

# 제조 및 작동온도에서 평판형 고체연료전지에 발생한 균열 거동

박철준 · 권오현\* · 강지웅\*\*

부경대학교 대학원 안전공학과 · \*부경대학교 안전공학과 · \*\*대구한의대학교 보건학부  
(2014. 6. 25. 접수 / 2014. 8. 18. 채택)

## The Crack Behavior in the Planar Solid Oxide Fuel Cell under the Fabricating and Operating Temperature

Cheol Jun Park · Oh Heon Kwon\* · Ji Woong Kang\*\*

Graduate School of Department of Safety Engineering, Pukyong National University

\*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

\*\*Faculty of Health Science, Daegu Haany University

(Received June 25, 2014 / Accepted August 18, 2014)

**Abstract :** The goal of this study is to investigate some crack behaviors which affect the crack propagation angle at the planar solid oxide fuel cell with cracks under the fabricating and operating temperature and analyze the stresses by 3 steps processing on the solid oxide fuel cell. Currently, there are lots of researches of the performance improvement for fuel cells, and also for the more powerful efficiency. However, the planar solid oxide fuel cell has demerits which the electrode materials have much brittle properties and the thermal condition during the operating process. It brings some problems which have lower reliability owing to the deformation and cracks from the thermal expansion differences between the electrolyte, cathode and anode electrodes. Especially the crack in the corner of the electrodes gives rise to the fracture and deterioration of the fuel cells. Thus it is important to evaluate the behavior of the cracks in the solid oxide fuel cell for the performance and safety operation. From the results, we showed the stress distributions from the cathode to the anode and the effects of the edge crack in the electrolyte and the slant crack in the anode. Furthermore the crack propagation angle was expected according to the crack length and slant angle and the variation of the stress intensity factors for the each fracture mode was shown.

**Key Words :** planar solid oxide fuel cell, crack behavior, operating temperature, electrolyte, stress distribution, stress intensity factor

### 1. 서론

연료전지는 연료가 되는 일부 화학 물질이 갖는 화학 에너지를 직접 변환시키는 장치로서 연료극(anode), 전해질(electrolyte) 및 공기극(cathode) 전극으로 구성되며 이온 전달 매개체인 전해질의 종류에 따라 분류된 고분자 전해질 연료전지, 용융탄산염 연료전지 및 고체 산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, 이하 SOFC라 한다)가 가장 활발히 연구되어지고 있다<sup>1)</sup>. 고분자 전해질 연료전지는 낮은 작동 온도와 비교적 높은 발전효율을 가지고 있어 연료전지 자동차 등에 많이 사용되고 있으며 용융탄산염 연료전지는 높은 작동 온도와 발전효율로 대용량 발전소 등에 사용되고 있다. 하지만 고분자

전해질형의 값비싼 백금 촉매사용과 용융탄산염형의 취급이 어려운 액체형 전해질 사용이라는 단점을 가지고 있는 반면에 SOFC는 약 60%에 이르는 전기변환 효율을 가질 뿐만 아니라 고체 전해질로 구성되어 취급하기가 용이하다<sup>2)</sup>. 또한 복잡한 외부 연료 개질이 필요가 없는 친환경적인 특성을 가질 뿐만 아니라 고가의 백금 전극 촉매를 사용하지 않고도 고온에서 작동 가능하므로 약 90%에 이르는 높은 열 병합 효율을 가지고 있다. 하지만 전해질 물질인 이트리아 안정화 지르코니아(Yttria Stabilized Zirconia; YSZ)의 산소이온 전도가 고온에서 요구되어짐에 따라 전지의 작동과정 열 사이클에 따라 전극 재료간의 열팽창계수 차이에서 오는 변형 문제로 신뢰성이 낮아지고 구성요소가 세라믹 재질로

\* Corresponding Author : Oh Heon Kwon, Tel : +82-51-629-6469, E-mail : kwon@pknu.ac.kr  
Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

되어있어 취성이 강해 강도 측면에서의 문제 등 열적·기계적으로 단점을 가지고 있다<sup>3,4</sup>. Joulae 등<sup>5</sup>은 전형적인 PEN 형 고체연료전지모델에서 발생하는 균열의 전파경로를 예측하는 연구를 하였다. 여기에서 Joulae는 SOFC의 기계적 전기적 성능을 저하시키는 원인으로 전해질 층과 공기극 모두의 파괴에 의한 것으로 평가하였으나 단전지만을 고려하였다. Nguyen 등<sup>6</sup>은 SOFC에 사용된 재료인 유리와 세라믹재료에 대한 파괴손상에 대하여 연구하였다. 경계층 모델링기법에 의하여 내부 균열과 계면균열의 거동을 파악하였으며 연속체 손상 역학모델과 비교하였다. 또한 Zhang 등<sup>7</sup>은 단전지 SOFC에서 발생하는 잔류 열응력을 해석적으로 수행하였다. 그들은 연료극이 인장 열응력이 가장 높기 때문에 파괴강도에 도달되기 쉬워 압축응력상태의 전해질 층과 공기극보다 파괴가 발생하기 쉽다고 평가하였고 연료극 두께가 두꺼워질수록 안전하다고 확률론적 수법으로 예측하였다. 그러나 전해질 층의 두께가 매우 작기 때문에 이러한 평가결과는 더 명확한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 평판형 SOFC 단전지가 고온에서 재료의 소결을 거쳐서 제조된 후 전지 휴먼 상태인 상온으로 냉각될 때 전극간의 열팽창계수 차이에 의해 물리적인 변형이 발생되고, 이때 전극에 생성된 미세 균열이 전지 작동 중에 전지의 효율을 저하시키고 결국 전체 시스템에 안전상의 문제를 일으킬 수 있는 경우를 상정하였다. 따라서 전해질 층과 연료극에서 발생한 미세 균열이 제조과정 및 스택과 작동 환경에서 전지 강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 균열단 주위의 응력장 변화와 균열거동을 평가하였다. 얻어진 결과는 SOFC 전지의 강도적 성능향상을 높이기 위한 기초 자료로 유용히 사용될 것으로 여겨진다.

