

## LCR Network을 구성하는 Ru계 후막저항체의 거동

박지애 · 이홍림 · 문지웅 · 김구대 · 이동아 · 손용배

연세대학교 세라믹공학과  
한국과학기술연구원 세라믹스부  
(1996년 12월 17일 접수)

### The Behaviour of Ru Based Thick Film Resistor as a Component of LCR Network

Ji-Ae Park, Hong-Lim Lee, Ji-Woong Moon  
Goo-Dae Kim, Dong-A Lee and Yong-Bai Son

Department of ceramics, College of Engineering, Yonsei University  
Ceramic Processing Center, Korea Institute of Science and Technology  
(Received December 17, 1996)

#### 요 약

LCR(Inductor Capacitor Resistor) network을 구성하기 위한 900°C 소성용 Ru계 저항체를 제조하였다. 이 900°C 동시소성용 저항 페이스트는 유리상 조성중 용융온도를 낮춰주는 PbO의 양을 감소시키고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 SiO<sub>2</sub>의 양을 증가시켜 제조하였다. 본 연구에서는 Alumina기판 위에 인쇄하고 소결한 저항체의 면저항과 Inductor와 Capacitor기판을 사용하여 제조한 저항체의 면저항 및 기판과 저항체간의 계면에 대해 관찰하였다. 또한 RuO<sub>2</sub>의 양을 달리하여 제조한 저항체의 저항값 변화에 대해서도 고찰하였다. 동시소성으로 소결한 경우, Alumina기판에서는 10<sup>3</sup>~10<sup>6</sup>Ω/□의 저항값을 얻을 수 있었으나, Inductor와 Capacitor기판에서는 저항값의 측정 범위를 벗어났다.

#### ABSTRACT

The Ru-based thick film resistor (TFR) for sintering at 900°C was synthesized to prepare the LCR network. These compositions of pyrochlore could be prepared by decreasing the amount of PbO and increasing alumina and silica contents of glass frit. In this study, the sheet resistances of the TFRs which were sintered at 900°C after printing on alumina substrate, the sheet resistances of the TFRs on inductor and capacitor substrate and the interphase between TFR and substrate were observed. And the changes of the sheet resistance were obtained with the contents of RuO<sub>2</sub>. In case of the TFR sintered at 900°C, the sheet resistances on alumina substrates were in the range of 10<sup>3</sup>~10<sup>6</sup>Ω/□, but the sheet resistances of TFR on inductor and capacitor substrate were not obtained.

**Key words :** Ru-based TFR, LCR network, Sheet resistance

#### I. 서 론

최근 모든 전자기기에 있어서 고속화, 소형화, 복합화, 저가화가 요구되고 있다. 집적회로 패키지 기술 또한 재료와 공정기술의 개선이 필요하게 되었고, 이에 따라 다양한 회로를 구성하는 기판과 후막의 동시소성법의 필요성이 대두되었다. 저항체를 포함하는 다층회로의 제조는 Rzasa와 Potencki 등에 의해 연구된 바가 있는데, 유전체 기판위에 인쇄된 ruthenate저항체와 Alumina기판에 인쇄된 저항체는 TCR(Temperature Coefficient

of Resistance)이나 소성조건, 유전체의 종류에 따라 매우 다르다.<sup>1)</sup>

초기에 전도상으로 사용된 silver, palladium, carbon 등은 정밀한 저항특성의 조절이 어려워, 현재는 후막저항체의 전도상으로 rutile구조의 RuO<sub>2</sub>, pyrochlore구조의 Bi<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Pb<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>6+x</sub> 등이 상용화되어 있는데, 일반적으로 pyrochlore계 후막저항체보다 RuO<sub>2</sub>-glass계 후막저항체의 경우가 면저항이 작다고 보고되었다.<sup>2)</sup>

후막저항체는 일반적으로 Alumina기판위에 회로형태대로 인쇄하고, 휘발성 용매를 제거하기위해 건조시킨

다음 유리의 연화점 이상에서 약 10분 동안 열처리 시켜 소결한다.<sup>3)</sup> 소성과정의 초기에는 유기 vehicle이 열분해 되고, 보다 높은 온도에서 유리상이 연화되며, 전도상과 반응하게 된다.<sup>4)</sup> 유리가 연화되면서, 유리 입자사이의 공극이 줄어들고, 입자간 거리가 줄어들면서 전도성 입자들은 가까워지게 된다.<sup>5)</sup> 가까워진 전도성 입자들은 유리 표면에 달라붙게 되고, 소결온도에 도달하면 날카로운 모서리를 가진 유리 입자들이 연화·변형되어 스폰지와 같은 연속적인 막을 형성하며, 유리 입자의 계면을 따라 전도성 입자들이 축적되어 전도성 경로를 형성하게 된다.<sup>6)</sup> 소결 후 후막저항체의 두께는 10~20 μm이며, 도전상과 절연상의 혼합 비율을 조절함으로써 10<sup>1</sup>~10<sup>7</sup>Ω/□의 저항값을 얻을 수 있으며,<sup>3)</sup> 이러한 넓은 범위의 저항값과 시편의 준비 및 제조의 용이성 때문에 후막저항체가 널리 사용되고 있다.

