

# 삼원촉매장치의 열 피로 평가

조석수\*, 이현창\* 박우철\*, 최현진\*\*  
\*강원대학교 자동차공학과  
\*\*강원대학교 자동차공학과 대학원  
e-mail:sscho394@kangwon.ac.kr

## An Estimation of Thermal fatigue in Three-way catalyst

Seok-Swoo Cho\*, Woo-Chul Park, Hyun-Chang Lee\*, Hyun-Jin Choi\*\*  
\*Dept of Vehicle Eng., Kangwon National University  
\*\*Graduate School of Vehicle Eng., Kangwon National University

### 요 약

현재 자동차 검사 또는 정비 현장에서는 특정 삼원촉매변환기가 요구 내구 수명을 제대로 만족시키지 못하여 파손되는 사례가 발생되고 있다. 이러한 삼원촉매장치의 경우 배기가스 변환 효율이나 압력 강하 등은 엔진 효율 측면에서 만족되지만 열적 내구성은 만족되지 못한다. 본 연구에서는 열유동 해석 및 구조 해석을 통하여 국내 승용차용 삼원촉매 변환기의 대한 열적 안전성에 대하여 검토하였다.

### 1. 서론

### 2. 본론

한국은 승용차의 배기가스를 정화하는 삼원촉매장치(Three-way Catalyst converter: TCC)의 내구성을 1988년도 부터 5년 / 80,000Km로 규정하던 것을 2002년 이후 10년 / 120,000Km로 규정하고 있다. 반면 미국은 삼원촉매장치의 내구성을 1994년도에 7년 / 120,000Km를 2004년부터 10년 / 160,000Km로 규정하고 있다. 삼원촉매장치는 이러한 요구를 수용하기 위하여 엄격한 구조적 안정성을 필요로 하나 최근 국내 일부 차종의 경우 상기의 배기가스 규제를 만족시키기 위하여 삼원촉매장치에 과도한 열피로를 가하여 요구 내구성을 만족시키지 못하는 사례가 발생하고 있다.<sup>1)</sup>

본 연구에서는 실차 및 부품시험을 통해 결정된 열유동해석에 필요한 각 파라미터 범위를 이용하여 D-optimal 실험계획법을 적용하여 반응표면을 도출한다. 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 계산하여 촉매의 열적 내구성을 평가하였다.

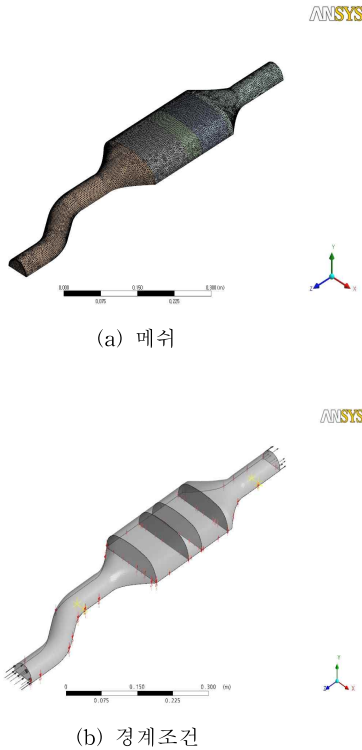
#### 2.1 D-optimal 반응표면법을 이용한 열피로 평가

예비 열유동해석에 의하여 촉매 발생열을 구하고 이것을 기초로 열유동 파라미터를 선정하고 이에 대한 범위를 선정한다. D-optimal 실험계획법에 의하여 실험계획을 세우고 이것을 기초로 열유동해석을 수행한다. 실차시험에서 구한 삼원촉매장치의 출구온도를 구하고 만족도 함수를 이용하여 출구온도 망목치에 대한 반응표면 최적화를 수행한다. 각 출구온도에 대한 열유동 경계조건이 동정되면 이 파라미터 값을 이용하여 열유동해석을 수행하고 이것에서 구한 온도분포를 이용하여 열응력을 구한다. 동적피로수명 평가법을 이용하여 삼원촉매의 요구내구수명에 대한 요구수명 강도를 구하고 이것을 열응력과 비교함으로써 삼원 촉매의 열적 내구성을 검토한다.

