

# 연료전지 분리판의 신뢰성기반 최적설계

## Reliability Based Design Optimization of the Bipolar Plate in Fuel Cell

조선영\*, 박정선, 임종빈(한국항공대학교)

### 1. 서론

산업 발달에 따른 경제성장으로 국내의 전력 수요는 급격히 증가하고 있는 것에 비하여 부존 에너지 자원 공급은 한정되어 있기 때문에 이에 따른 대체에너지 개발이 시급한 것이 현실이다. 이와 더불어 전 세계적으로 환경에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 우리나라는 화석연료 중에서도 이산화탄소의 배출량이 많은 석탄과 석유의 사용비중이 높아 공해문제와 환경문제가 점차 심각해지고 있다. 따라서 에너지의 효과적인 이용과 확보는 전력의 발생과 더불어 중요한 과제이다. 화석연료를 대신할 청정에너지원으로서 태양열 에너지, 바이오 에너지, 풍력 에너지, 수소 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 중 수소를 연료로 사용하는 연료전지는 차세대를 담당할 새로운 발전장치로 기대되고 있다.

연료전지는 천연가스, 가솔린, 메탄올 등의 연료를 전기화학반응을 통해 전기 에너지로 변환시켜주는 장치로 화석연료로부터 얻은 수소나 순수한 수소를 공기 중의 산소와 반응시킴으로써 전기 에너지를 얻는다[1]. 또한 카르노 효율에 제한 받는 기존 연소 기관보다 높은 효율의 에너지를 얻을 수 있고, 동시에 질소산화물(NOx)이나 황산화물(SOx)과 같은 공해물질의 배출도 거의 없어 대규모 열병합 발전 시스템에서 자동차용 동력원 및 최근에는 이동 전원까지 그 적용범위가 매우 넓은 장점이 있다. 이에 따라 연료전지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 중 연료전지 구조에 대한 관심이 높아짐에 따라 최근에는 연료전지 구조의 안정성 및 효율성을 증가시키기 위한 구조 최적설계 연구가 이루어지고 있다[2,3].

본 연구에서 다룰 최적설계 기법은 신뢰성 기반 최적설계(reliability based design optimization,

RBDO)이다. 신뢰성기반 최적설계는 최적설계 기법 중, 설계 변수에 존재할 수 있는 불확실성을 합리적으로 고려하여 제품의 운용 조건이나 작은 형상 변화에 따른 제품의 불량 감소를 최소화시키는 최적설계 방법이다. 연료전지 분리판 재질은 무겁고 스택을 구성할 때 쉽게 깨질 수 있는 특성을 지니고 있기 때문에 구조 안정성을 고려한 신뢰성 기반 최적설계가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 연료전지 분리판 단면의 두께 치수를 설계변수로 선정하고, 이 설계변수들의 불확정성을 고려하여 신뢰성 기반 형상 최적설계를 수행하고자 한다.

### 2. 반응 표면법

반응표면분석은 여러 개의 설명변수가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응 변수에 영향을 주고 있을 때 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석을 실시하는 실험계획방법을 말한다[4].

#### 2.1 반응표면생성

반응이란 설계변수에 의해서 영향을 받는 반응치의 값을 말하며 반응표면은 독립변수와 반응치와의 관계를 나타낸 함수를 의미하며, 반응표면은 여러 개의 설계변수  $X_1, X_2, \dots, X_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수  $y$ 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 함수관계를 적절한 수학적식으로 표현한 것을 말한다. 일반적으로 반응표면 생성시 사용되는 회귀모델로는 식 (1)의 1차 회귀모델과 식 (2)의 2차 회귀모델이 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad (1)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i,j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

여기서  $\beta_i$ 는 회귀계수이며,  $k$ 는 설계변수의 수를 의미한다.

