

## 고체산화물 연료전지 단위셀의 열응력에 관한 연구

김영진<sup>†</sup> · 박상균<sup>1</sup> · 노길태<sup>1</sup> · 김만응<sup>1</sup>

(원고접수일 : 2011년 3월 31일, 원고수정일 : 2011년 5월 14일, 심사완료일 : 2011년 5월 14일)

### Investigation of a Thermal Stress for the Unit Cell of a Solid Oxide Fuel Cell

Young-Jin Kim<sup>†</sup> · Sang-Kyun Park<sup>1</sup> · Gill-Tae Roh<sup>1</sup> · Mann-Eung Kim<sup>1</sup>

**요 약 :** 평균전류밀도 0~2000 A/m<sup>2</sup> 의 운전범위에 대한 음극 지지형 고체산화물 연료전지의 단위셀에 대한 열응력해석을 수행하였다. 평균전류밀도가 2000 A/m<sup>2</sup> 운전에서, 단위전지 열유동에 대한 수치해석적 방법으로 얻어진 온도분포를 토대로 구조해석을 수행하였다. 온도 편차가 매우 미미한 상태에서 이러한 유체-구조 연성 해석 방법을 통하여 완전 결합된 조건에서 최대등가응력이 전해질은 262.58MPa, 캐소드는 28.55MPa, 애노드는 15.1MPa로 계산되어 전해질에서 가장 높은 응력이 발생함을 알 수 있었다. 또한, 마찰접합조건인 경우 마찰계수가 증가함에 따라 응력이 증가함을 알 수 있었으며, 이는 셀 내부 물질간의 결합력에 의한 응력이 지배적임을 알 수 있었다.

**주제어 :** 평판형 고체산화물 연료전지, 전산유체역학, 온도분포, 열응력

**Abstract:** Thermal stress analysis of a planar anode-supported SOFC considering electrochemical reactions has been performed under operating conditions where average current density varies from 0 to 2000 A/m<sup>2</sup>. For the case of the 2000 A/m<sup>2</sup> operating condition, Structural stress analysis based on the temperature distributions obtained from the CFD analysis of the unit cell has also been done. From this one way Fluid-Structure Interaction(FSI) analysis, Maximum Von-Mises stress under negligible temperature gradient fields occurs when cell components are perfectly bonded. The maximum stress of the electrolyte, cathode and anode in a unit cell SOFC is 262.58MPa, 28.55MPa and 15.1MPa respectively. The maximum thermal stress is critically dependent on static friction coefficient.

**Key words:** Planar SOFC, CFD, Temperature distribution, Thermal stress

### 1. 서 론

고체 산화물 연료전지는 전해질이 고체 산화물로서 산소이온을 통과시켜, 전기화학반응에 의해 연료가 가지고 있는 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 에너지 변환 장치를 말한다.

고체산화물 연료전지의 원리를 간단히 살펴보면, 연료극으로 공급된 수소는 수소이온과 전자로 분리되어 전자는 외부회로를 통해 공기극으로 이동하고 공기극으로 공급된 산소는 전자를 받아 산소이온이 되며, 산소이온은 전해질을 통해 연료극으로 이동

하고 연료극에서 수소이온과 만나 물을 생성시키게 된다. 따라서 최종적인 반응은 수소와 산소가 결합하여 전기, 물을 생성하게 된다.

고체 산화물 연료전지의 특징은 발전효율이 50~60% 이며, 고체 산화물 연료전지-가스터빈-증기터빈과 연계한 복합발전의 경우 전기효율이 70%이상 상승시킬 수 있는 장점을 지니며, 연료로는 천연가스, 석탄가스, 폐기물가스 등 다양한 연료 사용이 가능한 특징을 가지고 있다. 또한, 환경 공해 요인 배기 가스 중의 NOx, SOx가 아주 적고, 분진이 거

<sup>†</sup> 교신저자(사단법인 한국선급 녹색산업기술원, E-mail:kimyj@krs.co.kr, Tel: 042-869-9515)

