

연료전지스택 바깥판의 위상최적설계

최우석[†] · 오성진* · 김성종* · 흥병선*

Topology Optimization for End Plate of Fuel Cell Stack

Woo-seok Choi, Sung-Jin Oh, Sung-Jong Kim, and Byung-Sun Hong

Key Words : Fuel Cell(연료전지), MEA(Membrane and Electrode Assembly : 막전극집합체), End Plate(바깥판)

Abstract

A fuel cell is an electrochemical device in which the energy of a chemical reaction is converted directly into electricity. By combining hydrogen fuel with oxygen from air, electricity is formed, without combustion of any form. Water and heat are the only by-products when hydrogen is used as the fuel source. Fuel cell stack consists of multi-layered unit cells. A unit cell consists of MEA and bipolar plates. The end plate of fuel cell stack should give a uniform distributed pressure to multi unit cell layers so as to reduce the contact resistance and to prevent the leakage of reactant gases and the damage of multi layer components. The current end plate is redundantly large and heavy. It makes the power per unit volume reduced. Topology optimization of end plate is conducted for mass reduction and enhancement of bending rigidity. The evaluation of the current design and the recommendation for the future design is remarked.

1. 서 론

연료전지는 수소와 산소의 전기화학 반응을 통해 전기 및 열에너지를 생산하며 부산물은 물 뿐이므로 차세대 청정에너지원으로 주목받고 있다. 연료전지의 종류⁽¹⁾는 600℃ 이상의 고온에서 작동하는 용융 탄산염형 연료전지(MCFC, Molten Carbonate Fuel Cells) 및 고체산화물형 연료전지(SOFC, Solid Oxide Fuel Cells)와 200℃ 이하의 비교적 저온에서 작동하는 인산형 연료전지(PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cells), 고분자 전해질형 연료전지(PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cells) 등이 있다. 그 외에도 고분자 전해질 연료 전지와 달리 메탄올을 연료로 사용하는 직접메탄올 연료전지(DMFC, Direct Methanol Fuel Cells) 등이 있다. 이 중에서도 고분

자 전해질형 연료전지는 저온인 60-80℃에서 동작이 가능하며, 높은 전류밀도를 유지할 수 있으며, 빠른 시동능력과, 소형화 및 경량화가 가능해서 이동용 전원, 자동차용 전원, 가정용 열병합발전설비 등 다양한 분야에 적용되고 있다.

고분자 전해질형 연료전지는 막전극집합체(MEA)와 분리판(separator)으로 이루어진 단위전지 유닛(unit)을 여러 층으로 적층하여 스택(stack)을 구성하며, 이 적층하는 과정에서 MEA와 분리판에 균일한 압력을 제공해야만 접촉저항을 줄이고, 가스의 누설 및 전극의 균열을 방지할 수 있다. 현재 스택 체결의 일반적인 기구는 분리판 외곽에서 다수의 볼트를 사용하여 체결하고 있으며 이 과정에서 균일한 압축응력을 제공하기 위하여 불필요하게 크고 두꺼운 바깥판(end plate)를 사용하고 있어서 스택의 단위체적당 전력밀도를 낮추는 요인으로 작용하고 있다. 스택 체결기구의 핵심은 보다 경량화된 바깥판 및 적은 체결점으로 원하는 정도의 균일한 압축응력을 제공하는데 있으며 더욱 진보된 기술로는 스택 운전 시 발생하는 열팽창에 대응할 수 있는 기구를 갖추는 것이 바람직하다.

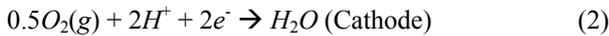
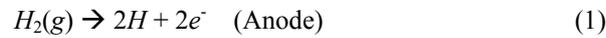
[†] 한국원자력연구소
E-mail : wschoi@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-8956 FAX : (042)868-8990

* (주)퓨얼셀파워
http://www.fuelcellpower.co.kr
TEL : (031)781-0477 FAX : (031)781-0476

본 연구에서는 연료전지 스택에 대하여 구조해석을 통해 그 설계를 평가하고 위에서 언급한 연료전지가 갖추어야 할 조건을 충족시키도록 하기 위한 방편으로 바깥판에 대한 위상최적설계⁽²⁾를 수행하였다.

