

## RuO<sub>2</sub>계 후막저항체의 미세구조와 전기적성질

구본급·김호기

한국과학기술원 재료공학과  
(1989년 1월 20일 접수)

---

### Microstructure and Electrical Properties of RuO<sub>2</sub> System Thick Film Resistors

Bon-Keup Koo and Ho-Gi Kim

Dept. of Materials Science and Engineering, KAIST

(Received January 20, 1990)

#### 요 약

혼성집적회로에 널리 쓰이는 기존의 RuO<sub>2</sub>계 후막저항체 중 저저항(100ohm/□)의 Du Pont 1721저항체와 고저항(10 kohm/□)의 1741후막저항체 페이스트를 여러조건에서 소결하여 미세구조와 전기적성질의 상관관계를 조사하였고, 이들의 결과를 바탕으로 후막저항체의 전기전도기구를 해석하였다.

저저항 후막저항체의 경우 소결온도 증가에 따라 glass의 용융과 함께 700°C에서 면적저항의 급격한 감소를 보이다가 그 이상의 온도에서 다시 조금씩 증가하였고, 700°C이상의 온도에서 소결한 모든 시편의 저항온도특성은 모두 양(+)이였으므로 저저항의 후막저항체의 전기전도는 금속과 같은 전자에 의한 전기전도가 지배적이다 반면 고저항의 후막저항체의 경우 소결온도 증가에 따라 면적저항이 거의 직선적으로 감소하였으며, 저항온도특성도 저저항의 경우와 달리 소결온도에 따라 달리 나타났는데, 700°C소결에서는 -였고, 800°C소결에서는 +, -가 공존하다가 900°C가 되면 다시 +로 그 경향이 변화하였다. 따라서 전기전도에 기여하는 charge carrier도 소결온도에 따라 종류가 변하였다. 이들의 전기적 성질은 미세구조의 형성과 도전분말의 확산에 의한 기지상 내부의 전자상태의 변화와 깊은 관련이 있음을 알았다.

#### ABSTRACT

As a function of sintering temperature and time, the electrical properties of ruthenium based thick film resistors were investigated with microstructure. The variation of resistivity and TCR(temperature coefficient of resistance)trends of sintered specimen at various sintering temperature were different low resistivity paste(Du Pont 1721) from high one (Du Pont 1741). These phenomena are deeply relative to microstructure of sintered film.

With increasing the sintering temperature for 1721 system, the electrical sheet resistivity decreased, but again gradually increased above 800°C. And TCR trends in 1721 system are all positive. On the other hand the electrical sheet resistivity of 1741 resistor system decreased with sintering temperature. And TCR trends variable according to sintering temperature. TCR of specimen sintered at 700°C was negative value, and TCR of 800°C

sintered specimen coexisted negative and positive value. But in case of specimen sintered at 900°C, TCR was positive value. As results of this fact, it was well known that the charge carrier contributed to electrical conduction in 1741 resistor system varied with sintering temperature.

### 1. 서 론

우주항공, 통신 및 전자산업에 쓰이는 전자회로가 점차 기능의 고 밀도화, 경량, 그리고 우수한 신뢰성과 안정성을 요구하게 되면서 미소회로기법(microcircuit technology)의 개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 micro-electronics에는 세가지 주요한 기법 즉 후막기법, 박막기법 그리고 단일체체 집적회로(monolithic I.C.)기법이 있다. 그중에서도 후막기법이 유연성이 우수하고, 응용성이 뛰어나 가장 널리 쓰이고 있다<sup>1,2)</sup>.

혼성집적회로(hybrid I.C.)를 구성하는 주 재료의 하나인 후막저항체는 30여년 전 부터 전자산업에 널리 쓰이고 있으나 이에 대한 기본연구는 매우 부족한 상태이다. 예를 들어 가장 기본적인 성질의 하나인 전기전도의 기구에 대해서도 무정형 반도체 모델<sup>3)</sup>, 터널링 모델<sup>4)</sup>, 연속 chain 모델<sup>5)</sup>, Hopping 모델<sup>6)</sup> 등 여러가지가 제안되고 있으나 아직은 정설이 없는 실정이다. 또한 도전성 분말인 RuO<sub>2</sub>나 Bi<sub>2</sub>Ru<sub>4</sub>O<sub>7</sub>와 glass 간의 상호확산에 의한 기지상의 전자구조상태의 변화와 glass 분물에 따른 미세구조의 변화가 막의 전기적성질과 전기전도기구에 미치는 영향을 밝히지 못하고 있다. 최근 Abe<sup>7)</sup> 등은 RuO<sub>2</sub>와 glass 반응에 의해 glass 입자 표면에 반응층이 생겨 glass의 양이 적으면 금속과 같은 전기전도를, glass 양이 많으면 반도체적인 전기전도를 보인다고 했다. 그러나 막의 저항과 미세구조의 상관관계를 밝히지는 못했고, 어떤 저항범위에서는 소결온도에 따라 전기전도기구가 변하는 것은 고려하지 못했다.

