

최적화 기법을 이용한 삼원촉매변환기의 열유동 경계조건의 동정

백석흠¹, 최현진², 김광홍³, 조석수^{4*}

¹동아대학교 기계공학과, ²강원대학교 산업과학대학원, ³한국전력연구원, ⁴강원대학교 자동차공학과

Identification of Thermal Flow Boundary Conditions for Three-way Catalytic Converter Using Optimization Techniques

Seok-Heum Baek¹, Hyun-Jin Choi², Kwang-Hong Kim³ and Seok-Swoo Cho^{4*}

¹Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

²Graduate School of Industry & Science, Kangwon National University

³APR 1400 NRC-DC Project Team, KEPCO Research Institute

⁴Department of Vehicle Engineering, Kangwon National University

요 약 한국에서 삼원촉매 내구성은 1988년에 5년/80,000 km 이지만 2002년 이후로 10년/120,000 km이 요구된다. 국내의 삼원촉매는 배출가스 정화효율이나 압력강하 등이 만족하지만 열적 내구성은 만족시키지 못하고 있다. 삼원촉매는 내부에서 높은 온도를 유지하지만 외부 표면에서는 낮은 온도를 유지한다. 본 연구는 열유동과 구조해석 및 다 음과 같은 과정에 의해서 열적 내구성을 평가하였다. 열유동 매개변수 범위는 차량시험과 열유동 해석에 의해 결정하였다. 후면 촉매 온도에 대한 반응 표면은 열유동 매개변수에 대한 실험계획법을 이용해 구성되었다. 차량시험에서 후면 촉매 온도에 대한 열유동 매개변수는 만족도 함수에 의해 예측하였다. 삼원촉매의 온도분포는 예측된 열유동 매개변수에 대한 열유동 해석에 의해 평가하였다.

Abstract Three-way catalyst durability in the Korea requires 5 years/80,000km in 1988 but require 10 years/120,000km after 2002. Domestic three-way catalyst satisfies exhaust gas conversion efficiency or pressure drop etc. but don't satisfy thermal durability. Three-way catalyst maintains high temperature in interior domain but maintain low temperature on outside surface. This study evaluated thermal durability of three-way catalyst by thermal flow and structure analysis and the procedure is as followings. Thermal flow parameters ranges were determined by vehicle test and basic thermal flow analysis. Response surface for rear catalyst temperature was constructed using the design of experiment (DOE) for thermal flow parameters. Thermal flow parameters for rear catalyst temperature in vehicles examination were predicted by desirability function. Temperature distribution of three-way catalyst was estimated by thermal flow analysis for predicted thermal flow parameters.

Key Words : Inverse Analysis, Design of Experiment, Desirability Function, Thermal-flow Boundary Condition, Three-way Catalytic Converter

1. 서론

배기가스 장치에 대한 기존의 연구는 삼원촉매변환기(three-way catalytic converter: TWC)의 형상 설계변수와 입출구각 및 촉매 성분에 따른 배기가스 유동이 배기가스 정화효율에 미치는 효율에 대한 것이 대부분이다. 따

라서 배기가스에 대한 열유동 특성을 균일도 관점에서 평가되었다[1-3]. 이 영역의 보고에서 Clarkson 등[6]은 촉매의 활성화 성능에 미치는 연소 반응의 영향을 평가 하여 일부 온도 영역에서의 발열 현상이 전체 열전달에 미치는 영향을 설명하였다. 이와 반대로, Gulati 등[7]은 촉매 활성화 계수, 촉매 변환 효율, 압력 강하 계수 등의

*교신저자 : 조석수(sscho394@kangwon.ac.kr)

접수일 10년 05월 26일

수정일 10년 09월 05일

게재확정일 10년 09월 08일

촉매 매개변수를 제안하여 강도 설계 관점에서 대상 엔진에 적합한 촉매를 선정하는 기준을 제시하였다. 국내의 삼원촉매변환기의 경우 배기가스 변환 효율이나 압력 강하 등은 엔진 효율 측면에서 만족되고 있지만 열적 내구성은 만족 되지 못하고 있어 자동차 검사 또는 정비 현장에서는 상당한 파손 사고가 보고되고 있다[8,9].

