

삼원 촉매의 열적 내구 성능 평가

이성룡¹, 조석수^{2*}

¹강원대학교 재료금속공학과, ²강원대학교 자동차공학과

A Estimation of Thermal Fatigue Performance in Three-way Catalyst

Sung Riong Lee¹ and Seok-Swoo Cho^{2*}

¹Department of Materials and Metallurgical Engineering,
Kangwon National University, Kangwon, Korea

²Department of Vehicle Engineering, Kangwon National University, Kangwon, Korea

요 약 국내 승용차용 삼원촉매의 경우 열적 내구성을 만족시키지 못하고 조기 파손되는 사례가 증가하고 있다. 이것은 차량의 배기가스 정화장치의 신뢰성에 치명적 손상을 유발시키므로 삼원촉매의 내구성 평가 모델을 파악할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 세라믹 모노리스 담체에서 발생하는 열응력을 구한 뒤 강도저하계수모델과 파손확률을 기초로 삼원촉매의 열적 내구성을 평가하였다.

Abstract This study examines thermal safety on three-way catalyst that dominates 70% among whole exhaust gas purification device in 2003. Three-way catalyst maintains high temperature in interior domain but maintains low temperature on outside surface. Therefore this device shows tensile stress on outside surface. Temperature distribution of three-way catalyst was acquired by thermal flow analysis for predicted thermal flow parameter. Thermal stress analysis for three-way catalysis was performed based on this temperature distribution. Thermal safety of three-way catalyst was estimated by strength reduction factor and failure probability.

Key Words : Three-way Catalyst, MOR(Modulus of Rupture), Probability Factor, Size Factor, Fatigue Factor, Strength Reduction Factor, Failure Probability

1. 서론

배기가스를 정화하기 위한 촉매를 함유하는 구조체인 삼원촉매는 엔진이 가동되는 동안 내부 영역의 경우 높은 온도를 유지하고 외부 영역의 경우 낮은 온도를 유지함으로써 세라믹 모노리스 담체는 일정 크기의 인장 응력을 받고 있다. 따라서 자동차 검사 또는 정비 현장에서는 삼원촉매가 요구 내구 수명을 제대로 만족시키지 못하여 상당한 파손 사고가 발생된다고 보고하고 있다.

따라서 국내 삼원촉매의 경우 배기가스 변환 효율이나 압력 강하 등은 엔진 효율 측면에서 만족되고 있지만 열적 내구성은 만족 되지 못하고 있다. 본 연구에서는

2003년 현재 전체 차량 중 차지하는 비율이 70%정도인 승용차의 배기가스 정화장치에 대한 열적 안전성에 대한 검토를 수행하기로 한다.[1]

담체에서 발생하는 열응력을 평가하기 위한 방법으로는 열전달 방법과 열유동 방법이 있다.[2-3] 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 열전달 방법은 담체 형상이 원형일 경우에는 매우 효과적이거나 오벌형(Oval type)인 경우 매우 비효율적이다. 또한 열유동 해석만 이용하는 방법은 담체의 연소 반응을 정확하게 구현하는 데 어려움이 있

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

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

Received July 9, 2012

Revised (1st December 7, 2012, 2nd December 20, 2012)

Accepted January 10, 2013

어 온도 분포의 신뢰성에 문제가 있다. 즉, 열유동 방법은 담체에서 발생하는 불명확한 연소 모델로 인하여 담체에서 발생하는 열량을 예측하는 데 어려움이 있어 경계조건을 정확하게 설정할 수 없다. 조등[4]은 삼원촉매변환기용 세라믹 촉매 담체의 고온 열피로의 고정도화를 위하여 열유동 해석에 필요한 실동경계조건 D-optimal 실험계획법을 이용하여 구하였다.

따라서 본 연구에서는 ANSYS CFX V11와 ANSYS Mechanical V11 및 조등[5,6]이 제안한 D-optimal 실험계획법에 의한 실동경계조건을 이용하여 세라믹 모노리스 담체에서 발생하는 열응력을 구한 뒤 강도저하계수모델과 파손확률을 기초로 삼원촉매의 열적 내구성을 평가하여 한국 승용차용 삼원촉매의 파손모델을 제안하였다.

