

삼원 촉매 담체의 확률론적 열피로 성능 평가

조 석 수*†

* 강원대학교 자동차공학과

Probabilistic Estimation of Thermal Fatigue Performance of Three-Way Catalyst Substrate

Seok-Swoo Cho*†

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

(Received September 14, 2013 ; Revised April 16, 2014 ; Accepted April 16, 2014)

Key Words: Three-Way Catalyst Substrate(삼원촉매담체), Thermal Stress(열응력), Probability Factor(확률인자), Size Factor(크기효과), Fatigue Factor(피로인자), Strength Reduction Factor(강도저하계수), MOR(Modulus of Rupture:파단계수), Failure Probability(파손확률)

초록: : 국내 승용차용 삼원촉매담체의 경우 배기가스 변환 효율이나 압력 강하 등은 엔진 효율 측면에서 만족되고 있지만 열적 내구성은 요구 내구 수명을 만족시키지 못하여 차량정비현장에서 상당한 파손 사고가 발견되고 있다. 본 논문에서는 이러한 현상의 원인을 밝히기 위하여 국내 승용차용 삼원촉매담체에서 발생하는 열응력을 온도측정자료와 단순한 열응력 모델을 이용하여 구하였으며 열피로 성능은 확률론적 강도가 아닌 확률과 크기 및 피로 인자를 고려한 확률론적 설계 강도로 평가함으로써 확률론적 설계 강도에 의한 열피로 성능 평가 방법을 극복하였다.

Abstract: A three-way catalyst substrate for domestic passenger car satisfies the design criteria for exhaust gas exchange and pressure drop but does not have satisfactory thermal fatigue performance. Prefracture faults in this three-way catalyst substrate has often been discovered in vehicle repair or vehicle inspection facilities. This paper presents a thermal fatigue performance estimation method for a three-way catalyst substrate using a probabilistic strength reduction factor model. This method is superior to the thermal fatigue performance estimation method for a three-way catalyst substrate that uses a deterministic strength model.

1. 서 론

자동차 배출가스를 단계적으로 줄이는 LEV, ULEV, SULEV 등의 규제를 받는 차량들은 삼원촉매담체(Three-way catalyst substrate), 워시코트(washcoat), 촉매 변환기의 구조 설계, 엔진 제어 시스템 등의 진보된 기술이 필요하다.⁽¹⁻³⁾ 특히, 이들 부품 중에서 배출가스를 직접적으로 정화하는 삼원촉매변환기는 차량의 주행 거리에 대한 정화 성능이 감소되어도 규정된 주행거리에 도달할 때까지 유해 배출가스가 허용 기준치 이하로 유지되어야 한다. 이러한 허용기준을 만족시키기 위한

가장 중요한 기능은 고온의 배출가스에 대한 삼원촉매변환기용 담체의 열피로 성능(Thermal fatigue performance)이다.⁽⁴⁾ 국내 삼원촉매변환기(Three-way catalytic converter: TWC)용 세라믹 담체(이하에서 삼원촉매담체로 명명)의 경우 배기가스 변환 효율이나 압력 강하 등은 엔진 효율 측면에서 만족되고 있지만 열적 내구성은 차량정비현장에서는 요구 내구 수명을 만족시키지 못하여 상당한 파손 사고가 발생된다고 보고되고 있다.^(5,6)

삼원촉매담체는 마운팅으로 인한 기계적 응력, 엔진 회전으로 인한 열응력, 돌 충격(Stone impact)으로 인한 충격 응력 등을 받고 있다. 삼원촉매담체 내구성이라는 관점에서는 위의 응력들을 모두 고려해야 하지만 그 중에서도 엔진의 광범위한 회전속도에 의하여 발생하는 열응력이 가장 가혹하

† Corresponding Author, sscho394@Kangwon.ac.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

고 발생 응력을 제어하기가 힘들다. 또한 엔진이 가동되는 동안 내부 영역의 경우 높은 온도가 유지되고, 외부 영역의 경우 낮은 온도가 발생되어 삼원촉매담체는 일정 크기의 인장 응력을 받고 있다. 이러한 관점에서 삼원촉매담체에서 발생하는 열응력을 평가하기 위한 접근으로는 열전달 방법(Heat transfer simulation method)과 열유동 방법(Thermal flow simulation method)이 있다. 전자는 삼원촉매담체 온도 분포를 직접 측정하여 열응력을 얻을 수 있어 매우 신뢰성이 높은 방법이다. 후자는 온도, 대류 열전달계수, 속도, 압력 등의 매개변수를 이용하여 삼원촉매담체의 온도 분포를 간접적으로 구하여 열응력을 간단히 계산할 수 있다. 그러나 이 방법은 유한요소해석에 있어 삼원촉매담체의 구조 특성상 대류열전달계수를 선정하는데 어려움이 있어 현장 설계 기술자들에게 추천할 수 없다.⁽⁶⁾

