

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2011.35.3.223

ISSN 1226-4873

## 세라믹 하니컴 담체의 3차원 유한요소해석을 위한 등가탄성방법의 효과적인 접근

백 석 흠\* · 조 석 수\*\*†

\* 동아대학교 기계공학과 BK21 박사후과정, \*\* 강원대학교 자동차공학과

### An Effective Approach of Equivalent Elastic Method for Three-Dimensional Finite Element Analysis of Ceramic Honeycomb Substrates

Seok Heum Baek\* and Seok Swoo Cho\*\*†

\* BK21 Post-Doctoral Fellow, Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.,

\*\* Dept. of Vehicle Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received June 3, 2010 ; Revised January 11, 2011 ; Accepted January 13, 2011)

**Key Words:** Equivalent Property(등가물성), Coefficient of Bonding (접합계수), Rule of Mixtures(혼합법칙), Cordierite Ceramic Substrate(코제라이트 세라믹 담체)

**초록:** 세라믹 모노리스 촉매는 두 계층으로 구성된 하니컴 구조이다. 하니컴 구조는 열유동 및 구조해석에서 연속체로 고려한다. 하니컴 구조의 등가 기계적 물성은 유한요소해석(FEA) 시험편으로부터 얻어진다. 강도 시험과 FEA는 ASTM C1674-08에서 소개된 사각 단위 셀 시험편과 시험방법에 의해 각각 달성되었다. 코제라이트 세라믹 층과 워시코트 층 사이의 접합계수는 거의 0이다. FEA 시험편은 접합계수에 기반한 모델로 만들어진다. 세라믹 모노리스 담체에서 탄성계수, 푸아송 비와 열적 물성은 FEA 시험편에 의해 결정하였다.

**Abstract:** A ceramic monolithic catalyst is a honeycomb structure that consists of two layers. The honeycomb structure is regarded as a continuum in structure and heat-flow analysis. The equivalent mechanical properties of the honeycomb structure were determined by performing finite element analysis (FEA) for a test specimen. Bending strength experiments and FEA of the test specimen used in ASTM C1674-08 standard test were performed individually. The bonding coefficient between the cordierite ceramic layer and the washcoat layer was almost zero. The FEA test specimen was modeled on the basis of the bonding coefficient. The elastic modulus, Poisson's ratio, and the thermal properties of the ceramic monolithic substrate were determined by performing the FEA of the test specimen.

## 1. 서 론

다공성 재료(porous material)는 충실 재료에 비하여 실험적 물성치를 얻는데 특별한 실험적 주의사항이 필요하다. 미국재료시험협회(ASTM)에서는 다공성 재료에 대한 시험규격을 충실 재료와는 별도로 제공하고 있다. 대표적으로 ASTM C1368-04, C1525-06, C1674-08 등<sup>(1-4)</sup>과 같은 다공성 하니컴 구조체 시험규격을 들 수 있다.

일반적으로 다공성 재료에 대한 해석적 물성치는 균질화 이론을 기본으로 충실 재료의 기계적 특성치와 함께 다공성 재료의 체적비 또는 다공

도(porosity)를 동시에 이용하여 구한다.

Vakdevit 등<sup>(5)</sup>은 복합재료 샌드위치 판넬의 종탄성계수와 횡탄성계수를 유한요소해석(finite element analysis: FEA)에 의한 굽힘 시험편으로 구하고, 실험값과 비교한 결과 95%의 정밀도가 있었다. 즉, 복합재료 샌드위치 판넬 코어와 플레이트의 접합성이 보장된다면 FEA로 기계적 특성치를 구할 수 있음을 보이고 있다. Torquato 등<sup>(6)</sup>은 다공성 구조체에 대한 탄성계수와 푸아송 비 및 열전도계수를 체적비로 나타내고, 이들 매개변수(parameter) 사이의 근사식도 제안하고 있다. 이 식은 기계적 물성치를 체적비로 나타내고 있어 단위 셀에 대한 응력 집중을 반영하지 못해 정확한 기계적 물성치를 파악하기 어렵다. 게다가 이

† Corresponding Author, sscho394@kangwon.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

매개변수를 구조해석에 근사적으로 이용하려면 구조체가 반드시 등방성이어야 한다.

이러한 관점에서 본 논문의 삼원촉매변환기(three-way catalytic converter)에 사용되는 하니컴 모노리스(honeycomb monolith) 구조를 가진 코제라이트 세라믹 담체(cordierite ceramic substrate)는 다공성 이방성 구조체이다. 따라서 효율적이고 정확한 구조해석을 위해서는 다음의 세 가지를 고려한 확실한 물리적 상태량이 필요하다.

- (1) 파단계수(modulus of rupture: MOR)<sup>(7,8)</sup>
- (2) 다공성 영향
- (3) 이방성 재료에 대한 등가 물성

Roe 등<sup>(9)</sup>은 다공성 이방성 구조체의 특성치를 많은 실험 결과를 기초로 종탄성계수 등과 같은 기계적 특성치에 대해 다공도와 충실 재료의 기계적 특성치를 이용하여 실험적 모델을 제안하였다. 그러나 다공성 담체의 기계적 특성치는 다공도  $p$ 와 다공도가  $p=0$  이었을 때의 기계적 특성치가 정확해야 코제라이트 하니컴 구조체의 기계적 특성치를 파악할 수 있다. 즉, 이러한 실험적 모델은 코제라이트 세라믹 재료의 강도 평가 측면에서는 유용하지만 코제라이트 세라믹 담체의 구조 설계 측면에서는 유용하지 못하다. 또한, 이방성 재료에 대한 구조 해석은 각 방향에 대한 탄성계수와 푸아송 비를 필요로 한다. Gulati 등<sup>(10,11)</sup>은 코제라이트 하니컴 담체의 종탄성계수나 파단계수 MOR 등이 구조적 이방성을 가지고 있음을 제한적 실험을 통하여 밝히고 있으나 모든 구조 해석에 필요한 물성 데이터를 체계적으로 제시하지 못하고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 4점 굽힘 시험에 의한 실험적 종탄성계수를 기초로 구조설계를 위한 코제라이트 하니컴 담체의 이방성 재료에 대한 탄성 매개변수의 결정을 제안한다. 세라믹 담체는 다공성 담체 벽(substrate wall)인 코제라이트와 촉매층(washcoat layer)의 두 부분으로 구성되어 있다. 이들 재료간의 물리적 상태량의 중요한 점은 접합계수(coefficient of bonding)의 변화에 대해 기계적 열적 특성이 변한다. 따라서 접합계수를 예측하고 이 값을 기초로 혼합법칙(rule of mixture)<sup>(12-15)</sup>을 이용하여 재료의 등가 물성을 구한다. 그 후에 FEA용 굽힘 시험과 인장 시험을 이용하여 주요 탄성 매개변수와 열적 물성치를 결정하고 실험과 비교하여 유효성을 설명하였다.

