

<학술논문>

# 승용차용 세라믹 촉매 담체의 열적 내구성의 실험적 평가

백석흠\* · 김성용\*\* · 승삼선\*\*\* · 양 협\*\*\* · 주원식\*\*\*\* · 조석수†  
(2007년 6월 11일 접수, 2007년 10월 24일 심사완료)

## Experimental Estimation of Thermal Durability in Ceramic Catalyst Supports for Passenger Car

Seok-Heum Baek, Sung-Yong Kim, Sam-Sun Seung, Hyup Yang, Won-Sik Joo and Seok-Swoo Cho

**Key Words:** Ceramic Catalyst Supports(세라믹 촉매 담체), CTE(Coefficient of Thermal Expansion: 열팽창 계수), MOR(Modulus of Rupture: 파단계수), Thermal Durability(열적 내구성), Thermal Stress(열응력), Threshold Stress(하한계 응력)

### Abstract

Ceramic honeycomb structures have performed successfully as catalyst supports for meeting hydrocarbon, carbon monoxide and nitrous emissions standards for gasoline-powered vehicles. Three-way catalyst converter has to withstand high temperature and thermal stress due to pressure fluctuations and vibrations. Thermal stress constitutes a major portion of the total stress which the ceramic catalyst support experiences in service. In this study, temperature distribution was measured at ceramic catalyst supports. Thermal durability was evaluated by power series dynamic fatigue damage model. Radial temperature gradient was higher than axial temperature gradient. Thermal stresses depended on direction of elastic modulus. Axial stresses are higher than tangential stresses. Tangential and axial stresses remained below thermal fatigue threshold in all engine operation ranges.

### 1. 서 론

저공해자동차(low-emission vehicle: LEV)와 초저공해자동차(ultra low-emission vehicle: ULEV) 그리고 극초저공해자동차(SULEV)와 같이 엄격한 배출가스 규제를 받는 차량들은 촉매, 워시코트(washcoat), 촉매변환기의 구조 설계, 엔진 제어

시스템 등에 진보된 기술이 필요하다. 특히, 이들 부품 중에서 배출가스를 직접적으로 정화하는 세라믹 촉매 담체(ceramic catalyst support)는 차량의 주행 거리가 증가함에 따라 정화능력이 감소될지라도 규정된 주행거리에 도달할 때까지는 유해 배출가스가 허용기준치 이하로 유지되어야 한다. 따라서 세라믹 촉매는 배출가스의 정화능력 이외에도 고온의 배출가스에 견딜 수 있는 열적 내구성(thermal durability)이 필요하다.<sup>(1,2)</sup>

국내의 경우, 1990년부터 배출가스 정화 처리 보증기간이 80,000 km 또는 5년이었던 것을 2000년부터는 160,000 km 또는 10년으로 규정하고 있다. 그러나 정화용 촉매와 전자제어장치(electronic control unit)의 보증기간은 2000년부터 120,000 km 또는 7년으로 규정하고 있다. 즉, 촉매는 다른 관련 부품에 비하여 열화 속도가 빠르므로 내구

† 책임저자, 회원, 강원대학교 자동차공학과  
E-mail : sscho394@kangwon.ac.kr  
TEL : (033)570-6394 FAX : (033)570-6390

\* 회원, 동아대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 회원, 강원대학교 산업대학원 자동차공학과  
\*\*\* 회원, 강원대학교 자동차공학과  
\*\*\*\* 회원, 동아대학교 기계공학과

성이 있는 세라믹 촉매 개발이 요구되고 있다.<sup>(3)</sup>

세라믹촉매변환기(ceramic catalyst converter)는 마운팅으로 인한 기계적 응력, 엔진 운전조건에 따른 배출가스 온도 변화에 대한 피로하중, 석재 충격(stone impact)으로 인한 충격 응력 등과 같은 응력을 받고 있다.

담체 내구성이라는 입장에서는 위의 응력들을 모두 고려하여야 하지만 그 중에서도 엔진의 광범위한 회전속도에 의하여 발생하는 열응력(thermal stress)이 가장 가혹하고, 발생 응력을 제어하기가 힘들다.<sup>(4)</sup> 특히, 자동차 배출가스 정화용 장치에서는 물이나 수증기와 같은 부식성 물질이 삼원촉매변환기 내에 형성되므로 담체의 내구 수명이 짧아지게 된다. 이러한 특성은 담체로 널리 사용되고 있는 세라믹에서 사용 시간이 경과함에 따라 강도가 서서히 감소하는 응력부식균열(stress corrosion cracking)이 나타나기 때문이다.

