

복합재료 샌드위치 엔드플레이트의 연료전지 냉시동성 향상에 미치는 효과

서정도*[†], 고재준*, 안병기*, 유하나**, 이대길**

*현대자동차, **한국과학기술원

Effect of Composite Sandwich Endplates on the Improvement of Cold Start Characteristics for PEMFC

JUNGDO SUH*[†], JAEJUN KO*, BYUNGKI AHN*, HANA YU**, DAIGIL LEE**

**Fuel Cell Vehicle Team1, Eco Technology Center, Corporate R&D Division,
Hyundai·KIA Motors, 104, Mabuk-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do,
Republic of Korea, 446-912*

***Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
ME3221, 373-1, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon-si,
Republic of Korea, 305-701*

ABSTRACT

The cold start problem is one of major obstacles to overcome for the commercialization of fuel cell vehicles. However, the cold start characteristics of fuel cell systems are very complicated since various phenomena, i.e. ice-blocking, electro-chemical reactions, heat transfer, and defrosting of BOP components, are involved in them. This paper presents a framework to approach the problem at a full stack scale using Axiomatic Design (AD). It was characterized in terms of Functional Requirements (FRs) and Design Parameters (DPs) while their relations were established in a design matrix. Considering the design matrix, the endplates should have low thermal conductivity and capacity without increase in weight or decrease in structural stiffness. Consequently, composite sandwich endplates were proposed and examined both through finite element analyses and experiments simulating cold start conditions. From the examinations, it was found that the composite sandwich endplates significantly contributed to improving the cold start characteristics of PEMFC.

KEY WORDS : Endplate(엔드플레이트), Cold start(냉시동), PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Sandwich structure(샌드위치 구조), Composite(복합재료)

Nomenclature

E_r : OCV (open circuit voltage, V)

E_0 : electrical potential at S.T.P (1.23 V)

E : electrical potential

P : pressure (Pa)

R : gas constant (8.314 J/mol · K)

T : absolute temperature (K)

[†]Corresponding author : suhjd@hyundai.com

[접수일 : 2011.12.1 수정일 : 2011.12.8 게재확정일 : 2011.12.27]

- n : number of electrons (2 for H₂)
- F : faraday's constant (96,485 C/mol)
- R_i : internal resistance (electrical + ionic, Ω)
- λ : water content (# of H₂O / SO₃H⁺)
- i₀ : exchange current density (A)
- i_L : limiting current density (A)
- κ : ionic conductivity (S/m)
- α : transfer coefficient
- a : water activity (P/P_{sat})

1. 서 론

최근 환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 CO₂를 배출하지 않는 새로운 에너지원에 대한 관심이 커지고 있다. 특히 자동차 배기가스는 환경오염의 주요 원인 중 하나이기 때문에 세계 각국의 자동차 업체들에서는 미래의 자동차용 동력원으로 수소 연료전지 개발에 박차를 가하고 있다. 연료전지는 수소와 산소의 전기화학반응으로부터 전기에너지를 제공하므로 반응에 의하여 생성되는 순수한 물과 반응열 이외의 오염물질을 전혀 배출하지 않는 미래의 청정 에너지원이다. 그러나 연료전지의 상용화를 위하여 기술적으로 극복하여야 하는 과제들은 많이 남아있다. 겨울철 저온 환경에서의 냉시동은 대표적인 문제점이다. 자동차는 -30~40°C에 이르는 가혹한 온도환경 변화에서 시동이 가능하고 작동도 안정적이어야 한다. 영하의 저온에서는 스택을 구성하는 이온 교환막(membrane)의 이온 전도도가 떨어질 뿐만 아니라, 전기화학반응이 일어나는 촉매 표면으로 수소 또는 공기를 공급하는 경로가 얼음에 의하여 차단되는 빙결차단(Ice-Blocking) 현상이 일어나기도 한다¹⁾. 이에 미국 에너지성(DOE)에서는 2010년까지 -20°C 저온 시동 시 30초 내에 최대 출력을 발생하는 연료전지 개발을 목표로 하였었다. 따라서 각국의 자동차 업체들에서는 연료전지 냉시동 관련 기술개발에 매진하고 있으며 시동정지(shut-down), 퍼징(purging)등 운전기술뿐만 아니라 냉시동에 적합한 이젝터(ejector), 수소 재순환 블로워(recirculation blower)등의 개발을 통하여 -20°C에서 냉시동을 성공시키고 보다 저온

에서의 냉시동을 위한 기술개발을 진행하고 있다.

