

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.2.129

세라믹 모노리스 담체의 열충격 특성에 관한 연구

백석흠* · 박재성** · 김민건*** · 조석수****†

* 동아대학교 기계공학과, ** 강원대학교 산업과학대학원, *** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부, **** 강원대학교 기계자동차공학부

A Study on Thermal Shock of Ceramic Monolithic Substrate

Seok-Heum Baek*, Jae-Sung Park**, Min-Gun Kim*** and Seok-Swoo Cho****†

* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

** Dept. of Vehicle Engineering, Graduate School of Industry & Science, Kangwon Nat'l Univ.

*** Dept. of Mechanical & Biomedical Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

**** Dept. of Vehicle Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received June 12, 2009 ; Revised December 8, 2009 ; Accepted December 8, 2009)

Key Words: Ceramic Monolithic Substrate(세라믹 모노리스 담체), Transient Thermal Stress(비정상 열응력), Thermal Shock(열충격), Critical Temperature Difference(임계온도차이)

초록: 공업용 세라믹은 자체의 특이한 물리적 특성으로 인하여 극한의 열 및 화학적 환경에서도 적용할 수 있는 우수한 고온 재료이다. 세라믹은 고온에서 저온으로 빠르게 이동되면 열충격을 받는다. 본 연구에서는 열충격에 대한 매개변수로 임계온도차이를 제안한다. 세라믹 부품에 대한 임계온도차이는 부품 크기와 대류열전달계수에 의해 영향을 받는다. 부품의 열충격 특성은 비정상 열응력에 의해 평가된다. 비정상 열응력이 파단계수를 초과한다면 열충격 균열이 표면에서 시작된다고 가정할 수 있다. 물에 대한 임계온도차이는 공기에 대한 임계온도차이보다 적다. 본 연구에서 사용된 국내 승용차용 삼원 촉매 담체는 반경 및 축방향 온도차이가 임계온도차이 아래에 존재하므로 충분한 열충격 성능을 가지고 있었다.

Abstract: Technical ceramics, due to their unique physical properties, are excellent candidate materials for engineering applications involving extreme thermal and chemical environments. When ceramics are rapidly cooled, they receive thermal shock. The thermal shock parameter is defined as the critical temperature difference. The critical temperature difference for ceramic parts is influenced by its size, the convective heat transfer coefficient, etc. The thermal shock for a component is analyzed by using the transient thermal stress. If the transient thermal stress exceeds the modulus of rupture (MOR), cracking by thermal shock is initiated. The critical temperature difference for water is less than the critical temperature difference for air. The three-way catalyst substrate used in this study has an adequate performance against thermal shock because its radial and axial temperature differences existed below the critical temperature differences.

1. 서 론

세라믹 모노리스 담체에 대한 열충격(thermal shock) 시험법에 대한 접근은 (1) Gulati 등이 제안하는 방법⁽¹⁾과 (2) ASTM C1525에서 제안하는 표준시험방법⁽²⁾으로 분류할 수 있다.

전자의 대표적인 시험법 중에 Maremont 열충격 시험법은 시간에 따른 온도 부하 사이클이 10회이고, 오븐 열충격 시험법은 시간에 따른 온도 부하 사이클이 3회이다. 두 시험법 모두 측정 온도 구간

이 50°C이다. 그러나 ASTM 열충격 시험법은 시간에 따른 온도 부하 사이클이 1회이고, 온도차이-잔류강도 선도에서 상온 파단계수(modulus of rupture)의 70%에 해당하는 굽힘강도를 나타내는 온도를 임계온도차이(critical temperature difference)로 정의하고 있다. 역학적 관점에서는 열충격 시험에 대한 엄격한 기준은 ASTM 시험법으로 볼 수 있다. 그러나 2007년 현재까지 세라믹 모노리스 담체의 경우 오븐 열충격 시험법이 여전히 사용되고 있다. 만약 열충격에 대하여 완화된 설계 기준으로 세라믹 모노리스 담체가 제작된다면 열충격은 발생되지 않더라도 반복 열충격에 의한 열피로 현상이 나타날 수

† Corresponding Author, sscho394@kangwon.ac.kr

있다. 실제 현장에서는 자동차용 삼원촉매변환기의 파손사고가 빈번하게 발생되고 있다.

Gulati 등⁽³⁾은 세라믹 모노리스 담체에 대한 오븐 열충격 시험을 수행하여 담체 내부와 외부 영역의 온도 분포를 측정하고 이것을 기초로 단순 열응력 모델을 제안하였다. 또한 담체의 열팽창량과 탄성계수 및 파단계수를 기초로 열충격파라미터(thermal shock parameter)를 제안하였다.⁽⁴⁾ 그러나 제안된 파라미터는 원형 담체를 기초로 제안된 식으로서 타원형 담체에 대해 적용하기에는 부적절하며 실차 온도 분포 데이터를 기초로 파단계수나 탄성계수 및 열팽창계수를 사용 온도 구간의 평균치를 적용하여 열충격파라미터를 계산하고 있다. 따라서 임계열충격파라미터는 사용 온도에 대한 파라미터 값에 의하여 지배되기 보다는 사용 온도 영역에 대한 파라미터의 평균값에 의하여 지배된다. 이러한 열충격에 대한 임계 파라미터의 정의는 열응력에 미치는 시험편 크기, 대류열전달계수, 열전도계수 등에 영향을 반영하지 못함으로써 열충격 환경을 둘러싼 경계조건이 바뀌게 되면 임계열충격파라미터도 변하게 되어져 일의적 파라미터로서의 의미를 갖지 못하게 된다.⁽⁵⁾ 이러한 문제로 인하여 열충격 파라미터의 정의대로라면 임계열충격파라미터가 1이 되면 부품이 파손되어야 하나 실험에서는 평균 0.82의 값을 가지고 있어 18% 정도의 평가 오차가 발생하고 있다.⁽⁶⁾ Hasselman 등⁽⁷⁾은 시험편의 특성 길이, 대류열전달계수, 열전도계수에 기반을 둔 열충격파라미터로서 임계온도차이를 제안함으로써 임계열응력에 열전달과 치수효과를 고려하여 상기 문제의 해결 방향을 제시하였다. 한편, Legendre 등⁽⁸⁾은 열응력을 제한된 경계조건하에서 Biot 수에 따른 열응력을 수식화시켰으나, 열응력이 경계조건에 대한 민감도가 높아 모든 공학적 응용에 적합하지 않다. 따라서 임의의 경계조건을 가지는 부품의 열충격은 부품의 구조 설계 관점에서 접근할 필요가 있다.