2. 연료전지의 구조설명

연료전지에서 전기 화학 반응은 두개의 반응, 즉 산화전극(anode)에서의 산화반응과 환원전극(cathode)에서의 환원반응으로 구성되며 식 (1), (2)와 같다. 두개의 전극은 고분자 소재의 수소이온 교환의 특징을 가진 전해질 막에 의해 서로 분리된다.



고분자 전해질형 연료전지는 고분자 전해질막과 전극으로 이루어진 막전극접합체(MEA), 반응에 사용되는 가스를 전극에 전달하고, 반응 생성물을 배출하는 유체분배층(fluid distribution layer), 반응가스와 냉각수를 외부로부터 공급하며 산화전극(anode)과 환원전극(cathode)을 분리하는 기능을 하는 도전성 분리판(separator) 등으로 구성되어 있다. 연료전지 스택은 그림 1에 도시한 바와 같이 MEA와 유체분배층 및 분리판을 필요한 용량만큼 적층하여 구성하며, 스택은 바깥판과 stud 볼트 및 너트에 의해 적절한 압력이 가해지며 각 단위전지가 어긋나거나 미끄러짐 없이 일체형을 이루게 된다.

3. 스택체결기구에 대한 해석

3.1 스택체결기구의 유한요소모델 제작

구조해석을 위하여 그림 1의 개략도를 바탕으로 스택체결기구의 유한요소모델을 제작하였다. 바깥판의 모양은 평판 위에 방사선 모양으로 뿔어나간 방패연의 살과 같은 모양의 frame이 덧대어져 있는 모양이다. 각각의 판은 면접촉을 하고 있으므로 이를 감안하여 각각의 판과 판 사이에는 gap 요소를 넣어 면접촉을 고려하였다. 먼저 면접촉을 표현하기 위해 바깥판과 집전판(current collector), 그리고 집전판과 MEA Assembly 사이에 gap 요소를 사용하였다. 이를 위해서는 각각 마주보는 판의 절점의 위치가 동일해야 하며 육면체 요소를 사용하는 것이 좋다. 반면에 바깥판은 홈이 나있

기 때문에 육면체 요소를 사용하지 않고 사면체 요소를 사용하여 free mesh 하는 것이 편리하다. 그러나 사면체 요소를 사용하여 각각의 판에 요소생성을 수행하면 마주보는 판의 절점의 위치가 동일하지 않게 되기 때문에 면접촉을 표현하기 곤란하다. 그래서 이 두 가지를 모두 만족시키기 위해서