연료전지의 냉시동 문제는 전기화학반응, 열전달, 반응물과 생성물의 상변화, 전해질 막의 함수도에 따른 이온 전도도의 변화, 전자 이동 현상 등이 복잡하게 연관되어 있기 때문에 이의 극복을 위하여 체계적이고 논리적인 고찰이 필요하다²⁾. 엔드플레이트(endplate)는 스택의 양단을 지지하는 판상 부품으로 스택의 구조적 강성 및 균일한 면압 유지를 위하여 두꺼운 금속재질로 만들어지는 것이 일반적이다²⁾. 그런데 스택의 냉시동시 엔드플레이트와 인접한 셀에서는 엔드플레이트로의 열손실에 의하여 빙결차단이 발생하기 쉽고, 이에 따라 발생하는 역전압 현상 및 카본부식(carbon corrosion)은 연료전지 내구성에 나쁜 영향을 미치게 된다. 섬유 강화복합재료 또는 탄소섬유는 비강성, 열특성에서 큰 장점을 가지므로 경량화 및 냉시동을 고려할 때 연료전지 구성 요소용 재료로 큰 가능성(high potential)을 가진다^{3,4)}.

본 연구에서는 냉시동 특성 개선을 스택 수준에서 고찰하고 엔드플레이트에 대하여 공리설계(axiomatic design)에 의한 설계 방법론을 제시 하였다. 무게를 증가시키지 않으면서 강성을 유지하여야 하고, 열전도도 및 열팽창이 작을 것이 요구되므로 복합재료를 이용한 샌드위치 구조가 제안되었다. 또한 복합재료 샌드위치 구조에서 스킨과 코어 재질에 따른 기계 및 열적 특성을 시험적으로 확인하고, 실제 엔드플레이트를 설계 및 제작하였다. 개발된 복합재료 샌드위치 엔드플레이트는 냉시동시 열손실에 대한 유한요소 해석과 냉시동시 셀전압 측정 시험을 통하여 성능향상에 큰 효과가 있음을 검증하였고, 경량화에도 크게 기여 할 수 있음을 확인하였다.

2. 연료전지와 엔드플레이트의 공리설계

2.1 전기화학반응과 냉시동

고분자 전해질 연료전지 스택(PEMFC Stack)은 Fig. 1과 같이 막-전극 접합체(MEA, membrane electrode assembly), 가스 확산층(GDL, gas diffusion

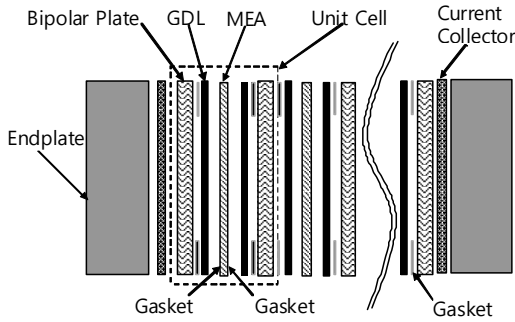


Fig. 1 Schematic of a fuel cell stack

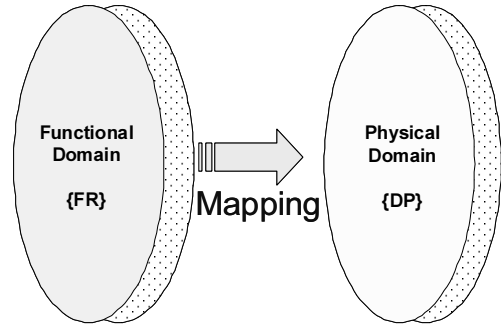


Fig. 2 Mapping from functional domain (FR) to physical domain (DP)

layer), 분리판(bipolar plate)으로 구성된 단위 셀이 (unit cell) 수십에서 수백개 적층(stack) 되어 이루어지는데, 이러한 스택의 양단을 지지하는 판상의 구조물이 엔드플레이트이다. 수소와 산소의 전기화학반응을 통하여 얻을 수 있는 이상적인 전위 E_r 는 네른스트 식(nernst equation)에 의하여 계산되는데, Eq. (1)과 같이 반응물인 수소와 산소의 분압이 높을수록 높은 전위를 얻는다¹⁾. 즉, 냉시동시 정상적인 작동상태에 이르기 위하여 수소와 산소를 원활히 공급하여 반응물의 분압을 적정수준으로 유지하여야 한다. 그러나 빙점이하 냉시동시 가스 확산층, 촉매층, 유체공급 유로에 생성되는 얼음은 반응기체의 이동경로를 차단하여 이를 어렵게 만들 수 있다.

