

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.5.400

고분자 전해질 연료전지 막의 변형 및 피로수명

양정환*, 박정선**

Study for the Deformation and Fatigue Life of a PEMFC

Jeonghwan Yang* and Jungsun Park**

ABSTRACT

The stress distribution and stress amplitude of a membrane are major factors to decide the mechanical fatigue life of PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell). In this paper, mechanical stresses under operating hygro-thermal condition of the membrane are numerically modelled. Contact analysis between gas diffusion layer (GDL) and the membrane is performed under various temperature-humidity conditions. The structural model has nonlinear material properties depending on temperature and relative humidity. Several geometric conditions are applied to the model. The numerical analysis results indicate that deformations of the membrane are strongly related with assembly conditions of the fuel cell. The fatigue life is predicted for practical operating condition through experimental data.

초 록

전해질 막의 응력 및 변화폭의 분포는 고분자 전해질 연료전지 (PEMFC, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)의 피로수명의 중요한 인자이다. 본 논문에서는 연료전지 운전조건에 의한 hygro-thermal 조건에 의해 전해질 막에 발생하는 기계적 응력 해석을 모델링 하였다. 기체확산층과 전해질 막 사이의 접촉해석이 여러 가지 온도, 습도 조건에 대하여 수행되었다. 구조 모델은 온도와 상대습도에 의존하는 비선형 재료물성을 적용하였다. 몇 가지 기하학적 조건들이 모델에 적용되었다. 구조해석 결과는 전해질 막의 변형이 체결조건에 크게 의존함을 보여주었다. 실험 데이터와의 비교를 통해 운전 조건에 대하여 피로수명 예측이 수행되었다.

Key Words : PEMFC(고분자 전해질 연료전지), FEA(유한요소해석), Nafion(나피온), Hygro-thermal expansion(수분-열 팽창)

1. 서 론

고분자전해질 연료전지가 Gemini 우주선에 처음 사용된 이래로 미국항공우주국 (NASA) 의 우주선 및 우주왕복선에 고분자전해질 연료전지

가 사용되고 있다. 기존 에너지 변환 방식에 비하여 고효율, 무소음, 무공해 등의 장점을 갖고 있는 고분자전해질 연료전지는 항공우주분야 뿐만 아니라 많은 공학응용 분야에서 다방면으로 연구가 진행되고 있다[1].

고분자 전해질 연료전지에 사용되는 고분자 전해질 막(PEM, polymer electrolyte membrane)은 온도, 습도의 변화에 따라 수축, 팽창하는 특성이 있다. 일반적으로 고분자 전해질 막의 재료로 PFSA (perfluorosulfonic acid) NAFION[®]이

† 2010년 11월 8일 접수 ~ 2011년 5월 2일 심사완료

* 학생회원, 한국항공대학교 대학원

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부
교신저자, E-mail : jungsun@kau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

사용되고 있으며 이 재료는 습도 및 온도에 따라 수화 및 열팽창 거동을 보인다[2-3]. 이러한 현상에 대해 유한요소해석 등을 통한 다양한 연구가 이루어지고 있다[4-6].

본 연구에서는 연료전지의 운전조건(온도, 습도)을 고려하여 유한요소해석을 이용한 방법으로 막의 응력 분포를 예측하고 피로하중 스펙트럼을 산출하여 피로수명에 대해 알아보고자 한다. 실제 사용되고 있는 연료전지의 구성 요소 및 체결 조건을 고려하여 좀 더 자세한 해석 모델을 수립할 필요가 있다. 실험을 통해 여러 가지 기체확산층의 기계적 거동을 확인하고 물성을 해석 모델에 적용 하였다. 또한, 셀 내부의 channel, land 부분 및 edge seal joint 부분 등의 여러 가지 상황에 대해 전해질 막(MEA)과 기체확산층(GDL, gas diffusion layer) 간의 비선형 접촉해석을 수행하였다. 해석은 상용 프로그램 ABAQUS 를 이용하여 수행하였으며, 전해질 막의 수화-열팽창을 구현하기 위하여 ABAQUS user subroutine UEXPAN 이 사용되었다. 유한요소해석을 통하여 얻어진 하중 스펙트럼에 재료의 피로 특성을 비교하였다.

