

SiC 세라믹 하니컴 담체의 탄성 물성치 평가

조석수^{1*}

¹강원대학교 자동차공학과

Estimation on Elastic Properties of SiC Ceramic Honeycomb Substrate

Seok-Swoo Cho^{1*}

¹Department of Vehicle Engineering, Kangwon National University

요 약 가솔린 엔진 차량용 삼원촉매담체는 주로 코제라이트 세라믹으로 제작되는 다공성 부품으로 엔진의 혼합기가 농후한 경우 삼원촉매의 열적 내구성이 급격히 떨어져 설계 내구 수명을 제대로 만족시키지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 SiC 세라믹 촉매 담체의 내구성 평가에 사용할 기계적 물성치를 유한요소해석으로 구하기 위하여 등가물성평가방법을 이용하여 SiC 세라믹 하니컴 담체의 기계적 물성치를 유한요소해석용 시험편으로 구하였다. MOR과 탄성계수는 코제라이트 세라믹 하니컴 담체에 비하여 SiC 세라믹 하니컴 담체가 최소 2배와 9.3배 정도 크게 평가되고 있어 SiC 세라믹 하니컴 담체는 코제라이트 세라믹 하니컴 담체에 비하여 높은 구조 강도를 가지고 있다.

Abstract Automotive three-way catalyst substrate has a cordierite ceramic honeycomb structure. The substrate in the high engine speed range doesn't satisfy the design fatigue life due to the low mechanical properties of cordierite ceramic. SiC ceramic has higher mechanical properties than cordierite ceramic. If the automotive three-way catalyst substrate is made from the SiC ceramic honeycomb structure, the substrate can be prevented from premature failure. In this study, the mechanical properties of SiC ceramic honeycomb substrate were estimated by FEA. The FEA results indicated that the MOR and elastic modulus for the SiC ceramic honeycomb substrate was much higher than those for the cordierite ceramic honeycomb substrate.

Key Words : Cordierite Ceramic, Honeycomb Structure, MOR(Modulus of rupture), SiC Ceramic, Three-way Catalyst Substrate.

1. 서론

가솔린 차량의 배기가스정화촉매에 적용되고 있는 삼원촉매는 주로 코제라이트 세라믹으로 제작되는 다공성 부품이다. 그러나 코제라이트 세라믹 하니컴 담체는 열적 충격온도가 낮아 엔진의 혼합기가 농후한 경우 삼원촉매 담체의 열적 내구성이 급격히 떨어져 설계 내구 수명을 제대로 만족시키지 못하는 차량이 급격히 증가하고 있다. 특히, 2007년 일부 차종에 대한 배기가스 정밀검사 결과에서 24.1%가 불합격 판정을 받아 삼원촉매담체의 조기 열화가 심각한 상태임을 알 수 있다. 이러한 결과는 엔진과 코제라이트 세라믹 하니컴 담체사이의 열적 팽팽에

문제가 있었으나 차량제작업체의 자발적인 리콜이 제대로 이루어지지 않았기 때문이다. 따라서 삼원촉매를 지지하는 코제라이트 세라믹 하니컴 담체를 대체할 수 있는 새로운 세라믹 하니컴 담체의 개발이 요구되고 있다.[1] 공업용구조세라믹으로는 코제라이트, 실리콘 니트라이드, 알루미늄, 탄화규소(SiC(Silicon carbide)), 지르코니아등이 있으며 내열성, 비강도, 가격등의 측면에서 SiC가 차세대 세라믹 하니컴 담체 재료로서 주목을 받고 있다.[2] 그러나 기존의 재료 데이터베이스에 의하면 SiC는 세라믹 하니컴 담체 재료 자체로서의 물성치가 기존의 코제라이트 세라믹 하니컴 담체 재료 자체로서의 물성치에 비해 우수할지더라도 SiC 세라믹 하니컴 담체로서의

*Corresponding Author : Seok-Swoo Cho(Kangwon National Univ.)

Tel: +82-33-570-6394 email: sscho394@kangwon.ac.kr

Received November 4, 2013 Revised December 4, 2013 Accepted December 5, 2013

물성치가 기존의 코제라이트 세라믹 하니컴 담체의 물성치에 비하여 얼마만큼 더 우수한가를 평가할 수 없다.[3] 따라서 본 연구에서는 SiC 세라믹 하니컴 담체의 물리적 물성치를 설계 단계에서 검토하기 위하여 유한요소해석으로 그 물성치를 구하고자 한다. 이하에 다공성 재료 또는 부품에 대한 기계적 물성치를 유한요소해석으로 구한 예를 나타내었다.