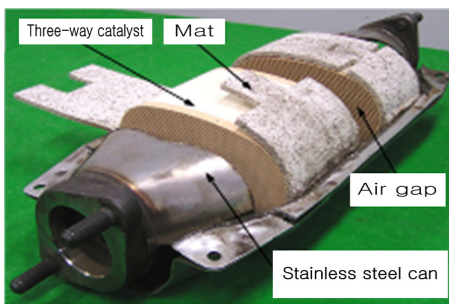
2. 실험장치 및 방법

2.1 삼원촉매의 구조

Table 1은 본 연구에서 사용한 엔진 제원을 나타낸 것이다. 실험 장치는 가솔린엔진 (SOHC, 4 Cylinder 2000cc), 삼원촉매변환기 (SONATA II, Part No.28950 - 33350), 온도측정장치등으로 구성되며 온도는 삼원촉매의 전방과 후방 부분에서 측정된다.[7]

[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	0
	5
	10.3
	16.5
2000	0
	5
	10.3
	16.5
3000	0
	5
	10.3
	16.5
4000	0
	5
	10.3
	16.5
5000	0
	5
	10.3
	16.5

[Table 3] 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. 1은 삼원촉매변환기의 구조를 나타낸 것이다. 삼원촉매변환기는 담체와 스테인레스 캔 및 매트로 구성되어 있고 담체는 사각 셀 구조로 되어져 있다.

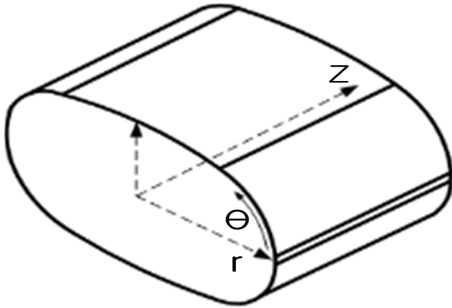
Table 2와 Table 3은 실차시험 조건을 나타낸 것으로 전자는 실내정차시험을, 후자는 삼척-강릉구간의 7번 국도와 동해고속도로에서 실차주행시험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열유동 및 구조해석

Fig. 2는 삼원촉매의 이방성을 반영하기 위한 촉매좌표계를 나타낸 것이다. 좌표계는 원통 좌표계를 적용하였

으며 반경방향, 접선 방향, 축 방향으로 각각 설정하였다. 또한, 삼원촉매의 기계적 성질과 물리적 성질 및 열유동 경계조건은 조동[7]이 수행한 열유동 해석결과를 이용하였다.



[Fig. 2] Coordinate system of ceramic three-way catalyst

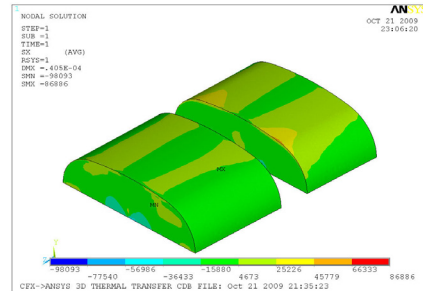
[Table 4] Thermal stress of three-way catalyst in indoor and road tests

Test condition	Engine speed (rpm)	Wind speed V_w (m/s)	σ_r (kPa)	σ_t (kPa)	σ_z (kPa)
Indoor	1000	0	6.41	10.85	12.05
		5	3.34	8.87	11.75
		10.3	1.86	5.77	7.88
		16.5	3.04	8.21	10.23
	2000	0	41.98	117.45	149.38
		5	54.36	138.21	160.22
		10.3	32.26	132.16	126.96
		16.5	11.68	15.34	18.35
	3000	0	88.98	273.55	377.89
		5	128.99	343.76	467.30
		10.3	201.01	302.04	330.37
		16.5	52.76	189.10	269.92
4000	0	118.69	292.99	377.83	
	5	243.01	539.08	714.31	
	10.3	286.20	609.56	814.94	
	16.5	329.59	593.50	761.99	
5000	0	331.05	691.79	954.74	
	5	456.62	805.31	1,090	
	10.3	383.37	693.66	879.20	
	16.5	259.08	578.67	790.42	
Road	2000~5000	16.7	68	191	295
		27.7	220	450	680
		50	410	840	1230

