

고분자 전해질 연료전지 스택의 시일링 평가를 위한 체결 해석

김 대 영 · 김 정 민 · 김 현 영*

강원대학교 기계의용공학과

Assembly Analysis for Evaluation of Sealing in PEMFC Stack

Dae Young Kim · Jung Min Kim · Heon Young Kim*

Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea
(Received 5 November 2009 / Accepted 19 March 2010)

Abstract : The one of the major problems in the development of PEMFC was regarding to the assurance of sealing on stack. The failure on the sealing creates the problems of fuel leakage, mixing, internal combustion, damage on parts and can be a direct reason for the degrading the efficiency of fuel cell. This paper studies on the analytical approach for improving the contacting pressure distribution on the gasket at the evaluation on the sealing of fuel cell stack. So, the assembly analysis on multi layered fuel cell stack was performed. The research on the simplification of finite element model was performed for three dimensional analysis at the multi layered state. The improved contact pressure distribution was obtained through the case studies on gasket for better sealing. In addition, the number of the cell was determined for the effective analysis and the structural characteristics were evaluated based on this research.

Key words : PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Sealing(시일링), Leakage(누출), Gasket(가스켓), Stack(적층), Contact pressure(접촉압력)

1. 서론

연료전지(fuel cell)는 자원고갈과 환경오염 등의 문제에 대한 차세대 동력원으로서 세계적으로 주목을 받고 있다. 다양한 방식의 연료전지 중에서 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell)는 주로 수송용으로 개발되고 있고, 기본 단위인 단위셀(unit cell)을 바탕으로 적층(stack)되어 스택이 구성되며, 많은 출력을 필요로 할 경우, 수십장에서 많게는 수백 장의 단위셀이 적층된다.¹⁾ Fig. 1에서처럼 스택의 기본이 되는 단위셀은 일반적으로 분리판(separator), 가스켓(gasket), 막전극 접합체(membrane electrolyte assembly), 가스 확산층(gas diffusion layer), 엔드플레이트(end plate)로 구성되

며, 강한 압력으로 각 구성품들이 압착되어 체결된다. 이때, 압축력에 대해 가스켓은 적절한 범위 내에서 변형이 수반되고, 일정량이 변형된 이후에는 다른 구성품들 간에 접촉을 발생시켜 유로를 형성하며, 시일링(sealing) 성능을 유지할 수 있도록 해준다.

연료전지 스택의 성능을 평가하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소비되고, 시험에 의존한 경우가 많기 때문에 연료전지 개발을 위한 성능 평가에 한계가 있다. 최근에는 수치해석적인 방법으로 많은 연구가 진행되고 있지만, 이 방법 또한, 고분자 전해질 연료전지의 구조 특성으로 인해 어려움이 따른다. 고분자 전해질 연료전지는 활성면(active area)이 넓고, 두께가 얇은 구성품으로 이루어져 있기 때문에 스택 전체를 고려하여 모델링할 경우, 모델 크기가

*Corresponding author, E-mail: khy@kangwon.ac.kr

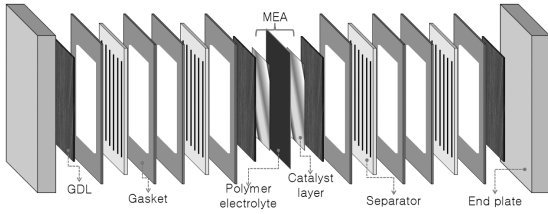


Fig. 1 Unit cell components of PEMFC

커지고 해석 시간이 증가된다. 또한, 기존의 많은 해석적 연구들은 유동이나 화학반응에 초점을 맞추어 왔으며, 막전극 접합체나 가스확산층이 주요 연구 대상이 되었다. 고분자 전해질 연료전지 개발에 있어 가장 큰 문제 중 하나인 시일링 문제는 체결 실패에 따라 다양하게 발생하며, 불충분한 체결 하중은 연료 누출(leakage), 섞임 현상(cross over), 내부 연소, 불안한 접촉력과 같은 문제의 원인이 되고, 과도한 체결 하중은 가스확산층과 막전극 접합체 등 고가의 스택 구성품에 심각한 손상을 발생시킨다.^{1,2)}