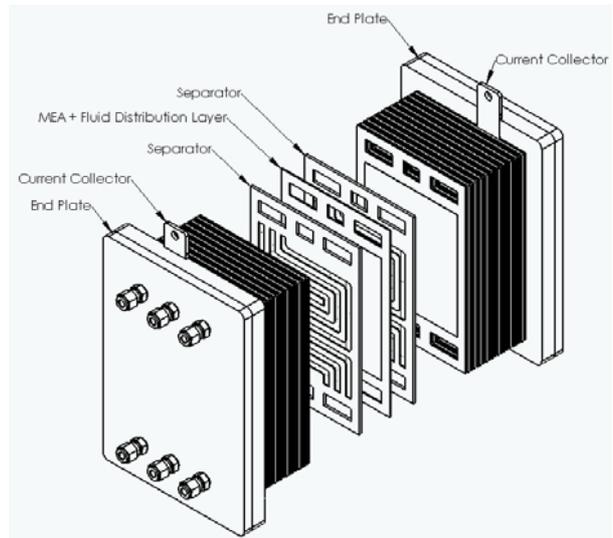


Fig. 1 Fuel Cell Stack

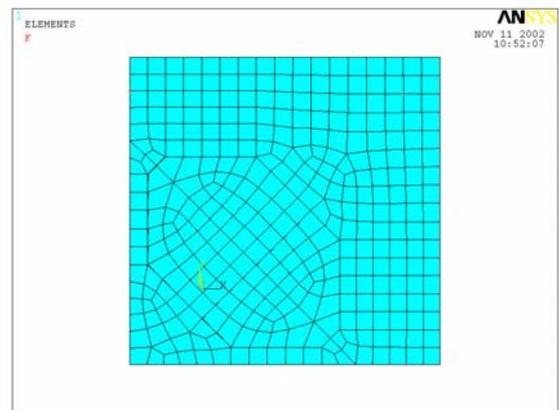


Fig. 2 Node information at base surface

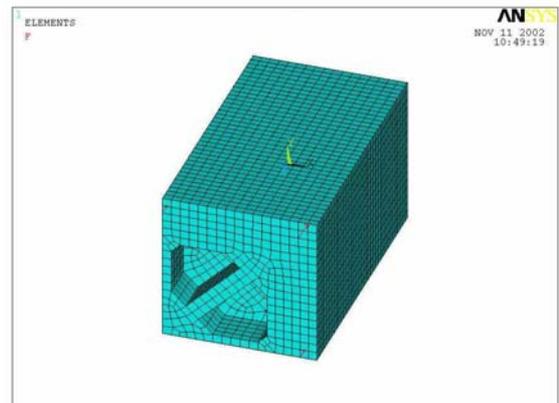


Fig. 3 1/8 symmetry finite element model

각각의 층에서 그림 2 와 같은 절점 및 요소정보를 갖는 판을 구성하였다. 이는 바깥판의 대칭구조를 고려한 1/4 부분이다. 이를 길이방향으로 extrude 시켜 다수개의 layer 를 적층하여 모델을 구성하였다. 그리고 바깥판의 홈이 있는 부분을 제외한 부분만을 다시 적층하여 frame 을 구성하였다. 다시 말하면 홈이 있는 부분을 미리 고려하여 한 층의 절점위치를 생성하였다. 이를 바탕으로 제작된 유한요소모델은 1/8 대칭모델이며 그림 3 에 나타나 있다. 유한요소모델은 solid 요소와 gap 요소로 구성되어 있다.

3.2 스택체결기구의 응력해석

생성된 유한요소모델을 가지고 주어진 하중조건과 경계조건하에서 응력해석을 수행하였다. 하중조건은 그림 3 에서와 같이 세 절점에서 볼트체결력을 작용하는 것이다. 모델을 위에서 보면 정사각형의 모양을 하고 있으며 유한요소 모델에서 하중이 작용하는 위치는 모서리 부분 한 지점과 대칭면 위의 두 지점에서 작용하는데 대칭면 위의 하중은 대칭조건을 고려하여 실제 작용하는 하중의 1/2 만을 작용하였다. 실제 모델에서는 한 변당 세 지점에서 하중이 작용하는데 모서리 부분의 하중은 공유하기 때문에 총 8 개의 지점에서 볼트로 체결된다. 경계조건은 1/8 대칭모델이므로 하중이 작용하는 면의 반대면을 구성하는 모든 절점의 모든 자유도를 구속하였고, 그림 3 에서 왼쪽면과 아랫면에 대칭조건을 적용하였다. 각각의 판에 대한 물성치는 표 1 과 같다.

해석결과는 그림 4~8 에 나타나 있다. 그림 4~6 은 각각의 판에 대한 Von Mises 응력을 나타낸다. 각각의 판의 최대응력은 표 2 에 나타나 있다. 바깥판의 최대응력은 상당히 높은 수준이나 하중이 작용하는 지점에서의 국부적인 응력이므로 실제 볼트 체결 구조를 생각할 때 위험한 수준은 아니라고 판단된다. 다른 판들도 판의 항복응력을 고려할 때 안전하다고 할 수 있다. 그림 7 은 gap 요소에 작용하는 반력을 나타낸 것이다. 즉, 면접촉 부위에서 발생하는 반력이다. 그림에서 알 수 있듯이 반력의 크기는 판의 중앙에서 가장 작고 중앙에서 멀리 떨어진 부분일수록 그 크기가 증가하여 흡사 타원형의 모양의 profile 을 갖는다. 또한 in-plane 하중도 존재함을 알 수 있다.