Table 1 Physical properties of cordierite and alumina

Properties	Cordierite	Alumina
Porosity $P$ (%)	35	60
Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,610	1,560
Thickness $t$ (mm)	0.08	0.03
Elastic modulus $E$ (GPa)	16.7	36
Poisson's ratio $\nu$	0.25	0.26
Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	20.7	26.2
Coefficient of thermal expansion $\alpha$ (1/°C)	$6 \times 10^{-7}$	$8 \times 10^{-6}$
Thermal conductivity $k$ (W/m°C)	1.67	9.25
Specific heat $c$ (J/Kg°C)	1465.4	15

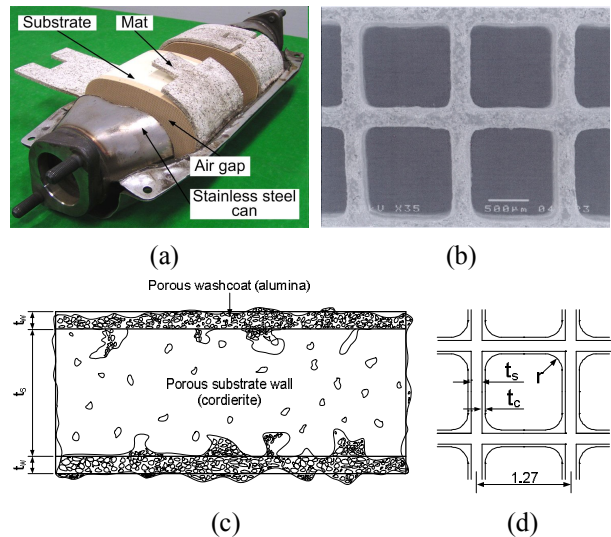


Fig. 1 (a) Photo of structure of three-way catalytic converter and (b) macroscopic view; (c, d) schematic illustration of 3-layer coated cell wall

## 2. 세라믹 하니컴 담체의 탄성 거동에 대한 구조 영향

### 2.1 다공성 담체/워시코트의 접합계수 영향

Table 1은 다공성 담체를 구성하는 코제라이트와 알루미나의 물성치를 나타낸 것이다.<sup>(14,16)</sup>

Fig. 1(a, b)는 삼원촉매변환기와 세라믹 하니컴 담체의 셀 구조를 나타낸 것이다. Fig. 1(c)는 담체의 셀 벽의 미시 구조를 나타낸 것으로 코제라이트 층, 알루미나 층, 코제라이트와 알루미나 접합 계면의 3층 대칭 적층재로 구성되어 있다. Fig. 1(d)는 본 논문의 모델인 단위 셀의 치수를 나타낸 것이다. 적층 복합재료의 각종 물리적 특성치는 두 재료간의 단위 셀 치수에 기반한 혼합

**Table 2** Coefficient of bonding and properties

Properties	Coefficient of bonding $\gamma$					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1610	1603.5	1598.5	1594.5	1591.3	1588.6
Elastic modulus $E$ (GPa)	16.7	19.8	22.9	26.0	29.1	32.2
Poisson's ratio $\nu$	0.25	0.2513	0.2523	0.2531	0.2538	0.2543
Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	20.7	21.4	21.9	22.4	22.8	23.0
Coefficient of thermal expansion $\alpha$ (1/°C)	$6 \times 10^{-7}$	$1.76 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-6}$	$3.25 \times 10^{-6}$	$3.75 \times 10^{-6}$	$4.16 \times 10^{-6}$
Thermal conductivity $k$ (W/m°C)	1.7	2.7	3.4	4.0	4.5	4.9
Specific heat $c$ (J/kg°C)	1465	1276	1131	1015	921	844

법칙<sup>(14,15)</sup>을 이용해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_s t_s + 2\gamma \rho_c t_c}{t_s + 2\gamma t_c} \quad (1)$$

$$\bar{E} = \frac{E_s t_s + 2\gamma E_c t_c}{t_s + 2\gamma t_c}, \quad \bar{\nu} = \frac{\nu_s t_s + 2\gamma \nu_c t_c}{t_s + 2\gamma t_c} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_s t_s + 2\gamma \sigma_c t_c}{t_s + 2\gamma t_c} \quad (3)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{E_s t_s \alpha_s + 2\gamma E_c t_c \alpha_c}{E_s t_s + 2\gamma E_c t_c} \quad (4)$$

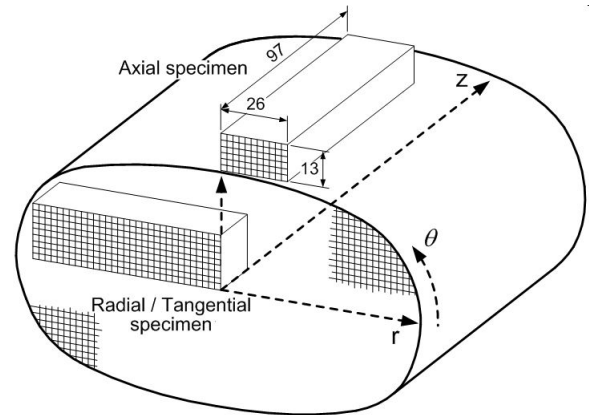
$$\bar{k} = \frac{K_s t_s + 2\gamma K_c t_c}{t_s + 2\gamma t_c} \quad (5)$$

$$\bar{c} = \frac{c_s t_s + 2\gamma c_c t_c}{t_s + 2\gamma t_c} \quad (6)$$

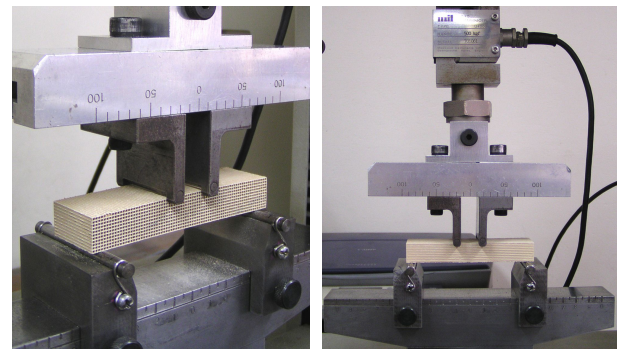
여기서 하첨자  $s$ : 코제라이트 담체, 하첨자  $c$ : 알루미늄 위시코트,  $t$ : 적층 두께,  $P$ : 다공도,  $\rho$ : 밀도,  $c_p$ : 비열,  $k$ : 열전도계수,  $E$ : 탄성계수,  $\nu$ : 푸아송 비,  $\alpha$ : 열팽창계수,  $\sigma$ : 인장강도,  $\gamma$ : 접합계수이다. 접합계수(coefficient of bonding)<sup>(15)</sup>  $\gamma$ 는 코제라이트 층과 위시코트 층 사이의 접합 정도를 나타내는 지수로서  $\gamma=0$ 은 코제라이트 층과 위시코트 층 사이에 접합이 없음을 의미하고  $\gamma=1$ 은 완전한 결합을 이루고 있음을 의미한다. Table 2는 식 (1)~(6)을 이용한 접합계수에 따른 담체의 기계적 물성치를 정리한 것이다.

