

고온상태 고체산화물연료전지의 전극 계면 균열 발생 평가 Evaluation of the Measurement of Crack Initiation in the Interface between SOFC Anode and Cathode at High Temperature

이준혁* · 전상구** · 권오현****

Jun-Hyuk Lee*, Sang-Ku Jeon** and Oh-Heon Kwon****

(Received 09 March 2023, Revised 12 April 2023, Accepted 13 April 2023)

초록 : 차세대 연료 중 SOFC는 800~1,000℃의 작동 범위에서 작동하기 때문에 부품 간 열팽창 계수가 달라 SOFC의 성능 저하 또는 계면 균열의 발생을 초래할 수 있다. 본 연구의 목적은 Ag paste를 집전체로 사용하여 고온 환경에서 전극 사이에 발생하는 미소 균열의 거동을 조사하는 것이다. SOFC 연료극 시편에 Ag 페이스트를 처리하여 20℃, 500, 700℃에서 4점 굽힘 시험을 수행하였고, DIC 및 ACDM을 이용하여 변위, 변형을 평가 및 균열 특성을 분석하였다. 고온에서 연료극과 Ag 페이스트의 계면 특성이 강화되고 강성이 증가하였다. 또한 변형률 값이 비연속적으로 크게 뛰는 지점에서 균열이 진행되었다.

키워드 : 균열 발생, 고체 산화물 연료전지, 고온, 이미지상관계분석, 측정

Abstract : Among the next-generation fuels, SOFC operates in the operating range from 800 to 1,000℃, so the coefficient of thermal expansion is different between components. This can cause degradation of SOFC performance or interface crack initiation. The purpose of this study is to investigate the behaviors of the micro cracks generated between electrodes at high-temperature environment using Ag paste as a current collector. A four-point loading test was performed at 20℃, 500℃ and 700℃ in the SOFC anode specimen treated by Ag paste, and displacement and strain variation were evaluated by the DIC and crack characteristics was analyzed by applying the ACDM. The interface properties between anode and Ag paste were strengthened at high temperatures and its stiffness was increased. Also, crack was advanced at the point that the strain value jumps greatly noncontinuously.

Key Words : Crack Initiation, SOFC, High Temperature, DIC, Measurement

1. 서 론

대형선박의 온실 가스 배출 규제가 강화되는

**** 권오현(<https://orcid.org/0000-0003-4026-293X>) : 교수, 부경대학교 안전공학과
E-mail : kwon@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6469
*이준혁(<https://orcid.org/0009-0000-5450-7817>) : 교수, 한국해양수산연수원 해양기술교육팀
**전상구(<https://orcid.org/0000-0002-3709-494X>) : 연구원, 한국표준과학연구원

**** Oh-Heon Kwon(<https://orcid.org/0000-0003-4026-293X>) : Professor, Department of Safety Engineering, Pukyong National University.
E-mail : kwon@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6469
*Jun-hyuk Lee(<https://orcid.org/0009-0000-5450-7817>) : Professor, Korea Institute of Marine Fisheries Training.
**Sang-Ku Jeon(<https://orcid.org/0000-0002-3709-494X>) : Researcher, Korea Research Institute of Standards and Science.

현 상황에서 차세대 사용 연료로 연료전지 적용에 대한 산업계의 연구가 활발히 진행되고 있다. 연료전지 중 하나인 고체 산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell; 이하 SOFC)는 연료극, 공기극, 전해질 등으로 구성되며, 모두 고체 형태로 고온 범위인 800~1,000°C에서 작동하여 고온 유지 시스템이 필요하다.

최근에는 온도가 600~800°C 범위에서 작동 가능한 연구가 진행되고 있다.¹⁾ SOFC는 일반적으로 출력을 얻기 위해 다중 셀로 적층된 구조를 가진다. 적층된 형태인 스택 구조는 효율성 향상을 위해서 셀과 셀 사이에 분리판인 집전체를 삽입하여 전력손실을 줄이고 전기가 전달되도록 한다. 이러한 구조는 단순 접촉 형태이기에 접촉 계면은 열화와 구조 불안전의 원인이 된다. 스택 전지는 작동 조건상 고온에서 작동하기에 각 구성요소들 간의 다른 열팽창 계수로 인하여 계면 마찰이 발생하고 마모와 균열 생성, 접촉 불량과 분극현상을 야기하며 전기화학적 반응과 확산, 그리고 부산물 생성으로 인한 성능 저하가 발생된다.²⁻⁵⁾ 전극 간 계면에 발생하는 균열에 의한 성능 열화로 구조적인 불안전성을 초래하기 때문에 성능 열화의 원인이 제거된 안전한 스택전지의 구조 형성을 위해서는 구성요소 간의 접착력이 필요하며, 이를 위한 분리판과 집전체 개발이 필요하다.⁶⁻⁸⁾ SOFC와 분리판을 연결해 주면서 접촉 저항 및 분극저항을 최소화하는 역할을 하는 집전체로는 페이스트 형태의 Pt가 우수한 성능을 나타낸다.⁹⁾

한편, Jeon 등¹⁰⁾은 스트레인 값을 이용하여 전도성 변화를 확인하기 위하여 광학 현미경으로 하중 증가에 따른 전극 패턴의 표면 형상을 관찰한 결과, Ag 페이스트를 도포한 시험재료를 연신시켰을 때 미세 균열이 발생함을 확인하였다.

