

열-구조 연성해석을 이용한 세라믹 담체의 열적 내구성 평가 An Estimation of Thermal Durability in Ceramic Substrate Using Coupled Thermal-Structural Analysis

*최현진¹, 권인규², 신순기³, 조석수⁴

*H. J. Choi¹, I. K. Kwon², S. G. Shin³, S. S. Cho(sscho394@kangwon.ac.kr)⁴

¹강원대학교 산업과학대학원, ²강원대학교 소방방재학부, ³강원대학교 신소재공학과, ⁴강원대학교 자동차공학과

Key words : Fluid-Structural Interface, Thermal Fatigue, Dynamic Fatigue Constant, Ceramic Substrate

1. 서론

대기오염을 유발하는 원인 물질은 다양하지만 그 중 탄소산화물(CO_x), 유황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 휘발성 유기화합물(VOC) 및 입자상 물질(PM) 등은 5대 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 강화되는 추세이다. 특히, 선진국의 경우 배기가스 기준이 거의 무공해를 요구하고 있어 배기정화기구의 관점에서 보면 촉매(catalyst)에 대한 높은 사용 온도를 요구한다.¹ 한국은 승용차의 배기가스를 정화하는 삼원촉매변환기(three-way catalytic converter: TWC)의 내구성을 1988년도부터 5년/80,000km로 규정하던 것을 2002년 이후 10년/120,000km로 규정하고 있다. 반면 미국은 삼원촉매변환기의 내구성을 1994년도에 7년/120,000km를 2004년부터 10년/160,000km로 규정하고 있다. 삼원촉매변환기는 이러한 요구를 수용하기 위하여 엄격한 구조적 안정성을 필요로 하나 최근 국내 일부 차종의 경우 상기의 배기가스 규제를 만족시키기 위하여 삼원촉매변환기에 과도한 열피로를 가하여 요구 내구성을 만족시키지 못하는 사례가 발생하고 있다.

본 논문은 실차 및 부품시험을 통해 결정된 열유동 해석에 필요한 각 매개변수 범위를 이용하여 D-optimal 실험계획법을 적용하여 반응표면을 도출한다. 반응표면에 대하여 만족도 함수를 적용하여 실차 시험에서의 후방 촉매 중심부 온도에 대한 열유동 경계조건을 예측한 뒤 이 값을 ANSYS CFX에 적용하여 촉매 온도 분포를 구한다. 이러한 온도 분포를 ANSYS Multiphysics로 전달한 뒤 구조적 구속조건을 부여하여 삼원 촉매의 열응력을 계산하여 촉매의 열적 내구성을 평가하였다.

2. 제목

열유동과 구조해석의 FSI(fluid-structure interaction)는 CFX와 ANSYS Multiphysics를 이용하였다. 전체해석과정은 CFX에 의한 열유동 해석결과는 3-D Thermal70 요소를 이용해서 *.cdb 파일로 저장되고 이 파일의 정보를 읽어서 ANSYS Multiphysics에서 열전달 해석을 수행한다. 열전달 해석결과는 다시 열응력 계산을 위해 Solid185 구조 요소로 변경하고 열응력을 계산하였다. Fig. 1(a)는 열유동 해석을 위한 열유동 경계조건을 나타낸 것이다. Fig. 1(b)는 ANSYS ICEM

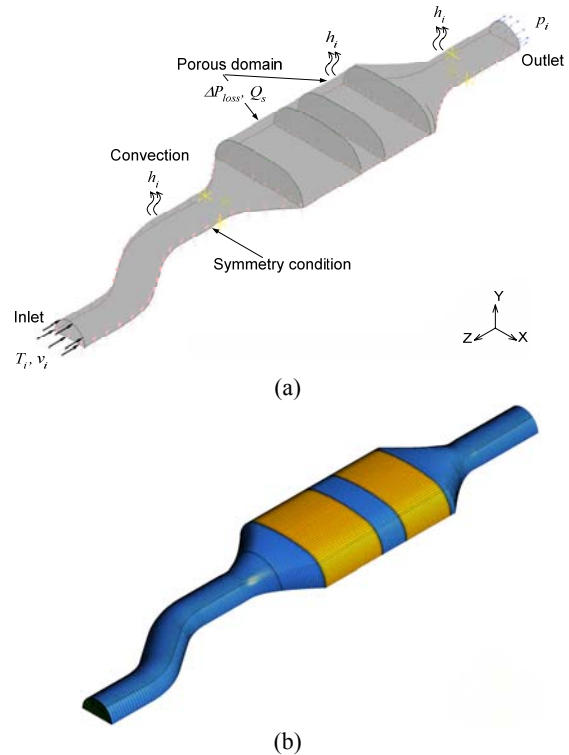


Fig. 1 (a) Schematic of boundary conditions for the TWC
(b) Computational grid system

CFD를 이용한 계산 격자를 생성한 것으로 절점은 217,495개이고 요소는 784,117개이다. 구체적인 FSI 조건의 설명은 다음과 같다.