## 2. 수치해석 모델

### 2.1 재료특성 및 해석 모델

해석대상은 상용화된 평판형 연료극지지 SOFC 단전지(K. co.; cell size:100 cm<sup>2</sup>, active area:81 cm<sup>2</sup>)를 선정하였고 해석에 사용된 전극별 재질은 연료극 Ni-YSZ인 다공질 서멧(cermet, 내열성합금), 공기극은 LSM-YSZ 세라믹 혼합전도체 그리고 전해질은 이온전도도가 높고 전자 전도도가 낮은 특성을 가진 YSZ를 사용하며 도전율이 극대화되는 8mol%를 상정하였다. Table 1은 SOFC 재료의 물성치를 나타낸다. SOFC의 각 전극은 등방성 균질재이며 선형 탄성거동을 하는 것으로 간주하였고 해석모델은 전지 대칭을 고려하여

Table 1. Properties of the SOFC electrode materials<sup>8-10</sup>

	Anode (NiO-YSZ)	Electrolyte (8mol%YSZ)	Cathode (LSM-YSZ)
Modulus of elasticity (GPa)	112.3	215	35
Poisson' ratio	0.284	0.32	0.25
Density (g/cm <sup>3</sup> )	6.87	5.90	6.57
T.E.C (1/K)×10 <sup>-6</sup>	12.5	10.8	11.2

Table 2. Analysis model size of SOFC

	Anode	Electrolyte	Cathode
Width (mm)	50	45	45
Thickness (mm)	0.86	0.015	0.05

Table 3. Naming of the model for a crack type and length

Crack type	Crack length, a (mm)		
	0.1	0.3	0.5
Edge crack	EC1	EC3	EC5

Table 4. Naming of the model for a crack slant angle

Crack type	Crack slant angle, α (degree)				
	15	30	45	60	75
Slant crack	SC15	SC30	SC45	SC60	SC75

1/2 단면을 해석대상으로 하였다. Table 2는 해석에 사용된 모델 크기를 나타내고 있다. Table 3과 4에는 해석에 사용된 모델의 균열형태와 길이에 대한 조건을 나타낸다.

Fig. 1은 해석에 사용된 모델 및 유한요소와 균열의 형태에 대한 예를 나타내고 있다. 해석은 상용 유한요소프로그램인 ANSYS R9을 사용하였다. 요소는 Quadratic 6 node를 사용하며 요소 수는 각각 78000개 전후로 2D 평면 변형률 상태에서 해석을 수행하였다. 균열발생은 기 연구결과<sup>11</sup>

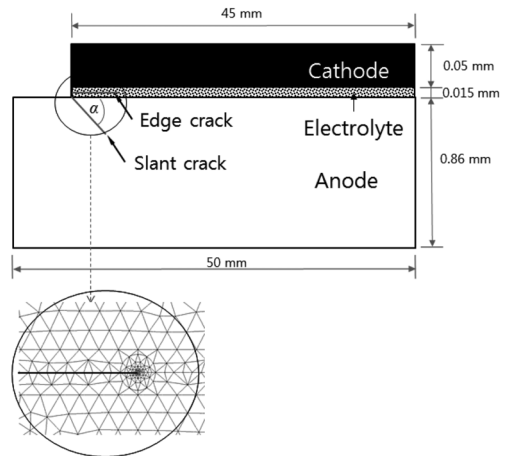


Fig. 1. An example of finite element mesh and crack types.

를 바탕으로 전해질과 연료극에서 발생하는 것으로 간주하였고 전해질 가장자리에서 발생하는 에지 균열과 연료극 모서리 내부에 존재하는 경사 균열로 나누어 계산하였다. 또한 균열 면은 두 요소간의 접촉조건을 부여하기 위하여 타겟 요소 target169와 접촉요소 conta171를 사용하였다. 구속조건은 제조단계에서는 자유 상태이며 다중 스택 상태에서는 전지와 연결재(interconnect plates)가 부가되어 공기극 상면을 고정 상태로 상정하였고 작동상태에서는 연료극 부위만 고정하였다.