본 논문에서는 삼원촉매변환기의 열충격 특성을 파악하기 위하여 담체에 대한 비정상 열전달해석을 수행한 뒤 담체의 온도 분포를 기초로 비정상 열응력(transient thermal stress)을 계산하였다. 또한, 각 켄칭 온도에 따른 비정상 열응력이 담체의 파단계수에 도달할 때를 담체가 열응력에 의해 파손된다고 가정하여 담체의 임계온도차이를 제안하였다. 그리고 실차주행시험을 실시하여 삼원촉매변환기용 담체의 열충격 안전성을 임계온도차이를 이용하여 평가하였다.

2. 열충격 해석

2.1 열충격 파라미터

열충격 조건하에서 세라믹 재료의 상대적 성능을 기술하기 위하여 몇 개의 열충격파라미터가 제안되고 있다. 본 논문에서는 세라믹 모노리스 담체의 파손 조건으로서 일반적인 급속열충격파라미터 보다는 임계온도차이 ΔT_c 를 사용하여 삼원촉매변환기의 안전성을 평가한다.⁽²⁾

$$\Delta T_c = \frac{\sigma_c(1-\nu)}{E\alpha f(\beta)} \quad (1)$$

여기서 σ_c : 균열 발생 또는 파손 임계응력, ν : 푸아송 비, E : 탄성계수, α : 열팽창계수, $f(\beta)$: Biot 수 $\beta(= \frac{Lh}{k})$ 에 의한 함수, L : 담체 특성 길이, h : 담체와 냉각 유체사이의 대류열전달계수, k : 세라믹 담체의 열전도계수이다.

2.2 열전달해석

세라믹 모노리스 담체는 엔진 시동시 강제 대류에 의한 열전달이 일어나고 엔진 종료시 자연 대류에 의한 열전달이 일어난다. 그러나 열충격은 엔진 종료시 발생하는 자연대류에 의한 열전달에 의해서 일어나므로 세라믹 모노리스 담체의 열전달 해석조건으로 자연 대류에 의한 열전달만 고려하기로 한다. 다음 식 (2)~(3)은 정지된 유체에 잠겨진 평판에서의 평균 대류열전달계수 h 를 나타낸 것이다.⁽⁹⁾

$$Nu = \frac{Lh}{k} = C(Ra)^n = C(GrPr)^n \quad (2)$$

$$h = \frac{C(GrPr)^n k}{L} = C \left(\frac{g\beta(T_Q - T_R)L^3}{\nu^2} \right)^n \left(\frac{\mu C_{pf}}{k_f} \right)^n \frac{k_f}{L} \quad (3)$$

여기서 g : 중력가속도 (9.81 m/s²)

β : 유체의 체적팽창계수

Gr : Gr 수

Pr : Pr 수

k_f : 유체의 열전도계수

ν : 유체의 동점성계수

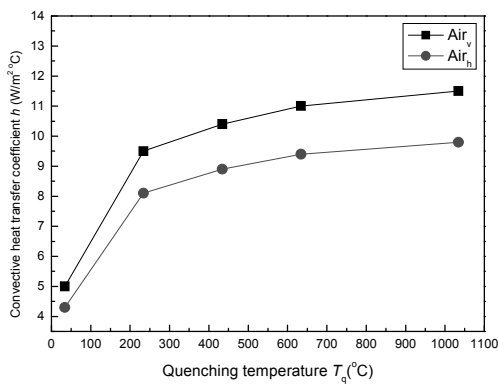
μ : 유체의 점성계수

C_{pf} : 유체의 정적 비열

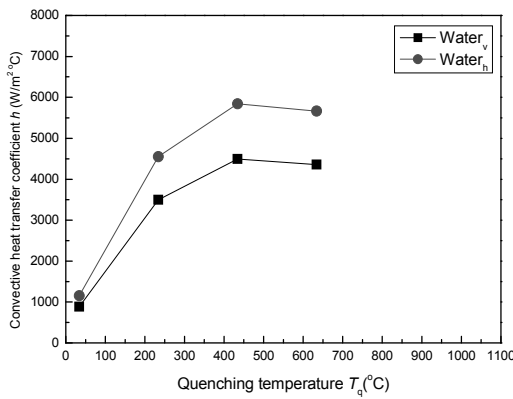
C, n : $GrPr$ 수에 의존하는 상수

Table 1 Constants and exponents in Eq. (2)~(3)

Cylinder type	Flow type	$GrPr$	C	n
Horizontal	Laminar flow	$10^4 \sim 10^9$	0.53	1/4
Horizontal	Turbulent flow	$10^9 \sim 10^{13}$	0.13	1/3
Vertical	Laminar flow	$10^4 \sim 10^9$	0.59	1/4
Vertical	Turbulent flow	$10^9 \sim 10^{13}$	0.10	1/3