따라서 본 연구에서는 RuO<sub>2</sub>계 후막저항체의 미세구조와 전기적 성질의 상관관계를 면적 저항이 다른 즉 페이스트 중의 glass 분율이 다른 기준의 두 페이스트를 여러 소결조건에서 실험하여 막의 미세구조를 관찰하고 전기적 성질을 측정하여 이들의 상관관계를 연구 하였으며, 이와 같은 실험을 바탕으로 아직도 밝혀지지 않고 있는 후막저항체의 전기전도기구를 정립하고자 하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1. 출발 시료의 조성분석 및 성질

실험에 사용한 후막저항체는 Du Pont 1721, 1741(이하 1721, 1741저항체라 함)으로써 각각의 조성분석 결과와 성질은 Table 1과 같다.

두 경우 모두 주성분은 RuO<sub>2</sub>와 glass로 구성되어 있었고, 저항이 낮은 1721의 경우가 RuO<sub>2</sub>의 상대량이 많음을 알 수 있으며, glass의 구성 산화물은 PbO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO, MnO, CuO 등임을 알 수 있다.

#### 2.2. 인쇄, 소결 및 물성 측정

96%알루미나 기판에 먼저 Ag/Pd 후막도체를 인쇄한 후 850°C에서 10분간 소결한 양 단자 사이에 가로와 세로 비(aspect ratio)를 4, 2, 1, 1/2, 1/4로 조절한 200메쉬 스테인레스스크린 망을 DEK65 프린터에 위의 양 단자에 일치시킨 후, 그 위에 저항체를 인쇄하였다. 인쇄된 시편을 상온에서 10분간 유지시킨 다음 120°C에서 10분간 건조하고, 600-900°C로 일정하게 유지되어 있는 관상로의 중심부 까지 pusher를 이용하여 50°C/min의 승온속도로 소결한 후 같은 속도로 꺼내었다. 저항체의 소결시에는 유기물의 연소시에 나오는 CO나 CO<sub>2</sub>가스의 배출을 위해 5 l/min의 공기를 흘려 주었다. 이는 이들 배기가스가 막을 환원시키는 경향이 있기 때문이다.

소결된 시편의 전기저항을 측정하여 면적 저항(sheet

Table 1. Characteristics of Starting Resistor Pastes.

	1721	1741		
Resistivity Ω/□	100±10%	10K±10%		
TCR ppm/°C	0±50	0±50		
VCR ppm/V/mm	-	-80		
Quan. Tech. Noise dB	21	80		
Conductive Phase	RuO <sub>2</sub>	RuO <sub>2</sub>		
Inorganic Binder	glass	glass		
Glass Forming Oxide	PbO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , ZnO, MnO, CuO			
Paste Composition (atomic%)	Al	2.42	Al	4.45
	Si	12.01	Si	19.63
	Pb	40.25	Pb	49.02
	Ru	38.26	Ru	10.10
	Ca	1.17	Ca	1.90
	Mn	1.77	Cu	1.36
	Cu	0.27	Zn	13.55
	Zn	3.85		

resistivity)으로 변환시켰으며, -45°C에서 150°C까지 온도를 변화시키면서 저항을 측정한 후 25°C의 저항을 기준으로 저항온도계수(TCR)를 구하였다. 그리고 주사전자현미경으로 미세구조를 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 저저항(1721계) 후막저항체의 전기적 성질과 미세구조

후막의 특성은 paste의 인쇄 후 소결에 의해 나타난다<sup>8)</sup>. 이러한 후막 특성은 매우 복잡한 비평형계로서 출발물질의 성질과 소결에 의한 미세구조와 상호반응은 막의 물리적 성질에 밀접한 관계를 갖는다<sup>9)</sup>. 후막저항체의 경우 도전성 산화물 분말과, 여러 성분으로 구성된 glass 분말로 이루어져 있다<sup>10)</sup>. 따라서 glass의 용융 후 두 상들 사이의 상호작용이 막의 미세구조와 전기적성질에 영향을 줄 것이다.