$$E_r = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (1)$$

전류가 흐르는 실제 작동 상황에서 셀 전압은 활성화 분극(activation polarization), 내부 전류(internal current), 옴 손실(ohmic Loss), 농도 분극(concentration polarization)등 요인에 의하여 더 많은 전압 손실이 발생한다.

$$E = E_r - \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i}{i_L - i} \right) - i \cdot R_i \quad (2)$$

여기서 R_i 는 전기적 저항뿐만 아니라 막의 이온 전도 저항도 포함하는 값으로 온도와 함수도에 의하여 크게 영향을 받는다. 나피온(nafion) 막의 경우 이온전도도는 아래 식으로 근사된다.

$$\kappa = (0.006139\lambda - 0.00326) \cdot \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

여기서 함수도 λ 는 주어진 온도에서 물의 분압 (partial pressure)에 대한 포화압력(saturation pressure)의 비인 물의 활동도 a (water activity)의 함수로서 아래 식으로 표현할 수 있다. 빙점이하 온도에서는 물이 고상으로 존재하여 활동도가 떨어지므로 연료전지의 옴 분극의 증가로 성능저하 현상이 일어날 수 있다.

$$\lambda = 0.043 + 17.18a - 39.85a^2 + 36a^3 \quad (4)$$

2.2 공리설계

공리 설계 관점에서 설계 과정은 Fig. 2와 같이 기능적 영역(functional domain)과 물리적 영역(physical domain)을 정의하고, 이들을 대응 시키는 과정(mapping)으로 요약된다. 이러한 영역들은 기능적 요구조건(functional requirement, FR)와 설계 변수(design parameter, DP)로 구체화 된다. 이와 같이 기능적 요구조건-설계 변수의 대응 쌍으로 문제가

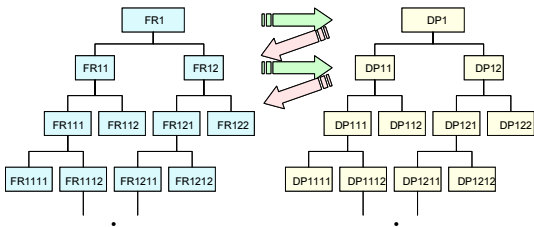


Fig. 3 Decomposition of FRs-DPs sets through zig-zagging procedure

분해(decomposition)되면, 이들의 관계는 디자인 행렬(design matrix)에 의하여 표현된다. 아래의 예에서는 이러한 대응이 3쌍의 조합으로 이루어져 있음을 가정하고, 각각의 대응관계를 서로 연관이 있을 때 X, 없을 때 O로 표현하였다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ O & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

위의 디자인 행렬식의 의미를 일반적인 함수의 종속변수-독립변수의 관계로 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} FR_1 &= \text{Function}(DP_1) \\ FR_2 &= \text{Function}(DP_2) \\ FR_3 &= \text{Function}(DP_2, DP_3) \end{aligned} \quad (6)$$

실제 공학문제에서 기능적 요구조건과 설계 변수는 Fig. 3에서와 같이 상위 레벨(higher level)로부터 하위 레벨(leaf level)로 분해되는 서열 체계(hierarchy)를 가지는데, 이는 지그재깅 과정(zig-zagging)를 통하여 얻어질 수 있다⁵⁾. 디자인 행렬에서 가장 이상적인 경우는 Eq. (7)과 같은 독립 설계(uncoupled design)로 기능적 요구조건과 설계 변수가 1대 1로 대응하여 하나의 설계 변수가 바뀌면 해당 기능적 요구조건만 영향을 받고 다른 기능적 요구조건이 변하지 않는 형태이다.

바람직하지 못한 설계의 디자인 행렬은 Eq. (8)과 같이 연관 형태로 나타난다. 즉, 한 개의 설계변

수를 변경하였을 때 다수개의 기능적 요구조건에 영향을 미쳐 결국 다른 설계 변수도 변경을 하여야 하므로 문제 해결 과정이 순차적이지 못하고 결국 무한히 반복 되는 변경 과정(infinite loop)을 거치게 되어 초기에 목표하였던 기능적 요구조건을 모두 만족하는 것이 어렵게 된다.

$$\text{독립: } \begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{연관: } \begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