따라서 세라믹 담체에 단순한 열피로를 가하여 피로수명을 평가하게 되면 사이클 의존성 열화는 평가할 수 있지만 응력부식균열과 같은 시간 의존성 열화를 평가할 수가 없으므로 담체의 전체 내구성을 확보할 수가 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 열피로와 응력부식기구를 동시에 다룰 수 있는 동적피로(dynamic fatigue)수명평가 방법의 적용이 요구된다.<sup>(5)</sup>

본 논문에서는 국내 승용차용 세라믹 촉매 담체의 온도에 따른 기계적 특성을 검토하고 실차에서 담체의 온도분포 측정시험을 수행하여 동적 피로수명평가방법에 기초한 세라믹 촉매 담체의 열적 내구성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 삼원촉매변환기의 구조

Fig. 1은 본 논문에서 고려하는 가솔린 엔진

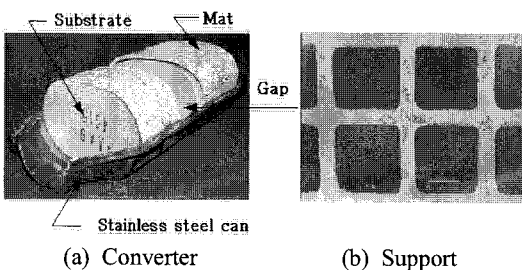


Fig. 1 Structure of ceramic catalyst converter

(NEW SIRIUS, 엔진 형식: G4CP)의 세라믹 담체 구조를, Table 1은 사각형 셀 구조의 기하학적 특성을 각각 나타낸 것이다.<sup>(6)</sup>

2.2 온도 분포 측정실험

Table 2는 본 논문에서 사용한 엔진 제원을, Table 3은 엔진 실험 조건을 나타낸 것이다. 엔진 속도는 주행풍이 없이 무 부하 상태에서 조절하였다.

Fig. 2는 본 논문의 실험장비 구성도를 나타낸 것이다. 가솔린 엔진, 삼원촉매변환기(SONATA II, Part No. 28950-33350), 온도 측정 장치(DARWIND S006-00-1F), 배출가스 측정장치(ECOM-A: JP/1F-

Table 1 Geometric properties of square cell honeycomb

Item	Specification
Manufacturer	Corning Inc. (USA)
Major diameter	148.4 mm
Minor diameter	83.7 mm
Front length	96 mm
Rear length	77 mm
Cell density	62 cell/cm <sup>3</sup>
Cell pitch	1.326 mm
Channel width	1.085 mm
Wall thickness	0.241 mm
OFA	75.7 %
GSA	27.4 cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup>
D <sub>h</sub>	0.1105 cm
Total pore area	17.993 m <sup>2</sup> /g
Average pore diameter	0.0508 μm
Porosity	36.5 %

Table 2 Specification of gasoline engine

Item	Specification
Engine type	SOHC, 4Cylinder
Displacement volume	1997cc
Bore×Stroke	58 mm×88 mm
Compression ratio	8.6:1
Max. power	115PS/5000rpm
Max. torque	177Nm/45rpm
Firing order	1-3-4-2
Idle engine speed	750±100

Table 3 Test conditions for thermal mapping of oval converter

Engine speed (rpm)	1000	1800	2700	3600	4500	5400

18, KIS: MEGA-1010A) 등으로 구성된다. 온도 측정 위치는 삼원촉매변환기의 입구와 출구로 설정하였다. 이 위치에 Chromel과 Alumel로 제작되고 직경이 4 mm인 K-type 열전대(thermocouple)를 드릴을 이용하여 구멍을 뚫고 부착하였다. 열전대는 각 구멍 당 1개~4개를 장착하였으며 직경이 1 mm 스테인리스 강철사를 이용하여 삼원촉매변환기 스틸 캔(steel can)에 고정하였다.

Fig. 3은 세라믹 담체 온도를 측정하기 위한 열전대의 위치를 나타낸 것이다. 배출가스의 촉매층 유동을 고려하여 담체의 입구와 출구에만 열전대를 설치하였다. 담체 내구성은 삼원촉매변환기의 작동 온도가 높으면서 안정된 정상 상태의 온도만을 고려하였다.