## 2.2. 해석순서 및 방법

해석은 전해질 내부의 에지 균열과 연료극 내부의 경사 균열을 가진 각각의 모델이 제조 및 스택된 후 작동상태의 환경에서 단계별로 수행되었다. 세라믹 재료인 단전지 SOFC는 1300°C의 고온에서 소결되어 제조된 후 전지 휴면 상태인 25°C의 상온으로 냉각된다. 전지의 응력상태는 자유상태이고 얻어진 응력은 냉각 과정동안에 재료의 열팽창률 차이에서 오는 잔류응력을 나타내게 된다. 이 과정에서 전지에 균열이 생성될 수 있다. 제조과정은 대기 중에서 이루어지므로 결국 산화과정을 거치게 되고 계산은 NiO-YSZ의 화학적 상태를 고려한다. 이후 단전지는 원하는 전류 밀도를 얻기 위하여 다수 전지와 연결재로 스택되어 지는데 이 상태는 제조 시에 발생하는 열 변형률에 의한 전극 변위를 0로 전환시켜 고려하였다. 변위를 0으로 변환하기 위하여 각 절점에서의 절점하중 결과치를 재 부하시킴으로써 구현하였다. 이 상태에서 전지를 상온에서 작동상태의 온도인 750°C로 재 상승시켜 해석을 수행하였다. 이것은 연료극이 산화 대기 중에서 이루어지므로 NiO-YSZ 상태조건을 적용하였다. 이후 연료(수소)가 주입되면 NiO-YSZ는 Ni-YSZ로 환원되게 되고 비로소 SOFC는 외부 회로와 연결되어 전류가 생성되게 된다.

## 2.3. 균열 거동 평가법

SOFC 재료는 세라믹 종류이기 때문에 균열의 거동 평가는 선형 탄성 파괴를 고려하여 파괴 평가 파라미터인 응력확대계수(stress intensity factors), K 또는 에너지 해방률(energy release rate), G를 균열 근방의 응력 및 변위를 통하여 사용할 수 있다. 균열 근방의 변위 u, v는 다음 식 (1)로 주어진다<sup>12)</sup>.

$$u = \frac{K_I}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} [(2\kappa - 1)\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{3\theta}{2}] - \frac{K_{II}}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} [(2\kappa + 3)\sin\frac{\theta}{2} + \sin\frac{3\theta}{2}]$$

$$v = \frac{K_I}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} [(2\kappa - 1)\sin\frac{\theta}{2} - \sin\frac{3\theta}{2}] - \frac{K_{II}}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} [(2\kappa + 3)\cos\frac{\theta}{2} + \cos\frac{3\theta}{2}] \quad (1)$$

여기서  $\kappa$ 는 평면 변형률에서  $\kappa = 3 - 4\nu$ 이다.

$\mu$ 는 전단탄성계수,  $\nu$ 는 포와송비,  $r, \theta$ 는 원통좌표계에서 균열단에서의 위치를 나타낸다. 이때 응력확대계수 K는 식 (2), (3)으로 얻어지며  $\Delta u$ 와  $\Delta v$ 는 각각 x, y 방향의 균열선단변위를 나타낸다.

$$K_I = \sqrt{2\pi} \frac{\mu}{1+k} \frac{|\Delta v|}{\sqrt{r}} \quad (2)$$

$$K_{II} = \sqrt{2\pi} \frac{\mu}{1+k} \frac{|\Delta u|}{\sqrt{r}} \quad (3)$$

SOFC는 본질적으로 3종류의 재료인 적층 구조로 형성되어 있고, 전해질 층이 연료극과 공기극에 비교하여 매우 얇기 때문에 재료 특성 불일치에 의한 열 변형으로 인하여, 균열이 성장을 개시할 때 어느 방향으로 진전할 것인가는 균열의 혼합모드 파괴양식을 따르게 된다. 이때 균열이 진전하는 방향에서의 등가모드 응력확대계수는 다음 식(4)와 같이 주어진다.

$$K_{Ieq} = K_I \cos^3\left(\frac{\theta_p}{2}\right) - 3K_{II} \cos\left(\frac{\theta_p}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_p}{2}\right) \quad (4)$$

여기서  $\theta_p$ 는 균열진전 방향을 의미하며, 식(5)로 주어지는 최대 주응력 파괴기준<sup>13)</sup>을 이용하여 최대 주응력에 수직인 방향인 식(6)에 의하여 구할 수 있다.

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2} \left( \frac{1}{2} K_I \sin\theta + \frac{1}{2} K_{II} (3\cos\theta - 1) \right) \quad (5)$$

$$\theta_p = 2\arctan\left(\frac{K_I - \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{4K_{II}}\right) \quad (6)$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 전해질 에지 균열재의 상온에서의 제조 잔류응력

해석 대상은 연료극 지지 형태이기 때문에 연료극의 두께는 상대적으로 매우 두껍다. 따라서 연료극의 수축은 전해질층과 공기극에 압축응력을 유발한다. 이 결과는 Fig. 2에 나타낸다.

y 방향 수직변형은 제조 후 상온에서 연료극과 공기극의 재료 열팽창률의 차이에 의하여 연료극 방향으로 전지의 가장자리에서 최대 휨 0.397 mm을 발생하고 있음을 나타낸다. 또한 응력등고선은 에지 균열의 주변에서의 x방향응력을 나타내고 있으며 연료극에 가까운 전해질 층에서 인장응력이 나타나고 공기극에 가까운 전해질 층에서는 압축응력이 보다 우세함을 나타낸다.