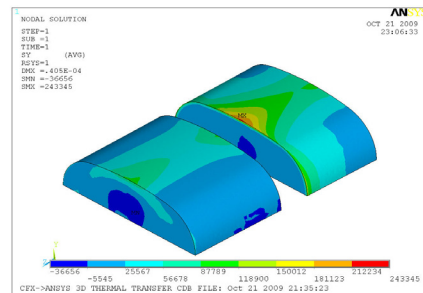
Table 4는 삼원촉매변환기에 대한 열유동 해석을 수행한 후 삼원촉매에 대한 구조해석을 수행한 결과이다. 반경방향응력이 가장 낮은 응력 분포를 보이고 축방향응력이 가장 높은 응력 분포를 보이고 있다. 즉, 축방향응력은 평균적으로 반경방향응력에 비하여 2.9배정도, 접선방향응력에 비하여 1.4배정도 더 크다. 따라서 축방향응력은

삼원 촉매의 피로파손에 결정적인 역할을 하는 응력이라고 생각된다.

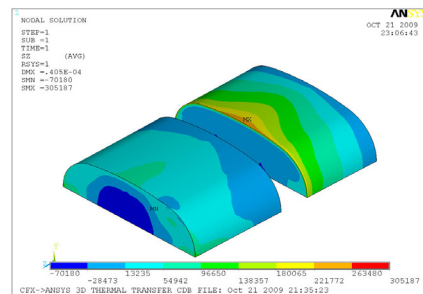
Fig. 3은 차량의 최대주행속도(=180km/hr)에서의 열응력 분포를 나타낸 것이다. 모든 방향의 최대 응력은 후방 촉매 외부 말단에서 생기고 있다. 따라서 촉매의 최초의 열피로 균열발생 위치는 발생 응력이 큰 후방 촉매의 외부 말단에서 접선 방향일 것으로 생각된다.



(a) Radial



(b) Tangential



(c) Axial

[Fig. 3] Thermal stress distributions in three-way catalyst at vehicle road test

3.2 열적 내구성의 검토

3.2.1 강도저하계수 모델

조등[8]은 삼원축매의 조기파손현상을 설명하기 위하여 삼원축매강도에 영향을 미치는 인자 중 가장 큰 인자라고 생각할 수 있는 피로효과만 고려하였으나 본 절에서는 확률 인자와 크기 인자 및 피로 효과를 동시에 고려하여 삼원축매의 신뢰성을 평가하고자 한다. 재료 결합분포의 확률적 특성을 평가하기 위하여 Fig. 4는 삼원 축매의 4점 굽힘강도시험에서 구한 축방향 파단계수 MORa (Modulus of rupture)의 누적 확률값을 2모수 Weibull 확률지에 나타낸 것으로 평균 μ_r 과 표준편차 σ_r 은 각각 3,125 kPa, 591 kPa이다.

파단계수에 대한 신뢰도 R 은 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \exp\left[\left(-\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)^m\right] \quad (1)$$

단. γ_r :MOR의 잔류강도, γ_o :척도계수, m :형상계수

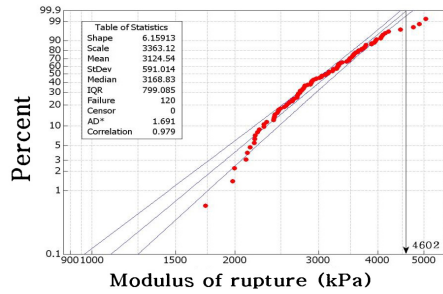
식 (1)에서 척도계수 γ_o 는 99.9%의 신뢰도를 가지는 파단계수로 설정하였으며 본 연구의 경우 4,602kPa가 된다. 한편, $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_p$ 은 강도설계관점에서 보면 재료 결합분포에 의한 MOR의 강도 저하 계수로서 설계강도 γ_o 에 대한 잔류강도 γ_r 의 비를 나타낸 것이다.