조 등⁽⁷⁾은 삼원촉매담체의 열피로 성능 평가 파라미터로 확장론적 설계 응력을 제안하는 동적피로수명평가방법으로 평가한 결과 삼원촉매담체가 피로설계수명을 만족시키지 못하는 조기파손현상을 설명하지 못하고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 국내 승용차용 삼원촉매담체에서 발생하는 열응력을 온도측정자료와 단순한 열응력 모델을 이용하여 구하였으며 열피로 성능을 확장론적 강도가 아닌 확률과 크기 및 피로 인자를 고려한 확률론적 설계 강도로 평가함으로써 확장론적 설계 강도에 의한 열피로 성능 평가 방법을 극복하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 삼원촉매변환기의 구조

Fig. 1은 본 논문의 가솔린 엔진에 사용되는 삼원촉매변환기용 세라믹 담체(400/6.5 cells/in²)의 구조를 나타낸 것이다. 일반적으로 삼원촉매담체는 촉방향의 과도한 온도구배를 억제하기 위해 두 개의 삼원촉매담체로 분리되어 설치된다.

2.2 실차시험조건과 온도분포측정시험

Table 1은 본 논문에서 사용한 가솔린 엔진 제원을 나타낸 것이다.⁽⁸⁾ 실내정차시험은 실내에서 최소 엔진 회전수를 1000rpm 으로, 최대 엔진 회전수를 5000rpm 으로 설정한 뒤 각각 1000rpm 간격으로 증가시켜 수행하였다. Table 2는 도로주행시험조건을 나타낸 것으로 후자는 삼척-강릉구간의 7번 국도와 동해고속도로에서 수행하였다.

Table 1 Specification of gasoline engine

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

Table 2 Vehicle driving test conditions

Vehicle driving test	Driving section	Temperature (°C)	Humidity (%)	Driving distance (km)	Driving speed (km/hr)
1	National Road No.7	21	65	12	80
	Donghae Expressway	21	65	53	100 ~ 180
2	National Road No.7	21	65	57	60 ~ 80

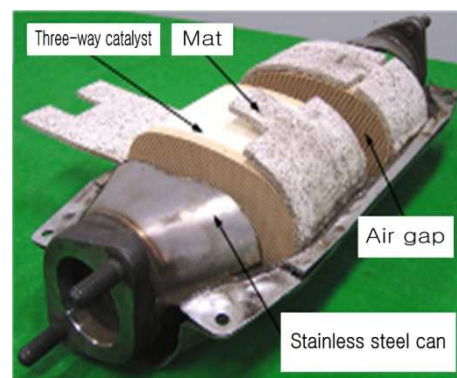


Fig. 1 Structure of three-way catalytic converter

Fig. 2는 실험 장치의 구성도를 나타낸 것으로, 가솔린 엔진(Hyundai, SONATA II SOHC 2000cc, Korea), 삼원촉매변환기(Mobis, Converter assy. No. 28950-33430, Korea), 온도측정장치(Graphtec, GL200, Japan), 배출가스측정장치(ECOM-A: JP/1F-18, KIS: MEGA-1010A, USA)등으로 구성되어 있다. 열응력 모델에서 사용하기 위한 삼원촉매담체의 온도 측정위치는 입구와 출구로 이 위치에 드릴을 사용하

여 직경이 4mm 인 열전쌍(Thermocouple) 구멍을 뚫었다. 열전쌍은 각 구멍 당 1개~2개를 장착하였으며 직경이 1mm 스테인리스 강철사를 이용하여 삼원촉매변환기 스틸 캔(Steel can)에 고정하였다. 삼원촉매담체 내구성은 정상 상태의 온도변화에 의한 열피로하중에 의하여 결정되므로 정상 상태의 온도만을 기록하였다.