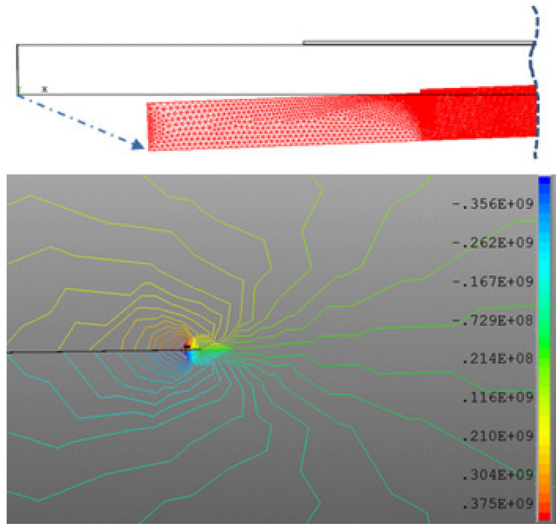


Fig. 2. A displacement and stress xx contour around a crack tip in case of the edge crack length 0.1mm.

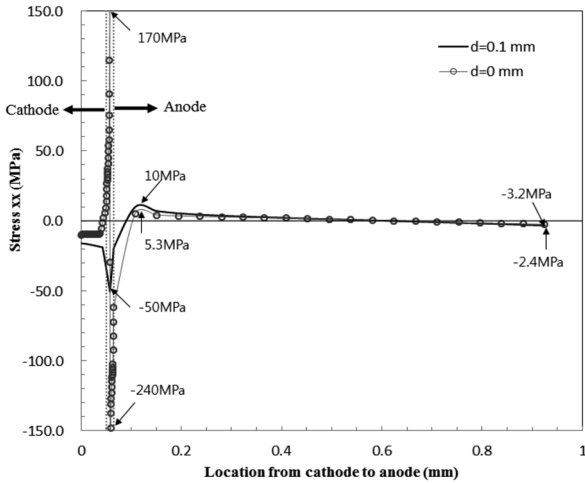


Fig. 3. The residual stress xx profiles at room temperature across the cell from a cathode top to an anode bottom after fabricating process(in case of the edge crack length 0.1 mm).

Fig. 3에서는 균열단에서 균열면 방향으로 일정 d거리 (d=0, 0.1 mm)에 위치하는 전극의 두께 방향 위치변화에 의한 축 방향에 따른 x 방향 응력의 변화를 나타내었다.

균열단이 존재하는 위치에서 x방향 잔류응력은 압축 응력이 존재하는 공기극에서 전해질층으로 갈수록 서서히 인장력이 증가하여 균열단 바로 직전에서 최대인장응력 170 MPa를 나타낸 직후 압축응력으로 전환되고 최대압축응력 240 MPa까지 상승되었다. 이후 다시 연료극에서 압축응력이 서서히 감소하여 최대 5.3 MPa까지 증가한 후 연료극 반대편까지 완만히 감소하여 최종 압축응력 2.4 MPa로 발생되었다. 균열단에서 0.1 mm 떨어진 위치에서의 응력의 변화는 공기극에서 압축응력

이 서서히 증가하다가 전해질 층 계면에서 급격히 압축 응력이 증가한 후 균열단 위치를 지나면서 다시 압축 응력이 감소하여 연료극에서 최대인장응력 10 MPa를 나타내고 이후 완만히 감소하여 최종 -3.2 MPa로 나타났다. 이 결과는 균열이 존재하지 않는 경우에 해석한 기 연구 결과들<sup>14-15)</sup>과도 일치한다. 그러나 균열이 존재하는 경우에 균열단이 존재하는 y위치(공기극에서 연료극으로의 방향)에서의 결과는 최대인장 및 압축응력이 교대하는 형태로 나타나 계면에서의 재료불일치에 의한 영향보다 균열존재에 의한 영향이 더 크게 좌우됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 초기 에지 균열길이가 0.3, 0.5 mm인 경우에도 유사한 경향으로 나타났다.

### 3.2. 전해질 에지 균열재의 작동상태에서의 응력변화

Fig. 4는 작동온도 상태에서 전해질의 에지 균열단에서 발생하는 전단응력에 대한 등고선을 나타내고 있다.

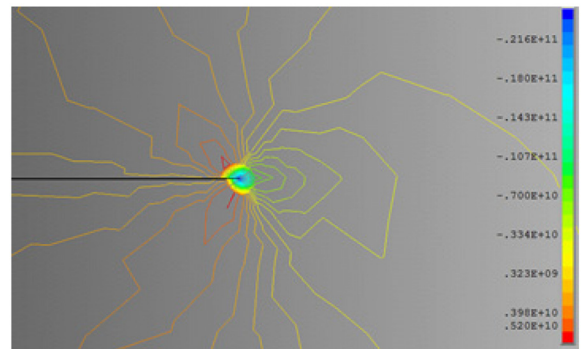


Fig. 4. Example of the shear stress contour around a crack tip under the operating temperature(in case of the edge crack length 0.1 mm).

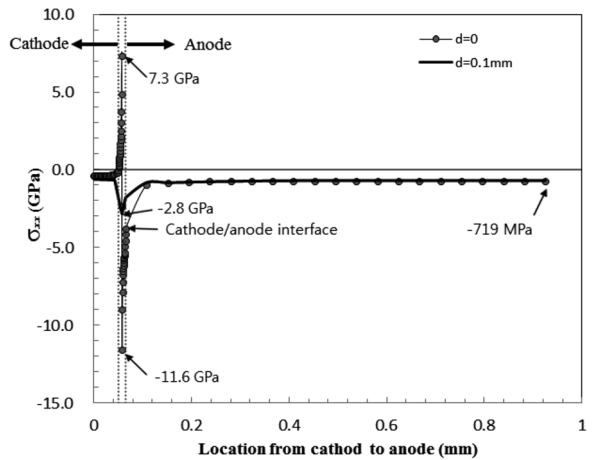


Fig. 5. The stress xx profiles at the operating temperature (T=750°C) across the cell from a cathode top to an anode bottom (case of the edge crack length 0.1 mm).

