

Axiomatic Design 기법을 이용한 연료전지 냉시동 특성 개선에 관한 연구

**서 정도¹⁾, 이 성호¹⁾, 안 병기¹⁾, 임 태원¹⁾, 유 하나²⁾, 이 대길²⁾

Investigation on the cold start characteristics of PEMFC using Axiomatic Design approach

**Jungdo Suh, Sungho Lee, Byungki Ahn, Taewon Lim, Hana Yu, Daigil Lee

Key words : Cold start(냉시동), Fuel cell(연료전지), Axiomatic Design(공리설계)

Abstract : Cold start of a fuel cell system is a major obstacle should be overcome as to commercialize it, especially for passenger vehicle applications. However, the cold start characteristics is so complicated since it involves various phenomenon such as ice-blocking in GDL, ionic conductivity in membrane affected by water activity with phase change, heat transfer through components such as bipolarplates or endplates, electro-chemical reactions affected by circumferential temperature and humidity as well. Axiomatic design provides a systematic method to investigate the complex phenomenon although it was developed as a methodology to establish logical design procedure by Nam P. Suh in 1990s. This paper presents a framework to approach the complex cold start problem using Axiomatic Design which features simplifying a problem through hierarchical decomposition and decoupling from the view of functional requirements and design parameters.

Nomenclature

- R : gas constant (8.314 J/mol · K)
- T : absolute temperature (K)
- n : number of electrons (2)
- F : faraday's constant (96,485 C/mol)
- R_i : internal resistance (Electrical + Ionic)
- λ : water content (# of H₂O / SO₃H)
- i₀ : exchange current density (A)
- i_L : limiting current density (A)
- κ : ionic conductivity (S/m)
- a : water activity (P/P_{sat})

1. 서론

최근 환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 CO₂를 배출하지 않는 새로운 에너지원에 대한 관심이 커지고 있다. 특히 환경오염의 주요 원인 중 하나로 여겨지는 자동차 분야의 세계 각국 메이커들에서는 미래의 자동차용 동력원으로서 수소 연료전지 개발에 박차를 가하고 있다. 연료전지는 수소와 산소의 전기화학반응으로부터 전기에너지

를 제공하므로 반응에 의하여 생성되는 순수한 물과 반응열 이외의 오염물질을 전혀 배출하지 않는 미래의 청정 에너지원이다. 그러나 연료전지의 상용화를 위하여 기술적으로 극복하여야 하는 과제들이 많이 남아있다. 첫째, 겨울의 저온 환경에서 냉시동은 대표적인 문제점이다. 자동차는 -30°C~40°C에 이르는 가혹한 온도변화에서 시동이 가능하고 작동도 안정적이어야 한다. 특히 영하의 저온에서는 스택을 구성하는 이온교환막(Membrane)의 이온전도도가 떨어질 뿐만 아니라, 얼음에 의해 전기화학반응이 일어나는 촉매표면으로 수소 또는 공기 공급경로가 차단되기도 한다. 또한, 물의 상변화시 부피변화는 촉매, 이온교환막 등 연료전지 구성부품의 내구성에 나쁜 영향을 미친다. 이에, 미국 에너지성(DOE)에서는 2010년까지 -20도 저온 시동시 30초 내에 최대 출력을 발생시키는 연료전지 개발을 목표로 하였고,

1) 현대자동차, 환경기술연구소, 연료전지개발실
E-mail : suhjd@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3142 Fax : (031)899-3331

2) KAIST, 기계공학과, 신소재 응용 기계설계 연구실
E-mail : suhjd@hyundai-motor.com
Tel : (042)350-3261 Fax : (042)350-5221