2.2 탄성 거동의 이방성 영향

Fig. 2는 세라믹 담체의 물리적 특성치를 구하기 위한 담체의 원통 좌표계와 이의 시험편 채취 방향과 치수를 나타낸 것이다. 일반적으로 세라믹 사출 성형품의 반경방향과 접선방향의 기계적



**Fig. 2** Cylindrical coordinate system and specimen machined from ceramic substrate



(a) Radial direction (b) Axial direction

**Fig. 3** Four-point bending test

특성은 동일한 것으로 평가되고 있어 반경방향과 접선방향의 기계적 특성치는 동일한 것으로 가정하였다. 따라서 세라믹 담체의 기계적 특성치는 반경방향과 축방향만 고려하여 시험편을 채취하였다. 시험편 치수는 ASTM E855-90<sup>(17)</sup>의 규정에 의해 제작되었고 반경방향과 축방향이 동일하다.

Fig. 3은 4점 굽힘 시험의 전경을 나타낸 것이다. 4점 굽힘 시험에 의한 파단계수 MOR은 다음

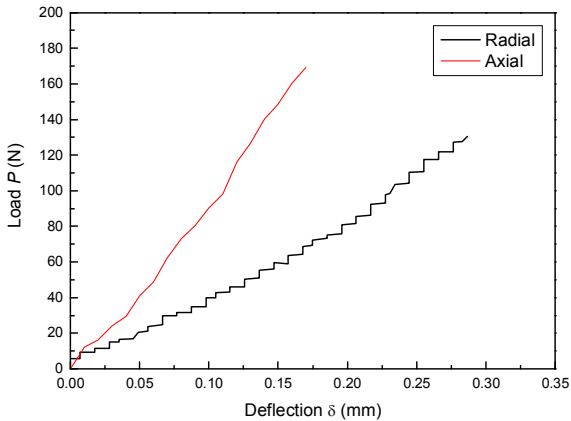


Fig. 4 Effect of specimen direction

의 식 (7)에 의해 구한다.<sup>(3,7,18)</sup>

$$MOR = \frac{3P_{max} a}{bh^2} \quad (7)$$

여기서  $L$ : 시험편 스패,  $a$ : 지지점에서 하중점까지의 거리,  $b$ : 시험편 폭,  $h$ : 시험편 높이이다.

Fig. 4는 4점 굽힘 시험에서 대표적인 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 하중-변위 선도는 일정한 직선 관계를 유지하지 않고 특이점이 발생되고 있다. 이러한 현상은 파괴 인성이 보강된 취성 재료의 대표적 현상으로서 세라믹이 가지고 있는 취성 파괴에 대한 저항성을 나타낸다. 축방향 보다는 반경방향 시험편에서 훨씬 더 빈번하게 발행하고 있어 재료 이방성이 존재하고 있음을 알 수 있다. 초기의 시험 영역은 시험조건에 영향을 많이 받으므로 시험편의 탄성계수를 구하기 위한 선도 기울기는 초기 이후 영역에서 구한 선도 기울기를 이용하였다.

### 3. 탄성 거동에 대한 등가 물성의 계산

#### 3.1 종탄성계수와 횡탄성계수

Fig. 5는 종탄성계수와 횡탄성계수를 구하기 위한 FEA용 3점 굽힘 시험편을 나타낸 것이다. 굽힘 시험편에 대한 굽힘 종탄성계수는 다음 식 (8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$E_b = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \quad (8)$$

여기서  $L$ : 시험편 스패,  $b$ : 시험편 폭,  $h$ : 시험편

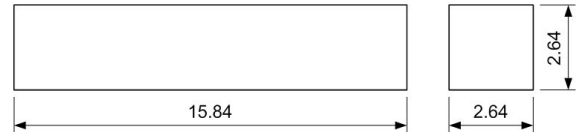


Fig. 5 Geometry and dimension for FEA bending test (three-point and four-point bend)

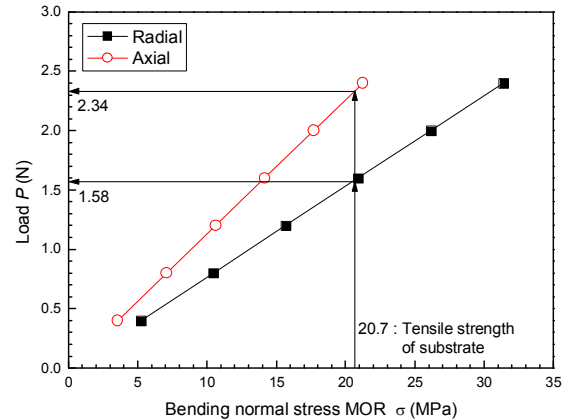
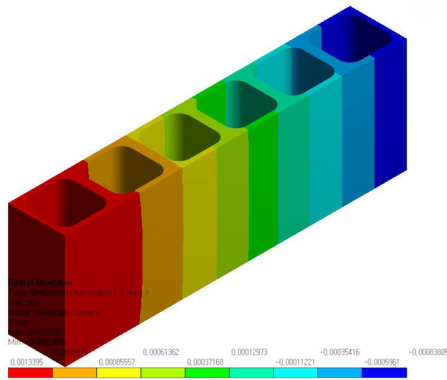


Fig. 6 MOR for cordierite ceramic honeycomb specimen

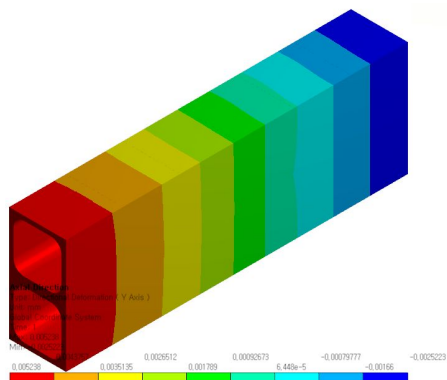
높이이다.

Fig. 6은 FEA를 이용한 3점 굽힘 시험에서 구한 굽힘강도인 파단계수 MOR을 나타낸 것이다. 코제라이트 세라믹의 인장강도가 20.7 MPa이므로 코제라이트 세라믹 하니컴의 3점 굽힘 시험편의 반경방향과 축방향의 파단하중(failure load)은 각각 1.58 N과 2.34 N이다. 이 값을 식 (7)에 대입하면 반경방향 MOR은 1.9 MPa이고 축방향 MOR은 3.195 MPa이다. 강도에 대한 재료 이방성이 강하게 나타나고 있으며 반경방향 MOR은 축방향 MOR의 약 59%이다. 따라서 세라믹 모노리스 담체의 구조 및 열응력 특성을 해석하기 위한 강도 설계 기준은 등방성 재료에서 사용하는 주응력 개념이 아니라 각 방향에 따른 수직 응력 개념으로 접근해야 한다.

