고 할 수 있다.

그림 8의 제값에서 glass를 실험했을때, Y계는 어떻게 해도 glass를 얻을 수 있었다. 그림 9에 BiCaSrCu_{20x}의 분말 X선 회절도를 나타낸다.

(a)는 고상반응생성물로서, (b)가 그것을 그림 8의 제값으로 초급냉한 것이다. CaO에 의한 회절 피크가 조금 보여졌지만 전체로서 amorphous 특유의 Pattern을 나타내고 있다. (c), (d), (e)는 이 초급냉된 것을 500도, 700도, 850도에서 2시간 열처리 한 것의 회절도로 고상반응 생성물과 같은 결정이 점점 성장하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 850도에서는 고상반응물과 회절 피크의 위치는 똑같은데 그 결정성이 좋아져 있다. 그

림8에 초냉각된 BiCaSrCuOx의 열분석 결과를 나타냈다. 시차열분석에 있어서 390도 부근에 명확한 glass전이온도 Tg를 볼 수 있는 것이 가장 주목된다. 이 glass전이온도의 확인과 그림 9 (b)의 X선 회절도를 합쳐서 이 초급냉물은 glass라는 결론을 내릴 수 있다. 다만 하나의 문제는 결정화온도 Tx가 Tg에 가깝고 glass로서의 안정성에 모자라므로 아직 이 단계에서는 성형 가공성이 기대될 수 없다는 것이다. 그러나, 화학조성을 바꾸면, 냉각속도를 더 작게, 안정성이 높은 glass도 얻을 수 있어서, 금후의 발전이 기대된다.

5. 맺음말

이상과 같이 전도성 Glass의 전도 하전체의 종류에 따라 전자 전도성 Glass와 이온 전도성 Glass 및 초전도체에 관해 정리를 해 보았다. 고도의 산업 사회를 이끌어 가는 Electronics분야에 밀거름이 될 도전재료 분야의 응용에 호응하기 위해서는 전도기구에

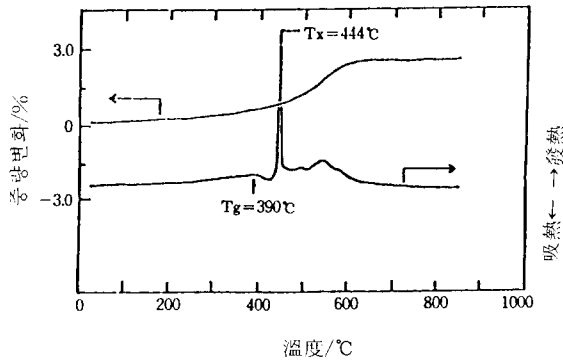


그림 8 초급냉시킨 BiCaSrCu₂Ox의 시차열 분석과 열중량분석

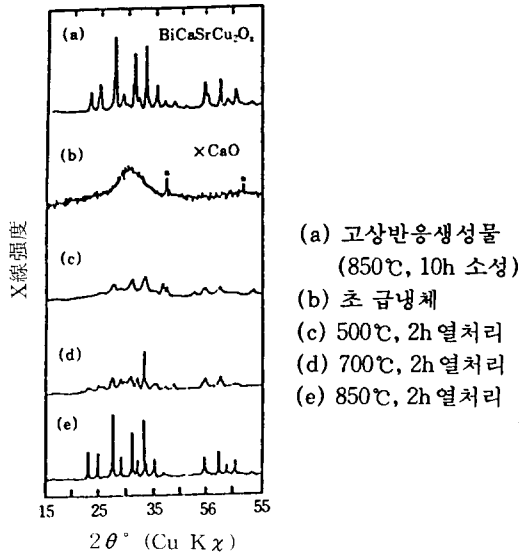


그림 9 BiCaSrCu₂Ox 조성물의 X선 회절 그림

따른 명확한 해석과 이를 이용한 각종 전기, 전자 분야의 첨단 소재들의 개발이 활발하게 추진되어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 作花濟夫, New Glass Hand Book, p.941-943, 朝倉書店(1975)
2. 泉浴微郎, 新しいガラスとその物性, p.407-420
3. 作花濟夫, ガラスの事典, p.382-387, 朝倉書店(1985)
4. ニューガラスハンドブック編輯委員會, ニューガラスハンドブック, p.365-379, 九善株式會社
5. S.R.Elliott, Physic of Amorphous Materials, p.243-262, Longman S & T.
6. T.Minami, J.Non-Cryst. Solid, 95/96, 107(1987)3.
7. T.Minami, J.Non-Cryst. Solid, 73,273 (1985)
8. T.Minami and A.Kinoshita, J.Non-Cryst Solid, vol.1.p.201,M,Pollak 編, CRC Press(1987)
9. N.M. Tallan, Electrical Cond. in Ceramics and Glass, B, p.592~p.598, Dekker p. (1974).

著者紹介



강원호
 1945년 3월 18일생. 1971년 한양대 요업공학과 졸업. 1973년 한양대 요업공학과 석사. 1985년 한양대 요업공학과(공학박). 1993년 현재 단국대 재료공학과 조교수.



이명원
 1967년 7월 14일생. 1991년 단국대 재료공학과 졸업. 1993년 2월 단국대학교 재료공학과 졸업(석사). 1993년 현재 단국대학교 재료공학과 박사과정.