3. 열응력 해석 방법

3.1 열응력 모델

Fig. 3은 삼원촉매담체의 이방성을 표현하기 위한 좌표계를 나타낸 것이다. 좌표계는 원통좌표계(Cylindrical coordinate system)를 적용하고 반경방향, 접선방향, 축방향으로 각각 설정하였다. 또한, 삼원촉매담체는 적은 연신율에 의한 취성 및 압출공정과 온도분포의 이방성으로 인하여 파손기준응력을 복합응력으로 고려하지 않고 원통좌표계에 따른 단일수직응력으로 가정하였다.⁽⁹⁾ 한편, 세라믹 압출 성형품은 반경방향과 접선방향의 기계적 특성치는 동일한 것으로 평가되고 있어 본 연구에서도 반경방향과 접선방향의 기계적 특성치를 동일하게 가정하였다.^(4,10)

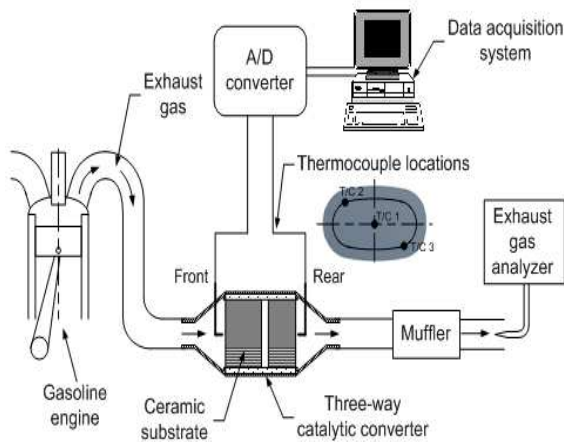


Fig. 2 Schematic of temperature measurement test equipment

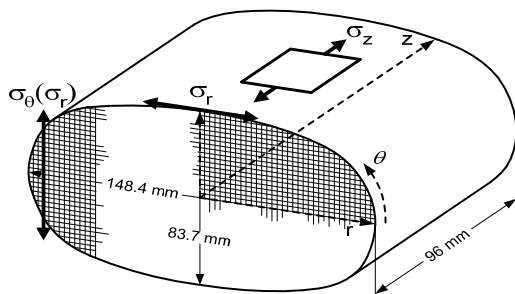


Fig. 3 Coordinate system of three-way catalyst substrate

3.2 반경방향 온도구배에 의한 열응력^(7,11~13)

삼원촉매담체가 실린더 형태의 단면을 가진 구조물에서 반경방향 온도구배는 뚜렷하나 축방향 온도구배는 무시할 수 있는 경우 삼원촉매담체 표면에서 발생하는 최대 열응력은 다음과 같다.

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

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

여기서,

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

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

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

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

$$+ \frac{b^2}{2} \lambda_3 \left(1 - \frac{a^4}{b^4} \right) + \frac{2}{3} b^3 \lambda_4 \left(1 - \frac{a^5}{b^5} \right)$$

T_c : 중앙영역의 온도(°C)

T_0 : 표면영역의 온도(°C)

K : 탄성계수의 비($\frac{E_r}{E_z} = 0.5$)

$\nu_{\theta r} = \nu_{rz} = \nu = 0.1$, $\nu_{\theta z} = \nu' = 0.25$

$\frac{\Delta L}{L}$: 삼원촉매담체의 중간단면에서의 평균 열팽창률

a : 가열된 영역의 삼원촉매담체 반경(mm)

b : 삼원촉매담체 외경(mm)

$$\lambda_1 = mA + m^2B + m^3C$$

$$\lambda_2 = -(nA + 2mnB + 3m^2nC)$$

$$\lambda_3 = n^2B + 3mm^2C$$

$$\lambda_4 = -n^3C$$

$$m = [b(T_c - 25) - a(T_0 - 25)] / (b/a)$$

$$n = (T_c - T_0) / (b/a)$$

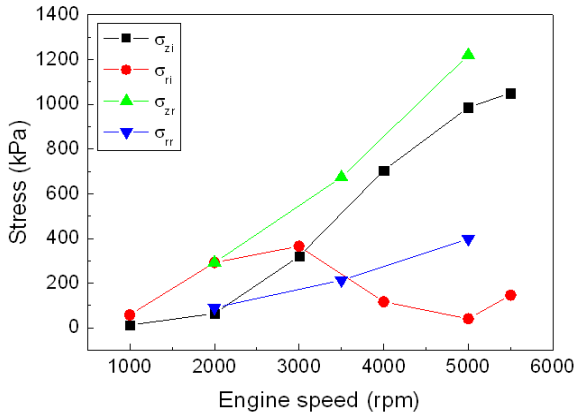
3.3 축방향 온도구배에 의한 열응력^(7,11~13)

삼원촉매담체가 배출가스의 열유동 방향에 따라 축방향으로는 선형적인 온도 분포를 보이나 반경방향의 온도구배는 무시할 수 있는 경우, 삼원촉매담체 표면에서 발생하는 최대 열응력은 다음과 같다.

