

구조 변형을 고려한 연료전지 공기판의 유동 해석

양 지 혜* · 박 정 선†

(2003년 4월 9일 접수, 2004년 5월 24일 심사완료)

Structural Deformation and Flow Analysis for Designing Air Plate of a Fuel Cell

Jihae Yang and Jungsun Park

Key Words: PEMFC(고분자전해질형연료전지), Nonlinear Material(비선형 재료), Finite Element Method (유한요소법), Pressure Distribution(압력분포)

Abstract

In this paper, structural analysis is performed to investigate the deformation of porous media in a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). Structural deformation of air plate of the fuel cell causes the change in configuration and cross sectional area of the channel. The distributions of mass flow rate and pressure are major factors to decide the performance of a PEMFC. These factors are affected by channel configuration of air plate. Two kinds of numerical air plate models are suggested for flow analyses. Deformed porous media and undeformed porous media are considered for the two models. The Numerical flow analysis results between deformed porous media and undeformed porous media have some discrepancy in pressure distribution. The pressure and velocity distribution under a working condition are numerically calculated to predict the performance of the air plates. Pressure and velocity distributions are compared for two models. It is shown that structural deformation makes difference in flow analysis results.

기호설명

f : 일반 변수(압력 제외)
 F : 절점 힘 벡터
 K : 강성 행렬
 M : 질량 행렬
 \dot{m} : 유량
 p : 압력
 R : 외부 절점 하중 벡터
 s : 유동 흐름 방향

U : 변위 벡터
 \ddot{U} : 가속도 벡터
 v_i : x_i 방향의 절대속도
 x_i : 직교 좌표계
 δ : Kronecker delta
 ρ : 밀도
 τ_{ii} : 수직 응력
 τ_{ij} : 전단 응력

상첨자

* 한국항공대학교 대학원
 † 책임저자, 회원, 한국항공대학교
 항공우주 및 기계공학부
 E-mail : jungsun@mail.hankong.ac.kr
 TEL : (02)300-0283 FAX : (02)3158-3189

\cdot : 시간에 대한 1차 미분
 $\ddot{\cdot}$: 시간에 대한 2차 미분
 t : 임의의 t 시간
 $t+\Delta t$: 임의의 $t+\Delta t$ 시간

1. 서론

연료전지는 전기화학 반응에 의하여 연료가 갖고 있는 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 고효율 발전장치이다. 또한 환경 오염 물질의 배출이 거의 없기 때문에 차세대 에너지 발전 장치로 각광받고 있다. 연료전지는 전해질의 종류에 따라 고분자전해질형, 인산형, 용융탄산염, 고체산화물형, 알칼리형 등의 다섯 가지 형태로 구분된다.⁽¹⁾

그 중에서 고분자 전해질 연료전지는 다른 종류의 연료전지와 비교하여 작동온도가 낮아 시동 시간이 짧고, 전류밀도 및 출력밀도가 높은 장점이 있다. 그래서 고분자전해질 연료전지는 단시간에 고출력을 요하는 자동차의 동력원 및 가정용 발전 등의 다양한 분야에 응용이 가능한 대체 에너지 시스템이다.

연료전지의 성능은 전지판의 전류밀도가 균일하게 최대 발생될 때 우수한 성능을 나타낼 수 있다. 또한, 연료전지의 전류 밀도는 분리판 내부 유동과 밀접한 연관을 갖고 서로 영향을 미친다. 연료전지의 효율을 높이기 위해서는 화학반응을 지배하는 공기가 분리판의 채널에 고르게 확산된 후 박막면(membrane)에 최대한 투과되어, 많은 양의 공기가 균일하게 화학적으로 반응될 수 있도록 설계되어야 한다. 이러한 분리판의 설계를 위해서, 또는 전지 채널 설계 후, 성능을 검증하기 위해서는 분리판의 채널 형상에 대한 유동특성을 파악하는 것이 중요하다. 유동 특성은 채널의 형상과 단면적 등에 의해 좌우되며, 주어진 전극판의 단면적내에서 효율적으로 화학반응을 일어날 수 있도록 채널형상을 설계할 필요가 있다. 이러한 효율적 유동특성을 갖기 위한 채널을 설계하기 위해 이제까지는 오로지 유체역학적 측면에서의 접근이 이루어져왔다.