#### 2.2 열유동 및 구조해석

그림 1 (a)은 열유동 해석을 하기 위한 삼원촉매장치의 메쉬를 나타낸 것으로 ANSYS CFX에서 제공하는 사면체 열유동 해석용 메쉬를 사용하였다. 절점은 217,495개이고 요소는 784,117개이다. (b)는 열유동 해석을 하기 위한 열유동 경계조건을 나타낸 것이다. Z축 방향에 대하여 대칭경계조건을 부여하였다.

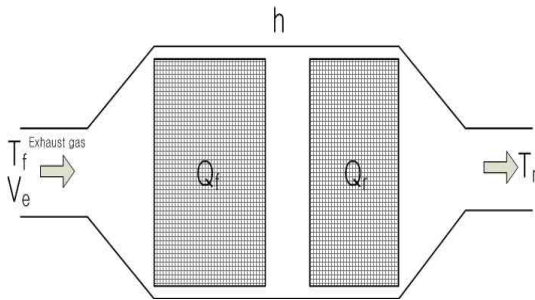
삼원촉매변환기의 입구에 공기 속도와 온도를, 출구에 개방 압력 1 atm을 주었다. 열전달과 난류 유동 모델은 ANSYS CFX V11에서 제공하는 모델을 사용하였으며 전자는 이음속 조건에서 사용하는 Thermal energy 모델을, 후자는 k-ε 난류 모델을 각각 사용하였다.<sup>2)</sup>



[그림 1] 삼원촉매장치 유동해석 경계조건

### 2.3 열유동 및 반응 표면 모델

그림 2는 열유동 반응표면모델에 사용할 인자와 반응 변수를 나타낸 것이다. 인자는 입구온도, 유속, 전방과 후방의 촉매 반응열, 대류열전달계수이고 반응변수는 출구온도로 설정하였다.



[그림 2] 인자와 반응변수

표 1은 열유동 반응표면모델에 사용할 인자의 범위를 나타낸 것이다.

표 2는 D-optimal 실험계획에 의한 26회 전산 실험에 따라 수행한 촉매변환기의 출구 온도를 나타내었다.

[표 1] 인자 범위

Response variables	Low value	High value
$T_f$ (K)	373	1300
$Q_f$ (W/m <sup>3</sup> )	0	$6 \times 10^5$
$Q_r$ (W/m <sup>3</sup> )	0	$6 \times 10^5$
$h$ (W/m <sup>2</sup> °C)	5.55	38.85
$V_e$ (m/s)	5	52.5

[표 2] D-optimal 실험계획법에 의한 출구 온도

Run	Variables					Response $T_r$ (K)
	$T_f$ (K)	$Q_f$ (W/m <sup>3</sup> )	$Q_r$ (W/m <sup>3</sup> )	$h$ (W/m <sup>2</sup> °C)	$V_e$ (m/s)	
1	1300	0	600000	38.85	52.5	1231
2	1300	300000	600000	38.85	5	1319
3	1300	600000	0	38.85	5	1266
4	373	0	300000	5.55	5	389
5	1300	0	0	38.85	5	1101
6	373	0	0	5.55	52.5	372
7	373	0	600000	38.85	5	402
8	1300	0	0	5.55	52.5	1279
9	373	0	0	38.85	5	382
10	1300	600000	600000	5.55	52.5	1309
11	836.5	600000	0	38.85	52.5	817
12	1300	600000	600000	38.85	28.75	1241
13	373	300000	600000	38.85	52.5	376
14	373	0	0	38.85	52.5	370
15	1300	600000	600000	5.55	5	1492
16	373	600000	0	5.55	28.75	380
17	1300	600000	0	5.55	5	1353
18	836.5	600000	300000	22.2	28.75	827
19	1300	0	600000	5.55	5	1321
20	373	0	600000	5.55	52.5	376
21	373	600000	600000	38.85	5	451
22	373	600000	600000	22.2	52.5	379
23	373	600000	600000	5.55	5	459
24	373	600000	0	38.85	5	412
25	836.5	300000	0	22.2	28.75	810
26	836.5	0	0	5.55	5	789

표 3은 실차시험에서 측정된 출구 온도 데이터를 기초로 만족도함수를 이용하여 출구 온도 데이터의 망목치에 적합한 열유동해석의 경계조건을 구한 결과이다.

### 2.4 열응력 해석 결과

표 4은 이러한 온도 분포를 기초로 ANSYS V11에서 구한 각 방향의 열응력을 나타낸 것이다.