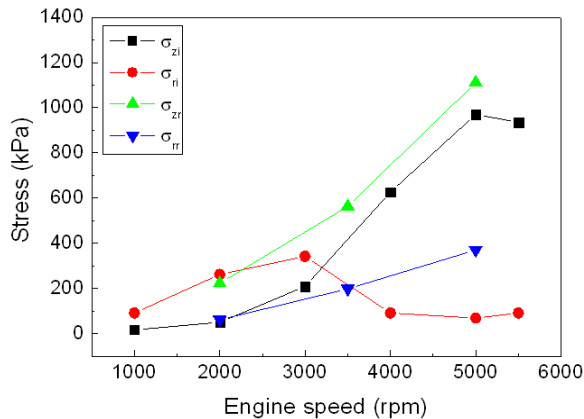
$$\sigma_z = 0.16 [3(1 - \nu'^2)]^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{E_z}{1 - 0.32\nu'} \right) \times \left(\frac{\Delta L}{L} \Big|_{inlet} - \frac{\Delta L}{L} \Big|_{midbed} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_r = 0.5 \left(\frac{E_r}{1-\nu} \right) \left(\frac{\Delta L}{L} \Big|_{inlet} - \frac{\Delta L}{L} \Big|_{midbed} \right) \quad (4)$$

여기서, σ_r : 반경방향 열응력, σ_z : 축방향 열응력
 L : 삼원촉매담체 축방향 길이, $\frac{\Delta L}{L} \Big|_{inlet}$: 삼원촉매담체 입구에서의 열팽창률, $\frac{\Delta L}{L} \Big|_{midbed}$:



(a) Radial temperature gradient



(b) Axial temperature gradient

Fig. 4 Thermal stress of three-way catalyst substrate in indoor and road tests

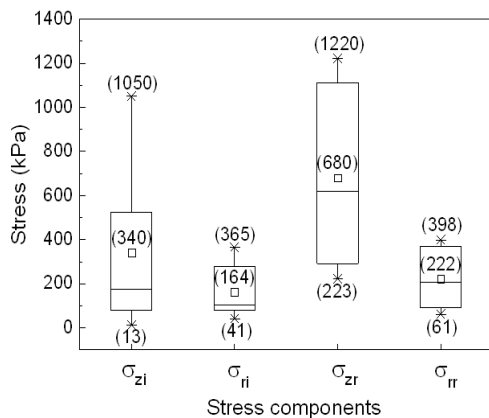


Fig. 5 Distribution of stress components

삼원촉매담체 입구와 출구 온도 사이의 평균 온도에서의 열팽창률($=1/2L \int_0^L [A(T-25) + B(T-25)^2 + C(T-25)^3] dz$)

Fig. 4는 Fig. 2의 온도 측정 자료를 식 (1)에서 (4)까지의 식에 대입하여 구한 삼원촉매담체 열응력을 나타낸 것이다. 또한, Fig. 5는 Fig. 4의 결과를 기초로 각 응력성분 σ_{ij} 의 분포를 나타낸 것이다. 여기서 첨자 i 는 각 응력성분방향을, j 는 시험장소를 낸 것으로, j 의 i 는 실내정차시험을, j 의 r 은 도로주행시험을 나타낸 것이다. 축방향 온도구배에 의한 열응력 평가방법은 반경방향 온도구배에 의한 열응력 평가방법에 비하여 최대 응력을 기준으로 열응력이 축방향의 경우 1.06~1.08 배, 반경방향의 경우 1.09~1.1 배 정도 과대 평가하고 있으며 전체 평균적으로는 1.08 배 정도 과대 평가하고 있다. 또한, 축방향 열응력은 반경방향 열응력에 비하여 최대응력을 기준으로 2.84~3.06 배 정도 과대 평가하고 있다. 또한, 도로주행시험에 의한 열응력은 실내내정차시험에 의한 열응력에 비하여 1.09~1.16 배 정도 과대 평가되고 있다. 따라서 삼원촉매담체에서 발생하는 열응력은 평가방법과 장소보다는 열응력 방향에 더 큰 영향을 받고 있다. 이상의 결과를 종합 분석하여 보면 축방향 온도구배에 의하여 축방향 열응력을 도로주행시험조건에서 평가한 값은 반경방향 온도 구배에 의하여 반경방향 열응력을 실내정차시험조건에서 평가한 값에 비하여 최대응력을 기준으로 3.57 배 정도 과대하게 평가되고 있다. 특히, 축 방향 온도 구배에 의한 축방향 열응력은 평가방법과 장소에 관계없이 가장 큰 응력을 나타내고 있어 이 응력을 삼원촉매담체의 설계 응력으로 설정하기로 한다. 즉, 축 방향 온도 구배에 의한 축방향 열응력이 삼원촉매담체의 피로파손에 결정적인 역할을 하는 응력이다. 한편, Fig. 4에서 다른 시험 조건과 다르게 엔진회전속도가 증가함에 따라 도로주행시험의 반경방향응력은 증가하다가 다시 감소하는 특이한 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 촉매의 실제적 온도변화가 축방향의 경우 엔진회전속도가 증가함에 따라 증가하나 반경방향의 경우 삼원촉매의 화학반응에 의한 열적 활성화과정에 의하여 초기엔진회전속도영역에서는 증가하나 3000rpm 이상에서는 오히려 더 감소하기 때문이다.