Fig. 5는 각 신뢰도 R 의 수준에 따른 강도저하계수 $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_p$ 를 2모수 와이블 누적확률밀도함수의 형상계수로 나타낸 것으로 다음 식 (2)로 나타낼 수 있다.

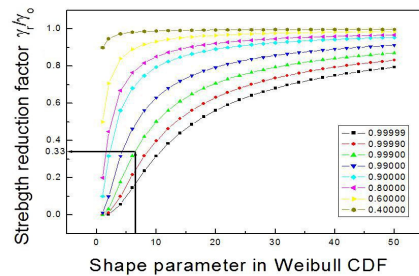
$$\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_p = (-\ln R)^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

본 연구에서는 2모수 와이블 누적확률밀도함수의 형상계수 6.2와 신뢰도 99.9%에 해당하는 강도저하계수를 선택하면 강도저하계수 $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_p$ 는 0.33이다. 또한, 설계 강도를 99.9%의 신뢰도를 가지는 파단계수로 설정하면 본 연구의 경우 4,602kPa이 되므로 재료의 확률론적 결합분포에 의하여 저하된 설계강도는 1,519kPa이다.

Fig. 6은 삼원 축매에 적용할 크기 효과 개념을 나타낸 것이다. 본 연구의 경우 크기 효과 파라미터는 삼원 축매의 고응력 발생 부분인 바깥 표면적 A 에 대한 4점 굽힘 시험편의 최대응력발생부분인 순수굽힘응력발생표면적 A_o 의 비로서 나타낼 수 있다.



[Fig. 4] Cumulative density probability of MOR



[Fig. 5] Relation between strength reduction factor and reliability

Fig. 7은 위험면적비 $\frac{A_o}{A}$ 에 따른 강도저하계수 $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_s$ 를 2모수 와이블 누적확률밀도함수의 형상계수로 나타낸 것으로 다음 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_s = \left(\frac{A_o}{A}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

축매의 고응력발생부분의 바깥 표면적은 37,233 mm²이고 4점 굽힘 시험편의 순수굽힘응력발생 면적은 1613mm²으로서 위험면적비 $\frac{A_o}{A}$ 는 0.043이다. 본 연구에서는 2모수 와이블 누적확률밀도함수의 형상계수 6.2와 위험면적비 0.043에 해당하는 강도저하계수를 구하면 강도저하계수 $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_s$ 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 발생시킨다. 즉, 이러한 개념은 기존의 피로손상이론으로는 설명할 수가 없으

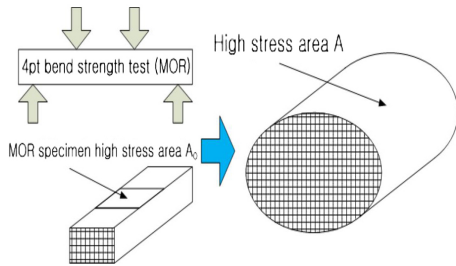
므로 다음 식 (4)과 같은 멱급수 동적 피로손상 모델을 사용하여 세라믹 담체의 강도저하계수를 구할 수 있다.

$$\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_f = \left(\frac{t_{fo}}{t_{fr}}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

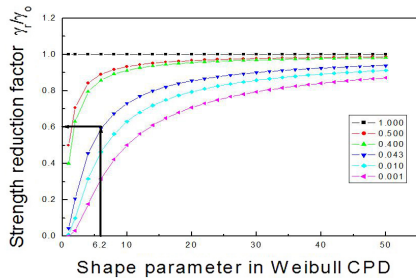
단, t_{fo} : 파단계수의 시험 시간, t_{fr} = 담체의 사용 수명(보증기간), n = 코디어라이트 세라믹 담체 (cordierite ceramic substrate)의 피로상수