Fig.1은 도전성 분말인 RuO<sub>2</sub>의 양이 상대적으로 많은

저저항의 1721저항체를 인쇄한 후 소결온도에 따른 막의 면적저항의 변화를 나타낸 결과이다. glass가 완전히 용

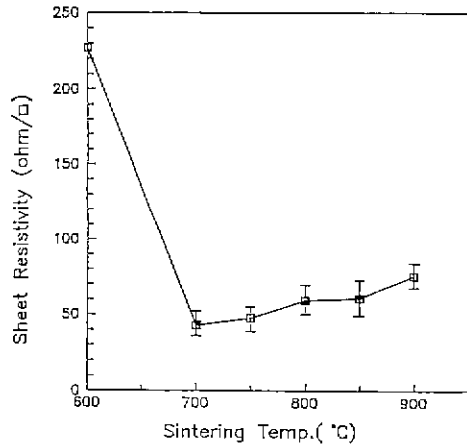


Fig.1. Electrical sheet resistivity with sintering temperature in 1721 resistor system (sintering time 10min.).

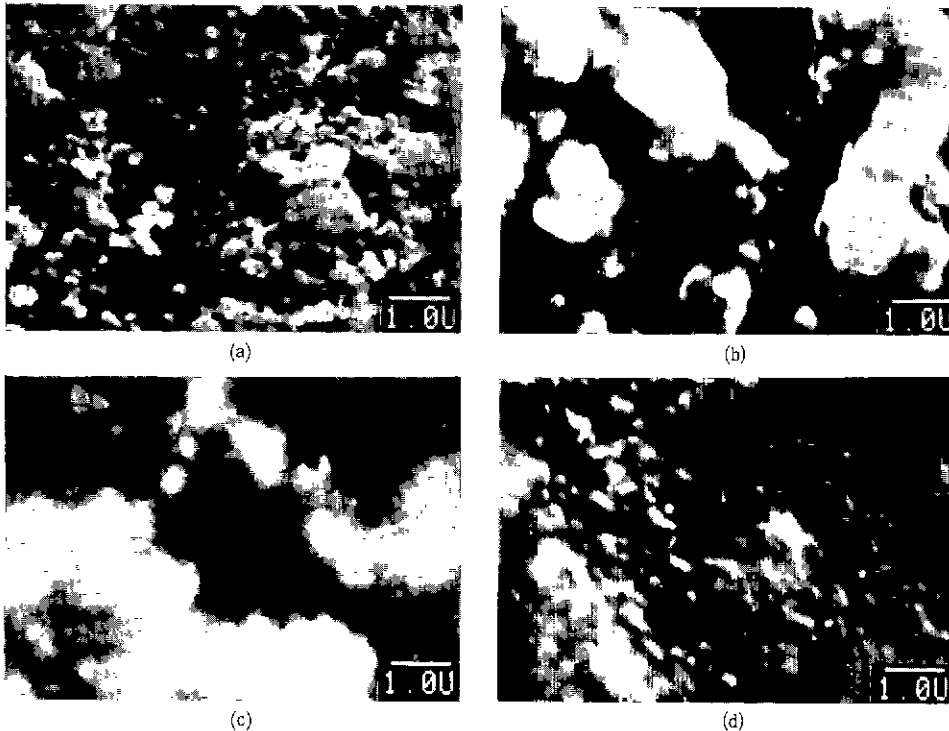


Fig.2. SEM micrographs of 1721 resistor system with sintering temperature. (a) 600°C, (b) 700°C, (c) 800°C, (d) 900°C

용되지 않은 600°C에서는 도전분말인 RuO<sub>2</sub>가 서로 완전히 접촉하지 못하여 높은 저항을 보이다 700°C 부터 저항은 급격히 감소하였다. 그 후 700°C이상으로 소결하면 소결온도에 따라 약간씩 면적저항이 증가되는 경향을 보였다. 이러한 현상은 glass와 도전성 입자의 상호작용에 의해 나타나는 미세구조와 밀접한 관계가 있다.

Fig. 2는 각 온도(600-900°C)에서 10분간 소결한 막의 미세구조이다. 600°C온도에서는 glass의 용융이 부분적으로 일어나고, 도전성 입자는 glass 매트릭스에 고립되어 있어 부분적인 접촉만 이루고 있으므로 막의 면적 저항이 비교적 높게 나타났다. 700°C에서는 glass의 용융이 현저하지만 용융 glass의 점도는 아직 높아 RuO<sub>2</sub>입자들을 뭉쳐 cluster를 형성하며 이들 cluster가 서로 많은 기공을 형성하면서 연결되어 있는 상태로 된다. 따라서 막의 미세구조는 균일하지는 않아도 RuO<sub>2</sub>입자의 접촉은 glass가 균일하게 피쳐있는 상태보다 더 많이 일어나게 되어 저항은 비교적 낮게 나타났고, 800°C이상으로 소결온도가 높아지면 glass의 점도는 낮아지게 되어 막의 전체에 퍼지고 따라서 부분적으로 모여 있던 RuO<sub>2</sub>가 막 전체로 퍼지면서 도전입자 사이의 간격은 조금 증가하고, RuO<sub>2</sub>의 용해와 확산이 일어나 glass 매트릭스에 저항이 RuO<sub>2</sub>보다 큰 중간층이 형성되면서 저항은 약간씩 증가한다. 900°C로 소결온도가 높아지면 액상소결은 거의 완료된 상태로 되어 이러한 소결체들이 균일하게 분포되고, cluster와 cluster 사이는 중간층으로의 분리가 현저해 지면서 막의

