

## 3Y-ZrO<sub>2</sub>와 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말의 혼합비율에 따른 테이프 캐스트된 지르코니아 박판의 전기적 성질의 변화

김선재 · 강대갑 · 김경호 · 정충환 · 박지연

한국원자력연구소

정밀요업재료 개발팀

(1994년 5월 27일 접수)

### Electrical Properties of Tape-Cast Zirconia Thin Plates with the Mixing Ratios of 3Y-ZrO<sub>2</sub> and 8Y-ZrO<sub>2</sub> Powders

S. J. Kim, T. K. Kang, K. H. Kim, C. H. Jung and J. Y. Park

Hi-Tech Ceramics Team

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received May 27, 1994)

#### 요 약

3Y-ZrO<sub>2</sub> 분말에 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말을 0, 33, 50, 67, 100% 범위의 무게비로 혼합한 다음, 테이프 캐스팅 방법으로 성형하고 1500°C에서 4시간 동안 소결하여 지르코니아 박판을 제조하였다. 지르코니아 박판의 결정구조, 미세구조, 그리고 그 전기적 성질은 각각 X-선 회절, 주사전자현미경(scanning electron microscopy), 그리고 임피던스 분석기(impedance analyser)를 이용하여 조사하였다. 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말을 33% 첨가하여 제조한 소결박판은 이 연구에서 높은 온도였던 750°C 이상에서 고체산화물 연료전지의 전해질 재료로 널리 사용되는 8Y-ZrO<sub>2</sub> 박판보다 기계적 물성이 좋으면서 전체저항 또한 더 낮은 값을 가지고 있었다. 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말이 33% 첨가된 소결박판이 8Y-ZrO<sub>2</sub> 소결시편보다 전체저항이 낮은 것은 Arrhenius 관계식을 벗어나는 500°C 이상의 고온영역에서 나타나는 특성으로서 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말이 많이 첨가된 시편들은 전체저항의 기울기가 심하게 감소하는 반면에 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말이 적게 첨가된 시편들은 저온부근에서의 전체저항에 대한 기울기가 고온에서도 거의 그대로 유지하였기 때문이다.

#### ABSTRACT

After adding 8Y-ZrO<sub>2</sub> powders to 3Y-ZrO<sub>2</sub> powders at ratios of 0, 33, 50, 67, and 100% by weight, the mixed yttria-stabilized zirconia specimens were fabricated into thin plate using tape-casting method and then sintered at 1500°C for 4h in air. The crystalline structure, microstructure and electrical properties of the sintered zirconia thin plates were investigated by using X-ray diffractometer, scanning electron microscope and impedance analyzer, respectively. At the temperatures higher than 750°C, the sintered thin plate with 33% 8Y-ZrO<sub>2</sub> content shows higher mechanical properties and lower electrical resistivity than 8Y-ZrO<sub>2</sub> thin plate which is generally used as an electrolyte for solid oxide fuel cells. This is due to the fact that the zirconia thin plates with low 8Y-ZrO<sub>2</sub> content maintain the slope of low temperature region up to high temperatures, whereas at temperatures higher than 500°C the slope decrease in the zirconia thin plates with high 8Y-ZrO<sub>2</sub> content.

#### 1. 서 론

환경오염 방지에 대한 관심이 높아지면서 무공해, 무소음으로 전기에너지를 생산할 수 있는 새로운 에너지 시스템인 평판형 고체전해질 연료전지에 대한 연구가 전

세계적으로 각광받고 있다<sup>1,2</sup>. 고체전해질 연료전지용 전해질 재료인 지르코니아(ZrO<sub>2</sub>) 박판은 전기전도도가 높아야 될 뿐만 아니라, 반응기체(연료와 산소)의 혼합을 막기 위하여 밀도가 높으면서 강도와 인성 또한 높아야 한다<sup>3</sup>. 지르코니아를 고체전해질로 사용한 연료전지는

1937년 Bauer와 Preis<sup>4)</sup>에 의해 최초로 보고되었으며 현재 산소이온 전도성이 높은 8Y-ZrO<sub>2</sub>(이트리아(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)가 8 mole% 첨가된 안정화 지르코니아)의 조성을 갖는 안정화 지르코니아가 집중적인 연구 대상이 되고 있다. 그러나, 8Y-ZrO<sub>2</sub> 박판은 기계적 성질이 약하여 실제 실용화에 많은 제한을 받고 있다. 지난 수년간 산소 이온 전도성이 높으면서 강도와 인성이 높은 연료전지 전해질용 지르코니아 박판을 제조하기 위한 연구가 진행되어 왔다<sup>3,5)</sup>.

