

실험계획법을 이용한 삼원촉매담체의 조기 파손 예방 설계

Premature Failure Prevention design of Three-way Catalyst Substrate using DOE

이동우¹, 조석수^{2,✉}Dong Woo Lee¹ and Seok Swoo Cho^{2,✉}¹ 동아대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.)² 강원대학교 자동차공학과 (Department of Vehicle Engineering, Kangwon National Univ.)

✉ Corresponding author: sscho394@kangwon.ac.kr, Tel: 033-570-6394

Manuscript received: 2010.2.8 / Revised: 2010.4.25 / Accepted: 2010.5.11

Domestic three-way catalyst satisfies exhaust gas conversion efficiency or pressure drop etc. but doesn't satisfy thermal durability. Thermal stress analysis for three-way catalyst was performed based on experimental temperature distribution. Thermal safety of three-way catalyst was estimated by safety factor. Aspect ratio variable had the most significant effect on thermal stress. Thickness variable had the least significant effect on thermal stress. Optimal conditions for premature failure prevention of three-way catalyst were as follows : (1) aspect ratio of three-way catalyst : 0.6:1 (2) 2.84mm thick (3) silicon nitride. The safety of Taguchi-optimized three-way catalyst were 4.7 times higher than that of existent three-way catalyst.

Key Words: Three-way Catalyst (삼원촉매), Orthogonal Array (직교 배열표), MOR (Modulus of rupture: 파단계수), Safety Factor (안전율)

1. 서론

대기오염을 유발하는 원인 물질은 다양하지만 그 중 탄소산화물(CO_x), 유황산화물(SO_x), 질소 산화물(NO_x), 휘발성 유기 화합물(VOC) 및 입자상 물질(PM) 등은 5 대 오염 물질로 분류되어 각종 환경법에 의해 배출량이 규제되고 있다. 이들 대부분은 자동차 엔진에서 발생하는 것으로 국내뿐만 아니라 EU, 미국, 일본 등 주요 선진국을 중심으로 자동차 배기가스에 대한 규제가 강화 되는 추세이다. 특히, 선진국의 경우 궁극적 자동차 배기가스의 기준이 거의 무공해를 추구하고 있어 배기정화기구의 관점에서 보면 촉매에 대한 높은 사용 온도를 요구한다.¹

배기가스정화장치에 대한 기존 연구는 형상 파라미터와 입출구각 및 촉매 성분에 따른 배기가스

유동이 배기가스정화효율에 미치는 효율에 대한 것이 대부분이다. 따라서 배기가스에 대한 열유동 특성을 균일도 관점에서 평가되었다.² 특히, 최³ 등은 미시적 관점과 거시적 관점에서 채널 직경에 따른 압력강하를 제안하여 엔진 성능에 미치는 배압의 영향을 검토하였다. 또한, Clarkson⁴ 등은 촉매의 활성화 성능에 미치는 연소반응의 영향을 검토하여 일부 온도영역에서의 발열 현상이 전체 열전달에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 한편, Gluati⁵ 등은 DPF 나 삼원 촉매 담체의 기계적 강도에 미치는 재료 탄성 계수와 셀 크기 및 셀 모양 등의 영향을 검토하였다. 따라서 각종 재료에 대한 삼원촉매담체의 상대적 성능을 평가하는 데 유용한 자료를 제공 하고 있다. 그러나 삼원촉매담체의 열적 내구성과 같이 실제 제품의 구조적 성능을 평가할 수 없다.

한국은 승용차의 배기가스를 정화하는 삼원촉매 장치(Three-way Catalyst converter: TCC)의 내구성을 1988 년도부터 5 년 / 80,000Km 로 규정하던 것을 2002 년 이후 10 년 / 120,000Km 로 규정하고 있다. 반면 미국은 삼원촉매장치의 내구성을 1994 년도에 7 년 / 120,000Km 를 2004 년부터 10 년 / 160,000Km 로 규정하고 있다.⁶ 삼원촉매장치는 이러한 요구를 수용하기 위하여 엄격한 구조적 안전성을 필요로 하나 최근 국내 일부 차종의 경우 상기의 배기가스 규제를 만족시키기 위하여 삼원촉매장치에 과도한 열피로를 가하여 요구 내구성을 만족시키지 못하는 사례가 발생하고 있어,⁷ 배기가스 변환 효율이나 압력 강하 등은 엔진 효율 측면에서 만족되고 있지만 열적 내구성은 만족되지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 열적 내구성을 만족하는 삼원촉매변환기 설계를 위하여, 열적 내구성에 큰 영향을 미치는 삼원촉매담체 단면의 장단축비, 외피 두께 및 재료를 설계변수로 안전율을 목적 함수로 하는 최적설계를 실험계획법을 이용하여 수행하였다.