LCR network을 형성하기 위해서는 고온 장시간의 열처리에 견딜 수 있는 저항체를 제조해야 하기 때문에, 일반적 후막저항체의 저온·단시간 소결시와는 다른 저항특성 및 미세구조가 예측되어 진다. 후막저항체를 높은 온도에서 소성하거나 오랜 시간 동안 유지시키면, 전도성 입자들이 응집체를 형성하게 되고, RuO<sub>2</sub>와 유리상 사이의 반응이 유발된다. RuO<sub>2</sub> 응집체 입자들은 전기 전도에 관여하지 않기때문에 면저항을 증가시키며, RuO<sub>2</sub>와 유리상의 반응은 면저항을 감소시킨다.<sup>5)</sup> 또한 일반적으로 저항체의 전기적 특성은 온도에 의존적이다. 낮은 온도에서는 전기전도도의 감소가 현저한데, 이러한 감소로 면저항이 증가하게 된다.<sup>3)</sup> 그러나, 후막저항체와 같은 혼합물계에서는 이러한 효과들을 분리해 생각하기가 어렵다.<sup>7)</sup> 따라서 본 실험에서 일차적으로 해결해야 할 문제는 면저항의 제어보다는 고온 장시간의 열처리시 안정한 저항체의 조성을 제조하는 데에 주안점을 두었다.

본 연구에서는 LCR network을 구성하기 위한 기초 연구로서 소결한 Inductor기판과 Capacitor기판에 저항을 후막처리하여 개별소성하고, 소결하지 않은 기판과 동시소성한 저항체의 전기적 특성 및 미세구조 등 관찰하였다.

## 2. 실험방법

본 실험의 제조 공정을 Fig. 1에 나타냈으며, 세부적인 실험내용은 다음과 같다.

### 2.1. 분말합성

Pyrochlore형의 페이스트를 제조하기 위해서 Ru(OH)<sub>3</sub> 분말(Dowa Mining co.)을 800°C에서 3시간 하

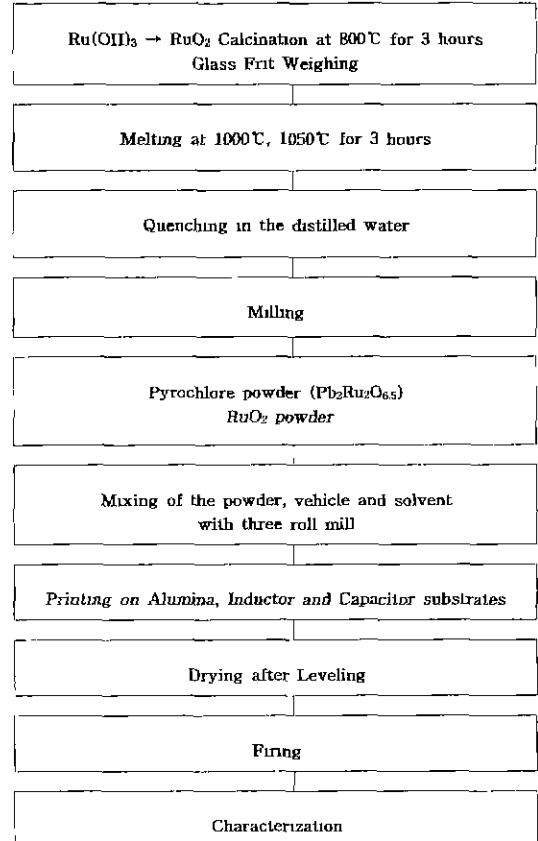


Fig. 1. Flow chart of experimental procedures.

Table 1. The Compositions for Resistor Paste

	PG-1	PG-2
RuO <sub>2</sub>	5	10
PbO	64	65
SiO <sub>2</sub>	26.5	21.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.5	2.5
CaO	1	1
ToTal (wt%)	100	100

소하여 얻은 RuO<sub>2</sub> 분말<sup>8)</sup>과 PbO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO를 칭량한 다음 12시간 동안 ball milling으로 건식 혼합한 뒤, 백금 도가니에 넣고 PG-1, PG-2를 각각 1000°C, 1050°C에서 3시간 동안 충분히 용융시킨후 증류수에 급냉시켰다. 이를 막자사발로 조분쇄한 뒤 40 mesh로 체 거름하여 zirconia jar에서 zirconia ball과 증류수를 넣고, 48시간 동안 분쇄하여 건조시키고 200 mesh로 체 거름하였다. Table 1에 pyrochlore형 분말의 조성(PG-1, PG-2)을 나타내었다.