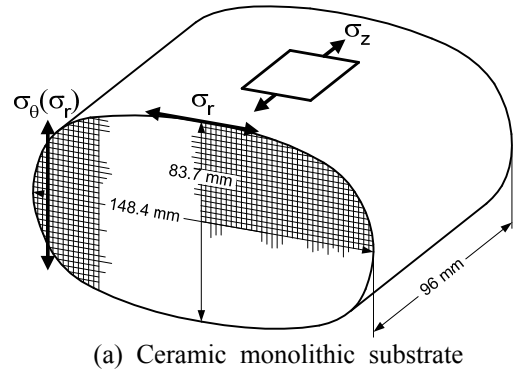
(a) Air



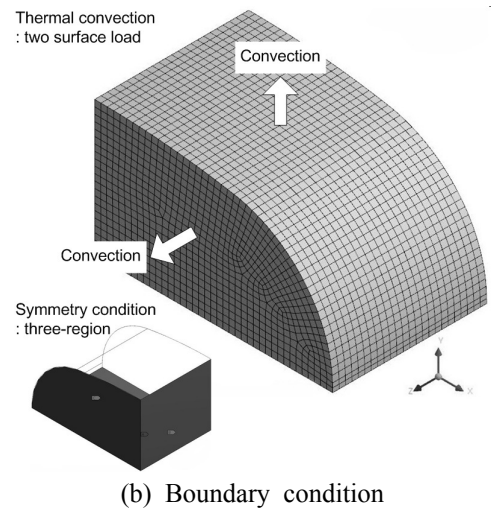
(b) Water

Fig. 1 Convective heat transfer coefficient of ceramic honeycomb substrate in cooling

세라믹 담체를 수직(vertical)과 수평(horizontal)의 실린더로 가정하는 경우, 임계 $GrPr$ 수($=10^9$)를 기준으로 유체 유동 형태를 분류한 후에 Table 1의 McAdams⁽¹⁰⁾가 제안한 실험 상수 C 와 지수 n 을 사용하여 식 (3)을 계산하여 대류열전달계수를 구하였다. 세라믹 모노리스 담체가 공기에 노출될 경우 $GrPr$ 수가 9.9×10^6 에서 8.5×10^6 의 범위에 있어 유동 형태는 층류에 해당된다. 따라서 공기의 경우 실험상수 C 와 n 은 각각 0.53, 0.59



(a) Ceramic monolithic substrate



(b) Boundary condition

Fig. 2 Finite element model for heat transfer and thermal stress analysis

와 1/4을 사용한다. 그러나 세라믹 모노리스 담체가 물에 노출될 경우 $GrPr$ 의 값이 2.7×10^9 에서 1.2×10^{12} 의 범위에 있어 유동 형태는 난류에 해당한다. 따라서 물의 경우 실험상수 C 와 n 은 각각 0.13, 0.1과 1/3을 사용한다.

Fig. 1은 담체의 쿨링 온도에 따른 대류열전달계수를 쿨링 유체에 따라 나타낸 것이다. 대류열전달계수는 Table 1과 식 (3)에 의하여 구하였다. 공냉과 수냉에서 각각 5가지, 4가지 대류열전달계수를 선택하여 유한요소해석에 적용하였다.

3. 유한요소해석과 실차주행시험

3.1 유한요소해석

Fig. 2는 세라믹 모노리스 담체의 비정상 열전달 및 열응력을 계산하기 위한 1/8 유한요소모델과 그 경계조건을 나타낸 것이다. 유한요소해석에는 ANSYS Workbench V11⁽¹²⁾를 이용하였고 대류열전달은 SURF152 요소에 의해 표면에 분포

Table 2 Mechanical properties of ceramic substrate

Longitudinal elastic modulus			Shear elastic modulus			Poisson's ratio		
E (GPa)			G (GPa)			ν		
Radial	Tangential	Axial	Radial	Tangential	Axial	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{zx}
E_r	E_θ	E_z	G_r	G_θ	G_z			
2.5	2.5	4.3	0.6	0.6	1.4	0.22	0.3	0.3

Table 3 Thermal properties of ceramic substrate

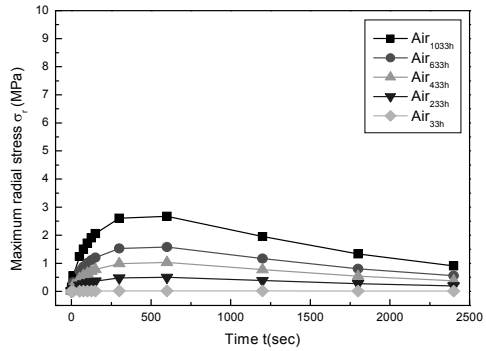
Properties	Radial direction	Axial direction
Density ρ (kg/m ³)	513	
CTE α (1/°C)	6×10^{-7}	
Thermal conductivity k (W/m°C)	0.3	0.5
Specific heat C (J/kg°C)	1047.2	

하중으로 적용된다. 열전달 및 열응력 해석에 사용한 요소는 SOLID90과 SOLID186이고, 요소 및 절점수는 각각 64,232개와 271,137개이다.

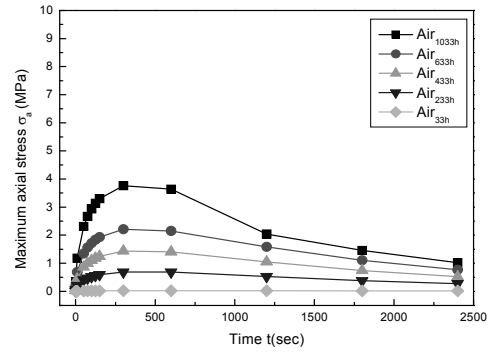
Table 2는 세라믹 담체의 기계적 특성치를 나타낸 것이다.⁽¹¹⁾ 담체는 압출이라는 제조 방법과 재료의 물리적 구조에 의하여 이방성이 존재하므로 축방향과 반경방향(또는 접선방향) 성분의 기계적 특성치는 다르게 나타난다. 즉, 축방향 탄성계수는 반경방향 탄성계수에 비하여 1.72배 정도 크다. 이러한 경향은 수치적으로 차이가 있지만 전단탄성계수와 포아송 비에서도 나타나고 있다. 그러나 반경방향과 접선방향의 기계적 특성치는 동일하게 나타나고 있다. 이것은 압출이라는 제조 방법과 재료의 물리적 구조가 반경 및 접선방향에서 동일하게 나타나기 때문이다. Table 3은 세라믹 담체의 열적 특성치를 나타낸 것이다.⁽¹¹⁾ 밀도, 열팽창계수, 비열은 등방성을 유지하고 있으나 열전도계수는 축방향이 반경방향에 비하여 1.67배 정도 더 크다.