이러한 관점에서 세라믹 담체(ceramic substrate)에서 발생하는 열적 내구성을 평가하기 위한 접근으로는 열전달 방법(heat transfer method)과 열유동 방법(thermal flow method)이 있다. 전자는 담체 온도 분포를 직접 측정하여 열응력을 얻는다. 후자는 온도, 대류 열전달계수, 속도, 압력 등의 매개변수를 이용하여 담체의 온도 분포를 간접적으로 구하여 열응력을 계산할 수 있다. 열전달 방법은 담체 형상이 원형일 경우에는 매우 효과적이거나 타원형인 경우 비효율적이다. 조석수 등[8]은 담체를 단순 원형으로 가정하여 세라믹 담체에서 발생하는 열응력을 평가하였다. 그러나 실제 담체 형상은 원형이 아닌 오발형(oval type)이므로 이러한 방법은 담체를 공칭 응력 수준에서 제한적인 평가만이 가능하였다. 또한 열유동 해석만 이용하는 방법은 담체의 연소 반응을 정확하게 구현하는데 어려움이 있어 온도 분포의 신뢰성에 문제가 있다. 즉, 열유동 방법은 담체에 대한 불명확한 연소 모델로 인하여 담체에서 발생하는 열량을 예측하는데 어려움이 있어 경계조건을 정확하게 설정하기가 어렵다.

본 논문은 고온부품인 삼원촉매변환기의 실제 경계조건은 복잡하므로 열유동 수치해석에 많은 시행착오가 필요하다. 따라서 실험계획법(design of experiment)을 이용한 역문제 해석[10,11]으로 접근하여 열유동 해석에 사용할 각 매개변수 범위를 실차온도시험을 통하여 결정하였다. 이 온도범위의 반응표면모델(response surface model)에 대해 만족도 함수(desirability function)와 최적화 방법[12-15]을 이용해서 실차 시험에서의 후방 촉매 중심부 온도에 대한 열유동 경계조건을 예측하였다. 수치해석을 위한 열유동 경계조건 예측모델을 실차시험에서 측정된 삼원촉매의 출구온도와 비교하여 타당성을 평가함으로써 삼원 촉매의 열응력 해석에 사용할 온도 분포의 정밀도를 설명하였다.

2. 열유동 경계조건 평가 방법

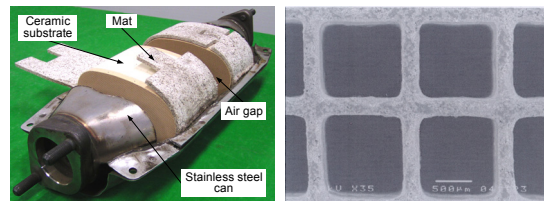
2.1 TWC의 온도 측정 실험

표 1은 본 논문에서 사용한 가솔린 엔진 제원을 나타낸 것이다. 그림 1은 삼원촉매변환기의 구조와 세라믹 촉

매 담체의 셀 구조를 나타낸 것이다. 삼원촉매변환기는 삼원 촉매, 스테인레스 캔 및 매트로 구성되어 있고 촉매 담체(400/6.5 cells/in²)는 하니컴 형태의 사각 셀 구조이다. 일반적으로 담체는 축방향의 과도한 온도 구배를 억제하기 위해 두 개의 담체로 분리되어 설치된다.