4. 열피로 성능의 검토

4.1 강도저하계수 모델

삼원촉매담체의 조기파손현상을 설명하기 위하

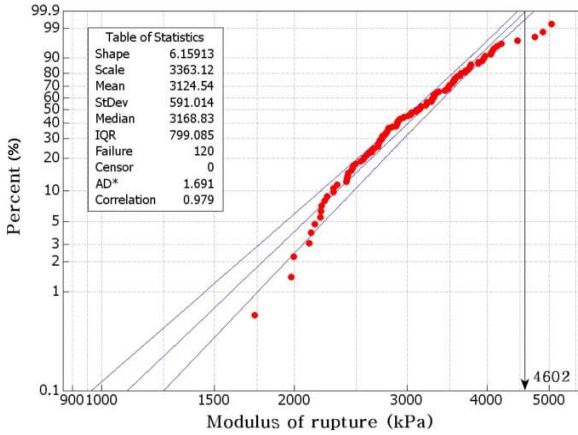


Fig. 6 Cumulative density probability of MOR

여 삼원촉매담체강도에 영향을 미치는 인자 중 가장 큰 인자라고 생각할 수 있는 확률 인자와 크기 인자 및 피로 인자를 동시에 고려하여 삼원촉매담체의 신뢰성을 평가한다. 재료 결함분포의 확률적 특성을 평가하기 위하여 Fig. 6은 삼원 촉매의 4점 굽힘강도시험에서 구한 축방향 파단계수 $MO R_a$ (Modulus of rupture)의 누적 확률을 2모수 Weibull 확률지에 나타낸 것으로 평균과 표준편차는 각각 3,125 kPa, 591 kPa이다. 파단계수에 대한 신뢰도 R은 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \exp\left[\left(-\frac{\gamma_r}{\gamma_0}\right)^m\right] \quad (5)$$

단, γ_r :MOR의 잔류강도, γ_0 :척도계수, m:형상계수

식 (5)에서 척도계수 γ_0 는 99.9%의 신뢰도를 가지는 파단계수로 설정하였으며 본 연구의 경우 4,602kPa가 된다.

한편, $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_0}\right)_p$ 은 강도설계관점에서 보면 재료 결함 분포에 의한 MOR의 강도 저하 계수로서 설계강도 γ_0 에 대한 잔류강도 γ_r 의 비를 나타낸 것이다. Fig. 7은 각 신뢰도 R의 수준에 따른 강도저하계수 $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_0}\right)_p$ 를 2모수 와이블 누적확률밀도함수의 형상계수로 나타낸 것으로 다음 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_0}\right)_p = -(\ln R)^{\frac{1}{m}} \quad (6)$$

본 연구에서는 2모수 와이블 누적확률밀도함수의 형상계수 6.2와 신뢰도 99.9%에 해당하는 강도저하계수를 선택하면 강도저하계수 $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_0}\right)_p$ 는

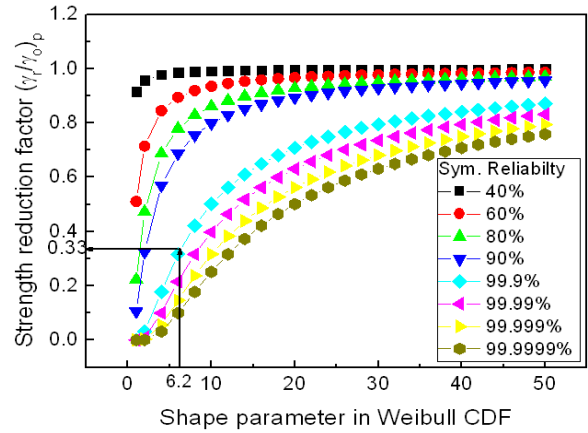


Fig. 7 Relation between strength reduction factor and Reliability

0.33이다. 또한, 설계 강도를 99.9%의 신뢰도를 가지는 파단 계수로 설정하면 본 연구의 경우 4,602kPa이 되므로 재료의 확률론적 결함 분포에 의하여 저하된 설계강도는 1,519kPa이다.

