

## 열유동구조연성해석을 이용한 삼원촉매담체의 구조 해석

이성룡<sup>1\*</sup>, 조석수<sup>2</sup>

<sup>1</sup>강원대 재료금속공학과, <sup>2</sup>강원대 기계설계공학과

### The Structural Analysis of Three-Way Catalyst Substrate using Coupled Thermal-Fluid-Structural Analysis

Sung-Riong Lee<sup>1\*</sup>, Seok-Swoo Cho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials and Metallurgical Engineering, Kangwon National University

<sup>2</sup>Department of Mechanical Design Engineering, Kangwon National University

**요약** 본 논문은 국내 승용차에 장착된 삼원촉매담체의 열적 구조 안전성을 평가한 것이다. 삼원촉매담체에 대한 열 유동 경계조건을 D-optimal 실험계획법으로 결정한 뒤 이 값을 ANSYS CFX V11에 적용하여 촉매 온도 분포를 구하였다. 이러한 온도 분포를 ANSYS V11로 전달한 뒤 구조적 구속조건을 부여하여 담체의 열응력을 계산하였다. 이러한 열응력을 이용하여 삼원촉매담체의 재료강도분포와 실동하중조건하에서의 응력분포를 이용하여 해당 부품의 안전계수를 구하여 삼원촉매담체의 구조 안전성을 평가하였다. 본 연구에서 고려하는 삼원촉매담체는 구조적 안전계수가 0.275로, 발생 열응력이 설계 강도를 초과하고 있다. 따라서 삼원촉매담체는 설계 내구 수명 120,000km를 만족시키지 못하므로 본 부품에 대한 재설계가 요구된다.

**Abstract** This study evaluates the thermal structural safety of the three-way catalyst(TWC) substrate for domestic passenger cars. Thermal-fluid boundary conditions on the TWC substrate were determined by D-optimal DOE. The thermal stresses on the TWC substrate were calculated by the temperature distribution obtained from the CFD results. The safety factors of the TWC substrate were determined by statistical strength and stress distributions and estimated to be 0.275. The thermal stresses for TWC substrate exceeded the strength of the material. Therefore, it is necessary to redesign the TWC substrate because it has much shorter service life than design life.

**Key Words** : Three-Way Catalyst(TWC) Substrate, Thermal-Fluid-Structural Analysis, Design Life, Service Life, Safety Factor

### 1. 서론

가솔린 차량의 삼원촉매담체는 차량에서 발생하는 탄소 산화물, ( $CO_x$ ) 유황산화물( $SO_x$ ), 질소 산화물( $NO_x$ ), 휘발성 유기 화합물( $VOC$ ) 및 입자상 물질( $PM$ )등과 같은 오염 물질을 정화하는 삼원촉매 지지체로서 사용은도에 있어 변화량이 매우 커 높은 열적 구조 안전성을 요구한다. 한편, 자동차 검사 또는 정비 현장에서 삼원

촉매 담체가 요구 내구 수명을 제대로 만족시키지 못하는 파손 사고가 다수 발생된다고 보고하고 있다.[1] 따라서 국내 삼원촉매담체의 경우 배기가스 변환 효율이나 압력 강하 등은 엔진 효율 측면에서 만족되고 있지만 열적 구조 안전성은 만족 되지 못하고 있다. 본 연구에서는 2003년 현재 전체 차량 중 차지하는 비율이 70%정도인 가솔린 차량의 삼원촉매담체에 대한 구조 안전성에 대한 검토를 수행하기로 한다.

“2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음.(관리번호-220140054)”

\*Corresponding Author : Sung-Riong Lee(Kangwon National Univ.)

Tel: +82-10-5619-64144 email: sr0915@kangwon.ac.kr

Received March 30, 2015

Revised (1st April 27, 2015, 2nd May 6, 2015)

Accepted May 7, 2015

Published May 31, 2015

한국은 승용차의 배기가스를 정화하는 삼원촉매담체의 구조 안전성을 1988년도부터 5년 / 80,000km로 규정하던 것을 2002년 이후 10년 / 120,000km로 규정하고 있다. 반면 미국은 삼원촉매장치의 구조 안전성을 1994년도에 7년 / 120,000km를 2004년부터 10년 / 160,000km로 규정하고 있다.[2]