Fig. 3과 4는 각 쿨칭 유체에 대한 시간에 따른 비정상 열응력을 나타낸 것이다. 비정상 열응력은 공냉의 경우 시간에 따라 열응력이 증가하다가 대략 250초를 경과하면 오히려 열응력이 감소하게 된다. 또한, 수냉의 경우 매우 짧은 시간에 열응력이 증가하다가 대략 10초를 경과하면 열응력은 감소하게 된다. 즉, 공냉과 수냉의 대류열전달계수의 차이에 의하여 전자는 후자에 비하여

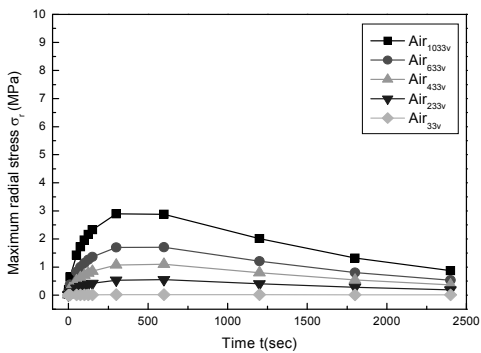
시간에 따른 온도 강하가 적기 때문에 시간에 따른 열응력의 증가도 적게 나타나는 것으로 생각된다. 한편, 냉각 초기를 제외한 시간 영역에서의 열응력은 시간에 따라 열응력이 감소하고 있고 수냉의 모든 해석 조건의 경우 대략 2,500초 이상에서 거의 0에 접근하고 있다. 또한, 공냉의 모든 해석 조건의 경우, Fig. 4에서 제시하지 않았지만 대략 3,700초 이상에서 열응력이 0에 접근하고 있다. 따라서 열충격에 의한 파손은 냉각 초기에 집중적으로 발생되고 있어 안전성 평가에 사용할 부품의 사용 응력으로서 냉각 초기에 발생하는 최대 응력을 고려해야 한다. 냉각 방법에 따른 열응력의 효과를 보면 수직 낙하법(담체를 수직으로 냉각 유체에 낙하시키는 방법)은 수평 낙하법(담체를 수평으로 냉각 유체에 낙하시키는 방법)에 비하여 0.92~1.11배 정도도 크므로 큰 차이를 발생시키지 않는다. 또한, 수냉에 의한 최대 열응력은 공냉에 의한 열응력에 비하여 1.84~2.37배 정도 더 크다. 이러한 결과는 물에 의한 대류 열전달계수가 공기에 의한 대류열전달계수보다 크기 때문이다. 한편, 열응력에 미치는 방향성의 효과를 보면 담체의 구조적 형상 특성 때문에 쿨칭 유체에 관계없이 반경방향 응력보다 축방향 응력이 1.3~1.77배 이상 크게 발생하고 있다. 따라서 담체에서 발생하는 열응력은 수냉하의 축방향 응력에서 최대가 된다. 식 (1)에서 제안된 임계온도차이 ΔT_c 는 $f(\beta)$ 에 크게 의존한다.⁽¹³⁾ 특히



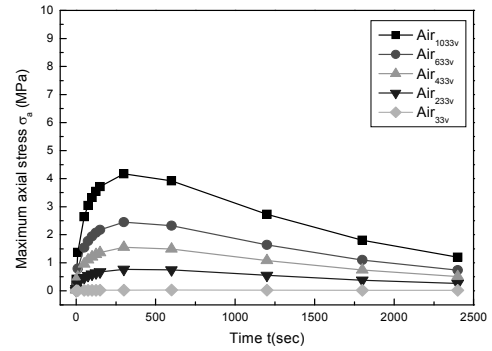
(a) Radial direction at horizontal quenching



(b) Axial direction at horizontal quenching

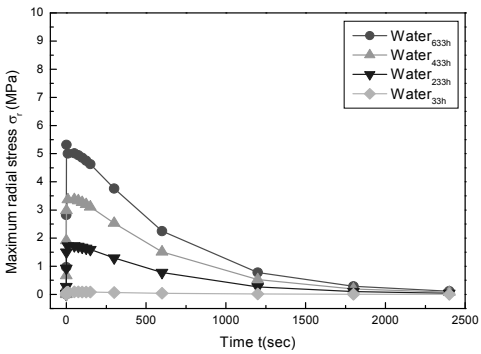


(c) Radial direction at vertical quenching

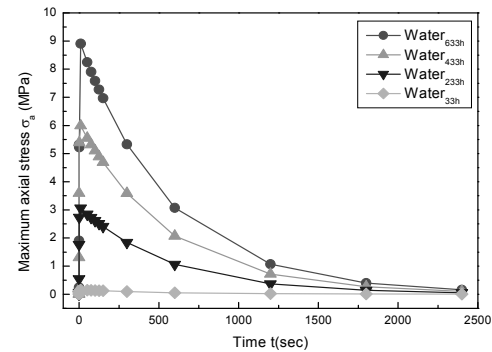


(d) Axial direction at vertical quenching

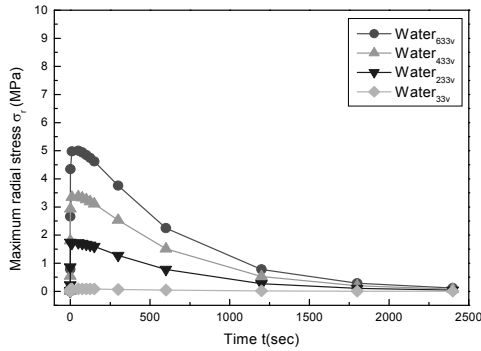
Fig. 3 Transient thermal stress vs. time for air quenching