이와 관련하여 Shuo-Jen Lee 등은 소형 고분자 전해질 연료전지의 단위셀(unit cell)을 이용하여 체결에 대한 해석을 수행하였다.³⁾ 또한, 막전극 접합체와 가스확산층에 가해지는 압력값을 시험으로부터 측정하여 해석결과와 비교하였으며, 정확성을 확인하였다. 몇가지 원인으로 인해 실험값과의 차이를 보였지만, 스택 설계 및 구성품 치수에 대한 평가에 있어, 수치해석적인 접근 방법이 유용할 것으로 보였다. Attila Husar 등은 고분자 전해질 연료전지의 7 셀 상태에서 가스켓의 손상으로 인해 발생하는 누출과 섞임현상을 연구하였다.⁴⁾ 가스켓의 손상은 예기치 못한 스택 내부의 온도와 체결 압력등의 변화로 인해 발생한다는 것을 확인하였고, 가스켓 물성 저하(degradation)의 원인이 되는 것을 확인하였다. Andreas Vlahinos 등은 고분자 전해질 연료전지가 체결될 때 받게되는 하중이 가스켓의 단면과 밀접한 관련이 있다고 보고 가스켓에 대한 연구를 수행하였다.⁵⁾ 가스켓의 유한요소모델링을 위해 초탄성(hyperelasticity) 모델을 고려하였으며, 이를 바탕으로 시일링 성능을 향상시키기 위한 가스켓 단면 형상을 최적화하였다.

본 논문에서는 연료전지 스택의 시일링 평가를 위해 적층 해석에 관한 연구를 수행하였다. 우선

가스켓에 대한 응력-변형률 곡선 확보 후 변형률 포텐셜 에너지식을 결정하였고, 2차원 평면변형 모드(plane strain mode)에서 체결해석을 수행하였다. 또한, 적층상태에서 3차원 해석을 수행하기 위해 유한요소모델 단순화에 대한 연구를 수행하였으며, 시일링 향상을 위한 가스켓의 변수연구를 통해 향상된 접촉압력 분포를 확보하고자 하였다. 마지막으로, 스택의 전체 모델에 대한 유한요소모델의 효율적인 해석을 위해 셀 개수를 결정하였고, 이를 바탕으로 연료전지 스택의 구조적 특성을 평가하였다.

2. 재료 데이터 및 변형률 포텐셜 에너지식

2.1 재료 데이터

연료전지 가스켓은 일반적으로 탄성을 지닌 고무나 실리콘 재질로 제작되며, 내부 매니폴드부(internal manifold)와 활성면적을 감싸고 있다. 가스켓은 내유성, 내침투성, 내화학성 등의 특성을 가져야 하며, 절대로 파손되어서는 안된다. 본 연구에서는 NBR(nitrile butadiene rubber)계 고무를 사용하여 연구를 수행하였다. NBR계 고무는 주로 시일용으로 사용되며, 기계적 성질이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 가스켓의 재료모델 구성을 위해 단축인장(uniaxial tension) 시험과 평면변형률(plane strain) 시험을 수행하였으며, 응력-변형률 곡선을 구하였다. 또한, 분리판은 강도와 두께면에서 장점을 가지고 있는 금속분리판에 대해 적용하였으며, 사용된 재질은 스테인리스스틸(stainless steel)로 탄성계수(Young's modulus) 193.3GPa이고, 프와송비(poisson's ratio)는 0.33이다. Fig. 2는 금속분리판에 대한 소성영역의 진응력(true stress)-진변형률(true strain) 곡선을 나타내고 있다.

2.2 변형률 포텐셜 에너지식 검증

고무 재료와 같은 초탄성체의 기계적 거동은 전적으로 변형률 포텐셜 에너지식(strain potential energy equation)에 의해 결정되며, 해석적으로 이를 표현하기 위해서는 잘 알려진 몇가지 식을 이용할 수 있다. 응력-변형률 곡선을 가장 근접하게 표현할 수 있는 변형률 포텐셜 에너지식을 결정하기 위해