균열단 직전에서는 압축전단이 발달되고 있으나 조금 떨어진 위치에서는 균열면 방향에서 멀어질수록 인장이 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 작동온도 ( $T=750^{\circ}\text{C}$ )에서 균열생성에 의한 x방향의 응력 변화를 나타내고 있다. 이 온도는 대기상태에서 수행되는 경우로 NiO-YSZ 연료극 상태를 나타내며 수소연료가 도입되어 환원되는 Ni-YSZ 상태를 의미하는 아니다.

전해질 층 내에 존재하는 균열단의 영향 때문에 균열단에 바로 접하고 있는 위치( $d=0$ ; 특이성 점)에서의 응력상태는 공기극과 연료극으로 최대인장, 압축으로 급격히 변화하여 7.3, -11.6 GPa를 나타내었다. 이러한 응력상태는 대단히 크지만 균열의 끝단을 이상상태로 간주한 결과이며 실제로는 보다 낮은 값을 가지게 된다. 실제 균열단에서 0.1 mm만큼 떨어진 위치( $d=0.1\text{ mm}$ )에서의 응력값은 -2.8 GPa로 특이성이 감소되고 최종 -719 MPa를 유지하는 것을 볼 수 있다. Fig.6은 에지 균열길이  $a=0.1\text{ mm}$ 에 대하여 균열단으로부터  $d/a=1/100$ ,  $1/50$  및  $3/50$ 의 위치에서 균열단 주위  $180^{\circ}$  영역에서의 응력변화를 나타낸다.  $d/a$ 는 균열길이에 대한 거리의 비를 나타내며 균열단에서 매우 가까운 위치에 있음을 의미한다. 따라서 균열단의 특이성이 잘 나타나 -8 GPa에서 4GPa 까지 응력이 변화하였다. 또한 균열단에서 멀어짐에 따라  $-20.86^{\circ}$ ,  $-28.86^{\circ}$  및  $-47.24^{\circ}$  근처에서 인장응력에서 압축응력으로 변화하였다.

Fig. 7은 균열길이 0.1 mm에 대하여 제조, 스택 및 작동시 에지 균열단 주위의 전단응력 분포와 균열길이 0.3 및 0.5 mm의 작동시 전단응력변화를 나타낸다. 작동시 절대 최대값은  $-30^{\circ}$ 근방에서 -2.8~-3.0GPa의 값

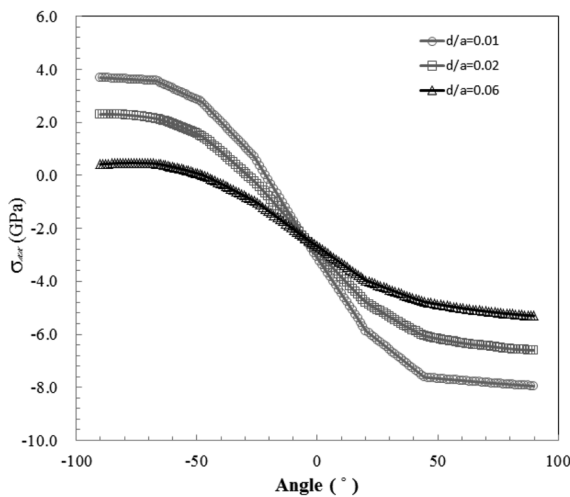


Fig. 6. The variation of stress  $\sigma_{xx}$  at the around of the crack tip with the different distance from the crack tip under the operating temperature (case of the edge crack length 0.1 mm).

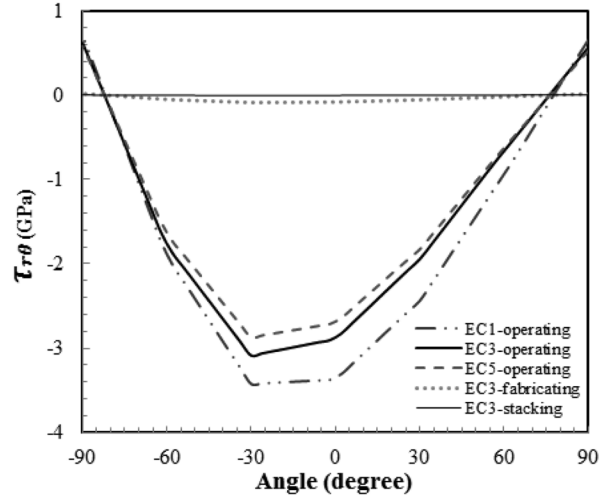


Fig. 7. The variation of shear stresses at the around of the crack tip (the edge crack length 0.1, 0.3 and 0.5mm).

으로 나타났고,  $-75^{\circ}$ 근방에서 0으로 나타났다. 따라서 균열의 진전은 파괴기준에 따라 균열면에 대하여 공기극 방향인  $75^{\circ}$ 방향으로 생성되는 것을 예측할 수 있다. 에지 균열길이가 0.3 mm, 0.5 mm인 경우에도 유사하게 나타났다.