Gluati등[9]은 코디어라이트 세라믹의 피로상수를 실험 데이터의 평균값인 24로 제안하고 있으나 국내 삼원 촉매의 경우 하중 속도에 따른 4점 굽힘강도를 구하여 피로상수를 구한 결과 $n=18.4$ 로서 국내 엔진용 촉매는 국외 엔진용 촉매에 비하여 내구성이 현저히 떨어짐을 알 수 있다.[10-11]

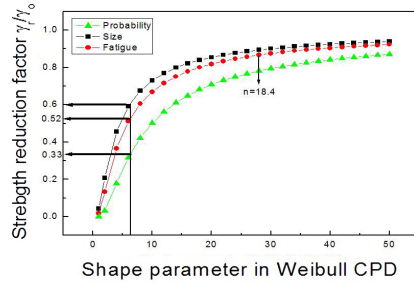
식 (4)에서 $t_s = 30 \text{ sec}$, $n = 18.4$ 이고, t_l 은 차량속도를 80 km/h로 가정하여 담체의 보증기간을 120,000 km로 할 때의 담체사용수명으로서 $t_l = 1,500 \text{ hrs} = 5,400,000 \text{ sec}$ 이다. 따라서 이러한 값을 식 (4)에 대입하여 피로효과에 의한 강도저하계수 $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_f$ 를 구하면 0.52가 된다. 또한, 설계강도를 99.9%의 신뢰도를 가지는 파단계수로 설정하면 본 연구의 경우 4,602kPa이 되므로 피로 인자에 의하여 저하된 설계강도는 2,393 kPa이다.



[Fig. 6] Effect of size on MOR



[Fig. 7] Relation between strength reduction factor and critical area ratio



[Fig. 8] Relation between strength reduction factor and shape parameter in Weibull CPD

Fig. 8는 확률인자와 크기인자 및 피로인자에 따른 강도저하계수 $\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_f$ 를 2모수 와이블 누적확률밀도함수의 형상계수로 나타낸 것으로 피로인자는 멱급수 동적피로손상모델의 피로상수 $n=18.4$ 에 대하여 나타내었다. 이상의 3가지 강도저하계수를 복합적으로 고려하면 다음 식 (5)의 통합적 강도저하계수 $\frac{\gamma_r}{\gamma_o}$ 를 구할 수 있다.

$$\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right) = \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_p \times \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_s \times \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_f \quad (5)$$

따라서 본 연구에서는 세라믹 담체의 안정성을 평가하기 위하여 상술의 3가지 강도저하계수를 식 (5)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 작용 응력의 확률분포로부터 파손확률을 다음 식 (6)을 이용하여 평가하였다.

$$P_f = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{\max}}{\gamma_o \times F_p \times F_f \times F_s}\right)\right] \quad (6)$$

단, F_p : 확률인자(= $\left(\frac{\gamma}{\gamma_o}\right)_p$), F_f : 피로인자(= $\left(\frac{\gamma}{\gamma_o}\right)_f$),

F_s : 크기인자(= $\left(\frac{\gamma}{\gamma_o}\right)_s$)

[Table 5] Failure probability of three-way catalyst

Stress \ Item	Vehicle Test	Maximum Stress σ_{max} (kPa)	Characteristic Strength γ_o (kPa)	F_p	F_f	F_s	Failure probability P_f (%)
σ_r (kPa)	Indoor	456.62	1933	0.33	0.52	0.6	89
σ_t (kPa)		805.31	1933	0.33	0.52	0.6	98
σ_a (kPa)		1,096	4602	0.33	0.52	0.6	90
σ_r (kPa)	Road	468	1933	0.33	0.52	0.6	90
σ_t (kPa)		869	1933	0.33	0.52	0.6	98
σ_a (kPa)		1,212	4602	0.33	0.52	0.6	92