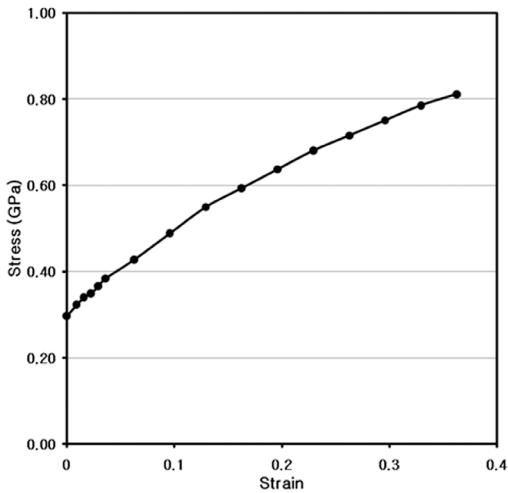


Fig. 2 Material property of stainless steel

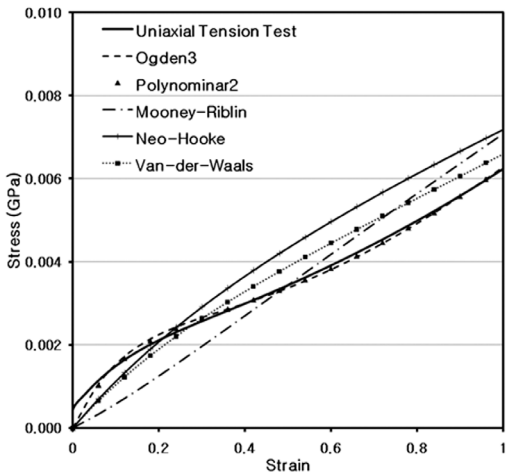


Fig. 3 Results of the material property verification analysis

단위체적 요소를 사용하여 검증 해석을 수행하였다. 실제 단축인장 시험과 평면변형률 시험에서 나타나는 변형상태를 표현하기 위해 8개의 노드점에 적절한 구속조건과 하중조건을 부여한 후 Fig. 3에서와 같이 각각의 응력-변형률 곡선을 비교하였다. Ogden 3차식과 Polynomiar 2차식이 가장 적합하였으나, 스택 체결해석에서는 Ogden 3차식을 사용하였다. 다음의 식 (1)은 Polynomiar 식이고, (2)는 Ogden식을 나타낸다. 여기서 I_i 는 λ_i 의 함수로서 불변량(deviatoric strain invariants)을 나타내고, λ_i 는 주 변형량(principal stretches)을 나타낸다. N 은 재료

파라미터이며, J^{el} 은 탄성 체적비(elastic volume ratio)이고, C_{ij} , μ_i , α_i , D_i 는 온도 관련 파라미터이다.^{6,7)}

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (1)$$

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (2)$$

3. 시일링 평가를 위한 체결 해석

스택 체결은 각 구성품을 정렬 시킨 후 엔드 플레이트로 고정시키는 방식이 대부분이다. 스택 시일링은 막전극 집합체와 가스 확산층의 두께가 가스켓과 분리판에 비해 상대적으로 얇고 강도가 약하기 때문에 가스켓 설계에 따라 그 성능이 결정된다. 따라서, 가스켓에 균일한 접촉압력이 작용하도록 하는 것이 중요하다.^{8,9)} 이에 본 연구에서는 연료전지 스택의 시일링 평가를 위해 체결시 가스켓에 작용하는 접촉압력을 평가하였다. 연료전지 면적의 대부분을 차지하는 활성면에 대해서는 평면변형 모드(plane strain mode)로 모델링을 한 후 해석을 수행하였고, 구조가 복잡한 매니폴드(manifold)부와 가스 유출입구(inlet and outlet)에 대해서는 3차원 유한요소모델로 해석을 수행하였다. 단위셀 상태에서 전체 형상을 고려한 모델과 매니폴드부만을 고려한 모델의 비교를 통해 단순화에 대한 검증을 수행하였다. 또한, 시일링 유지를 위한 가스켓 설계변수 연구를 수행하였으며, 접촉압력의 효과적인 평가를 위해 스택 구성시 필요로 되는 셀 개수를 결정하였다.