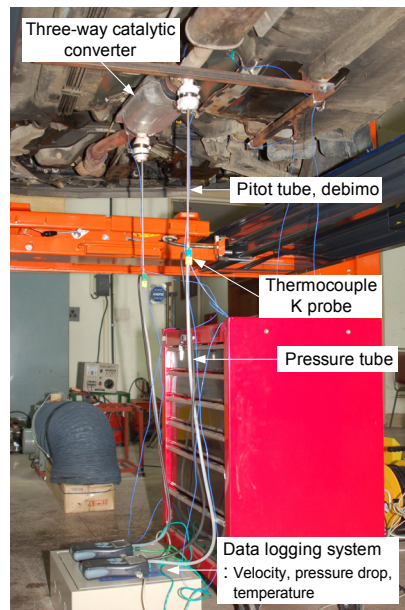
【표 1】 가솔린 엔진의 제원

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

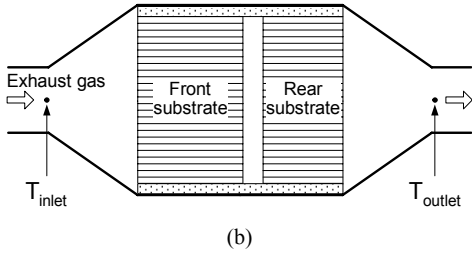


(a) (b)

【그림 1】 (a) TWC의 구조; (b) 세라믹 촉매 담체



(a)



[그림 2] (a) TWC의 온도 측정 실험 장치의 개략도 (b) TWC의 온도 측정 위치

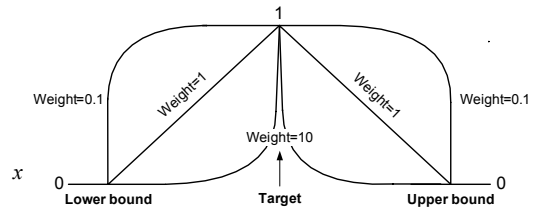
[표 2] 실차 시험조건과 온도 측정 실험의 요약

Test condition		Front	Rear	Temp. difference
Engine speed (rpm)	Wind speed (m/s)	T_f (K)	T_r (K)	ΔT (K)
1000	0	539	552	13
	5	489	429	-60
	10.3	473	414	-59
	16.5	477	441	-36
2000	0	671	682	11
	5	641	610	-31
	10.3	620	633	13
	16.5	595	601	6
3000	0	757	746	-11
	5	719	694	-25
	10.3	704	696	-8
	16.5	697	686	-11
4000	0	842	837	-5
	5	812	801	-11
	10.3	795	770	-25
	16.5	796	784	-12
5000	0	958	935	-23
	5	930	909	-21
	10.3	911	887	-24
	16.5	905	882	-23

그림 2는 실차 시험에서 삼원촉매변환기의 축방향 온도 분포를 구하기 위한 온도 측정 장치와 측정 위치를 나타낸 것이다. 열전대는 직경 4 mm 드릴을 이용하여 측면에 구멍을 뚫고 삽입 후 고온용 시멘트로 고정하였다. 표 2는 실차 시험조건에 대한 삼원촉매변환기의 입구 및 출구의 온도 분포 결과를 요약한 것이다.

2.2 만족도 함수를 이용한 최적화 기법

본 논문에서 최적화 방법은 반응표면방법론이 포함된 실험계획법으로 구성된다. 반응표면법은 $n(n > 1)$ 개의 설계변수에서 예측된 응답 y 의 관계를 근사한 것으로 최적화 또는 실험예측에 효율적으로 이용된다. n 개의 반응함수 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 가 있고, k 개의 설계변수



[그림 3] 만족도 함수의 개념

$= (x_1, x_2, \dots, x_k)$ 가 반응함수에 영향을 준다고 가정하면, 일반적인 반응표면모델[12,13]은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

여기서 f_i 는 i 번째 반응함수와 설계변수간의 함수를 나타내며, ε_i 는 평균이 0이고 분산이 σ_i^2 인 오차항이다.