연료전지의 구조적 변형은 채널의 형상과 단면적에 변화를 야기하여 유동 특성에 영향을 미치므로 구조변형을 고려하여 유동해석을 수행해야 한다. 구조변형을 고려하기 위해 박막면과 같은 구성요소들의 미세한 변형보다는 전극판과 전극판을 체결하는 크램프판과 크램프기둥의 외부 체결 요소들, 또는 각각의 요소들에 대한 열전달과 이에 따른 열응력, 체결체에 의한 외력에 대한 구조적 안정성에 대한 연구와 생산성을 높이고

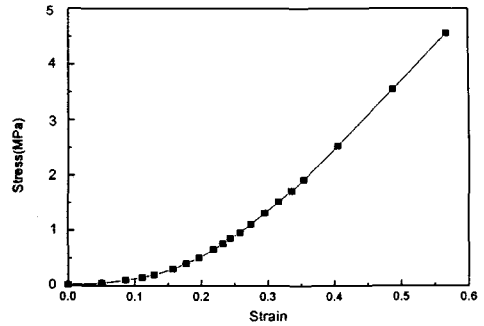


Fig. 1 Stress-strain diagram of a carbon paper

제작비용을 줄이기 위한 제조 가공에 대한 연구들이 이루어져왔다. 박막면은 채널의 바로 위에 위치하며, 전극판과 비교하여 강성이 작아 변형이 쉬운 재질로 이루어져 있기 때문에 압축 체결 시 박막면이 분리판의 채널들 사이로 변형 함입되어 유동 면적을 축소시킬 수 있다. 이러한 박막면의 구조적 변형은 채널의 단면적의 형상과 면적을 변화시키어 유동 특성에 큰 영향을 줄 수 있다.

이에 본 연구에서는 분리판 채널의 설계를 위하여 먼저 박막면의 구조적 변형에 대한 해석을 수행한 후 구조적 변형의 유동특성에 대한 영향을 고찰하기 위하여, 박막면의 변형을 고려하지 않은 경우의 공기관의 유동특성과 박막면의 구조적 변형을 고려한 경우의 공기관의 유동특성을 알아보기 위한 유동 해석을 수행하여 이들을 비교하였다.⁽²⁻⁵⁾

2. 구조해석

2.1 부재의 재질 및 모델링

압축 실험에 의해서 얻어진 박막면을 구성하는 재료의 구조적 물성치는 Fig. 1에 나타나 있다. 공기관에 사용된 재료의 물성치는 Table 1에 나타내져 있다. 구조 해석에 사용된 모델의 형상은 Fig. 2와 같다.

해석에 사용된 모델은 활성면적이 300cm²인 공기관의 일부를 모델링한 것으로 모델의 양쪽 끝단과 박막면의 중심면에 대칭의 경계조건을 적용하였다. 하중조건은 공기관의 밀면을 통해 균일한 분포하중이 작용하는 것으로 가정하였다. 작

Table 1 Material property of air plate

Component	Property
Elastic Modulus (E)	4.8 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.2

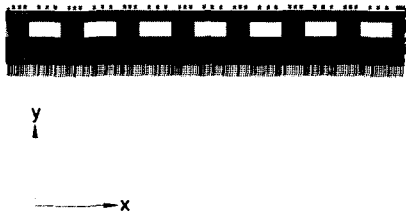


Fig. 2 Configuration of model and boundary condition for structure analysis

용된 분포 하중은 11기압이다.

공기판의 구성을 보면 공기가 흐르는 부분을 채널, 채널 옆의 지지대 부분을 리브라고 부른다. 본 연구에 사용된 모델의 경우 Fig. 2에서 알 수 있듯이 리브와 박막면이 서로 맞닿아 있으며, 리브의 폭이 채널의 폭과 비교하여 약 33% 정도 좁게 설계되었다. 채널을 통해서 화학 반응을 위한 공기의 확산이 이루어진다. 공기의 공급과 확산이 원활하기 위해서는 채널의 폭이 넓어야 하고, 상대적으로 리브의 폭이 좁아야 하지만, 전기 전도성과 구조적 안정을 위해서는 리브의 폭이 넓어야 한다. 그러므로 이 모든 요소를 동시에 고려한 설계가 필요하다.