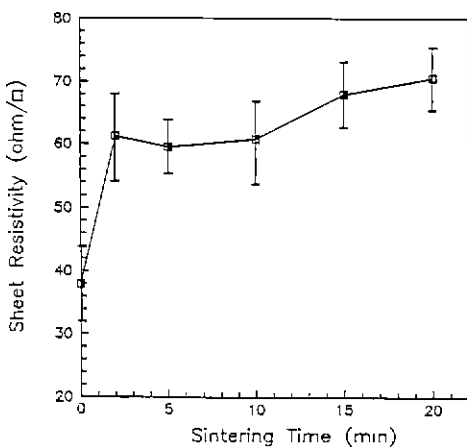


Fig. 3. Electrical sheet resistivity with sintering time in 1721 resistor system (sintering temperature : 850°C).

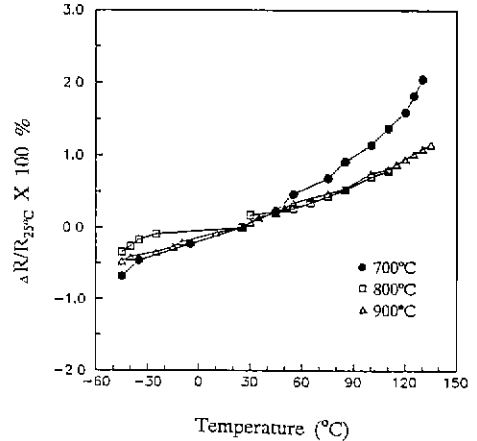


Fig. 4. Temperature-resistance characteristic of 1721 resistor system sintered at 700, 800, 900°C

저항은 조금씩 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 3은 850°C에서 소결시간의 증가에 따른 면적 저항의 변화를 나타낸 결과이다. 소결온도에서 급히 꺼낼 때는 유리가 막 전체에 퍼지기에 충분히 용융되지 못하여 앞의 700°C의 경우와 같이 유리가 도전분말을 뭉쳐 기공이 있는 상태와 유사하리라 여겨지며 따라서 저항은 작게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 용융 유리가 퍼지기에 충분한 시간이 지나면 다시 도전입자의 간격은 조금씩 커져 저항은 증가되는 경향을 갖는다고 사료되어 진다.

Fig. 4는 1721계 저저항 후막저항체를 알루미늄이나 기판에 인쇄하여 700, 800, 900°C에서 소결한 시편을 -45°C 부터 150°C 까지 온도를 변화시키면서 면적저항을 측정하여, 25°C의 저항을 기준으로 그 변화량 즉, 저항온도계수를 나타낸 결과이다. 저항온도계수의 절대값에는 차이가 있어도, 경향은 각 소결온도 모두 +로 나타남을 알 수 있다. 즉 온도가 증가함에 따라 저항은 증가하였다. 이렇게 저항온도계수가 양으로 되는 것으로 보아 charge carrier는 금속과 같은 전자에 의한 전기전도라 말할 수 있다. 따라서 +TCR인 RuO<sub>2</sub>입자의 cluster 사이에 존재하게 되는 중간층도 +TCR인 물질임을 알 수 있다.

### 3.2. 고저항(1741계)후막저항체의 전기적성질과 미세 구조

Fig. 5는 저저항 1721저항체보다 glass의 양이 상대적으로 많은 즉 도전분말의 양이 상대적으로 적은 고저항 1741 후막저항체의 소결온도에 따른 면적 저항의 변화를 나타내고 있다. 600°C소결온도에서는 매우 높은 저항을 나타

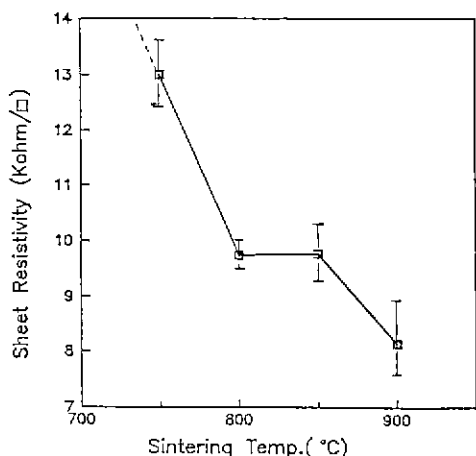


Fig. 5. Electrical sheet resistivity with sintering temperature in 1741 resistor system(sintering time : 10min. ).