### 2.2 실험계획법

실험계획법이란 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는 방법을 계획하는 것이다. 반응표면을 생성하기 위한 가장 적절한 추출점을 선택하기 위하여 실험계획법을 이용하며, 이러한 추출점의 선택은 생성된 반응표면의 정확성과 함께 최적화 시간에도 커다란 영향을 미친다. 본 연구에서는 적은 횟수의 실험으로 곡면을 추정하기 위하여 중심점과 축점을  $2^k$  요인 실험에 추가시킨 실험계획인 중심합성법( $\alpha$ 의 값은 0이 아닌 양수)과 중심합성계획이 어떤 특정한  $\alpha$ 의 값에 대해서 회전성을 갖게 되는 회전 중심합성법을 사용하였다.

### 3. 신뢰성기반 최적설계

#### 3.1 신뢰성 해석

신뢰성기반 최적설계는 신뢰성 해석의 발전을 기반으로 성장하였다. 신뢰성 해석 기법은 파괴 확률을 구하는 것이다. 이를 위해 한계 상태 함수의 결합 확률 밀도 함수를 파괴 영역에 대해서 다중 적분하여야 한다. 하지만 실제 확률 밀도 함수를 알기 힘들 뿐만 아니라 다중 적분의 어려움이 있기 때문에 근사 적분법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 근사 적분법은 몬테카를로 시뮬레이션 방법과 모멘트법이 있다. 본 연구에서는 통계량 중 평균과 분산에 의해 모든 통계적인 특성이 결정되는 정규분포라는 가정을 전제로 하며, 파괴확률의 간접적인 지표인 신뢰도지수(reliability index)를 계산하는 방법인 일계이차모멘트법(first order second moment method: FOSM)을 사용하였다.

#### 3.2 개선된 일계이차모멘트법

개선된 일계이차모멘트법은 기본적으로 MPFP를 찾는 과정을 식 (3)과 같이 전형적인 최적화 과정으로 보고 식 (4)를 이용하여 MPFP를 적당한 수렴범위 안에서 반복하여 갱신하는 방법

을 이용한다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \beta = \sqrt{u^T u} \\ & \text{subject to } g(u) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$u^{k+1} = \frac{G_u^{kT} u^k - g(u^k)}{G_u^{kT} G_u^k} G_u^k \quad (4)$$

$$G_u^k = \left\{ \frac{\partial g}{\partial u_1}, \frac{\partial g}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial g}{\partial u_n} \right\}^T \text{ at } u = u^k$$

$$\beta = \sqrt{u^{*T} u^*} = - \frac{G_u^{*T} u^*}{\sqrt{G_u^{*T} G_u^*}} \quad (5)$$

MPFP를 찾게 되면, 신뢰도 지수는 식 (5)에 의해 구하거나, 원점에서 MPFP까지 거리를 계산하여 얻을 수 있다. Fig. 1은 신뢰도지수에 관한 개념을 나타낸다.

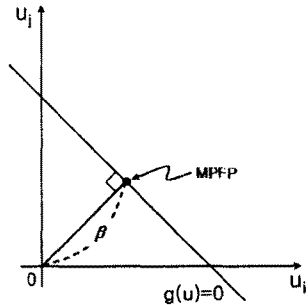


Fig. 1. Geometric concept of reliability

#### 3.3 반응표면기법에 의한 신뢰성 해석

몬테카를로 시뮬레이션 방법이나 이차 모멘트 방법들은 한계상태식이 확률변수의 수학적 함수로 명확하게 주어지거나 최소한 파괴의 발생 여부를 판별할 수 있다는 조건을 전제로 한 방법들이다.

그러나 실제 구조물에서 파괴를 판별하는 한계상태식을 확률변수들의 수학적 함수들로 명확하게 정의할 수 있는 경우가 제한적이다. 따라서 적은 횟수의 구조해석 결과를 이용하여 한계상태식을 확률변수의 다항식으로 근사한 다음 이를 이용하여 파괴확률을 산정하는 반응면 기법(response surface method: RSM)을 일반적으로 많이 사용한다. 본 연구에서는 반응면기법을 사용하여 신뢰성 최적설계를 수행하였고, 이를 반응표면법을 이용한 결정론적 최적설계(deterministic optimization: DO)값과 비교하였

다.

