용존산소활량 측정용 지르코니아 갈바니 센서

오 영 제*

Zirconia galvani sensor for the measurement of oxygen activity

Young-Jei Oh*

Abstract

Magnesia partially stabilized zirconia(Mg-PSZ) solid electrolytes for an improvement of thermal shock resistance, which is suitable for the measurement of oxygen activity in a molten steel, were prepared by post-thermal aging treatment. The steelmaking oxygen sensor elements were formed by an injection molding method, sintered at 1650 °C, and then thermal aged ranged from 1250 to 1400 °C. Sintered density and porosity were decreased as increasing the magnesia content in a zirconia-magnesia solid solution. Fractions of cubic phase to the synthesized Mg-PSZ solid electrolytes were ranged from 13.13 to 79.54 % after post-thermal aging treatment. Very dense microstructure without voids in the grains was obtained by the post-thermal aging process. Fine tetragonal phase crystallites precipitated on the cubic surface during post-thermal aging up to 1300 °C improve a thermal shock resistance and reappearance of electro motive force(EMF) curve.

Key Words : magnesia stabilized zirconia, thermal aging, thermal shock resistance, tetragonal phase, steelmaking

1. 서 론

제강공정에서 C, Si, P 및 기타의 불순 원소를 제거 할 목적으로 용철(또는 용동) 중에 산소를 흡입시켜 산화정련(酸化精鍊)을 행하게 되는데, 정련이 진행됨에 따라 용철 중의 산소량은 점차 증가하여 상당량의 산소가 용융 금속 중에 남게 된다. 그런데, 이 용존 산소는 조괴시 탄소와 반응하여 기포를 생성시켜 불건전한 강괴의 원인이 되거나 산화물 등의 개재물을 형성시켜 철강(또는 구리 금속)의 품질을 크게 저하시킨다.

따라서 이러한 산소를 용융금속 중에서 제거시키기 위하여 탈산제나 합금 원소를 첨가시켜 탈산을 행하게 되는데 탈산에 의한 산소 함량의 저하는 기공제거 합금원소의 실수율 향상, 탈유율 향상 및 개재물의 감소 뿐만 아니라 개재물의 형태나 분포 등도 조절 가능하게 한다. 다시 말해, 용해 금속중의 산소농도 제어는 냉연 강판의 재질 또는 표면상태의 조절 등과 같은 제

품의 중요한 품질관리 항목이며, 또 제강공정 중 탈산의 열쇠는 전로, 래들(ladle) 또는 턴디쉬(tundish) 내의 용강중의 산소농도를 원하는 때마다 신속하게 직접 측정할 수 있도록 해야 한다는 점이다. 따라서 종래에는 불활성가스 송기법 및 방사화 분석법 등이 개발되어 생산현장에서 상당한 효과를 거두었으나 이 방법들은 2~4분 정도의 시간을 요하기 때문에 정확한 산소량을 측정하기가 곤란하다. 그러나 위와 같은 방법들에 비하여 고체전해질을 이용한 산소농도 전지형의 기전력 측정법은 산소활량을 in-suit로 신속하고 정확하게, 또 간편히 측정 분석할 수 있는 이점을 갖고 있다¹⁻⁷⁾.

안정화 지르코니아(ZrO_2)계 고체전해질을 용강 중에서 산소농도전지형 갈바니센서로 사용할 경우의 최대 문제점은 용강 침적시 급격한 열충격저항 때문에 스포링(spalling)현상이 일어난다는 점인데 이것으로 인하여 산소활량 측정 시 기전력 파형을 얻을 수 없거나 또는 얻어진다 하더라도 얻어진 파형의 안정성이 적어짐으로 열충격저항성을 높이는 것은 금속공업용 산소센서 개발에 있어 관건이 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 용도를 위한 산소센서 소자를 위하여 고체전해질 산소센서 소재로 사용할 수 있는 안정화지르코니아 고용체(solid solution)를 합성하고, 이를 사출성형(injection