Fig. 7은 3점 굽힘 시험편에 0.5 N이 부하될 때의 FEA 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8은 Table 2에서 접합계수 0에 대한 물성치를 기초로 Fig. 5의 3점 굽힘 시험편에 대한 하중 증가에 따른 수직 변위를 나타낸 것이다. 반경방향과 축방향 시험편의  $\Delta P/\Delta \delta$ 는 각각, 421 N/mm, 707 N/mm로 후자가 전자에 비하여 68%정도 더 큰 값을 가지고 있다. 따라서 반경방향 및 축방향 시험편에 대한 굽힘 종탄성계수는 각각 2.5 GPa, 4.3 GPa이다. 세라믹 재료의 하니컴 구조 시험편에 대한 탄성계수의 이방성은 축방향에 대한 탄성계수의



(a) Radial direction



(b) Axial direction

Fig. 7 FEA results of displacement for three-point bending test

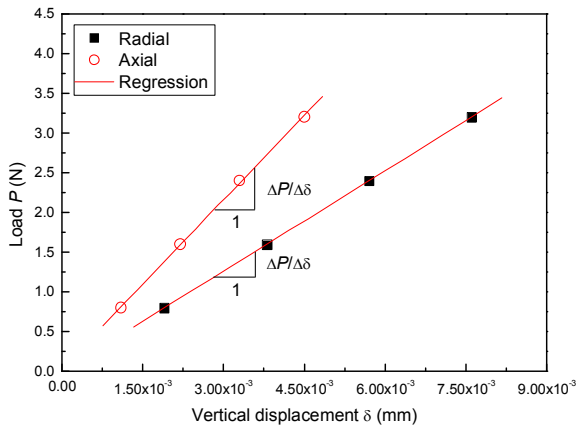


Fig. 8 Effect of specimen direction on elastic modulus

비로 나타낸다. 정사각형 셀 단면의 경우 보통 0.5정도의 값을 가진다. 그러나 본 시험편 형상의 경우, 축방향에 대한 탄성계수의 비가 0.58로 실험값에 비하여 9%정도 과대평가 되고 있다. 이러한 결과는 FEA에서 사용한 단면 길이 방향 셀 수가 2개로 굽힘 시험에서 사용하는 단면 길이 방향 셀 수 15개에 비하여 적어 전자가 후자에 비하여 변형을 구속이 적게 일어나 탄성계수의 이방성이

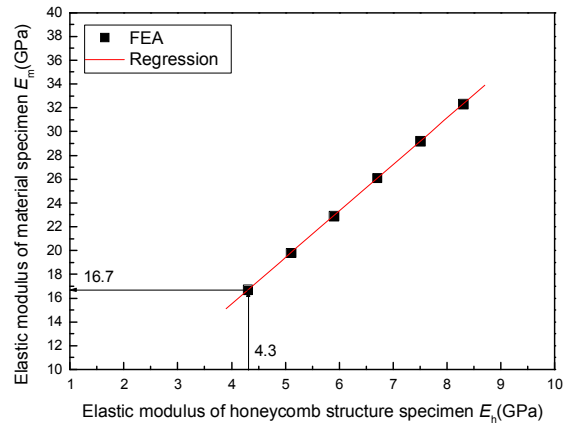


Fig. 9 Elastic modulus in material and honeycomb structure specimens

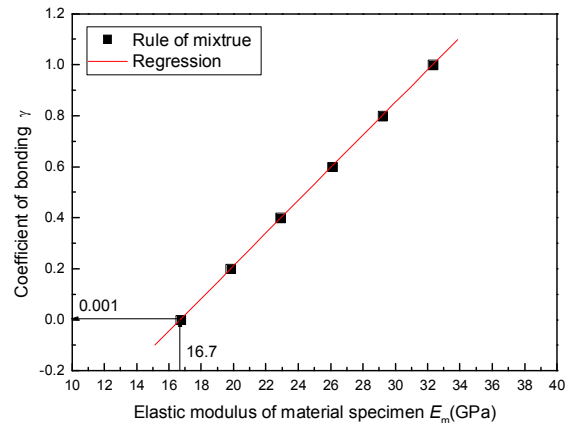


Fig. 10 Effect of coefficients of bonding on elastic modulus

적게 일어나는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 축방향 시험편에 대한 FEA 굽힘 시험 결과를 기반으로 Table 2의 탄성계수에 대한 하니컴 구조체의 탄성계수를 나타낸 것이다. 가로 축은 하니컴 구조체 시험편에 탄성계수를 나타낸 것이고 세로 축은 Table 2의 탄성계수를 나타낸 것이다. 하니컴 구조체의 탄성계수는 Fig. 8과 같은 방법으로 구하였다. 하니컴 구조체 시험편에서 구한 4.3 GPa에 대응하는 재료의 탄성계수는 16.7 GPa이다. Fig. 10은 탄성계수에 대한 결합계수의 분포를 나타낸 것으로 16.7 GPa에 대응하는 접합계수는 0.001인 것으로 추정된다. 즉, 다공성으로 구성된 세라믹 담체의 강도는 거의 코제라이트 세라믹이 담당하는 것으로 평가된다.

3점 굽힘 시험 동안 시험편은 굽힘과 전단변형을 동시에 받는다. 즉, 시험편은 수직하중에 의하여 굽힘 변형을 받고 수직하중의 1/2에 해당하는 전단하중에 의하여 전단변형을 받는다. 3점 굽힘



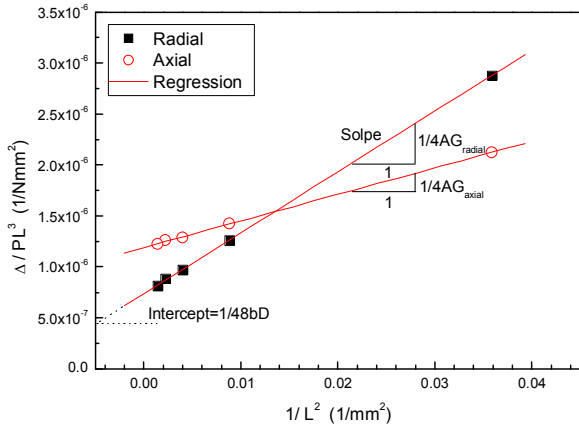


Fig. 11 Plots to determine effective transverse shear modulus for ceramic honeycomb specimen

상태에서 수직하중  $P$  에 의한 수직변위  $\delta$ 는 다음 식 (9)와 같이 정의 된다.<sup>(19,20)</sup>

$$\delta = \frac{PL^3}{48bD} + \frac{PL}{4AG} \quad (9)$$

여기서  $L$ : 보의 스패 길이,  $b$ : 보의 단면 폭,  $h$ : 보의 단면 높이,  $A$ : 보의 전단 면적,  $D$ : 보의 단위 폭 당 굽힘 강성,  $G$ : 보의 전단탄성계수이다.

