

고체산화물 연료전지용 기밀재

유준서, 이재춘
 명지대학교 신소재공학과
 {ngyjs, jcl}@mju.ac.kr

1. 서론

다양한 형태의 SOFC 중에서 평판형 SOFC (Planar Solid Oxide Fuel Cell)는 단위 체적당 전력밀도가 크기 때문에 SOFC 소형화에 기여한다. 특히 운송차량에 탑재되어 사용되는 SOFC로써 평판형 SOFC는 매우 중요하다. 평판형 SOFC는 Fig. 1에 나타난 대로 구조적으로 사각평면형태의 고체전해질 네 모서리를 따라 기밀(gas-tight sealing)이 이루어져야 한다.¹⁻³⁾ 즉 사각 평판형태의 고체전해질 상부표면이 연료가스와 접촉하게 되면, 구조적으로 고체전해질 하부 표면은 공기와 접촉하게끔 제작되어야 한다. 이 경우에 연료가스와 공기가스의 혼합을 방지하기 위해서, 두 가스를 격리시킬 수 있게끔 SOFC stack 구조내의 적절한 위치에 기밀재(seal)가 존재해야 한다. 만약, 고온에서 기밀재에 의해 두 가스의 격리가 이루어지지 않고, 서로 만나 두 가스의 혼합이 일어나는 경우에 다음 두 가지 운전사고를 예상할 수 있다.

첫째, 공기에 의한 연료가스의 산화반응에 의해 발열 또는 폭발에 따른 SOFC stack 구조 손상을 초래하여 stack 운전이 정지된다.

둘째, 두 가스의 혼합에 의해, 연료극과 공기극에서 각 가스 분압(partial pressure)이 낮아지면, Nernst-Einstein 식에 의거, 기전력이 감소하게 되므로 정상적인 전기 생산이 이루어지지 않는다.

현재까지 평판형 SOFC에서 요구되는 장기 기밀성능과 소재에 대한 신뢰성 모두를 만족할 수 있는 적합한 기밀방법과 기밀재에 대한 방안이 수립되어 있지 않다. 따라서 국외에서는 기밀재에 대해 많은 연구노력이 수행되고 있다. 기밀재 또는 기밀방법에 대한 개발이 지연되면 평판형 SOFC의 실용화 및 상용화에 많은 어려움

이 예상된다. 한편, 다음과 같은 SOFC 운전 조건을 고려하면 기밀재 개발의 어려움을 이해할 수 있다.

첫째, 기밀재 자체가 SOFC 운전 요소인 700~750°C 내외의 고온에서 6개월 이상의 수명을 가질 수 있도록, 기밀재 재료자체가 구조적으로 안정해야 한다.

둘째, 기밀재는 연결재 또는 접속자로 불리는 내열성 금속과 고체전해질인 지르코니아 세라믹과 700~750°C에서 장기간 접촉한다. 이때 서로 다른 물질간의 접촉에 따른 농도구배에 의한 물질 확산과 반응생성물에 의해 원재료의 고유 성능퇴화(degradation)가 발생되면 안 된다.

셋째, 기밀재는 SOFC stack 운전 중에 발생될 수 있는 급격한 열싸이클과 진동조건에서도 견딜 수 있어야

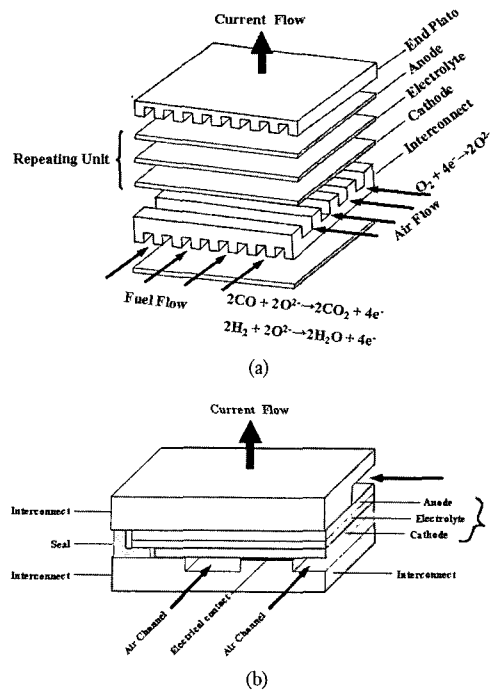


Fig. 1. Planar cross flow design of an SOFC: (a) a stack repeat unit; (b) the gas tight sealing portions of the interconnects.⁴⁾