### 3.3. 연료극 경사 균열재의 작동상태에서의 응력변화

Fig. 8은 연료극과 전해질경계의 코너에서 발생한 미소균열이 연료극 방향으로 경사하여 존재하는 경우에 대하여 얻어진 전단응력의 등고선을 나타낸다. 균열길이는 0.1 mm로 한정하였으며 경사각은  $15^{\circ}$ 를 상정한 결과이다.

전단응력은 경사 균열면 방향으로 절대 최대전단응력 값을 나타내며 좌우방향으로 갈수록 감소하고 있음

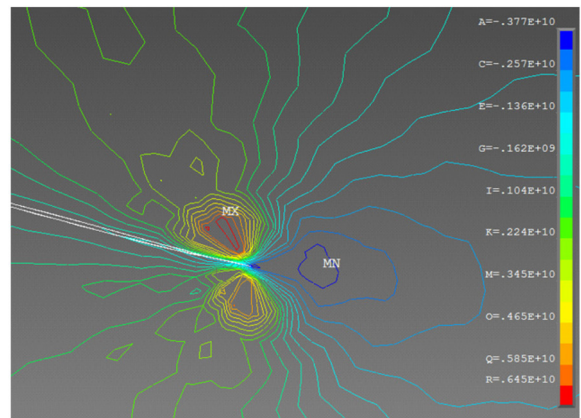


Fig. 8. Example of the shear stress contour around a crack tip under the operating temperature(in case of the slant angle  $15^{\circ}$  and crack length 0.1 mm).



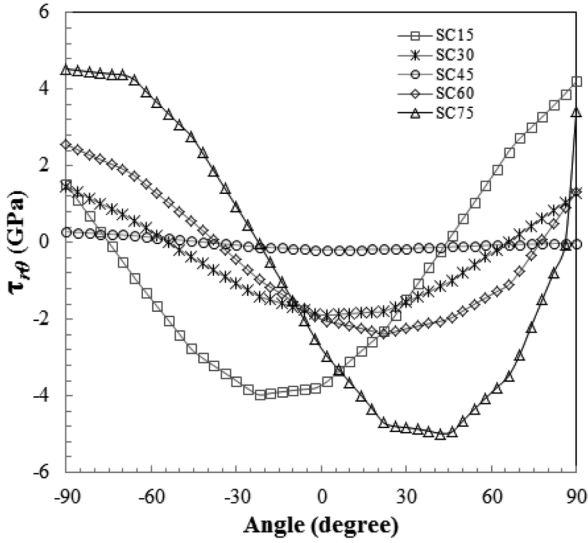


Fig. 9. The variation of shear stress at the around of the crack tip according to the crack slant angle (the operating temperature, the slant crack length 0.1mm,  $d/a=0.002$ ).

을 알 수 있다. Fig. 9는 길이가 0.1 mm인 미소균열이 연료극 방향으로 15°에서 75°로 5가지 방향으로 각각 경사하여 존재하는 경우에 균열단에서 0.2 $\mu$ m 떨어진 위치에서 얻어진 전단응력 변화상태를 나타낸다. 45°의 경우에는 균열단 주위에서의 전단응력의 변화는 매우 미소하지만 경사각이 15°~75°에서는 균열단 주위의 각도위치에 따라 감소하다가 다시 증가하는 양상을 나타낸다. 특히 균열단 주위각도  $\pm 30^\circ$  및  $0^\circ$ 전후에서는 절대 최대전단응력에 가깝게 나타나며, 균열 경사각 15°에서 75°로 증가함에 따라  $-76^\circ$ ,  $-52^\circ$ ,  $-40^\circ$ ,  $-36^\circ$  및  $-24^\circ$  근처에서 전단응력이 거의 0으로 나타났다.

### 3.4. 작동상태에서의 균열 진전각 및 응력확대계수

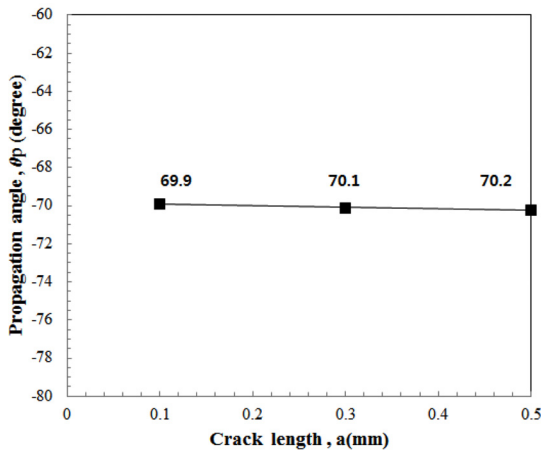


Fig. 10. The crack propagation length angle according to the edge crack length under the operating temperature.