Rutile형의 페이스트(RG-1)는 RuO<sub>2</sub>분말 5 wt%와

glass frit(SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-Na<sub>2</sub>O) 95 wt%를 혼합하여 12시간 동안 ball milling하여 분쇄하고 200 mesh로 체 거름하였다.

**2.2. 페이스트 제조**

후막저항체용 페이스트는 전도성 입자와 절연상이 적당한 비율로 유기 vehicle에 고루 분산된 고 점도 상태로,<sup>3)</sup> 페이스트가 우수한 인쇄성을 가져야 하며, 인쇄 직후 적당한 모양을 유지하기 위해서는 전단속도가 가해졌을때 점도가 감소하여 스크린 메쉬를 통과할 수 있고, 분산구조가 평형상태로 회복됨에 따라 점도가 급속히 증가하는 thixotropy성질을 가져야 한다.<sup>9)</sup>

페이스트의 구성성분은 분말, 유기 vehicle, 유기용매로 이루어지는데, 유기 vehicle의 역할은 페이스트가 적절한 rheology를 갖도록 하기 위한 것이다. 유기 vehicle 중 바인더는 ethyl cellulose를 사용하였고, 유기용매로는 α-terpineol을 사용하여 페이스트가 양호한 인쇄성을 갖도록 다음과 같은 조성으로 PG-1, PG-2, RG-1의 페이스트를 제조하였다.

- \*분말 70 wt%
- \*binder 20 wt%
- \*solvent 10 wt%

세 가지 성분을 혼합한 후 Three Roll Mill(Noritake NR-42A)을 사용하여 균일한 페이스트를 제조하였다.

**2.3. 인쇄 및 건조**

기판위에 전극을 형성하기 위해 silver 페이스트를 스크린 프린터에서 인쇄한 후, 스크린 자국을 제거하고 일정한 막의 모양을 형성시키기 위하여 상온에서 10분간 leveling하고, 150°C에서 10분간 건조하였다. 양 전극 사이에 저항 페이스트를 같은 방법으로 인쇄하여 건조시켰다.

**2.4. 저항체의 소결**

96%의 소결밀도를 가진 Alumina기판위에 위의 실험 방법과 같이 인쇄, 건조하여 일반적인 저항체의 소결방법인 850°C에서 10분간 열처리 하였다. 또한 동시소성에 요구되는 최종온도는 Inductor와 Capacitor기판의 소결온도인 900°C, 2시간의 열처리로 결정되어, 마찬가지로 인쇄·건조 소결하여 저항값을 비교하였다. 그리고 300°C, 520°C에서 각각 6시간씩 탈지하여 900°C, 2시간동안 소결한 Inductor와 Capacitor기판에 각각 저항체를 인쇄하여 건조하고 개별소성 하였다. 그리고 동시소성을 위하여 소결하지 않은 Inductor와 Capacitor기판에 저항체를 인쇄한 후 위의 열처리에 따라 탈지하고 900°C, 2시간 동안 소결하였다. 본 실험에서 사용된 In-

ductor는 CuO, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 소결조제로 한 Ni-Zn Ferrite 분말을 tape casting법으로 기판을 제조하였으며, Capacitor는 TiO<sub>2</sub>(91 wt%), CuO(3 wt%), NiO(3 wt%), MnO<sub>2</sub>(3 wt%)분말로 기판을 제조하였다.

그리고 저항체와 기판과의 계면반응을 관찰하기 위해 Scanning Electron Microscope(SEM, HITACHI S-4200)과 Electron Probe Microanalysis(EPMA) 관찰(JEOL, JAX 8600)을 하였다.

**2.5. 저항 측정**

소결 후막저항체의 전기저항을 측정하여 식 (1)과 같은 방법으로 면저항을 계산하였다.

$$R_s = R \times (W/L) = R/A \tag{1}$$

여기서 W는 저항체의 세로길이, L은 저항체의 가로길이, A는 저항체의 가로와 세로의 비이며, R은 실제 측정된 저항값이다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1. Pb<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>6s</sub> 분말의 특성**