#### 4. 연료전지 분리판의 구조해석

##### 4.1 고분자 연료전지의 구성

고분자 전해질형 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)는 상온에서 운전이 가능하고 기존의 발전 형태에 비하여 고출력을 얻을 수 있으며 높은 전류밀도 및 출력밀도의 특성을 가지고 있기 때문에 최근에 연료전지에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 고분자 연료전지 분리판 형상은 Fig. 2와 같이 공기관(cathode), 박막면(porous media), 수소판(anode) 순으로 적층되어 있다. 공기관과 수소판의 재질은 깨지기 쉬운 성질을 지닌 그래파이트 카본이 사용되고, 박막면은 다공성 재질을 사용하였다.

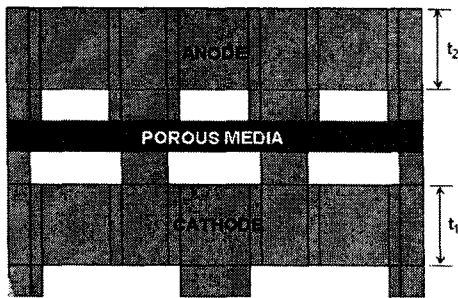


Fig. 2. Analysis model of the PEM fuel cell

##### 4.2 구조해석 모델 및 경계조건

본 연구에 사용된 구조 모델은 실제 성형되어 실험중인 활성면적이 300 cm<sup>2</sup>인 고분자전해질형 연료전지(PEMFC) 단위전지의 일부 단면을 모델링 한 것으로 Fig. 2와 같다. 해석에 사용된 모델의 경계조건은 공기관 하단 부분을 고정시키고, 양쪽 끝단은 대칭 경계조건을 적용하였으며, 수소판의 상단에는 균일한 분포하중 10기압이 작용하도록 설계하였다. 또한, 구조해석 시 수소판과 공기관 각각이 박막면과 맞닿는 부분에 접촉조건을 주었으며, 박막면의 특성인 재료비선형 거동을 함께 고려하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 범용해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

##### 4.3 구조해석 모델의 해석결과

구조해석에 사용된 모델의 요소는 2차원 4절점 사각형 요소이고, 요소수는 5216, 절점수는 5314이고, 하중은 총 10개의 부구간으로 나눠 주었다. 구조 모델의 유한요소 크기는, 요소 크기를 조금씩 줄여가면서 구조해석 결과가 수렴되는 구간을 찾는 메쉬 스테디에 근거하여 설정하였다. 메쉬 스테디 결과와 결과에 의해 짜여진 메쉬 형상이 Fig. 3~5에 제시되었다.

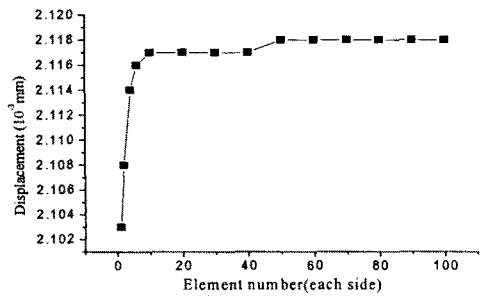


Fig. 3. Displacement convergence of bipolar plate

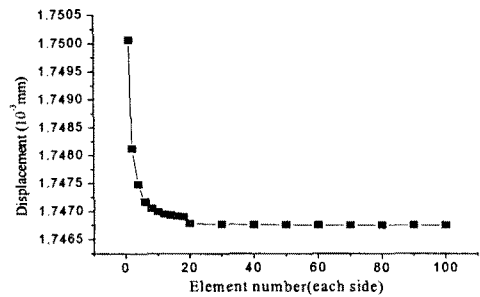


Fig. 4. Displacement convergence of porous media

구조해석 결과는 Fig. 6~7과 같이 연료전지 분리판의 수직한 방향으로 최대 변형 0.1829mm로 분포하중을 받는 수소판 윗면에서 나타났으며, Von Mises응력 분포에서 최대 응력은 7.394MPa로 공기관 상단 리브 모서리 부분에서 나타났다.