한다. 열싸이클은 열팽창률이 서로 상이하면서, 기계적 결합이 이루어져 있는 두 재료의 파괴를 초래할 수 있는 열기계적 응력을 발생 시킨다. 따라서 열싸이클을 대처할 수 있는 기밀재와 기밀 방법에 대처 방안을 찾는 것은 현재 SOFC stack 제작에서 해결해야 할 가장 중요한 문제 중의 하나이다.

넷째, 기밀재 제작비용과 기밀 공정에 소요되는 비용이 SOFC 상용화를 위해서 저렴해야 한다.

지금까지 연구, 개발 중에 있는 기밀 재료로 유리 또는 결정화유리, 압축성 마이카(mica) 결정, 금속 재질의 박판등이 있다. SOFC 개발초기에 SOFC 기밀재로, 유리 또는 유리 일부분을 결정화 시킨 결정화 유리가 개발되어 SOFC stack 제조 및 기밀시험등에 사용되어 왔다. 유리에 기반을 둔 기밀재의 기밀 성능은 매우 우수하나, 소재 자체의 장기 고온 구조 안정성과 열충격저항에 취약한 점이 보완되어야 한다. 최근에 유리에 비해 열충격저항이 강하고 압축성을 갖는 금속재를 SOFC stack의 기밀재로 사용하려는 연구가 시도되고 있다. 본 고는 SOFC 기밀재와 관계된 누설률 측정기술과 최근에 발표, 제안된 최신 기밀재와 기밀방법 등에 관해 기술하였다.

2. 기체누설률

기체누설률(gas leak rate)은 누설과 관계된 응용분야에 따라 여러 단위표현을 갖는다. 예로 단위시간당 누설되는 기체의 무게 (mg/s)나 부피 (cm³/s) 또는 단위시간당 기체 누설에 의한 감소된 용기의 압력(Pa/s) 등이다. 누설률 단위의 국제적인 표준은 25°C에서 (압력 * 부피)/시간으로 정의되며 atm-cc/sec 단위로 표현된다. 즉 1초 동안에 부피를 cc 단위로 나타낸 용기의 부피 값에 누설에 의한 압력 감소를 대기압으로 나타낸 값을 곱한 것이다. 이러한 국제적 표준단위 이외에 널리 사용되는 누설률 단위로 표준상태의 기체누설률을 나타내는 sccm (standard cubic centimeters per minute), cm³/min 단위가 있다. 즉 0°C, 1기압하의 이상기체가 단위시간인 1분 동안 누설되는 기체부피를 cm³으로 표현한다. 참고로, SOFC의 누설률 관련 문헌에서는 주로 sccm 과 mbar L/s 단위가 사용되고 있다.

Fig. 2는 SOFC 기밀재의 고온 누설률 시험에 사용되는 장치의 개략도를 나타낸다. 누설시험 장치는 디스크 형태의 기밀재 시편과 내열성 금속 지지체와 튜브, 시편 가열로, 그리고 기체압 센서와 하중센서 등으로 이루어져 있다. 누설시험에 사용되는 가체를 이상기체로 가정하면, L로 표현된 누설률은 다음 이상기체 방정식을 이용하여 계산된다.

$$L = \frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{n_t - n_i}{t_t - t_i} = \frac{(p_t - p_i)V}{RT(t_t - t_i)} \quad (1)$$