고체전해질로 사용하는 지르코니아의 전기저항은 연료전지의 효율에 가장 큰 영향을 미치므로 가능한 한 그 값이 낮아야 한다<sup>6)</sup>. 그러나, 전기저항을 낮추기 위해 두께를 얇게 하면 박판이 약해지므로 전기전도도가 높으면서 강도가 높은 새로운 지르코니아 재료를 개발해야 한다. 따라서, 강도와 인성은 높으나 전기전도도가 낮은 부분 안정화 지르코니아<sup>7)</sup>와 전기전도도는 높으나 강도가 떨어지는 안정화 지르코니아를 혼합하여 두 재료의 장점을 갖는 박판형 재료를 얻을 수 있다면 매우 유용한 연료전지용 전해질 재료가 될 것이다. 본 연구에서는 3Y-ZrO<sub>2</sub>(이트리아가 3 mole% 첨가된 부분 안정화 지르코니아)와 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말을 혼합한 후 테이프 캐스팅(tape-casting) 방법으로 성형한 뒤 소결한 지르코니아 박판의 미세구조를 관찰하고 그의 전기적 성질변화를 조사하였다.

## 2. 실험방법

이트리아(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)가 3 mol% 함유된 지르코니아(3Y-ZrO<sub>2</sub>)(TOSOH TZ-3Y, Japan)에 8 mol% 함유된 지르코니아(8Y-ZrO<sub>2</sub>)(TOSOH TZ-8Y, Japan)를 0, 33, 50, 67, 100% 무게비로 첨가하여 혼합하고 비수용성 용매와 기타 첨가제를 이용하여 슬러리(slurry)를 제조한 후, 테이프 캐스팅(tape-casting) 방법으로 지르코니아 박판을 제조하였다. 1500°C 공기분위기에서 4시간 동안 소결된 박판의 두께는 170~200 μm이었고, 소결밀도는 이론밀도의 96% 이상이었다.

시편의 결정구조는 X-선 회절기(X-ray diffractometer, Cu target)를 이용하여 분석하였으며, 미세조직은 주사 전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. 전기전도도 측정은 1 cm<sup>2</sup>의 면적으로 자른 소결박판에 백금 풀(platinum paste)로 전극을 부착한 다음 측정하였다. 이때, 백금전극과 시편과의 접합을 위하여 1000°C에서 30분간 열처리하였다. 관찰상과 임피던스(impedance) 분석기(HP4192A)를 사용하여 5 Hz~13 MHz의 주파수 범위에

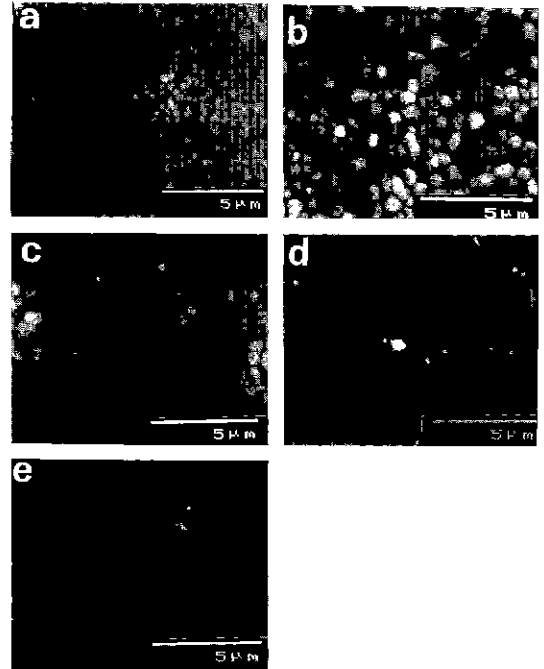


Fig. 1. SEM photographs of the microstructures of the specimens made of 3Y-ZrO<sub>2</sub> and 8Y-ZrO<sub>2</sub> at a 8Y-ZrO<sub>2</sub> content of (a) 0%, (b) 33%, (c) 50%, (d) 67%, and (e) 100% by weight. All the specimens were sintered at 1500°C for 4 h in air.

