

# 직교이방성 연료전지 스택의 유한요소 해석

전지훈\* · 황운봉\*\* · 조규택\*\*\* · 김수환\*\*\* · 임태원\*\*\*

## Finite Element Analysis of Fuel Cell Stack with Orthotropic Material Model

Ji Hoon Jeon\*, Woonbong Hwang\*\*, Kyu Taek Cho\*\*\*, Soowhan Kim\*\*\*, and Tae Won Lim\*\*\*

**Key Words:** 연료전지 스택(fuel cell stack), 유한요소법(FEM), 접촉 면압(contact pressure)

### Abstract

Mechanical behavior of a fuel stack was studied by the orthotropic material model. The fuel stack is mainly composed of bipolar plate (BP), gasket, end plate, membrane electrolyte assembly (MEA), and gas diffusion layer (GDL). Each component is fastened with a suitable pressure. It is very important to maintain a suitable contact pressure of BP, because it affects the efficiency of the fuel cell. This study compared mechanical behavior of various fastening types of the fuel cell stack. Bar, band, and modified band fastening type are used. The band fastening type showed that it reduces total volume of the cell, but it does not improve the contact pressure distribution of each BP. The modified band fastening type was designed by considering the deformations of band fastening type, and it showed a good enhancement of contact pressure distribution.

### 1. 서 론

석유 자원으로 인한 환경 공해 및 석유자원의 고갈에 따른 에너지 문제를 해결하기 위하여 많은 현재 많은 시도가 이루어지고 있다. 풍력, 태양열, 조력 등 많은 자연 자원을 이용하려는 시도가 있지만, 효율이 극히 낮다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결할 현실적인 대안 중의 하나가 수소에너지의 사용이다. 그 중에서도 연료전지는 수소 에너지 사용의 핵심기술이다. 연료전지는 다른 석유 대체 에너지 기술보다 효율은 높지만 상용화를 위해서는 성능향상의 연구가 절실히 필요한 상황이다. 연료전지는 물의 전기분해

반응의 역반응을 이용한 것이다. 특정한 전해질 사이에 한쪽에는 산소 한쪽에는 수소를 두면 적당한 압력과 온도에서는 반응을 하며 그 결과 물과 전기에너지가 발생된다.

연료 전지 스택의 일반적인 구성요소 및 기능은 다음과 같다. 분리판(bipolar plate, BP)은 수소나 산소의 통로이다. 전극 전해질 어셈블리(membrane electrolyte assembly, MEA)에서는 산소와 수소가 전기화학 반응을 일으키는 부분이다. 가스확산층(gas diffusion layer, GDL)은 분리판을 통과한 가스가 MEA로 이동하기 전에 넓은 면적에 대해서 확산이 잘 이루어지도록 하기 위한 층이며 탄소 섬유나 종이로 이루어져 있다. 또한 분리판에는 가스가 외부로 새지 않도록 가스켓을 사용한다. 1개의 MEA에 2개의 분리판이 있고, 그 사이에 GDL이 있으면 전기화학반응이 일어날 수 있다. 이 조합을 단위 셀이라 하며, Figure 1에 대략적인 개요를 보였다. 1개 셀의 사용 전압은

\* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

\*\* 포항공과대학교 기계공학과

\*\*\* 현대자동차(주)