있으나, 소결온도가 높아짐에 따라 민적 저항은 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이와같은 경향은 앞의 저저항 1721

계 후막저항체의 경우와 다른 경향성을 갖는다.

Fig. 6은 고저항 1741 후막저항체를 600-900°C에서 소결한 저항체막의 미세구조 사진이다. 600°C에서는 glass 입자의 소결진행으로 glass는 어느정도 매트릭스를 형성 하지만 이 온도에서 glass의 점도는 높으므로 RuO<sub>2</sub>입자는 부분적으로 고립된 상태로 존재하게 된다. 따라서 600°C에서는 매우 높은 저항을 갖는다. 700°C로 온도가 상승하면 도전분말의 양이 적어 glass가 도전입자를 뭉치는 힘보다 막 전체로 퍼지는 힘이 클 것으로 예상되어 1721저항체의 경우와 달리 700°C에서도 glass는 거의 완전한 매트릭스를 형성하고, 그 사이에 RuO<sub>2</sub>는 어느 정도의 간격을 두고 분산되어질 것이다. 입자와 입자 사이의 매트릭스에는 RuO<sub>2</sub>의 확산에 의한 중간층이 존재하게 되며, 이러한 중간층은 소결온도가 높아짐에 따라 점점 커지고, 900°C에는 중간층이 전 매트릭스에 퍼져 저항이 감소 되었음을 알 수 있다.

Fig. 7은 850°C에서 소결시간에 따른 막의 저항변화를 나타낸 결과이다. 여기서는 소결시간에 따른 저항변화가

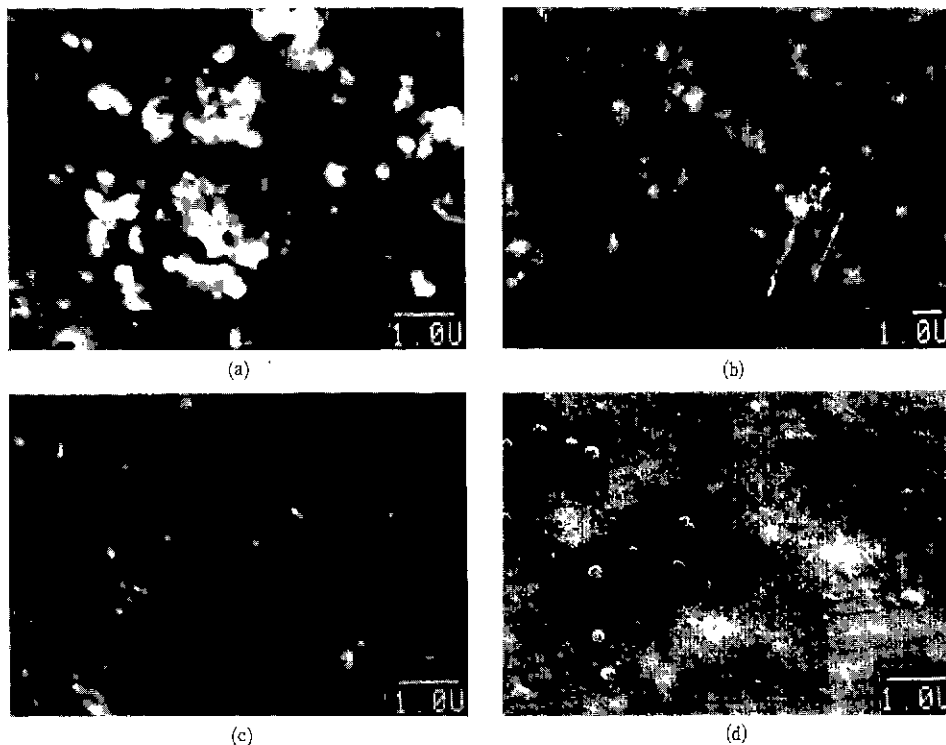


Fig. 6. SEM micrographs of 1741 resistor system with sintering temperature. (a) 600°C, (b) 700°C, (c) 800°C, (d) 900°C

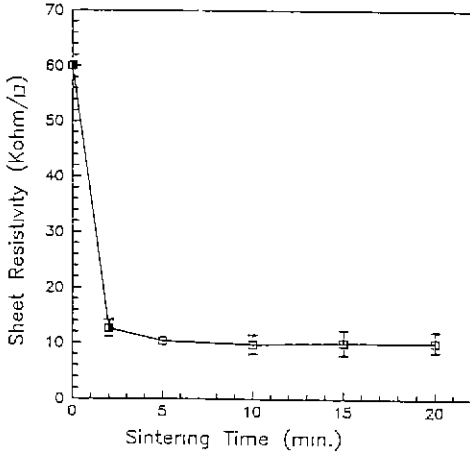


Fig. 7. Electrical sheet resistivity with sintering time in 1741 resistor system (sintering temperature : 850°C).