2. 실험장치

2.1 삼원촉매장치의 구조

Fig. 1 은 삼원촉매변환기의 구조와 촉매의 셀 구조를 나타낸 것이다. 세라믹 촉매변환기는 담체와 스테인레스 캔 및 매트로 구성되어 있고 담체는 사각셀 구조로 되어져 있다. 실제 현장에서 사용되는 삼원촉매변환기의 담체는 과도한 촉방향 온도 기울기를 억제하기 위하여 두 개의 담체로 분리되어 설치되어져 있다.

2.2 실차주행시험

Table 1 은 본 연구에서 사용한 엔진 재원을 나타낸 것이다.

Fig. 2 는 실차시험에서 삼원촉매장치 내부에 캐닝된 담체의 온도분포를 반경방향과 축방향으로 측정하기 위한 열전대 장착 위치를 나타낸 것이다. 사용한 열전대는 K-type (Kyowa, 0.32 mm)이고 데이터 샘플링 속도가 1 초인 온도측정장치 (Graphtec, midi logger GL200)를 사용하였다. 고온과 엔진 가동 및 주행 중에 열전대가 탈락되지 않도록 고온용 시멘트(Cotronics, resbond 919)를 파우더 100 그램에 물 14 그램의 비율의 젤 형태가 되도록 잘 섞

어서 상온에서 24 시간 경화시킨 후 실험하였다.

Table 2 는 실차주행시험조건을 나타낸 것으로 삼척-강릉 구간의 7 번 국도와 동해고속도로에서 실차주행시험을 수행하였다.

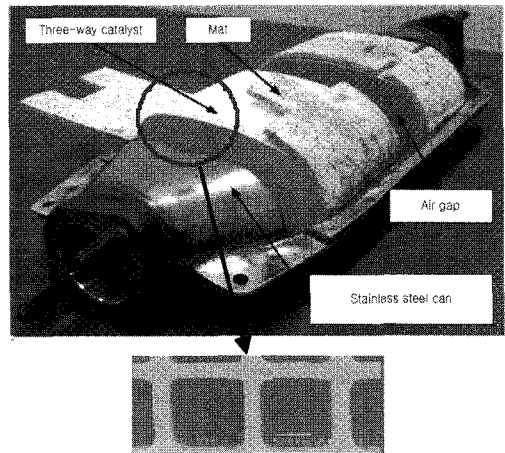


Fig. 1 Structure of three-way catalytic converter

Table 1 Specification of Gasoline Engine

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

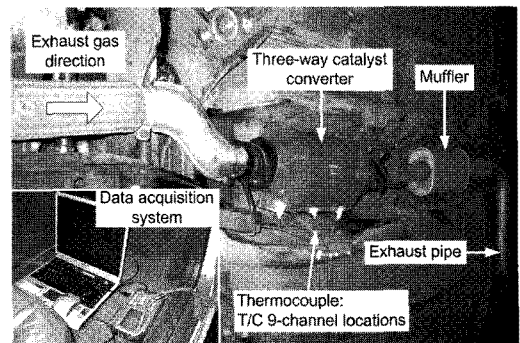


Fig. 2 Temperature measurement locations in engine exhaust system

Table 2 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

3. 실험계획법을 이용한 삼원촉매담체의 조기 파손 경감을 위한 최적설계

Fig. 3 은 실험계획법을 이용한 삼원촉매담체의 조기파손 경감을 위한 최적설계의 흐름도를 나타낸 것이다. 먼저 삼원촉매담체의 조기파손에 영향을 주는 설계변수와 수준을 결정한다. 두 번째로 직교배열표를 생성하고 세 번째로 정확한 유한요소해석을 위하여 실차시험을 통한 삼원촉매담체의 온도분포측정한 후 유한요소모델을 구성한다. 네 번째로 유한요소해석을 실행한 후, 마지막으로 실험계획법의 평균분석을 수행하여 최적해를 결정한다.