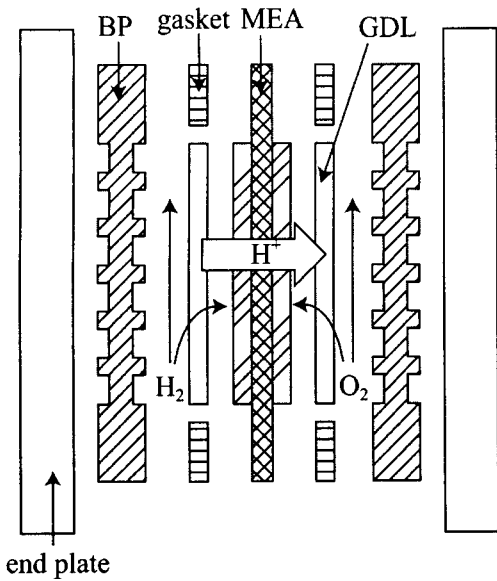


Figure 1 Single unit of fuel cell stack

0.6 ~ 0.7 V 가 되며, 전압을 높이기 위해서는 스택을 직렬로 적층한다. 보통 적층 개수는 수십 개에서 수백 개이다. 이러한 연료전지 스택의 성능 향상 및 개발을 효율적으로 수행하기 위해서는 유한요소법이나 전산유체역학을 사용할 수 있다. 하지만 분리판의 유로가 매우 복잡하게 형성되어 있고 매우 많은 수의 스택이 적층이 되기 때문에, 이를 전산 해석을 수행하기가 어렵다. 전산유체역학을 이용하여 연료의 압력분포나 속도등을 해석한 경우에도 전체 스택에 대해서 해석한 사례는 없고, 단일 셀에 대해서 해석한 사례만 있는 실정이다. 또한 유한요소법을 이용하여 다수의 스택 구조물의 거동을 해석한 사례도 아직 없다. 추후 컴퓨터의 성능이 향상되면 더 복잡한 조건을 두어서 해석 할 수 있지만, 본 연구에서는 10개 정도의 매우 형상이 복잡한 분리판을 직교이방성 복합재료로 단순화하여 유한요소법으로 모델링하고, 연료전지 스택의 거동을 분석하여 연료전지 스택의 효율을 높이는 방안에 대해서 살펴보고자 한다.

연료전지의 효율 향상을 위해서는 분리판과 분리판 사이의 접촉 면압이 중요한데 일정한 접촉 면압을 유지하고 있어야 한다. 접촉 면압이 너무 큰 경우에는 접촉면 증가에 따른 전기저항이 감소하는 장점이 있지만, 분리판 돌출부에서는 전기화학 반응이 일어나지 않는 단점이 있다. 또한 접촉 면압이 너무 작은 경우에는 분리판 돌출부

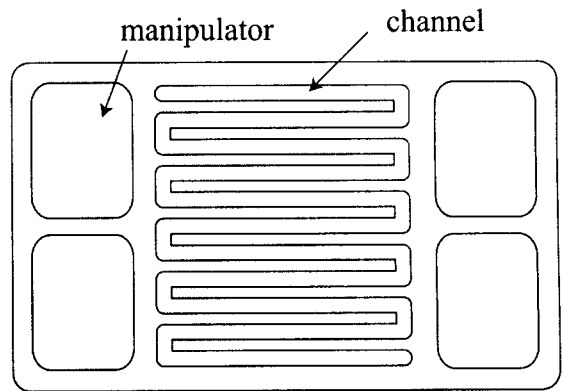


Figure 2 Schematic view of bipolar plate

에도 전기화학 반응이 일어날 수 있지만, 접촉면 감소에 따른 전기저항이 증가한다. 따라서 분리판 사이의 접촉면압에 따라 전기화학반응이 영향을 받으며, 최적이 되는 면압이 존재한다. 하지만 스택을 수십, 수백 개를 적층하는 경우 적층시의 오차 때문에 접촉 면압을 일정하게 유지하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 기존 연료전지 스택의 체결구조에 따른 접촉 면압을 유한요소 해석하였고 엔드 플레이트 형상을 변형하여 접촉 면압의 분포를 개선시키고자 하였다. 또한, 분리판의 복잡한 형상을 직교이방성인 복합재료로 단순화하여 효율적인 해석을 하였다.

## 2. 개별 부품 물성 평가

### 2.1 분리판

Figure 2와 같이 분리판에는 연료가 흐르기 위한 유로(channel)가 존재하며, 이를 일일이 모델링하는 것은 비효율적이다. 분리판은 외부 체결 요소에 의하여 굽힘하중을 받을 가능성이 있으며, 대체적으로 한 방향으로 구성되어 있다. 따라서 분리판의 유로가 형성된 부분을 하나의 직교이방성 복합재료의 물성으로 대체할 수 있다.

유로가 형성되어 있는 방향으로 한 개의 강화섬유(fiber)가 형성되어 있다고 하고, 유로가 있는 부분과 없는 부분의 비를 계산하고, 혼합법칙(Rule of Mixture)을 이용하여, 각방향의 물성을 추정하였다. 또한 분리판을 여러 개의 층으로 분리하고 각층의 유로가 형성된 방향으로 직교이방성인 요소를 이용하여 한 개의 분리판 유한요소

모델을 생성시켰다. 따라서 이 모델에 인장 및 전단 해석을 하여, 각 방향의 영률, 포아송비, 전단계수 등을 추정하였으며, 이를 전체 스택 구조 해석에 이용하였다. 이 해석은 선형해석이기 때문에 SolidWorks로 모델링 한 후 CosmosWorks로 해석하였다.