II. 단위전지의 구조해석

2.1 개요

전해질 막(MEA)의 응력 분포 및 변형 형상은 단위전지의 체결구조 및 기체확산층(GDL) 재료에 따라 크게 영향을 받는다. 전해질 막이 변형되는 부위는 주로 서브개스킷과 채널 부근이었다. 고분자전해질 연료전지의 단위전지 안에서 전해질 막이 거동하는 모습을 Fig. 1 및 Fig. 2에 단면도로 나타내었다. 그림에서 분리판과 기체확산층 사이에서 유체가 흐를 수 있도록 만들어진 채널, 그리고 분리판과 기체확산층이 접촉하는 부분인 랜드가 있다. Fig. 1은 연료전지가 가동 전 정지상태일 때의 전해질 막의 형상을 나타낸다. 물과 열이 발생하지 않아 전해질 막이 수축되어 있다. 반면 Fig. 2는 연료전지 운전상태에서의 전해질 막의 형상을 나타낸다. 전기-화학 반응으로 생성된 물과 열로 인해 전해질 막이 팽창한 모습이다. 채널 부분과 랜드 부분에서 기체확산층(GDL)이 전해질막을 지지해주는 힘의 차이로 인하여 Fig. 2(a), Fig. 2(c)와 같은 현상이 발생한다. 또한 서브개스킷과의 결합 과정에서 발생하는 공간에서 전해질 막이 구속되지 못하여 Fig. 2(b)와 같이 변형이 발생한다.

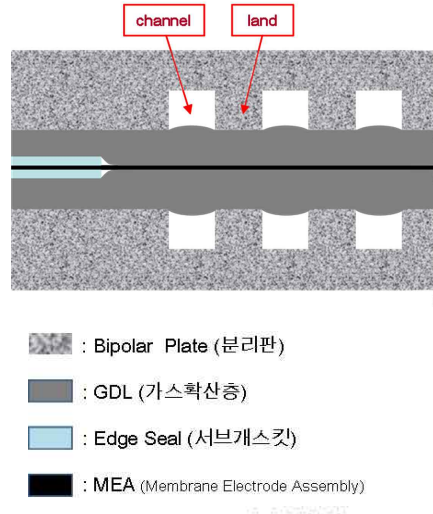


Fig. 1. Schematic diagram of Membrane behavior(dry/shrunken state)

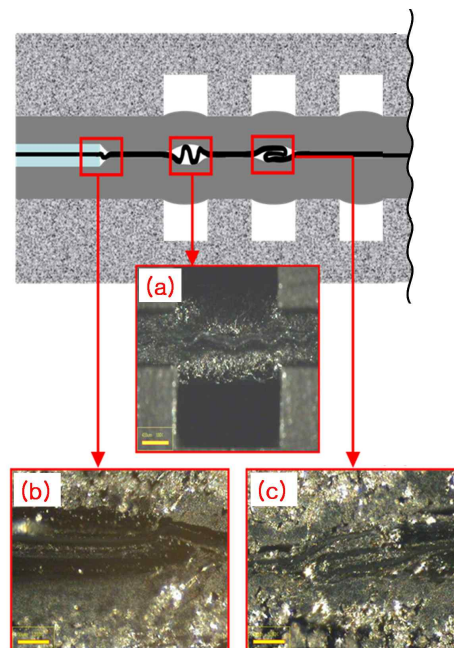


Fig. 2. Schematic diagram of Membrane behavior(wet/swollen state)

Fig. 2에서 아래에 추가로 삽입된 이미지 Fig. 2(a)~(c)는 실제 운전에서 사용된 단위전지의 기체확산층과 막 전극 집합체를 스택으로부터 분리하여 단면을 광학현미경으로 촬영한 영상이다. Fig. 2(a)의 경우 채널 부분에서의 전해질 막(MEA)이 위, 아래로 휘어져 있다. 기체확산층이 전해질 막

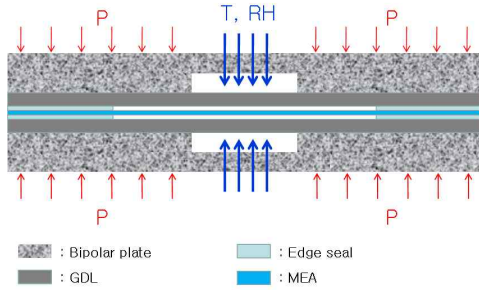


Fig. 3. Modeling concept of cross section of unit cell

의 팽창에 의해 밀려난 것이다. Fig. 2(b)의 사진은 서브개스킷과 기체확산층, 전해질 막의 세 가지 요소가 접촉하는 부분에서 생겨나는 공간으로 인한 현상이다. 전해질 막이 빈 공간으로 팽창하여 휘어져 있다. Fig. 2(c)는 Fig. 2(a)에서 좀 더 진행되어 전해질 막이 겹쳐진 경우이다.