그림 8 은 MEA 판에서의 z-방향의 응력을 나타낸다. 최대 응력의 크기는 -7.1 MPa 이지만 전체적으로 σ_{req} MPa 대에 분포하므로 요구되는 조건에 근접하고 있음을 알 수 있다. 하지만 판의 중앙과 가장자리 쪽의 응력사이엔 큰 편차가 존재하므로

이를 최소화하는 것이 성능향상을 위해 필요하리라 생각된다.

4. 바깥판에 대한 위상최적설계

4.1 위상최적설계 문제 정의

스택체결기구의 현안 가운데 하나는 바깥판의 굽힘강성을 보강하여 MEA assembly 에 고른 압력 분포가 이루어지도록 하는 것이다. 이론상으로는 무한평판의 매우 단단한 바깥판을 사용하면 되지만

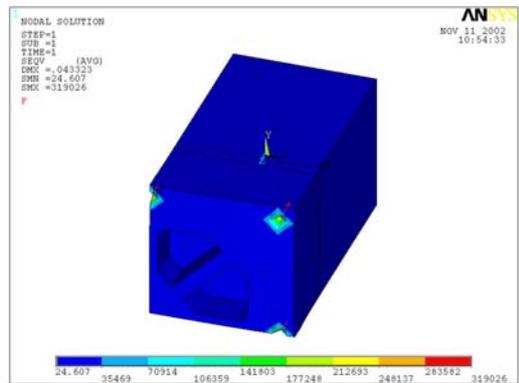


Fig. 4 Von Mises stress of end plate

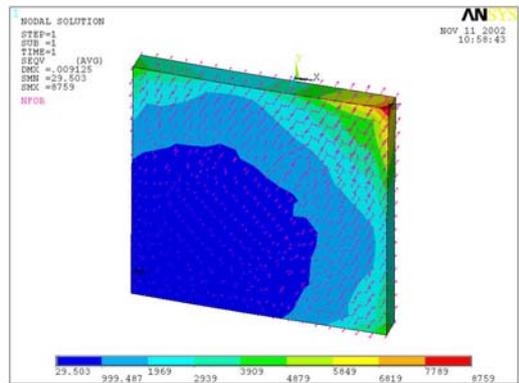


Fig. 5 Von Mises stress of current collector

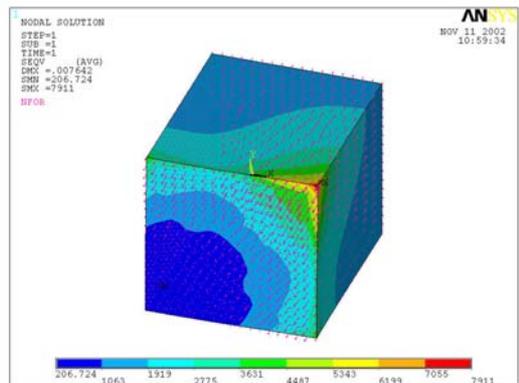


Fig. 6 Von Mises stress of MEA assembly

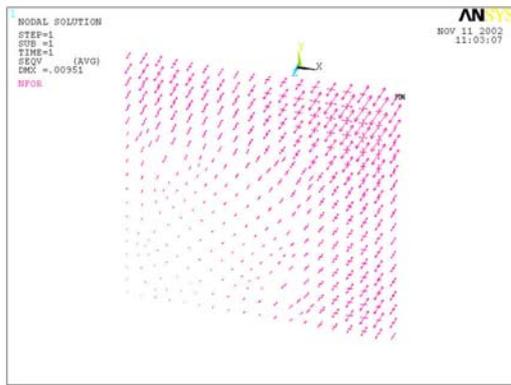


Fig. 7 Reaction force

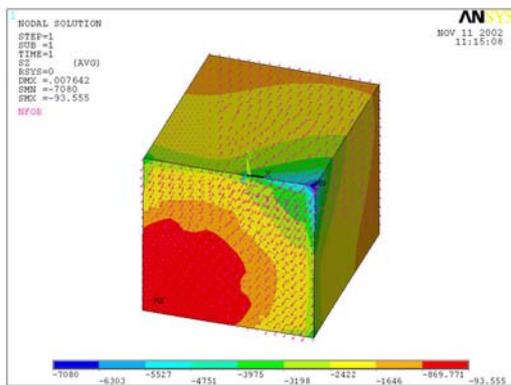


Fig. 8 Stress in z-direction of MEA assembly

Table 1 The material properties of plates

	Material	E(GPa)	ν	ρ (kg/m ³)
End Plate	Aluminum	69	0.33	2700
Collector	Aluminum	69	0.33	2700
MEA	Graphite	4.8	0.01	2250

Table 2 The maximum stress and the yield stress

	Max. stress	Yield stress
End Plate	319 MPa	35~500 MPa
Collector	8.8 MPa	35~500 MPa
MEA	7.9 MPa	175 MPa

현실적으로 불가능하므로 체결력이 작용하는 위치를 고려하여 굽힘강성을 극대화하는 바깥판을 설계해야 한다. 또한 현실계는 스택체결기구의 전체 중량 대비 바깥판의 중량이 상당히 크므로 연료전지 스택의 단위체적 혹은 단위중량당 전력밀도를 증가시키기 위해서는 바깥판의 중량감소가 이루어져야 한다. 이러한 바깥판의 경량화 요구에 따라 중량 및 부피는 줄이면서 성능은 증가시키는 설계의 필요성이 증대되었다. 따라서 바깥판에 대한 위상최적설계를 수행하여 설계개선 가능여부를 판단하기로 하였다.

