

## SOFC 음극용 Ni-YSZ 복합체 제조시 생기는 Ni 손실

문 환 · 이종호 · 이해원  
한국과학기술연구원 세라믹공정연구센터  
(2000년 12월 8일 접수)

### Ni Loss During the Fabrication of SOFC Anode, Ni-YSZ Composite

Hwan Moon, Jong-Ho Lee and Hae-Weon Lee  
Ceramic Processing Research Center, KIST, Seoul, 136-791, Korea  
(Received December 8, 2000)

#### 초 록

SOFC 음극으로 쓰이는 Ni-YSZ 복합체의 제조과정 중에 생기는 조성의 변화를 관찰하였다. XRD를 이용하여 복합체 부위 별로 상분석한 결과 Ni-YSZ 복합체는 소결과정이나 환원처리시 복합체 내-외부간의 조성차가 일어나며 이로 인해 전기적 물성의 불균일성이 나타난다. 복합체 조성의 불균일성 및 전기적 물성의 불균일성은 주로 복합체를 구성하는 Ni성분의 변화에 기인했는데 소결과정이나 환원과정시 Ni성분이 기판으로 확산해가거나 기상으로 증발해버려 Ni 손실이 생기기 때문인 것으로 나타났다. Ni 성분의 손실은 열처리 온도와 시간에 비례하여 커졌으며 이로 인해 복합체의 전기적 물성도 악화되었다.

#### ABSTRACT

The compositional variation of the Ni-YSZ composite during the fabrication of SOFC-anode was investigated via XRD analysis. According to the XRD analysis, Compositional inhomogeneity was observed in between the surface and inside of the composite. Compositional inhomogeneity was mainly due to the NiO or Ni loss during the heat treatment like debinding, sintering and reduction. The compositional loss occurred via evaporation or diffusion of Ni, which become intensified as the temperature and the duration time of the heat treatment increase.

**Key words :** Ni-YSZ composite, Ni loss, Diffusion, Evaporation

#### 1. 서 론

최근 들어 발전장치 및 수송기기용 차세대 연료전지로 각광받고 있는 고체산화물 연료전지(SOFC)는 크게 전해질 지지형과 전극지지형 그리고 전해질과 전극을 모두 박막형태로 제조하는 가스확산층(gas diffusion layer) 지지형으로 분류될 수 있다.<sup>1-3)</sup> 이중 일반적으로 가장 널리 쓰이고 있는 음극지지형 SOFC의 경우 지지체 역할을 하는 음극기판위에 박막형태의 전해질과 양극이 차례로 구성되게 되는데 전해질의 경우는 YSZ 등의 zirconia 계 전해질이 양극으로는 LSM등의 perovskite계 산화물이 대표적인 물질들로 제안되고 있다.<sup>1,2)</sup> 연료의 산화반응을 담당하고 있는 연료전지의 음극은 지금까지 cobalt, platinum, palladium 등의 전이 금속 또는 귀금속들이 사용돼왔으나 현재는 거의 대부분 nickel 또는 nickel을 함유한 물질들 특히 Ni-YSZ 복합체가 주로 사용되고 있다. Ni-YSZ 복합체는 가격과 성능 등 여러 가지 면에서 고체 산화물 연료전지의 음극으로 사용하기에 적합한 물질로 알려져 있는데 Ni-YSZ 복합체의 제조는

Ni 금속상에서 출발하기보다는 NiO-YSZ 복합체를 먼저 소결한 후 이를 환원시켜 제조하기 때문에 제조시 소결, 환원 등 몇 단계의 열처리과정을 거치게 된다.<sup>4)</sup>