전해질 막(나피온, Nafion® Dupont)의 경우 고분자 물질로써 온도, 습도에 따라 탄-소성 거동이 다르게 나타난다[7]. 따라서 16가지 온도, 습도 조건에 대하여 탄-소성 특성을 정의하였다. 또한 전해질 막의 수분-열 팽창 거동에 대해 같은 조건에 대하여 정의하였다. 기체확산층은 carbon fiber와 poly tetra fluoro ethylene(PTFE) 및 micro porous layer(MPL)층으로 구성되어 있는 다공성 물질이다. 그렇지만 전해질막과의 상호 작용에 대한 고려만을 목적으로 단일 재료로 정의하였으며 이에 대한 물성 데이터는 몇 가지 유형의 기체확산층에 대하여 실험을 통해 얻어졌다. 이러한 재료물성들을 이용하여 단위전지 내에서 연료전지 운전조건에 대한 전해질 막의 거동에 대해 고찰해 보기 위하여 구조해석을 수행하였다. 단위전지 적층 단면 구조에 대하여 Fig. 3 과 같은 단일채널 단위전지를 가정하였다. 각각 요소 간에는 접촉거동이 정의되었다. 채널 및 서브개스킷(Edge seal) 부위에서의 거동을 각각 확인하기 위하여 단일 채널 양쪽으로 서브개스킷을 두었다.

해석상에서 분리판(Bipolar plate) 부분은 실제 모델링하지 않고 경계조건으로 대체하였다.

2.2 재료물성 모델링

전해질 막은 연료전지의 작동을 위해 기본적으로 필요한 핵심 부품이다. 일반적으로 전해질 막은 촉매극이 전사된 상태인 MEA(membrane electrode assembly)의 형태로 사용된다. 이러한 전해질 막의 기계적 거동을 모델링하기 위해 나

피온 막의 탄성-소성 특성 및 수분-열 팽창 특성을 해석에 적용하였다. 전해질 막의 탄-소성 물성들은 고분자 물질인 나피온의 특성상 온도 및 습도에 의해 영향을 받는다.

따라서 온도 및 습도에 의해 달라지는 전해질 막의 물성을 여러 가지 온도, 습도 상태에 대해 정의하였다. 전해질 막의 탄성계수(E)가 작동 온도 및 습도에 따라 최대 197 MPa에서 최소 46 MPa까지 변화하며 항복응력 및 소성 거동 또한 온도, 습도에 따라 크게 변화한다[7]. 전해질 막의 이러한 특성은 Fig. 4 및 Fig. 5를 통해 알 수 있다. Fig. 4는 온도 65 °C 조건에서 상대습도 조건이 달라짐에 따른 응력-변형률 선도이다. Fig. 5는 상대습도가 동일하고 온도가 달라짐에 따른 전해질 막의 응력-변형률 선도를 비교하여 나타내었다. 두 경우 모두 온도 또는 습도가 높아지면 탄성계수와 항복응력이 낮아지는 경향을 나타내고 있다.

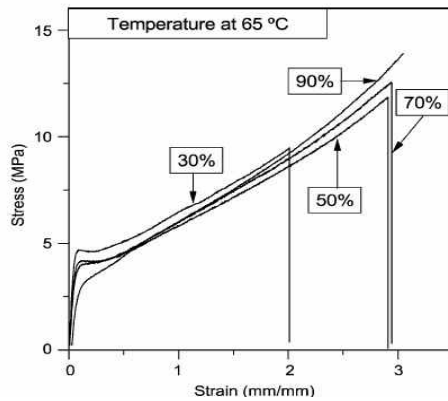


Fig. 4. Stress - strain curves at different relative humidity at 65 °C [7]

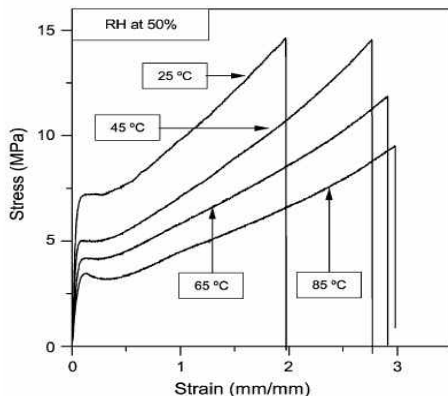


Fig. 5. Stress - strain curves at different temperatures at 50% RH [7]