### 3. 열응력 해석

#### 3.1 열응력 모델

Fig. 4는 세라믹 담체에서 발생하는 응력 발생

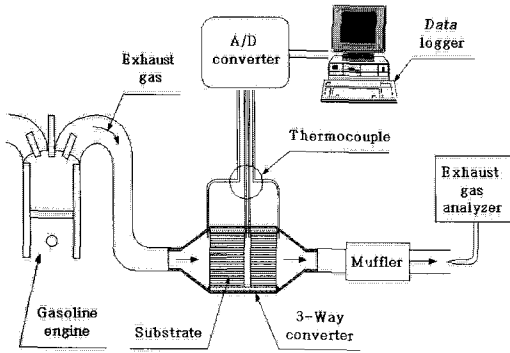


Fig. 2 Schematic of the test equipment for temperature distribution characteristics

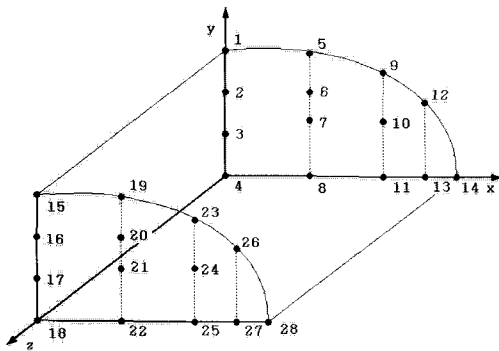


Fig. 3 Thermocouple locations of oval converter

기구를 도식적으로 나타낸 것이다. 축방향 길이의 중간 영역에서 일어날 수 있는 최대 축방향 응력  $\sigma_z$ 가 축방향 파단계수(modulus of rupture)<sup>(3)</sup>를 초과하게 되면 환상균열(ring-off crack)이 담체 표면에서 발생하여 열피로 사이클이 진행되는 동안 담체 내부로 성장하게 될 것이다. 이와 동일한 기구로 담체 출구 표면에서 발생하는 최대 접선방향 응력  $\sigma_\theta$ 가 접선방향 파단계수를 초과하게 되면 반경방향 균열이 출구에서 발생하여 축방향으로 성장하게 될 것이다.<sup>(7,8)</sup>

Fig. 5는 담체에서 정의하는 열응력 방향을 나타낸 것이다. 반경방향과 축방향의 온도 기울기를 이용하여 구한 열응력은 탄성론에서 다음과 같이 분류할 수 있다.<sup>(9-11)</sup>

#### 3.2 반경방향 열응력

본 논문의 담체와 같은 타원형 단면의 구조물에서 반경방향 온도 기울기는 뚜렷하나 축방향 온도 기울기는 무시할 수 있는 경우 담체 표면에서 발생하는 최대 열응력은 다음과 같다.

$$\sigma_z = E_z \left( \frac{1 + \nu'}{1 - K\nu'^2} \right) \left[ \left( \frac{\Delta L}{L} \right) - \left( \frac{\Delta L}{L} \right)_{T_0} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = E_\theta \left( \frac{1 + \nu'}{1 - K\nu'^2} \right) \left[ \left( \frac{\Delta L}{L} \right) - \left( \frac{\Delta L}{L} \right)_{T_0} \right] \quad (2)$$

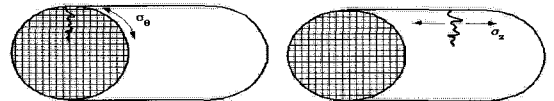


Fig. 4 Thermal cracking patterns in oval ceramic support

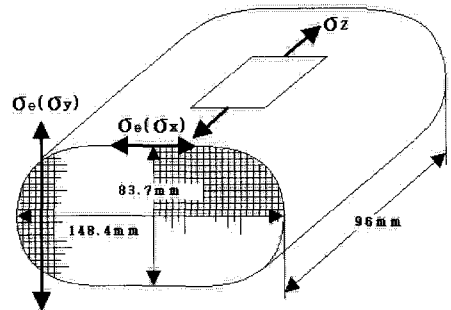


Fig. 5 Orientation of thermal stresses

여기서  $T_c$  = 중앙 영역의 온도 (°C)  
 $T_0$  = 표면 영역의 온도 (°C)  
 $K$  = 탄성계수 비 ( $E_\theta/E_z=0.5$ )  
 $\nu_{\theta r} = \nu_{rz} = \nu = 0.1$   
 $\nu_{z\theta} = \nu' = 0.25$