앞선 연구<sup>5,6)</sup>를 통해 Ni-YSZ 복합체의 전기적 물성은 복합체내 주요 구성상인 Ni와 YSZ의 공간적 분포 상태에 의하여 많은 영향을 받게 됨을 알 수 있었다. 따라서 Ni-YSZ 복합체의 전기적 물성은 제조 과정 중에 발생하는 조성 변화에 의해 큰 영향을 받게 되는데 극단적인 경우 처음 의도했던 전기적 물성과 전혀 다른 특성으로 변할 수도 있게 된다. 따라서 최적의 전극 특성을 구현할 수 있는 전극을 제조하기 위해서는 복합체 제조 과정중 발생할 수 있는 조성 변화 인자들에 의한 영향을 파악하고 이를 통해 처음 계획했던 조성을 유지하면서 목적했던 전기적 특성을 구현하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 성능이 우수한 SOFC용 음극 제조를 위해 Ni-YSZ 복합체 제조과정 중 쉽게 발생할 수 있는 조성 변화 요인들에 대해 파악하고 이로부터 안정적인 전극 제조를 위해 필요한 실험조건들을 제시하고자 한다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 음극지지형 SOFC 단전지의 제조를 위해 다음과 같은 공정을 사용하였다. 원료분말로는 일본 Tosho사의 이트리아 안정화 지르코니아(TZ8YS, 입경 0.3  $\mu\text{m}$ )와 미국 Unitec사의 이트리아 안정화 지르코니아(FYT13, 입경 2  $\mu\text{m}$ ) 그리고 일본 Joung-Dong사의 NiO를 사용하였으며 다공성 전극을 구성하기 위해 graphite(SGP-5)를 기공전구체로 첨가하였다. 균일한 조성의 시편을 얻기 위해 YSZ와 NiO 그리고 graphite를 acetone/IPA(1/1)용액과 혼합해 24시간동안 습식 밀링을 하고 이를 분무건조 하였다. 분무 건조한 분말은 체질을 통해 150  $\mu\text{m}$  이상의 거대 입자들을 분리해 낸 후 미세한 분말만을 사용하여 음극기판을 제조하였다. 분무건조법으로 제조한 분말을 몰드에 장착하고 일축가압법으로 판상시편을 제조하였다. 성형한 시편은 2.5°C/min의 승온속도로 300°C, 600°C 및 1000°C에서 각각 10분씩 유지시켜 탈지(debinding)를 시켰으며 기공전구체인 graphite는 900°C 공기중에서 열처리하여 제거하였다. 탈지가 완료된 NiO-YSZ 시편위에 YSZ 전해질 후막을 전착법(electrophoretic deposition) 또는 담금법(dip coating)으로 형성하였다. 전착법과 담금법으로 YSZ막을 형성시킨 시편은 상온에서 유기용매를 휘발시키고 건조과정을 거쳐 1400°C에서 3시간 동안 소결하였다. 소결이 끝난 NiO-YSZ 복합체는 다시 1000°C, 수소분위기에서 열처리하여 Ni-YSZ 복합체로 환원시켰다. 환원 분위기는 수소(200 cc/min)와 질소(1000 cc/min)를 혼합하여 조절하였으며 환원 시 1000°C까지의 승온 속도는 5°C/min으로 하였고 환원 후에는 로냉하였다. 로냉시 시편 표면에 산화막이 형성되는것을 막기 위해 상온까지 계속적으로 수소를 흘려주었고 각각의 시편은 XRD 분석을 통해 산화막 형성이 되지 않았음을 확인하였다.

성형후의 탈지과정이나 소결과정 그리고 소결체의 환원과 과정 등 열처리 단계마다 XRD(M03X-HF 1301, MacScience, Japan) 분석을 통해 시편 조성의 변화를 관찰하였다. 이때 코팅된 전해질 후막의 영향을 살펴보기 위해 코팅된 시편과 코팅되지 않은 두 종류 시편을 따로 준비하고 소결, 환원 등의 열처리과정을 수행하였다. 시편 조성의 변화는 시편 부위별로 조사하기 위해 시편 두께별로 연마해가며 관찰하였다. 열처리시 발생한 조성변화가 시편의 전기적 물성에 끼치는 영향을 살펴보기 위해 코팅되지 않은 시편을 대상으로 소결온도와 소결시간을 달리하며 열처리 한 후 1000°C, 환원분위기하에서 환원처리하고 상온에서 전기 저항을 측정하였다. 본 연구에서는 일반적으로 연료전지 음극에 쓰이는 Ni-YSZ 복합체는 Ni 상의 percolation이 이루어져 있기에 상온에서도 금속 Ni에 의한 전도특성을 보여주게 되므로 만약 Ni 상의 손실이 생기면 표면저항의 변화가 있을 것으로 예상돼 간단히 표면저항을 electrometer(Keithley 6514)를 이용해 2 probe법으로 측정하여 조성변화에 따른 전기적 물

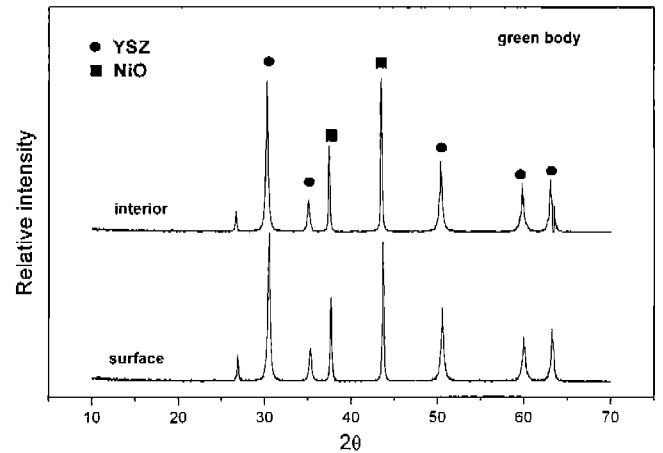


Fig. 1. XRD spectra of NiO-YSZ green body showing no compositional inhomogeneity.

