

복합재료 연료전지 스택의 열응력 해석

전지훈*·황운봉**·엄석기***·김수환***·임태원***

Thermal Stress Analysis of a Fuel Cell Stack using an Orthotropic Material Model

Ji Hoon Jeon*, Woonbong Hwang**, Sukkee Um***, Soowhan Kim***, and Tae Won Lim***

Key Words: 연료전지 스택(fuel cell stack), 열응력(Thermal Stress), 접촉 면압(contact pressure)

Abstract

Mechanical behavior of a fuel stack was studied using an orthotropic material model. The fuel stack is essentially composed of a bipolar plate (BP), a gasket, an end plate, a membrane electrolyte assembly (MEA), and a gas diffusion layer (GDL). Each component is fastened with a suitable pressure. It is important to maintain a suitable contact pressure distribution of BP, because it influences the power efficiency of the fuel cell stack. When it is exposed to high temperature, its behavior must be stable. Hence, we performed stress analysis at high temperature as well as at room temperature. At high temperature, the contact pressure distribution becomes poor. Many patents have shown that using an elastomer can overcome this phenomena. Its effect was also studied. By using an elastomer, we found a good contact pressure distribution at high temperature as well as at room temperature.

1. 서론

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. 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 한

쪽에는 산소 한쪽에는 수소를 두면 적당한 압력과 온도에서는 반응을 하며 그 결과에 의해 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 0.6 ~ 0.7 V 가 되며, 전압을 높이기 위해서는 스

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과

*** 현대자동차(주)

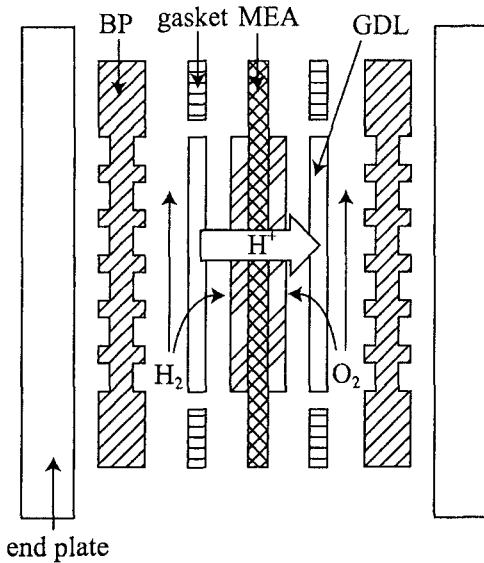


Figure 1 Single unit of fuel cell stack

택을 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. 본 연구에서는 10개 정도의 매우 형상이 복잡한 분리판을 직교이방성 복합재료로 단순화하여 유한요소법으로 모델링하였다. 연료전지의 효율 향상을 위해서는 분리판 사이의 접촉 면압이 중요하며 일정하게 유지되어야 한다. 이를 위해서 스택 내에 비선형 탄성체를 사용하는 방법이 있다 [1-5].

따라서 본 연구에서는 기존 연료전지 스택의 체결구조에 따른 접촉 면압을 유한요소 해석하였고, 온도 상승에 따른 면압 변화를 계산하였다. 또한 비선형 탄성체의 사용에 따른 효과를 살펴 보았다.

2. 개별 부품 물성 평가

2.1 분리판

Figure 2와 같이 분리판에는 연료가 흐르기 위한 유로(channel)가 존재하며, 이를 일일이 모델링

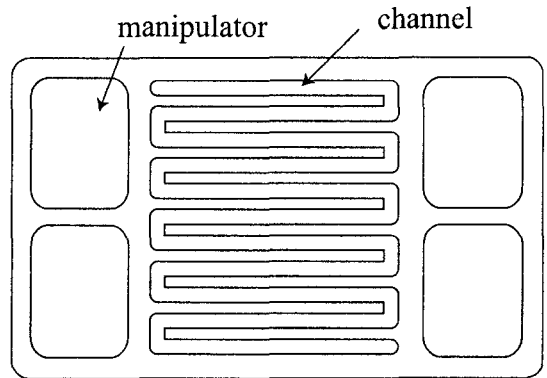


Figure 2 Schematic view of bipolar plate

하는 것은 비효율적이다. 분리판은 외부 체결 요소에 의하여 압축하중을 받을 가능성이 있으며, 대체적으로 한 방향으로 구성되어 있다. 따라서 분리판의 유로가 형성된 부분을 하나의 직교이방성의 복합재료의 물성으로 대체할 수 있다.

유로가 형성되어 있는 방향으로 한 개의 강화 섬유(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. 열응력은 100℃에서 하며, 탄소 섬유 복합재료로 이루어진 분리판의 100℃의 물성은 상온과 같다고 설정하였다.

2.2 가스켓

분리판과 분리판 사이에 연료의 유출을 방지하기 위하여 쓰이는 가스켓은 압축실험을 하여 온도에 따른 변위-하중곡선을 유한요소 해석에 사용하였다.

2.3 MEA 및 GDL

MEA는 다른 요소에 비해 매우 얇기 때문에 해석시 고려하지 않았으며, GDL의 압축실험만 수행하였다. MEA와 GDL은 두 개의 분리판 사이에 놓여서 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 구조 해석시에는 MEA를 직접

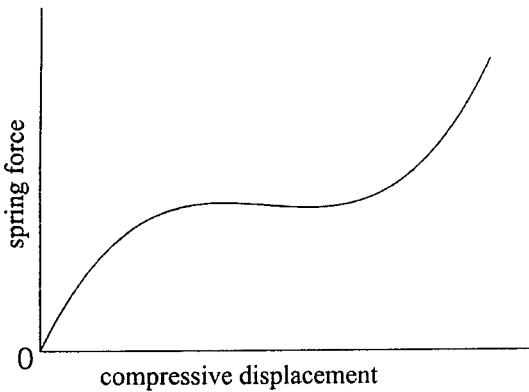


Figure 3 displacement-force curve of elastomer

모델링 하지 않고, 분리판 사이의 간격에 따라 접촉면압이 작용하도록 설정하였으며, 탄소로 이루어진 재료이며 기공이 많기 때문에 100 °C에서의 물성은 상온과 같다고 설정하였다.