<sup>1</sup> 한국선급 녹색산업기술원

의 없으며 CO<sub>2</sub> 발생량에 있어서도 미분탄 화력발전  
에 비해 60% 가량 적게 발생한다. 또한, 조용한 운  
전방식으로 도심부근에 설치가 가능하여 송배전시  
에 따르는 설비 및 전력 손실이 적으며, 설치형태에  
따라서 현지 설치용, 분산 배치용, 중앙 집중용 등  
의 다양한 용도로 사용 가능하다. 하지만, 현재 고  
체 산화물 연료전지는 제조 단가가 비싸고, 고온 작  
동으로 인한 주변장치와의 결합상의 문제점을 지니  
고 있으며, 고온으로 장시간 운전 시 내구성의 문제  
점을 지니고 있어서 현재 많은 연구가 진행 중에  
있다.

특히 SOFC의 고온에서의 작동은 SOFC연료전지  
내의 불균일 온도장 분포를 야기 시킨다. 금속으로  
구성된 분리판(separator)과 세라믹으로 구성된 셀은  
서로 다른 열팽창계수로 인해 고온에서 셀의 파손  
및 누수(leakage)를 야기 시킬 수 있다. 불균일 온도  
장은 이러한 파손과 누수를 더 심화시킬 수 있기  
때문에 연료전지 작동 시 온도장을 예측, 해석하고  
이로 인한 열응력과 변형량을 예측하여 설계에 반  
영하는 것은 중요한 문제이다.

Achenbach et al.등은 3차원 평판형 고체산화물  
연료전지에 대한 열유동 해석을 수행하였으며,  
Ferguson et al.등은 사각 평판형과 원형 평판형에  
대한 고체산화물 연료전지에 대한 열유동 및 성능  
해석을 수행하였다[1,2].Yakabe et al.은 단위 채널에  
서의 열유동해석을 통하여 얻어진 온도장을 이용하  
여 단위채널에서의 열응력해석을 수행하였다[3].

본 연구에서는 고체 산화물 연료전지의 성능 특  
성을 예측하기 위하여 평판형 고체산화물 연료전지  
단위전지와 셀 프레임에 대한 조립체에 대해 전기  
화학반응을 고려한 열유동해석을 수행하였으며, 또  
한 이렇게 얻어진 구조물의 온도장을 이용하여 응  
력 및 변형에 대한 구조해석을 수행하여 종합적으  
로 단방향 유체-구조물 연성해석(Fluid Structure  
interaction)을 수행하였다.

특히, 열응력해석에서 가장 불확실한 인자는  
Cathode와 Electrolyte, Anode와 Electrolyte 사이 결합  
력이다. 이 결합력을 고려하기 위해 특정한 정지 마  
찰 계수(static friction coefficient)를 사용하여 해석을  
수행하였다. 본 연구에서는 셀 내부의 결합력이, 셀

내부 온도구배가 존재하는 상황에서 최대응력에 미  
치는 영향을 파악하고자 한다.

## 2. 계산방법

SOFC 단위전지 셀 프레임의 열/유동해석을 위하  
여 상용코드인 Ansys Fluent가 사용하였고, 전기화  
학반응을 모사하기 위해서 Fluent 내부의 In-house  
코드인 UDF(User Defined Function) 코드를 개발, 사  
용하였다. 이러한 전기화학반응을 고려한 연료전지  
열/유동해석 결과인 온도장 Data를 이용하여 구조해  
석인 열응력해석을 수행하기 위하여 유한요소 상용  
프로그램인 Ansys WorkBench를 사용하였으며, 이러  
한 계산 방법에 FSI (Fluid-Structure Interaction) 기법  
을 이용하였다.

### 2.1 계산영역설정

Figure 1과 같이 Anode와 Cathode의 가스흐름을  
교차시킨 Cross-flow 형태의 단위전지 셀 프레임에  
대하여 계산 영역을 설정하였다.