현재, SOFC의 집전체 사이의 균열 진전 특성에 대한 연구는 매우 미비하며, 따라서 본 연구에서는 고온에서 사용 가능하며 전기전도성이 뛰어난 Ag 페이스트를 집전체로 이용할 경우, 고온 환경에서 전극들과 Ag 페이스트 사이에 생성되는 계면 균열의 특성을 평가하고 파단면에 대하여 분

석한다. 이러한 계면 균열의 특성을 파악하고 평가하기 위해서는 균열 발생을 측정하기 위한 변형률 측정이 반드시 필요하다.¹¹⁾ 특히 전지 계면에서 발생하는 균열은 균열 발생 초기에 매우 미소한 균열이 발생됨에 따라 균열성장의 특성을 평가하기가 용이하지 않다.¹²⁾ 적층된 재료에 균열이 발생되면 재료의 특성에 의해 파손에 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 미소 균열 발생의 측정은 구조물 안전성 평가에 중요한 수법으로 사용된다.

한편, 구조물에서 발생하는 변형율은 재료의 기계적 특성을 평가하는데 필수적으로 적용되어 왔으며, 스트레인 게이지를 이용한 다양한 변형률 측정법¹³⁾이 활용되고 있으나, 최근에는 변형이 일어나는 측정 대상의 표면을 연속적으로 촬영하여 얻어진 이미지 간의 상관관계를 적용한 효율적인 변형률 측정법으로 디지털 이미지 상관관계법(Digital Image Correlation; 이하 DIC)¹⁴⁾이 연구되고 있다. DIC는 비접촉 방식으로 구조물의 평가 영역에 대한 변형 및 동적 거동에 대한 이미지를 변형 전과 후로 비교하는 방식이다. 측정 목표물의 표면에서 변형이 된 부분에 대한 이미지를 회색조 밝기값(Gray intensity; 이하 GI)의 변화를 비교하여 평가하는 방법을 통해서 DIC 해석이 가능하다. 이를 위해 측정 목표물 표면에 인공적인 랜덤 패턴(Speckle pattern)을 형성하여야 알고리즘 적용이 가능하며, 해석 결과의 정확성을 올리기 위하여 스펙클 패턴 평가를 포함한 다양한 연구¹⁵⁾가 이루어지고 있다.

저자의 선행 연구¹⁶⁾에서는 미소균열 시험편 제작을 위하여 도료용액이 점착된 실리콘 재료의 압입에 의하여 랜덤 패턴을 시험편에 형성 후, 4점 굽힘실험을 수행하였고, DIC로 변형율을 평가한 후 시험편에서 발생하는 미소 균열을 측정하는 기법을 제시하였다.

본 연구에서는 기존 연구에서 제시한 기법을 이용하여 고온 상태에서 SOFC 전극간 계면 미소균열의 평가를 목적으로 노치균열 끝단에서 균열의 진전과 계면에서 발생하는 변형을 분석하였다.

2. 시험편 제작 및 실험방법

2.1 시험편 제작

SOFC의 전극과 Ag 페이스트와의 접착강도를 평가하기 위해 Fig. 1과 같이 시험편을 제작하였다. SOFC 단전지(100 mm × 100 mm)와 SiO₂ 웨이퍼를 각각 Wafer dicing saw를 이용하여 30 mm × 3 mm로 절단하였다. 절단된 SOFC의 연료극에 Au를 도포한 후 도포면 입자를 균일하게 하기 위하여 300°C, 1시간 동안 경화시켰다. 고온 경화 처리된 연료전지에 Ag 페이스트를 도포하고 절단된 SiO₂ 웨이퍼를 접착시켰으며 스크린 프린팅 기법을 이용하여 Ag 페이스트의 두께를 일정하게 하였다. 본 연구에 사용된 Ag 페이스트는 AREMO 사의 고온용 597-A이다. 높이 게이지(height gage)를 이용하여 일정하게 눌러주어 시험편의 두께가 1.4 mm로 최대한 일정하게 되도록 만들었다. 최종적으로 만들어진 시험편은 Ag 페이스트와 전극들 사이의 접착력을 향상시키기 위해 70°C, 2시간 동안 경화시켰다. 또한 시험편에 하중을 인가하였을 때 시험편의 중간 위치에서 균열이 진전될 수 있도록 SiO₂ 웨이퍼 중간에 Wafer dicing saw를 이용하여 깊이가 300 μm의 노치를 생성하였다.