삼원촉매담체는 엔진이 가동되는 동안 내부 영역의 경우 높은 온도를 유지하고 외부 영역의 경우 낮은 온도를 유지함으로써 세라믹 모노리스 담체는 일정 크기의 인장 응력을 받고 있다.담체에서 발생하는 열응력을 평가하기 위한 방법으로는 온도측정 방법과 열 유동 방법이 있다. 전자는 담체 온도 분포를 직접 측정하여 열응력을 구한다. 후자는 온도, 대류 열전달계수, 속도, 압력 등의 파라미터를 이용하여 담체의 온도 분포를 간접적으로 구하여 열응력을 구할 수 있다. 그러나 온도측정 방법은 관련 공식을 담체 형상이 원형일 경우에는 매우 적용하기 쉬우나, 오벌형인 경우에는 적용에 어려움이 있다. 또한 열유동 해석만 이용하는 방법은 담체의 연소 반응을 정확하게 구현하는 데 어려움이 있어 온도 분포의 신뢰성에 문제가 있다. 즉, 열 유동 방법은 담체에서 발생하는 불명확한 연소 모델로 인하여 담체에서 발생하는 열량을 예측하는 데 어려움이 있어 경계조건을 정확하게 설정할 수 없다. [3,4]

Lee 등은 로커 암 축의 파손경계조건을 유한요소법과 실험계획법을 이용하여 추정함으로써 애매한 경계조건에 대한 예측 모델을 제안하였다.[5]

본 연구에서는 이러한 개념을 응용하여 열유동 해석에 사용할 각 파라미터 범위를 실차와 부품 시험을 통하여 결정된 뒤 D-optimal 실험계획법을 적용하여 반응표면을 도출하였다. 반응표면에 대하여 만족도 함수를 적용하여 실차 시험에서의 후방 촉매 중심부 온도에 대한 열유동경계조건을 예측한 뒤 이 값을 ANSYS CFX V11에 적용하여 촉매 온도 분포를 구한다. 이러한 온도 분포를 ANSYS V11로 전달한 뒤 구조적 구속조건을 부여하여 담체의 열응력을 계산하였다. 이 열응력을 이용하여 삼원촉매담체의 재료강도분포와 실동하중조건하에서의 응력분포를 이용하여 해당 부품의 안전계수를 구하여 삼원촉매담체의 구조 안전성을 평가하였다.

## 2. 열유동실험과 반응표면모델

### 2.1 열유동실험

#### 2.1.1 온도측정실험

Table 1은 본 논문에서 사용한 가솔린 엔진의 제원을 나타낸 것이다. Fig. 1은 삼원촉매변환기의 구조를 나타낸 것이다. 삼원촉매변환기는 담체와 스테인레스 캔 및 매트로 구성되어 있고 촉매 담체(셀 밀도 : 620,001 cells/m<sup>2</sup>, 셀 벽 두께 : 1.57×10<sup>-4</sup>m)는 벌집형태의 정사각형 단면으로 구성되어 있다.

Table 2와 Table 3은 실차 실내 및 주행시험조건을 나타낸 것이다.

Fig 2는 실차 실내 및 주행시험에 사용한 시험장치를 각각 나타 낸 것으로, 가솔린엔진(SOHC, 4 Cylinder 2000cc), 삼원촉매변환기(SONATA II, Part No. 28950 - 33350),

Table 1. Specification of gasoline engine

Item	Specification
Engine Type	SOHC, 4 Cylinder
Displacement Volume	1997cc
Bore × Stroke	58 × 88 mm
Compression Ratio	8.6 : 1
Max. Power	115 PS / 5,000 rpm
Max. Torque	177 Nm / 4,500 rpm
Firing Order	1 - 3 - 4 - 2
Idle Engine Speed	750 ± 100

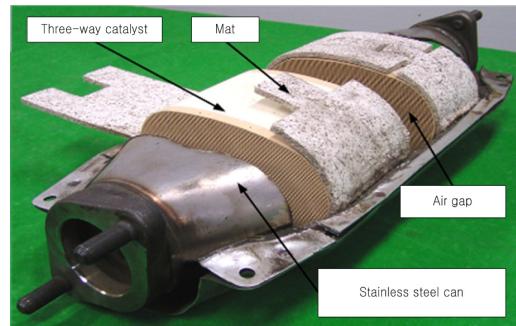


Fig. 1. Structure of three-way catalytic converter

Table 2. Indoor vehicle test conditions

Engine speed (rpm)	Wind speed (m/s)
1000, 2000, 3000 4000, 5000	0
	5
	10.3
	16.5

Table 3. Vehicle driving test conditions

Vehicle driving test	Driving section	Temp (°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

온도측정장치등으로 구성된다. 삼원촉매담체 표면의 축방향 전후 온도 차이는 열유동해석의 경계조건을 동정하는 데 사용되며 K-type의 열전대 (Kyowa, 0.32 mm)와 샘플링 속도가 1초인 온도측정장치(Graphtec, midi logger GL200)를 이용하여 그 온도를 측정하였다.