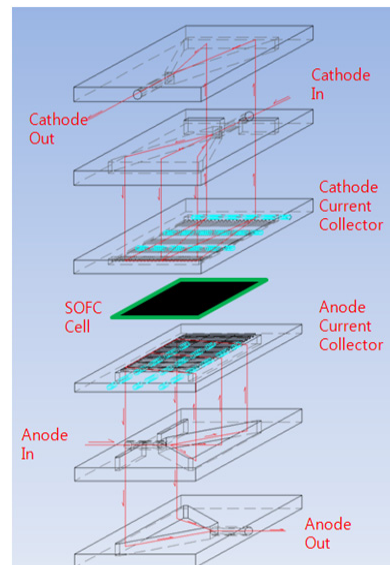


Figure 1: SOFC Unit Cell Frame Conceptual Design

### 2.2 SOFC 단위전지 열유동 수치해석방법

아래의 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식, 물질  
전달 방정식은 본 해석에 사용된 지배방정식들이다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_p \tag{1}$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla \cdot P + \nabla \cdot \vec{\tau} + S_i \tag{2}$$

$$\nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) = \tag{3}$$

$$\nabla \cdot (k_{eff} \nabla T + \sum h_i \vec{J}_i + (\vec{u} \cdot \tau_{eff})) + S_T \tag{4}$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} m_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i \tag{4}$$

연료전지 시스템에서 성능을 나타내는 일반적인 식은 아래와 같으며, 각 항에 대한 실험식은 참고문헌 [1], [2]를 사용하였다.

$$V_{cell} = E_{rev} - i(\eta_a + \eta_c + \eta_{ohm}) = E_{rev} - iR_p \tag{5}$$

또한, 각 지배방정식의 소스텀은 전기화학반응에 의한 전류밀도에 관한 함수로 주어진다. 전기화학반응에 대한 전하량 보존을 만족하여야 한다. 본 연구에서는 Yoshiba. et. al 이 제시한 Electric Circuit Model을 도입하였으며, 이는 국부적인 전류 흐름에 대해서 각각의 화학종과 온도를 구하여 전하량 보존을 성립시켰다[4]. Figure 2는 계산에 사용된 Electric Circuit Model에 대한 전하량 보존에 대하여 설명하고자 나타낸 그림이다. 전극과 전해질을 통과하는 전류밀도에 대한 계산 격자(=grid)들은 모두 병렬 회로로 구성되며, 전류의 흐름은 전해질의 Vertical 방향으로만 흐르고 Horizontal 방향으로 흐르지 않는다고 가정하였다. 이렇게 등가회로로 구성하면 Cell voltage와 전류밀도의 관계식은 Kifchhoff의 제1법칙 및 제2법칙에 의하여 계산할 수 있다[5].

본 열유동 해석에 사용된 각 파라미터는 아래 Table 1에 정리하였다.

정상상태, 층류유동으로 가정하였으며, 외벽 온도는 800°C로 일정하다고 가정하였다.

기본적인 열유동 해석은 Fluent를 사용하였으며, 이렇게 구한 온도장을 이용하여 열응력해석은 유한요소 상용프로그램인 Ansys WorkBench를 사용하여 수행하였다.

열응력해석 조건으로 잡기위해 CFD 해석결과인 온도장을 유한요소해석격자에 적용시켰다.

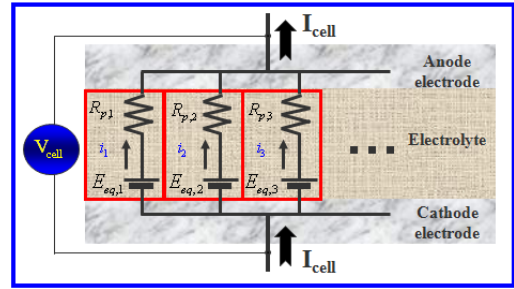


Figure 2: Electric Circuit Model for charge conservation in active reaction layer

Table 1: Parameters for the calculations of SOFC Unit Cell

Parameter	Value
<b>Geometric parameters</b>	
Anode channel thickness	2 mm
Cathode channel thickness	2 mm
Anode electrode thickness	1.4 mm
Electrolyte	0.02 mm
Cathode electrode thickness	0.03 mm
<b>Operating parameters</b>	
Active area	0.0081 m <sup>2</sup>
Operating current density	2000 A/m <sup>2</sup>
Fuel Utilization	46.7 %
Oxidant Utilization	20 %
<b>Input parameters</b>	
<b>Inlet mass flow rate</b>	
Anode	4.636e-7 kg/s
Cathode	2.883e-5 kg/s
<b>Inlet temperature</b>	
Anode	800 °C
Cathode	800 °C
<b>Anode Inlet components</b>	
H <sub>2</sub>	97 %
H <sub>2</sub> O	3 %
<b>Cathode Inlet components</b>	
O <sub>2</sub>	21 %
N <sub>2</sub>	79 %