그림 3은 D-optimal 실험계획에서 출구 온도가 가장 높은 조건인 표 3의 5000rpm 무주행풍 조건을 ANSYS CFX V11을 이용하여 삼원촉매장치의 열유동 해석결과를 나타낸 것이다.

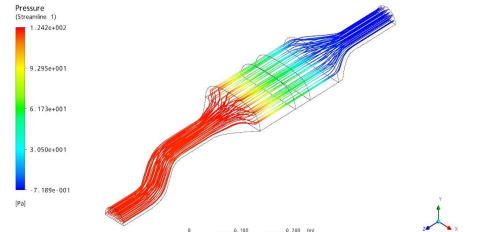
그림 4는 최대 열응력을 나타내는 표 4의 5000rpm, 5m/s에서의 반경과 접선 및 축 방향 열응력 해석 결과를 각각 나타낸 것이다.

[표 3] 열유동해석을 위한 경계조건 및 상대오차

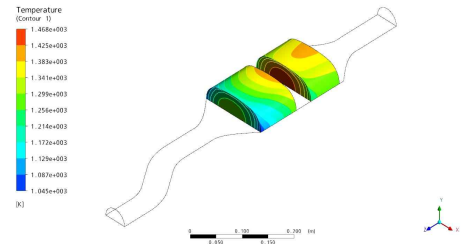
Test conditions		Response		Variables				
Engine rpm	Wind speed (m/s)	$T_r$ (K)	$T_f$ (K)	$Q_f$ ( $W/m^3$ )	$Q_r$ ( $W/m^3$ )	$h$ ( $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ )	$V_e$ (m/s)	Relative error (%)
1000	0	551	515	42724	529418	12.7	12	0.14
	5	428	433	266614	304158	36.2	26	0.07
	10.3	412	400	489729	540088	38.0	49	0.26
	16.5	440	418	343954	555448	38.1	21	0.16
2000	0	680	672	41695	529961	7.3	48	0.15
	5	609	583	495330	536486	36.8	22	0.06
	10.3	632	558	517459	415850	9.1	8	0.11
	16.5	600	568	65553	439313	8.2	17	0.17
3000	0	744	739	399699	213171	13.2	45	0.17
	5	692	695	408844	401210	28.2	47	0.17
	10.3	694	673	54911	409494	12.9	10	0.17
	16.5	684	679	482002	72174	12.8	45	0.15
4000	0	835	813	201791	489450	7.7	34	0.17
	5	800	809	186661	467202	22.8	41	0.10
	10.3	768	814	69185	265151	28.8	44	0.16
	16.5	783	774	422811	309049	27.4	21	0.06
5000	0	934	953	467844	107524	24.0	39	0.10
	5	908	956	203352	67162	29.6	32	0.06
	10.3	885	850	537840	442025	21.1	20	0.15
	16.5	880	879	422747	274579	19.0	38	0.16

[표 4] 열응력 해석 결과

Engine speed (rpm)	Wind speed $V_w$ (m/s)	$\sigma_r$ (kPa)	$\sigma_t$ (kPa)	$\sigma_z$ (kPa)
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	30.34	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	1090.00
	10.3	383.37	693.66	879.20
	16.5	259.08	578.67	790.42