박막재료연구센터, 한국과학기술연구원(Thin Film Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology)

*Corresponding author : youngjei@kist.re.kr

(Received : August 3, 2009, Revised : September 16, 2009)

Accepted : October 14, 2009)

molding)법을 이용하여 제조한 후 소성된 센서소자용 시편을 여러 조건에서 에이징 처리한 후 이들이 센서 소자의 특성에 미치는 여러 영향을 조사 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 출발원료

불순물에 의한 영향을 최대한 배제시키기 위하여 고 순도의 시약급 ZrO_2 (Table 1)와 MgO (Table 2)를 출발원료로 사용하여 20 mol% 까지의 MgO 가 고용 되도록 각각 칭량한 후(MgO 고용량증가에 따라 AMZ, BMZ, CMZ 및 DMZ로 표기 함), 에탄올을 용매로 하여 지르코니아 볼밀에서 2시간동안 혼합한 뒤 자연건조 시켰다.

2.2. 센서소자 제조

가. 혼합

앞서 혼합된 원료에 유기첨가제인 PS(수지), stearic acid, paraffin wax 등을 일차 혼합시킨 다음, 혼련기를 이용하여 180 °C에서 세라믹 원료분말과 유기첨가물을 골고루 재차 혼합시킨 후 건조하였다. 다음 사출성형을 위하여 이를 pellet화 하였다.

Table 1. Some impurities and particle size of Zirconia as starting material

Al_2O_3 (wt%)	≤ 0.1
SiO_2 (wt%)	≤ 0.02
Fe_2O_3 (wt%)	≤ 0.01
Na_2O (wt%)	≤ 0.04
Specific Surface Area(m^2/g)	14 ± 3
Particle size(μm)	0.27

Table 2. Some impurities in Magnesia as starting material

Soluble Substance in Water	≤ 0.4
Solubility in dil. HCl	to pass test
Drying Loss	$\leq 2.0\%$
Chloride (Cl)	$\leq 0.01\%$
NO_3	$\leq 0.005\%$
SO_4	0.03%
PO_4	$\leq 0.002\%$
Pb	$\leq 0.005\%$
Fe	$\leq 0.005\%$
Zn	$\leq 0.002\%$
Ba	$\leq 0.005\%$
Ca	$\leq 0.05\%$
As	$\leq 0.0005\%$
함량(건조후)	$>99.0\%$

Fig. 1. Oxygen sensor elements for the measurement of oxygen activity in molten steel after injection molding.

나. 성형

사출성형기에서 사출온도 180 °C, 금형온도 60 °C, 사출압력 2,000 Kg/Cm^2 , 유지시간을 15~20 초로 하여 제품을 Fig. 1과 같이 외경 5 mm/내경 3 mm(좌), 외경 4 mm/내경 2 mm(우)의 2종류의 크기로 성형하였다.

다. 탈지 및 소성

사출성형 된 샘플은 열간 탈지로에서 각종 유기첨가물을 완전히 제거하였다. 탈지온도는 400 °C까지 11~12 시간 동안 승온 시킨 다음 1시간 동안 유지하였다.

성형된 모든 샘플들은 10 °C/min로 1650 °C에서 4시간 동안 유지시킨 다음 다시 -5 °C/min의 냉각속도로 50 °C간격으로 1250, 1300, 1350 및 1400 °C에서 12시간 동안 각각 에이징(aging)을 실시한 후 로냉 하였다.

2.3. 특성 분석

가. 물리적 특성

기초 물성조사를 위해 $7 \times 7 \times 33$ mm의 직육면체 형으로 시편을 제조하여 상기 각각의 온도에서 에이징된 시편에 대해 아르키메데스법에 의해 비중, 기공률 및 흡수율을 측정하였고 소성 후의 선수축률을 계산하였다. 항절강도(MOR)는 INSTRON(Model No.1127)을 이용하여 스펀길이 20 mm, 테스트 속도 1 mm/min의 조건으로 3-point bending에 의해 강도를 측정하였다. SEM(hitachi)을 이용하여 미세구조를 관찰하였다.