#### 5. 연료전지 분리판 최적화

##### 5.1 결정론적 최적설계 정식화

연료전지 분리판의 최적설계시 사용환경에 따른 안전도를 유지하면서 전체 무게가 최소가 되는 형상을 설계한다. 따라서 본 연구에서의

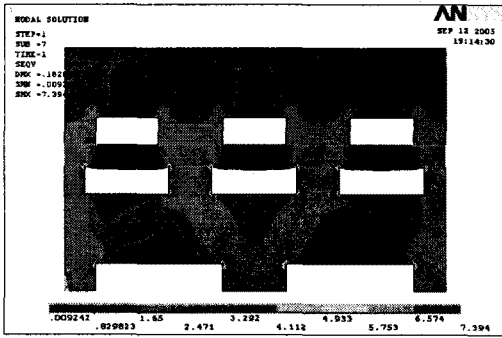


Fig. 5. Mesh configuration distribution study

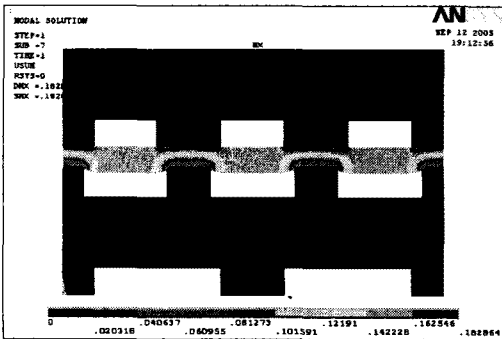


Fig. 7. Displacement distribution

목적함수는 무게로 설정하였으며, 제한조건은 구조해석을 수행할 때 응력과 박막면의 두께로 설정하였다. 또한 설계변수는 공기판과 수소판의 두께( $t_1$ ,  $t_2$ )로 설정하였다. 이를 정식화하면 식 (6)~(8)로 나타낼 수 있으며, 설계변수의 범위는 식 (9), (10)으로 나타낼 수 있다.

Minimize: 
$$F = \sum_{i=1}^n \gamma_i A_i l_i \quad (6)$$

Subject to: 
$$G_1 = \frac{\sigma}{\sigma_{max}} - 1 \leq 0 \quad (7)$$

$$G_2 = \frac{u}{u_{max}} - 1 \leq 0 \quad (8)$$

$$0.3 \leq t_1 \leq 1.5 \quad (9)$$

$$0.3 \leq t_2 \leq 1.5 \quad (10)$$

여기서,  $\gamma$ ,  $A$ ,  $l$  은 각각 재료의 비중량과 단면적 그리고 단위길이이다.

5.2 결정론적 최적설계 결과

근사 모델링 기법 중 일반적으로 사용되는 반응표면법을 이용하여 연료전지 분리판의 단

면형상을 최적화 시킨 결과가 Table 1에 제시되었다. Table 1에서 설계변수(design variable)의 단위는 mm, 목적함수의 단위는  $10^{-3}N$ , 제한조건의 응력과 변위 단위는 각각 MPa과 mm이다. 연료전지 분리판 단면형상을 최적화시키기 위하여 중심합성법(central composite design, CCD)을 이용하여 실험점을 추출한 후 반응표면을 생성하여 최적설계를 수행하였다.