현대, 혼다, GM 등 각국의 자동차 메이커에서는 냉시동 관련 기술개발에 매진하고 있다. 이의 결과로 현대자동차에서는 2004년에 -20도 시동 가능한 연료전지 투싼 개발에 성공한 바 있고, 퍼징(Purging)등 운전기술 뿐만 아니라 냉시동에 적합한 시스템 개발도 추진하고 있다. 둘째, 스택내 물평형에 관한 것인데, 스택내 반응열의 적절한 제거는 촉매 내구성 확보뿐만 아니라 이온교환막의 이온전도도 유지를 위하여 중요하다. 현재 많이 사용되는 나피온(Nafion)막은 적절한 함수도를 유지하여야 수소이온(Proton)을 전달할 수 있다. 따라서 막의 건조(Drying)을 방지하기 위하여 공급하는 수소/공기를 가습하기도 하는데, 가습이 지나치게 많거나, 전기화학반응에 의한 생성수가 적절히 배출되지 못하면 액상 수분이 과다한 상태(Flooding)가 되어 수소/공기의 공급이 원활하지 않게 된다. 따라서 스택내 수분이 적정수준으로 유지 될 수 있도록 하는 운전기술이 필수적이다. 셋째, 연료전지의 전기화학반응에서 수소와 산소의 화학에너지는 전기에너지와 열에너지로 변환된다. 촉매, 막 등의 내구성을 확보하기 위하여 적절한 냉각이 필요한데, 연료전지는 60~80도 정도로 비교적 저온에서 작동하므로 냉각수 온도가 낮고 대기 온도와의 온도차가 작다. 따라서 기존 가솔린 엔진에 적용하던 것 보다 성능이 크게 향상된 고효율, 고성능 라디에이터 개발이 필요하다.

이 외에도 여러 가지 극복하여야 하는 과제들이 있으나, 그 중에서도 특히 냉시동은 스택내부 물의 상변화, 구성요소의 열관성과 열전달, 전기화학반응, 수소/공기의 공급 및 가습 등 여러 가지 변수와 관련되어 매우 복잡한 현상이므로 이에 대한 체계적 고찰이 필요하다. 공리설계(Axiomatic Design)은 1990년대에 공학 설계의 체계적 접근을 위하여 M.I.T.의 서남표 교수에 의하여 제안된 방법론으로서 복잡한 현상을 논리적으로 분석하고 해답을 찾아가는 방법을 제시해 준다^(1, 2).

본 논문에서는 연료전지 상용화를 위하여 극복하여야 할 여러 가지 문제 중, 가장 시급하게 극복되어야 하는 냉시동에 대하여 공리설계(Axiomatic Design)이론을 바탕으로 한 방법론을 제시하고자 한다.

2. 공리 설계(Axiomatic Design)

공리 설계 관점에서의 설계 과정은 Fig. 1과 같이 기능적 영역(Functional Domain)과 물리적 영역(Physical Domain)을 정의하고, 이들을 대응 시키는 과정(Mapping)으로 요약된다. 이러한 기능적 영역과 물리적 영역은 Functional Requirement (FR)와 Design Parameter (DP)로 구체화 된다.

실제 공학문제에서 FR과 DP는 Fig. 2에서와 같이 상위로부터 하위 레벨의 FR-DP 세트들로 분해(Decomposition) 되는데, 지그재깅 과정(Zig-Zagging Process)를 통하여 구현 된다. 다수개로 구체화된 하위 FR-DP의 세트가 각각 3개씩의 FR과 DP로 Decomposition 되었다고 가정하면, 이들의 관계는 아래와 같은 Design matrix에 의하여 표현된다. 여기서 각각의 대응관계는 서로 연관이 있을 때 X, 없을 때 O로 표현한다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ O & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

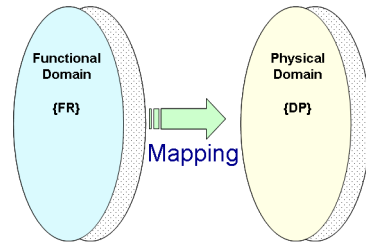


Fig. 1 Mapping from functional domain to physical domain

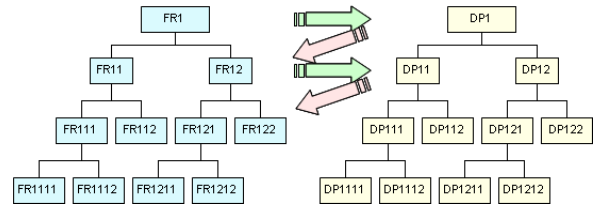


Fig. 2 Decomposition of FR-DP sets through zig-zagging procedure

이를 Design equation으로 표현하면,

$$\begin{aligned} FR_1 &= fr_1(DP_1) \\ FR_2 &= fr_2(DP_2) \\ FR_3 &= fr_3(DP_2, DP_3) \end{aligned} \quad (2)$$