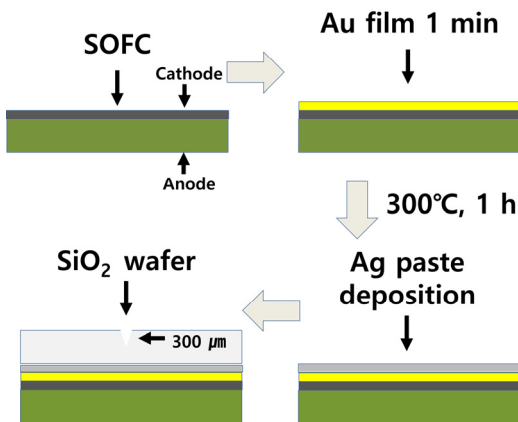


Fig. 1 Manufacturing process of the specimen

2.2 시험장치 및 실험 방법

4점 굽힘실험을 수행할 때 일반적인 밀폐 형태 고온로의 내부에서는 DIC 분석을 위한 이미지 촬

영이 어렵기 때문에 Fig. 2와 같이 이미지 촬영이 용이하고 인장 시험기에 설치 가능하도록 제작된 자체 고온로를 이용하였다. 직경 140 mm, 높이 22 mm 원통형 기둥 형태의 고온로이며, 수냉각형의 냉각방식을 채택하였다. 시험편을 측정 위치에 배치하고, 대량의 할로젠 램프 빛 에너지를 순간 방사하여 측정 위치의 온도를 올리는 시스템을 적용하였으며, 온도 조절 시스템은 UP35A 컨트롤러를 이용해서 온도를 제어하였다. 최대한 시험편에 가해지는 온도가 정확하게 발생오차를 줄일 수 있도록 열전대를 시험편 바로 아래에 위치시켰다.

굽힘시험은 Fig. 3과 같이 소형 인장시험기 (Tinius Olsen사, 5 kN)를 이용하였다. 4점 굽힘시험은 시험편의 위 아래 각각 두 포인트씩 총 4개의 핀이 시험편에 접촉된다. Fig. 3 part(A)에서 보여주는 것처럼 4개의 핀은 회전이 가능하도록 설치가 되었으며, 위쪽 핀을 끼워 넣을 수 있는 홈



Fig. 2 Halogen heat control system

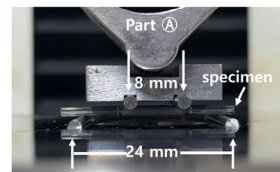
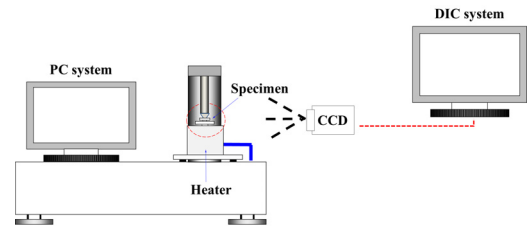


Fig. 3 Apparatus of 4 point-loading test with CCD camera and halogen heat system

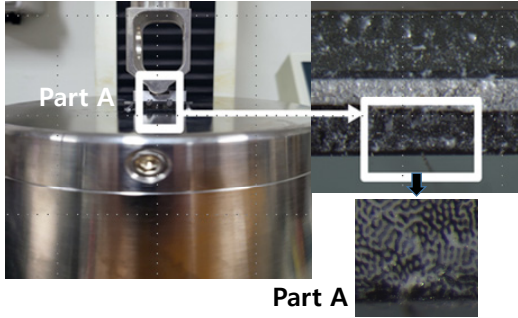


Fig. 4 DIC pattern around notch crack

과 로드셀로부터 시험편에 균등한 하중을 가할 수 있도록 설계된 알루미늄 블록을 사용하였다. 시험편은 균열 성장을 위한 SiO₂ 웨이퍼의 노치 부분이 아래에 위치하게 놓았다. 하부 핀 거리는 24 mm, 상부 핀 거리는 8 mm, 로드셀은 20 N을 사용하였으며, 60 μm/sec 속도의 변위제어로 실험을 진행하였다. Fig. 3은 고온로와 DIC용 CCD 카메라를 적용한 4점 굽힘시험의 전체 구성도를 나타낸다. 가열로는 온도를 20°C, 500°C 그리고 700°C로 설정하여 설치하였으며, 온도에 따른 변위변화 및 변형을 측정실험을 진행하였다.

시험편의 관심 영역(Rigion of interest; ROI)에서 발생하는 변위 및 변형율을 평가하기 위해서 대상물 표면의 변형 전·후의 이미지를 굽힘시험을 수행하는 시간 동안 일정 간격으로 획득하였다. 지적된 ROI에서 스펙클 패턴의 움직임을 기준으로 변위장을 ROI에 집중되도록 CCD 카메라(QImaging Ltd.)를 설치하였다.

Fig. 4와 같이 시험편 표면에 스펙클 패턴을 표시하기 위해 실리콘 스탬프 기법¹⁷⁾을 사용하였으며, 실험 평가영역의 ROI에 아세톤과 사포를 이용하여 표면 세척한 후, 스펙클 패턴이 각인된 실리콘 스탬프에 7:3의 비율로 혼합된 백색 페인트와 크실렌을 도포하여 시험편 표면에 스펙클 패턴을 형성하였다. 실험 중 이미지 촬영은 30초 간격으로 저장하였으며, 이를 통해 획득한 이미지는 Ncorr사의 DIC 분석 프로그램을 사용하였고, 이를 통해 변형 전과 후의 이미지 매칭에 대한 상관관계를 평가하였다.