성의 변화를 알아보았다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 열처리에 따른 조성변화

일반적으로 크기가 서로 다른 원료분말을 사용하여 시편을 성형하는 경우 각 구성물질들의 크기 차에 의한 응집체 형성으로 인하여 일축가압 성형시 두께방향으로 조성상의 불균일성이 생길 수 있다. 그러나 본 연구에서 채택한 분무건조법으로 제조한 분말을 이용하는 경우 Fig. 1에 나와있는 성형체에 대한 XRD 분석결과에서 보듯이 응집체 형성에 의한 시편 표면과 내부의 조성차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

성형이 끝난 시편은 탈지과정을 거치면서 처음 열처리를 하게된다. 탈지과정 중에 주어지는 열처리 조건은 최고온도 1000°C이며 공기 분위기 조건이다. 우선 열처리 과정에서 쉽게 예측할 수 있는 조성변화 요인으로는 휘발성이 강한

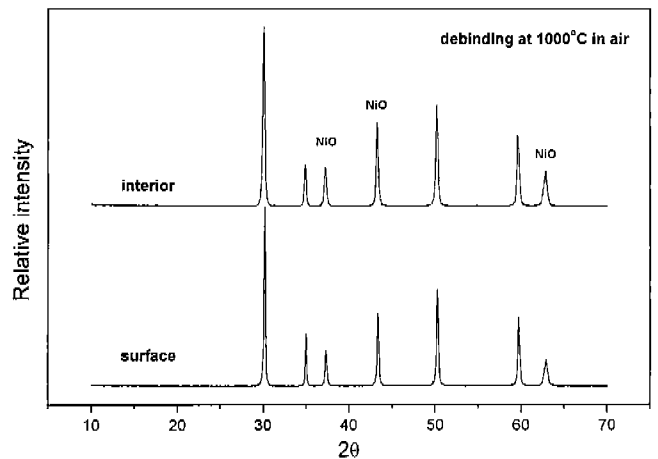


Fig. 2. XRD spectra of NiO-YSZ composite after debinding at 1000°C in air.

NiO상의 휘발문제와 물리적으로 접촉해있는 기판(알루미나, 두께 1 mm)과의 반응에 의한 일부 성분의 손실문제를 들 수 있다. Fig. 2는 탈지과정을 거친 후 시편의 내부와 외부에서의 조성변화를 XRD로 분석한 결과를 보여주고 있다. Fig. 2의 결과에서 보면 시편 내부와 외부의 조성이 미세한 차이지만 약간 다르게 나타나고 있음을 보여주고 있는데 시편 외부에서 NiO상이 초기조성보다 약간 적게 분포하고 있음을 알 수 있다. 그러나 그 차이는 그렇게 크지 않았으며 이는 탈지과정 중 2.5°C/min의 속도로 공기중 조건에서 1000°C까지 승온 했다가 내리는 경우 NiO의 휘발이나 기판과의 반응이 그리 크지 않음을 말해준다. 한편 Fig. 3에 나와있는 시편 부위에 따른 미세구조 사진을 보아도 탈지과정을 거친 시편에서는 특별한 미세구조의 불균일성이 나타

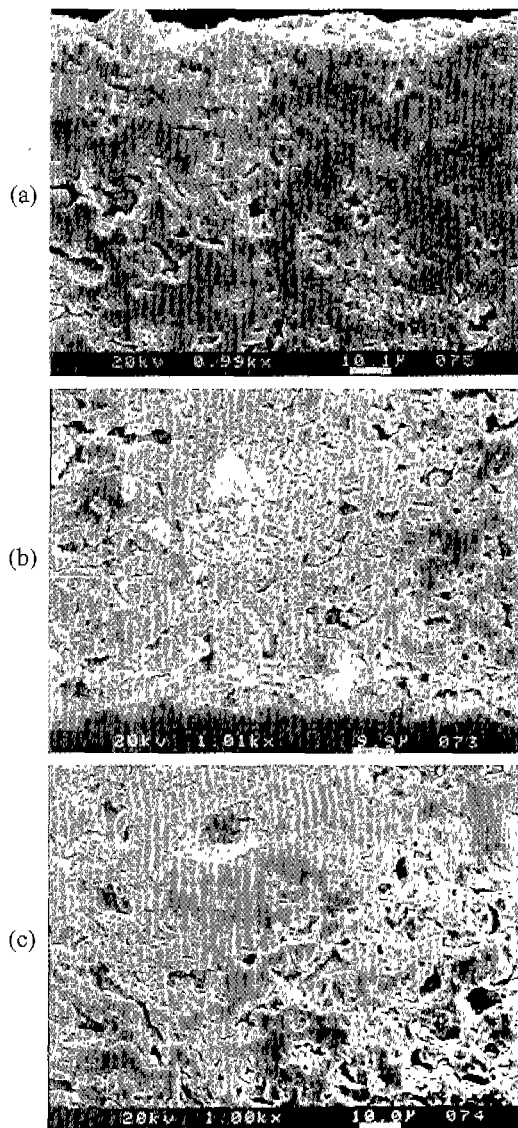


Fig. 3. Microstructure of NiO-YSZ composite after debinding; (a) upper, (b) middle and (c) lower part of Ni-YSZ composite.