3.1 평면변형 모델 체결 해석

단위셀의 상당부분을 차지하는 반응면 단면의 변형 해석을 통해 체결 시 압축량과 그에 따른 유로 확보 문제를 평가하였다. Fig. 4는 단위셀 형상을 나타내고 있으며, 이로부터 평면변형 모델(plane strain model)을 구성하였다. 경계조건 및 접촉조건을 Fig. 5와 같이 적용하였으며, 가스 확산층과 막전극 집합체에 대한 유한요소모델은 간격에 따른 압력으로 표현하였다. Fig. 6과 같이 오링시험(O-ring test) 자

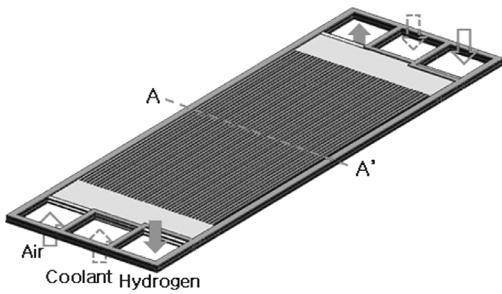
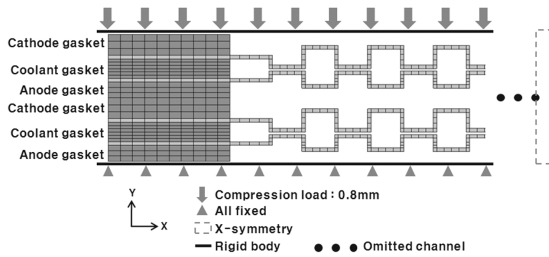
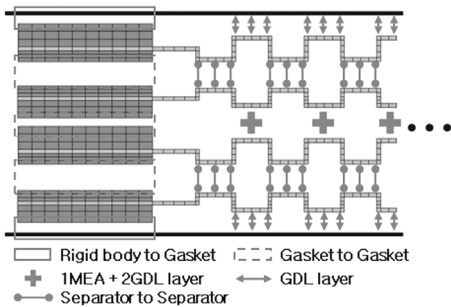


Fig. 4 Geometry of unit cell



(a) Boundary conditions of A-A' cross section



(b) Contact conditions A-A' cross section

Fig. 5 Boundary and contact conditions of plane strain model

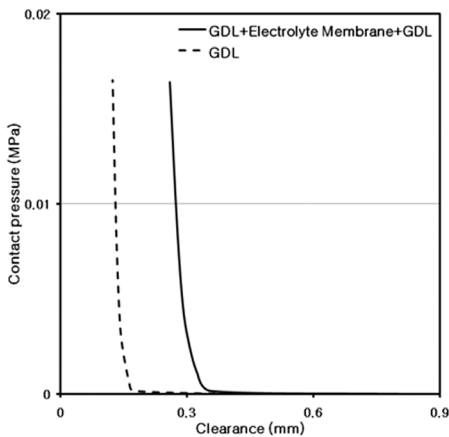


Fig. 6 Results of contact pressure in the O-ring test

료로 간격에 따른 압력 곡선을 확보하였다. 시험 자료는 1장의 가스 확산층에 대한 것과 가스 확산층 및 막전극 집합체가 결합된 결과를 분리하여 나타내었다. 체결 압축량은 각 가스켓의 변형량을 고려하여 전체 단위셀 두께의 약 16%로 압축변위 0.8mm를 부여하였다. 적층에 따라 분리판에 작용하는 접촉압력의 영향성을 확인하고자, 3셀, 5셀, 7셀, 9셀 모델을 구성하고, 동일한 경계조건을 바탕으로 각 모델 정중앙쪽 분리판의 접촉압력을 측정하였다.

3.2 평면변형 모델 체결 해석 결과

평면변형 모델에 대한 해석 결과, Fig. 7에서처럼 유로가 구성되었으며, 가스켓의 적절한 변형을 통해 각 구성품들 간의 접촉이 발생하였다. 체결 하중에 대한 평가를 위해 막전극 집합체와 가스 확산층의 변형량을 측정하였으며, 전체 두께의 약 34%가 변형되었음을 확인하였다. 일반적으로 가스 확산층이 30%정도 변형되었을 때, 화학반응이 가장 잘 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 해석에 사용된 체결 하중이 적합하다고 할 수 있다. 또한, 막전극 집합체와 가스 확산층이 접촉하고 있는 유로 부분의 접촉압력을 측정하였으며, 그 결과 Fig. 8과 같이 가스켓에 가까운 유로에서 불균일한 접촉압력이 발생하였고, 가스켓에서 멀어질수록 균일해지고 있음을 확인하였다. 이는 가스켓 부근에서 분리판의 변형량이 크다는 것을 의미하며, 굽힘에 의한 변형 결과다. 이때, 단위셀 상태에서의 접촉압력 분포는 여러장이 적층되어 있는 구조와는 상이하게 가스켓 부근에서의 접촉압력 변화가 크게 측정되었다. 이러한 결과는 엔드플레이트에서의 하중이 가스켓으로 전달되어 엔드플레이트와 인접해 있는 분리판을 가장 크게 변형시키기 때문에 나타난다. 이에 따라 단위셀로만 해석을 한 경우, 접촉압력을 측정할 분리판이 엔드플레이트의 하중을 직접적으로 전달 받