2.2 유한요소 해석

변위에 대한 연속체 유한요소지배식에서 요소 좌표와 변위의 내간 함수의 선택 등의 기본방법들은 선형해석의 방법과 동일하다. 절점에 대해 선형 가상 변위 원리를 적용함으로써 유한요소지배식을 구할 수 있다. 이와 같은 유한요소지배식은 선형해석에서와 같이 단일 요소에 대해서 유도된다. 요소 집합의 지배 방정식은 강성법을 적용함으로써 유도될 수 있다. 요소 좌표와 변위를 내간할 때 요소가 임의의 시간에서 변위와 변위

좌표에 대한 내간법은 같아야 한다. 일정한 시간이 경과한 후의 새 요소 좌표는 원래 좌표에 요소 변위를 더해줌으로써 얻어지기 때문에 요소와 변위에서 같은 내간함수를 사용해야 한다. 원래 형상에서 요소 경계 사이에서 교차하는 변위 적합성이 요구되는 요소들은 모든 차후의 형상에서도 이 적합성이 유지되어야 한다. 요소 좌표와 변위의 내간을 선형해석식에 대입하면, 유한요소식을 얻을 수 있으며, 정해석에 대한 유한요소식은 식 (1)과 같다.

$${}^tKU = {}^{t+\Delta t}R - {}^tF \quad (1)$$

동해석에서 임의의 시간 t 에 대해 음적분 (implicit integration) 식은 다음의 식 (2)와 같다.

$$M {}^{t+\Delta t}\ddot{U} + {}^tKU = {}^{t+\Delta t}R - {}^tF \quad (2)$$

동해석에서 임의의 시간 t 에 대해 양적분 (explicit integration) 식은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$M {}^t\ddot{U} = {}^tR - {}^tF \quad (3)$$

위의 유한요소식에서 감쇠 효과는 무시가능하고, 비선형 구성 관계식으로 표현될 수 있다. 외부에서 가해진 힘은 변형에 대해 무관하며, 따라서 모든 힘이나 임의의 시간 t 에 대한 하중 벡터는 해석 전에 계산된다고 가정하였다. 만약 하중이 변형에 좌우되는 요소를 포함한다면, 하중 벡터에 대한 적분과 하중을 보정해주는 과정이 필요하다. 위의 유한 요소 행렬은 선형 해석과 같은 방법으로 구해진 것이다. 이들 행렬들은 고려된 임의의 특정요소에 좌우된다. 변위 내간 행렬은 변위 내간 함수로부터의 선형 해석에서 쉽게 구해진다. 이 비선형 요소의 응력-변형을 행렬과 응력 수치를 구하기 위한 행렬은 사용된 재료에 좌우된다.⁽⁶⁾

박막면의 물성치는 Fig. 1에서와 같이 비선형 특성을 갖는다. 이에 본 연구에서는 박막면의 물성치에 대한 비선형 해석을 수행하였다. 구조해석은 범용 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 수행하였다.

Table 2 Change in sectional Area of a channel

	Before	After	Ratio (%)
Area (mm ²)	1.28	1.106	13.623
Width (mm)	1.6	1.600	0.011
Height (mm)	0.8	0.691	13.671