$\frac{\Delta L}{L} \Big|_{T_i}$  :  $T_i$  에서의 열팽창률

$$\frac{\Delta L}{L} \Big|_{T_0} = A(T_0 - 25) + B(T_0 - 25)^2 + C(T_0 - 25)^3$$

$$\frac{\Delta L}{L} \Big|_{T_c} = A(T_c - 25) + B(T_c - 25)^2 + C(T_c - 25)^3$$

$\frac{\overline{\Delta L}}{L}$  :  $T_c$ 와  $T_0$ 사이의 평균 열팽창률

$$\left(\frac{\overline{\Delta L}}{L}\right) = \frac{\Delta L}{L} \Big|_{T_i} \left(\frac{a}{b}\right)^2 + \lambda_1 \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) + \frac{2}{3} b \lambda_2 \left(1 - \frac{a^3}{b^3}\right) + \frac{b^2}{2} \lambda_3 \left(1 - \frac{a^4}{b^4}\right) + \frac{2}{5} b^3 \lambda_4 \left(1 - \frac{a^5}{b^5}\right)$$

여기서  $a = b - 1$  (mm),  $b =$ 담체 외경 (mm)  
 $\lambda_1 = mA + m^2B + m^3C$   
 $\lambda_2 = -(nA + 2mnB + 3m^2nC)$   
 $\lambda_3 = n^2B + 3mn^2C$   
 $\lambda_4 = -n^3C$   
 $m = \{b(T_c - 25) - a(T_0 - 25)\} / (b/a)$   
 $n = (T_c - T_0) / (b/a)$

3.3 축방향 열응력

본 논문의 담체와 같은 타원형 단면의 구조물에서 배출가스의 열 유동방향에 따라 축방향으로는 선형적인 온도 분포를 보이나 반경방향의 온도 기울기는 무시할 수 있는 경우, 담체 표면에서 발생하는 최대 열응력은 다음과 같다.

$$\sigma_z = 0.16 \{3(1 - \nu'^2)\}^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E_z}{1 - 0.32\nu'}\right) \times \left(\frac{\Delta L}{L} \Big|_{Exit} - \frac{\Delta L}{L} \Big|_{Midbed}\right) \tag{3}$$

$$\sigma_\theta = 0.5 \left(\frac{E_\theta}{1 - \nu}\right) \times \left(\frac{\Delta L}{L} \Big|_{Exit} - \frac{\Delta L}{L} \Big|_{Midbed}\right) \tag{4}$$

여기서  $\frac{\Delta L}{L} \Big|_{Exit}$  : 담체 입구에서의 열팽창률

$$\frac{\Delta L}{L} \Big|_{Midbed} = \frac{1}{2L} \int_0^L \{A(T - 25) + B(T - 25)^2 + C(T - 25)^3\} dz$$

: 담체 입구와 출구 온도사이의 평균 온도에서의 열팽창률 (단,  $L$ : 담체 축방향 길이)

4. 실험 결과 및 요약

4.1 기계적 특성치의 온도 의존성<sup>(12)</sup>

Fig. 6, 7은 세라믹 담체의 각 온도 영역에서의 탄성계수와 열팽창계수를 각각의 방향에 따라 나타낸 것이다. 열팽창계수는 400°C까지는 압축 변형률이 나타나다가 그 이후의 온도에서는 인장 변형률을 보이고 있다. 그러나 탄성계수는 500°C까지 거의 선형적으로 증가하지만 그 이후의 온도에서는 그다지 큰 변화를 보이고 있지 않다. 이러한 결과는 세라믹의 고온 변형 저항성이 저온

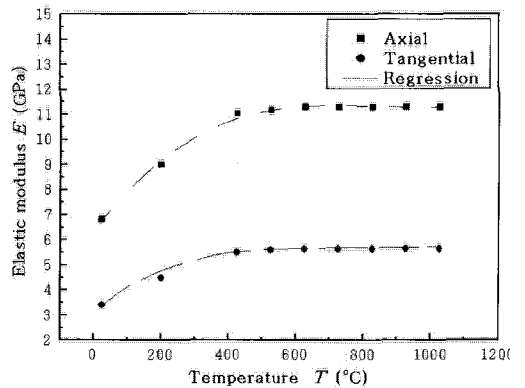


Fig. 6 Variation of elastic modulus with temperature

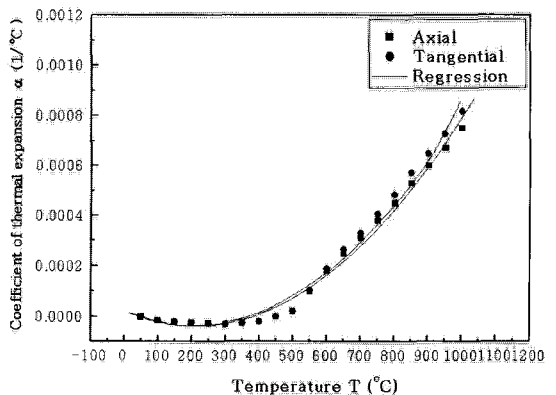


Fig. 7 Thermal expansion curves for axial and tangential directions during heating