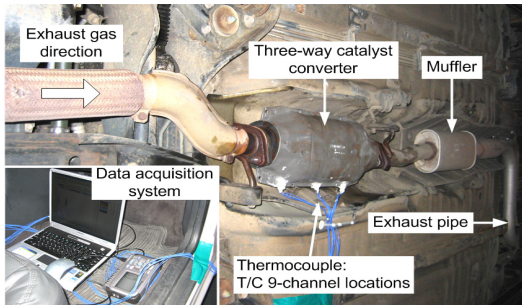
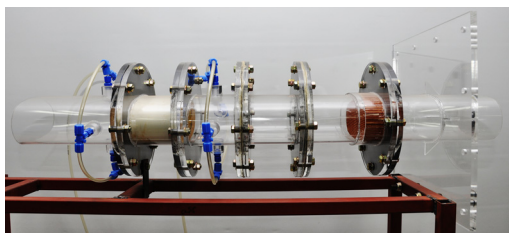


Fig. 2. Temperature measurement in TWC substrate

### 2.1.2 압력강하측정실험



(a) Main test section



(b) apparatus

Fig. 3. Pressure drop test equipment

Fig. 3은 삼원촉매의 압력강하측정장치를 나타낸 것으로 촉매 전후 100mm 떨어진 위치 중앙에 속도와 압력을 측정하기 위한 피토프라와 디지털 마이크로 마노미터 (Differential pressure transmitter Model 332)를 설치하였다. 이 위치에서 측정된 압력강하는 측정 지점에서의 정압 차이를 측정한 것으로 촉매 채널 내부유로에서의 압력 강하만 아니고 모노리스 입출구의 축소·확대부로부터 인한 압력강하도 포함된 것이다.

### 2.2 열유동 및 구조해석

Fig. 4는 삼원촉매담체의 물리적 이방성을 반영하기 위한 삼원촉매담체의 좌표계를 나타낸 것이다. 좌표계는 원통 좌표계를 적용하였으며 반경방향, 접선 방향, 축 방향으로 각각 설정하였다.

Table 4와 5는 삼원촉매변환기의 담체를 구성하는 촉매의 기계적 성질과 물리적 성질을 동시에 나타낸 것이다.[3,4,5,6]

Table 6은 열유동해석에 사용된 이상 기체의 물리적 성질을 나타낸 것으로 ANSYS CFX V11에서 제공되는 물성치를 그대로 사용하였다. 열유동해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS CFX V11을 사용하였으며 구조해석은 ANSYS V11을 사용하였다. 전체 해석 순서는 열유동해석을 ANSYS CFX V11을 이용하여 실시하여 담체 온도 분포를 획득한 뒤 이것을 ANSYS V11로 넘겨 하중조건으로 설정하였다. 담체의 대칭과 구속조건을 각각 부여한 뒤 불균일 온도분포에 따른 열응력을 구하였다.

Fig. 5 (a)은 열유동해석을 하기 위한 삼원촉매변환기의 메쉬를 나타낸 것으로 ANSYS CFX에서 제공하는 사면체 열유동해석용 메쉬를 사용하였다. 절점은 217,495개이고 요소는 784,117개이다. Fig. 5 (b)는 열유동 해석을 하기 위한 열유동 경계조건을 나타낸 것이다. Z축 방향에 대하여 대칭경계조건을 부여하였다. 삼원촉매변환기의 입구에 공기 속도와 온도를, 출구에 개방 압력 1 atm을 주었다. 열전달과 난류 유동 모델은 ANSYS CFX V11에서 제공하는 모델을 사용하였으며 전지는 아음속 조건에서 사용하는 Thermal energy 모델을, 후자는  $k-\epsilon$  난류 모델을 각각 사용하여 에너지 방정식과 연속 방정식 및 운동량 방정식을 각각 적용하였다. 해석 열유동 모델의 수렴판정조건으로 온도에 대한 계산 잔차를  $10^{-4}$ 이하로, 나머지 유동변수에 계산 잔차는  $10^{-3}$ 이하로 설정하였다.[7]

**Table 4.** Mechanical properties of TWC substrate

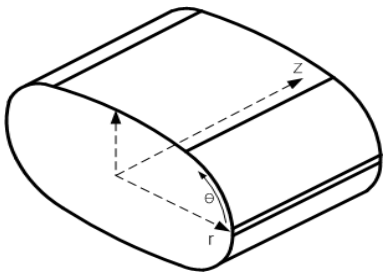
Longitudinal elastic modulus $E$ (GPa)			Shear elastic modulus $G$ (GPa)			Poisson's ratio $\nu$		
Radial $E_r$	Tangential $E_\theta$	Axial $E_z$	Radial $G_r$	Tangential $G_\theta$	Axial $G_z$	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{zx}$
2.5	2.5	4.3	0.6	0.6	1.4	0.22	0.3	0.3

**Table 5.** Physical properties of TWC substrate

Direction	Radial	Axial
Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	513	513
Coefficient of thermal expansion $\alpha$ (1/°C)	$6 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-7}$
Thermal conductivity $k$ (W/m°C)	0.3	0.5
Specific heat $C$ (J/kg°C)	1047.2	1047.2