여기서 n은 기체의 몰수, T는 기체의 절대온도, V는 용기 부피, R은 기체상수, t는 시간 그리고 P는 압력이다. 아래첨자 f 와 i는 각각 시험 최종과 초기 조건을 나타낸다. 시편이 측정온도에 도달된 후, 내열 금속 튜브내로 시험기체를 주입시켜 일정압력을 유지시킨 후 시간에 따른 압력변화를 기체압력센서로 감지한다. 이 측정결과를 식(1)에 대입하여 기체누설률을 계산한다. 이렇게 계산된 누설률은 누설길이와 초기 기체압을 고려하여 정규화된 누설률(normalized leak rate) 값으로 나타낸다. 한편,

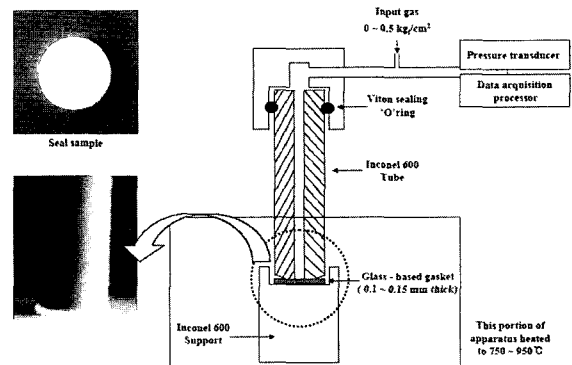


Fig. 2. Schematic drawing of seal test apparatus.

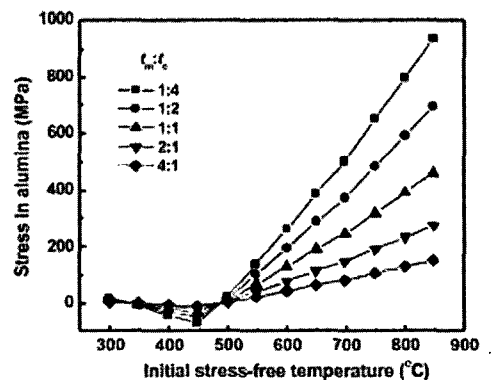


Fig. 3. Thermal stress estimation.¹²⁾

SOFC 운전에서 공기 또는 연료기체의 절대 기압은 0.105~0.12 MPa 범위를 유지하는 것으로 알려져 있다.

3. 기밀 소재 설계

3.1 유리 및 결정화 유리

SOFC 개발 초기인 1990년 부터 일반 창유리 재질로 잘 알려져 있는 soda-lime silicates, alkali silicates, alkaline-earth silicate, alkali borosilicates 유리등을 기밀접착재로 사용하였으며, 최근 까지도 결정화 유리를 이용한 기밀기술이 연구되었다. SrO-La₂O₃-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂ 계 유리,⁵⁾ BaO-Al₂O₃-SiO₂-B₂O₃ 계 유리,^{6,7)} MgO-Al₂O₃-P₂O₅ 계 유리^{3,8)} BaO-Al₂O₃-SiO₂-ZnO 계 유리⁹⁾ CaO-TiO₂-SiO₂계 유리¹⁰⁾ 등이 SOFC 기밀재로서 문헌에 정리되어 있다.¹¹⁾ 유리에 기반을 둔 기밀재의 누설률은 ~10⁻³ sccm/cm 이하로 우수하나 열충격에 취약한 문제점이 있다. 예로, 금속접속자와 기밀접합된 유리기밀재에서, 냉각시 유리기밀재에 생성되는 열응력은 다음 식으로 예측된다.

$$\sigma_c = \frac{\Delta\alpha\Delta TE_m E_c t_m}{(1-\nu)(t_m E_m + E_c t_c)}$$

여기서 σ_c 는 열응력이며 아래첨자 c와 m은 각각 기밀재와 금속접속자를 나타내고 $\Delta\alpha$ 와 ΔT 는 각각 열팽창계수 차이와 온도차, E는 탄성계수, t는 기밀재 또는 접속자의 두께 그리고 ν 는 Poisson의 값이다. 이 식을 이용하여 금속의 열팽창률이 500°C 이상에서 유리 기밀재에 비해 약 2배 큰 조건에서 유리기밀재에 생성되는 열응력의 크기에 대한 접합온도 및 접속자 두께와 기밀재 두께의 비율, t_c/t_m 영향을 분석한 계산결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 접합온도 또는 t_c/t_m 이 클 수록, 생성되는 열응력이 증가하며 이러한 응력은 유리의 파괴를 초래할 수 있기에 충분하다. 따라서 유리 또는 결정화유리 단독을 SOFC 기밀재로 활용하려는 연구에 관한 논문을 지금은 찾아보기가 어렵다.