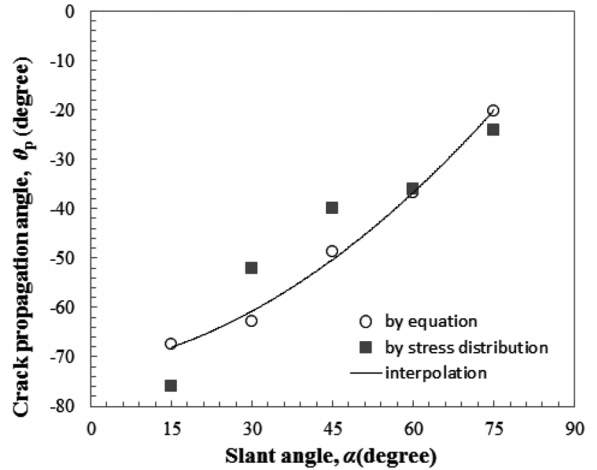


Fig. 11. The crack propagation angle according to the slant crack length under the operating temperature.

Fig. 10은 작동상태의 고온에서 전해질 내에 존재하는 에지 균열길이  $a$ 가 변함에 따라 얻어진 균열진전각도이다. 균열의 진전각은 균열길이  $a$ 가 0.1, 0.3 및 0.5 mm로 변화함에도 불구하고 거의 일정한 각도인 약  $70^\circ$  전후를 나타내었다. 또한 전단응력분포에 의한 값은 약  $75^\circ$ 로  $5^\circ$  정도의 차이로 얻어졌다. 이것으로 볼 때 에지 균열의 경우에는 균열이 직선방향으로 성장함을 예측할 수 있다. Fig. 11에서는 연료극에 존재하는 경사 균열의 크기는 0.1 mm로 일정하게 두고 작동상태에서 경사각의 변화에 따라 균열이 진전하는 방향을 나타낸 것이다. 경사각이 증가함에 따라 균열진전각은 점점 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. 또한 전단응력의 분포에 의하여 얻어진 결과와 비교하여 보면 작게는 2%에서 크게는 18%정도까지 차이를 나타내고 있다. 이 결과는 수치해석상의 정도의 차이로 여겨지며 향후 보다 더 정확한 결과를 얻기 위한 방법을 고려해야 할 것이다.

Fig. 12는 제조단계 및 작동온도상태에서 에지 균열의 응력확대계수  $K$ 의 Mode I과 Mode II의 비가 균열 길이에 따라 어떻게 변화하는가를 나타낸다. 제조단계의 실온상태에서는  $K_{II}/K_I$ 가 다소 감소는 하고 있으나 비교적 일정한데 비교하여 작동상태인 고온에서는 증가하고 있다. 이것은 균열이 0.1~0.5 mm로 성장함에 따라 Mode II의 성분이 더욱 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 13은 작동상태에서 균열경사각이 증가함에 따라 응력확대계수비  $K_{II}/K_I$ 는 오히려 감소하고 있어  $45^\circ$ 이후에는 Mode I 성분이 더 커지고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 균열의 경사각이  $45^\circ$ 방향으로 균열의 진전이 진행되는 경향이 있음을 알 수 있다.

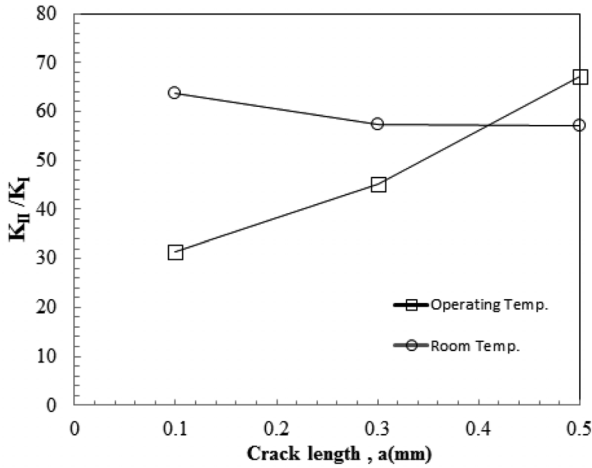


Fig. 12. The variation of the stress intensity factor ratio  $K_{II} / K_I$  according to the crack length under operating temperature.

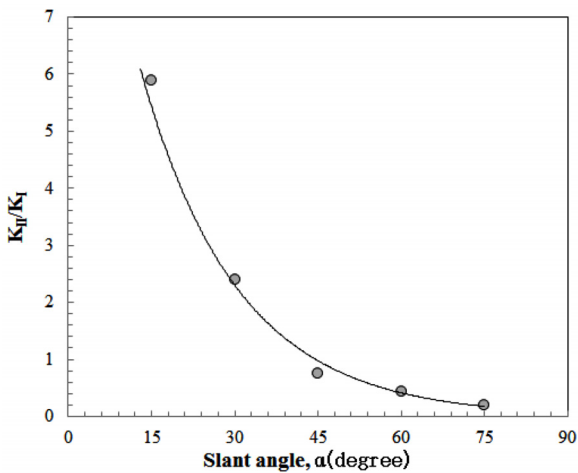


Fig. 13. The variation of the stress intensity factor ratio  $K_{II} / K_I$  according to the crack slant angle under operating temperature (crack length 0.1 mm).