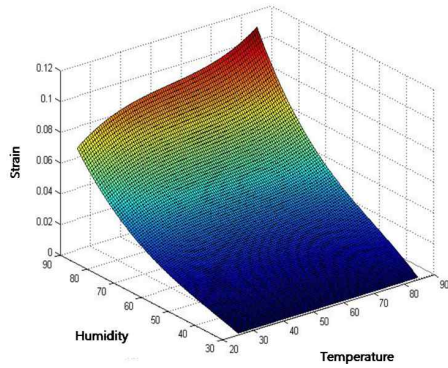


Fig. 6. Swelling strain of Nafion@112 as function of T and RH

Table 1. Constants for the swelling strain polynomial defined in Eq. (1)

C_{ji}	$i = 1$	$i = 2$
$j = 1$	3.0816×10^{-12}	-4.4727×10^{-10}
$j = 2$	-5.3516×10^{-10}	7.6152×10^{-08}
$j = 3$	3.6359×10^{-08}	-5.2865×10^{-06}
$j = 4$	-6.9232×10^{-07}	1.0213×10^{-04}
C_{ji}	$i = 3$	$i = 4$
$j = 1$	2.2696×10^{-08}	-7.5602×10^{-08}
$j = 2$	-3.7261×10^{-06}	2.3356×10^{-05}
$j = 3$	2.6400×10^{-04}	-2.1601×10^{-03}
$j = 4$	-5.1794×10^{-03}	4.5824×10^{-02}

또한 온도, 습도에 의한 막의 팽창을 모사하기 위해 ABAQUS user subroutine이 사용되었다. ABAQUS에서는 기본적으로 습도를 고려할 수 없기 때문에 Field variable의 형태로써 적용하여 해석하였다. 온도, 습도에 따른 팽창 거동에 대한 재료 시험 데이터를 그래프로 나타내면 Fig. 6과 같다. 이를 해석에 적용하기 위하여 변형률 관계식을 식 (1)과 같이 정의하였다. 여기서 계산된 ϵ 는 온도와 상대습도에 따른 재료의 팽창률을 나타낸다. C_{ji} 는 변형률 다항식의 계수이며 Table 1에 나타내었다.

$$\epsilon(T, RH) = \sum_{i,j=1}^4 C_{ji} T^{4-i} RH^{4-j} \quad (1)$$

RH : 상대습도

기체확산층은 다공성 물질로써 채널을 통해 유입된 유체가 활성면적에 균일하게 분포될 수

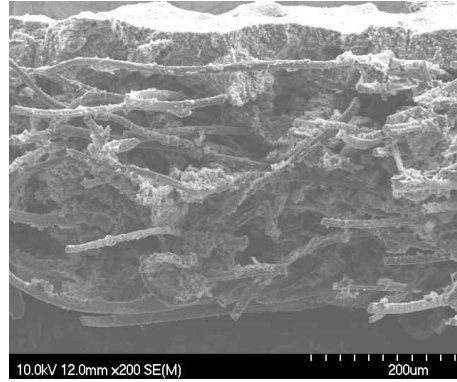


Fig. 7. SEM image of cross section of GDL

있도록 하는 역할과 동시에 MEA를 기계적으로 지지하는 역할을 맡고 있다. 따라서 MEA의 기계적 거동을 확인하기 위해서는 기체확산층의 기계적 거동 및 전해질 막에 대한 상호 작용을 해석할 필요가 있다. 기체확산층의 다공성 구조를 확대한 사진을 Fig. 7에 나타내었다. 기체확산층은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 수많은 carbon fiber와 poly tetra fluoro ethylene(PTFE) 및 micro porous layer(MPL)층으로 구성되어 있는 다공성 물질로써, carbon fiber 들이 수평 방향으로 불규칙하게 얽혀있는 구조를 갖는다. 또한 이 사진으로써 기체확산층의 두께방향 특성이 비선형적일 수 있음을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 전해질 막과 기체확산층 간의 상호작용 및 기체확산층의 전해질막 지지(membrane support) 성능 등을 확인하는 것을 목적으로 수직방향과 수평방향의 탄성계수(E_x, E_y) 그리고 전단계수(G) 및 포아송 비(ν)를 따로 정의한다.