나고 있지 않은데 이로부터 본 연구에서와 같이 분무건조법으로 제조한 분말을 사용하는 경우 분말 성형과정에서 발생하는 응집체로 인한 조성이나 미세구조의 변화는 배제할 수 있음을 알 수 있었다.

한편 일반적인 단전지 제조공정에서는 탈지가 끝난 시편에 전착법 또는 담금법으로 전해질을 표면에 코팅한 후 동시 소결하게 된다. 본 연구에서는 시편의 소결시 전해질이 표면에 코팅돼있는 경우와 그렇지 않은 경우 시편 조성상에 어떤 영향을 줄 것인지를 알아보기 위해 전해질이 코팅된 시편과 코팅되지 않은 시편을 똑같은 소결조건 (1400°C, 공기중에서 3시간)에서 열처리 한 후 그 변화를 살펴보았다.

Fig. 4는 전해질이 코팅되지 않은 NiO-YSZ 복합체를 1400°C 공기 분위기하에서 소결한 후 시편 부위에 따라 XRD 분석한 결과이다. 그림에서 보면 앞서 탈지과정 후의 결과와는 달리 시편 외부와 내부의 조성이 크게 차이가 나고 있음을 볼 수 있다. 특히 받침으로 사용한 알루미나 기판과 물리적으로 접촉해 있는 시편의 밀부분에선 NiO가 거의 검출되지 않을 정도로 NiO 손실이 일어났음을 보여주고 있다. 실제 소결 후 시편과 접촉해있던 알루미나 기판 부위에는 시편형상으로 자국이 남아있는 것을 발견할 수 있는데 그 색깔이 푸른색으로 남아있는 것으로 보아 시편에서 NiO가 휘발 또는 확산에 의해 기판쪽으로 빠져 나왔음을 알 수 있다. NiO와 알루미나 기판과의 반응을 확인해보기 위해 시편형상이 남아있는 기판부분을 XRD 분석해 본 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 결과에서 보면 기판위에 남아있던 자국은 단순히 NiO가 증착돼있는 자국이 아니라 NiO와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 고상반응이 일어나 새로운 화합물, NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>를 형성 하였음을 보여주고 있다. 고상반응은 주로 기판쪽에서 이루어졌으며 시편쪽에서는 새로운 화합물의 peak이 관찰되지 않는 것으로 보아 주로 Ni가 기판쪽으로 이동해와 반응에 참여하는 것으로 보인다. 시편쪽에서 빠져 나오는 Ni의 경로는 고상을 통한 고체확산과 기상을 통한 증발-증착을 통

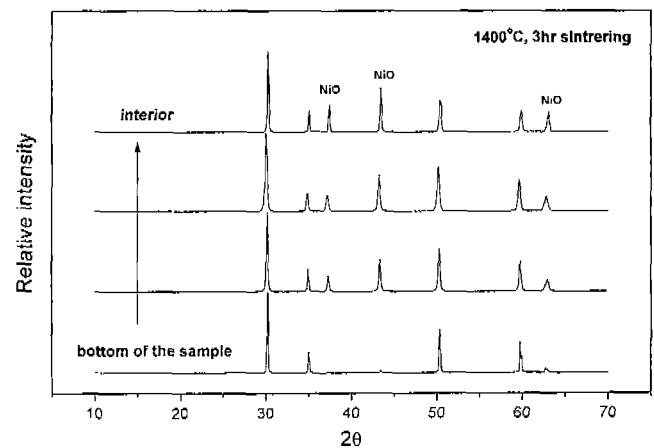


Fig. 4. XRD spectra of NiO-YSZ composite after sintering at 1400°C in air for 3 h.

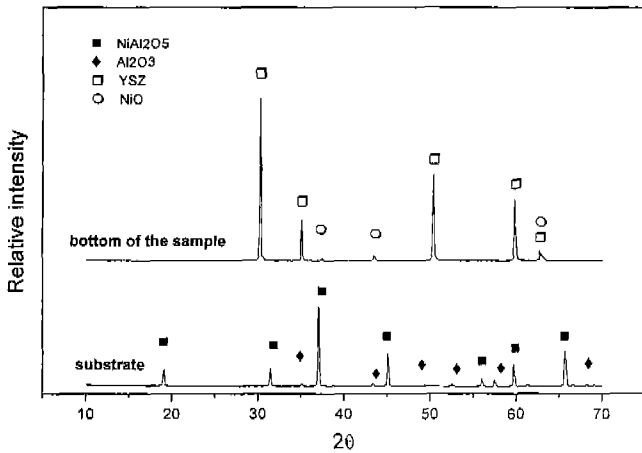


Fig. 5. XRD spectra of the sample surface and reaction product between NiO-YSZ composite and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrate after sintering.