나. 입방정상 분율(Fraction of cubic phase: FCP)

X-선 회절분석에 의해 입방정상 분율을 구하였으며, 회절분석조건은 30kV-15mA의 가속전압과 CuK_α 의 타겟을 사용하였다.

다. 기전력(EMF) 측정

용강(molten steel)중 산소활량(a_o)에 의해 발생되는 기전력 측정을 위해 센서소자를 열전대, Mo 봉 및 센서소자가 같이 부착된 3P-connector형으로 조립하였으며 완성

품은 아래 Fig. 2와 같다. 고주파유도로(induction furnace)에서 측정 할 센싱소자 샘플들은 모두 표면코팅을 실시하지 않은 형태로 에이징 온도는 1250 °C, 1300 °C, 1350 °C 및 1400 °C 조건으로 실험하였다. 내열충격성은 기전력 파형을 측정 한 후 센서소자에 외관에 대한(Fig. 11) 육안 및 기전력파형 관찰로, 또 응답성 및 파형의 안정성, 재현성은 측정후 기록된 기전력 파형을 상호 비교하였다. 표준극으로는 $\text{Cr/Cr}_2\text{O}_3$ 를 사용하였으며 산소농도를 고농도와 저농도 2영역으로 구분하여 측정하였다. 아래 식 (1)은 본 연구에 사용된 갈바니 전지식이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 고체전해질 합성

배합된 원료를 이용하여 각 조성에 대한 최적의 소성조건을 규정짓기 위한 소성온도별 물성을 측정 한 결

Fig. 2. Proto-type of oxygen sensor for steel making.

과 Table 3과 같다. 실험온도 범위에서 이론밀도에 가까운 것을 기본조성으로 선택하고자 했던 것과 일치하는 결과를 Table 3에서 얻었다. 그리고 각 온도에서 4 시간 소성했을 때 MgO 의 함량이 증가할수록 밀도, 겉보기 및 흡수율은 감소하여 소결이 더욱 잘 진행 되었다. AMZ 조성에서 최대의 소결조건을 나타냈으며, 최적의 소성온도는 1650 °C인 것으로 생각 되는데 이는 Fig. 3의 항절강도(MOR)와 기공률 측정 결과와도 일치하는 것을 알 수 있다. 즉, 항절강도는 소성온도가 증가함에 따라 약 160 MPa에서 약 300 MPa로 증가하여 철강용 산소센서 소자로서의 강도를 만족 시킨다.

3.2. 소성후 특성

(1) 선수축률

각각의 온도에서 에이징된 시편에 대하여 소성 선수축률을 측정 한 결과, Fig. 4와 같다. 1250 °C에서 에이징 한 시편들은 소성 선수축률이 19%~19.5% 범위 이었으나 그 외의 모든 시편에 대한 수축률은 20~21% 정도로 비슷한 수축이 일어났다. 그 중 1400 °C에서 에이징 한 시편이 가장 높은 소성 선수축율을 보였다.

(2) 에이징 후 물성

1250 °C, 1300 °C, 1350 °C 및 1400 °C 각각의 온도에서 에이징 시킨 시편에 대해 겉보기 밀도, 기공률 및 흡수율을 측정 한 결과를 Table 4에 나타내었다. Aging 온도는 아래의 $\text{ZrO}_2\text{-MgO}$ 상태도(Fig. 5)를 참고하여

Table 3. Apparent density/Bulk density/Porosity/Water absorption data as a function of MgO content at various firing temperatures