Anode측 Cell Frame의 아랫면은 마찰이 없는 지지조건으로 구축하고, 각 Cell Frame과 셀의 접촉은 마찰이 없는 지지조건으로 두었다. Cathode측 Cell Frame의 윗면은 Frame의 무게와 분리판 위에 일정 압력 (0.2MPa)이 작용하도록 하고, 기준온도를 22°C로 설정한 후 800°C에서 열응력과 변형에 대한 계산을 수행하였다.

SOFC에서 열응력을 해석하기 위해서 필요한 모든 변수를 고려하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 몇 가지의 변수를 고정시키는 것이 필요하였으

며 기본적인 해석의 가정은 다음과 같다.

열적·기계적 물성치는 등방성(isotropic)이며 일정하다. Cell Frame과 셀 사이의 결합력은 셀 내부 즉 Cathode와 Electrolyte 사이, Electrolyte과 Anode 사이의 결합력에 비해 무시 할 만하다.

본 연구의 SOFC 셀은 가장 일반적으로 사용되는 물질들로 가정하였다. 즉, Cathode는 LSM계, 전해질(electrolyte)은 8mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stabilized ZrO<sub>2</sub>, Anode로는 (NiO-YSZ)를 사용하였으며 Table 2와 같이 상온과 800℃사이에서의 평균적인 물성치를 사용하였다[6].

Table 2: SOFC Material Properties

	thermal expansion coefficient(1/℃)	Young's modulus (GPa)
Cathode	$1.20 \times 10^{-5}$	50
Electrolyte	$1.05 \times 10^{-5}$	145
Anode	$1.25 \times 10^{-5}$	87.5
Separator	$1.70 \times 10^{-5}$	193

열응력해석의 가장 불확실한 인자(uncertain parameters)중 하나는 셀 내부 물질들 간의 결합력이라 할 수 있다. Anode와 Electrolyte 사이, 그리고 Cathode와 Electrolyte간의 접합면사이의 결합력은 정지마찰계수에 의해 모델화 될 수 있다.

Chiang et al.은 셀 간의 마찰접합(frictional contact)의 정지마찰계수에 0.16을 사용하였다[7]. 하지만 이 값이 어느 정도 신뢰성을 가지는 지는 언급되어 있지 않다. 본 연구에서는 경계조건과 물성치를 고정시킨 상태에서, 상기 논문에서 제시된 정지마찰계수를 0에서 0.3까지 변화시키며 해석을 수행하였다. 그리고 이상적인 경우로 완전히 결합되어 분리가 되지 않는 상황을 해석하였다.

정지마찰계수(Frictional coefficient)는 요소 간 해석 격자의 슬라이딩이 있을 때, 클롱형태의 마찰력을 고려할 때 필요한 인자로 다음과 같이 정의된다[8].

$$F = \mu N \quad (N \text{은 수직항력, } F \text{는 마찰력}) \quad (6)$$

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\beta V} \quad (7)$$

$\mu_s$ : 정지마찰계수(static friction coefficient)

$\mu_d$ : 동마찰계수(dynamic friction coefficient)

$\beta$ : exponential decay coefficient

$V$ : 접촉점에서의 상대속도

### 3. 해석결과

먼저 각 평균전류밀도를 달리하면서 계산한 결과 Figure 3과 같은 성능곡선을 얻을 수 있었다.

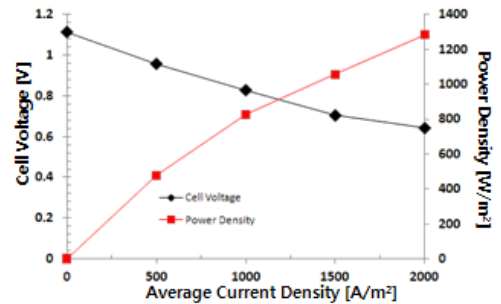


Figure 3: Performance curve for the SOFC unit cell.

