

# SiC 세라믹 담체에 대한 피로강도저하계수의 평가

백석흠\*, 조석수\*\*

\*동아대학교 기계공학과 BK21 박사후과정

\*\*강원대학교 삼척캠퍼스 자동차공학과

e-mail: sscho394@kangwon.ac.kr

## Evaluation of Fatigue-Strength-Reduction Factor for SiC Ceramic Substrate

Seok-Heum Baek\*, Seok-Swoo Cho\*\*

\*BK21 Post-Doctoral Fellow, Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

\*\*Dept. of Vehicle Engineering, Kangwon National University

### 요 약

삼원 촉매는 주로 코제라이트 세라믹으로 제작되는 다공성 부품이다. 그러나 코제라이트 세라믹은 열적충격온도가 낮아 엔진의 혼합기가 농후한 경우 삼원촉매의 열적 내구성이 급격히 떨어져 내구 수명을 제대로 만족시키지 못하는 차량이 급격히 증가하고 있다. 따라서 본 논문은 유한요소법으로 구한 SiC 세라믹 재료의 등가 물성치를 기초로 SiC 세라믹 촉매 담체의 기계적 물성치를 유한요소해석용 시험편으로 구한 뒤 SiC 세라믹 촉매담체가 실차에 설치될 경우의 열피로 성능에 대하여 평가하였다.

### 1. 서 론

자동차용 삼원촉매변환기에 사용되는 삼원 촉매는 주로 코제라이트 세라믹으로 제작된다. 그러나 코제라이트 세라믹은 열적 충격 온도가 낮아 엔진의 혼합기가 농후한 경우 삼원 촉매의 열적 내구성이 급격히 떨어져 내구 수명이 감소되는 경우가 많다.

일반적으로 공업용 구조 세라믹은 코제라이트(cordierite), 실리콘 니트라이드, 알루미늄, 탄화규소(silicon carbide: SiC), 지르코니아 등이 있으며 내열성, 비강도, 가격 등의 측면에서 SiC가 차세대 세라믹 촉매 담체 재료로 주목을 받고 있다. 그러나 여러 문헌 자료에서 SiC는 촉매 담체 재료 자체로서의 물성치가 기존의 코제라이트의 물성치에 비해 우수하더라도 SiC 촉매 담체로서의 물성치가 기존의 코제라이트 촉매 담체의 물성치에 비하여 얼마만큼 더 우수한가를 평가할 수 없다[1-3]. 물론 가장 확실한 평가 방법은 SiC 세라믹 촉매 담체를 직접 제조하여 그 기계적 물성치를 평가하고 해당 부품을 엔진에 장착하여 그 열적 내구 성능을 평가하는 것이다. 이것은 고가의 압출 제조장치 및 시험비용 때문에 설계 관점에서 확실히 비교 우위가 있는 촉매 담체의 최종 제품시험단계에서 수행할 수 있는 방법이다.

따라서 본 논문에서는 SiC 세라믹 촉매 담체의 열

피로와 확률적 안전성 평가를 설계 단계에서 검토하기 위해 아래의 두 과정을 제안한다. SiC 세라믹 재료의 물성치는 조석수 등[4,5]이 제안한 유한요소해석을 이용한 등가탄성방법을 이용하여 SiC 세라믹 촉매 담체의 기계적 물성치를 구한다. 이 결과로부터 SiC 세라믹 촉매 담체가 실차에 설치될 경우의 두 가지 확률적 설계 모델(probabilistic design model)을 제시하고 이의 유효성을 설명하였다.

### 2. 강도저하계수에 의한 내구성 평가

삼원 촉매의 강도에 영향을 미치는 인자는 크게 다음의 세 가지로 분류 할 수 있다.

- (1) 확률적 인자 (probability factor:  $F_p$ )
- (2) 피로 인자 (fatigue factor:  $F_f$ )
- (3) 크기 인자 (size factor:  $F_s$ )

SiC 세라믹으로 제조된 삼원 촉매 담체 강도는 재료 내부의 확률적 결함 분포에 강하게 의존하고 있어 큰 분산이 있을 경우 강도를 현저히 저하시키는 경향이 있다. 또한, 파단계수 시험편과 삼원 촉매 담체의 표면적 또는 체적사이에는 큰 차이가 있으므로 크기 효과(최약 결함 링크 이론)에 의하여 큰 체적의 부품은 긴 링크를 만들게 되고 이것은 더 약한 링크를 만들기 때문에 강도를 저하시킨다. 세라믹의 경우 수분 등을 포함한 열악한 환경 속에서 가동되

면 강도가 시간에 따라 서서히 감소하게 되는 피로 현상을 보이게 된다.