Fig. 2는 pyrochlore형과 rutile형의 페이스트 초기 분말의 XRD 결과를 나타낸 것이다. PG-1, PG-2 분말의

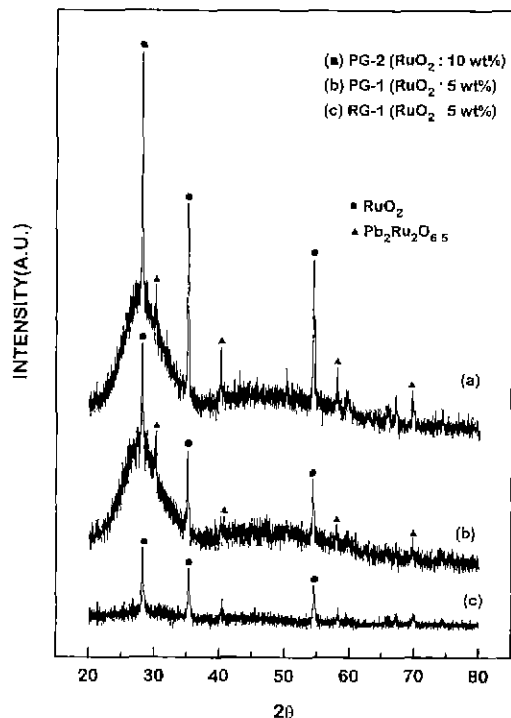
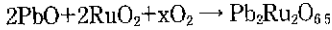


Fig. 2. XRD patterns of the starting powders.

경우  $Pb_2Ru_2O_6$  피크와 잔여의  $RuO_2$  피크가 함께 나타났다. 이 pyrochlore( $Pb_2Ru_2O_6$ )는 Table 1과 같은 조성의  $PbO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ 의 유리조성이  $1000^\circ C$  부근에서 용융되면서  $RuO_2$ 와  $PbO$  사이에 다음과 같은 반응이 일어남으로써 형성되게 된다.



$RuO_2$ 는 결정격자에서  $Ru^{4+}$  자리에  $Ru^{3+}$ 가 일부 존재하는 부분 산소 결합구조를 가지고 있는 비화학 양론 구조를 가지고 있으므로 pyrochlore형성시 과잉의 산소를 함유하게 된다.<sup>10)</sup> 그리고, rutile형의 분말인 RG-1의 경우는  $RuO_2$  분말과 유리분말을 단순히 혼합한 것이므로  $RuO_2$  피크만이 나타났음을 알 수 있었다.

일반적으로 저항체의 전기전도 model은 uniform model, uniform channel model, non-tunneling barrier model 그리고, tunneling barrier model로 제시되는데, 유리상이 많아지면 저항체의 절연상이 증가하여 전도성 경로를 차단하므로 저항값이 증가하게 될 것이라는 tunneling barrier model 전도기구의 적용이 가장 적합하다고 알려져 있다.<sup>3)</sup>

일반적으로 Ru계 저항체는  $850^\circ C$  정도에서 단시간 열처리 되지만, LCR 동시소성을 위해서는 저항체의 소결온도를 높이기 위한 유리상 조성비의 조절이 일차적으로 요구되므로 glass frit의 조성 중 용융온도를 낮춰주는  $PbO$ 의 함량을 감소시키고  $Al_2O_3$ 와  $SiO_2$ 의 양을 증가시킴으로써  $900^\circ C$ , 2시간의 열처리에도 안정한 고온용 저항체를 얻을 수 있었다.

**3.2. 기판의 종류에 따른 면저항**

Table 2에 소결밀도 96%인 Alumina기판에 각각의 저항체를 인쇄하여 승온속도  $5^\circ C/min$ 으로  $850^\circ C$ 에서 10분간 열처리한 후 얻어진 면저항값과  $900^\circ C$ 에서 2시간 동안 열처리하여 얻어진 면저항값을 나타내었다. 여기서  $RuO_2$  함량이 많은 PG-2가 PG-1에 비해 면저항값이 더 낮게 나타났는데 이는 PG-2의 경우 도전상인  $Pb_2Ru_2O_6$

와 잔여  $RuO_2$ 가 PG-1에 비해 많기 때문이다(Fig. 2). 그리고 rutile형인 RG-1의 경우, pyrochlore형의 저항체에 비해 더 낮은 저항값을 나타내는 것이 확인되었다. 또한  $850^\circ C$ , 10분 열처리한 경우보다  $900^\circ C$ , 2시간 열처리한 경우의 면저항값이 더 낮게 나타난 것은 고온의 열처리 과정에서  $RuO_2$ 의 유리상 내부 분포 즉, 유리상의 휘발로 인해 저항체내의 전도성 입자의 분포가 상대적으로 많아져 저항값이 낮아진 것으로 판단된다.<sup>5)</sup>

Table 3은 소결한 Inductor와 Capacitor기판에 각각의 저항체를 인쇄하여 개별소성한 경우의 면저항값을 나타낸 것이다. 개별소성은 Alumina기판의 경우와 동일한 경향의 결과를 얻을 수 있었다. 또한, Alumina기판에 저항체를 인쇄한 경우 동시소성의 열처리에도 저항값이 측정되었으나, 소결하지 않은 Inductor와 Capacitor기판에 동시소성을 한 경우에는 저항값의 측정 범위를 벗어났는데, 이는 고온의 열처리 과정에서 소결하지 않은 Inductor와 Capacitor기판 내부로 저항체의 전도성 입자가 확산되거나 유리상이 휘발되는 등의 계면반응 때문인 것으로 생각된다.