대부분의 경우, 연관 설계는 새로운 설계 개념 도입을 통하여 Eq. (9)의 분리 설계(decoupled design)로 변환할 수 있으며, 이 경우 가우스 소거법에 따른 행렬 연산 방법과 유사하게 DP₁으로부터 DP₃까지 순차적으로 설계 변수들을 결정하여 모든 기능적 요구조건을 만족하기 위한 설계 변수결정 순서가 체계적으로 정하여진다.

$$\text{분리: } \begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

2.3 엔드플레이트의 공리설계

엔드플레이트는 스택 체결시에 변형하지 않고 단위 셀에 고르게 면압을 가하여야 가스 확산층/막-전극 접합체/분리판 사이에서의 전기 접촉저항을 최소화 할 수 있고 반응가스 및 냉각수의 기밀성을 유지할 수 있다. 따라서 기존 엔드플레이트는 두꺼운 금속재질로 제작하는 것이 일반적 이었다.

연료전지 냉시동시, 30초 정도의 단시간 내에 정상적인 작동에 이르러 안정적인 전력 공급을 하기 위하여 전기화학반응이 일어나는 촉매 표면으로 수소와 공기를 원활히 공급하고, 고분자 전해질 막 내

Table 1 Design matrix for a composite sandwich endplate

	DP ₁₁	DP ₁₂	DP ₂	DP ₃	DP ₄₁	DP ₄₂
FR ₁₁	X	O	O	O	O	O
FR ₁₂	O	X	O	O	O	O
FR ₂	O	O	X	O	O	O
FR ₃	O	O	O	X	O	O
FR ₄₁	X	O	O	O	X	O
FR ₄₂	X	O	O	O	X	X

부의 물의 활동도를 높여 막에서 일어나는 오믹 손실을 최소화 하는 것이 중요하다. 그러나 금속재질의 엔드플레이트는 열관성(thermal mass)과 열전도도가 크기 때문에 냉시동 초기 전기화학반응에 의하여 발생한 물로부터 많은 열에너지를 흡수하고 엔드플레이트에 인접한 셀 내부에 열음을 생성시킴으로 빙결 차단에 의하여 반응기체의 공급을 방해할 뿐만 아니라 높은 자중으로 인하여 연료전지 차량의 중량을 무겁게 하는 단점이 있다.

공리설계 관점에서 기존 금속 재질 엔드플레이트를 분석하면 고강성과 저열관성 및 저열도도 관련 기능적 요구조건이 연관 되어있어 바람직하지 못한 설계이다. 즉, 금속 모노코크 구조의 엔드플레이트에서 고강성을 만족하기 위하여 두께를 키우면 열손실이 커지고, 열손실 저감을 위하여 두께를 낮추면 강성이 떨어진다. 엔드플레이트는 고강성, 저열관성, 저열도도, 전기절연성, 내화학성 등 다양한 기능적 요구조건이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 기능적 요구조건들을 만족시키는 설계 개념으로 내부에 열전도 저항이 크고 비중이 작은 폼 코어, 면재에 비강성이 우수한 복합재료를 사용한 샌드위치 구조를 통하여 공리설계의 분리 개념을 구현 하였다. 이로부터 얻어진 기능적 요구조건과 설계 변수를 이용하여 Table 1의 하단 삼각행렬(lower triangular matrix)로 표현되는 분리 설계를 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 : Provide electrical insulation

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 rate

DP₁ : Endplates and clamping device

DP₁₁ : Endplates of sandwich structure

DP₁₂ : Clamping device

DP₂ : Outer surfaces made of glass fiber reinforced polymeric composite

DP₃ : Face materials made of high corrosion resistance

DP₄ : Thermal characteristics of the endplate

DP₄₁ : Small thermal mass of composing materials

DP₄₂ : Thermal insulating panel (Foam)

3. 복합재료 샌드위치 구조의 특성

3.1 구조의 강도와 강성

샌드위치 구조는 강성이 큰 두개의 면재(face) 사이에 비중이 작은 코어(core)를 접합하여 구성되며 다양한 재료의 조합으로 제작이 가능하다. 시험용 샌드위치 시편의 면재는 스테인레스(SUS)와 탄소 섬유강화 에폭시 복합재료(URN 300, SK chemical, Korea)를 사용하였고 코어는 폴리우레탄 폼(PUF, Finetech, Korea), 아라미드 섬유 하니콤(aramid fiber honeycomb, hexcel, UK), 폴리우레탄 삽입 아라미드 섬유 하니콤(aramid fiber honeycomb filled with PUF)의 3종류를 사용하였다. 면재와 폼 포