Torquato등[4]은 다공성 구조체에 대한 탄성계수와 푸아송 비 및 열전도계수를 체적비로 나타내고, 이들 파라미터 사이의 근사식도 제안하고 있다. 이 식은 기계적 물성치를 체적비로 나타내고 있어 단위 셀에 대한 응력 집중을 반영하지 못해 정확한 기계적 물성치를 파악하기 어려웠다. Cho등[5]은 코제라이트 세라믹 하니컴 담체의 열·유동·구조해석에 필요한 물리적 물성치를 유한요소해석으로 구한 결과 실험치에 대하여 최대 5%이내의 오차를 발생시키고 있어 유한요소해석 시험편이 충분한 공학적 오차 이내에 있었다.

따라서 본 연구에서는 Cho등[5]이 제안한 방법을 이용하여 SiC 세라믹 재료의 물성치를 기초로 SiC 세라믹 하니컴 담체의 기계적 물성치를 유한요소해석용 시험편으로 구하여 SiC 세라믹 하니컴 담체의 구조 및 피로 해석의 기초 물성치 자료로 활용하고자 한다.

2. SiC 세라믹 하니컴 담체의 구조와 역학적 특성

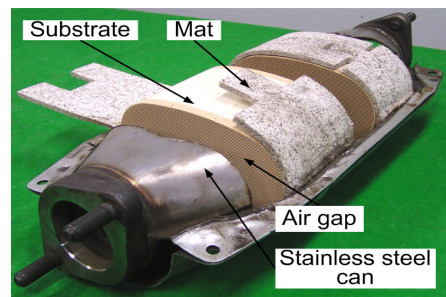
Table 1은 하니컴 담체를 구성하는 SiC 세라믹의 물성치를 나타낸 것이다.[3] 세라믹 하니컴 담체의 셀 구조는 삼각형, 사각형, 육각형 등이 사용되고 있으나 본 연구에서는 국내 삼원촉매변환기에 주로 사용되는 사각 형태로 설정하였다. 삼원촉매변환기에 사용되는 담체 셀 치수는 유동 특성을 고려하여 국내 차량에 탑재된 가솔린 엔진(SOHC, 4 Cylinder, 2000cc)에서 사용되는 세라믹 하니컴 담체를 기초로 하였다.

Fig. 1은 삼원촉매변환기와 세라믹 하니컴 담체의 셀 구조 및 치수를 각각 나타낸 것이다.

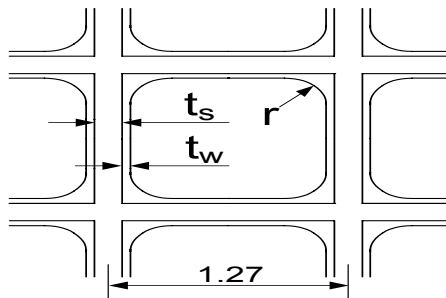
Fig. 2는 세라믹 하니컴 담체의 물리적 물성치를 구하기 위한 담체의 원통 좌표계와 이의 유한요소해석 시험편 채취방향을 나타낸 것이다. 일반적으로 세라믹 사출 성형품의 반경방향과 접선방향의 기계적 특성은 동일한 것으로 평가되고 있어 반경방향과 접선방향의 기계적 물성치는 동일한 것으로 가정하였다. 따라서 세라믹 담체의 기계적 물성치는 반경방향과 축방향만 고려하여 유한요소해석용 시험편을 모델링하였다.

[Table 1] Physical properties of SiC ceramic

Properties	SiC
Porosity P (%)	35
Density ρ (kg/m ³)	1,610
Thickness t (mm)	0.08
Elastic modulus E (GPa)	16.7
Poisson's ratio ν	0.25
Tensile strength σ_t (MPa)	20.7
Coefficient of thermal expansion α (1/°C)	6×10^{-7}
Thermal conductivity k (W/m°C)	1.67
Specific heat c (J/Kg °C)	1465.4