본 연구의 경우 크기 효과 파라미터는 삼원 촉매의 고응력 발생 부분인 바깥 표면적 A에 대한 4점 굽힘 시험편의 최대응력발생부분인 순수굽힘 응력발생표면적 A_0 의 비로서 나타낼 수 있으며 다음 식 (7)은 위험면적비 $\left(\frac{A_0}{A}\right)$ 에 따른 강도저하계수 $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_0}\right)_s$ 를 2모수 와이블 누적확률밀도함수의 형상계수로 나타낸 것이다.

$$\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_0}\right)_s = \left(\frac{A_0}{A}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

Fig. 8은 위험면적비 $\left(\frac{A_0}{A}\right)$ 에 따른 강도저하계수 $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_0}\right)_s$ 를 2모수 와이블 누적확률밀도함수의 형상계수로 나타낸 것으로 삼원촉매의 고응력발생부분의 바깥표면적은 37,233mm²이고 4점굽힘시험편의 순수굽힘응력발생 면적은 1,613mm²이므로 위험면적비 $\left(\frac{A_0}{A}\right)$ 는 0.043이다. 본 연구에서는 2모수 와이블 누적확률밀도함수의 형상계수 6.2와 위험면적비 0.043에 해당하는 강도저하계수를 구하면 강도저하계수 $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_0}\right)_s$ 는 0.6이다. 또한, 설계강도를 99.9%의 신뢰도를 가지는 파단계수로 설정하면 본 연구의 경우 4,602kPa이 되므로 크기 인자에 의하여 저하된 설계강도는 2,761kPa이다.

세라믹 성분으로 된 구조용 부품은 물이나 수증기 또는 특정 화합물에 노출되면 그 강도가 시간에 대하여 점진적으로 감소되는 응력부식균열을

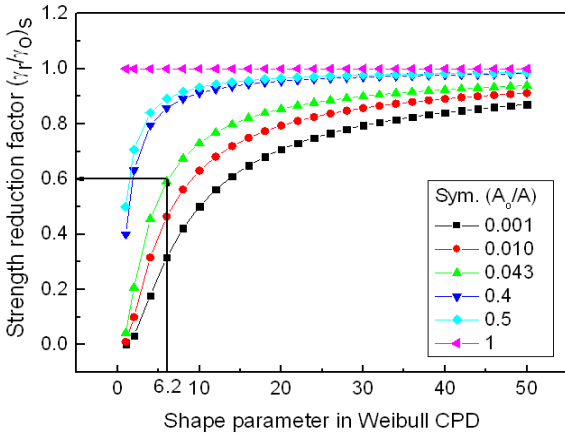


Fig. 8 Relation between strength reduction factor and critical area ratio

발생시킨다. 즉, 이러한 개념은 기존의 피로손상 이론으로는 설명할 수가 없으므로 다음 식 (8)과 같은 멱급수 동적 피로손상 모델을 사용하여 삼원촉매담체의 강도저하계수를 구할 수 있다.

$$\left(\frac{Y_r}{Y_0}\right)_f = \left(\frac{t_{r0}}{t_{fr}}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

단, t_{f0} : 파단계수의 시험 시간, t_{fr} = 삼원촉매담체의 사용 수명(보증기간), n = 코디어라이트 삼원촉매담체(cordierite ceramic substrate)의 피로상수 Gluati 등⁽¹⁴⁾은 코디어라이트 세라믹의 피로상수를 실험 데이터의 평균값인 24로 제안하고 있으나 국내 삼원 촉매의 경우 하중 속도에 따른 4점 굽힘 강도를 구하여 피로상수를 구한 결과 $n=18.4$ 로서 국내 엔진용 촉매는 국외 엔진용 촉매에 비하여 내구성이 현저히 떨어짐을 알 수 있다.^(15,16) 식 (8)에서 $t_{f0} = 30\text{sec}$, $n = 18.4$ 이고, t_{fr} 은 차량속도를 80km/h로 가정하여 삼원촉매담체의 보증기간을 120,000km로 할 때의 삼원촉매담체 사용수명으로서 $t_{fr} = 1,500\text{hrs} = 5,400,000\text{sec}$ 이다. 따라서 이러한 값을 식 (8)에 대입하여 피로인자에 의한 강도저하계수 $\left(\frac{Y_r}{Y_0}\right)_f$ 를 구하면 0.52가 된다. 또한, 설계강도를 99.9%의 신뢰도를 가지는 파단계수로 설정하면 본 연구의 경우 4,602kPa이 되므로 피로 인자에 의하여 저하된 설계강도는 2,393 kPa이다.