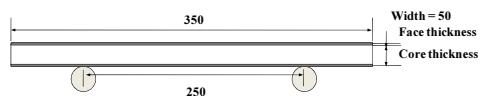


Fig. 4 Dimension of specimen for 3-point bending test

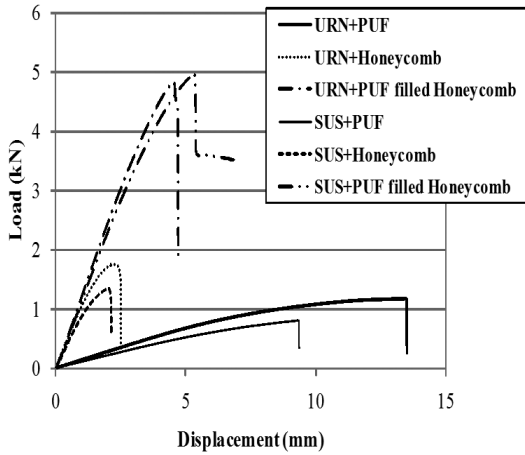


Fig. 5 Representative load-displacement curves of different sandwich beams

합한 코어의 접합에는 에폭시 접착제(aladite AW 160)를 사용하였고 면재와 하니콤의 접합에는 필름 접착제(FM305M, cytec, USA)을 사용하였다. 굽힘 강성, 강도의 측정은 Fig. 4와 같이 ASTM D 7903의 3점 굽힘시험 방법으로 인스트론(Instron4469, USA)의 헤드 속도 2.5mm/min에서 시험하였다.

Fig. 5는 재료에 따른 샌드위치 구조의 하중-변위 선도, Fig. 6은 샌드위치 시편의 코어 재료별 파괴모드, Table 2는 굽힘 강성과 강도에 관한 결과를 나타낸다. 폼 코어 사용한 샌드위치 구조는 큰 변형이 일어나는 동안 파단은 일어나지 않지만 취약한 전단강성으로 인하여 구조의 강성을 효과적으로 향

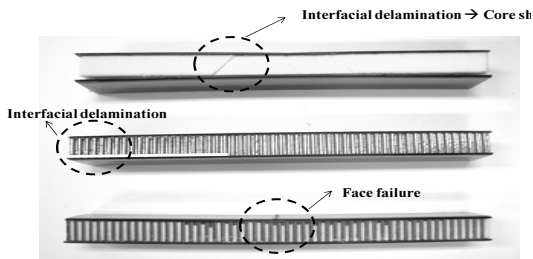


Fig. 6 Failure modes of the sandwich beams with Foam, Honeycomb, PUF filled Honeycomb core

Table 2 Structural properties of sandwich beams made of various materials

	Flexural strength (MPa)	Flexural rigidity (Pa·m ⁴)	Specific strength (MPa/kg)	Specific rigidity (Pa·m ⁴ /kg)
URN+PUF	13.1	45.8	72.6	254
URN+Honeycomb	22.1	339	123	1880
URN+PUF filled Honeycomb	60.1	401	296	1970
SUS+PUF	9.7	33.9	17.2	60.3
SUS+Honeycomb	21.8	306	38.9	547
SUS+PUF filled Honeycomb	65.7	374	111	630

상시키기 어렵다. 하니콤 코어를 사용한 샌드위치 구조는 큰 굽힘 강성을 얻을 수는 있지만 면재와 코어의 작은 접착 면적으로 인하여 작은 변위에서 계면의 파단이 일어나므로 폼 코어에 비하여 강도 측면에서는 큰 향상을 기대하기 어렵다. 폼 코어를 삽입한 하니콤을 코어로 사용하면 높은 강성과 강도를 동시에 만족할 수 있다.

3.2 열전도도

샌드위치 구조로 엔드플레이트를 제작하는 경우 두께 방향의 열전도도가 냉시동에 영향을 미치며 이는 면재와 코어의 열전도도와 계면의 열저항에 의하여 결정된다. 300×300×20mm 치수를 갖는 샌드위치 시편의 두께방향 열전도도는 열전도도계(HFM 436, NETZSCH, USA)를 이용하여 25°C and 70°C에서 각각 측정하였다. Table 3의 시험 결과에 의하

Table 3 Thermal conductivities (W/m·K) in the thickness directions of various sandwich plates

Material (Face + Core)	Temperature (°C)	
	25	70
URN+PUF	0.0478	0.0600
URN+Honeycomb	0.0953	0.1160
URN+PUF filled Honeycomb	0.0742	0.0881
SUS+PUF	0.0323	0.0397
SUS+Honeycomb	0.0819	0.0984
SUS+PUF filled Honeycomb	0.0618	0.0705