최적화 결과를 살펴보면, 목적함수 값은 초기에  $6.19 \times 10^{-3}N$ 에서 22.6% 감소한  $4.791 \times 10^{-3}N$ 을 얻었다. 초기 두께가 1.2mm이었던 공기판과 수소판의 두께는 공기판(cathode)  $t_1=1.274mm$ , 수소판(anode)  $t_2=0.880mm$ 의 값을 얻었다. 최적화 결과, 공기판 두께의 경우 초기값보다 증가하였다. 이는 제한조건을 만족시키기 위해 연료전지 분리판 단면이 증가하면서 나타난 현상이라 볼 수 있다. 총 iteration 수는 180회였다.

5.3 확률론적 최적설계 정식화

최적설계는 주어진 구조 모델의 목적함수를 최소화하고 주어진 제한 조건을 만족하는 설계 값을 찾아내는 방법이다. 이러한 기법 중 확률론적 최적설계인 신뢰성기반 최적설계는 설계변수에 존재할 수 있는 불확실성을 좀 더 합리적으로 고려하는 방법이다. 신뢰성기반 최적설계시 확률 제한 조건식의 위반 확률값을 근사할 때 설계 변수가 정규분포를 가지는 독립변수임을 가정하므로 각 설계변수들의 분포는 정규분포로 하였다. 또한 연료전지 분리판의 신뢰성기반 최적설계를 수행할 때, 결정론적 제한조건을 확률론적 제한조건으로 정의하여 정식화하였다. 정식화 과정은 식 (11)~(13)으로 나타낼 수 있으며, 설계변수의 범위는 식 (14), (15)로 나타낼 수 있다.

Minimize: 
$$F = \sum_{i=1}^n \gamma_i A_i l_i \quad (11)$$

Subject to: 
$$P\left[\frac{\sigma}{\sigma_{max}} - 1\right] \leq P_{\sigma}^a \quad (12)$$

$$P\left[\frac{u}{u_{max}} - 1\right] \leq P_u^a \quad (13)$$

$$0.3 \leq t_1 \leq 1.5 \quad (14)$$

$$0.3 \leq t_2 \leq 1.5 \quad (15)$$

식 (12), (13) 에서,

Table 1 Result of deterministic optimization

Deterministic Optimization		
Design variable	Nominal Value	
	Initial	Final
t <sub>1</sub>	1.2	1.274
t <sub>2</sub>	1.2	0.880
Constraint	Normal Value	
	Initial	Final
Stress	7.394	7.907
Displacement	0.183	0.193
OBJ	Nominal Value	
	Initial	Final
Mass	6.19	4.849

$P\left[\frac{\sigma}{\sigma_{max}} - 1\right]$  : 최대응력이 허용응력을 넘지 않을 확률

$P\left[\frac{u}{u_{max}} - 1\right]$  : 최대변위가 허용변위를 넘지 않을 확률

$P_{\sigma}^a$  : 응력에 관한 허용파괴확률

$P_u^a$  : 변위에 관한 허용파괴확률

확률론적 제한조건은 결정론적 최적설계 정식화 과정에서 정의한 응력의 제한조건식을 사용하였고, 목표신뢰도지수를 설정하여 신뢰성기반 최적설계를 수행하였다. 본 연구에서는 허용파손확률을 10%로 설정하여 구조물의 파손확률이 10%이하일 경우 안전하다고 보았다.

5.4 확률론적 최적설계 결과

신뢰성기반 최적설계를 수행하기 위하여 본 연구에서는 개선된 일계이차모멘트법(advanced first order reliability method, AFORM)을 사용하였다. 또한 최적설계시 구조해석을 요하기 때문에 함수값의 계산량을 줄이기 위해 반응표면법을 이용하여 확률론적 제한조건을 근사화시켜 확률변수의 최적점을 찾았다.