서 교류 전기전도도를 측정하였다. 측정온도 범위는 200°C~800°C이었으며 온도조절은 K-type 열전대를 이용하였다. 이때, 시편의 열평형을 위하여 측정온도에서 30분간 유지한 후 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

3Y-ZrO<sub>2</sub> 분말에 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말을 0, 33, 50, 67, 100% 무게비로 혼합하여 테이프 캐스팅 방법으로 제조한 지르코니아 소결박판들에 대한 표면 미세구조를 Fig. 1에 나타내었다. 3Y-ZrO<sub>2</sub> 분말만으로 제조된 박판(Fig. 1(a))은 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말만으로 제조된 박판(Fig. 1(e))보다 약 1/15배의 작은 입자(grain)를 보이고 있다. 이 입자크기의 차이는 지르코니아에 안정화제로 첨가된 이트리아 양의 차이 때문으로 보고되고 있다<sup>2)</sup>. Fig. 1(b)와 c)에 대한 EDS(energy-dispersive spectroscopy) 조성분석결과 큰입자는 8YZ(8Y-ZrO<sub>2</sub>)상이었으나 작은 입자는 대부분 3YZ(3Y-ZrO<sub>2</sub>) 상으로 이루어져 있는 혼합구조임을 확인하였다. 이 혼합구조는 소결시간에는 거의 무관하였다. 8Y-ZrO<sub>2</sub>



Fig. 2. The SEM photograph of the microstructure of the specimen made of 3Y-ZrO<sub>2</sub> and 8Y-ZrO<sub>2</sub> at a 8Y-ZrO<sub>2</sub> content of 50%. The specimen was sintered at 1500°C for 10hr in air.

분말이 50% 혼합된 소결박판을 1500°C에서 10시간 소결하여도 두 상의 입자크기가 거의 변하지 않는다는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 2). 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말의 양이 50%까지 증가함에 따라 8YZ상의 입자크기는 커지고 있으나 3YZ상의 입자크기는 거의 변화를 보이지 않고 있다. 한편, 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말이 67% 첨가된 시편에서는 작은 입자인 3YZ상이 관찰되지 않고, 입자가 크게 성장하였으나 입계(grain boundary)와 입자내부에서 기공(pore)을 많이 보여주고 있다. 이 시편(Fig. 1(d))에서는 입자에 대한 EDS 조성분석결과 입자의 중심부는 8YZ상이었고 입계와 기공 근처에서는 3YZ와 8YZ상이 아닌 새로운 중간상이 형성되었음을 확인할 수 있었으나 정확한 조성은 결정할 수 없었다.

XRD 분석결과 3Y-ZrO<sub>2</sub> 분말만으로 제조한 3YZ 소결박판은 정방정(tetragonal) 구조를, 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말만으로 제조한 8YZ 소결박판은 입방정(cubic) 구조를 하고 있었다. 3Y-ZrO<sub>2</sub> 분말에 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말을 무게비로 혼합하여 제조한 지르코니아 박판들에 대한 X-선 회절분석 측정결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 3Y-ZrO<sub>2</sub>에 8Y-ZrO<sub>2</sub>를 33%, Fig. 3(b)는 50%, 그리고 Fig. 3(c)는 67% 첨가하여 제조한 소결박판의 X-선 회절분석 결과이다. 여기에서 ○는 정방정과 입방정 구조에서 공통으로 나타나는 회절형태(peak)들을, ●는 정방정 회절형태들을 나타낸 것이다. 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말의 양이 증가할수록 정방정 구조에 해당하는 특성 회절형태들의 강도값이 감소하고 있다. Fig. 1과 Fig. 3로부터 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말을 33%와 50%를 첨가한 시편들은 입방정과 정방정 상들이 균일하게 혼재되어 있다는 것을 알 수 있다. 그러나, 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분