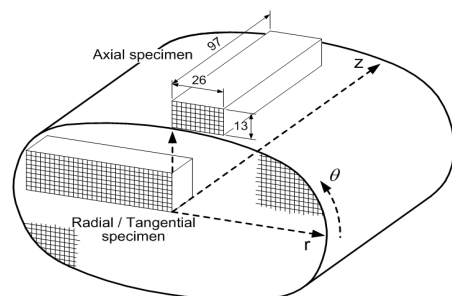


(a) Structure of three-way catalytic converter



(b) Dimension of TWC cell

[Fig. 1] Structure of three-way catalyst converter

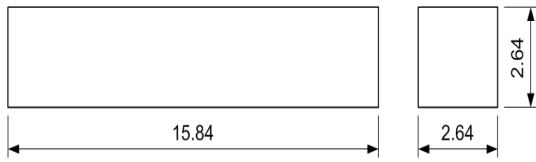


[Fig. 2] Cylindrical coordinate system of ceramic catalyst substrate

3. SiC 세라믹 하니컴 담체의 등가 물성치의 평가

3.1 파단계수의 이방성 영향

Fig. 3은 SiC 세라믹 하니컴 담체의 파단계수를 구하여 담체의 역학적 이방성을 확인하기 위한 유한요소해석용 3점굽힘시험편의 치수를 나타낸 것이다. Fig. 4는 Fig. 3의 3점굽힘시험편 치수를 기초로 3점굽힘시험편의 유한요소해석모델과 3점 굽힘시험 경계조건을 각각 나타낸 것이다.



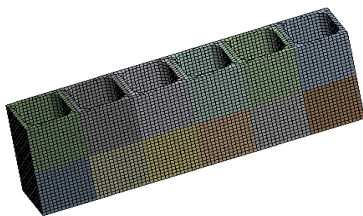
[Fig. 3] Geometry and dimension for FEA bending test (three-point bend)

Fig. 3의 3점 굽힘시험편에 대한 파단계수(Modulus of Rupture)는 Fig. 5의 유한요소해석결과와 다음 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

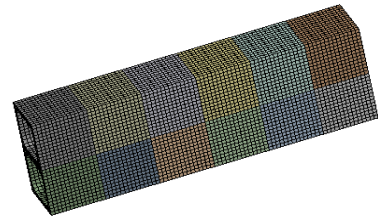
$$MOR = \frac{4PL}{bh^2} \quad (1)$$

단, P : 하중 (N), L : 보 스패น(mm), b : 보 단면 폭(mm), h : 보 단면 높이(mm)

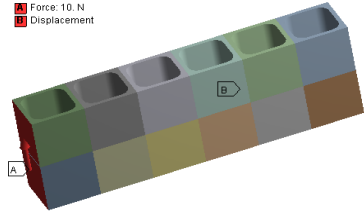
Fig. 6은 SiC 세라믹 하니컴 담체의 3점굽힘시험에 대한 유한요소해석결과를 나타낸 것이다. SiC 세라믹의 인장강도가 390MPa이므로 SiC 세라믹 하니컴 담체의 3점 굽힘시험편의 반경방향과 축방향의 파단하중은 각각 14.9N과 22.4N이다. 이 값을 식(1)에 대입하면 반경방향과 축방향의 파단계수가 각각 4.27MPa, 6.42MPa이다. 따라서 SiC 세라믹 하니컴 담체는 구조적 이방성을 가지고 있으며 축방향 파단계수는 반경방향 파단계수에 비하여 1.5배정도 크다.



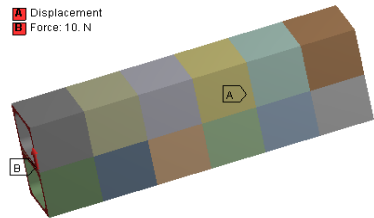
(1) Radial



(2) Axial
(a) Meshing



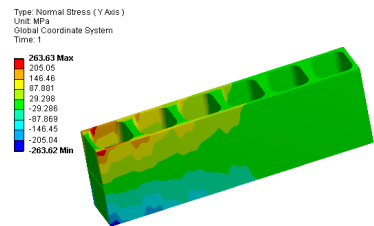
(1) Radial



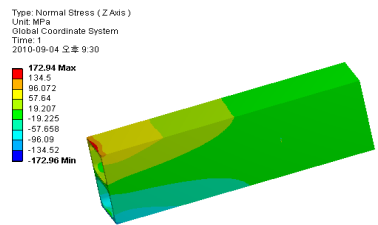
(2) Axial

(b) Boundary condition

[Fig. 4] Meshing and boundary condition for three-point bending test analysis

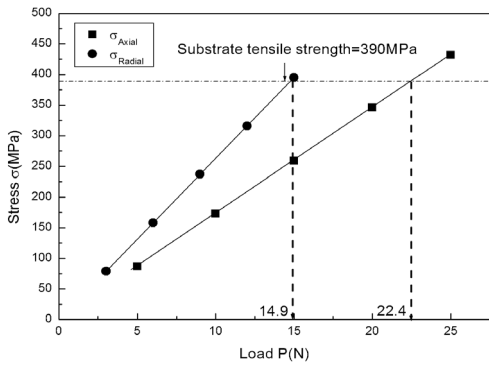


(a) Radial direction (P=10N)