3.2 마이카(Mica) 결정

두께가 약 0.5mm인 muscovite 종이와 두께가 약 0.1mm인 단결정 박판형태의 phlogopite 마이카 두 종류를 SOFC 기밀재로 사용하는 연구가 미국 PNNL(Pacific

Northwest National Laboratories) 연구팀에 의해 2000년 이후부터 최근까지 수행되었다.¹³⁻¹⁹⁾ muscovite는 potassium aluminum silicate hydroxide fluoride, KA₁₂(AlSi₃O₁₀)(F·OH)₂,이며 phlogopite는 potassium magnesium aluminum silicate hydroxide, KMg₃(AlSi₃O₁₀)(OH)₂로 명기된다. 마이카는 탄성체로 층상구조(layered structure)로 인해 박판으로 박리되기가 쉬우며 (Fig. 4) 이러한 박판을 여러 장 압축, 접합시킨 마이카 종이여러 산업 분야에서 사용되고 있다. 이러한 마이카 종이 또는 마이카 박판 단독을 기밀재로 사용하려는 연구가 수행되었다. 고온 누설률 측정 시험결과, 누설률을 7 sccm/cm에서 0.03 sccm/cm 으로 감소시키기 위해서 시편에 가해지는 압력이 7 기압에서 60 기압으로 크게 증가시켜야 한다. 이러한 누설률 값은 유리를 기밀재로 사용하며 얻은 ~10⁻³ sccm/cm에 비해 상대적으로 크다. 또한 고압을 mica 기밀재에 가하여 기밀을 유지해야 하는 문제점을 개선하기 위해 mica 기밀재 상, 하부 표면에 유리기밀재를 덧붙인, 소위 유리-마이카 hybrid 기밀 소재가 설계, 제작되었다(Fig. 5). 이러한 구조의 기밀재는 유리에 의한 기밀이 이루어지므로 누설률은 작고 시편에 가해지는 기계적 하중이 완화되는 장점이 있다. 그러나 앞에 언급한대로 유리와 금속 접속자간의 고온 반응, 접합으로 인해 발생하는 열기계적 응력에 의한 유리 기밀재의 취성파괴 문제점이 예상된다.

3.3 Ag-CuO 복합체 및 금속 박판

유리, 기밀재의 취성파괴, 마이카 기밀재의 높은 누설률등을 보완하기 위해 미국 PNNL 연구에서 개발중인 또 다른 기밀재로 Ag-CuO계 금속-세라믹 복합체가 있다.²⁰⁾ Ag-Cu 혼합 분말을 출발원료로 하여 약 1050°C에서 소성시켜 Cu는 CuO로 전환되고 Ag는 용융되어 복합체의 지지(matrix)를 형성한다. 4 mol% CuO를 갖는 조성이 적합한 이러한 금속산화물/귀금속 복합체는 세라믹-금속 브레이징(brazing)에 사용되고 있다. 이 기밀재의 특징은 SOFC 금속접속자와 기밀재 계면에서 얇은 산화물층 형성을 유도하는 것이다. 이 산화물 층의 기계적강도와 내구성이 입자가 분산된 금속기지 복합기밀재의 기밀 성능을 결정짓는다. 시험결과, 기밀재 접합조건이

최적화 되지 않은 경우, 기밀재/금속접속자 계면에서 비적심 현상에 의한 기공 발생과 기밀재/금속접속자간의 부착력 감소에 따른 누설률 증대가 예상된다.