기체확산층의 차이에 의한 결과를 비교하기 위하여 3종류의 기체확산층을 선정하였다. 대상 재료들로는 국내외에서 현재 많이 사용되고 있는 종류 들을 선정하였다. 먼저 비교적 강도가 작은 carbon paper와 강도가 큰 carbon felt계열로 분류하였다. 또한 carbon felt에 대해서 제작과정에서 굽힘하중을 받지 않고 생산된 경우에 대해 carbon felt-A, 대량생산 방식에 따라 roll-good 형태로 제작되어 굽힘하중을 받게 되는 것을 carbon felt-B로 분류하였다. 이 재료들은 서로 기계적 물성 및 전기, 화학적 특성에 차이를 보인다. Carbon felt-A에 대한 계수들은 Kleemann의 실험을 참고하였으며[8], carbon felt-B와 carbon paper에 대해서는 압축시험 및 굽힘시험을 수행하였다. 이렇게 구해진 계수

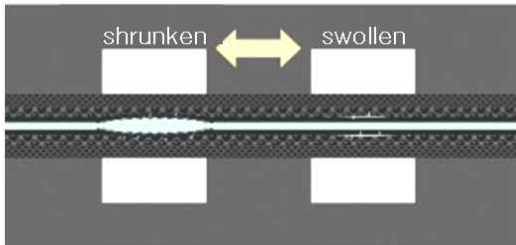
들을 이용하여 기체확산층을 직방성 재료로 모델링 할 수 있었다. 직방성 재료에 대한 후크의 법칙(Hooke's law)은 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{\nu_{xy}E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ \frac{\nu_{xy}E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ 2\gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

연료전지 운전에 따른 환경 변화에 대하여 재료 특성에 따라 셀 내부 요소의 변형 경향이 상이하게 된다. 온도-습도, 혹은 동결-해동 상황에 대하여 전해질 막과 기체확산층의 변형 경향에 대한 개략적 형상을 Fig. 7에 나타내었다. 대체로 큰 굽힘강성(bending stiffness)을 갖고 있는 carbon felt 계열의 경우와 상대적으로 작은 굽힘강성을 갖는 carbon paper 계열의 경우를 비교하여 나타내었다. 이들이 전해질 막의 내구성에 미치는 영향은 현재도 많은 연구자들에 의해 연구되어 지고 있다.

높은 강성으로 전해질 막을 곧게 지지하는 경우와 낮은 강성으로 유연하게 지지하는 경우를 비교할 때 어느 경우가 더 전해질 막의 내구성에 이로운 것인지 해석을 통해 알아볼 수 있겠다. carbon felt-A 와 carbon felt-B 는 동일한 Felt 계열의 구조를 갖지만 다른 강성을 갖는다.

[Carbon Felt]



[Carbon Paper]

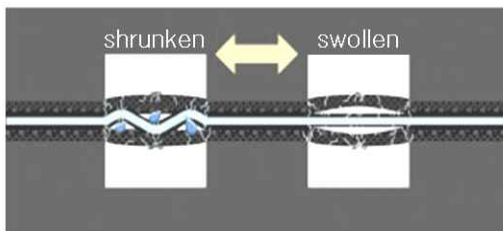


Fig. 8. Proposed degradation mechanism of cells with various GDL[9]

2.3 유한요소 해석 결과

해석 조건(기체확산층의 종류)에 따라 변형 형상의 차이를 보였다. 각각의 경우에 따라 변형 형상을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 변형 전의 유한요소 모델을 보여주고 있다. Fig. 9(b)~(d)는 동일한 전해질 막(Nafion)에 대하여 각각 다른 기체확산층을 적용한 모델 들에 대한 것이다. 각각 carbon felt-A, carbon felt-B, carbon paper 의 물성을 기체확산층에 적용하였을 때의 해석 결과로 얻어진 변형 형상을 나타낸다. 변형 형상은 연료전지 운전조건 에서의 모습이다. 상대적으로 굽힘강성이 작은 carbon paper를 적용한 경우 전해질 막의 거동이 채널아래 부위에서 Fig. 2(a)와 같은 현상이 나타났고 굽힘강성이 가장 큰 carbon felt-A를 적용한 경우 Fig. 2(b)와 같은 현상이 나타났다. carbon felt-A를 적용한 경우 carbon felt-B에 비하여 상대적으로 큰 강성을 갖고 있기 때문에 Fig. 9(b)에서 볼 수 있듯이 채널부분의 변형은 안정적으로 지지하고 있지만 오히려 서브개스킷의 두께로 인하여 전해질 막과 유연하게 접촉하지 못하는 현상을 발견하였다.