2.3 균열 발생 평가

DIC는 서론에서 언급한 바와 같이 변위와 변형의 구배장을 얻기 위하여 디지털 이미지 프로세싱기법을 사용하는 것이다. 변형 전 기준인 RI(Reference image) 서브셋과 변형된 DI(Deformed image) 서브셋 사이에서 상관계수 분포식을 이용하여 동일지점을 추적하는 방식으로 RI 서브셋의 중심과 DI 서브셋 중심 사이에 주어지는 벡터로 ROI의 Point(x, y)가 가지는 변위 및 변형의 구배장 정보를 확인할 수 있다. DIC 분석에서 오류 발생 감소를 위해 무작위 패턴인 스펙클 패턴을 RI 서브셋 위치에 표시하여 DIC 분석을 가능하도록 하였다. 자세한 DIC 평가 방법에 관한 내용은 기존문헌¹⁸⁾을 참고하면 된다. 이러한 DIC 평가정보를 바탕으로 균열 발생 여부 및 균열의 길이 정보를 확인하기 위해서 ACDM(Automated Crack detection and measurement; 이하 ACDM) 균열 감지 분석 기법을 적용하였다.¹⁹⁾ ACDM은 DIC 주요 변형장을 기반으로 미세하고 안정적으로 균열 위치를 분석할 수 있는 방식이다. 시험편의 DIC 변형장에 대한 분석 데이터를 사용하여 데이터 평활화 과정을 거쳐 균열의 운동학적 측정평가와 시각화를 수행할 수 있다. 따라서 분석된 DIC 데이터를 사용하여 ACDM 처리를 분석하였을 경우 높은 정밀도로 균열 위치를 감지하고 복잡한 균열 패턴이 있는 대규모 실험에서도 균열 운동학적 변화를 정확하게 측정할 수 있다. Fig. 5는 이미지에서의 균열의 길이 정보를 확인하는 절차를 나타낸다. 균열

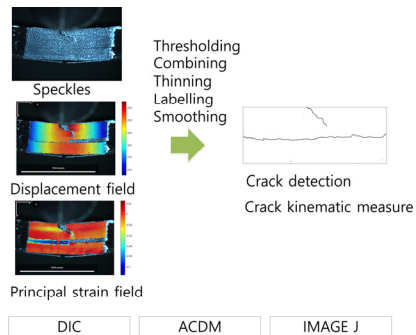


Fig. 5 Automated crack detection and measurement process

감지 및 균열 측정을 위한 ACDM의 운영 절차는 우선 시험편 표면의 전체 필드 변위를 추적하는 DIC를 평가하고 획득한 데이터를 균열 검출 알고리즘으로 평가하였다.

또한 ACDM 분석을 통해 시각화된 균열 정보에서 균열의 길이를 측정하기 위해 이미지 분석 프로그램인 Image J를 사용하였으며, 스켈레톤 함수²⁰⁾를 적용하여 스켈레톤화된 이미지를 추출하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실험온도에 따른 하중 및 균열 발생 평가

SOFC의 전극에 Ag 페이스트를 도포하고, 작동 온도(300°C)에서 1 h 동안 열처리한 후 Ag 페이스트의 특성을 파악하였다. Ag 페이스트 두께는 0.2 mm이다. SOFC 연료전지의 일반적인 작동온도가 700°C 이상이며, 타 연구²¹⁾에서 중 저온 범위인 600°C 이하로 낮추는 연구가 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 일반 상온인 20°C와 중 저온 범위인 500°C 및 고온의 700°C에서 4점 굽힘시험을 수행하였다.

Fig. 6은 실험온도에 따른 굽힘하중-변위 그래프의 변화를 나타낸다. 20°C에서는 하중-변위 그래프가 거의 선형적으로 증가하였고 변위 0.146 mm 및 하중 6.44 N에 도달 이후 하중이 급격한 감소를 보였다. 500°C에서는 변위 0.147 mm에서

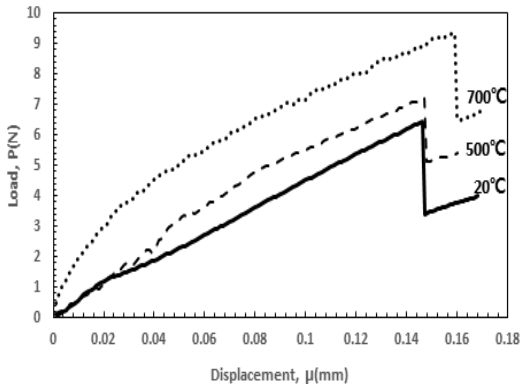
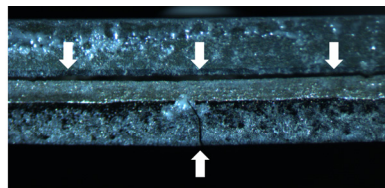


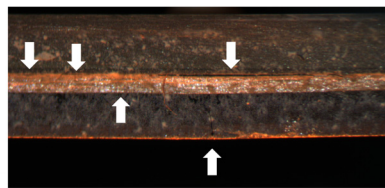
Fig. 6 Four point-bending load-displacement curves with initial notch (0.03 mm length) at 20°C, 500°C, 700°C

최대하중 7.24 N에 도달한 후 감소되었으나, 초기 하중 구간 이후에 기울기의 변화가 다소 증가되어 이후 선형 증가하였다. 보다 높은 고온인 700°C에서는 변위 0.159 mm 및 하중 9.36 N 도달 이후 하중이 급격히 감소하여 실험온도가 증가할수록 굽힘하중 최대값과 변위가 높게 나타났다. 또한 700°C 온도에서는 하중 변위 증가가 초기부터 비선형 형태의 기울기로 나타나, 전지 재료 내부에 소성변화가 발생되었음을 알 수 있다. Ag 페이스트의 재결정 온도는 400~600°C이며, 이에 따라 400~500°C 온도 범위까지는 상온의 성질을 나타내지만, 500°C 이상의 온도 영역에서는 재결정 온도 범위를 넘어가기 때문에 접착강도가 강해지는 영향이 있는 것으로 추측된다.