**3.3. 기판과 저항체간의 계면반응**

Alumina기판에 각각의 저항체를 인쇄하고  $850^\circ C$ , 10분 그리고  $900^\circ C$ , 2시간 동안 소결하여, 기판과 저항체의 계면을 SEM과 EPMA로 관찰하였다. Fig. 3는 Alumina기판에 PG-1을 인쇄하여  $850^\circ C$ , 10분 그리고  $900^\circ C$ , 2시간 소결한 경우의 계면 SEM사진과 Ru를 mapping한 EPMA사진이다. 그리고 Fig. 4와 Fig. 5는 각각 PG-2와 RG-1페이스트의 경우이다. pyrochlore형인 PG-1과 PG-2의 경우(Fig. 3과 Fig. 4) (a)와 (b)의 EPMA사진에서 볼 수 있듯이, 전도성 입자 응집체의 형성 빈도가 비슷하지만, 측정된 저항값과의 결과를 비교해보면 본 실험에서 열처리 온도에 따른 면저항의 변화는 전도성 입자가 분포되는 유리상에 의한 것임을 알 수 있었다. 또한 RG-1의 경우, pyrochlore형에서 사용한 유리상과는 다른 조성을 사용했기 때문에 유리상의 연

**Table 2.** Sheet Resistance with the Different Heating Schedule on Alumina Substrate

	PG-1	PG-2	PG-1
$850^\circ C$ , 10 min.	$10^8 \Omega/\square$	$2 \times 10^6 \Omega/\square$	$2.1 \times 10^5 \Omega/\square$
$900^\circ C$ , 2 hrs.	$1.3 \times 10^7 \Omega/\square$	$6.1 \times 10^5 \Omega/\square$	$1.2 \times 10^5 \Omega/\square$

**Table 3.** Sheet Resistances of the Post-fired Samples on Inductor and Capacitor Substrate

	Inductor			Capacitor		
	PG-1	PG-2	PG-1	PG-1	PG-2	RG-1
Sheet Resistance	$2.2 \times 10^7 \Omega/\square$	$5.4 \times 10^7 \Omega/\square$	$7.8 \times 10^4 \Omega/\square$	$1.6 \times 10^7 \Omega/\square$	$5.0 \times 10^7 \Omega/\square$	$8.0 \times 10^4 \Omega/\square$

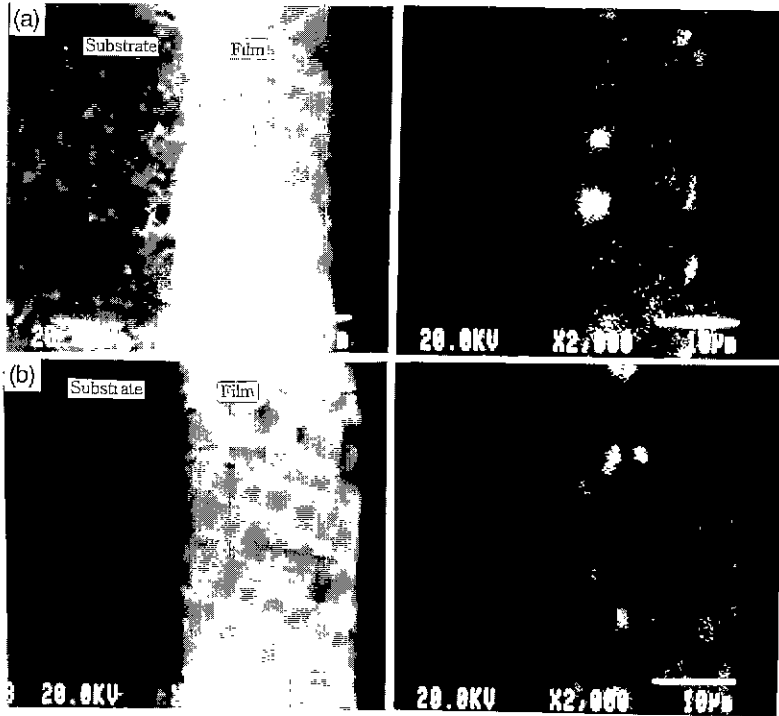


Fig. 3. SEM and EPMA photographs of the fractured surface of PG-1 paste on alumina substrate. (a) 850°C, 10 min sintering (b) 900°C, 2 hr sintering