최적설계시 설계영역은 바깥판에서 집전판과 접하는 맨 아래 일정부분을 제외한 나머지 부분으로

선택하였다. 이는 맨 아래 부분은 반력이 작용하는 부분으로 이 부분을 설계변경시 제거할 수는 없다는 공학적 직관에 의한 것이다. 바깥판은 대칭구조이므로 이를 고려한 1/4 대칭 유한요소모델을 사용하였다. 즉 판의 중심을 기준으로 우측상단의 1/4 부분만을 선택하였다. 하중조건은 수직아래 방향으로 작용하는 3 곳에서의 볼트 체결력과 3 장에서 유한요소해석을 통하여 얻은 그림 7의 면압형태의 반력이다. 그림 7에서 보면 반력은 수직방향의 성분 이외에 판의 평면 방향의 in-plane 반력도 존재하고 있다. 경계조건은 모델의 대칭성을 고려한 경계조건과 강제운동을 방지하기 위해 중심의 한 꼭지점에서의 모든 변위를 구속하는 것이다. 이는 그림 9에 나타나 있다.

위상최적설계를 위한 정식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Find} & \quad \rho \\ \text{Minimize} & \quad f(\rho) \\ \text{Subject to} & \quad g(\rho) \leq 0 (\Omega \text{ is given}) \end{aligned}$$

설계변수 ρ 는 요소의 밀도이고, $f(\rho)$ 는 설계변수의 함수로 표현되는 목적함수이다. $g(\rho)$ 는 설계변수의 함수로 표현되는 제한조건이다. 주어진 조건 하에서 굽힘강성을 최대화하는 것은 변형에너지를 최소화하는 것과 동일한 의미를 가지므로 목적함수로 변형에너지를 선택하였고, 제한조건으로는 현실계 대비 최적해의 질량비를 각각 선택하였다.

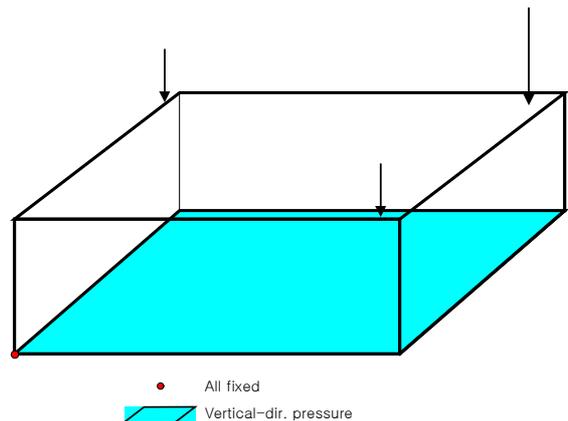


Fig. 9 Diagram of end plate for topology optimization

4.2 위상최적설계 결과

4.1 절의 정식화에 따라 최적설계를 수행하였다. 이를 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS⁽³⁾를 사용하였다. 스택체결기구의 바깥판에 대한 위상최적설계를 수행한 결과는 그림 10~12에 나타나 있다. 그림 10은 전체 모델에 대한 위상최적설계 결과이다. 그림에서 붉은색으로 표현되는 부분은 남아