가소변형이 가능하며 금속접속자와 단단이 결합된 기밀재로 Durafoil (22% Cr, 7% Al, 0.1% La+Ce, balance Fe)과 같은 alumina-forming ferrite steel을 알루미늄 포일(foil)과 같은 박판형태로 가공하여 가소변형이 가능한 기밀재로 사용하는 연구도 진행 중에 있다. 금속접속자와 금속 foil 사이에 앞에 언급한 Ag-4 mol% CuO brazing paste를 부착한 후, 1050°C 공기중에서 열처리하여 기밀이 유지되도록 설계하였다. 시험결과, braze 조성중의 CuO와 ferrite steel 성분 중의 Al이 반응하여 2CuOAl₂O₃ 결정이 생성되는 것이 확인 되었으며, 이에 대한 기계적 강도, 누설률에 대한 영향은 아직 알려져 있지 않다.

3.4 Sliding형 금속 박판

독일 Julich 연구소의 SOFC 연구팀은 SOFC 기밀재로 요철을 갖는 금속박판과 mica 종이 삽입된 금속박판 샌드위치를 각각 기밀재로 사용하는 연구를 수행하고 있다.²¹⁾ Fig. 6에 나타난 금속박판은 금속접합재와 화학적 또는 물리적 결합을 하지 않기 때문에 열사이클에

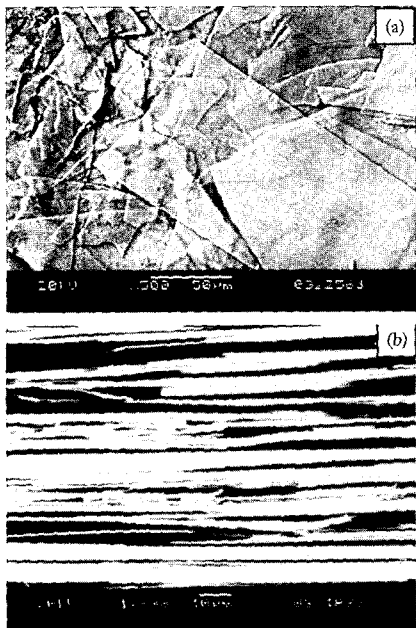


Fig. 4. Morphology and microstructure of the Phlogopite mica paper: (a) top surface and (b) cross-section.¹⁹⁾

의해 발생될 수 있는 열기계적 응력이 없다. 또한 금속박판은 세라믹에 비해 탄성 변형력과 가소성이 큰 장점이 있다. 시험결과, 접속자와의 접촉 면적이 상대적으로 작은 요철을 갖는 금속박판은 열사이클 시험에서 금속접속자와 금속 박판 기밀재와의 열팽창계수 차이에 기인한 전단응력에 의해 미끌어짐 현상과 금속 박판의 creep 현상은 누설률 증가의 원인으로 지적되었다. 한편, 상대적으로 금속접속자와 접촉되는 면적이 큰 금속박판 샌드위치의 경우, 누설률은 상대적으로 낮으나, 금속기밀재와 금속접속자간 short circuit를 형성하므로 전기적 절연이 유지될 수 있는 적절한 코팅기술이 요구된다.

3.5 반응결합 기밀재

탄화규소와 같은 비산화물을 접합시키기 위해 개발된 반응결합 기술을 SOFC 기밀접합에 이용하려는 연구가 진행되고 있다. 탄화규소는 강한 공유결합으로 인해 자체 강도가 매우 높다는 장점이 있다. 반응결합을 이용한 탄화규소를 합성, 기밀재로 이용하는 경우에 잔류기공, 반응결합 수축에 의한 균열 생성, 미 전환된 잔류 반응물,