3.1 인자 및 특성치의 정의

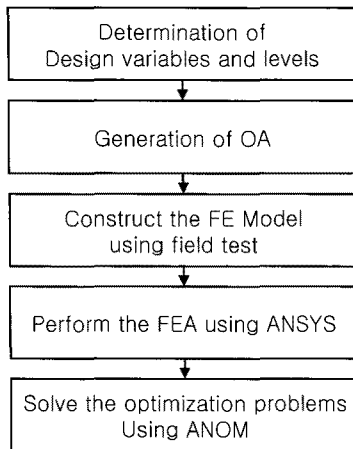


Fig. 3 Design procedures

삼원촉매장치는 높은 구조적 내구성과 엔진 효율을 필요로 한다. 따라서 낮은 열응력과 압력장

하를 필요로 한다. 이러한 조건을 삼원촉매 담체에서 구현하기 위하여 낮은 열응력 분포를 유도할 수 있는 기하학적 조건과 재료적 조건 및 얇은 담체 셀 두께를 필요로 한다. 그러나 후자의 셀 두께는 엔진과의 연관성 때문에 엔진 배기량에 따라 최적 조건을 가지고 있다. 따라서 기존 엔진에서 사용되는 삼원촉매장치의 조기파손예방 설계를 수행하기 위하여 설계변수로 결정할 수 있는 것은 구조적 내구성에 영향을 미치는 변수 밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 이러한 관점에서 설계변수를 선정하였다.

Fig. 4 는 삼원촉매담체의 단위 셀의 형상과 치수를 나타낸 것이다. 해석 셀 두께는 원래 셀 두께의 4 배로 설정하고 셀 피치도 4 배로 설정 하여 열전도해석에 따른 온도 분포를 유사하게 만들었다.

Fig. 5 는 삼원촉매담체의 장단축 설계변수를 정의하기 위하여 단면상에서 단축과 장축을 각각 나타내었다. Fig. 6 은 삼원촉매담체의 장단축비 설계변수로 장축길이에 대한 단축길이의 비인 장단축비 b/a 를 각각 나타내었다. 기존의 삼원 촉매담체의 장단축비는 0.6 이고 원형단면 삼원 촉매담체의 장단축비는 1 이다. 또한, 자체 제안 한 타원 단면 삼원촉매담체의 장단축비는 0.8 이다.