있어야 할 부분을 의미하고 파란색으로 표현되는 부분은 제거할 수 있는 부분을 의미한다. 중심에서 모서리를 잇는 대각선 부분이 붉은색으로 표현되어 있고 대칭면 위에 있는 하중작용지점도 붉은색으로 표현되어 있다. 그림 10 만으로는 판의 두께 방향의 결과를 볼 수 없으므로 판의 위쪽을 1/2 두께만큼 제거한 나머지 판에 대한 결과를 그림 11에 나타내었다. 그림 11에서 중앙부분이 파란색을 나타내므로 최적설계 결과가 중공을 의미

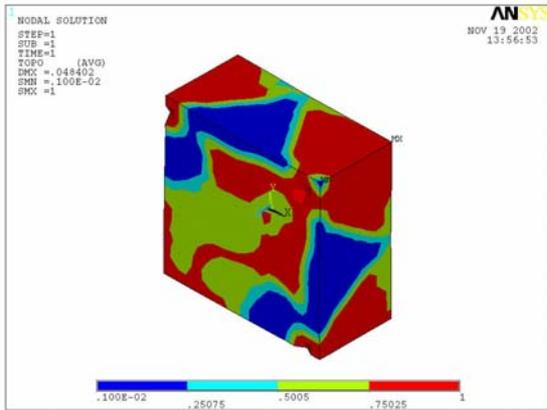


Fig. 10 The result of topology optimization 1

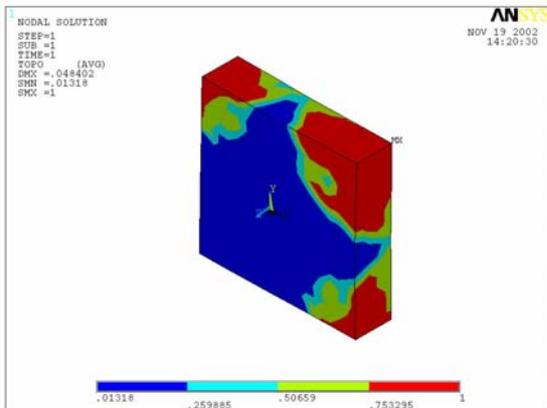


Fig. 11 The result of topology optimization 2

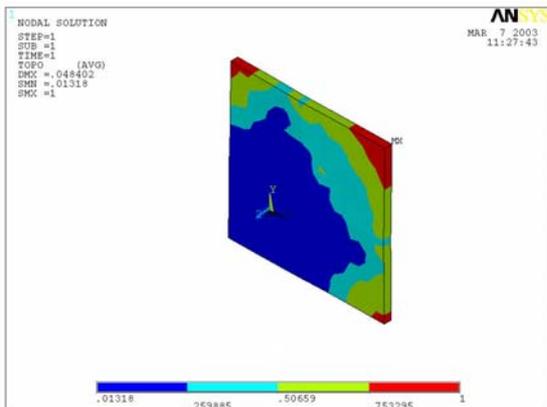


Fig. 12 The result of topology optimization 3

하고 있음을 알 수 있다. 그림 12는 판의 맨 뒷부분의 결과를 나타낸다. 역시 중앙부분이 제거될 수 있음을 알 수 있다. 4.1 절에서 설계영역으로 선택한 부분은 맨 아래 일정부분을 제외한 나머지 부분이었으므로 바깥판 전체로 보면 최적해는 중공의 판을 나타내며 윗판과 아랫판을 판의 중심부를 제외한 3곳의 모서리에서 연결한 모양이다.