Table 4 Thermal properties of endplate materials

Material	SUS	Glass-epoxy	Phosphor bronze
Specific heat [J/g·°C]	0.5	0.38	0.38
Density [kg/m ³]	8.0×10 ³	1.85×10 ³	8.8×10 ³
Thermal conductivity [W/m·K]	16.3	0.35	62
Modulus [GPa]	210	40	-
Material	PPA	Carbon-epoxy	Polyurethane foam
Specific heat [J/g·°C]	1.21	1.13	0.044
Density [kg/m ³]	1.47×10 ³	1.63×10 ³	0.96×10 ³
Thermal conductivity [W/m·K]	0.26	0.87	0.09
Modulus [GPa]	-	380	0.47~2.07

면 코어 재료가 샌드위치 구조의 두께방향 총 열전도도에 중요한 기여를 하며 폼이 하나쯤에 비하여 단열특성이 우수함을 알 수 있다. 그러나 스테인레스 강의 열전도도가 16.3W/m·K 임을 고려하면 다양한 코어를 사용한 샌드위치 구조는 모두 단열특성이 크게 우수하다고 사료된다.

4. 복합재료 샌드위치 엔드플레이트의 냉시동 향상 및 강성 증가 효과

4.1 흡열량 감소에 따른 열손실 저감

연료전지 냉시동 초기에 외곽 셀 부근의 반응열 손실을 줄이기 위하여 엔드플레이트 부피당 열용량 (specific heat·density)이 작고 열전도도 역시 작은 것이 좋다. Table 4는 일반적으로 엔드플레이트에 사용되는 재료들의 물성표이다. 엔드플레이트에 금속재를 사용하는 경우와 복합재료 샌드위치 구조를 사용하는 경우에 대하여 재료 열물성 및 구조 차이에 따른 열전달 특성 변화 대하여 유한요소해석 (FEM)을 통하여 상대비교 하였다.

해석조건은 스택 및 엔드플레이트의 온도가 -20°C 인 상태에서 엔드플레이트-분리판 경계면이 전기화학반응에 의하여 80°C로 순간적으로 올라가서 유지되며, 엔드플레이트 외면은 -20°C 외기에 노출된 상태에서 대류열전달에 의하여 열손실이 발생한다

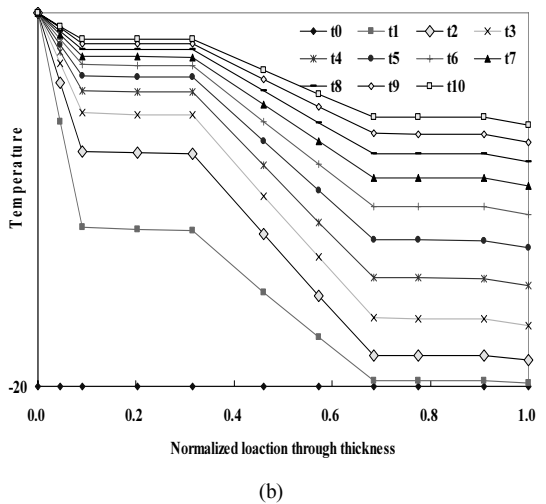
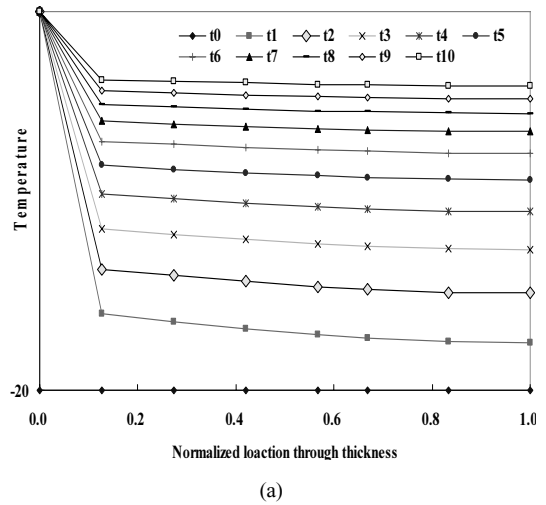


Fig. 7 Temperature variation of endplates with respect to time: (a) SUS endplate, (b) Composite endplate