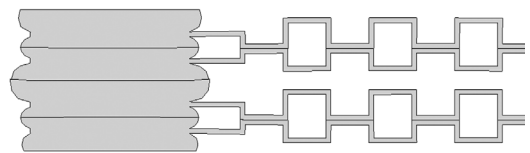


Fig. 7 Deformed shape of plane strain model

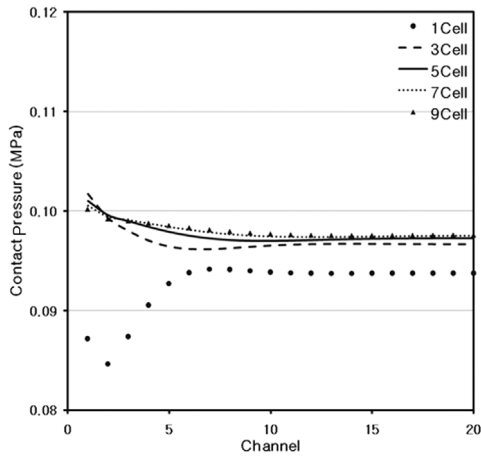


Fig. 8 Results of contact pressure on the channel about plane strain analysis

기 때문에 여러층을 적층한 구조물과는 상이한 접촉압력 분포를 나타내고 있다. 하지만, 불균일한 접촉압력은 적층된 셀의 개수가 늘어남에 따라 점차적으로 줄어들고, 적층되는 축상에서 중앙쪽으로 갈수록 접촉압력이 균일해지며, 엔드플레이트와 가까워질수록 불균일해진다.

3.3 3차원 체결 해석을 위한 모델 단순화

고분자 전해질 연료전지의 단위셀은 구성 부품이 많고, 체결시 넓은 면적에서 접촉이 발생한다. 따라서 3차원 체결해석에서는 해석시간 및 접촉에 대한 수렴성 등을 고려하여야 한다. 설계된 모델은 직선 유로를 갖는 단면이 일정한 형상으로 되어 있고, 길이 방향으로 좌우가 대칭인 것이 특징이다. 설계모델의 구조적 특징에 따라 대칭 조건을 적용할 수 있는 반 모델과 직선 유로 부분을 제외한 매니폴드부 모델로 나누어 단순화하였다. 매니폴드부는 형상이 복잡한 가스유출입구를 포함하며, 접촉압력 변화가 가장 크게 작용한다. Fig. 9는 3차원 반모델(half model)에 대한 경계조건을 나타내고 있다. 각 모델은 솔리드 요소를 사용하였으며, 가스켓과 분리판 사이의 접촉을 표현하기 위해 해당 면의 절점들을 공유시켰다. 접촉조건과 하중조건은 평면변형모델과 동일하게 적용하였으며, 막전극 접합체는 상대적으로 두께가 얇고 전체 강성에 미치는 영향이 작기 때문에 유한요소모델에서 제외하였다.⁵⁾

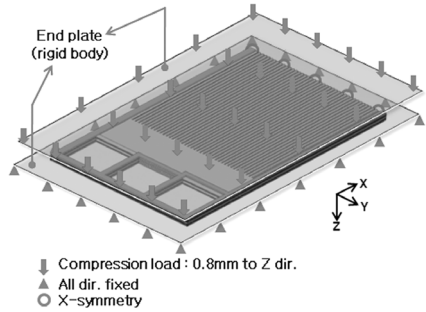


Fig. 9 Boundary conditions of 3D model

3.4 단순화 모델 평가

단순화된 매니폴드부 모델의 적합성을 판단하기 위해 반모델 결과와 서로 비교하였다. 이를 위해 응력 및 변형률의 최대값을 비교하였고, 설계 주요부인 가스유출입구에 대한 변형 양상을 확인하고자 반응면 가스켓에서의 접촉압력을 비교하였다. 두 모델의 응력 및 변형률값 차이가 발생하지 않았고, 접촉압력 또한 동일한 결과로 나타났다. 이는 직선 유로부가 매니폴드부 가스켓에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 단순화된 매니폴드부 모델이 적합한 모델임을 확인하였다. Table 1은 두 모델의 응력과 변형률, 접촉압력의 최대값 크기를 비교한 결과이고, Fig. 10은 반모델의 분리판 변형양상을 나타낸 것이다.