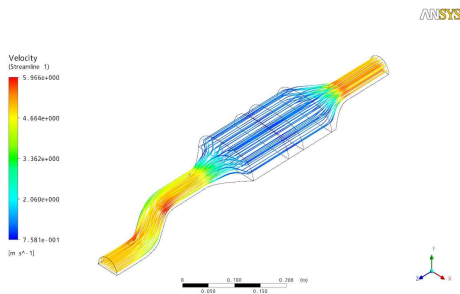


(b) 압력

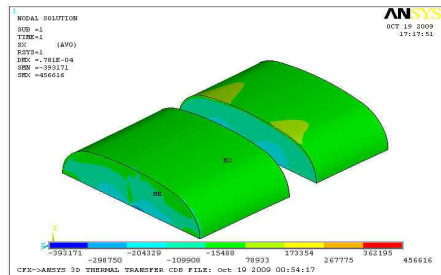


(c) 온도

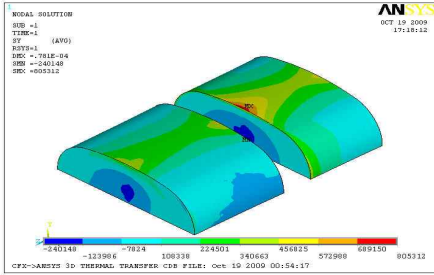
[그림 3] 열유동 해석 결과



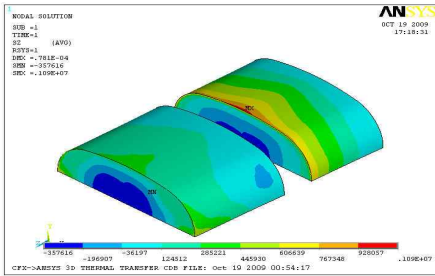
(a) 속도



(d) 반경방향



(b) 접선방향



(c) 축방향

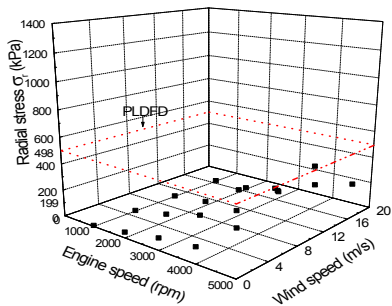
[그림 4] 열응력 해석 결과

승용차용 세라믹 촉매의 열적 안전성은 다음 식 (1)과 같은 맥급수 동적 피로손상 모델을 사용하여 평가할 수 있다.

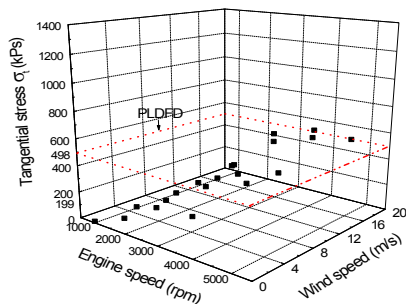
$$\gamma_{th} = MOR \left[ \frac{t_{fo}}{t_{fr}(n+1)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

축방향 요구내구강도  $\gamma_{tha}$ 는 1,188kPa이고 반경과 접선방향 요구내구강도  $\gamma_{thr}$ ,  $\gamma_{tht}$ 는 476kPa이다.

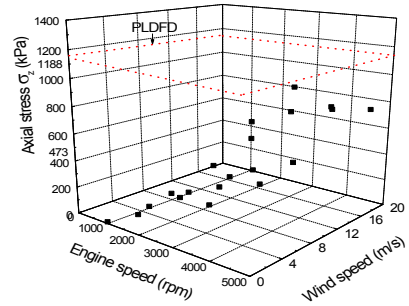
그림 5는 맥급수동적 피로손상 모델에 의한 삼원촉매장치의 열적 내구성을 평가한 것이다.



(a) Radial



(b) Tangential



(c) Axial

[그림 5] 맥급수 동적 피로손상모델에 의한 열피로 평가

삼원촉매변환기에서 발생하는 최대 접선방향 열응력은 4000 rpm 이상의 일부 영역에서 요구내구수명강도를 초과하고 있어 삼원 촉매의 열적 내구성을 보장할 수 없다.

### 3. 결론

삼원촉매변환기에 대한 실차시험 및 열유동 및 구조해석을 수행하여 열적 내구성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 엔진 회전수가 증가함에 따라 삼원촉매변환기에서 발생하는 열응력은 증가하고 있다.
2. 주행풍 속도가 증가함에 따라 삼원촉매변환기에서 발생하는 열응력은 촉매연소반응에 따라 감소 또는 증가되고 있어 일정한 경향을 파악할 수 없다.
3. 접선 방향 열응력은 기하학적 응력집중에 의하여 반경 방향 열응력에 비하여 최대 4배 정도 더 크게 나타나고 있다.
4. 삼원 촉매의 최대 접선방향 열응력은 4000 rpm 이상의 일부 영역에서 요구내구강도를 초과하고 있어 삼원 촉매의 열적 내구성을 보장할 수 없다.

### 참고문헌

[1] Park, Jae. Sung., 2009, " A Study on Thermal Shock of Ceramic Monolithic Substrate,"  
 [2] Park, J. S., Baek, S. H., Joo, W. S. and Cho, S. S., 2009, "A Study on Elastic Behavior of Ceramic Monolithic Substrate," Proceedings of the KSME 2009 Spring Annual Meeting, Jeju, pp. 393~398