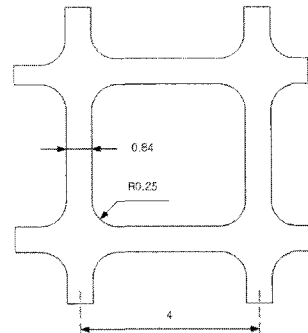


Fig. 4 Dimension of unit cell

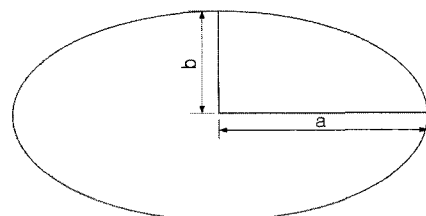


Fig. 5 Axis definition in TWC

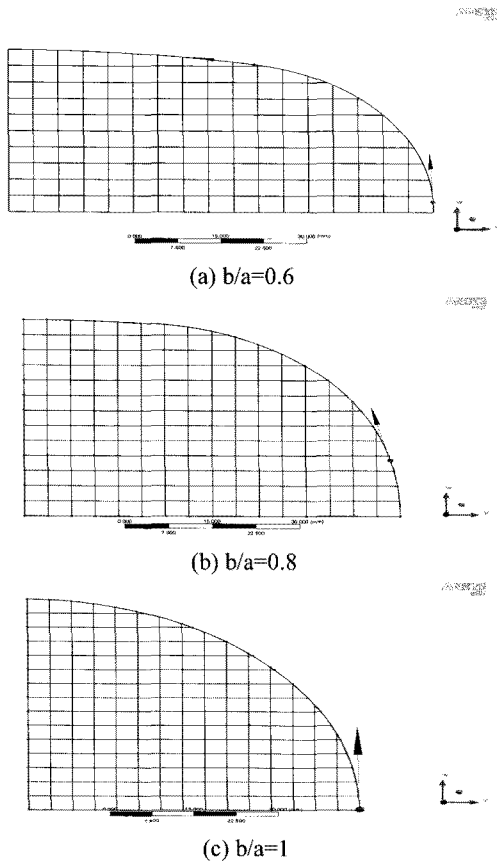


Fig. 6 Definition of shape design variable

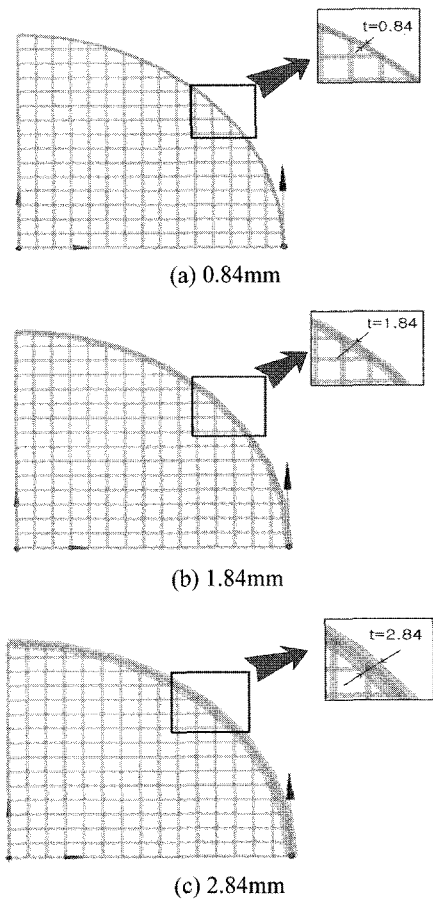


Fig. 7 Definition of thickness design variable

삼원축매담체의 열피로 균열은 외부층 표면에서 시작되어 성장된다. 따라서 외부층 표면의 강도를 증가시키기 위해서는 이러한 외부층을 다공성 물질로 구성하기 보다는 충실 물질로 구성하는 것이 바람직하다. 따라서 Fig. 7 은 삼원축매담체에서의 외부층을 두께 설계변수로 설정하여 나타낸 것이다.

Table 3 은 5 가지 대표적 구조용 세라믹을 나타낸 것이다. 5 가지 모두를 재료 설계변수로 고려하지 않았으며 이중 최저, 중간, 최고 파단 계수에 해당하는 재료만 선정하여 각각 3 수준에 해당되게 배치하였다.

Table 4 는 삼원축매담체의 구조최적설계를 위한 설계변수와 그 범위를 각각 나타낸 것이다. 기존 삼원축매담체는 x_1 과 x_2 및 x_3 가 각각 0.6, 0.84mm, Cordierite 세라믹이다. 여기서, x_1 은 담체의 장단축비를, x_2 는 외부층의 두께를, x_3 는 삼원축매담체 재료를 나타낸다.

Table 3 Physical properties of Structure ceramic

Properties \ Material	Cordierite	Silicon Nitride	Alumina	Silicon Carbide	Zirconia
Density ρ (kg/m ³)	2214	3047	3770	2721	5887
Elastic modulus E (GPa)	121	283	321	377	184
Poisson's ratio ν	0.26	0.25	0.23	0.18	0.293
Tensile strength σ (MPa)	29.6	383	209	390	584
MOR (MPa)	76.6	652	336	418	645
Coefficient of thermal expansion α (1/°C)	2.9×10^{-6}	3.3×10^{-6}	8×10^{-6}	4.6×10^{-6}	9.8×10^{-6}
Thermal conductivity k (W/m°C)	2.2	26	27.1	114	2.286
Specific heat C (J/Kg°C)	816	1000	900	900	400

Table 4 levels of design variables

Design variables		x ₁	x ₂ (mm)	x ₃
Level	1	0.6	0.84	Cordierite
	2	0.8	1.84	Silicon Carbide
	3	1	2.84	Silicon Nitride

Table 5 Analysis layout of OA table of L₉(3³)

No.	x ₁	x ₂	x ₃
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Table 5 는 설계공간을 구성하기 위한 샘플링 점을 나타낸 것으로 L₉(3³) 직교배열표이다. 이 직교배열표에서 설계변수는 3 가지이고 설계변수 수준이 3 가지이며 총 실험횟수는 9 번이다.