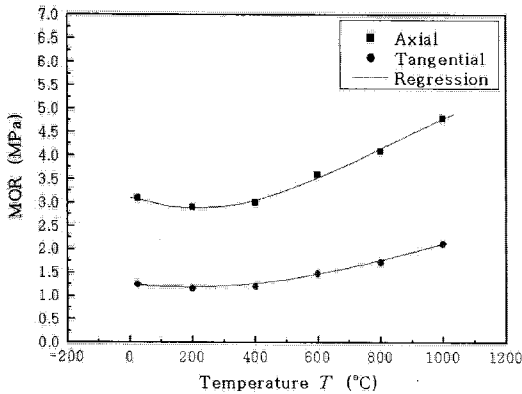


Fig. 8 Variation of MOR with temperature

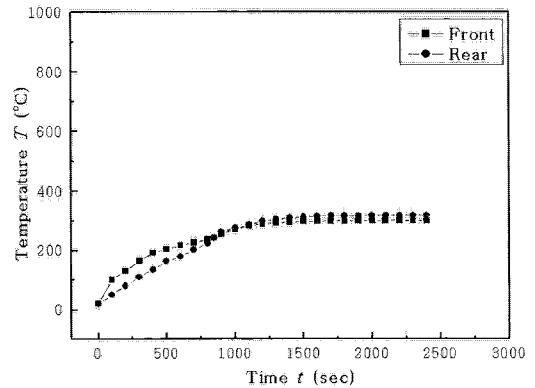
변형 저항성에 비하여 훨씬 더 안정적이라는 것을 나타내고 있다.

Fig. 8 은 온도에 따른 세라믹 담체의 파단계수를 나타낸 것이다. 온도가 증가하여도 파단계수는 감소하지 않고 오히려 더 증가하고 있다. 이러한 결과는 세라믹 담체로 사용하고 있는 코제라이트 세라믹 결정립의 입계 및 입내 확산이 본 실험 온도 범위에서는 활성화되지 못하고 있기 때문인 것으로 생각된다.<sup>(13)</sup> 한편, 대략 200°C 부근에서 파단계수가 가장 낮게 나타나므로 승용차용 삼원촉매변환기와 같이 담체의 작동 온도 영역(상온-600°C)이 상당히 넓어서 정확한 온도 상태를 파악할 수 없는 경우에는 이 온도에서의 강도를 설계 강도로 잡아야 할 것으로 생각된다.

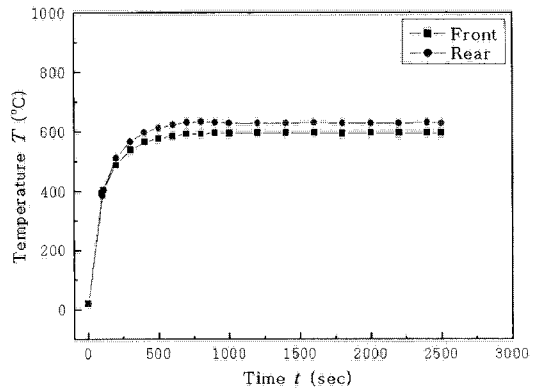
4.2 온도 분포

Fig. 9는 담체 입구와 출구영역에서의 온도를 시간에 따라 나타낸 것이다. 엔진 가동 초기에는 담체 입구 온도가 출구에 비하여 높으나 담체가 열적 정상상태에 이른 후에는 출구가 입구에 비하여 온도가 더 높게 나타나고 있다. 이러한 결과는 엔진 가동 초기에 열이 주로 엔진 배출가스에서 담체로 전달되기 때문에 전방의 담체 온도가 후방의 담체 온도에 비하여 높다.