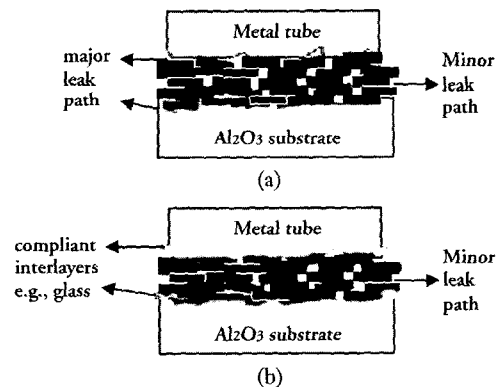


Fig. 5. Conventional (a) and hybrid (b) compressive mica seal.¹³⁾

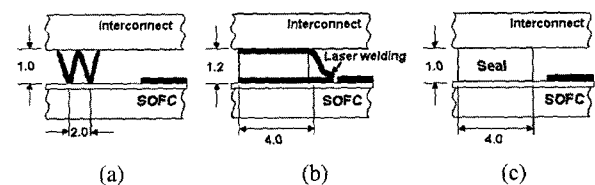


Fig. 6. Schematic drawings of different compressive sealing concepts: (a) corrugated metal sheet with filled with mica paste; (b) sandwich arrangement of mica paper and metal sheet; (c) plain mica paper.²¹⁾

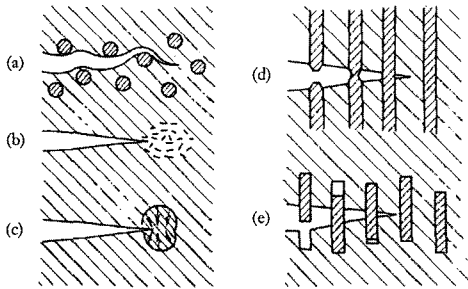


Fig. 7. Various mechanisms of toughening: (a) dispersing hard particles in the matrix; (b) generation of numerous microcracks, (c) utilizing phase transformation that generate compressive stress ahead of the crack tip; (d) toughening the matrix by ductile tough fibers; (e) toughening the matrix by high-strength fibers.²⁷⁾

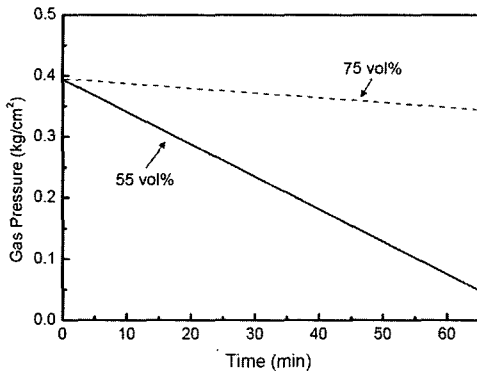


Fig. 8. Pressure decay curves as a function of elapsed time for the two composite seals containing different amount of glass.²⁸⁾

산화에 의한 실리카층 형성 방지 등이 해결해야 될 당면 문제로 지적되고 있다.²³⁾

3.6 세라믹 기지 복합체 (ceramic matrix composites)

세라믹의 취성파괴 현상을 완화하기 위해 입자, 섬유 등으로 유리 기지를 강화시킨 여러 형태의 세라믹 복합체가 널리 알려져 있다.²³⁻²⁶⁾ Fig. 7은 복합체에서 세라믹 기지의 인성을 증진 시킬 수 있는 여러 강화기구들을 나타낸다. 명지대학교와 KIST 연구팀은 이러한 강화구조에 바탕을 둔 복합체를 SOFC 기밀재로 설계, 제조하였으며²⁷⁾ 복합체의 고온 기밀성능을 측정하고 실제 SOFC stack 제작에 적용하였다. 복합체 조성에 따른 누설률을 Fig. 2에 나타난 측정장치를 이용하여 750°C에서 측정결과 예가 Fig. 8에 나타나 있다. 그림에서 두 기밀재는 각각 1×10^{-3} 과 7×10^{-3} sccm/min의 누설률을 나타내며

이 누설률은 SOFC 기밀재로의 성능을 만족한다. 이러한 복합기밀재는 단위전지를 10개 적층시킨 대면적 SOFC stack 제작에 적용되었고, 스택운전을 통해 새로운 SOFC 기밀재로써 사용 가능성을 확인하였다.