과 같고 DP변화에 따른 FR의 변화를 미분방정식으로 표현하면

$$\begin{aligned} dFR_1 &= \frac{\partial FR_1}{\partial DP_1} \cdot dDP_1 \\ dFR_2 &= \frac{\partial FR_2}{\partial DP_2} \cdot dDP_2 \\ dFR_3 &= \frac{\partial FR_3}{\partial DP_2} \cdot dDP_2 + \frac{\partial FR_3}{\partial DP_3} \cdot dDP_3 \end{aligned} \quad (3)$$

과 같다.

Design Matrix에서 가장 이상적인 경우는 Uncoupled 형태로서 FR과 DP가 1 대 1로 대응하여 하나의 DP이 바뀌어도 해당 FR만 영향을 받고 다른 FR이 변하지 않는 형태이다.

$$\text{Uncoupled Design Matrix: } \begin{bmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ O & O & X \end{bmatrix} \quad (4)$$

일반적인 공학문제는 한 개의 DP가 수정되면 복수개의 FR이 변화하는 Coupled 형태가 많다. 이 경우 한 개의 DP가 바뀌면 여러 개의 FR이 동시에 변화하여 모든 FR을 만족하기 위하여 결국 모든 DP를 바꾸어야 하는 것을 의미한다. 즉, 어떠한 문제를 해결하기 위하여 한가지 물리적 변수를 변경하였을 때, 또 다른 문제가 발생하여 결국 다른 모든 물리적 변수도 변경을 하여야 하므로 문제 해결 과정이 순차적이지 못하고 Loop를 형성하여 결국은 초기에 목표하였던 FR을 모두 만족하는 것이 어렵게 된다.

$$\text{Coupled Design Matrix : } \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix} \quad (5)$$

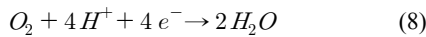
대부분의 경우 Coupled Design은 새로운 디자인 컨셉을 사용한 FR-DP 설정을 통하여 Decoupled Design으로 변환할 수 있으며^(3, 4, 5), 이 경우는 Matrix 연산의 가우스 소거법에서 사용하는 방법과 유사하게, 순차적으로 변화하는 DP를 결정하여 모든 FR을 만족하기 위한 DP 결정 순서가 체계적으로 정하여 진다.

$$\text{Decoupled Design Matrix : } \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ X & X & X \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. 연료전지의 작동과 냉시동

3.1 연료전지 내부의 전기화학반응

사용하는 전해질의 종류에 따라 연료전지는 다양한 종류로 구분되는데, 자동차용으로 주로 PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)이 사용된다. PEMFC의 음극 (Anode)에서는 아래와 같은 수소의 산화 반응이 일어나고, 양극에서는 산소의 환원 반응이 일어난다.



이러한 전기화학반응을 통하여 얻을 수 있는 이상적인 전위 (Electrical Potential)는 Nernst Equation에 의하여 계산되는데⁽⁶⁾, 반응물인 수소와 산소의 분압이 높을수록 높은 전위를 얻는다. 즉, 냉시동시 정상적인 작동상태에 이르기 위하여 수소와 산소를 원활히 공급하여 반응물의 농도를 유지하여야 한다. 그러나 빙점이하 냉시동시 GDL, 촉매층, 유체공급 유로에 생성되는 얼음은 이를 어렵게 만들 수 있다.