Table 1 Comparison of maximum stress, strain and contact pressure

		Stress	Strain	Contact pressure
Half model	Gasket	0.0323GPa	1.0032	0.0248GPa
	Separator	0.5806GPa	0.0134	
Manifold model	Gasket	0.0323GPa	1.0028	0.0248GPa
	Separator	0.5768GPa	0.0134	

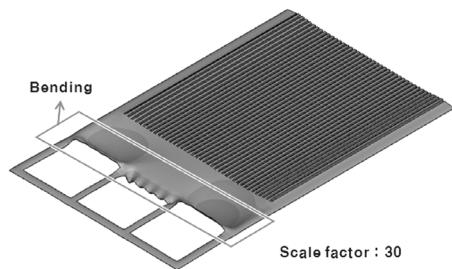


Fig. 10 Deformed shape of separator

4. 설계변수에 따른 영향성 평가

4.1 설계변수 선정

연료전지 가스켓의 가스유출입부는 변형이 크고 접촉압력 또한 불균일하여 설계시 중요부위가 된다. 따라서 가스켓 설계를 위해 Fig. 11과 같이 가스켓 영역을 나누어 설계인자들을 선정하였다. 또한, Table 2는 선정된 변수들의 범위를 나타내고 있으며, 선정된 변수는 설계 가능한 영역 내에서 범위를 설정하였다. 분리판 전체를 감싸는 외곽(exterior) 가스켓은 스택의 전반적인 시일링 역할을 하기 때문에 매니폴드부를 분리시켜주는 차단막(isolator) 가스켓이나 가스 유출입부 가스켓에 비해 면적이 커야한다. 또한 체결 시 그 크기가 너무 작게 설계되면 가스켓 간의 접촉이 어긋나기 때문에 가스켓 폭을 최소 2mm 이상으로 설정하였다.

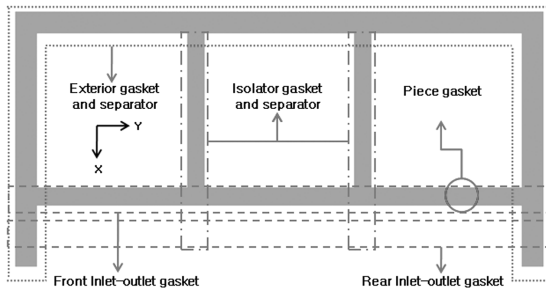


Fig. 11 Classification of gasket area

Table 2 Design factors and size for case study

	Case	Design factor	Size
Width of separator	Case1	Separators inside and outside manifold	4~6mm
Radius of corner	Case2	Between isolator gasket and front inlet gasket	10~20mm
Width of gasket	Case3	Exterior gaskets	4.5~5.5mm
	Case4	Isolator gaskets	3~5mm
	Case5	Inlet gaskets	3~5mm
	Case6	Piece gaskets	2~3mm
Clearance of gasket	Case7	Number of piece gasket	3~5
	Case8	Between front and rear inlet gasket	0~8mm

4.2 설계변수 연구 결과

설계변수 연구를 통해 Case3, Case4, Case6, Case7의 결과가 접촉압력에 영향을 미치는 것으로 나타

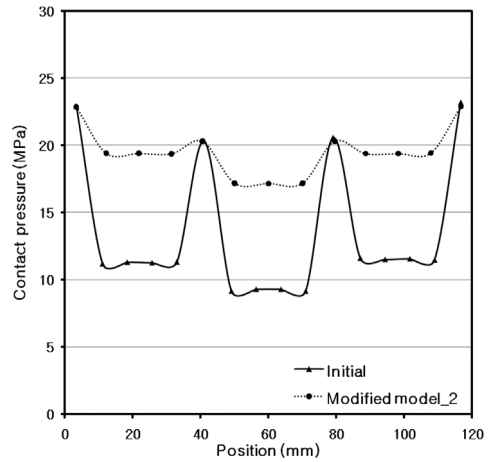


Fig. 12 Comparison of contact pressure distribution between initial model and modified model