소성발생의 원인은 SOFC 전극재료보다 Ag 페이스트의 영향이 큰 것으로 간주된다. Ag 페이스트가 저온에서는 연성의 특성을 나타내어 변위의 길이가 증가하고 하중이 낮게 나타나지만, 온도가 증가할수록 Ag 페이스트의 경화현상으로 강성이 증가하는 것으로 여겨지며, 전체적인 시험편의 접착력에 영향을 주는 것으로 생각된다. 하지만 소성변화가 전극재료의 영향인지 Ag 페이스트의 영향인지에 대한 명확한 평가는 현재의 연구에서는 확인되지 않았으며, 차후의 연구에서 논의할 예정이다.



(a) 20°C specimen crack image



(b) 500°C specimen crack image

Fig. 7 Images of crack propagation from initial at notch crack

Fig. 7은 초기 노치균열 끝단에서 균열이 발생하여 Ag페이스트 적층을 따라 진전되어 횡방향으로 계면 분리현상이 진행됨을 보여 준다. Fig. 6의 하중이 급격하게 감소하는 지점에서 노치에서 균열이 발생하고 연료극과 Ag 페이스트가 박리되었다.

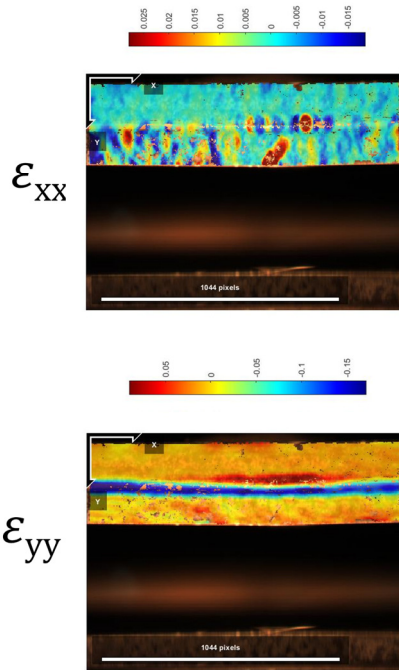
3.2 고온상태의 고체산화물 연료전지 전극층 계면에서의 DIC 평가

제작된 SOFC 시험편을 이용하여 20°C, 500°C 및 700°C에서 4점 굽힘시험을 수행하고, 얻어진 이미지를 이용하여 DIC해석을 수행한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a), (b), (c)는 연료극(anode)에 Au 도포 및 고온처리 후 Ag 페이스트를 도포하고, SiO₂ 웨이퍼를 접착시켜, 20°C, 500°C 및 700°C의 온도에서 수행된 4점 굽힘시험 결과에서 DIC 분석하여 얻어진 변형율(ϵ_{xx} , ϵ_{yy}) 등고선과 초기균열 진전 이미지를 나타낸다. 균열발생 형태는 온도조건과 관계없이 SiO₂ 웨이퍼의 노치에서 균열이 발생하여 SiO₂ 웨이퍼와 Ag 페이스트의 계면으로 균열이 진전되고 계면분리가 발생됨을 알 수 있다. 공기극과 연료극에서는 균열 및 계면 박리가 다른 진행방향으로 동시에 발생하였다.

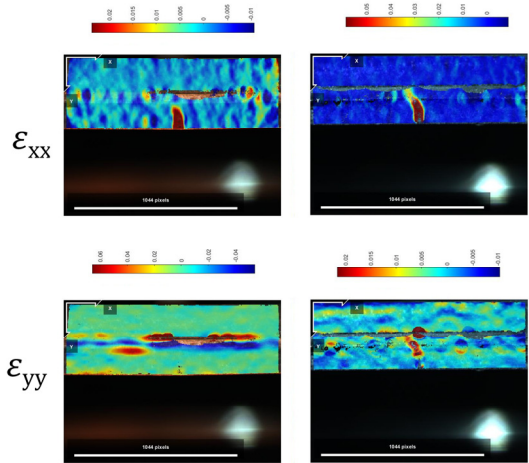
Fig. 9에서는 (a) 20°C, (b) 500v 및 (c) 700°C 실험온도에서 Ag 페이스트의 변화 정도를 확인하기 위해 노치 상방의 Ag 페이스트의 두께 방향으로 변위 및 변형율을 측정한 결과이다. 하중이 인가된 이후에서 균열이 발생하는 시기까지 변위 및 변형율이 일정하게 나타나다가 파단 시 크게 변화하였다. Ag 페이스트가 온도 증가에 따라 이 부위가 길이가 증가하며 소성형태로 성질을 나타냄을 확인할 수 있었다.