**Table 6.** Physical properties of ideal air

Molar mass (kg/kmol)	Dynamic viscosity (kg/ms)	Specific heat (J/kgK)	Thermal conductivity (W/mK)
28.96	$1.831 \times 10^{-5}$	1004.4	0.026

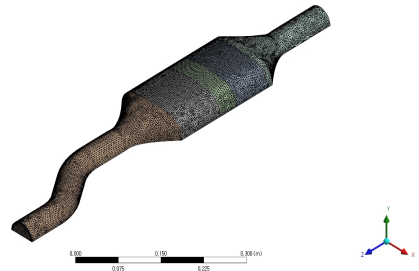


**Fig. 4.** Coordinate system of TWC substrate

**2.3 열유동 반응표면모델**

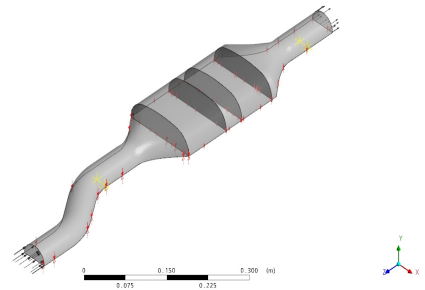
삼원촉매장치의 열유동해석을 수행하기 위해서는 엔진 속도에 따른 대류열전달계수와 촉매반응열 및 압력강하등의 열유동해석 파라미터를 알고 있어야 하나 그 값들을 실험적 또는 해석적으로 파악해야 한다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 입구온도와 유속, 전방과 후방의 촉매 반응열, 대류열전달계수를 인자로 출구온도를 반응치로 하는 열유동 반응표면모델을 D-optimal 반응표면법으로 구축하였다. 따라서 삼원촉매장치의 온도측정실험에서 측정한 출구온도를 열유동 반응표면모델에 대입하면 열유동해석 파라미터를 구할 수 있다.[8]

ANSYS



(a) Mesh

ANSYS



(b) Boundary conditions

**Fig. 5.** Thermal flow boundary conditions for three-way catalytic converter

**3. 실험결과와 열유동구조연성해석**

**3.1 온도측정시험결과**

Table 7은 Table 2와 Table 3의 조건하에서 수행한 실차시험을 기초로 측정된 삼원촉매변환기의 전방과 후방 온도를 나타낸 것이다. 삼원촉매변환기의 입구와 출구의 최대 온도 차이는 2000rpm 이상에서는 24~31°C 정도이나 1000rpm에서는 60°C 정도로 삼원촉매담체는 엔진의 저속영역에서 매우 큰 온도 기울기를 가지고 있다. 반응표면에 사용할 열유동해석 파라미터로서 삼원촉매장치의 입구 온도 범위는 Table 7의 삼원촉매변환기의 전방 최대온도와 최소 온도의 50%를 가감한 값을 취하

였다. 즉, 삼원촉매장치의 입구 온도범위는 전방 온도 최소값 200℃(473K)의 50%인 100℃(373K)에서 전방 온도 최대값 683℃(958K)의 150%인 956℃(1300K)까지로 설정하였다.

Table 7. Temperature measurement results in TWC substrate

Engine rpm	Wind speed (m/s)	Front $T_f$ (K)	Rear $T_r$ (K)	Temperature difference $\Delta T$ (K)
1000	0	539	552	13
	5	489	429	-60
	10.3	473	414	-59
	16.5	477	441	-36
2000	0	671	682	11
	5	641	610	-31
	10.3	620	633	13
	16.5	595	601	6
3000	0	757	746	-11
	5	719	694	-25
	10.3	704	696	-8
	16.5	697	686	-11
4000	0	842	837	-5
	5	812	801	-11
	10.3	795	770	-25
	16.5	796	784	-12
5000	0	958	935	-23
	5	930	909	-21
	10.3	911	887	-24
	16.5	905	882	-23

### 3.2 대류열전달계수

삼원촉매변환기의 대류열전달계수는 외부공기유속과 삼원촉매변환기의 온도의 단순 모델에 대하여 수행하였다. Table 8은 구성 요소의 물성치를 나타낸 것이다. 해석 조건은 외부 공기유동장의 입구조건은 공기 속도 (80m/s)와 온도(상온 294K)를, 출구조건은 개방압력 1 atm을 부여하였다. 또한, 삼원촉매장치의 온도는 Table 7의 실제 온도 분포의 최대값인 958K로 모델은 2.2절에서 제안한 ANSYS CFX V11 체설정하였다. 삼원촉매변환기의 열전달과 난류 공 모델을 사용하였다.