위의 성능 곡선 중 전류밀도가 2000A/m<sup>2</sup>에 대한 해석 결과를 Figure 4에 나타내었다.

Figure 4 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 수소와 산소의 몰농도는 유동 흐름에 따라 전기화학반응으로 인하여 점점 소모되는 것을 알 수 있다.

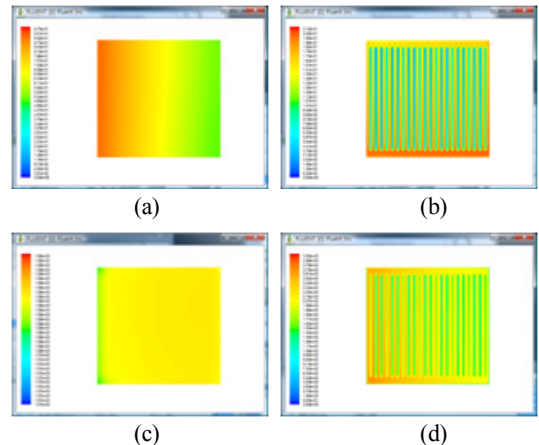


Figure 4: Calculation results for the SOFC unit cell. Average current density = 2000 A/m<sup>2</sup>, Fuel Utilization = 46.7%, Oxidant Utilization = 20%; (a) H<sub>2</sub> mole fraction (b) O<sub>2</sub> mole fraction (c) Temperature (d) Current density

특히, 산소의 몰농도의 변화는 입구측에서 급격히 변하며, 유로의 고체영역과 유체영역에서 차이가 클 수 있다. 이로부터 Cathode 전극의 두께가 30  $\mu\text{m}$ 로 매우 얇아 채널에서 반응 site로의 확산이 원활하지 않다는 것을 알 수 있다. 이러한 해석결과는 향후 설계 시 Buffer역할 및 전류집전을 위한 Mesh의 두께 설계에 중요한 설계 Factor를 제공할 것이라 기대된다. 또한 압력강하량은 Anode측은 약 2.5 Pa, Cathode측은 약 20.6 Pa로 Anode에 비해 Cathode의 압력강하량이 10배정도 크다는 것을 알 수 있다. 이는 똑같은 Channel형상에서 Cathode측의 유량이 훨씬 크기 때문이다. Figure 4 (c)에서의 온도분포에서는 거의 균일한 온도분포를 보이며, 최대 온도는 약 81  $^{\circ}\text{C}$ , 온도차는 약 10 $^{\circ}\text{C}$ 로 계산되었다. Figure 4 (d)에서는 평균 인가한 전류밀도가 2000  $\text{A}/\text{m}^2$ 일때의 국부 전류밀도 분포를 나타내며 이는 각 화학종의 반응율 분포를 예측할 수 있다. 성능적인 측면에서 평균전류밀도가 2000  $\text{A}/\text{m}^2$ 일 때 전지 전압은 약 0.642 V, 전력밀도는 1284  $\text{W}/\text{m}^2$ 으로 예측되었다.

열유동 해석을 통하여 얻은 온도장에 대하여 열응력해석을 수행하였다. 해석결과 분리판의 재질은 스테인리스 스틸로 열팽창계수가 가장 크며, 셀과 Cell Frame 간의 결합력은 셀 내부요소간 결합력과 비교하여 무시할 만 하므로, Cell Frame은 셀의 열응력에 큰 영향을 주지 못하였다.

또한 위의 열유동 해석에서 최대 온도 차이는 약 10 $^{\circ}\text{C}$  정도로 미미한 온도 차이는 열응력에 결정적인 영향을 미치지 않았다.