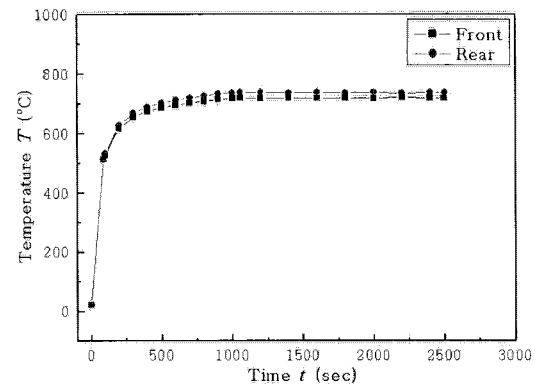
그러나 엔진 가동 후 대략 87초~847초 이상이 경과되면 후방 담체 온도가 전방 담체 온도에 비하여 높아지고 정상상태가 되어도 이러한 경향은 계속 유지되고 있다. Clarkson 등<sup>(14)</sup>에 의하면 촉매 활성화 시간 이전에는 배출가스와 담체사이에만 열전달이 이루어지기 때문에 담체 입구온도가 출구온도에 비하여 높다. 이러한 결과로 배출가스와 촉매사이의 화학반응도 담체 입구에서만 집



(a) 1000rpm



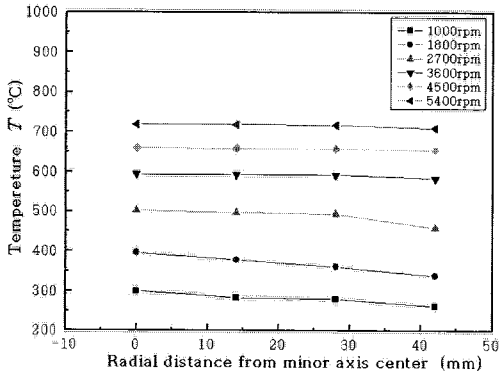
(b) 3600rpm



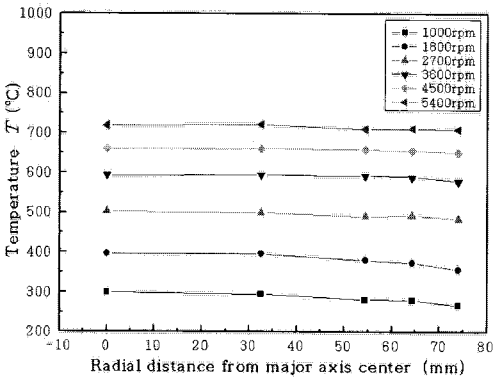
(c) 5400rpm

Fig. 9 Variation of temperature with time

중된다. 따라서 촉매 활성화 시간 이전에는 담체 입구에서 온도가 높아지게 된다. 그러나 촉매 활성화 시간 이후에는 엔진 배출가스 열 이외에 촉매 화학반응열이 첨가되어서 이른바 열적 역전 현상이 일어나게 된다. 이러한 결과로 담체가 열적 활성화 상태에 도달된 이후에는 담체 입구 온도보다 출구 온도가 더 높아 지게 된다.



(a) Minor axis



(b) Major axis

Fig. 10 Variation of temperature with radial distance

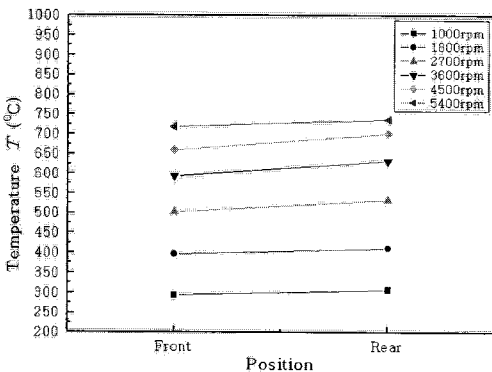


Fig. 11 Variation of temperature with axial distance

Fig. 10은 엔진 회전수에 대한 반경방향의 온도 분포를 나타낸 것이다. 엔진 회전수가 증가함에 따라 평균 온도는 증가하고 있으나 반경방향에 대한 최대 온도 기울기는 1800rpm에서 단경 방향으로 56.8°C 정도이다. 그러나 1800rpm 보다 더 클 때에는 오히려 온도 기울기가 더 감소하고 있다. 이러한 결과는 시험 시 엔진이 주행풍을 받

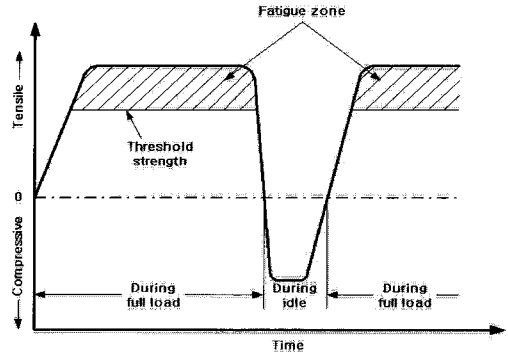


Fig. 12 Thermal fatigue and threshold strength

지 않아 삼원촉매변환기에서 대기로의 강제 대류가 활성화되지 못하였기 때문이다.