4.3 일정한 수직방향의 면압형태의 반력을 하중 조건으로 고려한 위상최적설계

4.2 절에서 얻은 최적화 결과와 비교할 때, 현재 스택의 바깥판의 모양은 평판위에 방사선 모양으로 뿔어나간 방패연의 살과 같은 모양의 frame 이 덧대어져 있는 모양이다. 이와 유사한 설계는 중량을 감소시키고 바깥판의 굽힘강성을 증가시키기 위해 외국의 연료전지 생산업체에서 채택된 바 있다. 현설계와 최적해 사이의 차이를 가져온 원인을 분석하고 현설계의 설계타당성을 검토하기 위해 하중조건을 여러 가지로 변경하면서 최적설계를 수행하였다. 4.2 절에서 사용한 하중조건은 3장의 해석에서 얻은 반력을 그대로 사용한 것이다. 하중조건에 사용한 반력에는 타원형 모양의 분포를 갖는 수직방향 면압 성분과 수평방향의 in-plane 성분이 동시에 존재하고 있다. 본 절에서는 이 중에서 수평방향의 반력을 무시하고 수직방향의 반력을 일정한 크기로 가정하여 가정된 하중조건하에서 최적화를 수행하였다. 그 결과는 그림 13과 같다. 최적해에서 mesh가 엉킨 듯이 복잡한 부분은 질량은 감소시키면서 최대한 굽힘강성을 유지하기 위해 중공이 된 부분이며, mesh의 변화가 없는 부분은 두께 방향으로 짝 차 있는 부분이다. 이 형태는 굽힘강성을 증가시키기 위하여 중공의 모양을 가지며 중앙에서 방사선 모양으로 뿔

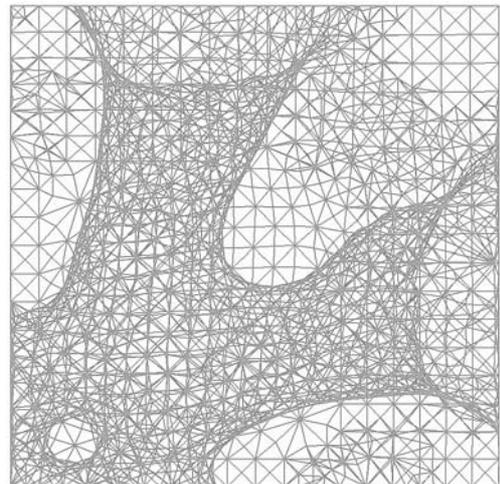


Fig. 13 The result of other topology optimization

어진 모양의 살들이 윗판과 아랫판을 연결하는 모양을 나타낸다. 실제로 증공의 판을 제작하기 어려우므로 방사선 모양의 frame 을 위쪽으로 옮겨 보면 현재의 설계와 매우 유사한 모양으로 표현된다. 따라서 현 설계는 수직방향의 일정한 면압을 하중조건으로 적용하고, 제작성을 고려한 조건하에서의 최적설계의 결과와 유사하다고 볼 수 있다.

4.4 수평방향의 반력은 무시하고 타원형 모양의 수직방향 면압만을 하중조건으로 고려한 위상최적설계

4.3 절에서는 일정한 수직방향의 면압형태의 반력만을 하중조건으로 고려하여 위상최적설계를 수행했고 그 결과에 대하여 고찰하였다. 그러나 실제로 해석을 통해 얻은 수직방향의 반력의 형태는 일정한 면압이 아니라 타원형에 가까운 면압이므로 본 절에서는 이를 하중조건으로 적용하여 위상최적설계를 수행하였다. 이 때 3 장의 해석에서 반력으로 계산된 수평방향의 in-plane 면압은 하중조건으로 고려하지 않았다. 즉, 본 절에서의 하중조건은 4.2 절의 하중조건에서 수평방향의 반력만을 제외한 것이다. 그 결과는 그림 14 와 같다. 이 형태 역시 굽힘강성을 증가시키기 위하여 증공의 모양을 가지며 위판과 아랫판을 연결하기 위해 모서리에서 큰 원형모양의 연결부가 존재함을 알 수 있다. 판의 중앙에는 적은 면압이 작용하고 모서리 부분으로 갈수록 큰 면압이 작용하므로 이를 견디기 위해서 모서리 부분의 연결부위가 보강되었고 판 중앙부분은 연결부가 사라졌음을 알 수 있다. 이 결과에 바탕한다면 현 설계는 일정한 면압을 고려한 설계이고, 타원형의 수직방향 면압을 고려한다면 모서리 부분이 현재보다 보강되는 방향으로 설계변경이 진행되어야 함을 시사한다고 할 수 있다. 이 전 절들에서와 마찬가지로 제작성