#### 4. 결론

본 연구에서는 친환경 에너지 자원인 수소를 에너지 원으로 사용하는 연료전지를 해석 대상으로 하였다. 제안된 해석은 평판형 SOFC 전지를 모델로 단전지 제조, 다중 전지 스택 그리고 작동 과정에서 제조시와 고온 작동상태에서 발생한 미세한 균열을 가정하여 응력 해석 및 균열거동평가를 수행하였다. 해석 방법은 전해질 층에 균열 길이를 증가시킨 에지 균열과 연료극에서 발생한 경사 균열에 대해 3단계의 과정으로 해석 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전해질 에지 균열재의 상온에서의 제조 잔류응력은 균열단에서 0.1 mm 떨어진 위치에서 공기극에서

압축응력이 서서히 증가하다가 전해질 층 계면에서 급격히 압축응력이 증가한 후 균열단 위치를 지나면서 다시 압축응력이 감소하여 연료극에서 최대인장응력이 나타났다. 균열단이 존재하는 위치에서는 최대인장 및 압축응력이 교대하는 형태로 나타나 계면에서의 재료불일치에 의한 영향보다 균열존재에 의한 영향이 더 크게 좌우됨을 알 수 있었다.

(2) 전해질 에지 균열재의 작동에서 작동시 절대 전단 최대값은 -30°근방에서 나타났고, -75°근방에서 0으로 나타나 균열의 진전은 파괴기준에 따라 균열면에 대하여 공기극 방향인 75°방향으로 생성되는 것을 예측할 수 있다.

(3) 연료극 경사 균열재의 작동상태에서의 응력변화를 보면 균열단 주위각도 ±30° 및 0°전후에서는 절대 최대전단응력에 가깝게 나타나며, 균열 경사각 15°에서 75°로 증가함에 따라 -76°, -52°, -40°, -36° 및 -24° 근처에서 전단응력이 거의 0으로 나타났다.

(4) 연료극에 존재하는 경사 균열이 작동상태에서 경사각이 증가함에 따라 균열진전각은 점점 감소하는 경향이 있음을 알 수 있었다. 또한 전단응력의 분포에 의하여 얻어진 결과와 비교하여 보면 작게는 2%에서 크게는 18%정도까지 차이를 나타내었다.

(5) 작동상태에서 균열경사각이 증가함에 따라 응력 확대계수비  $K_{II} / K_I$ 는 오히려 감소하고 있어 45°이후에는 Mode I 성분이 더 커지고 있음을 알 수 있었다.

**감사의 글:** 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임(No. 2012R1A1A2007778).

#### References

- 1) W. Z. Zhu and S. C. Deevi, "A Review on the Status of Anode Materials for Solid Oxide Fuel Cells", Materials Science & Engineering, A, Vol. 362, pp. 228-239, 2003.
- 2) S. D. Vora, in: A. J. McEvoy, Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Solid Oxide Fuel Cell Forum, Vol.2, Lucerens, Switzerland, 10-14 July, p.175, 2000.
- 3) J. Qu., A. Fedorov, S. Graham and C. Haynes, "Integrated Approach to Modeling and Mitigating SOFC Failure", U.S. Department of Energy, Fy Annual Report, pp.167-172, 2004.
- 4) S. R. Choi and N. P. Bansal, "Alumina Reinforced Zircornia Composites", NASA/TM-2003-212701, pp.1-17, 2003.
- 5) N. Joulae, A. Makradi, S. Ahzi and M. A. Khaleel, B.K.

- Koepfel, "Prediction of Crack Propagation Paths in the Unit Cell of SOFC Stacks", *International Journal of Mechanical Material Design*, Vol.5, pp.217-230, 2009.
- 6) B. N. Nguyen, B. J. Koepfel, S. Ahzi, M.A. Khaleel and P. Singh, "Crack Growth in Solid Oxide Fuel Cell Materials: from Discrete to Continuum Damage Modeling", *Journal of American Ceramic Society*, Vol.89, No.4, pp.1358-1368, 2006.
  - 7) T. Zhang, Q. Zhu, W. L. Huang, Z. Xie and X. Xin, "Stress Field and Failure Probability Analysis for the Single Cell of Planar Solid Oxide Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, Vol.182, pp.540-545, 2008.
  - 8) M. Radovic and F. Lara-Curzio, "Mechanical Properties of Tape Casting Nickel-based Anode Materials for Solid Oxide Fuel Cell before and after Reduction in Hydrogen", *Acta Materials*, Vol.52, pp.5747-5756, 2004.
  - 9) M. Radovic and F. Lara-Curzio, "Elastic Properties of a Nickel-based Anode Materials for Solid Oxide Fuel Cell as a Function of the Fractional Reduced NiO", *Journal of American Ceramic Society*, Vol.87, No.12, pp.2242-2246, 2004.
  - 10) F. Tietz, "Thermal Expansion of SOFC materials", *Ionics*, Vol.5, pp.129-139, 1999.
  - 11) C. J. Park, O. H. Kwon and J. W. Kang, "A basic Study on the Stress Field in the Electrode Interface of the Planar SOFC Single Cells", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol.28, No.5, pp.5-9, 2013.
  - 12) D. Broek, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Leyden: Noodhoff International Publishing; 1974.
  - 13) P. Isaksson and P. Stahle, "Mode II Crack Paths under Compression in Brittle Solids", *Solids and Structures*, Vol.39, pp.2281-2297, 2002.
  - 14) J. Laurencin, G. Delette, F. Lefebvre-Joud and M. Dupeux, *Journal of European Ceramic Society*, Vol.28, pp.1857-1869, 2008.
  - 15) H. Yakabe, Y. Baba, T. Sakurai, M. Satoh, I. Hirose and Y. Yoda, "Evaluation of Residual Stresses in a SOFC Stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 131, pp. 278-284, 2004.