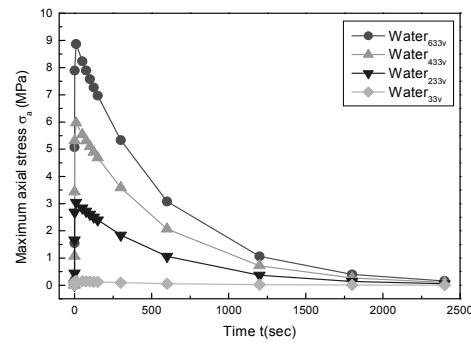
(a) Radial direction at horizontal quenching



(b) Axial direction at horizontal quenching



(c) Radial direction at vertical quenching



(d) Axial direction at vertical quenching

Fig. 4 Transient thermal stress vs. time for water quenching

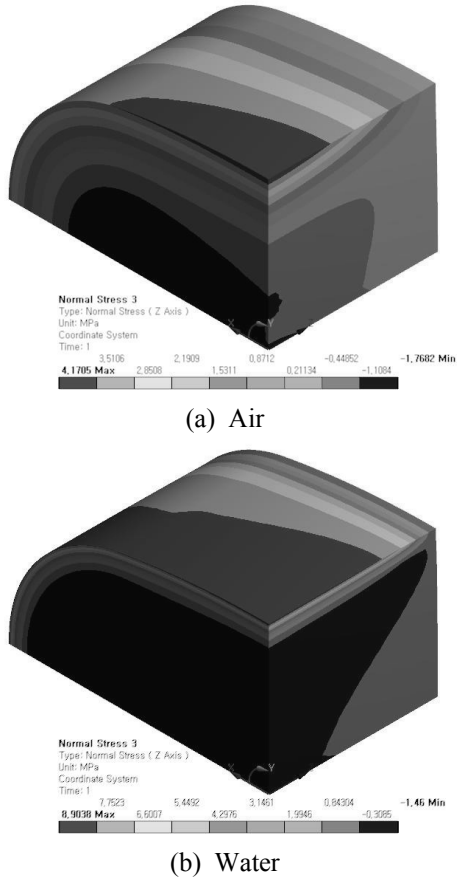


Fig. 5 Maximum thermal stress distribution in three-way catalyst substrate

Boit 수 $\beta (= Lh/k)$ 는 시험편의 특성 길이, 표면열전달계수 및 열전도계수에 따라 달라진다. 또한 특성 길이는 부품 크기에 의존하고 표면열전달계수 및 열전도계수는 부품의 가열온도 및 냉각온도에 의존하게 된다. 따라서 식 (1)을 이용하여 부품의 임계온도차이 ΔT_c 를 파악하는 것은 불가능하므로 부품 구조 설계 관점에서의 비정상 열응력 설계 개념이 필요하다. 즉, 비정상 열응력에 의한 균열은 표면에서 시작되므로 표면 온도에서의 응력이 해당 온도에서의 과단계수(modulus of rupture: MOR)에 도달될 때 부품은 파손된다고 가정할 수 있다. 이러한 개념은 해당 부품의 임계온도차이 ΔT_c 를 부품의 열충격 설계 및 안전성 평가에 응용할 수 있다.

Fig. 5는 각 켄칭 유체에서 최대 열응력을 보는 지점에서의 유한요소해석결과를 나타낸 것이다. 최대 비정상 열응력이 담체 중앙 영역의 표면에서 발생되고 있고 수냉이 공냉보다 더 큰 응력을 발생시키고 있다.

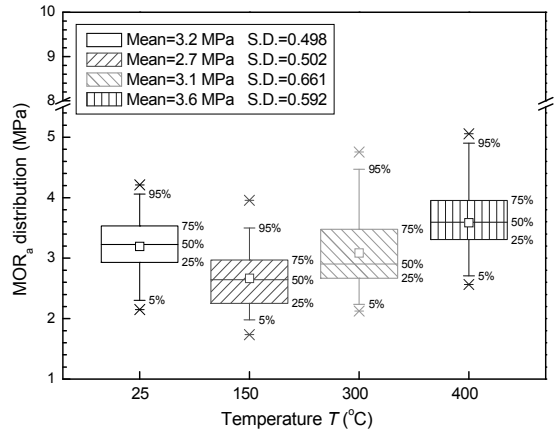


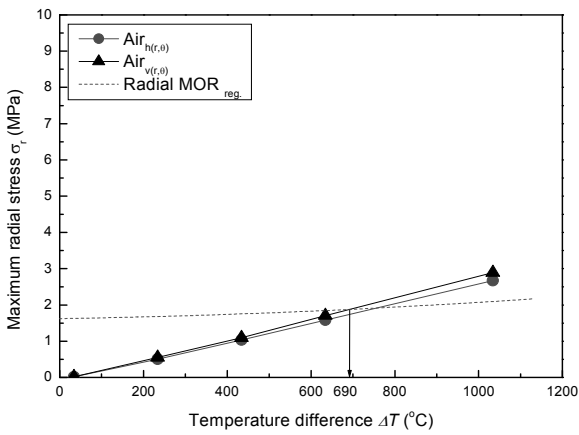
Fig. 6 MOR_a distribution for three-way catalyst substrate

Fig. 6은 삼원촉매변환기용 담체의 MOR을 각 시험 온도에 대하여 나타낸 것이다.⁽¹⁴⁾ 시험 온도 중에 150°C에서 MOR이 약간 저하되다가 300°C 이상에서는 오히려 강도가 증가하고 있다. 일반 구조용 강철의 경우 온도가 증가함에 따라 설계 강도가 저하하지만 고온용 구조 재료인 코제라이트 세라믹의 경우 사용 온도 영역에서의 MOR은 오히려 증가하고 있다. 따라서 열충격을 받는 부품 강도는 표면 온도 의존성이 강하게 나타나고 있다. 한편, 반경방향 과단계수 MOR_r은 시험 온도 25°C~800°C사이에서 축방향 과단계수 MOR_a의 42%~50% 사이에 존재하고 있다.⁽⁶⁾ 따라서 Fig. 8에서 제시되지 않은 MOR_r은 부품의 안전성을 확보한다는 측면에서 MOR_a의 42%로 설정하였다. 또한, 열충격 균열은 표면온도가 고온에서 상온으로 천이되는 과정에서 발생되므로 임계온도 T_c 는 부품의 열응력이 켄칭 온도에서의 MOR 평균값에 도달될 때의 온도로 가정한다.