Table 5는 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 7, Table 4의 결과를 식 (6)에 대입하여 삼원촉매의 파손 확률을 평가하였다. 접선 방향 응력에 대한 파손 확률은 반경과 축 방향 응력에 대한 파손 확률에 비하여 대략 8~9%정도 높게 나타나고 있다. 따라서 삼원 촉매의 파손확률은 파손 확률이 높은 방향의 응력에 지배되므로 접선 방향응력에 대한 파손 확률이 삼원 촉매 파손 확률이 된다. 따라서 삼원촉매의 파손 확률은 실내정차시험과 실차주행시험의 경우 모두 98%이다. 삼원 촉매에서 접선 방향 응력에 대한 파손 확률이 98%가 된다는 것은 삼원 촉매가 내구 수명 120,000km을 나타내는 부품이 98%라는 것을 나타낸다. 따라서 삼원 촉매에 대한 설계 안전율이 현저히 낮게 설정되어 있으므로 사용자의 다양한 운전 조건을 고려하여 삼원 촉매의 초기 파손을 경감시키려면 삼원 촉매의 파손 확률을 충분한 수준으로 낮추어서 설계 및 제조되어야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 삼원촉매의 열응력을 열유동 구조해석과 실차시험 및 D-optimal 실험계획법으로 구한 후 삼원촉매의 안전성을 파손 확률을 이용하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 삼원 촉매 강도에 영향을 미치는 인자는 확률적 인자, 크기 인자, 피로인자로서 세가지 인자를 모두 고려한 통합적 강도저하계수는 0.1이다.
2. 접선 방향 응력에 대한 파손 확률은 반경과 축 방향 응력에 대한 파손 확률에 비하여 대략 8~9%정도 높게 나타나고 있으므로 삼원 촉매의 파손확률은 접선 방향 응력에 대한 파손 확률에 의존한다.
3. 실차주행시험에서 발생하는 삼원촉매의 파손확률

은 98%이므로 사용자의 다양한 운전조건을 고려하면 삼원촉매의 초기 파손을 예방하기 위한 설계 및 제조가 필요하다.

References

- [1] S.H. Baek, S.S. Cho, "Comparison of Experimental and Numerical Analysis for Durability Design Criteria in Ceramic Catalyst Substrate", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 9, pp. 58-66, 2010.
- [2] 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", *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 14, No. 4, pp. 68-76, 2006.
- [3] J.K. Park, and S.H. Chung, "Numerical Simulation of Self-Supporting Regeneration using Heating Wire Ignition of Diesel Particulate Trap", *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 7, No. 3, pp. 1-11, 1999.
- [4] B.S.Baek, S.S.Cho, H.S.Kim, "Optimization Technique for the Inverse Analysis of Service Boundary Conditions in Porous Catalyst Substrate with Fluid-Structure Interaction Problems", *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 35, No. 10, pp. 1161-1170, 2011.
- [5] D.W.Lee and S.S.Cho, "Failure Load Prediction of Tunnel Support using DOE and Optimization Algorithm", *KAIS*, Vol. 13, No.4, pp.1480-1487, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.4.1480>
- [6] S.H. Baek, H.J. Choi, K.H. Kim, S.S. Cho, "Identification of Thermal Flow Boundary Conditions for Three-way Catalytic Converter using Optimization Techniques", *KAIS*, Vol. 11, No. 9, pp. 3125-3134,

2010.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.9.3125>

- [7] Hyundai Motors, 1993 *Hyundai SONATA II Engine Workshop Manua*", pp.14-16, Seoul, 1993.
- [8] S.B. Baek, S.S. Cho, "An Effective Approach of Equivalent Elastic Method for Three-Dimensional Finite Element Analysis of Ceramic Honeycomb Substrates," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 35, No. 3, pp. 223-233, 2011.
- [9] Gluati, S. T., William, B., Nunan, J., and Anderson, K., "Fatigue and Performance Data for Advanced Thin Wall Ceramic Catalyst", *SAE Tech. paper No. 980670*, 2010.
- [10] 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", *KSME(A)*, Vol. 31, No. 12, pp. 1157-1164, 2007.
- [11] H.J. Choi, *An Estimation of Thermal Fatigue in Three-way Catalyst using Thermal Flow and Structure Analysis*, pp. 49-50, A Thesis for a Masterate, Kangwon National University, South Korea, 2010.

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

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 재료금속공학과 교수

<관심분야>

화학금속학