		AMZ	BMZ	CMZ	DMZ
Apparent density (g/cm ³)	1500 °C	5.64	5.59	5.47	5.37
	1550 °C	5.63	5.50	5.45	5.38
	1600 °C	5.62	5.55	5.43	5.37
	1650 °C	5.60	5.50	5.42	5.34
Bulk density (g/cm ³)	1500 °C	5.51	5.46	5.44	5.34
	1550 °C	5.52	5.48	5.44	5.38
	1600 °C	5.58	5.54	5.42	5.35
	1650 °C	5.59	5.49	5.41	5.33
Porosity (%)	1500 °C	2.45	2.21	1.50	0.54
	1550 °C	1.96	0.30	0.17	0.15
	1600 °C	1.33	0.13	0.11	0.46
	1650 °C	0.14	0.12	0.11	0.09
Water absorption (%)	1500 °C	0.44	0.40	0.10	0.10
	1550 °C	0.35	0.05	0.03	0.03
	1600 °C	0.24	0.03	0.02	0.09
	1650 °C	0.03	0.02	0.02	0.02

Fig. 3. MOR and porosity of the sample fired at various temperatures with 4 hours soaking time.

정방정의 결정(T_{ss})들이 석출되도록 설계 하였다. 에이징 1250 °C 시편을 제외하고는 모든 시편에 대해 거의 비슷한 결과를 나타내어 준안정 정방정상이 석출된다면 강도 및 열충격저항성 증진에 유리한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

(3) 항절강도

Fig. 6에 보는 바와 같이 센서소자의 두께가 작은 (1 mm) 지르코니아 농담전지의 경우는 약 30~35 kg/cm²이었으며, 두께가 큰 경우는(1.5 mm) 약 35~45 kg/cm²사

Fig. 4. Linear firing shrinkage rate for the samples fired at various aging temperatures.

이로 강도 측면에서는 통상적인 요구 수준인 25 kg/cm²에 비해 우수한 값을 나타내었다. 그러나 에이징을 시킨 경우의 항절강도 값이 일본 A사의 제품에 비하여 (25 kg/cm²) 우수한 값을 나타냈지만 모든 시편이 일반적으로 적은 수치를 갖는 이유는 측정 시 적육면체의 bar 형태가 아닌 튜브 형태로 측정한데 원인이 있다.

Table 4. Apparent density/Porosity/Water absorption data as a function of aging temperature

	Apparent density(g/cm ³)	Porosity(%)	Water absorption(%)
1250 °C	5.39	1.49	0.28
	5.37	1.87	0.35
	5.36	1.97	0.37
	5.39	1.80	0.33
	5.39	1.49	0.28
1300 °C	5.45	0.19	0.08
	5.50	0.19	0.09
	5.49	0.15	0.06
	5.54	0.15	0.07
	5.55	0.13	0.05
1350 °C	5.47	0.13	0.08
	5.52	0.14	0.06
	5.58	0.14	0.08
	5.57	0.14	0.05
	5.58	0.19	0.09
1400 °C	5.43	0.24	0.09
	5.44	0.23	0.03
	5.48	0.16	0.03
	5.43	0.21	0.04
	5.51	0.27	0.05

Fig. 5. Phase diagram of ZrO_2 -MgO.

Fig. 6. Modulus of rupture for tube-type sample of sensing element fired at various aging temperatures.

3.3. 내열 충격성

(1) 입방정상 분율(Fraction of cubic phase : FCP)

순수한 지르코니아(ZrO_2)는 1000 °C 이상의 고온에서 상변태를 일으켜 단사정에서 정방정으로 전이 할 때 약 7 mol% 정도의 체적감소를 나타내므로 고온에서 사용할 때 열에 의한 팽창수축율이 크기 때문에 사용 상 제한되어 있다. 따라서 지르코니아를 그대로 내열재료로 사용하는 것은 불가하므로 소량의 저 원자의 산화물(Y_2O_3 , MgO, CaO 등)을 고용시키면 고온상의 형석형(fluorite) 입방정이 상당히 저온까지 안정된 상으로 존재하게 된다. 그러므로 본 연구에서도 MgO를 5-20 mol% 첨가한 후 각 에이징 온도 별로 결정상을 분석하여 저온까지 안정한 정방정이 일부 석출된 입방

정의 부분안정화 지르코니아를 얻는게 목적이다. 입방정상의 분율은 아래 식(2)에 의하여 산출하였다.