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2} (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2}} \right) \quad (9)$$

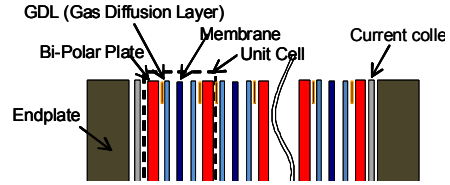


Fig. 3 Schematic of a fuel cell stack

전류가 흐르는 실제 작동 상황에서 셀 전압은 활성화 분극 (Activation Polarization), 내부 전류 (Internal Current), 오믹 분극 (Ohmic Loss), 농도 분극 (Concentration Polarization) 등 요인에 의하여 떨어지게 된다.

$$E = E_r - \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) - iR_i \quad (10)$$

여기서 R_i 는 전기적 저항 뿐만 아니라 막의 이온전도 저항도 포함하는 것으로 온도와 함수도에 의하여 크게 영향을 받는다. 나피온 (Nafion) 막의 경우 이온전도도는 아래 식으로 근사된다.

$$\kappa = (0.005139\lambda - 0.00326) \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (11)$$

여기서 함수도 λ 는 주어진 온도에서 물의 분압 (Partial Pressure)에 대한 포화온도 (Saturation Pressure)의 비인 Water activity a 의 함수로서 아래 식으로 표현할 수 있다.

$$\lambda = 0.043 + 17.18a - 39.85a^2 + 36a^3 \quad (12)$$

3.2 냉시동의 공리설계 분석 예

(엔드플레이트 중심)

앞 절에서 기술된 바와 같이, 냉시동시 30초 정도의 빠른 시간 내에 정상적인 작동에 이르고 안정적인 전력 공급을 하기 위하여 전기화학반응이 일어나는 촉매 표면으로 수소와 공기를 원활히 공급하고, Water activity를 높여 막에서 일어나는 오믹 손실 (이온전도 손실 포함)을 최소화 하는 것이 중요하다. 연료전지 스택은 Fig.3과 같이 양단의 엔드플레이트 사이에 적층/체결된 단위 셀들로 이루어진다. -20도 냉시동시 금속재질의 엔드플레이트는 자체의 열관성 이 클 뿐만아니라, 열전도도가 크기 때문에 전기화학반응에 의하여 발생한 열이 촉매부근이나 채널에 형성된 얼음을 녹여 Ice-Blocking을 방지하는데 사용되지 못하고, 엔드플레이트의 온도를 상승시키는데 사용되거나 외부로 방출되는 문제점이 있다. 또한 엔드플레이트는 단위셀에 적절한 면압을 가하여 GDL/MEA/분리판 사이에서의 전기접촉저항을 줄이는 역할을 해야 하므로, 최대한 경량화 하면서 충분한 강성을 갖는 것이 중요하다. 따라서 냉시동 특성을 만족시키기 위한 엔드플레이트는 열관성과 열전도율이 작고 경량 구조이면서 구조 강성도 충분히 커야 한다. 이를 공리설계의 FR-DP로 나누어 분석하면 기존의 금속재료 엔드플레이트는 Coupled Design Matrix를 갖는 바람직하지 않은 설계임을 알 수 있다.

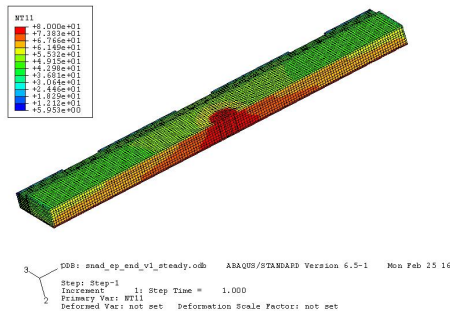


Fig. 4 Section temperature contour of a sandwich endplate at steady operating condition

그러나 내부에 열전도 저항이 큰 폼 코어, 스킨에 비강성이 우수한 복합재료를 사용한 샌드위치 엔드플레이트를 설계 컨셉으로 Decomposition을 수행하여보면 공리 설계 관점에서의 좋은 설계를 의미하는 Decoupled Design Matrix를 얻을 수 있다.

- FR1 = Provide uniform pressure to the stack with small mass
- FR11 = Provide high specific stiffness to the endplate
- FR12 = Develop a clamping method for the stack
- FR2 = Increase the dielectric strength of the face of the endplate
- FR3 = Increase the corrosion resistance of the face of the endplate
- FR4 = Improve the cold start characteristics
- FR41 = Minimize thermal energy storage in the endplate
- FR42 = Minimize heat transfer to the environment

- DP1 = High specific stiffness with a clamping device
- DP11 = Sandwich structure
- DP12 = Clamping device
- DP2 = Face of glass fiber reinforced polymeric composite
- DP3 = Materials of high corrosion resistance
- DP4 = Thermal characteristics of the endplate
- DP41 = Small heat capacity
- DP42 = Thermal insulating panel (Foam)