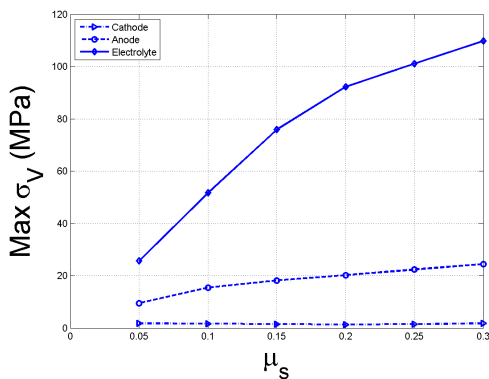
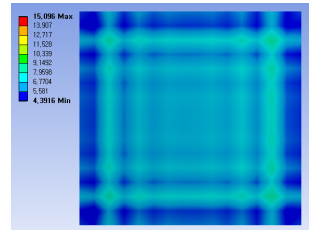


Figure 5: Comparison of Maximum Von-Mises Stresses with respect to Static Friction Coefficients

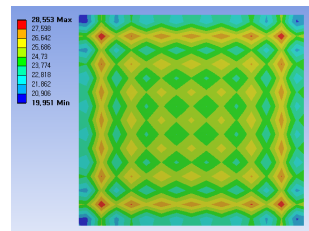
Figure 5에서 확인할 수 있듯 정지마찰계수가 증가함에 따라 Cathode, Electrolyte, Anode 모두의 열응력이 증가함을 알 수 있다. 셀 내부 최대 등가응력(Maximum Von-Mises Stress)은 두께가 가장 얇고 탄성계수가 가장 큰 Electrolyte에서 발생하였다. 그 값은 마찰계수가 0.05~0.3인 범위일 때 25.87MPa에서 110.07MPa로, 마찰계수가 열응력에 미치는 영향이 클 수 있다.

셀 내부의 최대 온도 차이는 약 10 $^{\circ}\text{C}$  정도 이었고, 해석결과 온도차로 인한 열응력에 미치는 영향은 10 MPa 미만으로 미미하였다.

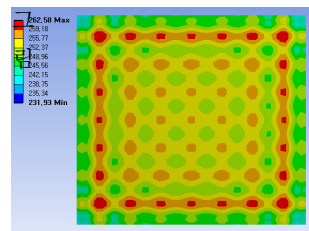
열응력이란 물체가 고온상태에서, 어떤 변형에 대한 자유롭지 않고 구속이 있을 때 발생하는 응력이다. 만약 Cathode와 Anode, Electrolyte 사이에서 결합력이 없다면 즉 (frictionless) 변형에 대해 아무런 구속을 주지 못하므로 고온에서도 열응력이 준



(a)



(b)



(c)

Figure 6: Maximum Von-Mises Stress (perfectly bonded) (a) Anode (b) Cathode (c) Electrolyte

재하지 않는다. 반대로 가장 구속이 심한 경우, 즉 완전히 접촉되어 있을 때(perfectly bonded) 최대열응력이 발생함을 쉽게 예측할 수 있다. **Figure 6**의 해석결과 최대등가응력은 Cathode에서 28.6MPa, Electrolyte에서 262.6MPa, Anode에서 15.1MPa로 나타났다.

#### 4. 결 론

평판형 고체산화물 연료전지를 구성하는 Anode, Cathode, Electrolyte와 이와 접촉하여 가스 유로와 전류집전을 수행하는 Cell Frame간의 다른 열팽창계수로 인한 고온에서의 구조적인 안정성을 평가하기 위하여, 평판형 고체산화물 연료전지에 대한 유체-구조 연성해석을 통하여 열응력을 계산하였다. 평판형 고체산화물 연료전지의 단위전지내의 열유동은 열전달, 물질전달, 전기화학반응을 모두 포함하였다. 공기와 연료간 Cross Flow에 대해 전산수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 유한요소법을 통해 셀 내부 Cathode, Anode와 Electrolyte에서 발생하는 등가응력(Von-mises stress)을 구하였다. 해석 결과를 정리하면 아래와 같다.

(1) 음극지지체형 고체산화물 연료전지의 특성으로 인하여 연료가스인 수소는 유동방향으로 점진적으로 균일하게 감소하나, 공기 중에 포함된 산소의 몰농도의 변화는 유로의 고체영역과 유체영역에서 차이가 큼을 알 수 있었다.