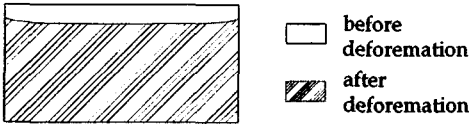


Fig. 3 Deformation of flow channel cross section

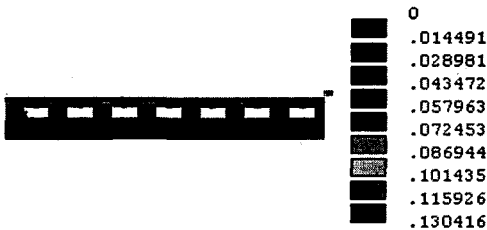


Fig. 4 Displacement of y direction

2.3 해석결과

해석 결과를 살펴보면 최대 변형은 0.130 mm로, 공기관의 리브가 박막면의 다공 (porous) 층으로 변형되어 함입하여 밀려들어간다. 이러한 효과로 박막면에 변형이 생기고, 채널부위에 공기가 흐를 수 있는 유효면적이 줄어들게 된다. Table 2는 변형 전과 변형 후의 채널 단면적의 비교를 나타내며, Fig. 3은 박막면의 변형에 의한 단면의 변화를 도식적으로 나타내고 있다. 이러한 단면적의 변화를 고려하여 뒤에 유동 해석이 수행되었다.

채널의 유한요소 모델의 y방향 변위와 Von Mises 응력 분포는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6에 박막면 다공층만의 Von Mises 응력 분포를 따로 나타내었다. 공기관의 경우 최대 응력은 13.5MPa이고, 최소 응력은 0.35MPa이다. 박막면의 경우 최대 응력은 2.93MPa, 최소응력은 0.35MPa이다. 박막면의 경우 사용되는 부재들 중

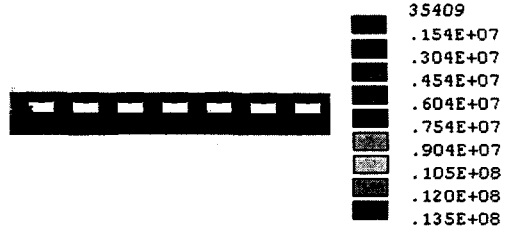


Fig. 5 Von Mises stress contour of total model

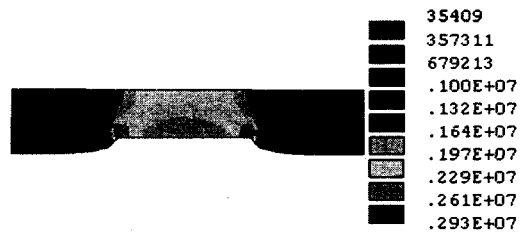


Fig. 6 Stress contour of porous media

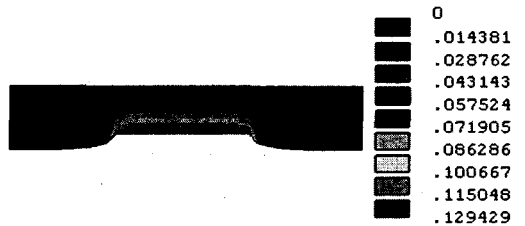


Fig. 7 Deformation of porous media

가장 작은 허용응력을 갖는 부재의 허용응력이 32MPa이다. 이 경우 발생하는 최대 응력은 재료의 허용 응력에 훨씬 못 미친다. 이에 반하여 Fig. 6과 Fig. 7을 살펴보면 박막면과 리브가 서로 맞닿는 모서리 부분에서 응력집중에 의한 변형이 상당히 크게 일어남을 알 수 있다.

3. 유동해석

3.1 지배 방정식 및 기본 가정

연료전지의 유동해석에 대한 지배방정식들은 반응기체의 특성, 전극표면에서의 기체의 반응률, 동작전압, 전류밀도, 온도분포 등을 동시에 포함하는 복잡한 편미분 방정식으로 구성되어 있다.

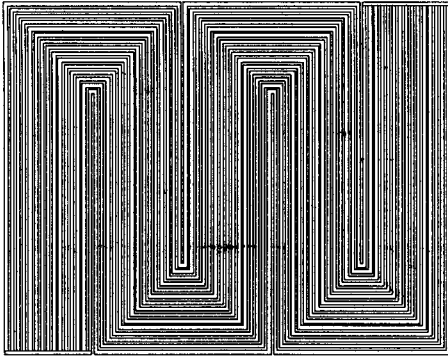


Fig. 8 Configuration of channel in air plate

전지의 유동 해석을 위해서는 연속방정식, 운동량 방정식, 이온전달 방정식에 의해 동시에 구해야 한다. 본 연구에서는 고려하는 유동은 비압축성, 층류 유동이고, 공기는 이상기체로 가정하였으며 지배방정식을 단순화하여 사용하였다. 본 계산에 사용된 질량, 운동량 보존 방정식은 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. Navier-Stokes 방정식을 직교 좌표계의 텐서 표현법을 사용하여 나타내면 다음과 같이 표현된다. 다음의 식 (4), (5)는 각각 연속 방정식과 운동량 보존 방정식을 나타낸다.⁽⁷⁾