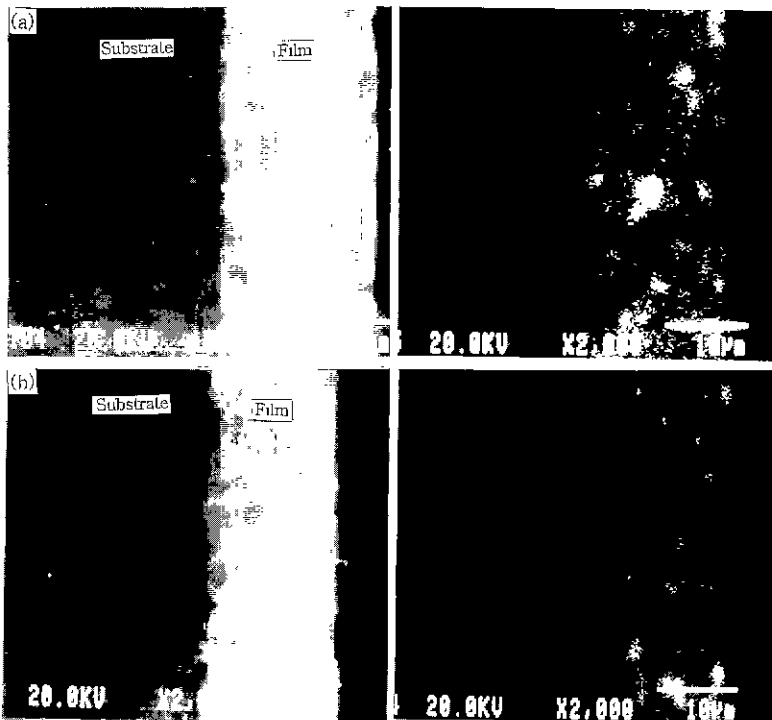


Fig. 4. SEM and EPMA photographs of the fractured surface of PG-2 paste on alumina substrate. (a) 850°C, 10 min sintering (b) 900°C, 2 hr sintering

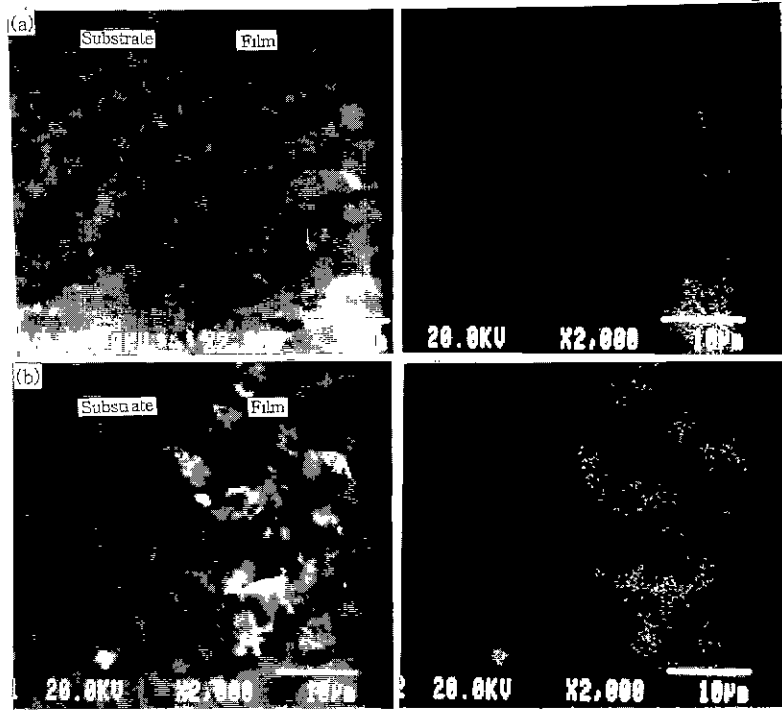


Fig. 5. SEM and EPMA photographs of the fractured surface of RG-1 paste on alumina substrate. (a) 850°C, 10 min sintering (b) 900°C, 2 hr sintering

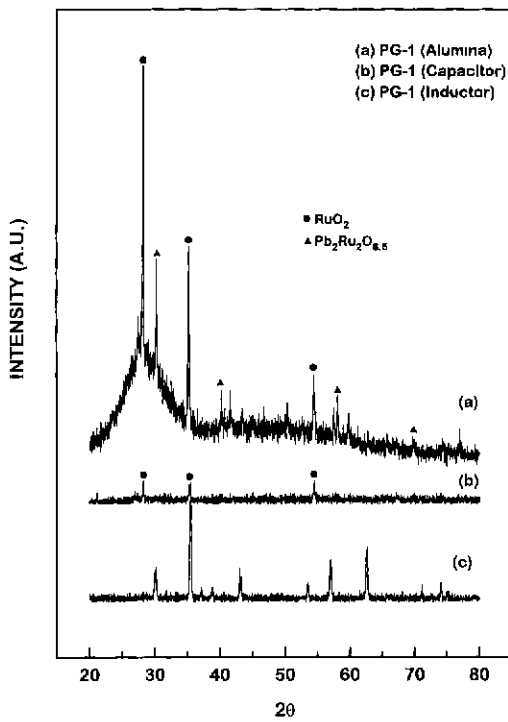


Fig. 6. XRD patterns of the thick film resistors.