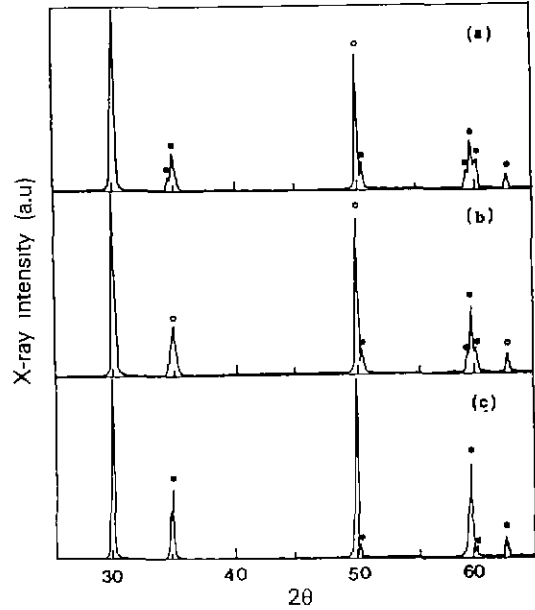


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of the specimens made of 3Y-ZrO<sub>2</sub> and 8Y-ZrO<sub>2</sub> at a 8Y-ZrO<sub>2</sub> content of (a) 33%, (b) 50%, and (c) 67% by weight. All the specimens were sintered at 1500°C for 4h in air.

Table 1. Fracture Toughness of the Sintered Samples Obtained by Press & Sintering Method<sup>8)</sup>

Samples	Fracture Toughness (MPa·m <sup>1/2</sup> )
0%(3YZ)	6.68
50%	4.25
100%(8YZ)	1.83

말을 67% 첨가한 시편은 미세구조 사진에서 작은 입자들이 관찰되지 않으므로 상을 자세히 분석하기 위해서는 더 자세한 연구가 필요하리라 생각된다. 세 시편 모두 3YZ와 8YZ에 해당하는 정방정과 입방정 회절형태들로 이루어져 있음을 알 수 있다.

한편, 각 시편에 대한 기계적 강도값은 박판에 대한 측정의 어려움 때문에 못하였지만, Kang 등<sup>8)</sup>은 같은 출발물질을 가지고 가압성형과 고온소결법, 테이프 캐스팅 방법으로 만든 약 1mm 두께의 원판에 대해서 측정한 결과, 8Y-ZrO<sub>2</sub> 양이 증가함에 따라 재료강도를 나타내는 파괴인성값이 감소하는 것을 확인하였었다(Table 1). 이것은 3YZ상<sup>7)</sup>의 파괴인성이 8YZ 첨가량이 증가함에 따라 나빠졌다고 생각할 수 있다. 따라서, 반대로 안정화 지르코니아에 부분 안정화 지르코니아를 첨가하면 그만큼 재료의 강도가 증가한다는 것을 알 수 있다.

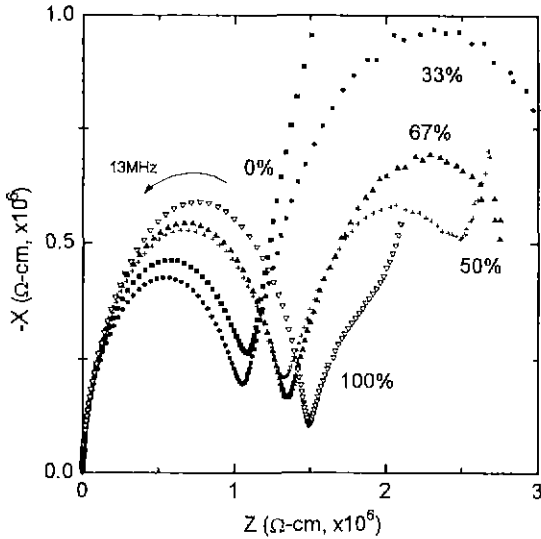


Fig. 4. Impedance spectra of the specimens, measured at 250°C in air.