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j + p \delta_{ij}) = -\frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{x_{ij}}) \quad (5)$$

$$\text{for } i, j = 1, 2, 3$$

3.2 해석 방법 및 모델링

유동 해석에 사용한 공기판의 형상은 Fig. 8과 같다. 이와 같은 채널의 형상을 다중 사행 형상 채널 (serpentine channel geometry)이다. 범용 전산 유체 해석 코드인 STAR-CD를 이용하여 스택 내의 공기판 전체의 유동 특성을 알아보기 위한 해석을 수행하였다.

유동해석 조건은 크게 두 가지로 나뉘어서 볼 수 있다. 첫째 구조 해석 결과를 유동해석에 적용시키지 않은 모델이고, 둘째는 구조 해석 결과를 적용시킨 모델이다. 첫 번째의 경우 채널의 단면적은 Table 2에 나타난 변형 전의 경우를 따른다.

이 경우 공기가 공급되는 매니폴드 입구에서의 경계조건은 일정한 유량이 공급된다고 가정하였으며, 활성면적이 300cm²인 단위전지 40개를 적층하여 전류밀도 120mA, 2.5KW의 전력을 얻을 수 있는 $\dot{m} = 1.1492 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 을 입구 유량으로 부여하여 해석을 수행하였다. 두 번째의 경우 Table 2에 나타난 구조변형후의 채널의 단면적을 고려하여 유동해석에 적용하였다. 그리고, 입구유량 등의 나머지 경계조건들은 유동해석 결과의 비교를 위하여 모두 동일하게 적용하였다. 분리판내의 유동은 비압축성으로 공기의 밀도는 일정하게 유지되고, 상압(1기압)으로 구동되며, 유입되는 유량이 일정하다고 가정하였고, 출구는 입구와 충분히 떨어져 있어서 출구에서는 유체의 흐름방향으로 변화가 일어나지 않는다고 가정하였다. 그래서, 출구면에서 압력을 제외하고, 모든 변수들의 흐름 방향의 구배가 0이라는 조건을 사용하였다.⁽⁷⁾ 다음 식에서 s 는 유동의 흐름 방향을 나타내고, f_s 는 압력을 제외한 변수들을 나타낸다.

$$\frac{\partial f}{\partial s} = 0 \quad (6)$$

3.3 해석 결과

각각의 결과 값들은 Fig. 9의 측정 위치의 해석 결과를 이용하여 나타내었다. 우선 구조적 변형을 고려하지 않은 경우의 해석결과를 살펴본다. 이 경우 각각의 채널의 압력차를 Table 3에 나타내었다. 연료전지의 성능을 균일하게 유지시키기 위해서는 각각의 채널의 압력차를 균일하게 효율적으로 유지시켜야한다. 각각의 채널에서의 압력값을 보면 압력차가 채널별로 고르게 나타남을 알 수 있다. 또한 유량이 증가함에 따라 압력이 거의 선형으로 증가함을 알 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11는 구조적 변형을 고려하지 않은 경우의 속도와 압력의 변화 분포를 나타낸 것이고, Fig. 12와 Fig. 13은 구조적 변형을 고려한 경우의 속도와 압력의 변화 분포를 나타낸 것이다. 이를 보면 채널이 직각으로 꺾이는 부분에서 속도의 변화가 심하고, 압력강하가 크게 일어남을 알 수 있다. 구조적 변형을 고려한 경우에 대해 압력강하를 Table 4에 나타내었다. 이 결과를 살펴보면 구조적 변형을 고려하지 않은 경우보다 압력차가 현저하게 커짐을 알 수 있다.