(b) Axial direction (P=10N)

[Fig. 5] Stress distributions for three-point bending test analysis



[Fig. 6] MOR for SiC ceramic honeycomb specimen

3.2 탄성 거동에 대한 등가 물성의 계산

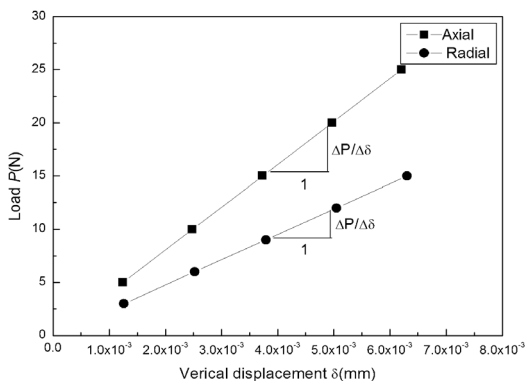
3.2.1 종탄성계수와 전단탄성계수

Fig. 7은 Fig. 4의 3점굽힘시험편을 이용하여 종탄성계수를 구하기 위한 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 3점굽힘시험편에 대한 종탄성계수는 다음 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$E_b = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \quad (2)$$

단, δ : 변위(mm).

반경방향과 축방향 시험편의 $\Delta P/\Delta \delta$ 는 각각, 2376N/mm, 4023N/mm로 후자가 전자에 비하여 68%정도 더 큰 값을 가지고 있다. 따라서 반경방향 및 축방향 시험편에 대한 종탄성계수는 각각 14.4GPa, 24.4GPa이다. SiC 세라믹 하니컴 담체에 대한 종탄성계수의 이방성은 축방향 종탄성계수에 대한 반경방향 종탄성계수의 비로 나타낸다. 코제라이트 세라믹 정사각형 셀 단면의 경우 실험값이 보통 0.5정도의 값을 가진다. SiC 세라믹 하니컴 담체의 경우, 축방향 종탄성계수에 대한 반경방향



[Fig. 7] Effect of specimen direction on elastic modulus

종탄성계수의 비가 0.59로 코제라이트 세라믹 하니컴 담체에 비하여 9%정도 크게 평가 되고 있어 SiC 세라믹 하니컴 담체의 종탄성계수 이방성이 코제라이트 세라믹 하니컴 담체의 종탄성계수 이방성과 거의 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 8은 3점굽힘시험편에 0.5N이 부하될 때의 유한요소해석결과를 나타낸 것이다. 반경방향변위가 축방향 변위의 68%정도의 값을 보이고 있으며 이러한 결과는 종탄성계수를 구하기 위한 하중-변위 선도 기울기 $\Delta P/\Delta \delta$ 의 경향과 동일한 경향을 보이고 있다. 3점굽힘시험 동안 시험편은 굽힘과 전단변형을 동시에 받는다. 즉, 시험편은 수직하중에 의하여 굽힘 변형을 받고 수직하중의 1/2에 해당하는 전단하중에 의하여 전단변형을 받는다. 3점굽힘상태에서 수직하중 P 에 의한 수직변위 δ 는 다음 식 (3)과 같이 정의된다[6,7].

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

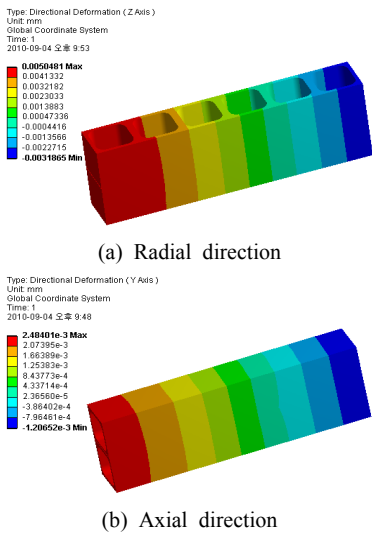
단, L : 보의 스패 길이, b : 보의 단면 폭, h : 보의 단면 높이, A : 보의 전단 면적, D : 보의 단위폭 당 굽힘 강성, G : 보의 전단탄성계수.