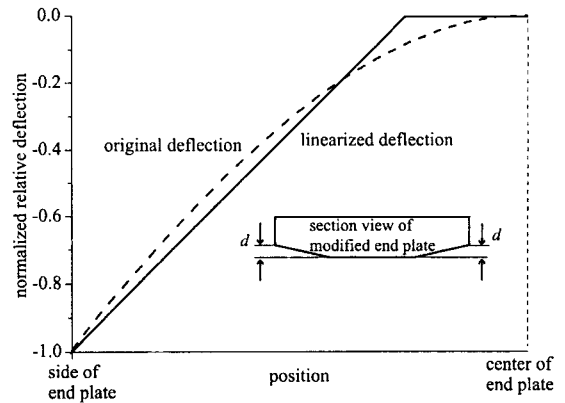


Figure 3 Deflection of end plate

## 2.2 가스켓

분리판과 분리판 사이에 연료의 유출을 방지하게 위하여 쓰이는 가스켓은 압축실험을 하여 변위-하중곡선을 유한요소 해석에 사용하였다. 전체 체결 구조 해석 시에는 모델이 복잡하고 접촉면이 많기 때문에 ABAQUS/Standard를 사용하였다. 가스켓 같은 재료는 유한요소 해석이 까다롭기 때문에, 고부해석 시 일반적으로 사용하는 초탄성 재질의 물성을 사용한 해석을 하지 않고 가스켓 전용 요소를 사용하여 해석하였다.

## 2.2 MEA 및 GDL

MEA는 다른 요소에 비해 매우 얇기 때문에 해석시 고려하지 않았으며, GDL의 압축실험만 수행하였다. MEA와 GDL은 두 개의 분리판 사이에 놓여져서 압축하중을 받는다. 따라서 분리판은 GDL에 의하여 접촉면압을 받는다. GDL이 분리판에 비해서 얇고, 천이나 종이와 같은 재료로 만들기 때문에 적합한 재료 모델을 설정하기 힘들다. 따라서 전체 구조해석시에는 MEA를 직접 모델링 하지 않고, 분리판과 분리판 사이의 간격에 따라 접촉면압이 작용하도록 설정하였다.

## 2.2 그 외의 부품

엔드 플레이트, 체결봉, 집전판(current collector)은 다른 부품에 비해서 형상이 복잡하지 않기 때문에, 각 재료로 이루어진 시편의 물성을 구하고 이를 직접 모델링 하였다.

## 3. 스택 체결 구조 해석

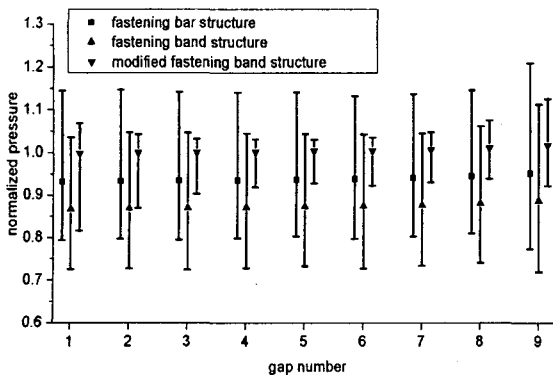
### 3.1 경계조건 및 유한요소 모델

분리판이 20개 적층된 모델로 해석하였으며, 체결봉으로 체결압을 가하는 요소이다. 또한, 대칭적으로 스택이 체결되기 때문에 실제로는 10개만 모델링 하였으며, 분리판도 대칭인 모델이기 때문에 1/8 해석 모델을 사용하였다. 체결시 사용되는 체결봉은 단순한 빔 모델로 설정하였고, 이 구조물은 마찰력이 중요시 되는 모델이 아니기 때문에 마찰은 없다고 가정하였고, 각 대칭면에는 대칭 경계조건을 가하였다. 각 체결봉이나 체결 밴드에 변위를 주어서 체결력을 가하였다. 엔드 플레이나 분리판 집전판 등은 ABAQUS의 C3D8R 또는 C3D8I 요소를 사용하였고, 가스켓은 GK3D8 요소를 하였다. 또한, 체결봉은 B21 빔 요소를 사용하였고, 체결밴드는 S4R 요소를 사용하였다.