그림 3은 만족도 함수의 최적화에 대한 접근 방법을 나타낸 것이다. 반응표면모델은 만족도 함수를 이용하여 하나의 척도로 변환하고 가중치는 각 반응에 대한 만족도 함수의 모양을 정의한다. 각 반응에 대해 가중치 (0.1~10)를 선택하면서 목표값의 중요성을 부여한다 [14,15]. 반응함수의 값이 목표

값에 일치하면 만족도 함수의 값은 1을 갖는다. 반응함수 y_i 의 최적값을 θ_i , 하한을 $y_i^{(L)}$, 상한을 $y_i^{(U)}$ 라고 할 때, 추정된 반응함수 \hat{y}_i 에 대해 식 (2)를 이용하여 각각의 개별 만족도 d_i 로 변환한다.

$$d_i = \begin{cases} \left[\frac{\hat{y}_i - y_i^{(L)}}{\theta_i - y_i^{(L)}} \right]^s & y_i^{(L)} \leq \hat{y}_i \leq \theta_i \\ \left[\frac{\hat{y}_i - y_i^{(U)}}{\theta_i - y_i^{(U)}} \right]^t & \theta_i < \hat{y}_i \leq y_i^{(U)} \\ 0 & y_i^{(U)} < \hat{y}_i \text{ or } \hat{y}_i < y_i^{(L)} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 s 와 t 는 설계자가 결정하는 것으로 반응함수의 값을 목표값에 근접케하도록 하기 위해서는 높은 값을 부여한다. 개별 만족도에 대해 기하평균(또는 가중기하평균)을 적용해 합성된 만족도 D 를 식 (3)과 같이 구한다.

$$D = (d_1 \times \dots \times d_n)^{1/n} \quad (3)$$

여기서 n 은 반응함수의 개수이다. 최적화는 심플렉스 방법(simplex method)[15,16]을 이용해 합성된 만족도 D

를 최대화(또는 최소, 목표값)하는 설계변수의 최적해를 계산한다.

3. 삼원촉매변환기의 열유동 해석

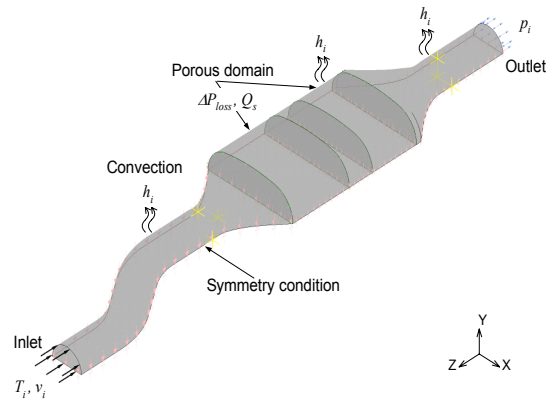
3.1 열유동 해석의 설명

삼원촉매변환기내에 세라믹 모노리스 담체는 많은 수의 하니컴 셀 구조를 가진 다공성 매질(porous media)로 구성되어 있다. 담체의 전체 기하 형상을 고려하면 그 형상이 매우 작고 조밀하여 매우 많은 수의 격자가 필요하게 되어 수치해석이 사실상 불가능하게 된다. 또한 다공성 매질을 통과하는 배기가스는 담체 벽면에서의 마찰손실과 담체 입구에서 급격한 유동영역의 축소와 담체 출구에서의 확대로 유체의 속도가 증가 및 감소됨으로써 발생하는 손실로 압력 강하가 발생한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 압력 강하를 고려한 다공체 모델 [17,18]을 적용하였다.

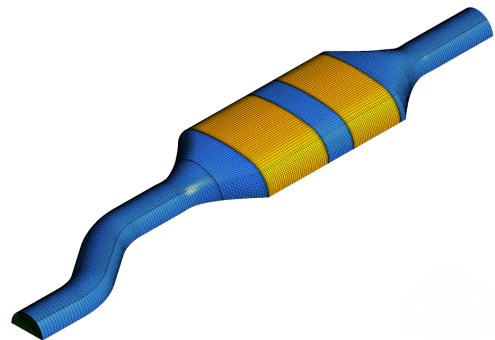
다공체 모델에 대한 기하학적 파라미터는 다공도이며 이 값은 그림 1(b)의 치수를 이용하여 구할 수 있다. 즉, 다공도는 전체 체적에 대한 다공체 체적의 비로 계산할 수 있다. 그러나 본 논문의 세라믹은 분말 압출 성형에 의하여 제작된 제품으로서 재료 자체에 다수의 기공율(porosity)이 존재한다. 따라서 촉매 다공도는 기하학적 다공도와 재료 기공률에 의한 다공도를 선형 합산한 값으로 계산한다. 즉, 전자는 미소채널의 단위 셀에서 전체 단면적에 대한 사각 채널 내부의 단면적 비는 0.707이다. 후자는 채널 벽면 단면적이 전체 단면적에서 차지하는 비율이 0.293이고 이 재료의 기공율이 0.365인 것을 고려하면 0.107이다. 따라서 촉매 다공율은 0.814이다. 다공체에 대한 연속체 모델은 다음 식의 일반적 Darcy 법칙(Darcy law)을 이용하여 다공체 내부 유동을 표현할 수 있다[18].