났으며, 가스켓 폭과 조각(piece) 가스켓 개수가 유의한 변수임을 확인하였다. 또한, 가스켓 폭이 동일할수록 균일한 접촉압력 크기를 갖는 것을 확인하였지만, 차단막 가스켓의 경우에는 외곽 가스켓에 비해 더 큰 접촉압력이 발생하였다. 따라서 초기 모델보다 균일한 접촉압력 분포가 가능한 가스켓 형상을 확보하기 위해 모델을 수정하였다. 차단막 가스켓은 4mm, 그 외의 가스켓은 모두 5mm로 설정하였으며, 조각 가스켓의 개수는 3개로 설정하였다. Fig. 12는 초기 모델과 최종 수정된 모델의 접촉압력을 가스 유출입구에서 측정한 결과이다. 측정방향은 공기부쪽 외곽에서 수소부 외곽으로 Y축 방향으로 측정하였으며, 가스켓 중심부에서 발생하는 최대값들을 나타냈다.

5. 3차원 적층 해석

설계변수 연구를 통해 접촉압력이 향상된 수정 모델이 확보되었으며, 수정모델을 적용한 적층 해석을 수행하기 위해서 유한요소모델을 구성하였다. 하지만, 매니폴드부 모델을 이용하여 적층 체결 해석을 수행하기 위해서는 해석 시간의 문제를 해결해야만하기 때문에 더욱 단순화된 모델을 구성하였다. Fig. 13과 같이 가스 유출입구 부분만을 해석영역으로 설정하고, 유한요소모델링을 수행하였다. 냉각수 매니폴드의 중앙부분을 중심으로 양쪽이 대

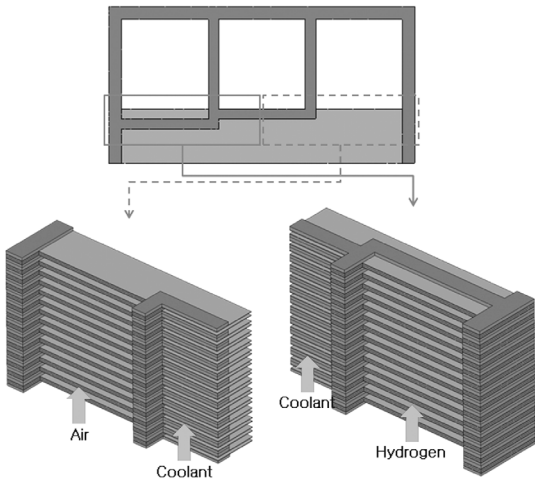


Fig. 13 7cell model and stack assembly analysis region

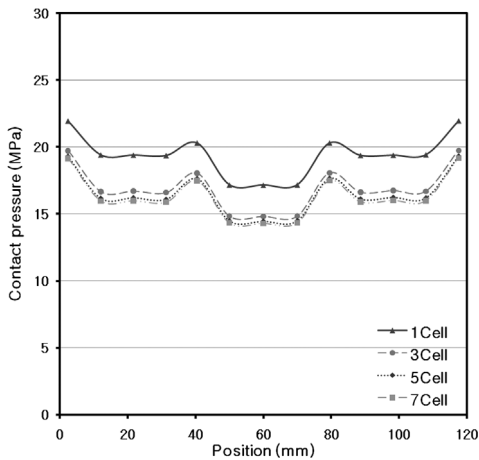


Fig. 14 Comparison of contact pressure on the center gasket in accordance with the number of cell

칭이라고 가정하였으며, 반 모델의 체결 과정에서 발생한 응력, 변형률, 접촉압력 분포를 단순화 모델과 비교해본 결과 최대값이 약 2%의 차이를 보였다. 하지만, 적층에 따른 효과를 확인하고, 스택 평가의 효과적인 셀 개수를 찾는 것이 목적이기 때문에 가스 유출입구 모델을 3셀, 5셀, 7셀로 구성하여 해석을 진행하였다.