Fig. 11은 엔진 회전수에 대한 축방향의 온도 분포를 나타낸 것이다. 최대 온도 기울기는 4500 rpm에서 41.7°C까지 나타나고 있어 반경방향의 온도편차보다는 적다.

### 4.3 열적 내구성의 검토

Fig. 12는 승용차용 세라믹 담체에서 발생하는 열응력 발생 기구를 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에는 담체에서 발생하는 열응력이 그 강도의 하한치를 초과하게 되면 그 때부터 피로손상이 담체에 누적될 것이라는 사실을 나타내고 있다. 또한, 세라믹 성분으로 된 구조용 부품은 물이나 수증기 또는 특정 화합물에 노출되면 그 강도가 시간에 대하여 점진적으로 감소되는 응력부식균열을 발생시킨다.

이러한 개념은 기존의 피로손상 이론으로는 설명할 수가 없으므로 다음의 식 (5)와 같은 멱급수 형태의 동적피로손상 모델을 사용하여 세라믹 담체의 안전성을 평가하고자 한다.<sup>(15)</sup>

$$\sigma_{th} = MOR \left[ \frac{t_s}{t_l(n+1)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

여기서  $\sigma_{th}$  = 하한계 응력(threshold stress),  $MOR$  = 4점 굽힘시험에서 결정된 파단계수,  $t_s$  = 파단계수의 시험 시간,  $t_l$  = 담체의 사용 수명(보증기간),  $n$  = 코디어라이트 세라믹(cordierite ceramic)담체의 피로상수이다.

Gulati 등<sup>(16)</sup>은 코디어라이트 세라믹의 피로상수를 실험 데이터의 평균값인 24로 제안하고 있으나 본 연구에서는 세라믹 담체의 안정성을 확보

하기 위하여 세라믹 담체에서 확보할 수 있는 가장 큰 값의 피로상수 20.7을 식 (5)에 대입하여 하한계 열응력을 결정하였다.

식 (5)에서,  $t_s=30$  sec,  $n=20.7$  이고,  $t_i$  은 차량 속도를 80 km/h로 가정하여 계산하면 담체 보증 기간을 120,000 km로 할 때의 담체 사용수명으로서 1,500 hrs=5,400,000 sec이다.

$$\sigma_{th} \leq 0.48 MOR \quad (6)$$

즉, 식 (6)은 접선방향과 축방향 열응력이 담체 표면 온도에서 구한 과단계수의 48 %이하에 있어야만 세라믹 담체의 열피로 손상을 방지할 수 있다는 것을 의미한다. 본 논문에서 5400rpm의 경우, 담체의 표면 온도는 710.7°C이며 이에 상응하는 접선방향과 축방향의 과단계수는 각각 1.57

MPa, 3.79 MPa이다. 그러므로 이때의 접선방향과 축방향의 하한계 열응력은 접선방향과 축방향 과단계수의 48 %로서 각각 0.7536 MPa, 1.8192 MPa이다.

Fig. 13은 엔진 회전수에 대한 축방향과 접선방향 열응력을 나타낸 것이다. 그림에서 각각의 엔진 회전수에 대한 하한계 열응력을 함께 표시하였다. 축방향 열응력이 접선방향 열응력에 비하여 더 크게 발생하고 있다.

이러한 결과를 Fig. 6, 10, 11과 비교하면 열응력이 온도 기울기의 방향성 보다 탄성계수의 방향성에 더 크게 의존하고 있다. 그러나 접선방향 열응력은 5400rpm 이상에서는 하한계 열응력의 86 % 정도까지 증가하고 있어 본 논문의 열응력 모델을 이용하여 담체를 평가하는 경우 접선방향과 축방향 열응력을 모두 검토해야 한다. 이러한 결과는 담체온도 분포가 반경방향과 축방향에 대하여 비슷한 경향의 분포를 가지지 못하기 때문인 것으로 생각된다.

### 5. 결론

승용차용 삼원촉매변환기로 사용되는 세라믹 담체의 열적 내구성을 동적피로수명평가방법으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 담체의 온도 기울기는 반경방향에 비하여 축방향이 더 크다.
- (2) 열응력이 온도 기울기의 방향성에 의존하는 것 보다 탄성계수의 방향성에 더 크게 의존하고 있어 축방향 열응력이 접선방향 열응력에 비하여 더 크다.
- (3) 정차 상태의 엔진에 대한 담체의 열응력을 측정해 본 결과 모든 엔진 회전수 영역에서 접선방향 및 축방향 열응력이 열피로 하한계 아래에 있으나, 4500rpm 이상에서는 접선방향 열응력이 열피로 하한계의 86 %에 접근하고 있다.