식 (3)의 양변을 $1/PL^3$ 으로 나누면 다음 식 (4)와 같이 되어 $\delta/PL^3 - 1/L^2$ 선도로 변환된다.

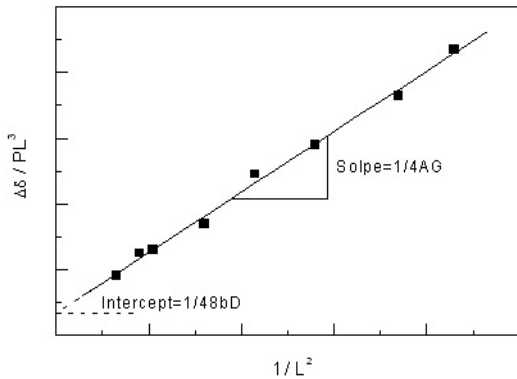
$$\frac{\delta}{PL^3} = \frac{1}{48bD} + \frac{1}{4AG} \frac{1}{L^2} \quad (4)$$

Fig. 9는 식 (4)를 기초로 3점굽힘시험 결과를 도식적으로 나타낸 것이다. δ/PL^3 축 절편에서 굽힘 강성 D 를 구할 수 있으며 이 선도의 기울기에서 전단탄성계수를 구할 수 있다.

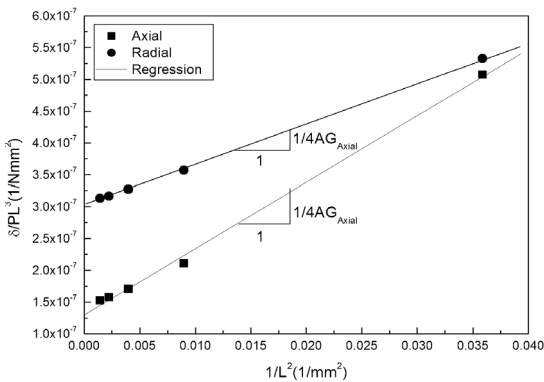
Fig. 10은 3점 굽힘 시험편의 $\delta/PL^3 - 1/L^2$ 선도를 나타낸 것이다. 반경방향과 축방향 시험편의 기울기는 각각 $6.42 \times 10^{-6} 1/N$, $1.04 \times 10^{-5} 1/N$ 이다. 또한, 선도의 기울기가 $1/4AG$ 인 것과 A 가 유효전단면적인 것을 고려하면 축방향과 반경방향 전단탄성계수는 각각, 13.8GPa, 8.5GPa임을 알 수 있다. 특히, 유효전단면적은 실제 하중을 부담하는 면적으로 축방향과 반경방향 시험편의 경우 모두 2.83mm^2 으로 고려하였다. 축방향 전단탄성계수에 대한 반경방향 전단탄성계수의 비는 0.62로 역학적 이방성이 종탄성계수와 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 즉, 세라믹 하니컴 담체에서 나타나는 탄성계수의 이방성은 모재나 탄성계수의 종류에 관계없이 하니컴 담체의 구조적 특성에 기인하고 있음을 알 수 있다.



[Fig. 8] FEA results of displacement for three-point bending test



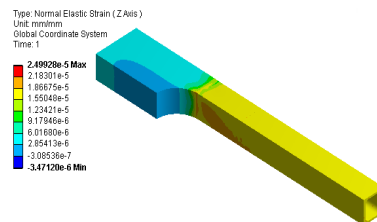
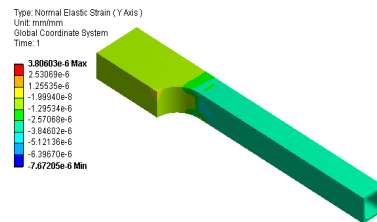
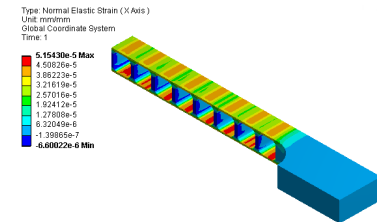
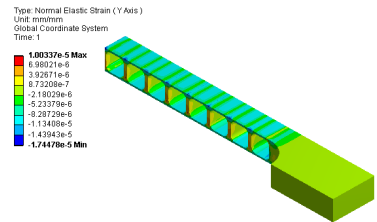
[Fig. 9] Plots to determine effective transverse shear modulus