4. 결 론

에너지효율이 높은 고체 전해질 연료전지가 상용화되기 위해서는 고온에서 오랜 시간동안 안정적으로 기밀 접합이 유지되어야 한다. 이러한 목적을 달성할 수 있는 기밀접착제는 지금까지 주로 저온에서 사용할 목적으로 개발된 기밀소재에서는 볼 수 없었던 엄격한 물성을 요구한다. 아직까지 이런 목적을 달성할 수 있는 경계성 및 신뢰성을 구비한 소재가 국내외에서 개발되지 않고 있다. 이러한 상황은 소재를 연구, 개발하고, 상업화에 기여하는 소재 전공자들에게는 하나의 커다란 도전이며 기회이다. 유리, 세라믹, 금속 소재는 각각 기밀성, 내구성 및 내산화성, 탄성 및 인성 등에서 고유 특성을 갖고 있는바, 이러한 특성 조합을 통해 SOFC 기밀소재를 개발할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

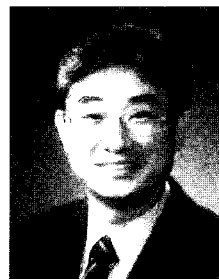
1. S.P.S. Badwal and K. Foger, "Solid Oxide Electrolyte Fuel Cell Review," *Ceram. Int.*, **22**, 257-65 (1996).
2. O. Yamamoto, "Solid Oxide Fuel Cells: Fundamental Aspects and Prospects," *Electrochimica Acta*, **45**, 2423-35 (2000).
3. P.H. Larsen, F.W. Poulsen and R.W. Berg, "The Influence of SiO₂ Addition to 2MgO-Al₂O₃-3.3P₂O₅," *J. Non-Cryst. Solids*, **244**, 16-24 (1999).
4. Z. Yang, K.S. Weil, D.M. Paxton and J.W. Stevenson, "Selection and Evaluation of Heat-Resistant Alloys for SOFC Interconnect Applications," *J. Electrochem. Soc.*, **150**(9) A1188-A1201 (2003).
5. K. L. Ley, M. Krumpelt, R. Kumar, J. H. "Meiser and I. Bloom, Glass-Ceramic Sealants for Solid Oxide Fuel Cells: Part I. Physical Properties," *J. Mater. Res.*, **11**(6), 1489-93 (1996).
6. C. Gunther, G. Hofer and W. Kleinlein, "The Stability of the Sealing Glass AF45 in H₂/H₂O and O₂, N₂ atmospheres," *Electrochemical Proc.*, 97-18, 746-56 (1997).
7. K. Eichler, G. Solow, P. Otschik, and W. Schaffrath, "BAS(BaO · Al₂O₃ · SiO₂)-Glasses for High Temperature