Fig. 9는 확률인자와 크기인자 및 피로인자에 따른 강도저하계수 $\left(\frac{Y_r}{Y_0}\right)_f$ 를 2모수 와이블 누적확률밀도함수의 형상계수로 나타낸 것으로 피로인자는 멱급수 동적피로손상모델의 피로상수 $n=18.4$ 에 대하여 나타내었다. 이상의 3가지 강도저하계수를 복합적으로 고려하면 다음 식 (9)의 통합적 강도

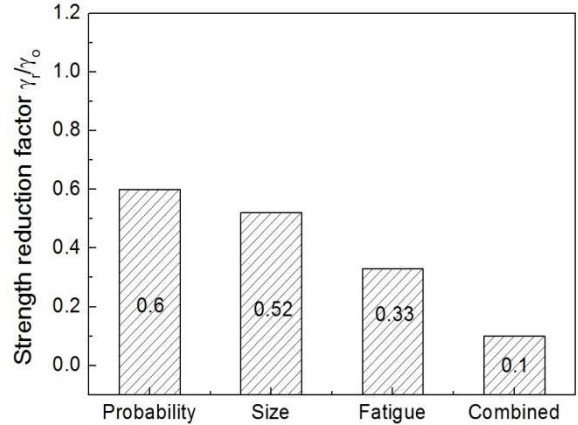


Fig. 9 Effect of parameters on strength reduction factor

저하계수 $\left(\frac{Y_r}{Y_0}\right)$ 를 구할 수 있다.

$$\left(\frac{Y_r}{Y_0}\right) = \left(\frac{Y_r}{Y_0}\right)_p \times \left(\frac{Y_r}{Y_0}\right)_s \times \left(\frac{Y_r}{Y_0}\right)_f \quad (9)$$

따라서 본 연구에서는 삼원촉매담체의 안전성을 평가하기 위하여 상술의 3가지 강도저하계수를 식 (9)에 대입하면 통합적 강도저하계수를 구할 수 있으며 그 값은 0.10296이 된다.

3.2.2 파손확률에 의한 열적 내구성 평가

삼원 촉매는 초기에 충분한 안전성으로 설계하였으나 재료의 열화에 의하여 소결 과정 중에 첨가한 성분이 다양한 유리상을 형성하면서 점성 유동이 활발해지고 이로 인한 기공의 생성과 결합에 의한 확산의 진행으로 느린 균열 성장(Slow crack growth)이 일어나게 된다. 따라서 삼원 촉매의 절대적 안정성을 검토하기 위하여 확률론적 평가로부터 얻어진 적합한 설계 강도의 확률분포와 작용응력의 확률분포로부터 파손확률을 다음 식 (10)을 이용하여 평가하였다.

$$p_f = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{\max}}{Y_0 \times F_p \times F_s \times F_f}\right)\right] \quad (10)$$

단, F_p : 확률인자 $\left(= \left(\frac{Y}{Y_0}\right)_p \right)$, F_s : 크기인자 $\left(= \left(\frac{Y}{Y_0}\right)_s \right)$, F_f : 피로인자 $\left(= \left(\frac{Y}{Y_0}\right)_f \right)$

Table 3은 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9의 결과를 식 (10)에 대입하여 삼원촉매담체의 파손 확률을 평가하였다. 반경과 접선 방향 응력에 대한 파손 확률은 축 방향 응력에 대한 파손 확률에 비하여 대략 5~6% 정도 높게 나타나고 있다. 따라서 삼원촉매담체의

Table 3 Failure probability of three-way catalyst

Vehicle Test type	Estimation method	Max. Stress σ_{max} (kPa)	Characteristic Strength Y_0 (kPa)	F_p	F_s	F_f	Failure probability P_f (%)	
Indoor	Axial temp. gradient	σ_r (kPa)	365	1933	0.33	0.6	0.52	84
		σ_θ (kPa)	365	1933	0.33	0.6	0.52	84
		σ_z (kPa)	1050	4602	0.33	0.6	0.52	89
	Radial temp. gradient	σ_r (kPa)	345	1933	0.33	0.6	0.52	82
		σ_θ (kPa)	345	1933	0.33	0.6	0.52	82
		σ_z (kPa)	970	4602	0.33	0.6	0.52	87
Road	Axial temp. gradient	σ_r (kPa)	398	1933	0.33	0.6	0.52	86
		σ_θ (kPa)	398	1933	0.33	0.6	0.52	86
		σ_z (kPa)	1220	4602	0.33	0.6	0.52	92
	Radial temp. gradient	σ_r (kPa)	370	1933	0.33	0.6	0.52	84
		σ_θ (kPa)	370	1933	0.33	0.6	0.52	84
		σ_z (kPa)	1111	4602	0.33	0.6	0.52	90