2.4 탄성체

접촉면압을 일정하게 하기 위해서 엔드 플레이트 접촉면에 탄성체를 사용한 문헌이 많이 있으며[1-5], 본 연구에서 이 효과에 대하여 살펴보았다. 해석시에 탄성체의 거동은 Figure 3과 같은 비선형의 변위-하중 경향을 가지도록 설정하였다. 이와 같은 변위가 변하여도 하중이 일정해지는 특징을 이용하면, 면압 변화를 줄일 수 있으며, 응력 분포 개선 효과를 확인하였다.

2.5 그 외의 부품

엔드 플레이트, 체결체, 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, 체결밴드로 체결압을 가하는 요소이다. 또한, 대칭적으로 스택이 체결되기 때문에 실제로는 10개만 모델링 하였으며, 분리판도 대칭인 모델이기 때문에 1/8 해석 모델을 사용하였다. 체결시 사용되는 체결체는 단순한 쉘 모델로 설정하였고, 이

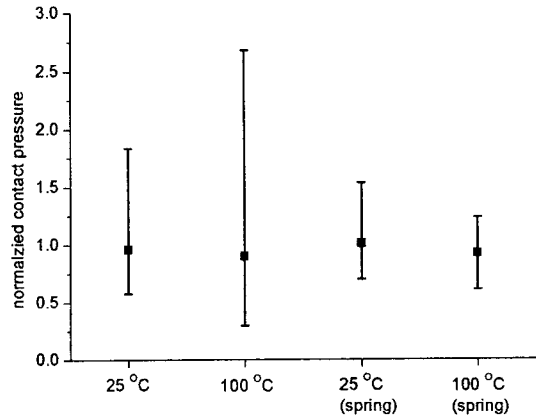


Figure 4 Contact pressure comparison

구조물은 마찰력이 중요시 되는 모델이 아니기 때문에 마찰은 없다고 가정하였고, 각 대칭면에는 대칭 경계조건을 가하였다. 체결 밴드에 변위를 주어서 체결력을 가하였다. 엔드 플레이트나 분리판, 집전판 등은 직육면체로 모델링하여 ABAQUS의 C3D8I 요소를 사용하였고, 가스켓은 GK3D8 요소를 하였다. 또한 체결밴드는 S4R 요소를 사용하였다. 해석은 2단계로 진행하였다. 첫 번째 단계는 상온에서 체결밴드에 체결력을 가하는 과정이고, 두 번째 단계는 전체 모델의 100 °C로 상승시켜 열응력 효과를 살펴보았다. 또한, 탄성체가 사용된 모델과 사용되지 않은 모델을 비교하였다. 탄성체가 사용되지 않은 경우나 사용된 경우 체결력은 모두 동일하게 설정하였다.

3.2 해석 결과 비교

Figure 4에 탄성체의 사용유무 및 온도에 따른 접촉 면압의 평균 및 최대, 최소 값을 표시하였다. 가로축에서 처음 데이터는 탄성체가 사용되지 않은 상태에서 25 °C의 접촉면압, 그 다음 데이터는 100 °C, 세 번째 데이터는 탄성체가 사용된 상태에서 25 °C, 마지막 데이터는 탄성체가 사용된 상태에서 100 °C인 경우를 나타낸다.

탄성체가 사용되지 않은 경우에는 100 °C에서 면압분포의 분산이 상온에 비하여 매우 컸음을 알 수 있다. 탄성체 사용 시에는 사용하지 않을 때보다 면압 분포의 분산이 우수하며, 또한 100 °C에서도 면압 분포의 분산이 상온에 비해서 증가하지 않았다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 연료전지 스택 셀 10개를 모델링 하여 거동을 분석하였고, 탄성체의 사용에 따른 특성 및 열응력 해석을 수행하였다. 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.

연료전지 스택의 온도가 상승함으로써 접촉면압의 분산이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 연료전지 스택의 성능 감소를 의미한다. 탄성체를 사용하여 온도상승에 따른 면압 분산이 증가하는 것을 효과적으로 줄일 수 있었다. 따라서 본 연구를 통하여 연료전지 스택에서 탄성체 사용의 장점을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Mease et al., "Clamping Apparatus and Method for a Fuel Cell, " US Patent, US 6,218,039, 2001
- (2) Peter Robert Gibb, "Compression Assembly for an Electrochemical Fuel Cell Stack, "US Patent, US 6,057,053, 2000
- (3) Russell H. Barton et al., "Electrochemical Fuel Cell Stack with an Improved Compression Assembly, "US Patent, US 6,190,793, 2001
- (4) Boguslaw Wozniczka et al., "Electrochemical Fuel Cell Stack with Compression Bands, "US Patent, US 5,993,987, 1999
- (5) Narutoshi Sugita et al., "Fastening Structure for Fuel Cell Stack, "US Patent, US 6,258,475, 2001

후 기

본 연구는 한국 철도 기술 연구원(KRRI)에 의하여 지원되었으며, 지원에 감사드립니다.