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\mu}{\gamma K_{perm}} u_i + K_{loss} \frac{\rho}{2\gamma^2} |u| u_i = C_{R_1} u_i + C_{R_2} |u| u_i \quad (4)$$

여기서 μ : 동점성 계수, γ : 다공도, ρ : 밀도, K_{perm} : 투과도, K_{loss} : 경험적 손실 계수이다. 이것을 저항계수로 대체하면 1차 저항 계수 $C_{R_1} = \mu/\gamma K_{perm}$, 2차 저항 계수 $C_{R_2} = K_{loss}\rho/2\gamma^2$ 로 나타낼 수 있다.



(a) 경계조건



(b) 격자모델

[그림 4] TWC의 열유동 해석에 대한 경계조건

본 논문에서 Darcy 법칙에서 1차 저항 계수와 2차 저항 계수는 압력 강하 실험에서 구한 $687.8 \text{ kg/m}^3\text{s}$ 와 3.3 kg/m^4 을 각각 이용하였다. 또한 본 논문의 해석 대상 촉매는 단일 모델이므로 이 매개변수는 촉매의 유동 특성치로서 반응표면모델에 고려되지 않는다.

그림 4(a)는 열유동 해석을 위한 열유동 경계조건을 나타낸 것이다. 그림 4(b)는 ANSYS ICEM CFD [19]를 이용한 계산 격자를 생성한 것으로 절점은 217,495개이고 요소는 784,117개이다. 구체적인 열유동 해석조건 설명은 다음과 같다.

- (1) 삼원촉매변환기의 배기관 내에 흐르는 3차원 정상 상태의 압축성 난류유동을 해석하기 위한 지배방정식으로 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 난류모델은 k-ε을 기반으로 한 SST (shear stress transport) 모델, 대류항의 차분방정식은 high resolution을 적용하여 계산하였다[18].

[표 3] TWC 세라믹 담체의 물리적 성질

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

[표 4] 이상기체의 물리적 성질

Molar mass (kg/kmol)	Dynamic viscosity (kg/ms)	specific heat (J/kgK)	Thermal conductivity (W/mK)
28.96	1.831×10^{-5}	1004.4	0.026

- (2) 입구의 속도와 온도분포는 그림 2의 실험결과를 적용하고 출구는 대기압 0 Pa로 설정하였다. 입출구 단면을 제외한 벽면은 점착(no-slip)조건이다.
- (3) 하니컴 셀 구조를 가진 모노리스 세라믹 담체는 압력 강하를 고려한 다공성 매질로 정의하였다. 담체 내부의 유동은 반경방향에 비하여 축방향의 속도가 지배적이므로 1차원 층류 유동으로 가정한다. 촉매의 화학반응에 대한 발열량은 소스영역(source domain)에 의한 총 에너지(total energy)로 적용하였다.