본 연구에서는 반응표면법을 이용한 결정론적 최적점이 수소관 및 공기관의 두께 변화에 대하여 높은 신뢰도를 보인 반면, 최대응력에 대해서는 파괴확률이 높은 편이기 때문에 최대응력에 대한 확률론적 제한조건에 대하여 목표신뢰도를 98%로 설정하고 신뢰성기반 최적설계를 수행하였다. 신뢰도지수 접근방법을 이용한 연료전지 분리판의 단면형상을 최적화 시킨 결과가 Table 2에 제시되었다. 각 확률변수

Table 2 Result of Reliability Based Design optimization

Deterministic Optimization				
Design variable	Nominal Value			
	Initial		Final	
t <sub>1</sub>	1.274		1.318	
t <sub>2</sub>	0.880		0.849	
Constraint	Nominal Value		Nominal Value	
	Initial	Final	Initial	Final
Stress	7.907	9.312	89.29%	97.13%
Displacement	0.193	0.197	95.1%	98.9%
OBJ	Nominal Value			
	Initial		Final	
Mass	4.849		4.870	

(random variable)의 단위는 Table 1의 단위와 동일하다. 총 iteration 수는 432회였다.

신뢰성기반 최적설계 결과를 살펴보면, 각 확률변수의 평균과 분산을 고려한 신뢰성 해석 결과, 최대응력이 9.312MPa로 제한조건 14.5MPa를 만족시켰으며 이에 대해 97.13%의 신뢰도를 보였다. 이는 목표신뢰도보다 낮은 결과이지만, 허용파괴확률을 만족하는 결과를 보였다. 변위에 대한 신뢰성 해석 결과는 최적점에서 최대 변위가 0.197mm로 허용변위 0.2mm를 만족시켰으며, 이에 대해 98.9%의 높은 신뢰도를 보였다. 이는 결정론적 최적점에서의 신뢰도인 95.1%보다 높은 신뢰도를 얻은 것이며, 목표신뢰도인 98%를 만족시키는 결과이다. 또한 최대응력과 변위 모두 본 연구에서 설정한 10% 이하의 허용파괴확률을 만족시켰기 때문에 신뢰성 최적설계에 의한 최적점은 최대응력과 변위에 대해 안전하다고 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 연료전지의 경량화 및 소형화를 위한 최적설계를 수행하였다. 최적설계를 위해 연료전지의 특성을 파악하여 구조해석을 수행하였고, 구조해석 수행 결과를 토대로 반응표면법을 사용하여 최적설계를 수행하였으며, 이를 설계변수가 가지고 있는 불확실성을 합리적으로 고려한 최적화 결과와 비교하였다.

그러나 본 연구에서 신뢰성기반 최적설계 시 요구되는 허용파괴확률을 10%로 가정하였기 때문에 정확한 최적점을 얻기 위해서는 실제 허용파괴확률이 필요하다. 또한, 연료전지의 대량생산과 일반화를 위하여 분리판에 대한 재질

개발이 이뤄지고 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 재질 이외의 어떤 재질을 사용하였을 때 더 좋은 목적함수 값을 얻을 수 있을지에 대한 연구도 함께 이뤄져야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 및 서울대학교 비행체특화연구센터의 연구비 지원에 의한 연구 결과입니다.

## 참고문헌

- 1) G & G Services Parsons, 2000, "*fuel cell handbook*," U. S. Department of Energy Office of Fossil Energy, 5th, pp. 3-1~3-8.
- 2) Wang, G. and Dong, Z., 2000, "Design Optimization of A Complex Mechanical System Using Adaptive Response Surface Method," *Transactions of the CSME*, Vol. 24, No. 1B, pp. 295~306.
- 3) Zheng, R. and Dong, Z., "Finite Element Structure Design of Fuel Cell Plate," *11th Canadian Hydrogen Conference*, Victoria., BC, June 17-21, 2001, pp. 183~191.
- 4) K. J. Bathe, "*Finite Element Procedures*," Prentice-Hall International, Inc., 1996, pp. 622-628.