적층 방향(z축)의 정중앙 가스켓 면에 작용하는 접촉압력을 측정하여 Fig. 14에 적층 개수별로 나타내었으며, 그 결과, 5셀 이상에서부터는 접촉압력의 차이가 크지 않음을 확인하였다. 따라서 적층에 따

른 효과를 고려하기 위해서는 최소 5셀 이상에서 해석이 수행되어야 한다. 5셀 이상에서의 접촉압력 분포가 동일하게 발생하게 되면, 유한요소해석 수행시에 적층된 셀 개수를 전부 고려하지 않고 5셀 상태에서 전체를 예측할 수 있다. 또한, 스택의 시일링 성능을 평가하는데 있어 가스켓에 작용하는 접촉압력이 중요하기 때문에 단위셀과 비교하여 적층 모델은 그 크기가 다를지라도 분포 양상이 비슷하기 때문에 단위셀의 접촉압력 분포 양상이 큰 의미를 가진다.

6. 결론

- 1) 연료전지 가스켓의 기계적 거동을 표현하기 위해 초탄성 재료 모델을 적용하였으며, 변형률 포텐셜 에너지식 검증을 통해, Ogdén 3차식과 Polynomiar 2차식이 가장 적합한 것으로 평가되었다.
- 2) 평면변형 모델의 체결 해석 결과, 부여된 하중에 대해 가스확산층이 약 34% 압축되었으며, 유로가 형성되었다. 유로의 접촉압력과 막전극 접합체의 압축량 분포가 가스켓쪽에서는 불균일하게 나타났지만, 가스켓에서 멀어질수록 균일해지고 있음을 확인하였다.
- 3) 가스 유출입구에서의 시일링 평가를 위해 솔리드 요소를 사용하여 반 모델과 단순화된 매니폴드부 모델로 나누어 3차원 해석을 수행한 결과, 두 모델의 응력 및 변형률, 접촉압력 분포가 거의 동일하게 발생하였다. 따라서 해석 시간과 모델 크기를 고려했을 때, 매니폴드부 모델이 효과적이다.
- 4) 단순화 모델을 이용한 단위셀의 체결 해석 결과, 가스켓이 접촉된 분리판은 굽힘 현상이 크게 작용하였으며, 가스 유출입구의 가스켓에 작용하는 접촉압력이 불균일하게 나타났다.
- 5) 설계변수 연구 결과, 가스켓 폭과 개수가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 이를 바탕으로 초기 설계안의 폭을 수정하여 접촉압력 분포가 향상된 설계안을 확보하였다.
- 6) 3차원 적층 체결 해석 결과, 적층 될수록 동일한 크기와 분포를 갖는다는 것을 확인하였다. 또한 단면에 대해 평가했을 때와 동일하게 5셀 이상에

서는 그 차이가 작기 때문에 스택을 평가하는데 최소 5셀 이상이 적용되어야한다.

References

- 1) J. Larminie and A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, 2nd Edn, WILEY, Milan, 2003.
- 2) W. Vielstich, A. Lamm and H. A. Gasteiger, Handbooks of Fuel Cells, WILEY, Milan, 2003.
- 3) S.-J., C.-D. Hsu and C.-H. Huang, "Analysis of the Fuel Cell Stack Assembly Pressure," Journal of Power Source, Vol.145, pp.353-361, 2005.
- 4) A. Husar, M. Serra and C. Kunusch, "Description of Fasket in a 7 Cell PEMFC Stack," Journal of Power Source, Vol.169, pp.85-91, 2007.
- 5) A. Vlahinos, K. Kelly, K. Mease and J. Stathopoulos, "Shape Optimization of Fuel Cell Molded-on Gaskets for Robust Sealing," The 4th International Conference on Fuel Cell Science, Proceedings of Fuel Cell, 2006.
- 6) ABAQUS Users Manual, 2006.
- 7) H. Y. Kim, C. Choi and W. J. Bang, "Large Deformation Finite Element Analysis for Automotive Rubber Components," Transactions of KSAE, Vol.15, No.1, pp.107-119, 1993.
- 8) W.-K. Lee, H. Ho, J. W. Van Zee and M. Murthy, "The Effects of Compression and Gas Diffusion Layers on the Performance of a PEM Fuel Cell," Journal of Power Source, Vol.84, pp.45-51, 1991.
- 9) J. Lee, I. Son, J. Yoon, Y. Kim, S. Oh and K. Ko, "Characterization of High Power PEMFC Stack for Passenger Car Application," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.2018-2023, 2008.