식 (9)의 양변을  $1/PL^3$ 으로 나누면 다음 식 (10)과 같이 전개 되어  $\delta/PL^3 - 1/L^2$ 선도로 변환 된다.

$$\frac{\delta}{PL^3} = \frac{1}{48bD} + \frac{1}{4AG} \frac{1}{L^2} \quad (10)$$

Fig. 11은 3점 굽힘 시험 결과로부터 식 (10)에 대한  $\delta/PL^3 - 1/L^2$ 선도를 나타낸 것이다.  $\delta/PL^3$  축 절편에서 굽힘 강성  $D$ 를 구할 수 있으며 이 선도의 기울기에서 전단탄성강성을 구할 수 있다. 축방향과 반경방향 시험편의 기울기는 각각  $2.6 \times 10^{-6} 1/N$ ,  $6 \times 10^{-6} 1/N$ 이다. 또한, 선도의 기울기가  $1/4AG$ 인 것과  $A$ 가 유효전단면적인 것을 고려하면 축방향과 반경방향 전단탄성계수는 각각 1.4 GPa, 0.6 GPa임을 알 수 있다. 특히, 유효전단면적은 실제 하중을 부담하는 면적으로 축방향과 반경방향 시험편의 경우 모두  $2.1 \text{ mm}^2$ 으로 고려하였다. 축방향 전단탄성계수에 대한 반경방향 전단탄성계수의 비는 0.43으로 역학적 이방성이 종탄성계수보다 전단탄성계수가 훨씬 더 큼을 알 수 있다.

### 3.2 푸아송 비

Fig. 12는 푸아송 비를 구하기 위한 반경방향과 축방향 1/4 FEA 시험편에 대한 수직 변형률의 결과를 나타낸 것이다. 시험편 형상과 치수는 JIS Z 2201<sup>(21)</sup>에 규정된 인장 시험편 중 판상 비례 시험편 14B호를 기초로 설계하였다. 시험편 단면적  $A$ 는 유한요소모델의 대칭성을 고려하여 4개 셀로 설정하였으며 그 값은  $7 \text{ mm}^2$ 이다. 따라서 시험편 표점거리  $L$ 은  $5.65\sqrt{A}$  이므로 15 mm가 된다. 또한 시험편 평행부 거리  $P$ 는  $L + 2\sqrt{A}$ 이므로 단면적  $A$ 를 해당 식에 대입하게 되면 20.2 mm가 된다. 시험편 표점거리나 평행부 거리는 시험편 단면적의 한 변 길이의 정수배로 설정하되 반드시 계산된 시험편 표점거리나 평행부 거리보다는 크게 하였다. 따라서 시험편 표점거리와 평행부 거리는 각각 시험편 단면적의 한 변 길이의 12배와 16배인 15.84 mm, 21.12 mm이다. 구속조건은 하중 부하 단면을 제외한 나머지 단면에 대해 경계조건을 부여하고 시험편 그림 끝단에 하중을 적용하였다.

푸아송 비는 시험편의 부하 방향과 일치하는 방향의 주변형률(major strain)에 대한 부하 방향에 수직인 방향의 부변형률(minor strain)의 비를 나타낸 것으로 다음 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\nu = \left| \frac{\epsilon_{minor}}{\epsilon_{major}} \right| \quad (11)$$

Fig. 13은 FEA 시험편에 대한 주변형률-부변형률 선도를 나타낸 것이다. 선도의 기울기가 푸아송비로  $\nu_{xy}$ 는 0.22이고  $\nu_{yz}$ ,  $\nu_{zx}$ 는 0.3이다. Fig. 12의 FEA 결과는 시험편 전체에서 발생하는 변형률을 나타낸 것으로 식 (11)에서 사용하는 변형률 정의와는 차이가 있다. 식 (11)의 푸아송 비를 구하기 위한 변형률은 표점 거리에서의 변형률이다. 따라서 본 논문에서는 주변형률과 부변형률은 FEA 시험편의 표점 거리를 프로브(probe) 구간<sup>(22)</sup>으로 설정한 뒤 이 구간내에서 최대 변형률과 최소 변형률을 구하였다.

축방향 시험편의 변형률은 주변형률에 대한 부변형률의 방향성이 없다. 그러나 반경방향 시험편의 변형률은 주변형률에 대한 부변형률의 방향성이 현저하게 존재하고 있다. 즉, 부변형률 방향의 변형 형태에 따라 변형률에 상당한 차이를

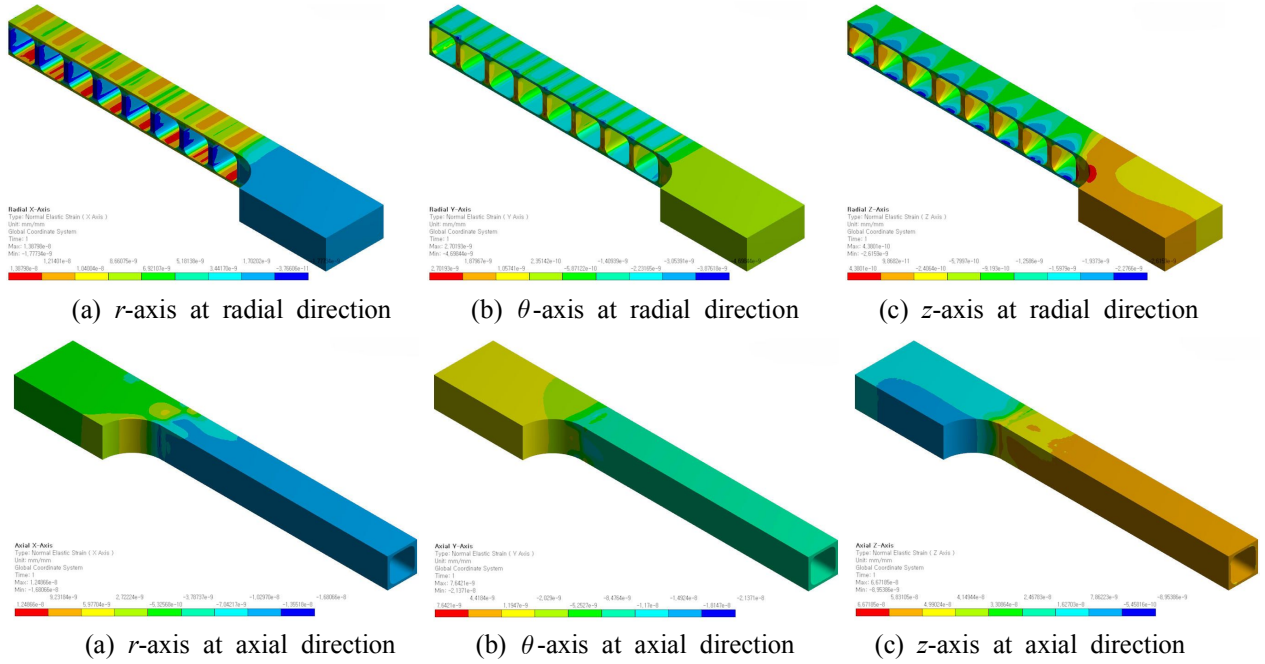


Fig. 12 Distribution of normal strain obtained from FEA

보이고 있다. 부변형률 방향의 변형 형태는 축방향에 반경방향에 비하여 대략 80% 정도의 과대한 변형률이 발생된다.