Fig. 8 은 기존 삼원촉매담체의 온도 분포를 구하기 위한 온도 측정 위치를 나타낸 것이다. 3 차원 열유동 및 구조 해석에서 나온 결과를 토대로 전방과 후방의 열응력 분포를 보면 최대 열응력이 후방 삼원촉매담체의 전면부에서 발생되고 있다.⁸ 이러한 결과를 토대로 후방 삼원촉매 담체의 전면부에서의 중앙과 최외각에서의 온도를 측정하여 두 지점에서의 온도 차이가 최대가 되는 시점을 선정하여 그 때의 온도 분포를 열전달 해석의 경계조건으로 부여하였다. Fig. 9 는 후방 삼원촉매담체의 전면부에서의 중앙과 최외각에서의 온도 분포를 각각 나타낸 것으로 각각 1072K 와 996.5K 이다.

3.2 삼원촉매장치의 열응력 해석

본 연구는 실험계획법을 이용하여 2 차원 삼원 촉매의 열응력을 최소화시켜 조기 파손을 경감 시키는 데 있다. 삼원 촉매를 3D 모델로 표현하여 해석하는 것은 상당한 컴퓨터 계산 용량을 필요로 하므로 실제 모델과 유사한 2 차원 모델로 구성하

였다. 2 차원 모델은 ANSYS Workbench R11 에서 제공하는 Line body 로 구성하였으며 각 Line 은 보 요소로 구성하여 축력에 의한 직접 응력과 굽힘하중에 의한 굽힘응력을 동시에 고려한 복합최대응력을 구하였다.

Fig. 10 은 2 차원 삼원촉매담체에 대한 1/4 유한 요소모델의 경계조건을 나타낸 것으로 전자는 열 전달경계조건을 후자는 구조구속조건을 동시에 나타내었다. X 와 Y 축 방향에 대한 대칭경계 조건을 부여하였으며 중앙 지점에서 완전구속 조건을 부여하였다.

3.3 설계문제의 정식화

삼원촉매담체의 조기 파손을 방지하기 위하여, 담체의 안전율을 목적함수로 설정하였다. 따라서, 삼원촉매담체의 최적설계를 위한 정식화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{find} && x_1, x_2, x_3 && (1) \\ &\text{to minimize} && -n \end{aligned}$$

여기서 n 은 안전율을 나타내는 것으로써 삼원 촉매 담체의 굽힘과단강도(MOR)와 삼원촉매담체에 발생하는 최대열응력의 비를 의미한다.

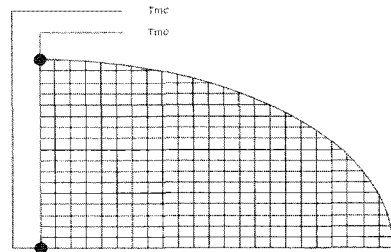


Fig. 8 Measurement locations of temperature variables

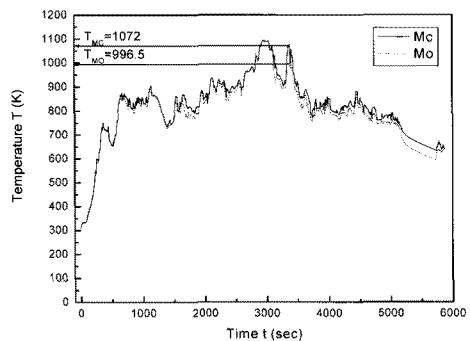


Fig. 9 Vehicle driving test results

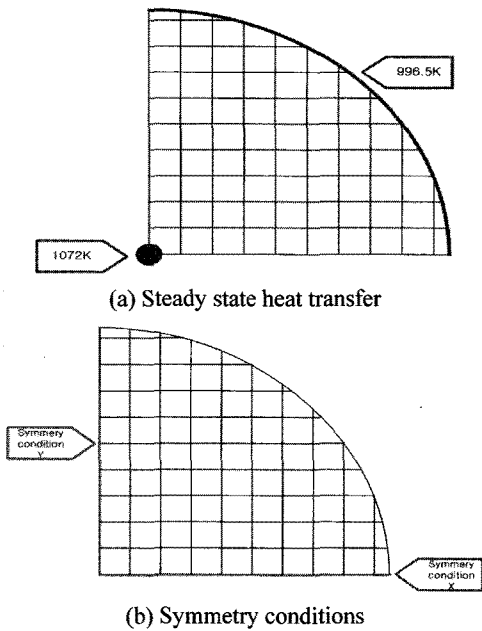


Fig. 10 Boundary conditions of thermal stress analysis

4. 실험계획법을 이용한 최적 설계⁹

Table 6 은 직교배열표에 따라 9 가지 경우에 대한 해석을 수행하여 계산된 열응력과 파단계수에 대한 열응력 비인 안전율을 나타낸 것이다.