[Fig. 10] Plots to determine effective transverse shear modulus for SiC ceramic honeycomb specimen

3.2.2 푸아송 비

Fig. 11은 푸아송 비를 구하기 위한 반경방향과 축방향 1/4 유한요소해석용 인장시험편에 대한 수직 변형률의 결과를 나타낸 것이다. 인장시험편의 형상과 치수는 JIS Z 2201[8]에 규정된 인장시험편 중 판상 비례 시험편 14B호를 기초로 설계하였다. 시험편 단면적 A 는 유한요소모델의 대칭성을 고려하여 4개 셀로 설정하였으며 그 값은 $7mm^2$ 이다. 따라서 시험편 표점거리 L 은 $5.65\sqrt{A}$ 이므로 $15mm$ 가 된다. 또한 시험편 평행부 거리 P 는



[Fig. 11] Distribution of normal strain obtained from FEA

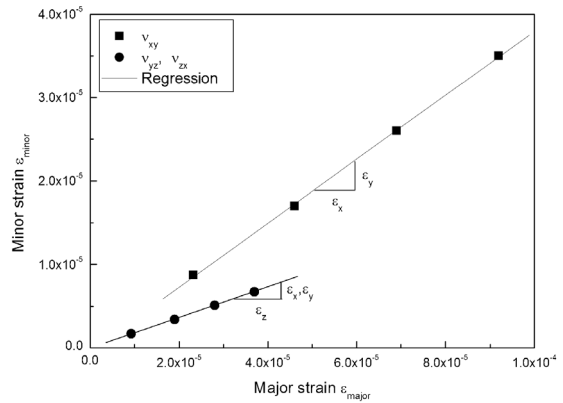
$L+2\sqrt{A}$ 이므로 단면적 A 를 해당 식에 대입하게 되면 20.2mm가 된다. 또한 시험편 표점거리나 평행부 거리는 시험편 단면적의 한변 길이의 정수배로 설정하되 반드시 계산된 시험편 표점거리나 평행부 거리보다는 크게 하였다. 따라서 시험편 표점거리와 평행부 거리는 각각 시험편 단면적의 한 변 길이의 12배와 16배인 15.84mm, 21.12 mm이다. 구속조건은 하중 부하 단면을 제외한 나머지 단면에 대해 경계조건을 부여하고 시험편 그림 끝단에 하중을 적용하였다.

푸아송 비는 시험편의 부하 방향과 일치하는 방향의 주변형률(major strain)에 대한 부하방향에 수직인 방향의 부변형률(minor strain)의 비를 나타낸 것으로 다음 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\nu = \frac{\epsilon_{minor}}{\epsilon_{major}} \quad (5)$$

Fig. 12는 Fig. 11의 인장시험편에 대한 주변형률-부변형률 선도를 나타낸 것이다. 선도의 기울기가 푸아송비가 된다. 즉, $\nu_{\theta z}$ 와 ν_{zr} 는 0.21이고 $\nu_{r\theta}$ 는 0.38이다. Fig. 11의 인장시험편에 대한 유한요소해석결과는 시험편 전체에서 발생하는 변형률을 나타낸 것으로 식 (5)에서 사용하는 변형률 정의와는 차이가 있다. 즉, 푸아송 비를 구하기 위한 변형률은 표점 거리에서의 변형률이다. 따라서 본 논문에서는 주변형률과 부변형률은 유한요소해석용 인장시험편의 표점 거리를 프로브(probe) 구간[9]으로 설

정한 뒤 이 구간내에서 최대 변형률과 최소 변형률을 구하였다. 한편, Table 2에서 $\nu_{r\theta}$ 가 $\nu_{\theta z}$ 나 ν_{zr} 에 대하여 1.8 배 이상 크다. 이러한 결과는 반경과 접선 방향의 SiC 세라믹 하니컴 담체 인장시험편의 경우 시험편 길이 방향의 다층 격벽 때문에 반경 또는 접선방향으로의 변형률이 강한 변형률 구속을 받는 반면 축 방향의 SiC 세라믹 하니컴 담체 인장시험편의 경우 중공 단면을 형성하고 있어 주변형률에 대하여 부변형률이 약한 변형률 구속을 받기 때문이다.