Table 8. Physical properties of each component in CFD model

Components	Air	Catalyst
	Properties	
Molar Mass (kg/Kmol)	28.96	-
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1.185	513
Specific heat Capacity (J/kgK)	1,004.4	1,047.2
Dynamic Viscosity (kg/ms)	1.831×10 <sup>-5</sup>	-
Thermal Conductivity (W/mK)	0.0261	0.4

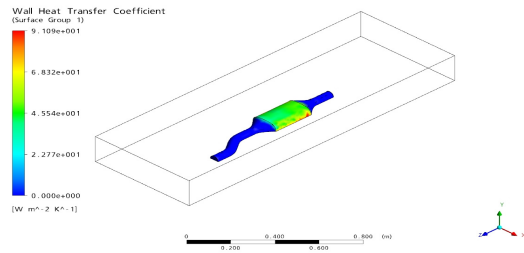


Fig. 6. Convective heat transfer coefficient on TWC converter

Fig. 6은 외부 공기 유속과 삼원촉매변환기 내부 온도에 대한 삼원촉매변환기에서의 대류열전달계수를 나타낸 것이다. 열유동해석에 사용할 최대 대류열전달계수는 Fig 6의 평균대류열전달계수의 175%로 선정하였고 최소 대류열전달계수는 평균대류열전달계수의 25%로 하였다. 따라서최소대류열전달계수는 평균 대류 열전달 계수22.2W/m<sup>2</sup>K의 25%인 5.55W/m<sup>2</sup>K로, 최대대류열전달계수는 평균대류열전달계수 22.2W/m<sup>2</sup>K의 175%인 38.85W/m<sup>2</sup>K.로 하였다.

### 3.3 촉매 반응열

Table 7에서 전체 배기가스 열량 중 촉매 반응열 비중이 가장 크다고 예상되는 실험 조건은 삼원촉매장치 전방이 후방보다 온도가 가장 높은 조건인 엔진 회전속도 2000 rpm, 주행풍 속도 10.3m/s이다. 전방과 후방 촉매 반응열 조건은 Table 9와 같으며 삼원촉매변환기에서 외부 공기로의 대류열전달계수는 Fig. 6에서 구한 평균대류열전달계수를 적용하였다. 이 조건에 대하여 ANSYS CFX V11로 예비 열유동해석을 수행하여 촉매 전방과 후방의 온도 차이에 해당하는 촉매 반응열은 400,000W/m<sup>3</sup>이다. 따라서 최대 촉매 반응열은 상기의 실험조건에 대하여 150%를 취하여 600,000W/m<sup>3</sup>으로 설정하였다. 그러나 최소 촉매 반응열은 예비 열유동해석결과에서 Table 7의 온도 차이를 고려하여 0으로 설정하였다.

Table 9. Heat generation rate for thermal flow parameter identification

Experiment number	Heat generation rate (W/m <sup>3</sup> )	
	Front	Rear
1	0	0
2	250,000	0
3	0	250,000
4	250,000	250,000

### 3.4 다공체 모델

삼원촉매장치의 열유동해석을 수행하기 위해서는 수많은 미소 채널을 모델링해야 하나 이것은 과도한 컴퓨터 계산 용량을 필요하므로 ANSYS CFX V11에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 다공체 모델을 제안하고 있다.[9]

촉매 다공도는 기하학적 다공도와 재료 기공률에 의한 다공도를 선형 합산한 값으로 계산할 수 있다. 즉, 전자는 미소채널의 단위 셀에서 전체 단면적에 대한 사각 채널 내부의 단면적 비는 0.707이다. 후자는 채널 벽면 단면적이 전체 단면적에서 차지하는 비율이 0.293이고 그 재료 기공율이 0.365인 것을 고려하면 0.107이다. 따라서 촉매 다공율은 0.814이다.

### 3.5 압력강하

다공체에 대한 연속체 모델은 다음 식의 일반적 Darcy법칙을 이용하여 다공체 내부 유동을 표현할 수 있다.[9] 본 연구에서는 일반적 Darcy법칙에서 1차저항 계수와 2차저항계수를 구하기 위하여 촉매 채널 입구에서의 압력강하(Lai)와 촉매 전후의 급확대와 급축소로 인한 압력 강하(Benedict)를 선형 합산하여 구하였다. 압력강하해석결과 1차와 2차 저항계수는 각각 687.8kg/m<sup>3</sup>s와 3.3 kg/m<sup>4</sup>이며 이 값을 열유동해석의 다공체 모델에 사용한다.