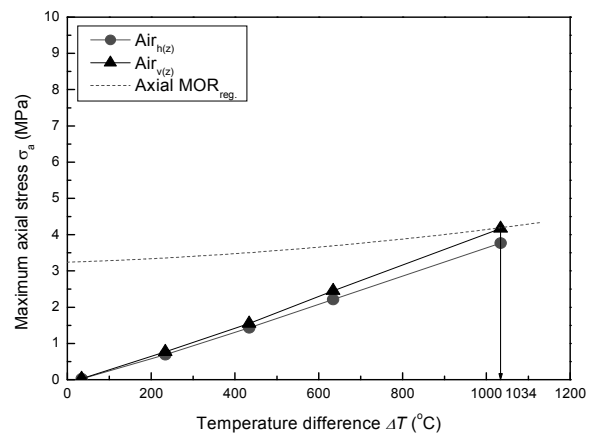
Fig. 7은 켄칭 온도에서 켄칭 유체 온도(공기와 냉각수 온도)를 켄 온도 차이를 변수로 하여 Fig. 3, 4에서 구한 최대 열응력을 나타낸 것이다. 점선은 Fig. 6의 MOR_a와 MOR_r 평균값을 회귀시켜 나타낸 것으로 열응력 해석값이 회귀값을 초과하면 열충격이 발생하게 된다. 따라서 임계온도차이는 MOR 회귀값과 열응력이 동일하게 되는 지점의 온도 차이로 정의할 수 있다. 담체의 공기에 대한 임계온도차이는 반경방향의 경우 690°C, 축방향의 경우 1,034°C에 존재한다. 담체의 물에 대한 임계온도차이는 반경방향의 경우 230°C, 축방향의 경우 255°C에 존재한다. 따라서 담체의

Table 4 Vehicle driving test conditions

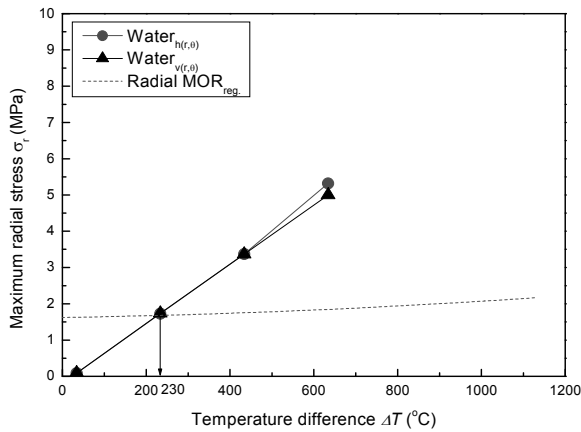
Vehicle driving test	Driving section	Temperature (°C)	Humidity (%)	Driving distance (km)	Driving speed (km/hr)
1	National road No.7	21	65	12	80
	Seoul-Donghae expressway	21	65	53	100~170
2	National road No.7	21	65	57	60~80



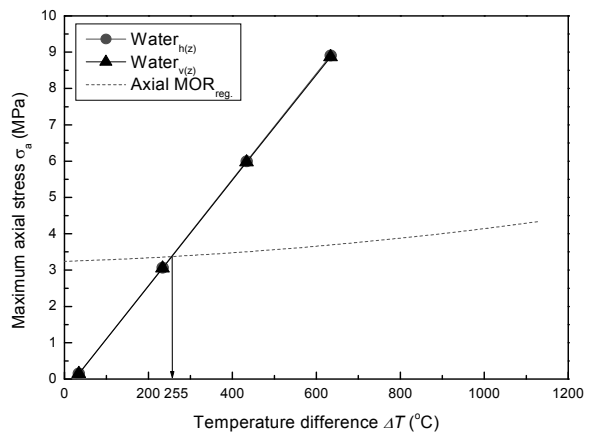
(a) Radial direction at air



(b) Axial direction at air



(c) Radial direction at water



(d) Axial direction at water

Fig. 7 Maximum thermal stress vs. quenching temperature difference

공기와 물에 대한 임계온도차이는 각각 690°C, 233°C로 설정할 수 있다.

ASTM C1525에서 제안하는 임계온도차이는 쿨링 유체로 물을 사용하고 있어 Fig. 7의 결과에 의하면 보수적 열충격 설계 방법인 것으로 평가된다. 따라서 자동차와 같이 경량화 및 다운사이징(downsizing)을 요구하는 부품에 ASTM C1525를 적용하기 어렵다. 본 논문에서는 담체의 열충격 환경이 자동차 배기가스라는 것을 고려하면

공기 중에서의 임계온도차이를 실제 담체의 임계온도차이로 가정할 수 있다. 따라서 담체 부품에 대한 임계온도차이는 690°C 이다.