[Fig. 12] Poisson's ratio for SiC ceramic honeycomb specimen

[Table 2] Equivalent mechanical properties of SiC ceramic honeycomb substrate

MOR (MPa)			Longitudinal elastic modulus E (GPa)			Shear elastic modulus G (GPa)			Poisson's ratio ν		
Radial MOR_r	Tangential MOR_θ	Axial MOR_z	Radial E_r	Tangential E_θ	Axial E_z	Radial G_r	Tangential G_θ	Axial G_z	$\nu_{r\theta}$	$\nu_{\theta z}$	ν_{zr}
4.27	4.27	6.42	14.4	14.4	24.4	5.6	5.6	8.5	0.38	0.21	0.21

[Table 3] Equivalent mechanical properties of cordierite ceramic honeycomb substrate

MOR (MPa)			Longitudinal elastic modulus E (GPa)			Shear elastic modulus G (GPa)			Poisson's ratio ν		
Radial MOR_r	Tangential MOR_θ	Axial MOR_z	Radial E_r	Tangential E_θ	Axial E_z	Radial G_r	Tangential G_θ	Axial G_z	$\nu_{r\theta}$	$\nu_{\theta z}$	ν_{zr}
1.9	1.9	3.2	2.5	2.5	4.3	0.6	0.6	1.4	0.3	0.22	0.22

Table 2는 Table 1의 기계적 물성치를 기초로 SiC 세라믹 하니컴 담체 시험편의 등가 물성치를 나타낸 것이다. 세라믹 하니컴 담체는 압출이라는 제조 방법과 하니컴의 물리적 미시 구조에 의하여 이방성이 존재하므로 축방향과 반경방향(또는 접선방향) 성분의 기계적 물성치는 다르게 나타난다. 즉, 축방향 물성치가 반경방향 물성치에 비하여 파단계수와 전단탄성계수의 경우 1.5배, 종탄성계수의 경우 1.7배, 푸아송 비의 경우 0.55배 정도 높게 나타나고 있다. 따라서 세라믹 하니컴 담체의 기계적 물성치는 높은 이방성을 보이고 있으며 이러한 결과는 Cho등[5]와 Gulati[10-11]의 기계적 물성치의 실험 결과와 비교하면 거의 동일한 경향을 보인다. 또한, SiC 세라믹의 원재료의 기계적 물성치와 SiC 세라믹 하니컴 담체의 기계적 물성치를 비교해 보면, SiC 세라믹 재료가 SiC 세라믹 하니컴 담체에 비하여 파단계수의 경우 3.2~4.8배, 반경방향 종탄성계수의 경우 1.2배, 전단탄성계수의 경우 2~3배, 축방향 푸아송 비의 경우 1.2배 정도 더 크다. 그러나, SiC 세라믹 재료는 SiC 하니컴 담체에 비하여 축방향 종탄성계수는 0.85배, 반경방향 푸아송 비의 경우 0.66배정도 더 적다. 따라서 파단계수와 전단탄성계수의 경우 SiC 세라믹 재료와 SiC 하니컴 담체사이의 차이가 SiC 하니컴 담체의 구조 이방성으로 인한 차이보다 훨씬 더 큰 차이를 나타내고 있으나 종탄성계수와 푸아송 비의 경우 SiC 세라믹 재료와 SiC 하니컴 담체사이의 차이가 SiC 하니컴 담체의 구조 이방성으로 인한 차이보다 훨씬 더 적은 차이를 나타내고 있다. 이러한 결과는 파단계수와 전단탄성계수의 경우 SiC 세라믹 하니컴 담체의 구조 강도가 SiC 세라믹 재료 강도에 비하여 매우 큰 값으로 감소하는 제작 인자가 SiC 하니컴 담체의 구조 이방성 인자보다 훨씬 더 영향을 받으나 종탄성계수와 푸아송 비의 경우 SiC 세라믹 하니컴 담체의 제작 인자보다 SiC 하니컴 담체의 구조 이방성 인자에 더 큰 영향을 받기 때문이다.

Table 3은 코제라이트 세라믹 하니컴 담체의 물성치의 실험치를 나타낸 것으로 SiC 세라믹 하니컴 담체는 코제라이트 세라믹 하니컴 담체에 비하여 파단계수의 경우 2~2.2배, 종탄성계수의 경우 5.7~5.8배, 전단탄성계수의 경우 5.1~9.3배, 푸아송 비의 경우 0.95~1.27배 정도 크게 나타나고 있다. 따라서 SiC 세라믹 하니컴 담체는 코제라이트 세라믹 하니컴 담체에 비하여 기계적 특성치가 푸아송 비를 제외하고는 매우 우수하므로 SiC 세라믹 하니컴 담체의 구조 성능이 코제라이트 세라믹 하니컴 담체의 구조 성능에 비하여 매우 우수할 것으로 생각된다.