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{\gamma K_{perm}} U_i + K_{loss} \frac{\rho}{2\gamma^2} |U|U_i \quad (1)$$

$$= C_{R_1} U_i + C_{R_2} |U|U_i$$

단,  $\mu$  : 동점성계수,  $\gamma$  : 다공도,  $K_{perm}$ : 투과도,  $K_{loss}$ : 경험적 손실 계수,  $\rho$  : 밀도,  $C_{R_1} = \frac{\mu}{\gamma K_{perm}}$  (1차 저항계수),  $C_{R_2} = \frac{K_{loss}\rho}{2\gamma^2}$  (2차 저항계수)

### 3.6 열유동경계조건의 평가

Table 10은 이상의 3절의 논의를 토대로 열유동 반응 표면모델에 사용할 인자의 범위를 나타낸 것이다. 최대와 최소 유속은 각각 실내실차시험에서 나온 최대 유속의 150%와 최소 유속의 50%로 각각 설정하였다. 식 (2)는 D-optimal 실험계획에 의한 26회 전산 실험에 따라 수행한 삼원촉매변환기의 출구 온도를 나타낸 것이다.

이러한 삼원촉매변환기의 열유동해석 반응표면모델은 유의 확률 p값이 0.0001로 매우 높은 모델 적합성을 보이고 있다. 또한, 실제 후방 온도에 대한 반응표면모델에 의한 후방온도와와의 차이를 실제 후방온도로 나눈 상대 오차는 최대 0.26%정도로서 공학적 오차 범위 내에 충분히 있다. 따라서 삼원촉매변환기의 출구온도에 적합한 열유동 해석의 경계조건은 상술의 식을 기초로 Design-Expert R6에서 제공하는 반응최적화 (response optimization) 방법의 하나인 만족도 함수를 이용하여 구하였다.

Table 10. Ranges of response variables

Response variables	Low value	High value
Tf ( K )	373	1,300
Ve (m/s)	5	52.5
Qf (W/m3)	0	6×105
Qr (W/m3)	0	6×105
h (W/m2℃)	5.55	38.85

$$T_r = 48.45 + 0.95 T_f + (8.41 \times 10^{-5}) Q_f + (7.32 \times 10^{-5}) Q_r - 1.54 h - 0.77 V_e \quad (2)$$

### 3.7 구조 해석 결과 및 고찰

Table 11은 Table 2와 Table 3의 실차시험에서 측정 한 출구 온도 데이터를 기초로 만족도 함수를 이용하여 실제 출구 온도 값에 적합한 열유동해석의 경계조건을 구한 결과를 이용하여 구한 각 방향의 응력으로 나타낸 것이다.

Fig. 7은 주행시험결과에서 획득한 삼원 촉매 장치의 입구와 출구 중앙부에서의 온도를 나타낸 것이다. 지속과 평균 및 고속주행시 엔진 rpm은 각각 16.7m/s, 27.8m/s, 50m/s이고 주행속도는 각각 1400rpm, 2400rpm, 5000rpm이다. 그림에서 가장 높은 온도를 나타내는 영역(입구온도:1079K, 출구온도:1013K)은 차량 속도가 180km/hr에 있을 때이다.

다음 식 (3)은 삼원 촉매 변환기의 후방 온도에 따른 각 방향 응력을 회귀시켜 나타낸 것이다. 회귀식의 R<sup>2</sup> 결정계수가 평균 81%정도로 정밀도는 떨어지고 있으나 대부분의 회귀 오차가 저응력영역에서 나타나고 있어 실용적 측면에서는 그다지 문제가 되지 않는 것으로 생각 된다.

Fig. 8은 식 (3)과 Fig. 7의 온도분포를 기초로 시간에

따른 삼원 촉매의 열응력을 확률밀도함수  $f(s)$ 를 나타낸 것이다. 또한 삼원촉매담체 재료의 과단계수와 강도저하계수를 이용하여 구한 설계강도를 확률밀도함수  $f(\gamma)$ 도 동시에 표시하였다.[10,11] 정상주행상태에서의 최소, 평균, 최대 열응력은 각 방향에 따라 다르나 최대 열응력을 나타내는 축방향 열응력의 경우 그 값이 각각 346kPa, 720kPa, 1,245kPa이며 열응력의 표준편차는 206kPa이다.

$$\begin{aligned} \sigma_t &= -750 + 1.5 T_r \\ \sigma_r &= -393.4 + 0.8 T_r \\ \sigma_z &= -1023 + 2.1 T_r \end{aligned} \quad (3)$$

Table 11. Thermal stress at indoor vehicle test

Engine speed (rpm)	$T_r$ (K)	$\sigma_r$ (kPa)	$\sigma_t$ (kPa)	$\sigma_z$ (kPa)
1000	552	6.41	10.85	12.05
	429	3.34	8.87	11.75
	414	1.86	5.77	7.88
	441	3.04	8.21	10.23
2000	682	41.98	117.45	149.38
	610	54.36	138.21	160.22
	633	32.26	132.16	126.96
	601	11.68	30.34	18.35
3000	746	88.98	273.55	377.89
	694	128.99	343.76	467.30
	696	201.01	302.04	330.37
	686	52.76	189.10	269.92
4000	837	118.69	292.99	377.83
	801	243.01	539.08	714.31
	770	286.20	609.56	814.94
	784	329.59	593.50	761.99
5000	935	331.05	691.79	954.74
	909	456.62	805.31	1,090.00
	887	383.37	693.66	879.20
	882	259.08	578.67	790.42