Fraction of cubic phase :

$$FCP = \frac{C_{(111)}}{M_{(111)} + C_{(111)}} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서 $C_{(111)}$ 는 XRD에서 최대 피크강도를 갖는 입방정 (111)면의 높이를 또 $M_{(111)}$ 은 역시 최대 피크강도를 갖는 단사정 ($11\bar{1}$)면의 높이를 나타낸다.

에이징 후의 각 제품에 대해 XRD회절 패턴을 관찰한 결과, Fig. 7과 같이 1250 °C에서도 관찰 될 수 있을 정도로 저온까지 안정한 입방정 상이 존재하는 것을 알 수 있다. Garvie 등에^[4-6] 의하면 전해질내 입방정상의 함유량이 38%였을 때 용장 중에 담귀도 균열이 일어나지 않았으나 65% 이상이였을 때 전해질 표면에 많은 균열이 관찰되었다. 이것은 낮은 입방정상 분율을 갖는 지르코니아가 그 열충격 저항이 큰데 그 이유는 단사정 상(monoclinic phase)의 열팽창계수와 비중이 입방정상에 비해 낮기 때문이다. 통상적으로 소결 시편 내 미세균열 현상은 단사정-입방정 전화(inversion)에 기인한다. 따라서 실제 사용에 적합한 센서를 제조기 위해서는 입방정상의 함유량이 적절한 수준을 유지하여야 한다. 그리고 Table 5에 의하면 에이징 온도가 증가함에 따라 단사정상의 감소에 따라 입방정상의 분율이 상대적으로 증가하였는데 1400 °C에서 에이징을 실시한 시편의 경우 65% 이상의 입방정상이 존재하는 것을 알 수 있다.

(2) 열충격 저항

주사전자현미경으로 에이징 처리된 지르코니아 산소

Fig. 7. X-ray diffraction patterns of the BMZ samples as a function of various aging temperature.

Table 5. Fraction of cubic phase in BMZ according to aging temperatures

Aging temperature (°C)	FCP (%)
1250	13.13
1300	18.06
1350	55.38
1400	79.54

센서 소자의 파단면에 대한 미세구조를 관찰결과, Fig. 8에서 보는바와 같이 입자(grain)와 입자 사이의 기공은 거의 찾아 볼 수 없을 정도로 치밀화가 이루어져 있으며, 입자 내 주름 또는 망사모양의 미세구조는 고온에서 냉각시 입방정 결정이 정방정결정+MgO 상태로 전이하면서 생성되는 구조로 여겨진다. 따라서 이와 같이 센서표면에 석출된 미세 정방정은 그 양이 적어 XRD 측정결과 검출되지는 않았지만 전체적인 입방정상의 함유율과 특히 열충격 저항성에 크게 영향을 주었다.

3.4. 기전력(EMF)

용강 중의 산소농도와 기전력과의 관계로부터 실측된 값을 평가하기 위해 용강 내의 산소농도를 고농도가 되게 미리 조정 한 것과(이는 양 부호의 기전력을 얻을 수 있고 14~15초 동안 측정 함) 또 저농도로 미리 조정

시킨(이는 음 부호의 기전력을 얻을 수 있고 약 20초 동안 측정 함) 측정 조건으로, 실제 고주파유도로에서 녹인 용강 중 산소활량에 의한 기전력을 측정 하였다. 그 결과 Fig. 9의 파형에서 보는바와 같이 1350 °C 에이징 샘플(a)에서는 고농도에서 열충격저항성 및 안정성은 우수하였으며 비교용 기준센서 샘플(맨 아래 곡선)과 유사한 파형을 보였으나, 1400 °C 에이징 샘플(b)에서는 맨 아래의 곡선이 불안정한 형태를 보여주고 있다. 또한 Fig. 10에서 측정된 것 같이 저농도에서의 측정치를 분석하면 비교용 기준센서 샘플(맨 아래 곡선) 비교하여 유사한 곡선 형태를 보이고 있으나 1400 °C 에이징 샘플(b)에서 역시 기준센서의 곡선과 약 40~60 mV차이를 보인다. 따라서 이는 응답성과 재현성에서 만족하지 못하는 결과이지만 향후 기준극의 충전량에 대한 연구가 추가로 이루어지면 이러한 문제는 쉽게 해결 될 수 있을 것으로 본다. 그러나 내열충격성 측면에서 볼 때 본 연구에서 소정의 재료조성 군과 이의 적절한 에이징 처리는 목적하는 내열충격성 향상에 크게 만족하였다(Fig. 11 좌측 참고).