주파수를 감소시켜가면서 다결정 이온전도체의 임피던스 특성을 측정할 때 3개의 반원이 나타나는데, 이 중에서 주파수가 높은 쪽에서 왼쪽부터 차례로 첫번째 반원은 재료의 고유물성 또는 자체물성(bulk)에 의한 저항 때문에 나타나고, 두번째 반원은 경계면(재료를 구성하는 입자와 입자사이의 입계 또는 상경계) 등에 의해, 그리고 세번째 반원은 전극물질에 의해 나타난다<sup>9)</sup>. 이 세개의 반원을 각각 실수축에 외삽하여 지름(반원과 실수축과의 교차점)들을 구하면 바로 각각 고유물성과 경계면, 그리고 전극재료의 저항값을 계산할 수 있다. 그러므로, 첫번째와 두번째 반원에 의해 나타난 저항값을 합한 것이 시편의 전체저항이라고 할 수 있다. 임피던스 스펙트럼을 분석하여 혼합비에 따른 미세구조의 변화 즉, 입자와 입자경계 또는 상경계의 변화가 지르코니아의 전기적 성질에 어떤 영향을 미치는지 알아보았다. Fig. 4은 3Y-ZrO<sub>2</sub> 분말에 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말을 무게비로 첨가, 혼합하여 제조한 지르코니아 박판에 대해 250°C에서, Fig. 5는 750°C에서 각각 주파수를 변화시켜 가며 측정된 임피던스 곡선을 나타낸 것이다. 이때, 각각의 측정결과를 한 종류의 시편에 대해 5개씩 측정하여 평균값으로 나타낸 것이다.

Fig. 4의 임피던스 곡선을 관찰해 보면, 3YZ의 임피던스 곡선과 비교해서 8YZ의 것은 고유저항(bulk)의 기여도가 매우 크게 나타나 있고 경계면에 의한 저항기여도가 작게 나타나 있음을 관찰할 수 있다. 이 측정온도에서 3YZ의 고유저항 값이 8YZ보다 작은 것은 Bonanos 등<sup>9)</sup>의

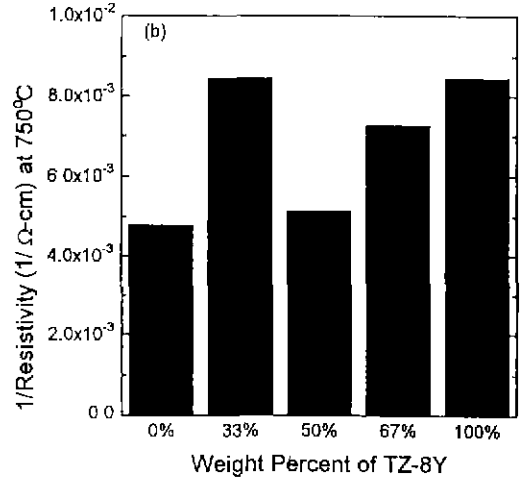
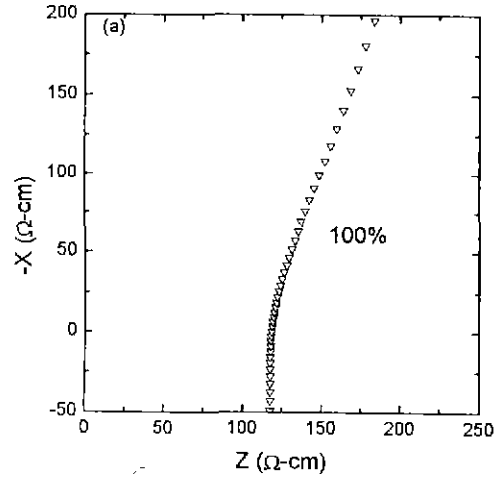


Fig. 5. (a) A representative spectrum of 8YZ specimen and (b) the histogram of the electrical conductivities of the specimens, measured at 750°C in air.