고 가정하였다. Fig. 7은 시간에 따라 엔드플레이트의 두께방향 위치별 온도가 상승하는 과정을 나타낸다. 여기서 엔드플레이트 설계 관련 보안상의 이유로 인하여 두께 방향의 위치는 정규화된 두께 방향 위치 (Normalized Thickness)로 나타내었는데 0인 부분이 분리판에 접하는 부분이고 1인 부분이 외기에 노출된 부분이다. 시간도 t0 ~ t10으로 표시하여 숫자가 큰 것이 나중의 시간을 의미한다. 스테인레스계 금속 엔드플레이트의 경우, 복합재료나

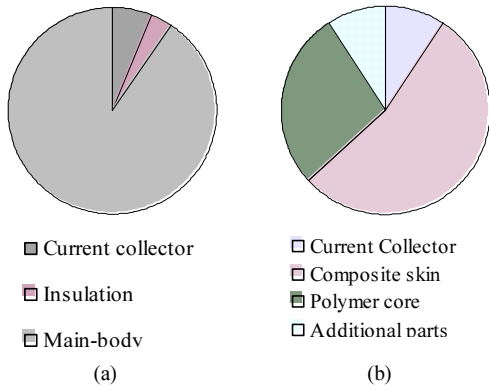


Fig. 8 Thermal energy required to increase temperature of endplates from -20°C to the steady state when inner surface is 80°C allowing convective heat transfer to -20° ambient air: (a) Conventional metallic endplate (Total energy required =100), (b) Sandwich endplate (Total energy required = 60)

폼 재료에 비하여 상대적으로 높은 열전도도로 인하여 전체적인 온도상승이 빠르며 엔드플레이트 내부에서 온도편차가 작다. 그러나 복합재료 샌드위치 엔드플레이트의 경우 낮은 열전도도에 의하여 전체적인 온도상승이 느리며 특히 폼재료 부분에서는 온도의 기울기(temperature gradient)가 크게 나타난다. Fig. 8은 단위부피당 열용량과 온도상승을 고려하여 냉시동시 정상상태에 이르기까지 엔드플레이트 구성요소별 열에너지 흡수량에 대한 계산결과이다. 스테인레스계 금속 엔드플레이트의 열에너지 흡수량을 100이라고 하였을 때 복합재료 샌드위치 엔드플레이트는 60의 열에너지 흡수량을 보였고, 이 중 50% 이상은 복합재료 스킨에서 흡수하였다.

이상의 결과로부터 복합재료 엔드플레이트의 경우 단위 부피당 열용량이 작고, 전체적인 온도상승이 느리므로 냉시동 초기에 엔드플레이트로의 열손실이 작음을 알 수 있다.

4.2 냉시동 특성 향상

엔드플레이트의 재료 및 구조 변화에 따른 냉시동 성능영향 평가를 위하여 복합재료 샌드위치 엔드플레이트를 적용한 스택과 기존 금속재 엔드플레이트를 적용한 스택의 저온 시동시 특성을 비교하였다.

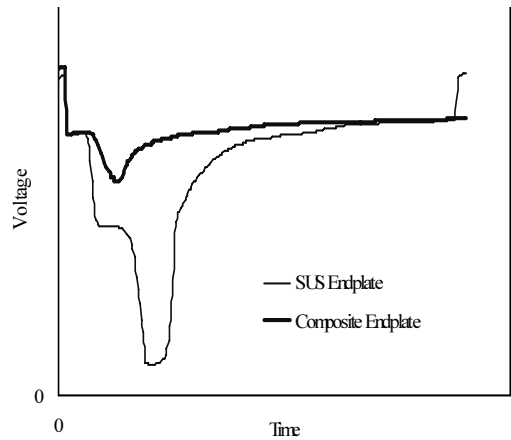


Fig. 9 Cell voltages during cold start with respect to endplate materials

스택은 15개의 단위셀로 구성하였으며, 수시간 동안 정상상태(steady state)로 운전한 후 정지하고 (shut-down) -20°C 에서 20시간 이상 경과한 후 냉시동을 시도하였다. 냉시동시 빙결차단은 주로 엔드플레이트에 인접한 셀에서 발생하므로 이러한 셀의 냉시동시 시간에 따른 전압변화를 측정하였고 결과는 Fig. 9와 같다. 스테인레스계 금속 엔드플레이트를 적용한 경우, 반응가스가 공급되기 시작하면서 셀 전압은 이상전압(OCV)에서 시작하여 급격히 떨어졌다가 장시간에 걸쳐 정상상태로 회복되는 경향을 나타낸다. 초기 전기화학반응에 의하여 만들어진 생성수가 엔드플레이트, 분리판 등 스택 구성품으로 열에너지를 빼앗김에 따라 상변화에 의한 빙결차단을 일으켜 반응면으로 수소와 공기의 공급을 방해한다. 일정시간 후 지속적인 전기화학반응에 의한 열발생으로 얼음이 녹기 시작하면 다시 반응가스의 공급이 원활해지면서 전압이 상승하여 정상작동상태에 이르므로 상기와 같은 결과가 나타난다. 반면 열관성 및 열전도도가 작은 복합재료 샌드위치 엔드플레이트를 적용한 경우 냉시동 초기 엔드플레이트로의 열확산량이 작으므로 빙결차단은 거의 일어나지 않으며 단시간내에 정상작동상태에 도달하였다. 즉 복합재료 엔드플레이트의