	DP11	DP12	DP2	DP3	DP41	DP42
FR11	X	0	0	0	0	0
FR12	0	X	0	0	0	0
FR2	0	0	X	0	0	0
FR3	0	0	0	X	0	0
FR41	X	0	0	0	X	0
FR42	X	0	0	0	X	X

Fig. 6은 기존의 금속재 엔드플레이트와 복합재료 샌드위치 엔드플레이트가 -20도 냉시동시 정상상태의 온도로 올라가는데 필요한 열 에너지를 유한요소법으로 계산하고 부분별로 비율을 나타낸 것이다. 총 필요 에너지량의 경우 복합재료 샌드위치 엔드플레이트는 기존 금속재료 엔드플레이트에 비하여 약 60% 정도의 열에너지를 흡수한다.

4. 결론

본 논문에서는 연료전지 상용화를 위하여 극복하여야 할 과제 중, 냉시동에 관하여 엔드플레이트의 설계 개념을 중심으로 공리설계 관점의 분석을 시도하였다. 냉시동 향상을 위한 저열관성/고열도저항, 스택의 고른 면압 유지를 위한 높은 구조 강성이라

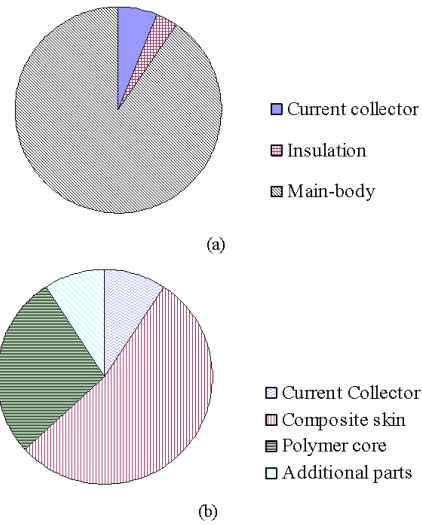


Fig. 5 Thermal energy required to increase temperature of endplates from -20°C to the steady state when inner surface is 80°C allowing convective heat transfer to -20° ambient air (a) Conventional endplate (Total energy required =100), (b) sandwich endplate (Total energy required = 60)

는 Functional Requirement를 만족하기 위하여 복합재료 샌드위치 구조를 컨셉으로 하여 Decoupled Design으로 설계가 가능하였다. 또한 복합재료 샌드위치 엔드플레이트의 열전달 해석을 통하여 -20도에서 냉시동시 Steady Operating condition에 이르는 동안 흡수하는 열에너지가 기존의 금속재 엔드플레이트에 비하여 약 60% 정도임을 확인하였다.

References

- [1] Suh, N. P., *Axiomatic Design*, Oxford University Press, New York, 2001.
- [2] Suh, N. P., *A Theory of Complexity and Applications*, Oxford University Press, New York, 2005.
- [3] Hwang, I. U., Yu, H. N., Kim, S. S., Lee, D. G., Suh, J. D., Lee, S. H., Ahn, B. K., Kim, S. H., Lim, T. W. "Bipolar plate made of carbon fiber epoxy composite for polymer electrolyte membrane fuel cells," J. of power sources, Vol. 184, pp. 90-94, 2008.
- [4] Yu, H. N., Kim, S. S., Hwang, I. U., Lee, D. G., Suh, J. D., Jeong, K. S., Ahn, B. K., 2008, "Axiomatic design of hybrid composite endplate for PEMFC in fuel cell vehicles," JSAE Proceedings.
- [5] Hwang, I. U., Yu, H. N., Kim, S. S., Lee, D. G., Suh, J. D., Lee, S. H., Kim, S. H., Ahn, B. K., 2008, "Development of Carbon Composite Bipolar Plate for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell in Passenger Vehicle," SAE Proceedings.
- [6] Khandelwal, M., Lee, S. H., Mench, M. M., "One-dimensional thermal model of cold-start in a polymer electrolyte fuel cell stack," J. of power sources, Vol. 172, pp. 816-830, 2007.