Fig. 9(a) 20°C 실험에서는 파단 직전까지 y축 방향 변위 변화 기울기가 0.905값으로 일정한 수평형태이고, Fig. 9(b) 500°C는 기울기가 8.892, Fig. 9(c) 700°C 실험은 기울기가 18.63값을 나타내어 온도에 따른 기울기의 차이가 발생함을 확인할 수 있었다.

또한 20°C, 500°C 및 700°C 세 온도에서 균열의 성장하는 시작점은 변형율이 급등하여 증가율이 달라지는 불연속 점프가 일어나는 위치에서 발생되는 것을 알 수 있다.



(a) 700°C, u=0.162 mm



(b) 500°C, u=0.149 mm © 20°C, u=0.150 mm

Fig. 8 Strain accompanying crack propagation at (a) 700°C, (b) 500°C and © 20°C

3.3 Ag 페이스트 부분 SEM 분석결과

Fig. 10(a)에서는 앞서 실험한 시험편에서 웨이퍼가 분리된 부분을 SEM으로 촬영한 것을 나타

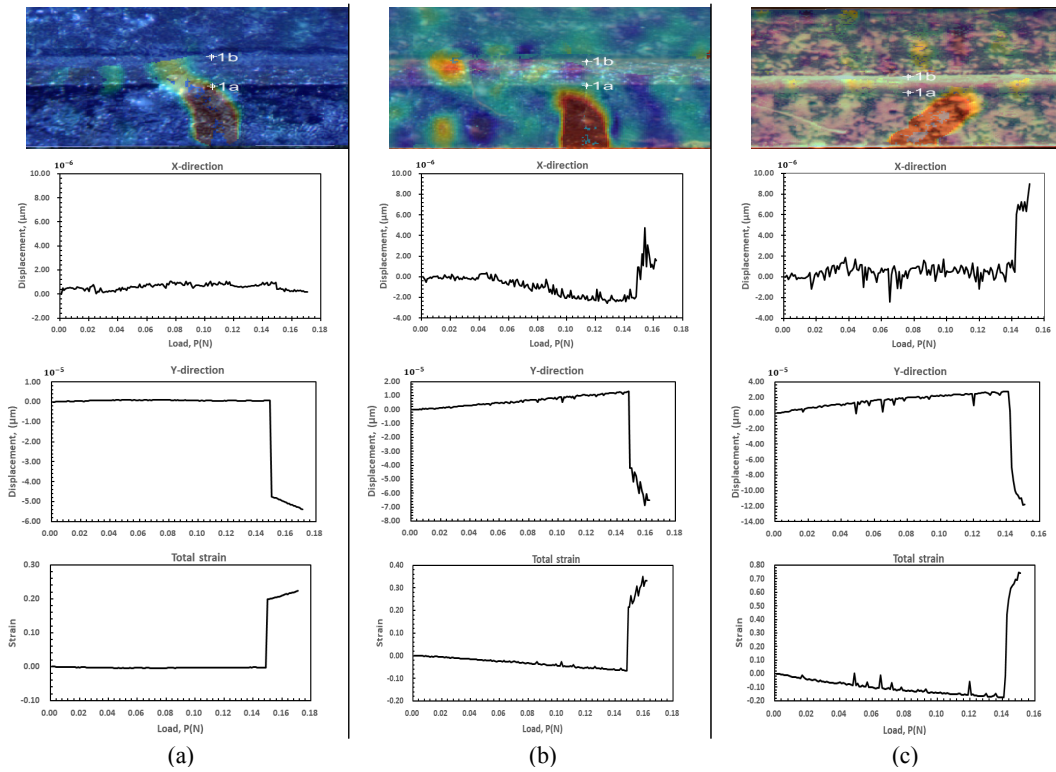


Fig. 9 Variation of displacement and strain in Ag paste layer (0.03 mm thickness) along 1a to 1b direction, (a) 20°C (b) 500°C (c) 700°C

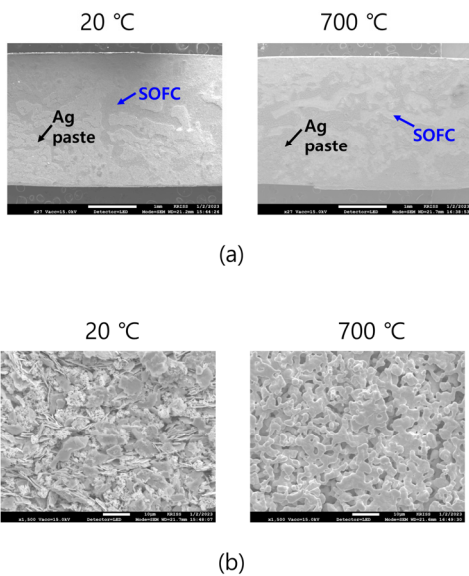


Fig. 10 Ag paste SEM images

낸다. 20°C 및 700°C에서 큰 차이를 나타내지 않았으며, 균열이 발생된 흔적이 없다. 따라서 균열은 주로 SOFC와 Ag 페이스트 계면에서 전과된 것으로 확인된다.