해서 가능할 것으로 보이는데 기판과 접촉해있지 않은 반대 쪽 표면에서의 NiO 손실이 그렇게 크지 않은 것으로 보아 NiO의 증발보다는 고상을 통한 확산이 더 주요한 경로일 것으로 추론된다. 이러한 고상확산은 기판쪽에서의 반응물 생성으로 인해 더욱 촉진돼 시편 내부로부터 기판쪽으로의 Ni 이동을 계속적으로 일어나게 해주며 이로 인해 시편 밑면의 Ni 결핍이 심각하게 발생하게 된다.

한편 전해질이 표면에 코팅된 시편을 같은 조건에서 소결한 후 시편 표면과 내부를 XRD 분석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 본 연구에서는 열처리시 시편의 휘현상을 방지하기 위해 시편 양면에 같은 두께의 전해질 층을 형성시키는데 Fig. 6의 결과는 이와 같이 양면에 코팅된 시편에 대해 분석한 결과이다. Fig. 6에 나타난 결과를 살펴보면 표면에 코팅된 전해질층에 의해 NiO의 손실이 코팅층이 없었던 Fig. 3의 경우에서보다 줄어들었음을 알 수 있다. 그러나 이 경우에도 시편 표면쪽으로는 NiO 성분이 감소했고 특히 기

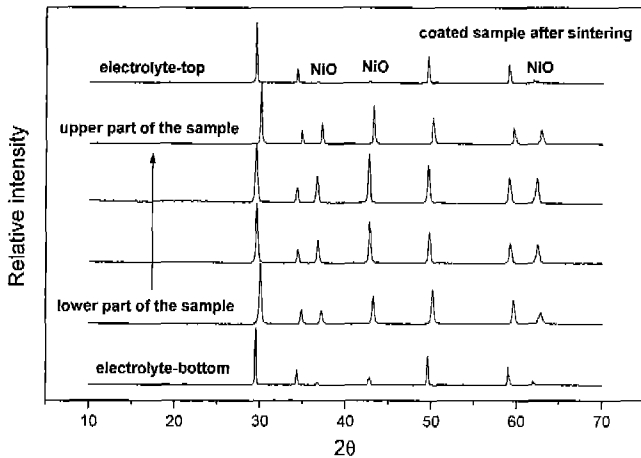


Fig. 6. XRD spectra of YSZ coated NiO-YSZ composite after sintering at 1400°C in air for 3 h.

판과 접해있던 시편 밑면에서 NiO의 손실이 크게 일어났다. 이러한 결과는 전해질층이 코팅돼 있어도 NiO의 휘발이나 기판과의 반응을 완전히 억제하지는 못하고 있음을 의미한다. 한가지 더 특기할만한 점은 소결 후 YSZ 코팅막에서도 NiO의 peak이 관찰된다는 점이다. 이것은 코팅된 막이 치밀하게 소결되기전 기판의 NiO 성분이 일부 코팅층으로 휘발 또는 확산에 의해 빠져 나왔기 때문으로 보인다. YSZ 코팅막에 잔류하는 NiO의 양은 기상과 접해있는 시편 윗면보다는 기판과 접해있는 아랫면에서 더 많이 존재하는 것으로 나타나는데 이것은 앞서의 경우와 마찬가지로 기판과의 반응때문에 코팅층을 통한 Ni의 이동이 촉진됐기 때문으로 보이며 이 때문에 시편 밑면에서의 NiO 손실이 더 심각해진 것으로 보인다.

한편 환원과정 중 발생하는 시편 조성의 변화를 살펴보기 위해 전해질이 코팅되었는 시편과 코팅되지 않은 시편을 똑같은 열처리 조건에서 소결한 후 1000°C, 환원분위기하에서 환원 처리를 하고 시편 부위에 따른 조성변화를 관찰하였다. 이때 두 종류 시편 모두 소결과정 중 Ni 기판과 접해있던 아랫면을 일정 두께로 연마한 후 환원처리 하였다. 시편의 한쪽면을 제거한 이유는 소결과정중 발생한 Ni 성분의 손실부위를 제거한 후 환원과정중에 생기는 변화를 살펴보기 위함이었다. 또한 시편 한쪽면을 가공하는 것은 실제 단전지 제작과정에서도 한쪽 전해질층을 제거하기 위해 추가되는 공정이기 때문에 실제와 똑같은 상황을 부여해주기 위한 이유도 있었다. 먼저 Fig. 7은 코팅되지 않은 시편을 환원처리한 후의 결과이다. 그림에서 보면 앞서 소결처리 과정에서 발생한 시편 아래쪽의 NiO 손실과 유사하게 환원과정 중에도 Ni의 손실이 발생하였음을 볼 수 있다. 추가적인 Ni 성분의 손실은 환원시 Ni가 금속상으로 존재하기 때문에 1000°C라는 온도가 비록 소결온도보다는 저온이긴 하나 금속 Ni와 기판과의 반응에는 충분한 온도였던 것으로 보인다. 한편 Fig. 8에는 한쪽 코팅면을 연마해 제거한 후 제거