4. 결론

승용차용 삼원촉매변환기용 SiC 세라믹 하니컴 담체의 기계적 특성치를 유한요소해석으로 그 특성을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 축방향 물성치가 반경방향 물성치에 비하여 파단계수와 전단탄성계수의 경우 1.5배, 종탄성계수의 경우 1.7배, 푸아송 비의 경우 0.55배 정도 높게 나타나고 있어 세라믹 하니컴 담체의 기계적 물성치는 높은 이방성을 보이고 있다.
- (2) 파단계수와 전단탄성계수의 경우 SiC 하니컴 담체의 제작 인자가 SiC 하니컴 담체의 구조 이방성 인자보다 훨씬 더 영향을 받으나 종탄성계수와 푸아송 비의 경우 SiC 하니컴 담체의 제작 인자보다 SiC 하니컴 담체의 구조 이방성 인자에 더 큰 영향을 받는다.
- (3) SiC 세라믹 하니컴 담체는 코제라이트 세라믹 하니컴 담체에 비하여 파단계수와 탄성계수가 상대적으로 매우 높아 SiC 세라믹 하니컴 담체의 구조 성능이 코제라이트 세라믹 하니컴 담체의 구조 성능에 비하여 매우 우수할 것으로 생각된다.

References

- [1] Kwang Jae Lee, 25% of Passenger Vehicles Failed to Pass Exhaust Gas Inspection in 2012, The Environmental Industry Weekly, 2007, Available From: <http://envinews.co.kr/Article.do?seq=3>, c2010[cited 2010 Oct.20].
- [2] D. W. Lee and S. S. Cho, "Premature Failure Prevention Design of Three-way Catalyst Substrate using DOE", *Journal of the KSPE*, Vol.27, No.7, pp. 101-108, 2011.
- [3] Matweb, Silicon Carbide(Alpha SiC), MatWeb.com, 2010, Available from: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=dd2598e783ba4457845586b58c8ea9fb>, c2010[cited 2010 Oct.20].
- [4] Torquato, S., Gibiansky, L. V., Silva, M. J. and Gibson, L. J., "Effective Mechanical and Transport Properties of Cellular Solids", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 40, No.1, pp. 71-82, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7403\(97\)00031-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7403(97)00031-3)
- [5] S. H. Baek, and S. S. Cho, "An Effective Approach of equivalent Elastic Method for Three-Dimensional Finite Element Analysis of Ceramic Honeycomb Substrates", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 3, pp.

- 223-233, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2011.35.3.223>
- [6] O'Connor, D. J., "A Comparison of Test Method for Shear Properties of the Cores of Sandwich Constructions", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 17, No. 4, pp. 241-246, 1989.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1520/JTE11121J>
- [7] Nordstrand, T. M. and Carlsson, L. A., "Evaluation of Transverse Shear Stiffness of Structural Core Sandwich Plates", *Composite Structures*, Vol. 37, pp. 145-153, 1997.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223\(97\)80007-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223(97)80007-4)
- [8] Japanese Standards Association, *Japanese Industrial Standard (JIS) Z2201 : Test pieces for Tensile Test for Metallic Materials*, pp. 19-25, Tokyo, 1980.
- [9] ANSYS inc., *ANSYS Workbench : Release 11.0 Documentations*, Canonsburg, PA, USA, 2008.
- [10] Gulati, S. T., Zak, M. E., Jones, L. F., Rieck, J. S., Russ, M. and Brady, M. J., "Thermal Shock Resistance of Standard and Thin Wall Ceramic Catalysts", *SAE Paper No. 1999-01-0273*, 1999.
- [11] S. R. Lee and S. S. Cho, "A Estimation of Thermal Fatigue Performance in Three-way Catalyst", *Journal of the KAICS*, Vol. 14, No. 1, pp. 13-19, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.1.13>

조 석 수(Seok-Swoo Cho)

[정회원]



- 1993년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 1997년 8월 : 창원문성대학교 기계과 전임강사
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대 자동차공학과 교수

<관심분야>

재료강도학, 구조최적설계