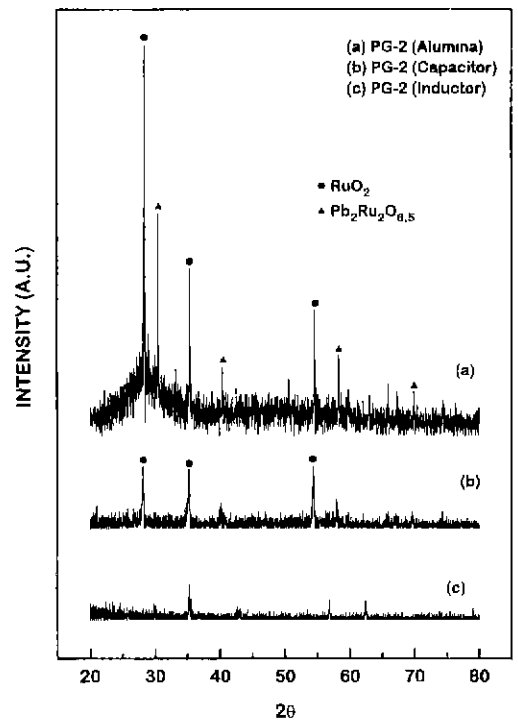


Fig. 7. XRD patterns of the thick film resistors.

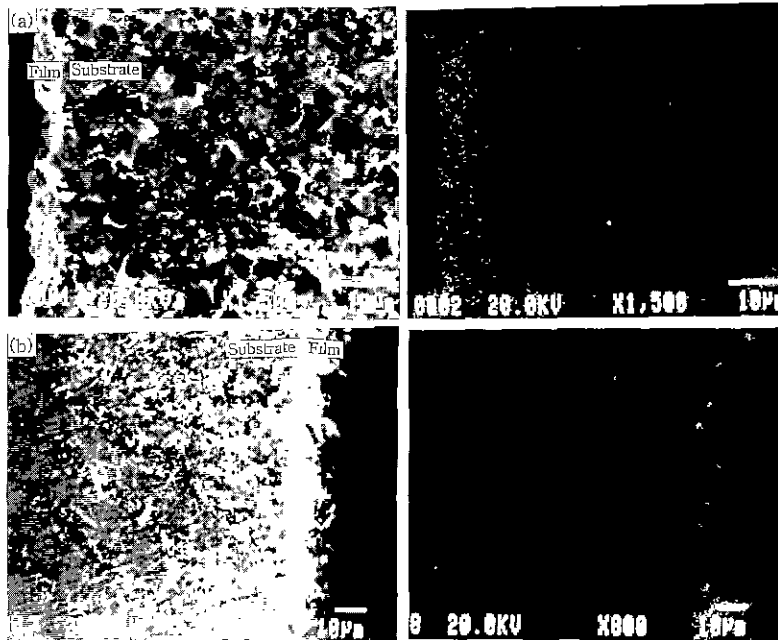


Fig. 8. SEM and EPMA photographs of the fractured surface of PG-1 paste on alumina substrate. (a) Inductor (b) Capacitor

화온도 차이에 의해 응집체의 형성이 없었을 것으로 생각되어진다. Fig. 5의 결과를 보면, 오히려 900°C소결의 경우 Ru의 분포가 더욱 균일한 것을 알 수 있었다. 이것은 유리상의 점도가 낮아지면서 RuO<sub>2</sub>의 재배열이 일어났기 때문이라고 판단된다.