반대로 carbon paper의 경우 Fig. 9(d)에서 볼 수 있듯이 서브개스킷을 유연하게 덮으며 전해질 막을 지지하고 있는 모습을 보여줬지만 채널 부

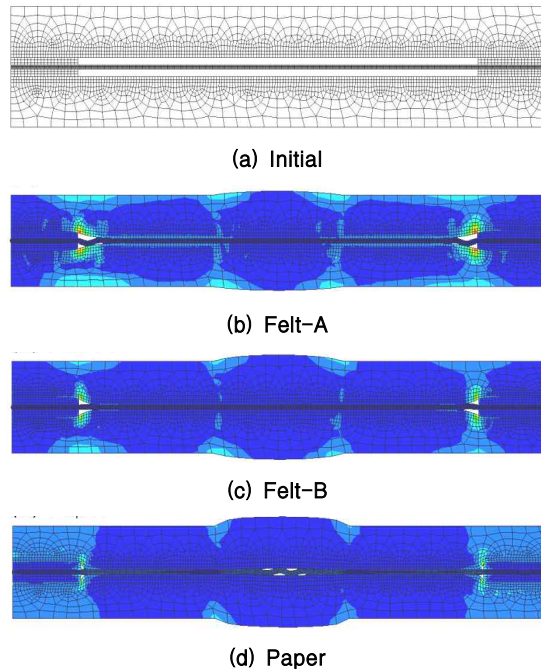


Fig. 9. Deformation of PEMs by FEA

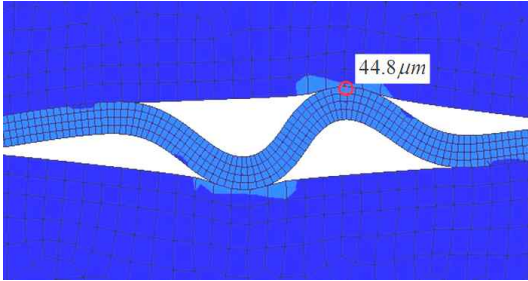


Fig. 10. Deformation of the PEM by FEA

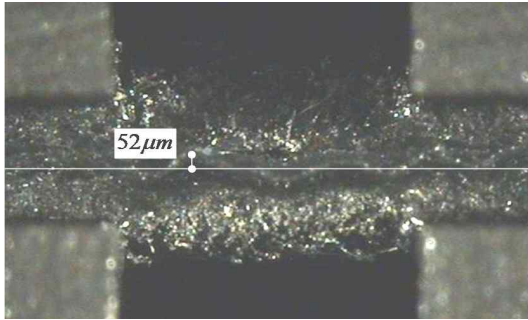


Fig. 11. SEM view for Deformation of the PEM by experiment (X100)

분에서는 막의 팽창을 이겨내지 못하고 Fig. 2와 같이 위 아래로 굽혀지는 모습을 확인하였다.

전기-화학적 성능 측면에서 이와 같은 현상은 접촉저항을 키우게 하므로 성능저하를 일으킬 것이다. 반면 전해질 막에 대한 기계적 지지성능으로 보면, 수평방향 탄성계수(E)가 클수록 채널부위 지지성능은 좋고, 서브개스킷 부분 지지성능은 좋지 않은 것으로 나타났다. 이들은 반복적인 하중에 의해 초기 상태와 변형 상태를 반복적으로 거치게 된다. 그렇다면 이러한 현상들이 막의 내구성에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 응력분포 및 변화 경향을 살펴보았다.

실험을 통하여 전해질 막의 운전 중 변형 거동을 구현하였다. 전해질 막(MEA)과 기체확산층(GDL), 분리판을 적층하여 온도, 습도 조건을 해석과 동일한 조건으로 구현하였다. 전자현미경을 이용하여 촬영한 사진을 통해 전해질 막의 변위를 확인하였다. 이 변형 형상을 해석을 통해 얻은 변형 형상과 비교해 보기로 한다. Fig. 10은 해석 결과로부터 얻은 막의 최대 변위이다. 최대 변위는 $44.8\mu\text{m}$ 로 확인되었다. 그리고 Fig. 11은 실험을 통하여 전자현미경으로 촬영한 영상이다. 최대 변위는 $44.8\mu\text{m}$ 로 확인되었다. 이런 최대 변위의 차이는 $7.2\mu\text{m}$ 이다.