Fig. 8은 각 제조회사에서 제공하고 있는 코제라이트 세라믹의 열충격에 대한 임계온도차이를 나타낸 것으로 대략 1079°C에서 1239°C의 범위에 존재하고 있다. 코제라이트 세라믹 모노리스 담체는 코제라이트 세라믹 재료에 대한 임계온도차이보다 최대 57%까지 감소하고 있다. 이러한 결과

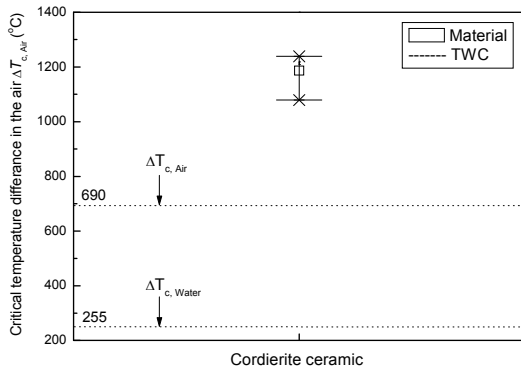


Fig. 8 Comparison of ceramic monolithic substrate and material specimen critical temperature difference

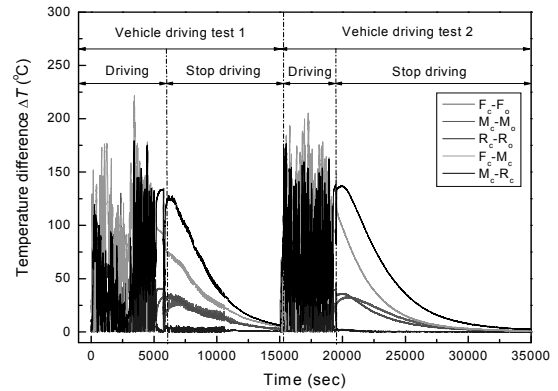


Fig. 10 Temperature difference as a function of time

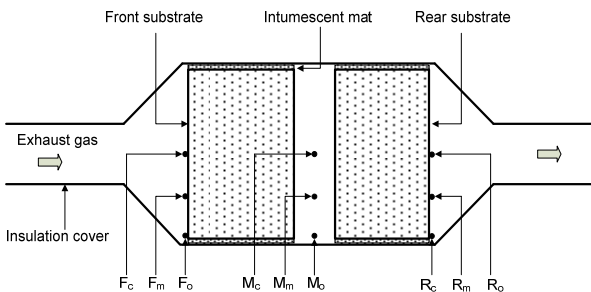
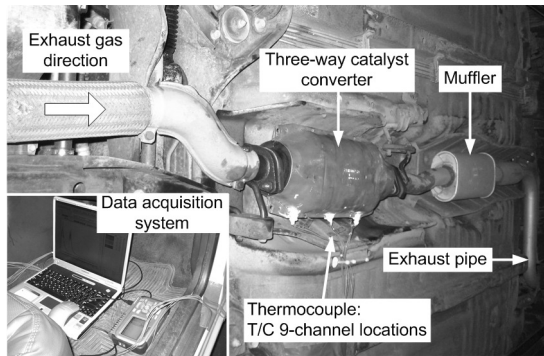
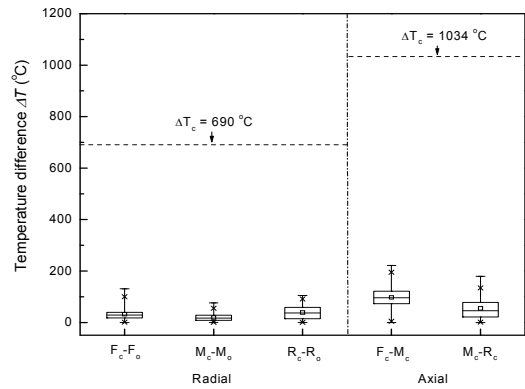
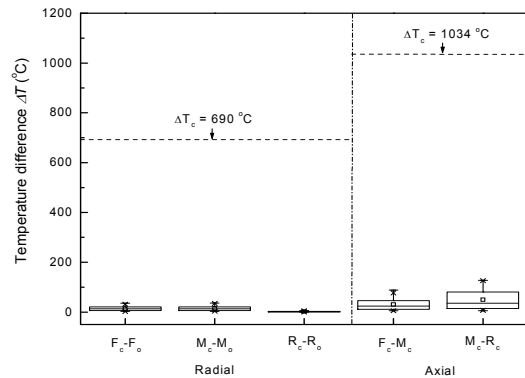


Fig. 9 Experimental layout for test vehicle. Temperature measurement locations of three-way catalyst substrate

는 다공성 부품의 제조 특성으로 인하여 셀 두께 (cell thickness)가 감소하면 열응력이 상당히 감소되어 담체에 대한 임계온도차이는 재료에 대한 임계온도차이와 큰 차이를 보이지 않을 수도 있으나 셀에 포함된 공기의 정체로 인해 세라믹 담체의 표면과 내부사이의 온도 차이가 재료 시험편 내부와 외부사이의 온도 차이보다 크게 되기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 열응력을 받는 다공성 부품의 경우 강도에 미치는 부품의 치수 효과가 강하게 나타남을 알 수 있다. 즉, 다공성 세라믹 부품의 구조 설계시 세라믹 제조 회사에서 제공하는 최고사용온도를 그대로 사용하면



(a) Driving



(b) Stop driving

Fig. 11 Temperature difference distribution of three-way catalyst substrate during proving test

상당한 구조적 위험 인자가 해당 부품에 포함되므로 부품의 열응력 해석에 의한 임계온도차이에 대한 규명이 필요할 것으로 생각된다.

3.2 실차주행시험

국내 제작 차량인 SONATA II (SIRIUS 2.0)를 이용하여 삼척-강릉 구간의 7번 국도와 동해고속도로에서 실차주행시험을 수행하였다.⁽¹⁵⁾ Fig. 9는

실차주행시험에서 삼원촉매변환기의 반경방향과 축방향 온도 차이를 구하기 위한 온도 측정 지점을 나타낸 것이다. Fig. 10은 삼원촉매변환기용 담체의 반경과 축방향 온도 차이를 나타낸 것이다. 담체의 실제 열충격 환경은 엔진 정지시 이후에 발생되나 본 논문에서는 차량 주행시의 반경 및 축방향 온도 차이도 함께 고려하였다.