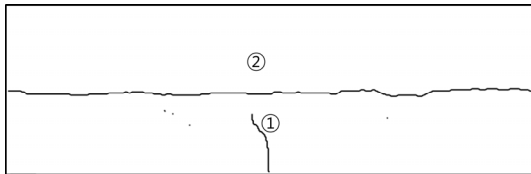
Fig. 10(b)는 Ag 페이스트 부위를 나타낸다. 20°C에서는 flake와 입자 상들이 혼재한 형태로 나타났으며, 700°C에서는 Ag 페이스트가 고온에 반응하여 다공성 형태로 나타났다. 이와 같이 저온에서 고온으로 실험온도가 상승하면 Ag 페이스트의 상변화가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 고온의 환경에서 Ag 페이스트가 상변화가 일어남에 따라, 전체적인 접착력과 강성이 달라지는 것을 앞의 그래프를 통해 확인할 수 있었다.

3.4 ACDM 균열진전평가

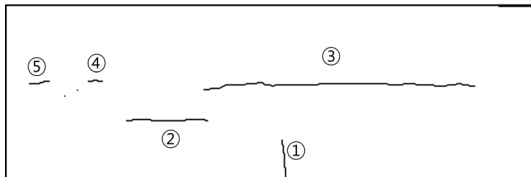
Fig. 11은 Ncorr에서 분석한 DIC 데이터를

ACDM에 적용하여 균열 이미지를 분석하는 것을 나타내며, 이를 픽셀당 계산하여 전체적인 균열의 진전 길이를 평가하였다. 육안으로 불명확한 균열의 경우에도 ACDM 평가를 적용하면 균열 발생을 확인할 수 있었으며, 균열진전 길이 및 위치 정보를 확인할 수 있다.

Table 1은 ACDM 평가를 통해 얻어진 데이터를 Image J를 이용하여 균열 길이를 평가한 것을 보여 준다. ACDM에서 분석된 데이터를 확인한 결과, 20°C 500°C 및 700°C 에서 동일하게 SiO₂ 웨이퍼 노치에서 발생한 균열은 Ag 페이스트까지 진전되지 않고 웨이퍼 내로 진전되었으나 동시에 Ag 페이스트 적층면을 따라 계면분리가 발생하였으며, 웨이퍼와 Ag 페이스트에 발생한 균열은 연결되지 않았다. ACDM에서는 픽셀값으로 균열 길이를 도출되었으며, Image J로 실제 시험편 길이를 적용하여 정확한 균열 길이값을 분석하였다.



(a) 20°C specimen crack image



(b) 500°C specimen crack image(T2)



(c) 700°C specimen crack image

Fig. 11 Crack behavior evaluation by ACDM method

Table 1 Crack length measurement from ACDM and image J

Temperature (°C)	Crack point	Pixel	Crack Length (μm)
20	1	99.113	521.647
	2	865.279	4554.1
500	1	59.071	305.164
	2	131.314	678.375
	3	443.326	2290.245
	4	22.828	117.931
	5	33.657	173.874
700	1	58.497	373.953
	2	409.267	2613.19

4. 결 론

본 연구는 DIC해석을 이용한 미소균열을 측정하는 평가수법을 제시하였으며, 고체산화물연료전지에 4점 굽힘실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험의 온도가 증가할수록 균열 발생 하중의 값과 변위값이 증가함을 확인하였으며, 노치에서의 균열발생과 Ag 페이스트와 SiO₂ 웨이퍼 사이의 계면 박리가 발생함을 확인하였다.
- 2) Ag 페이스트는 저온에서는 연성의 특징을 나타내며, 온도가 상승할 경우 경화되어 강성이 증가됨을 확인할 수 있었다.
- 3) 균열의 성장은 변형율이 급등하여 증가율이 달라지는 불연속 점프가 일어나는 위치에서 발생되는 것을 알 수 있다.
- 4) 초기 노치균열 끝단에서 Ag 페이스트쪽으로 균열 발생이 시작되고, Ag 페이스트에서 적층면을 따라 횡방향으로 계면분리현상이 진행되었다.
- 5) 미소균열 발생을 DIC해석을 통해 확인되었으며, ACDM 및 Image J 프로그램을 적용하여 균열 길이 측정이 가능하였다.

Author contributions

O. H. Kwon; Project administration, supervision

and conceptualization, W. R. Park; Writing-review & editing J. H. Lee; Investigation, editing writing-original draft, data curation and visualization.