응답성은 EMF 파형이 안정역에 달하는 시간이 짧을수록 좋은 것을 의미하는데, 곡선상에서 기전력 파형이 처음에 상승하다가 감소하고 있는 것은 전해질 프브(probe) 내에 남아 있는 공기 때문이며, 기전력이

Fig. 8. Scanning electron micrographs of the Mg-PSZ samples as a function of various aging temperature.

(a) 1350°C aging(1655°C 측정) (b) 1400°C aging(1670°C 측정)

Fig. 9. EMF curves measured from molten steel(at the range of >150 mV).

평형치에 도달하기 위한 시간은 전해질 프르브 내의 온도상승속도에 의존하며 보통 6초 정도이다. 응답성은 탄만형 프르브의 경우 외경이 감소할수록 빨라지는데 전해질의 치수나 기준극의 충전량이 응답성에 큰 영향을 미친다.

또 재현성은 산소센서 프르브의 크기나 두께가 다른 샘플로 산소함량(a_o)을 측정함으로써 알 수 있다. 측정된 모든 고체전해질 샘플에 대하여 비슷한 측정 파형이 얻어져야 하는데 본 실험에서는 어느 정도 파형의 일관성을 얻을 수 있었다.

안정성은 EMF 곡선의 안정영역이 명확한가를 의미하는 정도인데, a_o (oxygen activity)를 구하기 위해서는 30초 정도의 안정영역이 얻어져야 하며, 이 경우 전해질의 조성이나 치수 등의 영향은 별로 없는 것으로 알려졌다. 본 연구는 고농도 영역의 경우, 기전력 판독이 불가하거나 버블에 의한 파형 없이 모든 시편에서 비

(a) 1350°C aging(1675°C 측정) (b) 1400°C aging(1625°C 측정)

Fig. 10. EMF curves measured from molten steel(at the range of <=120 mV).

교적 안정된 파형을 얻었다. 그러나, Fig. 10 (b)에서 단락된 파형(위에서 두 번째 곡선)이 보여지고 있는데 이는 접촉이 절단된 프르브의 파형을 보이고 있어 이는 센서 조립시 발생한 에러로 보여 진다. 종합적으로 볼 때 본 연구에 의한 센서제작 조건이 내열충격저항이 우수한 금속공업용 산소센서로 사용 할 수 있음을 보여준다.

마그네시아로 안정화된 지르코니아 고체전해질에 첨가된 불순물의 영향으로 미량의 Al_2O_3 는 기전력에 별로 영향을 미치지 않으며 Fe_2O_3 와 TiO_2 는 약간 감소시키지만, SiO_2 는 기전력에 상당히 큰 영향을 미친다는 것을 보고하였는데 본 연구에서는 불순물의 개입을 봉쇄하였기 때문에 이에 대한 영향은 없을 것으로 생각한다^[9-12]. Fig. 11은 고주파유도로에서 실제 철강 중 산소함량을 측정한 후의 산소센서의 외관으로 좌측의 샘플들이 내열충격저항성을 만족시키는 결과를 나타내었다.

Fig. 11. Steelmaking oxygen sensors after EMF measurement in induction furnace.

4. 결 론

내열충격 저항성 향상에 의해 측정 시 균열이 없는 철강용 산소센서를 개발키 위해 우선 안정화지르코니아 고용체를 합성하고, 이를 사출성형(injection molding) 한뒤 소성된 센서소자용 시편을 1250~1400 °C 조건에서 에이징 처리한 시편들의 특성에 미치는 여러 영향을 연구 하였다.