조석수는 삼원 촉매 담체로 사용되는 코제라이트 세라믹에 대한 결함분포의 확률적 특성을 삼원 촉매의 4점 굽힘 강도 시험에서 구한 축 방향 파단계수 MOR(modulus of rupture)을 이용하여 평가한 결과 강도저하계수  $(\gamma_r/\gamma_o)_p$ 가 0.33이다. 또한, 면적비  $A_o/A$ (A: 삼원 촉매의 고응력 발생 부분인 바깥 표면적,  $A_o$ : 4점 굽힘 시험편의 최대응력 발생 부분인 순수굽힘응력 발생의 표면적)에 따른 강도저하계수  $(\gamma_r/\gamma_o)_s$ 를 2 모수 와이블 누적확률밀도함수의 형상 계수를 이용하여 나타낸 결과 0.6정도이다. 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 없으므로 다음 식 (1)과 같은 멱급수동적피로 손상모델을 사용하여 세라믹 담체의 강도저하계수를 구할 수 있다.

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

식 (1)에서 사용하는 파라미터는 조석수 등이 제시한 파라미터를 그대로 사용하면 피로효과에 의한 강도저하계수  $(\gamma_r/\gamma_o)_f$ 는 0.52이 된다. 이상의 3가지 강도저하계수를 복합적으로 고려하면 다음 식 (2)의 통합적 강도저하계수  $\gamma_r/\gamma_o$ 를 구할 수 있다.

$$\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right) = \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_p \times \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_s \times \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_o}\right)_f \quad (2)$$

따라서 세라믹 담체의 안정성을 평가하기 위하여 3가지 강도저하계수를 식 (2)에 대입하면 통합적 강도저하계수는 0.1이 되므로 최종 축방향 설계 강도는 642 kPa이고 최종 반경 및 접선 방향 설계 강도는 427 kPa 이다. 즉, 삼원 촉매 담체에서 발생하는 축방향 응력은 최종 축방향 설계 강도 642 kPa이하에, 반경과 접선 방향 응력은 최종 반경과 접선 방향 설계 강도 427 kPa이하에 존재해야 한다.

Table 1은 설계강도모델에 따른 각 방향 설계 강도를 나타낸 것으로 강도저하계수모델이 멱급수동적

[표 1] Design strength model of three-way catalytic converter

Model	$\sigma_r$ (kPa)	$\sigma_t$ (kPa)	$\sigma_z$ (kPa)
Strength reduction factor (SRF)	427	427	642
Power law dynamic fatigue damage (PLDFD)	1793	1793	2696

피로손상모델보다 훨씬 더 보수적임을 알 수 있다. 이러한 결과는 강도저하계수모델의 경우 부품을 둘러싼 모든 공학적 환경을 고려하는데 비해 멱급수동적피로손상모델은 응력부식균열에 바탕을 둔 역학적 환경만 고려하였기 때문이라 생각된다. 따라서 본 연구에서는 강도저하계수모델을 이용하여 삼원 촉매의 안전성을 평가하기로 한다.

### 3. 파손확률에 의한 신뢰성 평가

삼원 촉매는 초기에 충분한 안전성으로 설계하여도 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 작용응력의 확률분포로부터 파손확률을 다음 식 (3)을 이용하여 평가하였다.

$$P_f = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{max}}{\gamma_o \times F_p \times F_f \times F_s}\right)\right] \quad (3)$$

여기서  $F_p$ : 확률인자 $(\gamma_r/\gamma_o)_p$ ,  $F_f$ : 피로인자 $(\gamma_r/\gamma_o)_f$ ,  $F_s$ : 크기인자 $(\gamma_r/\gamma_o)_s$  이다.

또한, 설계 강도와 적용응력의 확률분포로부터 구하는 안전율  $\eta_p$ 는 식 (4)를 이용하여 평가하였다.

$$\eta_p = \frac{\gamma_o \times F_p \times F_f \times F_s}{\sigma_{max}} \quad (4)$$

Table 2(a)는 조석수 등[4,5]이 제안한 강도저하계수와 FSI(fluid-structure interaction)를 이용한 열유동

[표 2] Failure probability of three-way catalytic converter  
(a) SiC ceramic catalyst substrate

Stress	Vehicle test	Maximum stress $\sigma_{max}$ (kPa)	Characteristic strength $\gamma_o$ (kPa)	$F_p$	$F_f$	$F_s$	Failure probability $P_f$ (%)	Safety factor $\eta_p$
$\sigma_r$ (kPa)	Indoor	3.11	427	0.33	0.52	0.6	6.8	14
$\sigma_t$ (kPa)		6.41	427	0.33	0.52	0.6	13.6	6.9
$\sigma_a$ (kPa)		15.88	642	0.33	0.52	0.6	21.4	4.2
$\sigma_r$ (kPa)	Driving	2.60	427	0.33	0.52	0.6	5.7	16.9
$\sigma_t$ (kPa)		6.16	427	0.33	0.52	0.6	13.1	7.1
$\sigma_a$ (kPa)		14.50	642	0.33	0.52	0.6	19.7	4.6