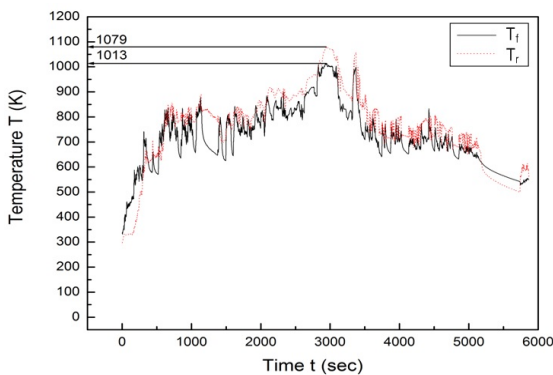
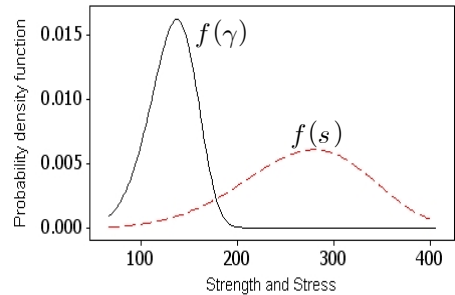


Fig. 7. Temperature-time curve on vehicle drive test

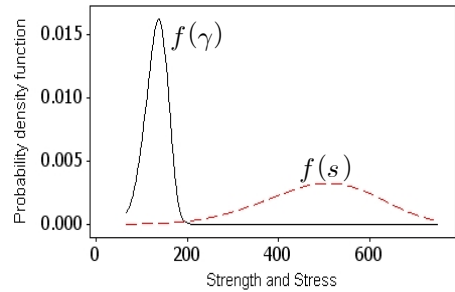
일반적으로 기계요소의 내구설계관점에서는설계강도분포와 작용응력분포가 상당한 거리를 두어야 하나 본 연구의 경우 설계강도분포와 작용응력분포는 거의 중첩되고 있다. 즉, 삼원촉매담체는 유한수명을 가지는 제품이라는 것을 알수 있다. Table 12는 설계강도분포와 작용응력분포의 평균과 분산 및 평균안전계수(Mean factor of safety,  $n_c$ )를 동시에 나타낸 것이다.[12] 평균안전계수  $n_c$ 는 다음 식 (4)로 구할 수 있다.

$$n_c = \frac{\mu_\gamma}{\mu_s} \quad (4)$$

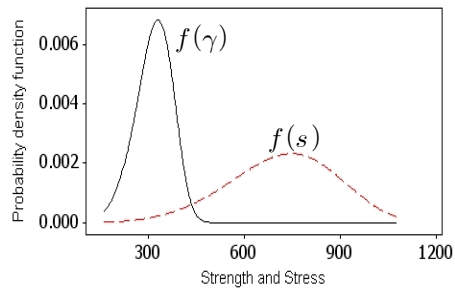
단,  $\mu_\gamma$ 는 설계 강도의 평균,  $\mu_s$ 는 작용 열응력의 평균이다.



(a) Radial



(b) Tangential



(c) Axial

Fig. 8. Strength-stress interference model in TWC substrate

접선 방향 안전율이 반경과 축방향에 비하여 현저히 떨어져 있으므로 오벌형 촉매의 설계응력으로 접선방향 열응력으로 설정하여야 한다. 즉, 접선 방향 열응력을 설계강도 아래에서 충분히 제어할 수 있으면 내구수명은 보증되나 Fig. 8에서 보는 바와 같이 일부고속영역에서와 같이 접선 방향 열응력을 설계강도 아래에서 충분히 제어되지 못하면 내구수명은 보증되지 못하고 조기 파손된다. 즉, 해당 삼원촉매담체의 안전계수는 보수적 관점에서 0.27이므로 삼원촉매담체는 조기 파손될 확률이 상당히 높은 것으로 판단 되어져 본 연구대상의 삼원촉매담체는 해당엔진의 삼원촉매변환기 부품으로는 부적합한 것으로 생각된다.