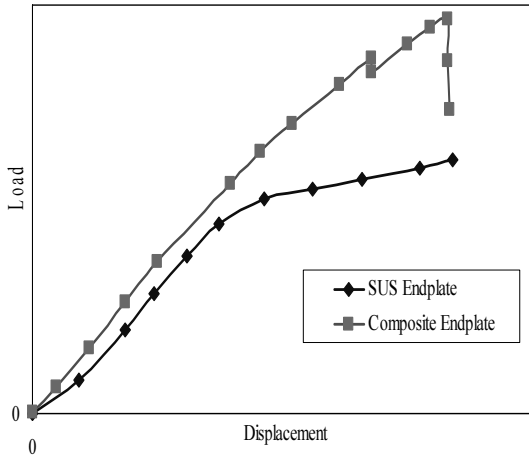


Fig. 10 Load-Displacement curves for SUS and composite endplates obtained by 3-Point bending test

적용에 의하여 연료전지 스택의 냉시동 성능을 크게 향상 시킬 수 있었다.

4.3 구조 경량화 및 강성 증대

개발된 복합재료 샌드위치 엔드플레이트와 기존 스테인레스계 금속 엔드플레이트의 기계적 강성은 ASTM D790의 3점 굽힘시험을 통하여 비교하였다.

Fig. 10의 하중-변위 선도에서 복합재료 샌드위치 엔드플레이트가 금속 엔드플레이트에 비하여 큰 기울기를 보여주는데 이는 높은 기계적 강성을 의미한다. 복합재료 샌드위치 엔드플레이트는 높은 비강성 특성으로 인하여 기존 금속재 엔드플레이트에 비하여 무게를 55% 경량화 하면서 강성은 14% 증가하는 효과를 나타냈다.

5. 결 론

본 연구에서는 연료전지 냉시동 특성 향상을 위하여 공리설계의 방법을 이용하여 열관성이 작고 열전도 저항이 큰 복합재료를 이용한 샌드위치 구조의 엔드플레이트를 제안하고 실제로 제작하여 냉

시동 및 경량화에 미치는 효과를 시험적으로 검증하였다.

- 1) 샌드위치 복합재료 엔드플레이트는 기존의 금속재 엔드플레이트에 비하여 열관성은 약 60% 정도로 감소하였고, 열전도 저항은 40% 정도 증가하였다. 이를 통하여 -20°C , 15셀 냉시동 시험에서 빙결차단이 지연되거나 발생하지 않음을 관찰하였고 연료전지 냉시동 특성 향상에 크게 기여할 수 있을 것이 기대된다.
- 2) 복합재료 샌드위치 엔드플레이트는 높은 비강성, 비강도 특성을 가져 기존 금속 엔드플레이트 대비 55%정도의 경량화를 실현하면서 14%의 강성 증대 효과를 얻었다.

참 고 문 헌

- 1) Barbir, F.: "PEM fuel cells : Theory and Practice", Elsevier academic press, US New York, 2005, pp. 197-200.
- 2) Ha Na Yu, Seong Su Kim, Jung Do Suh, Dai Gil Lee, "Axiomatic design of the sandwich composite endplate for PEMFC in fuel cell vehicle", Composite Structures, Vol. 92, Issue 6, 2010, pp. 1504-1511.
- 3) 김상현, 최영민, 황기호, 심지현, 황인철, 임태원, "연료전지자동차의 고압수소저장시스템 국부화재 신뢰성 평가", 한국수소 및 신에너지 학회논문집, Vol. 22, No. 4, 2011, pp. 520-526.
- 4) Jung Do Suh, Dai Gil Lee, "Thermal characteristics of composite sandwich structure for machine tool moving body applications", Composite Structures, Vol. 66, Issue 1-4, 2004, pp. 429-238.
- 5) Dai Gil Lee, Nam Pyo Suh: "Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures", Oxford, 2006.