(b) Cordierite ceramic catalyst substrate

Stress	Vehicle test	Maximum stress $\sigma_{max}$ (kPa)	Characteristic strength $\gamma_o$ (kPa)	$F_p$	$F_f$	$F_s$	Failure probability $P_f$ (%)	Safety factor $\eta_p$
$\sigma_r$ (kPa)	Indoor	456.62	1933	0.33	0.52	0.6	89	0.5
$\sigma_t$ (kPa)		805.31	1933	0.33	0.52	0.6	98	0.27
$\sigma_a$ (kPa)		1,096	4602	0.33	0.52	0.6	90	0.43
$\sigma_r$ (kPa)	Driving	468	1933	0.33	0.52	0.6	90	0.5
$\sigma_t$ (kPa)		869	1933	0.33	0.52	0.6	98	0.27
$\sigma_a$ (kPa)		1,212	4602	0.33	0.52	0.6	92	0.43

구조해석 결과를 식 (4)와 (5)에 대입하여 SiC 세라믹 삼원 촉매의 파손확률과 파손확률에 의한 안전율  $\eta_p$ 를 평가한 것이다. Table 2(b)는 최현진[6]이 수행한 코제라이트 세라믹 삼원 촉매의 파손확률과 파손확률에 의한 안전율  $\eta_p$ 를 평가한 것이다. 반경과 접선 및 축 방향 응력에 대한 평균파손확률은 각각 6.3%, 13.4%, 21%정도로 축방향 응력에 의한 파손확률이 가장 크게 나타나며 반경 방향 응력에 의한 파손확률이 가장 낮다. 따라서 SiC 세라믹 담체의 파손확률은 21%이며 SiC 세라믹 담체의 열피로에 의한 파손은 담체 외곽의 원주 방향으로 균열이 생성되어 성장할 것으로 생각된다. 또한 실내정차시험의 경우가 실차주행시험의 경우에 비하여 SiC 세라믹 담체의 파손확률이 평균 1.1% 정도 더 높게 나타나 공학적 오차 범위내에 있다. 따라서 차량이 정차시나 주행시에 관계없이 SiC 세라믹 담체의 파손확률은 일정하게 유지되므로 열적 부하 변동에 강건한 담체가 될 수 있음을 나타낸다. 또한, 코제라이트

세라믹 담체의 경우 동일 하중조건에서 파손확률이 최대 98%까지 올라가고 있어 SiC 세라믹 담체가 전자의 세라믹 담체에 비하여 4.7배 정도 파손확률을 낮출 수 있다.

반경과 접선 및 축 방향 응력에 대한 평균안전율은 각각 15.5, 7, 4.4정도로 축방향 응력에 의한 안전율이 가장 작게 나타나며 반경 방향 응력에 의한 안전율이 가장 크다. 따라서 SiC 세라믹 담체의 안전율은 4.4이다. 또한 실내정차시험의 경우가 실차주행시험의 경우에 비하여 SiC 세라믹 담체의 안전율이 평균 1.17정도 더 높게 나타나고 있어 열적 내구성 관점에서 실내정차시험조건이 실차주행시험조건에 비하여 상당히 열악함을 알 수 있다. 또한, 코제라이트 세라믹 담체의 경우 동일 하중조건에서 안전율이 최대 0.27까지 떨어져 있어 SiC 세라믹 담체가 전자의 세라믹 담체에 비하여 16.3배 정도 안전율이 높다.

한편, SiC 세라믹 담체가 코제라이트 세라믹 담체

에 비하여 안전율이 높은 이유는 다음과 같은 세 가지 효과인 것으로 생각된다.

첫째, 재료 자체의 강도 증가 효과이다. 즉, SiC 세라믹의 인장 강도가 390 MPa이고 코제라이트 세라믹의 인장 강도가 29.6 MPa로 전자의 세라믹 강도가 후자의 세라믹 강도에 비하여 13.2배 정도이다.