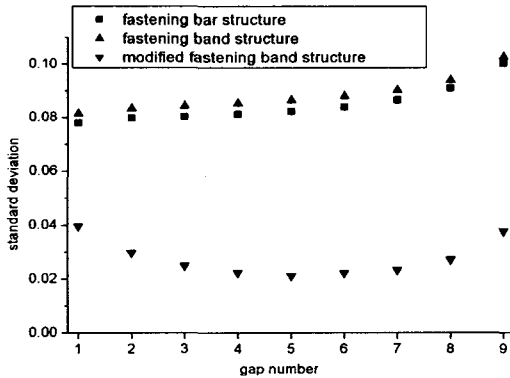
### 3.2 해석 결과 비교

기존의 봉을 이용한 체결구조의 해석을 수행한 후 체결밴드를 이용한 구조의 해석을 하였다. 그 후 Figure 3과 같이 밴드 구조 해석 시 엔드 플레이트가 변형되는 거동을 살펴보고 이를 선형화 하였다. 이 그림에서 점선은 변형량이며, 실선은 이를 선형화 시킨 변형량이다. 이 때 한쪽 끝이  $d$ 만큼 변형된다고 하면, 엔드 플레이트 끝을 미리  $d$ 만큼 가공을 하여서 해석 결과를 비교하였다.

엔드 플레이트의 경우 봉 체결 구조의 엔드 플레이트는 유리섬유복합재료로 제작하였지만, 밴



(a) max, min, and average



(b) standard deviation

Figure 4. comparison of pressure distribution

드 체결구조의 경우는 밴드와 엔드 플레이트 사이의 나사나 리벳 결합부위를 복합재료로 설계하기가 어렵기 때문에 알루미늄합금을 사용하여 제작하였다.

Figure 4에는 각 분리판 사이의 접촉면에 대한 면압 분포의 최대, 최소, 평균 및 표준편차를 비교하였다. 여기서 gap은 각 분리판과 분리판 사이의 간격을 뜻하며, 엔드 플레이트에 가까운 부분부터 번호를 시작하였다. 각 갭에서는 봉 체결 구조, 밴드 체결 구조, 변형된 밴드 체결구조 순으로 접촉 면압 분포를 나타내었다. 봉으로 체결한 구조나 밴드체결구조의 응력분포는 차이를 보이지 않았다. 표준편차는 미미하지만 밴드체결구조가 오히려 더 큰 결과를 보였다. 따라서 봉 체결 구조를 단순히 밴드의 체결구조로 바꾸면 면압 분포가 개선되는 효과는 없고, 체결 시 부피를 약간 감소시킬 수 있다는 장점만 있다. 하지만 이 구조에서 엔드 플레이트를 변형되는 양만큼 미리 가공을 한 경우를 보면 다른 체결구조에

비해 접촉 면압의 최대, 최소 차이도 크지 않고, 표준편차도 다른 구조에 비해서 매우 적음을 알 수 있다.

각 체결 조건에 따른 체결력을 비교했을 경우 큰 차이를 보이지 않았으며, 분리판 내의 응력분포도 큰 차이를 보이지 않았으며, 단지 접촉면압만 개선된 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 연료전지 스택 셀 10개를 모델링 하여 거동을 분석하였고, 효율을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하였다. 자세한 과정은 다음과 같다.

유로가 복잡한 분리판을 직교이방성의 물성을 갖는 재료로 단순화를 시켰다. 또한 GDL은 따로 모델링 하지 않고, 분리판과 분리판의 접촉면압의 거동에 사용하여, 요소의 개수를 효과적으로 줄일 수 있었다. 봉으로 체결된 구조를 밴드로 체결하면 체결 부피를 줄일 수 있었다. 또한, 엔드 플레이트의 변형을 고려하여 엔드 플레이트를 미리 가공하면 체결시 접촉면압의 분포를 효과적으로 개선할 수 있음을 알 수 있었다.

폴리머 전해질 형 연료전지 스택은 사용온도가 크게 높지 않아서 열응력이 큰 문제가 되지 않지만, 사용온도가 매우 높은 고체 전해질 형 연료전지 스택의 경우는 열응력도 고려해서 해석을 수행하면 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- (1) James Larmin, "Fuel cell systems explained," Wiley, 2000
- (2) Richard Stobart, "Fuel cell technology for vehicles," SAE, 2001