III. 피로수명

3.1 응력 변화 폭

Carbon felt-A, carbon felt-B 및 carbon paper 를 적용하였을 때, 각각에 대한 전해질막의 응력 변화 폭(stress range) 분포를 Fig. 12에 그래프로 비교하였다. 그림에서 가로축은 요소 번호(element number) 이고 세로축은 응력 변화 폭이다. 각각의 요소 번호에 대응하는 위치를 Fig. 13 을 통해 확인할 수 있다. 또한 여기서 응력 변화 폭은 연료전지 내부 온도, 습도 조건의 변화에 따라 운전 중일 때와 정지상태일 때의 응력 차이를 나타낸다. 기체확산층 종류별로 전해질 막의 변형이 크게 발생했던 경우에서 응력 변화 폭이 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 전해질 막의 기계적 내구성 측면에서 기체확산층의 수평방향 강도가 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있었다.

Tang의 실험에 따르면, 전해질 막의 응력 변화 폭은 1.5 MPa 수준으로 제한하고 있다[10]. 이 값을 넘어가게 되면 반복적인 변형으로 인하여 표면에 균열이 발생하고 누설(leak)이 일어난다고 하였다. 해석 결과를 비교해 보면 carbon felt-A 혹은 carbon paper 재질의 기체확산층을 사용할 경우 특정 부위에서 비교적 큰 응력 변화 폭을 나타내었다. Felt-A, carbon paper의 경우 각각 서브개스킷 접촉부분과 채널 부분에서 높은 응력변화폭을 보였으며 felt-B 에서 상대적으로 안정적인 내구성이 예측되었다.

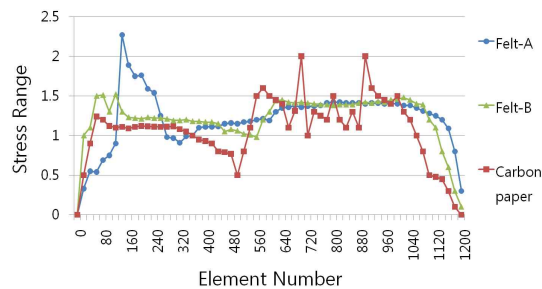


Fig. 12. $\Delta\sigma$ (stress range) of PEM

[deformed shape of the PEM]

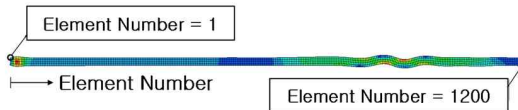


Fig. 13. Element number of deformed PEM

3.2 피로 수명 비교

나피온의 피로 특성에 대한 실험적 연구결과와 본 해석 결과와 비교하여 수명을 예측하여 본다. 본 연구에서는 나피온의 피로 특성은 운전조건에 따라 달라지지 않는다고 가정하였다. 또한 전해질 막의 화학적 열화 (chemical degradation)는 고려하지 않았으며, 운전조건에 의한 hygro-thermal stress의 영향에 대하여 기계적 피로수명을 예측 하였다. Fig. 14는 Nafion 막의 blister를 이용한 피로시험 데이터 이다[11]. 그래프에 나타난 응력변화 폭($\Delta\sigma$)-수명(N) 경향을 이용하여 3가지 해석모델에 대한 피로 수명을 예측한다. 데이터를 $\text{Log } N=1.29$ 지점을 기준으로 두 구간으로 나누었을 때 $\text{Log } N \geq 1.29$ 구간에 대하여 최소자승법을 이용하여 식(3)으로 나타내었다.

$$\Delta\sigma(\text{Stress Range}) = c_1 \text{Log } N + c_2 \quad (3)$$

$$c_1 = -0.5676, \quad c_2 = 3.83$$

Carbon Felt-A, carbon felt-B, carbon paper 각각의 경우에 대하여 계산된 전해질 막의 수명 예측 값(N_f)들은 다음 Table 2와 같다. 여기서 수명 값(N_f)은 연료전지 on-off 사이클의 수를 의미한다. 세 가지 기체확산층 중 felt-B를 사용한 경우에서 가장 큰 수명을 보였다. 이러한 on-off 사이클 수명을 연료전지자동차에 적용하여 수명을 예측할 수 있다. 만약 도시운전자

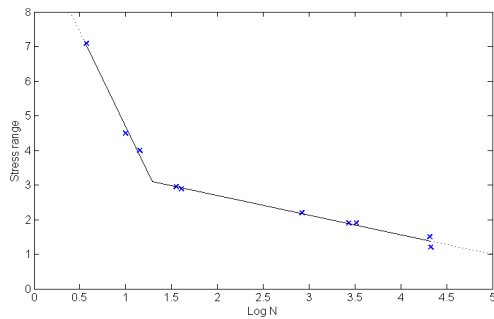


Fig. 14. S-N curve for Nafion

Table 2. Fatigue life of the PEM

GDL	Felt-A	Felt-B	Paper
$\Delta\sigma_{MAX}$ [MPa]	2.26	1.67	1.93
N_f (Cycle)	583.45	6389.94	2225.5

하루 평균 자동차를 3차례 on-off 하여 사용하면 carbon felt-A, carbon felt-B, carbon paper를 사용할 경우 대략적으로 각각 0.5년, 5.8년, 2년의 피로수명을 예상할 수 있다.