Fig. 11은 차량 주행과 차량 정차시 이후의 온도 차이 데이터를 최소값과 최대값 및 평균값으로 나타낸 것이다. 주행시 온도 분포는 열충격 온도 분포와 달라 열충격 임계온도차이로 열적 안전성을 평가하기에는 무리가 있으나 주행시험 시간 동안의 온도 차이는 열충격 임계온도차이보다 적다. 또한, 주행시의 온도 차이는 정차시의 온도 차이에 비하여 평균 및 분산 모두 더 크다. 정차시의 반경과 축방향 온도 차이는 반경과 축방향 열충격 임계온도차이보다 적어 본 논문에서 평가한 삼원촉매변환기용 담체는 충분한 열충격 강도를 가지고 있다.

4. 결 론

삼원촉매변환기의 열충격 특성을 조사하기 위해 세라믹 모노리스 담체의 비정상 열응력 해석을 수행하고 이의 구조설계 관점에서 담체 부품의 열충격 설계를 위한 임계온도차이를 제안하였다. 담체 벽면의 열충격 설계 지침을 유도해 내기 위해, 시간에 따른 반경방향 열응력과 축방향 열응력의 영향을 분석한 후 열응력과 온도 변화에서 담체 부품의 열충격 경계조건을 설명하였다. 중요한 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 수냉에 의한 최대 열응력은 공냉 열응력에 비하여 대류열전달계수의 차이에 의하여 최대 2.37배 정도 더 크다.

(2) 축방향 열응력은 세라믹 담체 형상 특성 때문에 공냉과 수냉에 관계없이 반경방향 열응력에 비하여 최대 1.77배 정도 더 크다.

(3) 비정상 열응력 해석에서 구한 공냉과 수냉의 최대 열응력이 4점 굽힘 시험에서 구한 MOR과 동일하게 되는 값을 임계온도차이로 정의하였다. 세라믹 모노리스 담체의 임계온도차이는 반경방향과 축방향의 경우 각각 690℃, 1,034℃이므로 담체 부품에 대한 임계온도차이는 690℃이다.

(4) 셀에 포함된 정제된 공기로 인하여 코제라

이트 세라믹 모노리스 담체의 임계온도차이는 코제라이트 세라믹 재료의 임계온도차이에 비하여 최대 57%정도 감소된다.

(5) 실차주행 시험에서 차량 정차 이후의 담체의 반경방향과 축방향의 온도 차이는 임계온도차이 아래에 존재하고 있어 충분한 열충격 강도를 가지고 있다.

후 기

본 연구는 2008년도 강원대학교 캠퍼스간 공동연구비로 연구하였으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Gulati, S. T., Widjaja, S., Hampton, L. E. and Roe, T. A., 2003, "Factors Affecting Severity of Oven Shock Test for Ceramic Substrates," SAE Paper No. 2003-01-3074.
- (2) ASTM Standard C1525-04, 2004, *Standard Test Method for Determination of Thermal Shock Resistance for Advanced Ceramics by Water Quenching*, ASTM International, pp. 1~8.
- (3) Gulati, S. T., 1983, "Thermal Stresses in Ceramic Wall Flow Diesel Filters," SAE Paper No. 830079.
- (4) Gulati, S. T., 1999, "Performance Parameter for Advanced Ceramic Catalyst Supportsts," SAE Paper No. 1999-01-3631.
- (5) Hugot, F. and Glandus, J. C., 2007, "Thermal Shock of Alumina by Compressed Air Cooling," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 27, pp. 1919~1925.
- (6) Gulati, S. T., Cooper, B. J., Hawker, P. N., Douglas, J. M. K. and Winterborn, D. J. W., 1991, "Optimization of Substrate Washcoat Interaction for Improved Catalyst Durability," SAE Paper No. 910732.
- (7) Singh, J. P., Tree, Y. and Hasselman, D. P. H., 1981, "Effect of Bath and Specimen Temperature on the Thermal Stress Resistance of Brittle Ceramics subjected to Thermal Quenching," *Journal of Materials Science*, Vol. 16, pp. 2109~2118.
- (8) Legendre, B. and Osterstock, F., 1997, "On the

- Quantification of Quenching Transient Thermal Stresses in Brittle Solids using Vickers Indentations," *Journal of Materials Science*, Vol. 16, pp. 584~587.
- (9) Ozyener, T., Satyamurthy, K., Knight Charles Eugeng, Jitendra P. S., Hasselman, D. P. H. and Ziegler, G., 1982, "Effect of ΔT -and Spatially Varying Heat Transfer Coefficient on Thermal Stress Resistance of Brittle Ceramics Measured by the Quenching Method," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 66, No. 1, pp. 53~58.
- (10) McAdams, W. H., 1954, *Heat Transmission, 3ed*, McGraw-Hill Inc., NewYork.
- (11) 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.
- (12) ANSYS User's and Theory Manual Version 11, 2008, ANSYS Inc.
- (13) Absi, J. and Glandus, J. C., 2004, "Improved Method for Severe Thermal Shocks Testing of Ceramics by Water Quenching," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, pp. 2835~2838.
- (14) Baek, S. H., Park, J. S., Choi, H. J., Cho, S. S. and Joo, W. S., 2008, "High Temperature Design Criteria of Cordierite Ceramic Substrate in Four-point Bending Test," *Proceedings of the KSME 2008 Spring Annual Meeting*, Pyeongchang, pp. 173~174.
- (15) Park, J. S., Cho, S. S., Kim, M. G., Shin, S. K. and Kwon, I. K., 2009 "A Study on Thermal Shock of Ceramic Monolithic Substrate," Proceedings of the KSME 2009 Spring Annual Meeting, Jeju, pp. 387~392.