둘째, 세라믹 하니컴 구조체 효과이다. 즉, 축방향 파단계수의 관점에서 파악하면 코제라이트 세라믹 담체의 파단계수(4.6 MPa)에 대한 SiC 세라믹 담체의 파단계수(6.4 MPa)의 증가율이 1.4배 정도이다. 따라서 재료와 구조체 효과에 의한 강도 개선율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\left(\frac{\sigma_{substrate(SiC)}}{\sigma_{substrate(cordi)}}\right) = \left(\frac{\sigma_{ult(SiC)}}{\sigma_{ult(cordi)}}\right) \times \left(\frac{MOR_{SiC}}{MOR_{cordi}}\right) = 13.2 \times 1.4 = 18.48 \quad (5)$$

SiC 세라믹 담체의 강도는 코제라이트 세라믹 담체에 비하여 설계 강도가 18.48배 정도 증가할 수 있다.

셋째, SiC 세라믹의 우수한 열적 특성으로 인하여 코제라이트 세라믹 담체에 비하여 SiC 세라믹 담체가 동일 열적 환경에서 열응력을 작게 발생시킨다. 코제라이트 세라믹에 비하여 SiC 세라믹에 비하여 열팽창계수와 탄성계수가 각각 1.6배, 3.11배 정도 높아 동일온도조건에서 전자 세라믹이 후자세라믹에 비하여 열응력을 5배 정도 높게 나타나나 열전도계수가 전자의 세라믹에 비하여 후자의 세라믹이 52배 정도 낮아 동일 열량에서 전자가 후자에 비하여 온도를 상승시키지 못하여 동일 열적 환경하에서 코제라이트 세라믹 담체에 비하여 SiC 세라믹 담체가 열응력을 적게 발생시킨다.

이상의 세가지 원인으로 SiC 세라믹 담체는 코제라이트 세라믹 담체에 비하여 발생 열응력은 낮고 설계 강도는 증가되어 안전율이 크게 증가되어 기존의 코제라이트 세라믹 담체가 일으키는 조기 파손 사고를 충분히 예방할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

SiC 세라믹을 사용하는 삼원촉매변환기용 하니컴 담체에 대해 두 가지 확률적 설계 모델을 제시하고 열적 내구성을 평가하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 차량실내시험과 차량주행시험에서 SiC 세라믹 담체에서 발생하는 모든 방향의 열응력이 먹급수동

적피로손상모델과 강도저하계수모델에 의한 설계 강도 아래에 존재하고 있어 기존의 코제라이트 세라믹 담체의 조기 파손 사고를 예방할 수 있다.

(2) 타원형 코제라이트 세라믹 담체의 경우 접선 방향과 축방향 열응력의 경우 고속주행구간에서는 설계 강도를 초과하고 있어 설계 강도로 접선 방향과 축방향 열응력을 동시에 고려해야 하나 SiC 세라믹 축매 담체의 경우 축방향 열응력이 반경 및 접선 방향 열응력보다 훨씬 더 설계 강도 근처에 접근하고 있으므로 간단하게 축방향 열응력만을 설계 강도로 설정해야 한다.

(3) 파손확률은 동일하중조건에서 SiC 세라믹 담체가 코제라이트 세라믹 담체에 비하여 4.7배 정도 낮출 수 있다.

(4) 파손확률에 의한 안전율은 동일하중조건에서 SiC 세라믹 담체가 코제라이트 세라믹 담체에 비하여 16.3배 정도 높으며 그 원인으로 전자 담체가 후자 담체에 비하여 재료 자체와 구조체로서의 강도가 높게 나타나고 열응력이 낮게 발생되기 때문이다.

#### 참고문헌

- [1] R. J. Clarkson, S. F. Benjamin, T. S. Jasper, and N. S. Girls, "An Integrated Computational Model for the Optimisation of Monolith Catalytic Converters," *SAE Paper No. 931071*, 1993.
- [2] S. T. Gulati, "Design Considerations for Advanced Ceramic Catalyst Supports," *SAE Paper No. 2001-01-0493*, 2001.
- [3] G. Pontikakis, and A. Stamatelos, "Three-Dimensional Catalytic Regeneration Modeling of SiC Diesel Particulate Filters," *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 128, No. 2, pp. 421-433, 2006.
- [4] S. H. Baek, and S. S. Cho, "An Effective Approach of Equivalent Elastic Method for Three-Dimensional Finite Element Analysis of Ceramic Honeycomb Substrates," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 35, No. 3, pp. 223-233, 2011.
- [5] S. H. Baek, H. J. Choi, K. H. Kim, and S. S. Cho, "Identification of Thermal Flow Boundary Conditions For Three-way Catalytic Converter Using Optimization Techniques," *Trans. of KAIS*, Vol. 11, No. 9, pp. 3125-3134, 2010.
- [6] H. J. Choi, "An Estimation of Thermal Fatigue in Three-way Catalyst Using Thermal Flow and Structural Analysis," *Dept. of Vehicle Eng., Graduate School of Industry Science, Kangwon national university, Master Thesis*, p. 75, 2010.