3.3 열전도계수, 열팽창계수와 비열

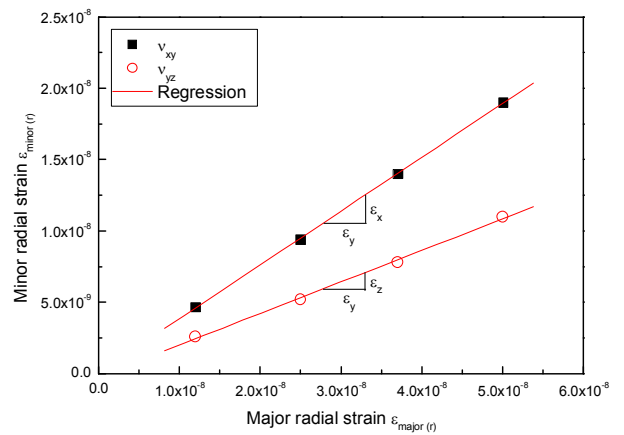
Fig. 14는 열전도계수와 열팽창계수를 구하기 위한 FEA 시험편 형상과 치수를 나타낸 것이다.

Fig. 15는 하니컴 구조체 시험편의 열전도계수를 구하기 위한 FEA 결과를 나타낸다. 시험편의 경계조건은 한쪽 면은 온도 22°C로, 반대면은 열량 0.2 W로 설정하고 나머지 벽면은 단열로 가정한 뒤 정상 열전달 해석을 수행하였다.

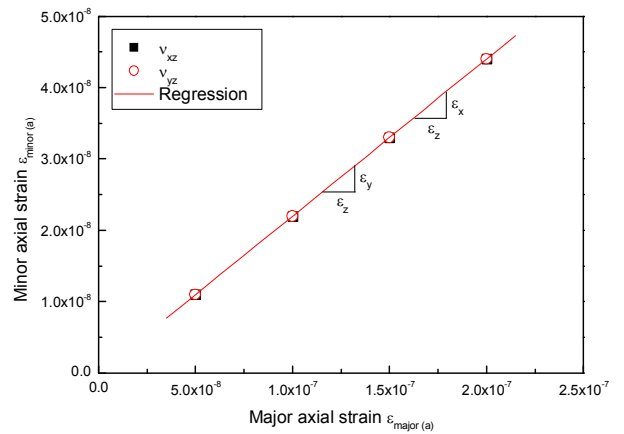
Fig. 16은 시험편에 입력되는 열량에 따른 정상 상태에서의 고온과 저온 부분에서의 온도 차이를 나타낸 것이다. 열량이 증가함에 따라 온도 차이는 증가하고 있으며 축방향과 반경방향의 선도 기울기는  $1.2 \times 10^{-4} \text{ W/}^\circ\text{C}$ ,  $6.9 \times 10^{-6} \text{ W/}^\circ\text{C}$ 이다. 따라서 시험편 길이(7.92 mm)와 시험편 단면적( $1.7424 \text{ mm}^2$ )을 고려하여 다음 식 (12)를 이용하여 열전도계수를 계산 할 수 있다.

$$k = \frac{L}{A} \frac{\Delta Q}{\Delta(\Delta T)} \tag{12}$$

식 (12)로부터 축방향과 반경방향 열전도계수는 각각  $0.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $0.3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 이다. Gulati 등<sup>(23)</sup>에



(a) Radial specimen



(b) Axial specimen

Fig. 13 Poisson's ratio for honeycomb structure specimen

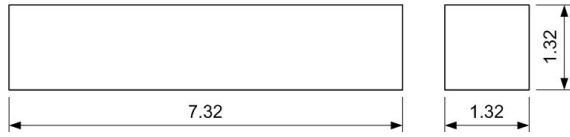
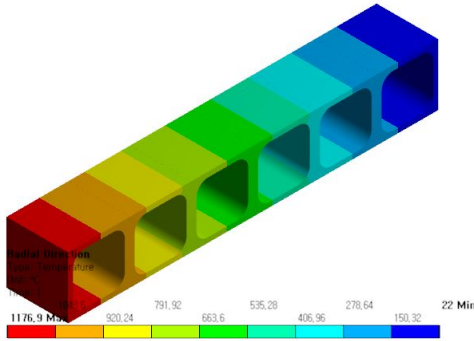
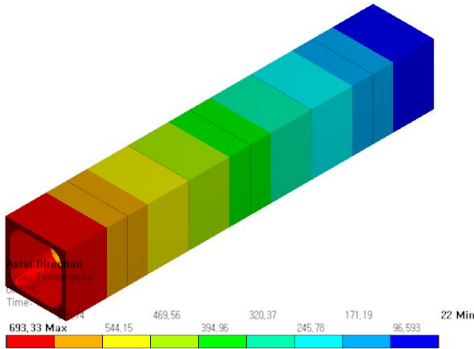


Fig. 14 FEA test specimen for thermal conductivity and coefficient of thermal expansion



(a) Radial direction



(b) Axial direction

Fig. 15 FEA results of temperature for thermal conductivity measurements

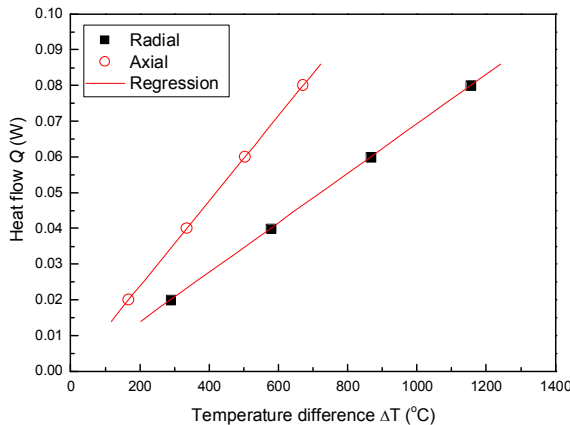
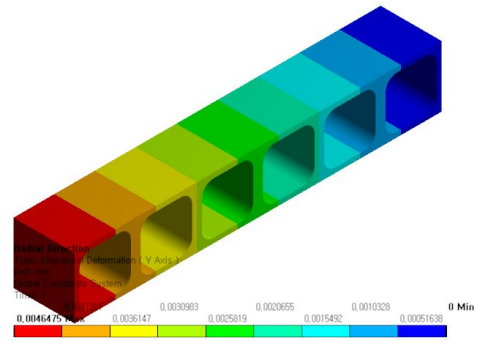
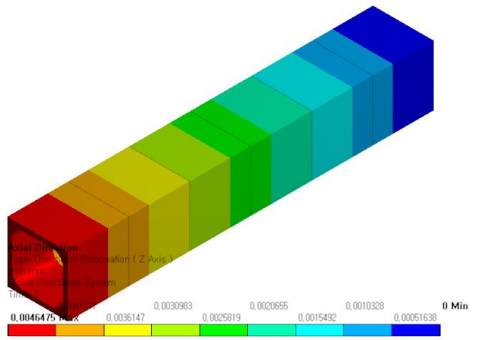