Table 12. Safety factors at stress components

Item	Strength		Stress		Safety factor $\eta_c$
	Mean $\mu_\gamma$ (kPa)	Variance $\sigma_\gamma$ (kPa) <sup>2</sup>	Mean $\mu_s$ (kPa)	Variance $\sigma_s$ (kPa) <sup>2</sup>	
Radial	132	729	271	73,441	0.5
Tangential	132	729	495	245,025	0.27
Axial	313	4,096	720	518,400	0.43

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내승용차용 삼원촉매담체의 구조 안전성을 D-optimal 실험계획법과 열유동구조연성해석을 이용하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열유동반응표면모델은 반응변수로 삼원촉매변환기의 전방온도, 배기 가스 유속, 전방과 후방 촉매 반응열, 대류열전달계수로, 반응치는 삼원촉매담체의 출구온도로 설정하여 구성한 결과 p값이 0.0001보다 적어 매우 높은 모델 적합성을 가지고 있다.
2. 삼원촉매변환기의 입구와 출구의 온도 차이는 2000rpm 이상에서는 24~31℃ 정도이나 1000rpm에서는 60℃ 정도로 삼원촉매담체는 엔진의 저속영역에서 매우 큰 온도 기울기를 가지고 있다.
3. 오벌형 삼원촉매담체의 경우 접선 방향 안전계수가 반경과 축방향에 비하여 현저히 떨어지므로 오벌형 삼원촉매담체의 설계응력으로 접선방향 열응력으로 설정하여야 한다.

4. 실차주행시험에서 발생하는 삼원촉매의 안전율은 0.27이므로 삼원촉매담체는 조기파손을 충분히 발생시킬 수 있다.

#### References

- [1] S. Y. Kim, *Thermal Analysis of Three-Way Catalyst Ceramic Substrate for Passenger Car*, pp.1-2, Master Dissertation, Kangwon National University, Kangwon province, 2006.
- [2] S. S. Cho, "Probabilistic Estimation of Thermal Fatigue Performance of Three-Way Catalyst Substrate", *Transactions of KSME(A)*, Vol. 38, No. 6, pp. 669~676, 2014.
- [3] S. J. Jeong, S. J. Lee, W. S. Kim, and C. B. Lee, "Numerical Study on the Effect of Changes of Geometric Shape of Diesel Particulate Filter on Light-Off Characteristics and Transient Thermal Behavior during Regeneration", *Transactions of KSAE*, Vol. 14, No. 4, pp.68-76, 2006.
- [4] J. K. Park, and S. H. Chung, "Numerical Simulation of Self-Supporting Regeneration using heating wire ignition of Diesel Particulate Trap", *Transactions of KSAE*, Vol. 7, No. 3, pp. 1-11. 1999.
- [5] D. W. Lee, S. J. Lee, S. S. Cho, and W. S. Joo, "Failure of rocker arm shaft for 4-cylinder SOHC engine", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 12, No.3, pp.405-412. 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.03.014>
- [6] S. H. Baek, S. Y. Kim, S. S. Seung, H. Yang, W. S. Joo, and S. S. Cho, "Experimental Estimation of Thermal Durability in Ceramic Catalyst Supports for Passenger Car", *Transactions of KSME(A)*, Vol. 31, No. 12, pp. 1157-1164, 2007.
- [7] ANSYS, *ANSYS CFX, Release 11.0, CFX-Solver Theory Guide, the K-epsilon model*, Canonsburg, USA, 2009.
- [8] S .H. Baek, S. S. Cho, H. S. Kim, "Optimization Techniques for the Inverse Analysis of Service Boundary Conditions in a Porous Catalyst Substrate with Fluid-Structure Interaction Problems", *Transactions of KSME(A)*, Vol. 35, No. 10, pp. 1161-1170, 2011.
- [9] ANSYS, *ANSYS CFX, Release 11.0, CFX-Solver Theory Guide, the Directional Loss Model*. Canonsburg, USA, 2009.
- [10] J. H. Hwang, H. Y. Jung, C. S. Kim, and J. K. Kim, "Reliability Assessment of Steam Turbine Blade Steel



used by Stochastic Analysis Model", *KSME Spring Annual Meeting*. pp.611-616, March, 2005.

- [11] B. N. Park, K. H. Kim, and H. K. Kim, "An Evaluation Method of Fatigue Strength and Reliability in a Railway Wheel with an Application of Strength-Stress Interference model", *Korean Society For Railway*, Vol. 5, No.2. pp.131-137, 2002.
- [12] C.S. Kim, J.H. Lee, and J.K. Kim, "Reliability Analysis in Fatigue Strength of Connecting Rod", *Transactions of KSME(A)*, Vol. 25, No. 10, pp. 1651-1658, 2001.

**이 성 룡(Sung-Riong Lee)**

[정회원]



- 1983년 2월 : 동아대학교 대학원 금속공학과 (공학석사)
- 1990년 8월 : 동아대학교 대학원 금속공학과 (공학박사)
- 1994년 11월 ~ 1996년 9월 : (주)세강열처리, 대표이사
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대 재료 금속공학과 교수

<관심분야>

화학금속학, 철강공학, 금속열역학

**조 석 수(Seok-Swoo Cho)**

[정회원]



- 1993년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 1997년 8월 : 창원 문성대학교 기계과 전임강사
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대 기계 설계공학과 교수

<관심분야>

재료강도학, 구조최적설계