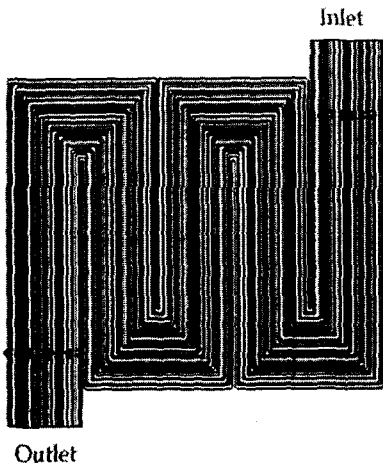


Fig. 9 Location of pressure difference surveying station

Table 3 Pressure difference between inlet and outlet

Line	Pressure Difference(Pa)
1	1259.30
2	1261.80
3	1265.10
4	1265.67
5	1269.71
6	1264.02
7	1263.05
8	1260.64
Average	1263.66

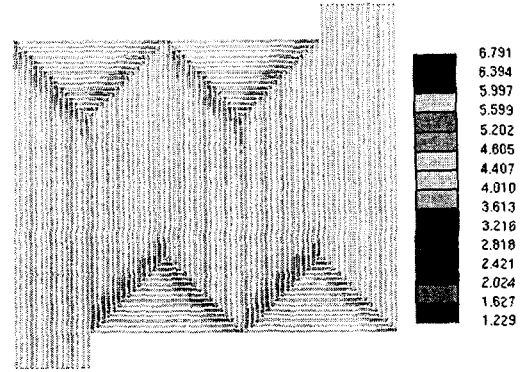


Fig. 10 Velocity distribution without structural deformation

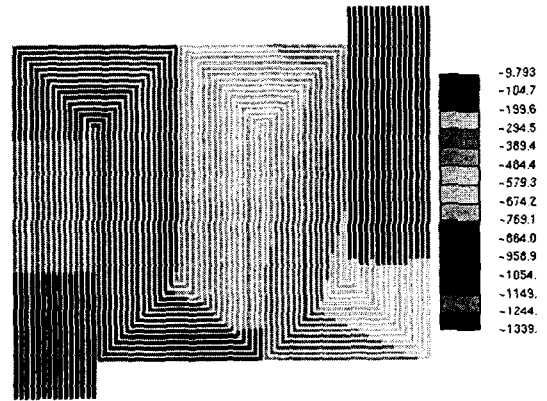


Fig. 11 Pressure distribution without structural deformation

Table 4 Pressure difference between inlet and outlet

Line	Pressure Difference(Pa)
1	1853.25
2	1856.82
3	1854.41
4	1855.81
5	1854.95
6	1856.52
7	1855.05
8	1855.05
Average	1855.23