(2) 전기화학반응을 포함한 고체산화물 연료전지의 열유동 해석 결과 최대 온도 차이가 약 10°C로 미미한 온도차를 나타내었다. 이는 열전도도가 큰 Cell Frame의 외벽 온도를 800°C로 가정하고 반응 길이가 10cm로 작기 때문이다.

(3) 해석결과 Electrolyte가 가장 큰 등가응력을 보였으며, 그 다음으로 Cathode와 Anode순으로 예측되었다. 고온 SOFC 단위셀 내에서 최대온도구배는 10°C 정도의 크기를 가지고 있으므로, 이러한 온도차이로 인한 열응력보다 셀 내부 구성요소간의 접촉 결합력에 의한 열응력이 지배적이었다. 가장 열응력이 클 조건은 완전히 결합되어 있을 때였으며, 최대등가응력은 262.6MPa로 Electrolyte에서 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 국토해양부 (한국해양과학기술진흥원) 해양과학기술연구개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] E. Achenbach, "Three dimensional and time-dependent simulation of a planar solid oxide fuel cell stack", Journal of the Electrochemical Society, vol. 142, pp. 3792~3800, 1994.
- [2] J. R. Ferguson, J. M. Fiard and R. Herbin, "Three-dimensional numerical simulation for various geometries of solid oxide fuel cells", Journal of Power Sources, Vol. 58, pp. 109-122, 1996.
- [3] H. Yakabe, Y. Babaa, T. Sakurai, M. Satoh, I. Hirose and Y. Yodab, "Evaluation of residual stresses in a SOFC stack", Journal of Power Sources, vol.131, pp. 278-284, 2004
- [4] Yoshida F, Abe T and Watanabe T. "Numerical analysis of molten carbonate fuel cell stack performance: diagnosis of internal conditions using cell voltage profiles. J Power Sources 2000; 87: 21-7.
- [5] Y.J.Kim, I.G.Chang, T.W.Lee and M.K. Chung, "Effects of relative gas flow direction in the anode and cathode on the performance characteristics of a Molten Carbonate Fuel Cell", Fuel, Vol 89, Issue 5, pp. 1019-1028, May 2010.
- [6] Sophie Giraud., J'erome Canel "Young's modulus of some SOFCs materials as a function of temperature", Journal of the European Ceramic Society, vol. 28, pp77~83, 2008.
- [7] Lieh-Kwang Chiang, Hui-Chung Liu, Yao-Hua Shiu, Chien-Hsiung Lee and Ryey-Yi Lee, "Thermo-electrochemical and thermal stress analysis for an anode-supported SOFC cell", Renewable Energy, Vol. 33, pp. 2580-2588, 2008
- [8] Ansys WorkBench V12. "Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications"

## 저 자 소 개



### 김영진(金英辰)

2003년 부산대학교 기계공학과(공학사),  
2005년 KAIST 대학원 기계공학과(공학  
석사), 2011년 KAIST 대학원 기계공학  
과(공학박사), 2005년 - 2010년 (주)두산  
중공업 근무, 현재 (사)한국선급 녹색산  
업기술원 근무



### 박상균(朴相均)

1996년 한국해양대학교 기관공학과(공  
학사), 2001년 한국해양대학교 대학원  
기관학과(공학석사), 2005년 일본 북해  
도대학교 대학원 기계공학과(공학박사),  
1996년 - 1999년 (주)한진해운 근무(2등  
기관사), 현재 (사)한국선급 녹색산업기  
술원 근무



### 노길태(盧佶兌)

2002년 동국대학교 화학공학과(공학사),  
2004년 동국대학교 화학공학과(공학석  
사), 2005-2007년 삼성SDI 근무,  
2007-2009년 (주)두산중공업 근무,  
2009-2010 (주)현대자동차 근무, 현재  
(사)한국선급 녹색산업기술원 근무



### 김만응(金晩應)

1980년 한국해양대학교 기관공학과(공  
학사), 2005년 한국해양대학교 대학원  
기계공학과(공학박사), 현재 (사)한국선  
급 녹색산업기술원 원장