작고 매우 안정함을 알 수 있다. 이러한 현상으로 glass 매트릭스내로 RuO<sub>2</sub>의 확산은 시간에 그다지 큰 영향을 받지않고 온도에 더 많이 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 고저항의 1741저항체를 알루미늄 기판에 인쇄한 후 700, 800, 900°C에서 소결한 시편을 -45°C에서 부터 150°C까지 온도를 변화시키면서 면적 저항을 측정하여 25°C의 저항을 기준으로 그 차이를 분율로 나타낸 결과이다. 700°C까지의 소결온도에서는 앞의 미세구조 사진에서도 본 바와 같이 RuO<sub>2</sub>입자가 glass 기지상 내에서 서로 접촉이 완전히 일어나지 않고, 아직 glass 내로 RuO<sub>2</sub>의 확산이 현저하지 못할 것으로 예상되어 막의 저항은 크고, 저항온도 특성도 -로 나타났다. 이와같이 -TCR로 나타나는 것으로 보아 이는 glass 자체의 이온전도특성에 잘 일치하는 결과라 할 수 있다. 그러나 800°C 소결온도에서는 온도저항특성이 상온 이하에서는 - 그리고 상온 이상의 온도에서는 +TCR이 공존하는 결과를 얻었다. 이와 같이 양과 음의 저항온도계수의 상호보완에 의해 절대치도 비교적 작게 나타남을 알 수 있었다. 이와같은 현상을 임계현상이라 할 수 있다. 온도가 상승하여 RuO<sub>2</sub>의 용해 및 확산이 활발해지면 기지상으로 확산된 Ru 이온에 의해 기지상의 전기적 구조가 변화되어 +TCR로 되는 영역 즉, 중간층이 생기지만 800°C 정도의 온도에서는 아직 전기지상에 완전한 중간층이 분포되지 못하고 일부 glass의 이온전도 특성이 나타나는 부분도 공존하게 된다고 여겨진다. 그러나 소결온도가 900°C로 되면 저항온도특성은

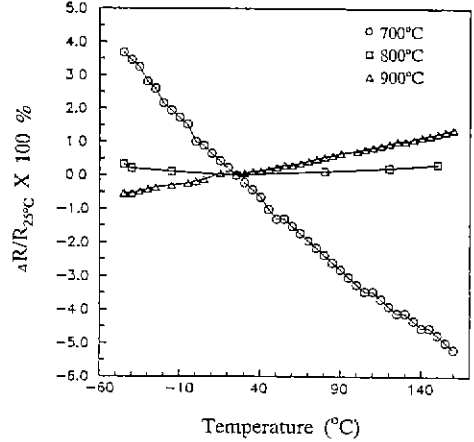


Fig. 8. Temperature-resistance characteristic of 1741 resistor system sintered at 700, 800, 900°C.

모두 +값으로 되는 것을 알 수 있다. 이는 기지상에 Ru 이온의 뚜렷한 확산으로 +TCR을 갖는 중간층의 overlap으로 나타나는 결과라 사료된다.

### 3.3. 후막저항체의 전기전도기구 고찰

후막의 전기전도에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 20여년 전 부터 연구되어 오고 있으나, 아직도 밝혀져 있지 않다. Fig. 9 및 Fig. 10에 지금까지의 연구 결과를 토대로 하여 후막의 미세구조 형성과정을 Fig. 9의 저 저항의 경우와 Fig. 10의 고 저항의 경우로 나누어 도식적으로 묘사하였고, 이러한 현상으로 후막의 전기전도기구를 다음과 같이 설명할 수 있다.