- Applications," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **19**, 1101-04 (1999).
8. P.H. Larsen and P.F. James, "Chemical Stability of MgO/CaO/Cr₂O₃-Al₂O₃-B₂O₃-Phosphate Glasses in Solid Oxide Fuel Cell Environment," *J. Mat. Sci.*, **33**, 2499-507 (1998).
 9. K. H. Lee, "A Study on Glasses and Glass-Ceramics as Sealing Materials for Flat-Plate Solid Oxide Fuel Cell Components," *Korean J. of Ceramics*, **35**(2), 151-62 (1998).
 10. J.S. Lee, M.J. Park, H.I. Shin, and J.C. Lee, "Properties of Glass-Ceramics in the System CaO-TiO₂-SiO₂ with the Additives of Al₂O₃, ZrO₂, and B₂O₃ for Use in the Solid Oxide Fuel Cells," *K. J. of Ceramics*, **5**(4), 336-40 (1999).
 11. 신현익, 송현중, 박민진, 이재춘, "SOFC용 유리 기밀 접착재", *세라미스트*, **3**(5), 91-6 (2000).
 12. G.J. Qiao*, C.G. Zhang, Z.H. Jin, "Thermal Cyclic Test of Alumina/Kovar Joint Brazed by Ni.Ti Active Filler," *Ceram. Int.*, **29**, 7-11 (2003).
 13. Y. S. Chou, J.W. Stevenson, L.A. Chick, "Ultra-Low Leak Rate of Hybrid Compressive Mica Seals for Solid Oxide Fuel Cells," *J. Power Sources*, **112**(1), 130-6 (2002).
 14. Y.S. Chou, J.W. Stevenson, L.A. Chick, "Novel Compressive Mica Seals with Metallic Interlayers for Solid Oxide Fuel Cell Applications," *J. Am. Ceram. Soc.*, **86**(6), 1003-7 (2003).
 15. S.P. Simner, J.W. Stevenson, "Compressive Mica Seals for SOFC Applications," *J. Power Sources*, **102**(2), 310-6 (2001).
 16. Y.S. Chou, J.W. Stevenson, "Mid-Term Stability of Novel Mica-Based Compressive Seals for Solid Oxide Fuel Cells," *J. Power Sources*, **115**(2), 274-8 (2003).
 17. Y.S. Chou, J.W. Stevenson, "Thermal Cycling and Degradation Mechanisms of Compressive Mica-Based Seals for Solid Oxide Fuel Cells," *J. Power Sources*, **112**(2), 376-83 (2002).
 18. Y.S. Chou, J.W. Stevenson, "Phlogopite Mica-Based Compressive Seals for Solid Oxide Fuel Cells: Effect of Mica Thickness," *J. Power Sources*, **124**(2), 473-8 (2002).
 19. Y.-S. Chou, J. W. Stevenson, "Novel Infiltrated Phlogopite Mica Compressive Seals for Solid Oxide Fuel Cells," *J. Power Sources*, **135**, 72-8 (2004).
 20. K.S. Weil, J.S. Hardy, J.Y. Kim, "Development of a Silver-Copper Oxide Braze for Joining Metallic and Ceramic Components in Electrochemical Devices," in Proceedings of the International Brazing and Soldering 2003 Conference, American Welding Society (2003).
 21. M. Bram., S. Reckers, P. Drinovac, J. M. Monch, R. W. Steinbrech, H. P. Buchkremer, D. Stover, "Deformation Behavior and Leakage Tests of Alternate Sealing Materials for SOFC Stacks," *J. Power Sources*, (in press) (2004).
 22. E. Pippel, J. Woltersdorf, P. Colombo and A. Donato, "Structure and Composition of Interlayers in Joints Between SiC Bodies," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **17**(10), 1259-65 (1997).
 23. A.G. Evans, "Perspective on the Development of High-Toughness Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**, 187 (1990).
 23. W.B. Hillig, "Strength and Toughness of Ceramic Matrix Composites," *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **17**, 341 (1987).
 25. D.B. Marshall, J.E. Ritter, "Reliability of Advanced Structural Ceramics and Ceramic Matrix Composites. A Review," *Ceram. Bull.* **66**, 309 (1987).
 26. H.G. Sowman, D.D. Johnson, in: K.S. Mazdiyani (Ed.), "Fibre Reinforced Ceramic Composites: Materials Processing and Technology," Noyes Publications, USA, 122-38 (1990).
 27. J. Mencik, "Strength and Fracture of Glass and Ceramics," Glass Science and Technology 12, Elsevier Science Publishing (1992).
 28. J.C. Lee, S. Park, J. S. Yu, J.H. Lee, J.S. Kim and H.W. Lee, "Sealing Behavior of Visco-elastic Composite Seals for SOFC Applications," Presented at The 3rd International Symposium on the Science of Engineering Ceramics, Osaka, Japan (2004).



유준서

- 2003년 명지대학교 세라믹공학과(학사)
- 2003년 명지대학교 무기재료공학과(석사)
- ~현재 과정



이재춘

- 1977년 서울대학교 재료공학과(학사)
- 1982년 미국 IOWA 주립대(석사)
- 1986년 미국 IOWA 주립대(박사)
- 1986년 한국원자력연구소 선임연구원
- 1990년
- 1990년 명지대학교 신소재공학과 교수
- ~현재