References

1. J. S. Lim, J.H. Choi and O. J. Kwon, 2006, "Effect of Oxidation of Ni on the Microstructure of Ni/YSZ Anode and Crack Formation in YSZ Electrolyte Layer for SOFC", *Journal of the Korean Ceramic Society*, 43(12), 805-811.
(<https://doi.org/10.4191/KCERS.2006.43.12.805>)
2. J. H. Jun, Y. M. Park, S. C. Hwang, Y. W. Kim, D. H. Kim and J. H. Jun, 2010, "Review of Performance Degradation in Planar SOFCs", *RIST Research Paper*, 24(2), 91-97.
3. K. J. Park, S. O. Yu, J. M. Bae, H. S. Kim and Y. K. Ko, 2010, "Fast Performance Degradation of SOFC Caused by Cathode Delamination in Long-term Testing", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 8670-8677.
(DOI:10.1016/j.ijhydene.2010.05.005)
4. Y. C. H and J. R. Selman, 1997, "The Degradation of SOFC Electrodes", *Solid State Ionics*, 98, 33-38.
([https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(97\)00106-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(97)00106-9))
5. J. Malzbender, P. Batfalsky, R. Vaben, V. Shemet and F. Tietz, 2012, "Component Interactions after Long-term Operation of an SOFC Stack with LSM Cathode", *Journal of Power Source*, 201, 196-203.
(<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.117>)
6. M. Mori, N. M. Sammes, E. Suda and Y. Takeda, 2003, "Application of $\text{La}_{0.6}\text{AE}_{0.4}\text{MnO}_3$ (AE=Ca and Sr) to Electric Current Collectors in High-temperature Solid Oxide Fuel Cells", *Solid State Ionics*, 164, 1-15.
([https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(03\)00303-5](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(03)00303-5))
7. M. Han, S. Peng, Z. Wang, Z. Yang and X. Chen, 2007, "Properties of Fe-Cr based Alloys as Interconnects in a Solid Oxide Fuel Cell", *Journal of Power Source*, 164, 278-283.
(<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.039>)
8. Y. Guo, Y. Liu, R. Cai, D. Chen, R. Ran and Z. Shao, 2012, "Electrochemical Contribution of Silver Current Collector to Oxygen Reduction Reaction Over $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ Electrode on Oxygen-ionic Conducting Electrolyte", *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 14492-14500.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.031>)
9. N. W. Cho, S. C. Hwang, S. M. Han, E. S. Park, S. I. Chai, Y. W. Kim, J. H. Jun, S. G. Kim, S. T. Kuk, Y. J. Choi, D. H. Kim, J. H. Jun and B. H. Park, 2006, "Current Collecting Technology in Stacking the unit Cells of Planar Solide Oxide Fuel Cell", *RIST Research Paper*, 20(2), 181-186.
10. S. K. Jeon, S. H. Nahm and O. H. Kwon, 2015, "Evaluation of the Effect of High Temperature on the Interface Characteristics between Solid Oxide Fuel Cell and Ag Paste", *Journal of the Korean Society of Safety*, 30(1), 21-27.
(<https://dx.doi.org/10.14346/JKOSOS.2015.30.1.021>)
11. J. Qiu, Y. Li, F. Xu, X. Hu and Y. Xiao, 2022, "Strain Induced Crack Initiation and the Subsequent Crack Propagation of Fiber-Reinforced Resin Composites", *Composites Part A*, 155, Article 106836.
(<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.106836>)
12. L. F. Varandas, A. Arteiro, G. Catalanotti and B. G. Falzon, 2019, "Micromechanical Analysis of Interlaminar Crack Propagation between Angled Plies in Mode I Tests", *Composites Structures*, 220, 827-841.
(<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.050>)
13. A. S. Khan and X. Wang, 2001, "Strain Measurements and Stress Analysis", 30-87,

Prentice Hall, NJ.

14. B. Pan, K. Qian, H. Xie and A. Asundi, 2009, “Two Dimensional Digital Image Correlation for in-Plane Displacement and Strain Measurements: a review”, *Measurement Science and Technology*, 20(6), 1-17, Article 062001.
(DOI:10.1088/0957-0233/20/6/062001)
15. S. Yaofeng and J. Pang, 2007, “Study of Optimal Subset Size in Digital Image Correlation of Speckle Pattern Images”, *Optics and Lasers in Engineering*, 45, 967-974.
(<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.01.012>)
16. J. H. Lee and O. H. Kwon, 2022, “The Investigation for Detection of Crack Initiation in the CFRP Laminates under Flexural Loading Test”, *Journal of the Korea Society of Safety*, 73(5), 7-13.
(<https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2022.37.5.7>)
17. S. Bossuyt, 2013, “Optimized Patterns for Digital Image Correlation, Imaging Methods for Novel Materials and Challenging Applications”, *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 3, 239-248, Springer, NY.
(DOI:10.1007/978-1-4614-4235-6_34)
18. B. Pan, W. Dafang and X. Yong, 2012, “Incremental calculation for large deformation measurement using reliability-guided digital image correlation”, *Optics and Lasers in Engineering*, 50(4), 586-592.
19. N. Gehri, J. Mata-Falcón and W. Kaufmann, 2020, “Automated crack detection and measurement based on digital image correlation”, *Construction and Building Materials*, 256, 1-14.
(<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119383>)
20. S. S. Abeysinghe, M. Baker; W. Chiu and T. Ju, 2008, “Segmentation-free skeletonization of grayscale volumes for shape understanding”, 2008 IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications, 63-71.
(DOI:10.1109/SMI.2008.4547951)
21. J. H. An, H. J. Kim, J. G. Yu, S. K. Oh and G. T. Lee, 2016, “Performance Enhancement of SOFC by ALD YSZ Thin Film Anode Interlayer”, *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 23(3), 31-35.
(<https://doi.org/10.6117/kmepps.2016.23.3.031>)