- (1) 삼원촉매변환기의 배기관 내에 흐르는 3차원 정상상태의 압축성 난류유동을 해석하기 위한 지배방정식으로 연속방정식과 Navier-Stokes방정식을 사용하였다. 난류모델은 k-ε을 기반으로 한 SST(shear stress transport)모델, 대류항의 차분방정식은 high resolution을 적용하여 계산하였다.
- (2) 하니컴 셀 구조를 가진 모노리스 담체는 압력강하를 고려한 다공성 매질(porous media)로 정의하였다. 담체 내부의 유동은 반경방향에 비하여 축방향의 속도가 지배적이므로 1차원 층류 유동으로 가정한다. 촉매의 화학반응에 대한 발열량은 소스영역에 의한 총 에너지로 적용하였다.
- (3) 구조해석 등 기타 조건은 참고문헌¹에 설명하였다.

Table 1 Thermal flow boundary Conditions for indoor vehicle test

Engine speed (rpm)	Design variable					Response
	T_{inlet} (°C)	v_{inlet} (m/s)	Q_f (W/m ³)	Q_c (W/m ³)	h (W/m ² °C)	T_{outlet} (°C)
1000	242	12	42724	529418	12.7	278
2000	399	48	41695	529961	7.3	407
3000	466	45	399699	213171	13.2	471
4000	540	34	201791	489450	7.7	562
5000	680	39	467844	107524	24	661

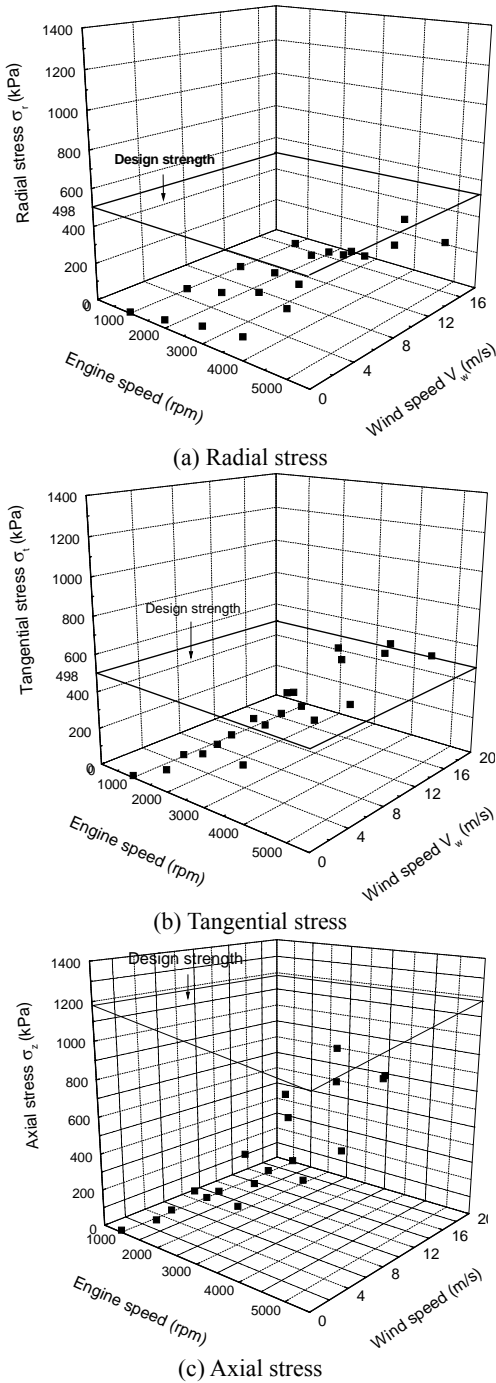


Fig. 2 Estimation of thermal durability at indoor

3. 조기파손 방지를 위한 열적 내구성 평가

세라믹 부품의 설계 강도는 멱급수 동적피로손상모델을 사용하여 결정할 수 있고 다음의 식 (1)로 나타낸다.

$$s_{th} = MOR \left[\frac{t_s}{t_l(n+1)} \right]^{1/n} \tag{1}$$

여기서 t_s 는 파단계수 MOR의 시험 시간, t_l 는 담체의 사용 수명(보증기간), n 은 코제라이트 세라믹 담체(cordierite ceramic substrate)의 동적피로상수(dynamic fatigue constant)를 각각 나타낸다.