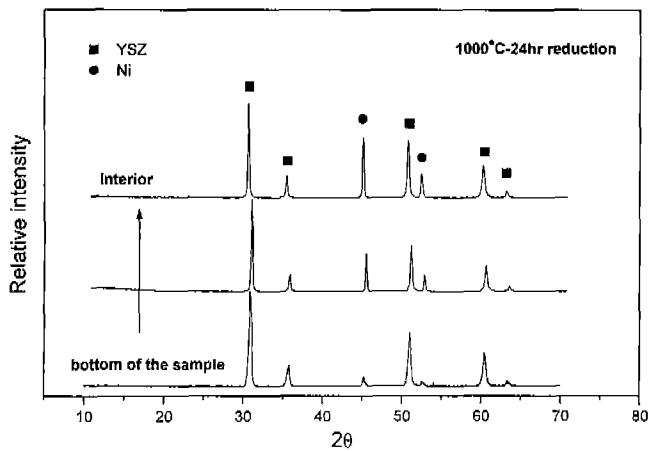


Fig. 7. XRD spectra of NiO-YSZ composite after reduction at 1000°C for 24 h.

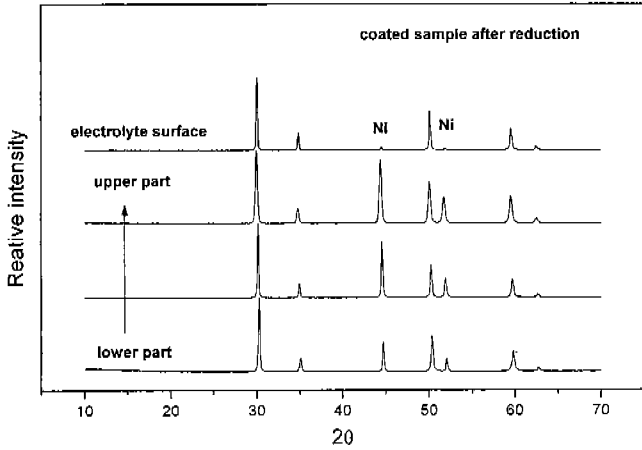


Fig. 8. XRD spectra of YSZ coated NiO-YSZ composite after reduction at 1000°C for 24 h.

한 면을 아래쪽으로(기관과 접촉) 하여 환원처리한 시편의 결과를 나타내었다. 그림의 결과에서 보면 앞서 코팅되지 않았던 시편에서와 마찬가지로 환원처리를 거치면서 기관과 접촉한 시편 아랫면의 Ni 손실이 발생하였는데 상대적으로 환원 온도에서는 Ni의 휘발은 심각하지 않아 기상과 접한 코팅면 쪽에서는 Ni 손실이 크지 않은 것으로 나타났다. 한편 전해질이 코팅된 층에서는 소결시 발생했던 NiO 성분이 그대로 남아 Ni로 잔류하고 있음을 보여주고 있는데 잔류하는 Ni 성분이 연료전지의 특성에 악영향을 줄 것으로 생각되기에 이를 최대한 억제하기 위한 노력을 현재 진행중이다. 그러나 현재까지 분석해본 바로는 잔류하는 Ni상이 대부분 전해질막 표면 또는 내부에 일부 격리돼 있을 뿐 전해질층을 관통해서 존재하지는 않는 것으로 밝혀졌다.

3.2. 조성변화에 따른 전기적 물성변화

Ni-YSZ 복합체의 열처리 과정에서 가장 Ni 성분의 손실이 많은 단계는 가장 높은 온도에서 열처리하게 되는 소결과정이다. 특히 소결과정 중 기관인 알루미늄과 접촉해 있는 부위에서의 손실은 아주 심각하다. 본 연구에서는 열처리 온도와 시간에 따른 시편 조성의 변화와 그에 따른 전기적 물성의 변화를 살펴보았다. Fig. 9a는 소결 온도에 따른 상온 전기 저항값의 변화이다. 그림에서 보듯이 1100°C 이하의 온도에서는 3시간 정도 열처리하는 경우 시편 표면의 Ni 손실이 그리 크지 않아 금속 Ni에 의한 낮은 저항값을 보인다. 그러나 1200°C 이상의 온도에서는 3시간 정도 열처리하는 경우 시편 표면에서의 Ni 손실이 심각해져 저항값이 크게 나온다. 한편 열처리 시간에 따른 전기 저항값의 변화를 살펴보면(Fig. 9b) 1100°C에서 열처리하는 경우 5시간 이상 열처리지 Ni상의 손실이 커져 전기 저항값이 크게 나오고 있다. 이러한 저항값의 증가는 앞절에서 살펴보았듯이 시편 열처리과정중 발생한 시편 표면부위에서의 Ni 손실 때문인데 Ni상이 결핍돼있는 층의 두께 또한 열처리 온