결과와 일치하는 것이다. 여러시편 중 3YZ 시편의 경우 경계면에 의한 저항이 너무 커서 그림에 나타나지 못했고, 반면에 8YZ 시편의 경계면에 의한 임피던스 특성은 매우 억압된 곡선으로 나타나 있다. 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말의 첨가량이 증가함에 따라, Fig. 1에서 보인 것처럼, 소결된 입자크기가 증가하면서 고유저항이 약간 증가하고, 경계면에 의한 저항값이 상대적으로 크게 감소하고 있다. 이 측정온도에서 전극물질에 의한 임피던스 특성은 모든 시편에서 거의 관찰되지 않았다. 따라서, 250°C의 측정 온도에서 전체저항은 3YZ 소결박판이 제일 크고, 8YZ 소결박판이 제일 작다는 것을 알 수 있다. 또한, 혼합시편 중에서는 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말이 33% 첨가된 소결박판의 전체 저항이 3YZ보다는 작지만 다른 두 혼합시편에 비해 매우

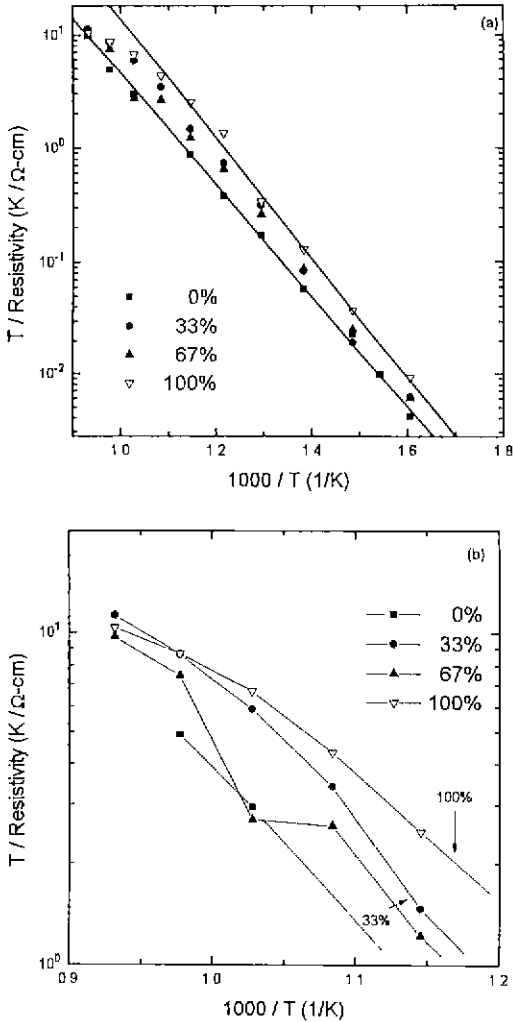


Fig. 6. Arrhenius plots of total conductivities of the specimens made of 3Y-ZrO<sub>2</sub> and 8Y-ZrO<sub>2</sub> at a 8Y-ZrO<sub>2</sub> content of 0% (■), 33% (●), 67% (▲), and 100% (▽) by weight (a) overall temperature and (b) at high temperature.

큰 전체저항 값을 갖고 있음을 알 수 있다.

그런데, 실제 지르코니아 연료전지의 작동환경(600~1000°C)에 해당하는 고온부에서 전해질의 전기저항의 차이가 연료전지의 효율을 결정하는 것으로 알려져 있다<sup>6)</sup>. 고온에서 임피던스 특성을 측정하면, Fig. 5(a)에 대표적인 8YZ의 시편만을 보인 것처럼, 전도이온의 활발한 운동으로 인해 임피던스 곡선에서 고유저항과 경계면에 의한 저항성분이 나타나지 않고 단지 시편의 전체저항만을 측정할 수 있다. 750°C 에서 측정된 각 시

편의 임피던스 곡선으로부터 얻은 전체저항을 Fig. 5(b)에 막대그림으로 다시 나타내었다. 250°C 에서 측정된 Fig. 4의 결과에 의하면, 저온에서는 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말의 첨가량이 증가함에 따라 경계면에 의한 저항기여도의 감소로 전체저항이 감소하였다. 그렇지만 750°C 에서는 500°C 이하의 저온특성으로부터 예측할 수 있는 결과와는 다르게 나타나 있다. 즉, 750°C 의 높은 온도에서는 8YZ 근처의 조성을 갖는 혼합시편들이 낮은 전체저항 값을 가지리라 예상하였으나 오히려 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말이 33% 첨가된 소결박판의 전체저항이 가장 낮게 나타났으며 이 시편이 또한 기계적 물성이 좋았다.