축방향 파단계수는 온도에 따른 파단계수시험에서 가장 파단계수가 적게 나타나는 150℃에서의 값으로 2,700kPa이고 반경과 접선방향 파단계수는 축 방향 파단계수의 42%이며 그 값은 1,134kPa이다. 또한, Gluati는 코디어라이트 세라믹의 피로상수를 실험 데이터의 평균값인 $n=24$ 로 제안

하고 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. 식 (1)에서 $t_s=30\text{sec}$, $n=18.4$ 이고, t_l 은 차량속도를 80km/h로 가정하여 삼원 촉매의 보증기간을 120,000km로 할 때의 삼원 촉매 사용수명으로서 $t_l=1,500\text{hrs}=5,400,000\text{sec}$ 이다. 따라서 식 (1)에 의한 촉매 담체의 설계 강도 S_{th} 는 반경과 접선 및 축방향 열응력이 각 방향의 파단계수의 44%이므로 축방향 설계 강도 S_{thz} 는 1,188 kPa이고 반경과 접선방향 설계 강도 S_{thr} , $S_{th\theta}$ 는 476 kPa이다.

Fig. 2는 엔진 회전수와 주행풍 속도에 대한 반경과 접선 및 축방향 열응력을 각각 나타내었다. 그림에서 각각의 엔진 회전수와 주행풍 속도에 대한 설계 강도를 동시에 표시하였다. 멱급수 동적피로손상모델은 접선방향 열응력의 일부 고엔진 회전속도 영역과 고속 주행풍의 시험조건을 제외하고는 120,000km의 내구수명을 보증할 수 있다고 판단할 수 있다. 그러나 차량주행조건이 가혹한 4000rpm 이상에서는 접선방향 열응력이 설계 강도를 초과하고 있으며 5000rpm영역에서는 반경방향과 축방향 열응력이 설계 강도의 92%에 도달하는 실험조건이 나타난다. 따라서 실제주행조건이 되면 실내시험조건보다 외부로부터 열전달계수가 높게 되어져 현재 수준보다도 더 높은 온도 기울기가 발생하여 열응력이 증가되므로 삼원 촉매의 열피로 파손을 방지하기에는 낮은 안전율을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한, 일반적으로 세라믹 압출 부품은 이방성 재료로서 대표적 강도로 축방향 강도로 설정하고 있다. 그러나 본 부품의 경우 축방향 열응력보다 접선방향 열응력이 덜 가혹한 조건에서 설계 강도를 초과하고 있어 삼원 촉매의 설계 강도는 접선방향 열응력으로 설정하여야 한다. 이것은 조석수 등이 수행한 탄성론에 기반한 단순 열응력 모델의 결과와 상이하다. 이러한 이유는 조석수 등이 수행한 단순 열응력 모델이 원형모델로서 반경과 축방향 온도를 가지고 응력을 측정하고 있으며 반경과 접선방향 열응력은 동일한 것으로 취급한다. 그러나 본 삼원 촉매 모델은 타원형 유한요소모델로서 반경과 접선방향 열응력이 반경방향과 접선방향 온도 기울기에 의하여 결정되므로 반경과 접선방향 열응력은 다르게 계산된다. 이러한 이유로 이전 연구의 탄성론에 기반한 단순 열응력 모델에서는 열적 내구성을 가지고 있는 것으로 평가되어졌으나 본 논문에서는 삼원 촉매가 열적 내구성을 가지지 못하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문은 삼원촉매변환기의 열응력을 열유동구조 해석과 실차시험 및 D-optimal 실험계획법으로 구한 뒤 삼원 촉매의 안전성을 멱급수 동적피로손상모델을 이용하여 열피로를 평가하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전방과 후방 촉매 입구 끝단에서 응력이 집중되고 있으나 후방 삼원 촉매가 전방 삼원 촉매에 비하여 응력이 대략 3.8배 정도 더 높게 나타나므로 후방 삼원 촉매가 삼원촉매변환기의 조기파손을 제공하는 원인이 된다.
- (2) 접선방향 열응력은 4000rpm 이상의 영역에서 설계 강도를 초과하고 있어 120,000km의 내구수명을 보증할 수 없다.
- (3) 삼원 촉매의 경우 축방향 열응력보다 접선방향 열응력이 덜 가혹한 조건에서 설계 강도를 초과하고 있어 삼원 촉매의 설계강도는 접선방향 열응력으로 설정하여야 한다.

참고문헌

1. Baek, S. H., Park, J. S., Kim, M. G., and Cho, S. S., "A Study on Thermal Shock of Ceramic Monolithic Substrate," Trans. of KSME, Series A, 34(2), 129-138, 2010.