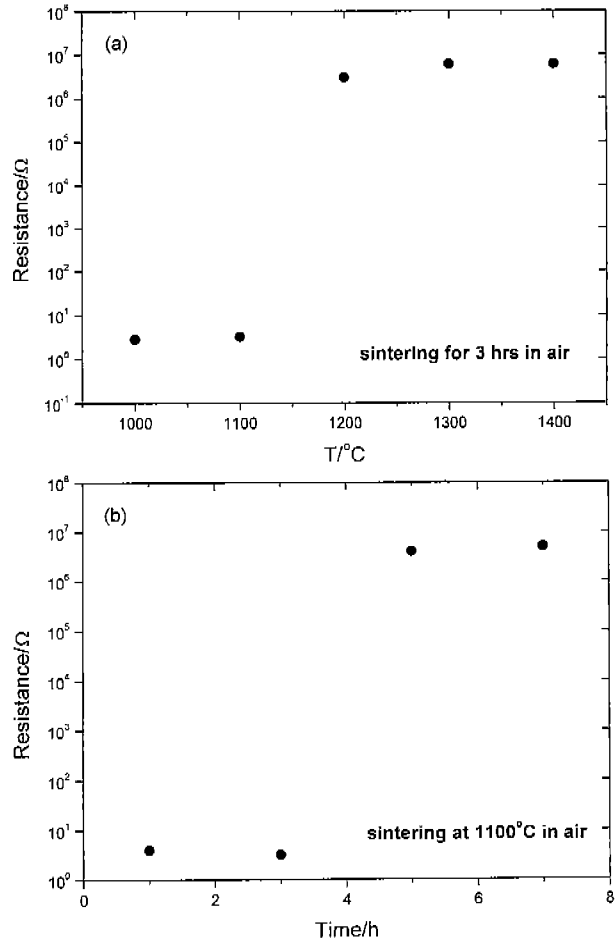


Fig. 9. Surface resistance of NiO-YSZ composite after sintering showing the influence of sintering (a) temperature and (b) duration time.

도와 시간에 따라 비례하였다. 실제 저항값이 높게 나오는 시편의 표면을 연마해 제거하고 시편 내부의 저항값을 측정해보면 낮은 저항값이 측정되는 것을 확인할 수 있었는데 이러한 전기적 물성의 변화는 앞절에서 확인된 시편부위에 따른 Ni 조성의 변화와 일치하는 결과이다. 이상의 결과에서 보듯이 열처리 조건에 따른 복합체 조성의 불균일성은 바로 전기적 물성의 불균일성을 가져오게 되며 따라서 이러한 조성변화에 대한 대책이 마련 되었지 않으면 Ni-YSZ 복합체의 전기적 물성이 당초 예상과 달리 연료전지의 음극으로 사용하기에 적합치 않아 질 수도 있다.

따라서 본 연구에서는 연료전지 음극으로서의 Ni-YSZ 복합체 제조시 복합체내 NiO 또는 Ni 성분의 손실을 막기 위해 다음과 같은 방법을 제안하고자 한다. 먼저 가장 간단하며 효과적인 방법은 NiO와 반응성이 없는 기관을 사용하는 방법이다. 우선 생각해볼 수 있는 기관은 안정한 지르코니아 기관이 있다. 실제 지르코니아 기관을 사용해 시편을 소결한 후 시편 부위에 따른 XRD 분석 결과(Fig. 10)를 살펴보면 앞서의 경우와 달리 기관과 접촉해 있던 시편 부

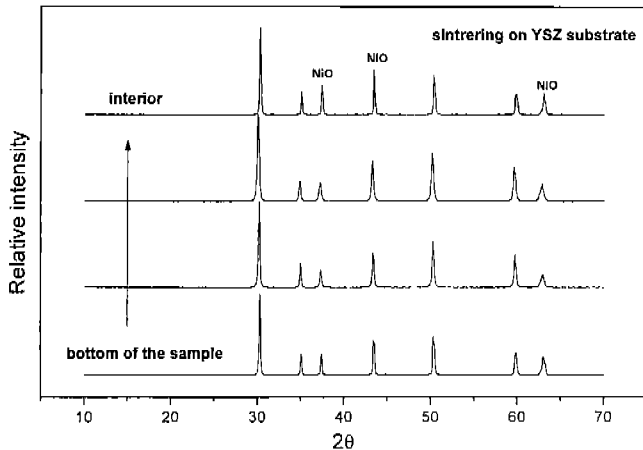


Fig. 10. XRD spectra of NiO-YSZ composite after sintering on YSZ substrate.