IV. 결 론

연료전지 운전-정지 사이클에 대해 전해질 막의 피로 수명을 예측하였다. 또한 어떤 기체확산층을 사용하는지에 따라 결과를 비교 하였다. 이로써 기체확산층의 강성과 전해질 막의 수명이 일관되게 정비례 또는 반비례 하지 않으며 적절한 수준의 강성이 요구되는 것을 알 수 있었다. 전해질막의 피로 시험 자료의 적용에 있어서 피로특성을 운전조건에 따라 동일하다고 가정하였다. 본 연구에서는 연료전지 내부의 복잡한 온도/습도 환경변화에 대해 응력 해석을 통해 살펴보고 그것을 피로시험 데이터를 통해 수명을 예측하는 일련의 과정에 대한 가능성을 검증해 보았다. 이 과정에서 피로하중이 집중되는 부위의 균열발생에 대한 상대적인 예측을 할 수 있었다.

참고문헌

- 1) Larminie, J. and Dicks, A., *Fuel Cell System Explained*, John Wiley & Sons, Ltd. 2000.
- 2) Weber, A. Z. and Newman, J., "A Theoretical Study of Membrane Constraint in Polymer-Electrolyte Fuel Cells", *American Institute of Chemical Engineers*, 50, pp. 3215 - 3226, 2004.
- 3) Craig, G., Yeh, H. L. and Daniel, M., "Durability of Perfluorosulfonic Acid Membranes for PEM Fuel Cells", *Fuel Cell Activities*, 2005.
- 4) Huang, X., Solasi, R., Zou, Y., Feshler, M., Reifsnider K., Condit D., Burlatsky S. and Madden, T., "Mechanical Endurance of Polymer Electrolyte Membrane and PEM Fuel Cell Durability", *Journal of Polymer Science, Part B, Polym Phys* 44, pp. 2346 - 2357, 2006.
- 5) Budinski, M., Gittleman, C., Lai, Y., Miller, D. and O'Leary, K., "Mechanical and Chemical Degradation in Automotive Fuel Cell Membranes", *International Workshop on Fuel Cell Degradation*, Greece, September 19-21, 2007.

- 6) Kusoglu, A., Karlsson, A. M., Santare, M. H., Cleghorn, S. and Johnson W. B., "Mechanical behavior of fuel cell membranes under humidity cycles and effect of swelling anisotropy on the fatigue stresses", *Journal of Power Sources* 170, pp. 345 - 358, 2007.
- 7) Yaliang, T., Anette, M. K., Michael, H. S., Michael, G., Simon, C. and William, B. J., "An experimental investigation of humidity and temperature effects on the mechanical properties of perfluorosulfonic acid membrane", *Materials Science and Engineering* A 425, pp. 297 - 304 2006.
- 8) Kleemann, J., Finsterwalder, F. and Tillmetz, W., "Characterisation of mechanical behaviour and coupled electrical properties of polymer electrolyte membrane fuel cell gas diffusion layers", *Journal of Power Sources* 190, pp. 92 - 102, 2009.
- 9) Lim, S. J., Park, G. G., Park, J. S., Sohn, Y. J., Yim, S. D., Yang, T. H., Hong, B. K. and Kim, C. S., "Investigation of freeze/thaw durability in polymer electrolyte fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 1-7, 2010.
- 10) Tang, H. L., Pan, M. and Wang, F., "A Mechanical Durability Comparison of Various Perfluorocarbon Proton Exchange Membranes", *Journal of Applied Polymer Science* 109, pp. 2671 - 2678, 2008.
- 11) Li, Y., Dillard, D., Case, S., Ellis, M., Lai, Y., Gittleman, C. and Miller, D., "Fatigue and creep to leak tests of proton exchange membranes using pressure-loaded blisters", *Journal of Applied Polymer Science* 194, pp. 873 - 879, 2009.