### 참고문헌

- (1) Matsumoto Rempei, 2002, *Introduction to Environment Technology in Automobile*, Grandprix Publication, Tokyo, pp. 40~68.
- (2) Kim Seongyong, 2007, *Thermal Analysis of Three-way Catalyst Ceramic Substrate for*

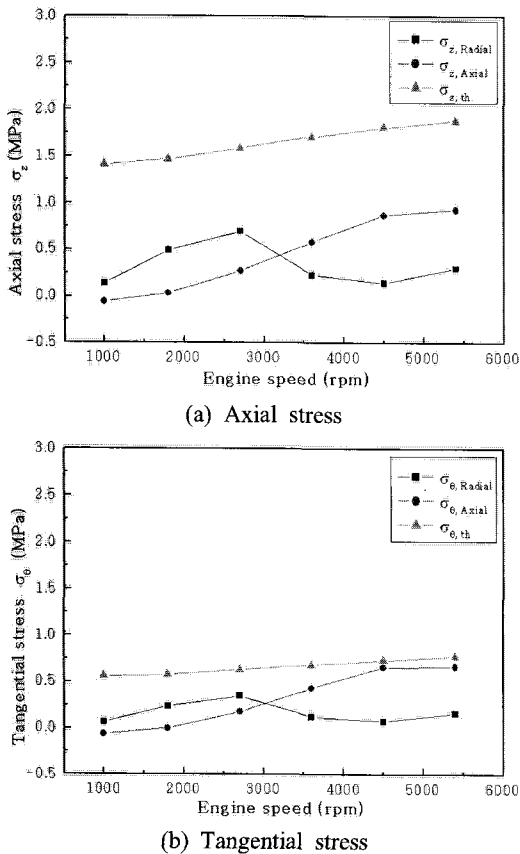


Fig. 13 Estimation of thermal durability in ceramic support

- Passenger Car*, Master Thesis, Kangwon National University, Korea, pp. 1~4.
- (3) 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.
- (4) Gulati, S. T., and Merry, R. P., 1984, "Design Consideration for Mounting Material for Ceramic Wall-Flow Diesel Filters," *SAE Paper No. 840074*.
- (5) Helfinstine, J. D., 1980, "Adding Static and Dynamic Fatigue Effects Directly to the Weibull Distribution," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 63, Issue1-2, pp. 113.
- (6) Gulati, S. T., 2001, "Design Consideration for Advanced Ceramic Catalyst Supports," *SAE Paper No. 2001-01-0493*.
- (7) Gulati, S. T., 1985, "Long-Term Durability of Ceramic Honeycomb for Automotive Emissions Control," *SAE Paper No. 850130*.
- (8) Gulati, S. T., and Sherwood, D. L., 1991, "Dynamic Fatigue Data for Cordierite Ceramic Wall-Flow Diesel Filters," *SAE Tech. Paper No. 910135*.
- (9) Gulati, S. T., 1983, "Thermal Stresses in Ceramic Wall Flow Diesel Filters," *SAE Paper No. 830079*.
- (10) Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N., 1970, *Theory of Elasticity: 3rd edition*, McGraw-Hill, New York.
- (11) Rawson, H., 1951, "A Theory of Stresses in Glass Butt Seals," *British Journal of Applied Physics*, Vol. 2, No. 6, pp. 151~156.
- (12) 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*.
- (13) Nomura, H., Jang B. K., and Matsubara, H., 2005, "A Report on Sintering Simulation of SiC Honeycomb Ceramics," *Materials Research and Development Laboratory in Japanese Fine Ceramics Center*, pp. 24~28.
- (14) Clarkson, R. J., Benjamin, S. F., Jasper, T. S., and Girls, N. S., 1993, "An Integrated Computational Model for the Optimisation of Monolith Catalytic Converters," *SAE Paper No. 931071*.
- (15) Helfinstine, J. D., and Gulati, S. T., 1985, "High Temperature Fatigue in Ceramic Honeycomb Catalyst Supports" *SAE Paper No. 852100*.
- (16) Gulati, S. T., Williamson, B., Nunan, J., and Anderson, K., 1998, "Fatigue and Performance Data for Advanced Thin Wall Ceramic Catalysts," *SAE Tech. Paper No. 980670*.