각 기판상에 pyrochlore형 페이스트를 인쇄하여 동시소성 열처리에 따라 900°C에서 2시간 동안 소결한 시편의 XRD분석 결과가 Fig. 6과 Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 6과 Fig. 7의 경우 모두 Alumina기판상에서 나타난 Pb<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>6.5</sub>상이 Capacitor와 Inductor기판상에서는 생성되지 않았다. 이는 앞서 나타냈듯이 고온의 열처리동안 저항체용 페이스트의 전도성 입자가 Inductor와 Capacitor기판의 내부로 확산되거나 유리상의 휘발때문일 것으로 생각되어진다. 또한 Capacitor기판의 표면에서는 RuO<sub>2</sub>상이 남아있었으나, Inductor기판의 표면에서는 나타나지 않았고, XRD분석 결과 Inductor기판의 성분인 spinel상만이 나타났다. 이는 고온의 열처리동안 소결하지 않은 Inductor기판과 저항체와의 반응이 Capacitor에서보다 더 많이 일어났기 때문일 것으로 생각된다. Fig. 8은 Capacitor와 Inductor기판에 PG-1조성의 저항체를 동시소성한 경우의 SEM과 EPMA사진이다. EPMA사진에 나타나있듯이 저항체 전도성 입자들의 기판 내부로의 침투와 유리상 부분의 휘발 및 기판과의 반응으로 인해 저항값이 측정범위를 벗어난 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

LCR network을 구성하기 위한 기초실험의 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 소성 한계 온도가 850°C인 pyrochlore조성으로부터, 유리상의 조성비를 변화시킴으로써 900°C동시소성이 가능한 저항체 조성을 얻을 수 있었다.
2. Alumina기판에 저항체를 인쇄하여 동시소성 열처리에 따라 소결한 경우, 850°C 소결에 비해 낮은 면저항값이 나타났다. 이는 동시소성 열처리에 따라 저항체내 유리상의 휘발과 도전상-유리상 사이의 상호반응 때문임을 알 수 있었다.
3. 동시소성 열처리에 따라 pyrochlore형의 저항체를 소결한 경우, Alumina기판상에서는 RuO<sub>2</sub>상과 Pb<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>6.5</sub>상이 생성되었으나, Capacitor기판에서는 계면 반응에 의해 RuO<sub>2</sub>만이 나타남을 XRD분석으로 확인할 수 있었다.
4. LCR network을 구성하기 위해서는, 계면 반응이 심한 동시소성보다는 계면 반응이 비교적 적고, 면저항값이 안정한 개별소성에 의해 R값을 구현하는 것이 더 적합함을 알 수 있었다.

#### REFERENCES

1. Benedykt Rzasa and Jerzy Potencki, "Thick Film

- Resistors on Dielectrics as Temperature Detectors," *Active and Passive Elec. comp.*, **12**, 137-139 (1986).
2. P. F. Carcia, A. Suna and W. D. Childers, "Electrical Conduction and Strain Sensitivity in RuO<sub>2</sub> Thick Film Resistors," *J. Appl. Phys.*, **54**(10), 6002-6008 (1983).
  3. G. E. Pike and C. H. Seager, "Electrical Properties and Conduction Mechanisms of Ru-based Thick Film (Cerment) Resistors," *J. Appl. Phys.*, **48**(12), 5152-5269 (1977).
  4. M. Hrovat and F. Jan, "An Investigation of Thick Film Resistor Materials' Properties During the Firing Process," *Hybrid Circuits*, No. 14, September, 25-29 (1987).
  5. Takashi Yamaguchi and Kazuhiko Iizuka, "Microstructure Development in RuO<sub>2</sub>-Glass Thick Film Resistors and Its Effect on the Electrical Resistivity," *J. Am. Ceram.*, **73**(7), 1953-57 (1990).
  6. T. Inokuma, Y. Taketa and M. Haradome, "The Microstructure of RuO<sub>2</sub> Thick Film Resistors and Influence of Glass Particle Size on Their Electrical Properties," *IEEE Trans. CHMT*, **7**(2), 166-175 (1984).
  7. Takashi Yamaguchi and Yuko Nakamura, "Sol-Gel Processing and Conduction Mechanism of RuO<sub>2</sub>-Glass Thick Film Resistors," *J. am. Ceram. Soc.*, **78**(5), 1372-74 (1995).
  8. 김구대 · 김창은 · 강현규 · 손용배, "Ru계 후막저항체의 제조 및 특성 연구," *J. ISHM-KOREA*, Vol. 2, No. 1, May. (1995).
  9. P. G. Holmes and R. G. Loasby, *Handbook of Thick Film Technology*, CH 7, 8, 9 Electorchemical Publications Ltd. (1976)
  10. 강현규, "Ru계 후막저항체의 제조 및 특성 연구," M. S. thesis of Yonsei Uni., 42-43 (1995).
  11. Hoffman, "Precision Glaze Resistors," *Ceram. Bull.*, **42**, 490 (1963).
  12. P. F. Carcia, A. Ferretti and A. Suna, "Particle Size Effects in Thick Film Resistors," *J. Appl. Phys.*, **53**(7), 5282-5288 (1982).
  13. Yet-Ming Chiang, "Thin Glass Film between Ultrafine Conductor Particles in Thick Film Resistors," *J. Am. Ceram. Soc.*, **77**(5), 114-52 (1994).