(1) 순수 지르코니아 분말에 안정화제로서 마그네시아를 고용시키면 MgO의 함량증가에 따라 밀도와 기공률이 감소하며, 내열성과 부식저항성이 우수한 산소센서용 고체 전해질 재료로 합성 할 수 있다.

(2) ZrO₂-MgO계 분말을 1650 °C에서 1차 소결을 한 후 1250~1400 °C에서 2차 에이징 시킨 재료의 입방정상 분율은 약 13.13~79.54 % 범위에서 조절이 가능하며, 미세구조는 결정립자(grain)와 결정립자간 기공이 없이 매우 치밀하다.

(3) 1350 °C까지의 에이징 처리시 석출된 미세구조의 정방정 결정상들은 내열충격저항성을 크게 향상시키고 금속공업용 산소센서로서 재현성을 만족시킨다.

참고 문헌

- [1] D. L. Porter and A. H. Heuer, "Microstructural development in MgO-partially stabilized zirconia(Mg-PSZ)", *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 62, pp. 298-305, 1979.
- [2] R. C. Garvie and P. S. Nicholson, "Structure and thermodynamical properties of partially stabilized zirconia in the CaO-ZrO₂ syatem", *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 33, pp. 152-157, 1972.
- [3] R. H. J. Hannink, K. A. Johnston, R. T. Pascoe, and R.C. Garvie, "Microstructural changes during isothermal aging of a calcia partially stabilized zirconia alloy", *Advances in Ceramic, vol. 3, Science and Technology of Zirconia*, The American Ceramic Society, pp. 116-136, 1981.
- [4] M.V. Swain, R.C. Garvie, and R.H.J. Hannik, "Influence of thermal decomposition on the mechanical properties of magnesia-stabilized cubic zirconia", *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 66, pp. 358-62, 1983.
- [5] M. Iwase, M. Yamamoto, M. Tanida, and T. Mori, "Thermal-shock behavior of zirconia-based solid electrolyte for use in steelmaking processes", *Transaction ISIJ*, vol. 22, pp. 349-354, 1982.
- [6] Y. C. Yang and C. O. Park, "Oxygen sensor for the low temperature-measurement using yttria stabilized zirconia(YSZ) electrolyte and Ag electrode", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 15, no. 2, pp. 97-101, 2006.
- [7] J. Park, K. Park, and C.O. Park, "Potentiometric NOx sensors for automobile exhaust using YSZ(yttria stabilized zirconia)", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 16, no. 6, pp. 434-440, 2007.
- [8] J. Park, B. Y. Yoon, and C. O. Park, "The development of new oxide materials and modified mixed potential sensing method for high sensitive NOx sensor", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 17, no. 1, pp. 61-68, 2008.
- [9] Y. J. Oh and D. Y. Lee, "Fabrication and characterization of limit-current type oxygen sensor with monolith aperture structure", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 17, no. 4, pp. 273-280, 2008.
- [10] Y. J. Oh and C. H. Lee, "Limit-current type zirconia oxygen sensor with porous diffusion layer", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 17, no. 5, pp. 329-337, 2008.

오 영 제

- 1977년 연세대학교 세라믹공학과(공학사)
- 1987년 연세대학교 세라믹공학과(공학박사)
- 2007년 일본 동경공업대학(이학박사)
- 1988~89년 미국 일리노이즈 대학(Urbana-Champaign) 포스트닥
- 1982년~현재 KIST 재료연구본부책임연구원
- 2000년 KIST 신산업창업보육센터장
- 2000년 Academician, Russian Academy of Engineering
- 2002년 Full Member, International Academy of Engineering
- 2008년 한국세라믹학회 수석운영이사
- 2008년~현재 한국센서학회 감사
- 2008년~현재 과학기술연합대학교 겸임교수
- 2009년 한국화학관련학회연합회 총무이사
- 주관심분야: 화학센서, 기능성 나노재료