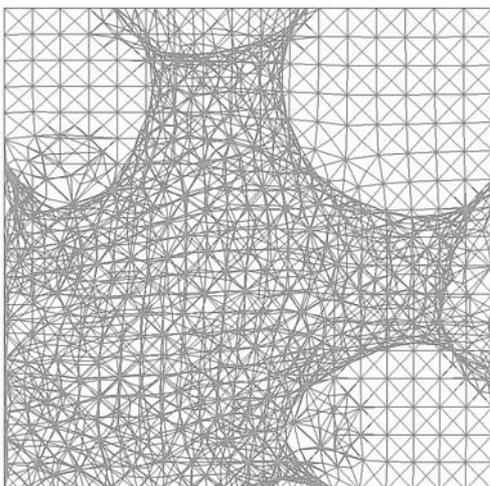


Fig. 14 The result of other topology optimization

을 고려한다면 모서리의 보강부분을 위쪽으로 옮겨 frame 을 구성해야 하는데 이렇게 구성된 설계에 대한 평가가 이루어지기 위해서는 세부적인 해석이 필요하다.

5. 결 론

현재 설계에 대한 유한요소모델을 제작하였고 응력해석 및 최적화를 통하여 현재 설계에 대한 평가가 이루어졌고 현재설계에서 개선해야 할 방향을 제안하였다. MEA assembly 에 작용하는 압력이 대체적으로 요구되는 크기에 근접하고 있으나 편차가 존재하기 때문에 바깥판의 굽힘강성을 증가시키는 방향으로의 설계개선이 필요하였다. 유한요소해석을 통해 접촉부위에서의 반력을 계산하여 이를 최적설계시 하중조건으로 적용하였다. 하중조건을 여러 가지로 변환하면서 최적설계를 수행하였고 아래와 같은 사실들을 확인할 수 있었다.

(1) 현재 설계는 접촉면에서 반력으로 작용하는 면압 중에서 일정한 크기의 수직방향의 면압형태만을 고려하여 얻은 설계를 제작성을 고려하여 적절히 변경한 것이라 할 수 있다.

(2) 실제로 작용하는 면압에는 타원형 모양의 수직방향 면압과 수평방향의 면압이 함께 존재한다. 타원형 수직면압을 고려한 최적설계는 현재 설계에서 모서리 부분이 보강되는 설계로 표현된다. 수평방향의 면압은 해석을 통하여 볼 때 스택의 체결기구에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단된다. 그러나 차후 이 부분에 대한 해석이 필요할 것이라 사료된다.

(3) 최적설계의 결과로서 얻은 설계값을 제작성을 고려한 설계로 변환하는 것은 또 하나의 큰 과제이다. 따라서 제작성을 고려한 설계로의 전환시 유의점들을 파악하는 이를 고려하는 방법으로 문제를 해결할 수도 있고, 처음부터 제작성을 고려하여 유한요소모델을 제작하고 그 밖의 고려사항은 제한조건으로 적용하여 최적설계를 수행할 수도 있다. 향후에 최적해에 대한 해석이 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) James Larminie, Andrew Dicks, 2002, *Fuel Cell Systems Explained 1st Ed.*, Wiley, pp. 10-12
- (2) Bendsoe, M.P. and Kikuchi, N., 1988, "Generating Optimal Topologies for Structural Design Using a Homogenization Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71, 197-224.
- (3) ANSYS, Inc., "ANSYS User's Manual", 2001.