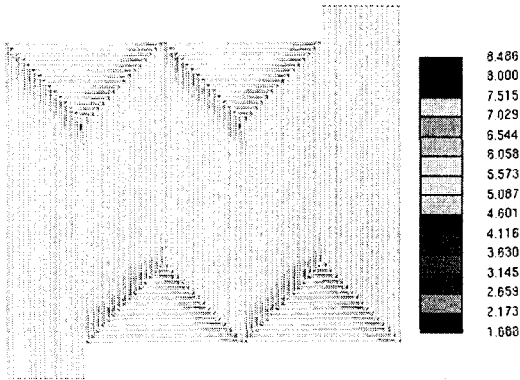


Fig. 12 Velocity distribution with structural deformation

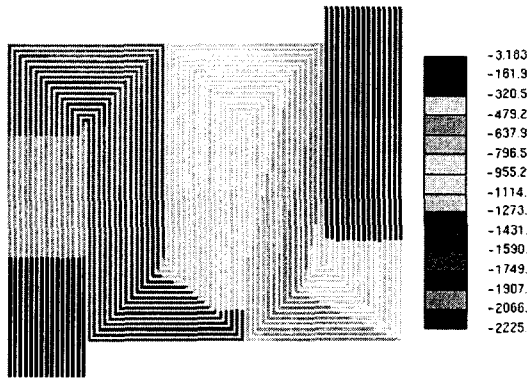


Fig. 13 Pressure distribution with structural deformation

5. 결과 비교

5.1 해석 결과 비교

구조적 변형을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 압력강하를 비교하면 그 차이가 평균 31.88%로 상당함을 알 수 있다. 각각의 압력강하 값을 비교하여 Table 5에 나타내었다. 구조적 변형을 고려한 경우 평균 압력차는 1855.23Pa이고 고려하지 않은 경우의 평균 압력차는 1263.66Pa이다. 분리판내의 입구와 출구사이의 압력차는 전기적 특성만을 고려할 때는 작을수록 좋지만, 어느 정도의 압력차가 존재해야 전기화학반응에 의해 생성된 물이 배출되기 때문에 연료전지 시스템 전체의 효율을 고려하여 압력차를 조절하여야 한다. 이전에 수행된 Thomas Mennola⁽⁸⁾의 연구 결과를 살펴보면 전체 연료전지 효율을 고려할

Table 5 Pressure difference comparison between A and B

Line	(Pa)		
	A	B	Difference (%)
1	1259.30	1853.25	32.05
2	1261.80	1856.82	32.04
3	1265.10	1854.41	31.77
4	1265.67	1855.81	31.80
5	1269.71	1854.95	31.55
6	1264.02	1856.52	31.91
7	1263.05	1855.05	31.91
8	1260.64	1855.05	32.04
Average	1263.66	1855.23	31.88

A: Without structural deformation

B: With structural deformation

때의 연료전지 공기관 채널의 허용 압력차의 범위는 1000Pa에서 3000Pa이다.⁽⁸⁻¹¹⁾ 본 연구의 두 가지 경우 모두 이 허용 압력차의 범위를 만족시킴을 알 수 있다.

6. 결론

수행된 고분자 전해질 연료전지에 관한 연구들을 살펴보면 구조적인 관점에서의 연구는 유동 특성이나 전기화학적 측면에 비해 아직 미비하다. 구조해석 결과를 살펴보면, 응력분포가 허용 응력보다 상당히 작지만, 박막면 다공층 등의 변형으로 인한 채널형상과 단면적의 변화가 유동의 흐름에 상당한 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다.

입구와 출구의 압력차는 구조적 변형을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에서 각각 1263.66Pa, 1855.23Pa의 값을 갖는다. 분리판내의 입구와 출구사이의 압력차는 전기적 특성만을 고려할 때는 작을수록 좋지만, 압력차가 존재해야 생성된 물이 원활히 배출되기 때문에 연료전지 시스템 전체의 효율을 고려하여 적절히 압력차를 조절하여야 한다.

참고문헌

- (1) Kordesch, K. V., 1971, "City Car with H₂-Air Fuel Cell and Lead Battery," *6th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, SAE Paper No. 719015.
- (2) Picot, D., Metkmeijer, R., Beziau, J. J. and Rouveyre, L., 1998, "Impact of the Water Symmetry Factor on Humidification and Cooling Strategies for PEM Fuel Cell Stacks," *Journal of Power Sources*, Vol. 75, Issue 2, pp. 251~260.
- (3) He, W. and Chen, Q. 1998, "Three-Dimensional Simulation of A Molten Carbonate Fuel Cell Stack under Transient Conditions," *Journal of Power Sources*, Vol. 73, Issue 2, pp. 182~192.
- (4) Lee, J. H., Lalk, T. R. and Appleby, A. J. 1998, "Modeling Electrochemical Performance in Large Scale Proton Exchange Fuel Cell Stacks," *Journal of Power Sources*, Vol. 70, Issue 2, pp. 182~192.
- (5) Zheng, R. and Dong, Z., 2001, "Finite Element Structure Design of Fuel Cell Plate," *11th Canadian Hydrogen Conference*, pp. 183~191.
- (6) Bathe, K. J., 1996, *Finite Element Procedures*, Prentice Hall.
- (7) Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., 1999, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Longman.
- (8) Mennola, T., 2000, "Design Experimental Characterization of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells."
- (9) Leo, J., Blomen, M. J. and Mugerwa, M. N., 1993, *Fuel Cell Systems*, Plenum Press.
- (10) EG & G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation, 2000, *Fuel Cell Handbook*, 5th U. S. Department of Energy Office of Fossil Energy.
- (11) Larminie, J. and Dicks, A., 2000, *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley & sons.