Fig. 16 Heat flow-temperature difference curves for honeycomb structure specimen

의한 실험 결과에 의하면 코제라이트 세라믹으로 제조된 정사각형 셀을 가진 세라믹 모노리스 시험편의 축방향에 대한 반경방향 열전도계수 비



(a) Radial direction



(b) Axial direction

Fig. 17 FEA results of displacement for thermal expansion measurements

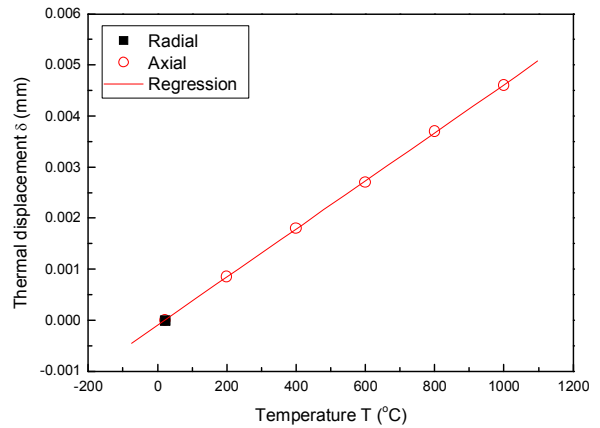


Fig. 18 Thermal displacement-temperature difference curves for honeycomb structure specimen

$k_{radial}/k_{axial}$  가 0.5 정도로 본 논문의 결과( $k_{radial}/k_{axial} = 0.6$ )와 비슷한 결과를 보이고 있다. 따라서 세라믹 모노리스 담체의 열전도계수는 재료 구조에 의존하는 재료 이방성이 존재하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 17은 하니컴 구조체 시험편의 열팽창계수를 구하기 위한 FEA 결과를 나타낸다. 시험편의 경계조건은 초기온도 22°C~1000°C에 대한 구조해석 결과로부터 길이 방향의 열적 변위를 얻었다.

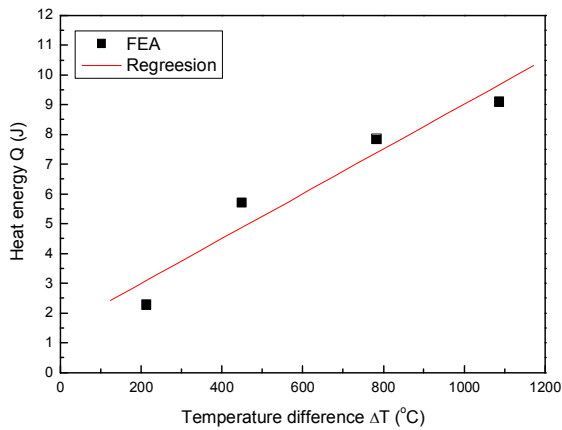


**Table 3** Equivalent mechanical properties of honeycomb specimen

Longitudinal elastic modulus $E$ (GPa)			Shear elastic modulus $G$ (GPa)			Poisson's ratio $\nu$		
Radial $E_r$	Tangential $E_\theta$	Axial $E_z$	Radial $G_r$	Tangential $G_\theta$	Axial $G_z$	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{zx}$
2.5	2.5	4.3	0.6	0.6	1.4	0.22	0.3	0.3

**Table 4** Equivalent physical properties of honeycomb specimen

Properties	Equivalent method		Reference [11]	
	Radial direction	Axial direction	Radial direction	Axial direction
Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	513		513	
CTE $\alpha$ (1/°C)	$6 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-7}$
Thermal conductivity $k$ (W/m°C)	0.3	0.5	0.209	0.418
Specific heat $c$ (J/kg°C)	1047.2		930	



**Fig. 19** Heat energy-temperature difference curves for honeycomb structure specimen

열팽창계수는 시험편의 방향에 따른 열적 변위-온도 선도의 기울기를 기초로 다음의 식 (13)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T} \tag{13}$$

Fig. 18은 FEA 시험편에 부하되는 온도 증가에 대한 열팽창 변위를 나타낸 것이다. 축방향과 반경방향에 선도 기울기는  $4.7 \times 10^{-9}$  m/°C이므로 열적 팽창성이 재료 물성의 이방성이 나타나고 있지 않다. 축방향과 반경방향의 열팽창계수는 모두  $6 \times 10^{-7}$  1/°C이다.

하니컴 구조체 시험편의 비열은 FEA로 구하기

위해 초기 온도는 22°C로 설정하고 시험편에 열유속  $Q$ 를 0.0075만큼 부하하고 천이 열전달 해석을 수행하였다. 열량은 초기 온도에서 시험편의 정상상태 온도에 도달까지 걸리는 시간과 시험편 질량을 열유속에 곱한 값으로 설정하였다.

$$Q = mc\Delta T = mc(T_{steady} - T_{initial}) \tag{14}$$

여기서  $m$ : 질량(kg),  $c$ : 비열(J/kg°C),  $T_{steady}$ : 정상상태 온도,  $T_{initial}$ : 초기 상태 온도 이다.

Fig. 19는  $\Delta Q / \Delta(\Delta T)$ 을 구하기 위해 정상상태 온도에 대해 시험편에 부하되는 열량과 온도 차이  $\Delta T (= T_{steady} - T_{initial})$ 를 나타낸 것이다. 하니컴 구조체 시험편의  $\Delta Q / \Delta(\Delta T)$ 는 0.00753 J/°C이고 시험편 질량  $m$ 을  $7.191 \times 10^{-6}$  kg로 고려하면 다음 식 (15)에 의하여 하니컴 구조체 시험편의 비열  $c$ 를 1047.2 J/kg°C로 구할 수 있다.

$$c = \frac{1}{m} \frac{\Delta Q}{\Delta(\Delta T)} \tag{15}$$

Table 3과 4는 Table 1의 기계적 특성치를 기초로 하니컴 구조체 시험편의 등가 물성치를 요약한 것이다. 세라믹 담체는 압출이라는 제조 방법과 재료의 물리적 구조에 의하여 이방성이 존재하므로 축방향과 반경방향(또는 접선방향) 성분의 기계적 특성치는 다르게 나타난다. 즉, 축방향 탄

성계수는 반경방향 탄성계수에 비하여 1.72배 정도 크다. 이러한 경향은 전단탄성계수와 푸아송 비에서도 동일한 결과를 나타나고 있다. 이와 반대로 반경방향과 접선방향의 기계적 특성치는 동일하다.