Kim 등<sup>10)</sup>은 테이프 캐스팅 방법을 이용하여 3YZ와 8YZ 박판이 교대로 적층된 다층박판의 전기저항에 대한 연구결과를 보고한 바 있다. 3YZ와 8YZ가 교대로 적층된 다층박판이 전극에 대해 평행과 직렬방식으로 접속하도록 하였을 때, 직렬접속방식보다 평행접속방식의 전기저항 값이 훨씬 낮아 단층 8YZ 소결박판의 전체저항 값에 근접하였었다. 따라서, 8YZ 소결박판보다 기계적 물성이 좋은 조성인 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말을 33% 첨가해서 제조한 박판의 전체저항 값이 다른 혼합시편들보다 낮은 것은 고유저항이 작은 3YZ와 고유저항이 큰 8YZ 입자 연결에 따른 전기전도 경로(path)와 관련이 있을 것으로 생각된다. 즉, 8Y-ZrO<sub>2</sub> 분말이 33% 첨가된 소결박판에서 전극에 대하여 3YZ와 8YZ의 입자 연결상태가 직렬상태보다는 평행하게 된 부분이 많이 존재하기 때문으로 생각된다. 이 전기전도에 대한 기구를 해석하기 위하여 Fig. 6에 측정온도에 따른 전체저항의 변화를 나타내었다.

Fig. 6는 각 지르코니아 박판들에 대한 임피던스 값으로부터 환산된 전체저항을 측정온도의 역수로서 나타낸 것이다. 전 측정온도 구간에서의 전체저항을 Fig. 6(a)에, 고온부근에서의 전체저항을 확대하여 Fig. 6(b)에 나타내었다. 모든 시편들이 Arrhenius 관계식

$$T/\rho \propto \exp(-E_a/kT)$$

을 만족하는 직선을 보이고 있다. 여기에서  $\rho$ 는 전체저항, T는 측정온도, E<sub>a</sub>는 활성화에너지, 그리고 k는 볼츠만 상수를 의미한다. 따라서, 측정온도가 올라감에 따라 모든 시편들은 열적으로 활성화된 이온전도 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 3YZ 소결박판의 전체저항에 대한 기울기가 가장 작고 8YZ의 기울기가 가장 높은 값을 가지고 있다. 혼합시편의 전체저항에 대한 기울기는 3YZ와 8YZ의 기울기의 범위에 들어 있다. 저온 측정구간에서는 3YZ 소결박판의 전체저항이 제일 크고 8YZ 소결박판의 것이 가장 작다. 그러나, 750°C 이상의 고온

측정구간에서는 3Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 소결박판의 전체저항이 가장 크지만, 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말을 33% 첨가된 소결박판의 전체저항이 제일 작게 나타나고 있다. 이것은 500°C 이상의 온도에서 이온전도 특성이 Arrhenius 관계식을 만족하지 않으면서 온도가 올라감에 따라 전체저항의 기울기가 감소함으로써 나타나는 현상이다. 즉, 3Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말의 양이 많을수록 높은 측정온도까지 저온부근에서의 전체저항의 기울기가 그대로 유지되지만 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말의 첨가량이 많은 시편은 낮은 온도(약 500°C) 이상에서부터 기울기가 감소하기 시작한다. 그래서, 750°C 이상에서는 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말이 33% 첨가된 시편의 전체저항이 오히려 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 시편보다 낮게 된다(Fig. 6(b)). 이 전체저항의 기울기의 변화원인은 잘 모르지만 Arrhenius 관계식을 만족하지 못하는 것은 전도기구가 변화한다는 것을 의미한다. Hassel 등<sup>11)</sup>과 Patil 등<sup>12)</sup>도 이것을 전해질 재료의 전기전도 기구가 변하기 때문으로 설명되고 있으나 아직 확실하게 밝혀지지 않고 있다. 그 기구의 실체를 확실히 규명하기 위한 연구가 계속되어야 한다.