Fig. 9는 저항이 낮은 1721저항체를 묘사한 경우로서 700°C에서는 glass 용융에 의해 RuO<sub>2</sub>입자의 재배열이 일어나고 이들이 서로 용융 glass로 인해 뭉쳐지면서 접촉이 생겨 약간의 소결이 진행되고, 도전분말인 RuO<sub>2</sub>의 확산에 의한 Ru 이온과 glass 내의 이온들과의 반응에 의한 중간층이 형성되면서 cluster 들을 약간 분리시킨다. 그러나 이러한 중간층은 적을 것이다. 따라서 전기전도는 RuO<sub>2</sub>와 +TCR을 갖지만 RuO<sub>2</sub>보다 저항이 높은 중간층을 통해 전기전도가 일어난다고 볼 수 있다. 온도가 더욱 높게 되면 접촉을 이룬 부분은 소결이 진행되어 cluster들 사이의 간격은 조금씩 커지고, 반응 생성층도 커지면서 저항은 약간씩 증가한다. 이 경우는 각 온도에서 모두 +TCR을 갖는 것은 금속과 같은 전자에 의한 전기전도로 설명된다.

반면 Fig. 10의 고저항의 경우 즉, glass의 상대량이 많

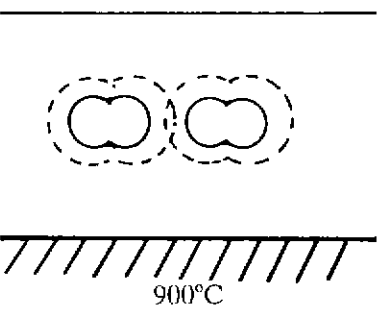
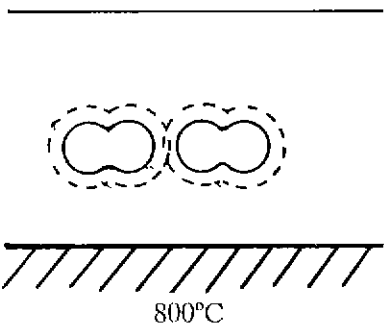
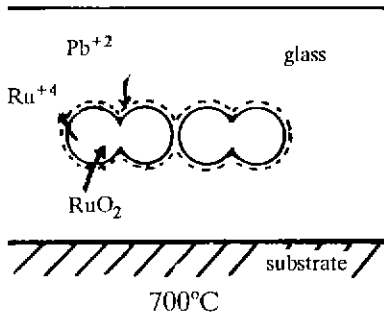


Fig. 9. Schematically illustration of microstructure for 1721 resistor system.

은 경우에는 700°C에서는 glass 매트릭스에 RuO<sub>2</sub> 입자가 고립된 상태로 존재하므로 RuO<sub>2</sub> 사이의 간격이 크고, 비록 약간의 반응층이 형성되어도 서로 겹치지 못하여 -TCR을 가지며 저항이 높은 이온 전도성의 glass를 통한 전기전도가 전체 전기전도의 성질을 지배하게 될 것이다. 따라서 막은 전체적으로 -TCR의 높은 저항을 보인다. 800°C로 소결온도가 증가되면 RuO<sub>2</sub> 입자는 용해에 의해 크기가 작아지고 glass 내의 이온들과 용해된 Ru<sup>4+</sup>의 반

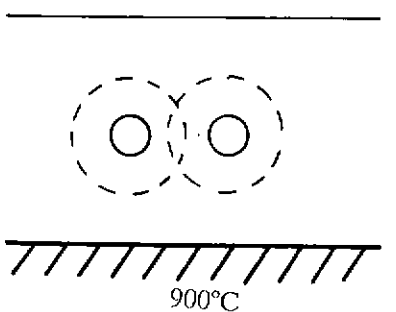
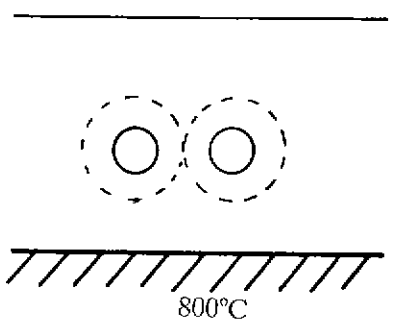
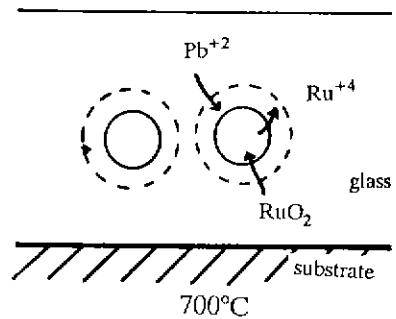


Fig. 10. Schematically illustration of microstructure for 1741 resistor system.

응으로 +TCR을 가지는 중간층이 형성되면서 TCR에 임계현상이 나타난다. 즉 막의 TCR이 +와 -가 공존하는 현상을 보인다. 900°C에서는 중간생성층 생성이 현저하게 되면서 막의 TCR은 +를 갖는 중간생성물 층의 overlap으로 전체적으로 +가 된다고 사료된다.