세라믹 담체의 열적 특성치는 밀도, 열팽창계수, 비열은 등방성을 유지하고 있으나 열전도계수는 축방향이 반경방향에 비하여 1.67배 정도 더 크다. 이것은 Gulati<sup>(11)</sup>의 열적 물성치의 실험 결과와 비교해서도 거의 일치한다. 이상의 결과로부터 삼원촉매변환기의 세라믹 담체의 3차원 열 유동 및 구조해석을 수행하기 위한 기계적 특성치로 Table 3과 4를 사용할 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

코제라이트 세라믹과 알루미늄으로 구성된 삼원 촉매변환기용 세라믹 하니컴 담체의 3차원 FEA 모델링은 매우 복잡하다. 이 상태의 하나는 세라믹 담체가 기하학적으로 하니컴 구조의 다공성과, 하니컴 구조를 형성하는 담체 벽(코제라이트 세라믹과 알루미늄의 영역)이 다공성을 가지는 2중의 하니컴 모노리스 형태의 다공성 구조체이다. 각 상태의 외연적 3차원 FEA 모델링은 결과적으로 다루기 힘들고 막대한 크기의 계산 모델이 된다. 이 논문은 정확성의 손실 없이 계산의 효율적인 사용을 가능하게 하기 위해 3차원 FEA에 대한 등가 물성을 설명한 것이다. 등가 물성의 계산에 대한 주요 과정은 세라믹 담체의 4점 굽힘 시험에 의한 실험적 종탄성계수를 기반으로 혼합법칙과 FEA를 이용하여 기계적 열적 등가 물성치를 평가하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 세라믹 하니컴 담체의 3점 굽힘 시험에서 과단계수 MOR은 축방향에 대한 반경방향 과단계수 비가 0.59이고 탄성계수의 비는 0.58이 나와 담체 압출 과정에 의한 재료 이방성이 존재하고 있다.

(2) 세라믹 모노리스 담체의 축방향 탄성계수를 이용하여 코제라이트 세라믹과 알루미늄 위쉬코트 사이의 결합계수를 예측한 결과 0.001이다. 따라서 알루미늄 위쉬코트가 코제라이트 세라믹 위에 기능적으로 코팅되어져 있다.

(3) 주변형률에 대한 부변형률 비에 있어 구조 이방성은 축방향에는 나타나지 않으나 반경방향

의 경우 과도하게 발생되고 있다.

(4) 열전도계수는 구조 이방성이 나타나고 있으나 열팽창계수와 비열은 구조 이방성이 나타나지 않는다.

#### 참고문헌

- (1) ASTM C1525-04, 2004, *Standard Test Method for Determination of Thermal Shock Resistance for Advanced Ceramics by Water Quenching*, ASTM International.
- (2) ASTM C1368-06, 2006, *Standard Test Method for Determination of Slow Crack Growth Parameters of Advanced Ceramics by Constant Stress-Rate Flexural Testing at Ambient Temperature*, ASTM International.
- (3) ASTM C1674-08, 2008, *Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics with Engineered Porosity (Honeycomb Cellular Channels) at Ambient Temperatures*, ASTM International.
- (4) Hashin, Z. and Shtrikman, S., 1962, "A Variation Approach to the Theory of the Effective Magnetic Permeability of Multiphase Materials," *J. of Applied Physics*, Vol. 35, pp. 3125~3131.
- (5) Valdevit, L., Wei, Z., Mercer, C., Zok, F. W. and Evans, A. G., 2006, "Structural Performance of Near-optimal Sandwich Panels and With Corrugated Cores," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 43, pp. 4888~4905.
- (6) Torquato, S., Gibiansky, L. V., Silva, M. J. and Gibson, L. J., 1998, "Effective Mechanical and Transport Properties of Cellular Solids," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 40, No.1, pp.71~82.
- (7) Baek, S. H., Cho, S. S., Shin, S. G. and Joo, W. S., 2006, "Size Effect on the Modulus of Rupture in Automotive Ceramic Monolithic Substrate using Optimization and Response Surface Method," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 11, pp. 1392~1400.
- (8) Baek, S. H., Park, J. S., Kim, M. G. and Cho, S. S., 2010, "A Study on Thermal Shock of Ceramic Monolithic Substrate," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 34, No. 2, pp. 129~137.
- (9) Gulati, S. T., Leonhard, T. and Roe, T. A., 2001, "Shear Strength of Cordierite Ceramic Catalyst Supports," *SAE Paper No. 2001-01-0935*.
- (10) Gulati, S. T., 1999, "Thin Wall Ceramic Catalyst

- Supports," *SAE Paper No.* 1999-01-0269.
- (11) Gulati, S. T., 1985 "Long-Term Durability of Ceramic Honeycombs for Automotive Emission Control," *SAE Paper No.* 850130.
- (12) Kalamkarov, A. L. and Kolpakov, A. G., 1997, *Analysis, Design and Optimization of Composite Structures*, John Wiley & Sons Ltd., New York, USA.
- (13) Gulati, S. T., Summers, J. C., Linden, D. G. and White, J. J., 1989, "Improvements in Converter Durability and Activity via Catalyst Formulation," *SAE Paper No.* 890796.
- (14) Gulati, S. T., Cooper, B. J., Hawker, P. N., Douglas, J. M. K. and Winterborn, D. J. W., 1991, "Optimization of Substrate/Washcoat Interaction for Improved Catalyst Durability," *SAE Paper No.* 910372.
- (15) Gulati, S. T., Zak, M. E., Jones, L. F., Rieck, J. S., Russ, M. and Brady, M. J., 1999, "Thermal Shock Resistance of Standard and Thin Wall Ceramic Catalysts," *SAE Paper No.* 1999-01-0273.
- (16) Hu, Z. and Heck, R. M., 1995, "High Temperature Ultra Stable Close-Coupled Catalysts," *SAE Paper No.* 950254.
- (17) ASTM E855-90, 1994, *Metals Test Methods and Analytical Procedures*, Vol. 03.02, pp. 650~657.
- (18) ASTM C623-92, 2005, Standard Test Method for Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Glass and Glass-Ceramics by Resonance, ASTM International.
- (19) O'Connor, D. J., 1989, A Comparison of Test Method for Shear Properties of the Cores of Sandwich Constructions, *J. Test. Eval.*, Vol. 17, No. 4, pp. 241~246.
- (20) Nordstrand, T. M. and Carlsson, L. A., 1997, "Evaluation of Transverse Shear Stiffness of Structural Core Sandwich Plates," *Composite Structures*, Vol. 37, pp. 145~153.
- (21) Japanese Industrial Standard (JIS) Z2201, 1980, *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials*, Japanese Standards Association.
- (22) ANSYS Workbench, 2008, *Release 11.0 Documentations*, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA.
- (23) Gulati, S. T., Hampton, L. E. and Lambert, D. W., 2002, "Thermal Shock Resistance of Advanced Ceramic Catalysts for Close-Coupled Application," *SAE Paper No.* 2002-01-0738.