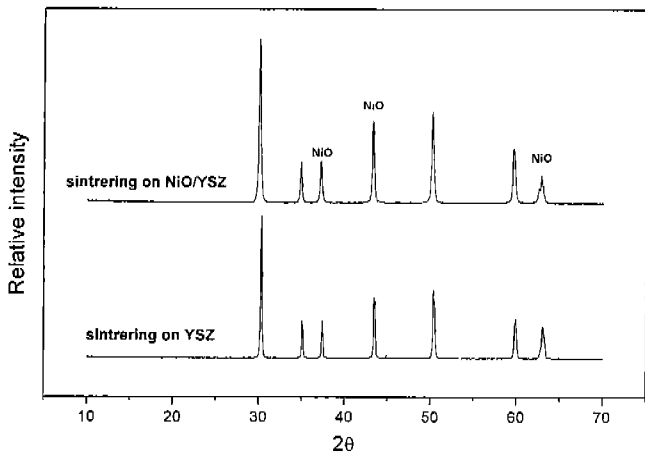


Fig. 11. XRD spectra of NiO-YSZ composite after sintering on YSZ and NiO-YSZ substrate.

위에서도 NiO상의 손실이 상당히 감소되었음을 볼 수 있다. 한편 시편과 같은 조성의 기판을 사용하는 것도 효과적인 일 것으로 예상할 수 있는데 Fig. 11에서 보듯이 같은 조성으로 제작한 NiO-YSZ 기판위에 시편을 얹고 소결한 경우 지르코니아 기판위에서 소결한 시편과 마찬가지로 NiO상의 손실은 상당히 감소하였음을 알 수 있다. Fig. 10과 11의 결과는 전해질이 코팅되었지 않은 시편에서의 결과들로 실제 사용되는 음극기판의 경우처럼 전해질층이 코팅되었는 경우 기판과의 반응은 더 감소할 것으로 예상된다. 그러나 전해질이 코팅되었는 경우는 NiO-YSZ 기판위에서 소결할 때 전해질층으로 NiO 성분이 들어가 잔류할 확률도 높아지기 때문에 추가로 이에 대한 분석이 필요할 것으로 보인다.

한편 공기중으로 휘발하는 NiO 성분에 대해서는 시편 소결 시 분위기조절용 NiO 분말을 시편 주위에 배치시키거나 시편 위에 같은 조성의 시편을 적층시키면 억제될 것으로 보이는데 이 경우도 전해질 코팅층으로 NiO 성분이 침투되는 문제에 대해서는 주의를 기울여야 한다.

#### 4. 결 론

SOFC 음극으로 쓰이는 Ni-YSZ 복합체는 제조과정 중 발생하는 Ni 성분의 손실로 인해 처음 설계했던 음극특성을 잃게될 수 있다. 제조과정 중 발생하는 Ni 성분의 손실은 소결과정 중 발생하는 NiO의 손실과 환원과정 중 발생하는 Ni의 손실로 구분되는데 두 경우 모두 기관과의 반응이 가장 큰 원인으로 나타났다. 한편 소결온도인 1400°C에서는 NiO의 휘발 또한 무시할 수 없을 정도로 나타난 반면 탈지과정이나 환원과정에서는 휘발에 의한 Ni 성분 손실은 심각하지 않은 것으로 나타났다. 코팅된 전해질층은 소결과정 시 NiO의 휘발이나 기관과의 반응을 줄여주는 하나 완전히 차단하지는 못하였으며 코팅층을 통한 Ni 성분의 손실은 코팅층이 치밀화 되기전에 주로 발생하는 것으로 보인다. 전해질 코팅층을 통한 Ni의 이동은 소결 후에도 전해질 층에 Ni 성분의 잔류를 가져와 실제 연료전지 작동에 악영향을 줄 수 있을 것으로 사료된다. 연료전지 작동성능에 악영향을 줄 수 있는 이 같은 요인들을 해결하려면 먼저 시편과의 반응을 없애거나 최소화 할 수 있는 기판을 사용하여야 하며 동시에 소결시 NiO의 휘발을 막기 위한 조치를 취해야 한다.

#### REFERENCES

1. N. Q. Minh, "Ceramic Fuel Cell," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**(3), 563-588 (1993).
2. N. Q. Minh and T. Takahashi, *Science and Technology of Ceramic Fuel Cells*, Elsevier Science, Amsterdam, 1995.
3. K. Kordesch and G. Simader, *Fuel Cells and Their Applications*, pp. 1-21, VCH Verlag., Weinheim (1996).
4. 이종호, 김구대, 손용배, 이해원, 김상우, 송휴섭, 김금호, "음극지지형 SOFC 단전지의 출력특성 및 장기안정성," *한국세라믹학회지*, **37**(9), 847-55 (2000).
5. 문환, 이해원, 이종호, 윤기현, "SOFC 음극용 Ni-YSZ 복합체의 미세구조와 전기적 물성간의 상관관계: I. 미세구조 분석," *한국세라믹학회지*, **37**(5), 479-90 (2000).
6. 문환, 이해원, 이종호, 윤기현, "SOFC 음극용 Ni-YSZ 복합체의 미세구조와 전기적 물성간의 상관관계: II. 경시변화," *한국세라믹학회지*, **37**(12), 1140-45 (2000).