이와 같이 저항이 낮은 1721저항체의 경우는 도전상입자들 사이의 접촉과 glass 맥상을 통한 소결 그리고 +TCR을 갖는 약간의 반응생성물을 통해 전기전도가 일어

나는 금속과 같은 전자에 의한 전기전도로서 설명할 수 있고, 반면 고저항 1741저항체의 경우 즉 glass의 상대량이 많은 경우에는 초기에는 중간층의 형성이 적어 서로 연결되지 않아 막의 전기전도는 -TCR을 갖는 glass 매트릭스를 통한 이온전도로 지배되어지다가, 소결온도가 높게되면서 +TCR의 중간층의 형성으로 이온에 의한 전도와 전자에 의한 전도의 두 전도기구가 공존하는 영역이 존재한 후 더욱 소결이 진행하여 중간층의 형성이 커지면 +TCR로 즉 전자에 의한 전도로 전기전도기구가 변함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

Ag/Pd 제 후박도체에 RuO<sub>2</sub>를 도전성상으로 하여 제조된 Du Pont 1721(저저항), 1741(고저항)저항체를 인쇄하여 각각을 여러 온도에서 소결하여 저항체의 미세구조와 전기적 성질 그리고 저항온도특성을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

저항이 낮은 1721의 경우 600°C 소결온도에서 높은 저항을 보이나 700°C이상에서 소결하면 저항은 급격히 감소한 후 소결온도에 따라 약간씩 저항이 증가하였다. 이러한 양상은 미세구조의 형성과 밀접한 관련이 있었다 그리고 700°C이상의 소결온도에서 모두 양의 저항온도계수를 갖는 것으로 이 경우의 전기전도는 도전입자의 소결과 양의 저항온도계수를 갖는 중간층에 의해 금속과 같은 전자에 의한 전기전도임을 알 수 있었다.

이보다 저항이 높은 1741 저항체의 경우 소결이 진행하면서 먼저저항은 감소하는 경향을 보였다. 그리고 소결온도 700°C에서는 -저항온도계수를 보였으며, 800°C소결온도에서는 +와 -저항온도계수가 공존하는 임계현상이 보이나, 그 온도 이상에서는 +로 저항온도 특성이 변하였다. 따라서 전기전도기구도 소결온도에 따라 달리 나타났는데 700°C에서는 도전분말의 주위에 약간의 중간층이 생기지만 이 중간층은 서로 연결되지 못하여 전기전도는 음의 저항온도계수를 갖는 매트릭스에 지배를 받는 이온전도기구가 되며, 800°C소결온도에서는 이온전도와 전자에 의한 전도의 두 기구가 공존하다가 소결온도가 900°C로 되면 양의 저항온도계수를 갖는 중간층의 중첩으로 전체막의 전기전도는 다시 전자에 의한 전기전도기구를 갖는다고 사료된다.

#### [감사의 글]

본 연구는 과학기술처 국책연구비로 수행되었음을 알고 이에 감사를 표하는 바이다.

#### REFERENCES

1. C A Harper, (ed-in chief) "Handbook of Thick Film Hybrid Microelectronics," McGRAW-HiLL Company (1974)
2. L.C. Hoffman, "An Overview of Thick Film Hybrid Materials," *J Am. Ceram. Bull.*, **63** (4), 572, (1984).
3. C.C. Sartain, "Semiconductors Produced by Doped Oxide-Glasses with Ir, Pd, Rh, Ru," *J Non-Crystall. Solid*, **5**, 55 (1970).
4. G.H. Pike, C.H. Seager, "Electrical Properties and Conduction Mechanisms of Ru-Based Thick Film (Cermat) Resistors," *J. Appl. Phys.* **48** (12), 5152, (1977).
5. R.H. Scarisbrick, "Electrically Conducting Mixture," *J. Phys D Appl. Phys.*, **6**, 2198 (1973).
6. N.C. Halder, "Electron Tunneling and Hopping Possibilities in RuO<sub>2</sub> Thick Films," *Electrocompo Sci. and Technol.*, **11**, 21, (1983).
7. O. Abe and Y. Tkeda, "Microstructure and Electrical Conduction in Thick Film Resistors," Proceeding of the 5th int'l Microelectronics Conference, 45, (1988).
8. B.K. Koo and H.G. Kim, "Effect of Frit and Sintering Conditions on Microstructure and Electrical Properties in Ag and Ag/Pd Thick Film Conductors," *J. Kor. Ceram. Soc*, **25** (6), 623, (1988).
9. R W Vest, "Materials Science and Thick Film Technology," *J. Am. Ceram. Bull.*, **65** (4), 631, (1986).
10. L.M. Levinson(ed), "Electronic Ceramics," Marcel Dekker, Inc. *ch.* **6**, (1988).