Fig. 11 은 설계변수의 안전율에 대한 수준별 평균값을 나타낸 주요인 효과선도로서 기울기가 급할수록 기여도가 큰 인자이며 현재 수준과 비교하여 그 차이로 개선 효과를 평가할 수 있다. Fig. 11 에서 기여도가 가장 큰 것이 장단축비 설계 변수이고 그 다음으로 재료 설계변수이며 기여도가 가장 작은 설계변수는 두께 설계변수이다. 재료와 두께 설계변수는 굽힘강도와 두께가 증가함에 따라 안전율은 증가된다. 한편, 장단축비 설계변수에서 2 수준에서 큰 변곡점이 나타나는 이유는 1 수준은 기존 모델로서 모델링 과정에서 2 개의 원형 곡선을 기반으로 하는 복합원형곡선이고 3 수준은 원형 모델로서 단일 원형곡선이다. 그러나 2 수준은 타원 곡선으로서 급격한 곡률 변화를 유발하여 전자에 비하여 급격한 곡률 변화를 발생시키고 이에 따라 응력집중도 크게 된다. 따라서 장단축비 설계변수의 2 수준은 다른 수준에 비하여 안전율을 급격히 저하시킬 수 있어 1 수준에 비하여 안전율을 증가시키지 못하고 정체시키고 있다. 그러나 장단축비 3 수준은 응력집중에서 전자의 2 수

준에 비하여 약간 자유로운 상태이므로 2 수준 장단축비 설계변수에 비하여 안전율이 높게 나타나고 있다. 따라서 두께와 재료 설계변수는 인자 수준이 증가됨에 따라 안전율이 증가되고 있으므로 각 설계변수에 대한 안전율의 설계 민감도는 양의 값을 가지고 있고, 장단축비 설계변수는 인자 수준이 증가함에 따라 안전율이 감소되고 있으므로 각 설계변수에 대한 안전율의 설계 민감도는 음의 값을 가지고 있음을 알 수 있다.

목적함수를 최대화시킬 수 있는 최적조건은 Fig. 11 의 각 설계변수에서 평균값이 가장 큰 설계변수에 해당하는 조건을 조합하는 것이다. 따라서 x_1 설계변수는 1 수준에서, x_2 설계변수는 3 수준에서, x_3 설계변수는 3 수준이 인자의 최적수준이 된다. Table 7 은 이상의 결과를 토대로 인자의 최적수준 즉, 설계변수의 최적조건을 나타낸 것이고 Table 8 은 최적조건을 나타낸 것이다. 최적 모델은 기존 모델에 비하여 안전율이 대략 4.7 배 정도 향상되었다.

Table 6 Results of FEA by orthogonal array

No.	x_1	x_2	x_3	Maximum stress σ_{max} (MPa)	MOR (MPa)	Safety factor n
1	1	1	1	10	76.6	7.6
2	1	2	2	44.7	418	9.4
3	1	3	3	18.3	652	35.6
4	2	1	2	1331.4	418	0.3
5	2	2	3	487	652	1.3
6	2	3	1	246.9	76.6	0.3
7	3	1	3	105.8	652	6.2
8	3	2	1	79.3	76.6	1.0
9	3	3	2	641.6	418	0.7

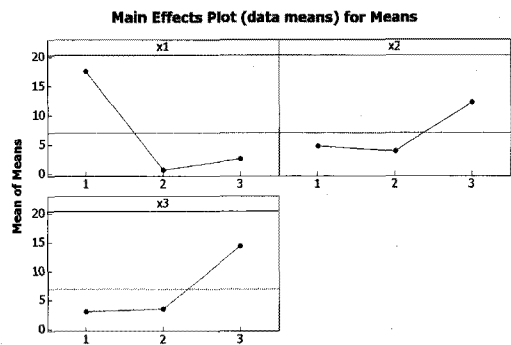


Fig. 11 Main effects for means

Table 7 Optimum level of design variables

Design	Current	Optimum
x1	1(0.6)	1(0.6)
x2(mm)	1(0.84)	3(2.84)
x3	1(Cordierite)	3(Silicon Nitride)