#### 4. 결 론

3Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말에 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말을 0, 33, 50, 67, 100%의 무게비로 혼합한 다음, 레이프 캐스팅 방법으로 성형테이프를 제조한 후 1500°C 공기분위기에서 4시간 동안 소결하여 연료전지용 지르코니아 박판을 제조하고 미세구조와 그 전기적 성질을 조사하였다. 혼합시편 중 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말이 33% 첨가된 소결박판은 750°C 이상의 온도에서 고체산화물 연료전지의 전해질 재료로 널리 사용되는 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박판에 비해 기계적 강도가 훨씬 크면서 전기저항 또한 더 작은 값을 가지고 있었다. 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말이 33% 첨가된 시편이 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 시편보다 전체저항이 작은 것은 Arrhenius 관계식을 벗어나는 고온영역에서 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말이 많이 첨가된 시편들은 전체저항의 기울기가 심하게 감소하는 반면에 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말이 적게 첨가된 시편들은 저온부근에서의 전체저항에 대한 기울기가 고온에서도 거의 그대로 유지하였기 때문이었다. 따라서, 3Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말의 혼합비를 잘 조절하면 3Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말의 양에 따라 박판의 강도가 증가하면서 연료전지의 동작온도에서 전체저항이 낮고 기계적 물성이 향상된 지르코니아 박판을 얻을 수 있으리라 예상된다.

#### REFERENCES

1. J. Schoonman, J.P. Dekker, and J.W. Broers, "Electrochemical Vapor Deposition of Stabilized Zirconia and Interconnection Materials for Solid Oxide Fuel Cells," *Solid State Ionics*, **46**, 299-308 (1991).
2. M. Mori and C. Asakawa, "Solid Oxide Fuel Cells," CRIEPI-R-EW90002, Japan (1990).
3. N.Q. Minh, "Ceramic Fuel Cells," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**(3), 563-588 (1993).
4. E. Baur and H. Preis, "Über Brennstoff-Ketten Mit Festleitern," *Z. Elektrochem.*, **43**, 727-732 (1937).
5. A.G. Evans, "The New High-Toughness Ceramics"; pp. 267-291 in *Fracture Mechanics: Perspective and Directions* (20th symposium). ASTM STP 1020, edited by R.P. Gangloff. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1989.
6. F. Ishizaki, T. Yoshida, and S. Sakurada, "Effect of Alumina Addition on the Electrical Properties of Yttria-Doped Zirconia"; pp. 3-14 in *Proc. of the First International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells*, edited by S.C. Singhal. The Electrochemical Society, Pennington, NJ, 1989.
7. T.K. Gupta, J.H. Bechtold, R.C. Kuznicki, L.H. Cadoff, and B.R. Rossing, "Stabilization of Tetragonal Phase in Polycrystalline Zirconia", *J. Mat. Sci.*, **12**, 2421 (1977).
8. T.K. Kang and S.J. Kim, "Optimization of Electrical Conductivity and Fracture Toughness in Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Stabilized ZrO<sub>2</sub> through Microstructural Designs," *J. Korean Ceramic Society*, to be published.
9. N. Bonanos, J. Drennan, R.K. Slotwinski, B.B.H. Steele, and E.P. Butler, "Characterization of Grain Boundaries in Ceramic Ionic Conductors Using A.C. Electrical Techniques," *Silicates Industries* **9-10**, 127 (1985).
10. S.J. Kim, K.H. Kim, S.J. Oh, T.K. Kang, and I.H. Kuk, "Effect of Microstructural Design on the Electrical Properties of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Stabilized ZrO<sub>2</sub>," *J. Korean Ceramic Society*, **30**, 717 (1993).
11. B.A. van Hassel and A.J. Burggraaf, "Effect of Ion Implantation Doping on Electrical Properties of Yttria-Stabilized Zirconia Thin Films," *Solid State Ionics*, **57**, 193 (1992).
12. D.S. Patil, N. Venkatramani, V.K. Rohatgi, and B.C. Mutsuddy, "Investigation on Some Ceramic Materials for Electrochemical Device Application," *Solid State Ionics*, **52**, 189 (1992).