파손확률은 파손 확률이 가장 높은 방향의 응력에 지배되므로 축방향 온도 구배 방법에 의한 축방향 응력에 대한 파손 확률이 삼원 촉매 파손 확률이 된다. 따라서 Table 3에서 이러한 조건에 해당하는 삼원촉매의 파손 확률은 92%이다. 삼원촉매담체의 파손 확률이 92%가 된다는 것은 삼원 촉매담체가 내구 수명 120,000km에 도달하지 못하는 부품이 92%라는 것을 나타낸다. 따라서 삼원촉매담체에 대한 설계 안전율이 현저히 낮게 설정되어 있으므로 사용자의 다양한 운전 조건을 고려하여 삼원 촉매담체의 조기 파손을 경감시키려면 삼원 촉매담체의 파손 확률을 충분한 수준으로 낮추어서 설계 및 제조되어야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 삼원촉매의 열응력을 온도 측정 시험결과를 기초로 삼원촉매의 안전성을 파손 확률로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 삼원 촉매 강도에 영향을 미치는 인자는 확률적 인자, 크기 인자, 피로인자로서 세가지 인자

를 모두 고려한 통합적 강도저하계수는 0.1 이다.

(2) 삼원촉매담체에서 발생하는 열응력은 평가 방법과 장소보다는 열응력 방향에 대하여 가장 큰 민감도를 가진다.

(3) 축방향 온도 구배 방법에 의한 축방향 열응력은 다른 방법과 응력성분에 비하여 더 높게 나타나므로 삼원촉매담체의 설계응력이 된다.

(4) 도로주행시험에서 발생하는 삼원촉매의 파손확률은 92%이므로 사용자의 다양한 운전조건을 고려하면 삼원촉매의 조기 파손을 예방하기 위한 설계 및 제조가 필요하다.

참고문헌 (References)

- (1) Shamim, T., Shen, H., Sengupta, S., Son, S. and Adamczyk, A. A., 2002, "A Comprehensive Model to Predict Three-way Catalytic Converter Performance," *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 124, No. 2, pp. 421~428.
- (2) Pontikakis, G. and Stamatelos, A., 2006, "Three-Dimensional Catalytic Regeneration Modeling of SiC Diesel Particulate Filters," *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 128, No. 4, pp. 421~433.
- (3) Lee, J. S. and Kim, N. Y., 2008, "Characterization of SCR System for No_x Reduction of Diesel Engine (II)," *Transactions of the KSPE*, Vol. 25, No. 11, pp. 83-89.
- (4) Gulati, S. T., 1985, "Long-Term Durability of Ceramic Honeycombs for Automotive Emissions Control," *SAE Tech. Paper No. 850130*.
- (5) 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. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 30, No. 11, pp. 1392~1400.
- (6) Lee, S. R. and Cho, S. S., 2013, "A Estimation of Thermal Fatigue Performance in Three-way Catalyst," *Transactions of the KAIS*, Vol. 14, No. 1, pp. 13~19.
- (7) Baek, S. H., Kim, S. Y., Seung, S. S., Yang, H., Joo, W. S. and Cho, S. S., 2007, "Experimental Estimation of Thermal Durability in Ceramic Catalyst Supports for Passenger Car," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 12, pp. 1157~1164.
- (8) Hyundai Motors, 1993, *Hyundai SONATA II Engine Workshop Manual*, Hyundai Motors, Seoul, pp.14~16.
- (9) Norman E. Dowling, 1999, *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice Hall Inc., New Jersey, pp. 239~285
- (10) Gulati, S. T. and Sherwood, D. L., 1991, "Dynamic Fatigue Data for Cordierite Ceramic Wall-Flow Diesel

- Filters," *SAE Tech. Paper No. 910135*.
- (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) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., 1970, *Theory of Elasticity: 3rd edition*, McGraw-Hill, New York, pp. 433~483.
- (13) Gulati, S. T., 1983, "Thermal Stresses in Ceramic Wall Flow Diesel Filters," *SAE Tech. Paper No. 830079*.
- (14) Gluati, S. T., William, B., Nunan, J., and Anderson, K., 2010, "Fatigue and Performance Data for Advanced Thin Wall Ceramic Catalyst," *SAE Tech. Paper No. 980670*.
- (15) Baek, S. H., Kim, S. Y., Seung, S. S., Yang, H., Joo, W. S., and Cho, S. S., 2007, "Experimental Estimation of Thermal Durability in Ceramic Catalyst Supports for Passenger Car," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 12, pp. 1157~1164.
- (16) Choi, H.J., 2010 *An Estimation of Thermal Fatigue in Three-way Catalyst using Thermal Flow and Structure Analysis*, A Thesis for a Masterate, Kangwon National University, South Korea, pp. 49~50.