Table 8 Result of optimization

	Before	After
Safety factor	7.6	35.6

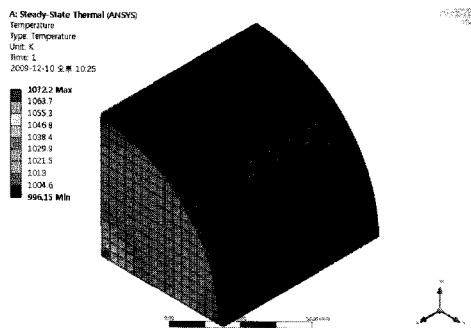


Fig. 12 Temperature distribution in optimized TWC

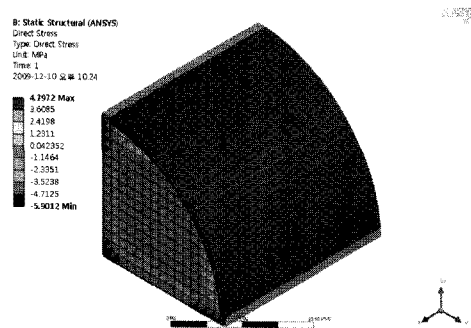


Fig. 13 stress distribution in optimized TWC

Fig. 12 와 Fig. 13 은 최적화된 삼원촉매담체의 온도와 응력 분포를 나타낸 것이다. 중앙부의 높은 온도가 외부층 낮은 온도로 전도되고 있으며 열응력은 삼원촉매담체 표면에서 최대가 됨을 알 수 있다.

5. 결론

1) 삼원촉매담체의 열응력에 미치는 기여도가 가장 큰 설계변수는 장단축비이고 그 다음이 재료

이며 가장 작은 설계변수는 두께이다.

2) 안전율에 미치는 두께와 재료 설계변수의 민감도는 양의 값을 가지고 있고, 장단축비의 민감도는 설계변수의 민감도는 음의 값을 가진다.

3) 삼원촉매담체의 조기 파손 현상을 경감시키는 최적조건은 장단축비 0.6, 외부층의 두께 2.84mm, 재료는 Silicon Nitride 세라믹이다.

4) 실험계획법으로 최적화된 실리콘 니트라이드 세라믹 삼원촉매담체의 안전율은 코제라이트 세라믹 삼원촉매담체의 안전율의 4.7 배 정도로서 삼원촉매담체의 조기 파손을 억제할 수 있다.

참고문헌

1. Park, Y. J., Yun, H. S., Lee, Y. J., Song, I. H. and Kim, H. D., "Porous Ceramic for Purification Filter," Machine and Materials, Vol. 21, No. 2, pp. 98-109, 2009.
2. Jeong, S. J. and Kim, W. S., "A Study of light-off Performance of Catalytic Converter with the Effect of Flow Characteristics," Trans. of KSAE, Vol. 7, No. 5, pp. 107-120, 1999.
3. Choi, H. T., Mok, J. K., Lee, E. H., Yoo, J. S. and Lee, J. W., "An Experimental Study on the Fluid Flow in Monolithic Catalyst Supports," Energy Eng. J., Vol. 4, No. 2, pp. 288-296, 1995.
4. Clarkson, R. J., Benjamin, S. F., Jasper, T. S. and Girls, N. S., "An Integrated Computational Model for the Optimisation of Monolith Catalytic Converters," SAE, Paper No. 931071, pp. 11-24, 1993.
5. Gulati, S. T., "Design Considerations for Advanced Ceramic Catalyst Supports," SAE, Paper No. 2000-01-0493, 2000.
6. Kim, S. Y., "Thermal Analysis of Three-Way Catalyst Ceramic Substrate for Passenger Car," Master Thesis, Dept. of Vehicle Eng., Kangwon National University, 2006.
7. Baek, S. H., Kim, S. Y., Seung, S. S., Yang, H., Joo, W. S. and Cho, S. S., "Experimental Estimation of Thermal Durability in Ceramic Catalyst Supports for Passenger Car," Trans. of KSME(A), Vol. 31, No. 12, pp. 1157-1164, 2007.
8. Choi, H. J., "An Estimation of Thermal Fatigue in Three-way Catalyst using Thermal Flow and Structure Analysis," Master Thesis, Dept. of Vehicle

- Eng., Kangwon National University, pp. 29-30, 2010.
9. Hong, D. K., Choi, S. C. and Ahn, C. W., "Optimal Design for Weight Reduction of Magnet Over Head Crane by using Taguchi method," J. of KSPE, Vol. 20, No. 3, pp. 50-57, 2003.