표 3은 삼원 촉매를 구성하는 촉매의 물리적 성질을 나타낸 것이다. 표 4는 열유동 해석에 사용된 이상기체의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

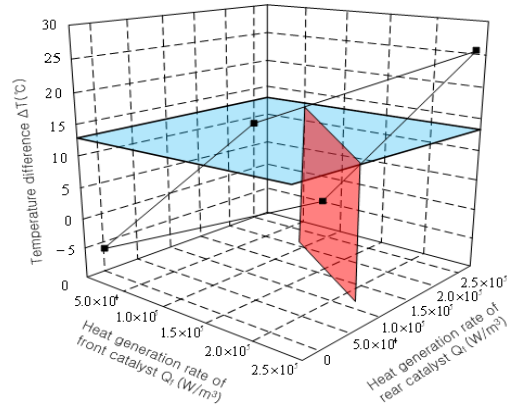
3.2 촉매 반응열

촉매 반응열은 촉매에 담지된 촉매와 배기가스의 각 성분의 체적 유량을 파악하고 있어야만 반응열을 정확히 파악할 수 있다. 그러나 본 삼원 촉매의 경우 각 성분을 정확히 파악하지 못하고 있다. 본 논문은 이러한 문제를 해결하기 위하여 삼원촉매변환기의 전방과 후방의 온도 분포를 기초로 열유동 해석을 수행하여 촉매 반응열을 예측하였다.

표 2에서 전체 배기가스 열량 중 촉매 반응열 비중이 가장 크다고 예상되는 실험 조건은 삼원촉매변환기의 전방과 후방의 온도 차이가 가장 큰 조건인 엔진 회전속도 2000 rpm, 주행풍 속도 16.5 m/s이다. 전방과 후방 촉매 반응열 조건은 표 5와 같다. 삼원촉매변환기에서 외부 공기의 대류열전달계수는 그림 4에서 얻은 평균 대류열전달계수를 적용하였다. 이 조건에 대해 ANSYS CFX v11[18]를 이용하여 예비 열유동 해석을 수행하여 전방

[표 5] 촉매의 반응열 조건

Experiment number	Heat generation rate	
	Front	Rear
1	0	0
2	250,000	0
3	0	250,000
4	250,000	250,000

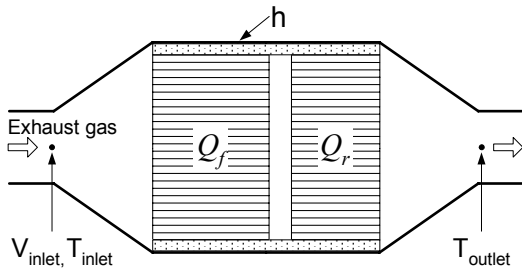


[그림 5] 촉매 반응열과 온도차이의 관계

및 후방 촉매의 온도 차이를 구한 결과는 그림 5이다. 그림에서 해당 실험조건에 대한 온도 차이를 적용하면 촉매 반응열은 400,000 W/m³이다. 따라서 최대 촉매 반응열은 상기의 실험조건에 대하여 150%를 취하여 600,000 W/m³으로 설정하였다. 그러나 최소 촉매 반응열은 예비 열유동 해석결과에서 표 5의 온도 차이를 고려하여 0으로 설정한다.

3.3 대류열전달계수

삼원촉매변환기는 엔진 시동 후 정차하고 있을 때는 자연대류에 의한 열전달이 발생된다. 그러나 대류열전달 계수의 엄밀해 및 실험식은 대부분 일정 단면의 원통 또는 사각 채널에 대한 것이고 유체 유동이 단면과 평행 방향이다. 따라서 기존의 대류열전달계수 식을 본 논문에 적용할 수 없으므로 삼원촉매변환기에 대한 정상 열유동 해석을 수행하여 표면에서 발생하는 평균 대류열전달계수[9,20]를 구하였다. 해석 조건은 외부 공기유속과 삼원 촉매변환기의 온도의 단순 조합에 대해 수행하였다. 외부 공기 유동장의 입구조건은 공기 속도와 온도를, 출구조건은 개방 압력 1 atm을 부여하였다. 따라서 외부 공기 온도는 상온 294K, 외부 공기 속도는 차량의 최고 주행 속도를 고려하여 80 m/s로 설정하였다. 또한, 삼원촉매변환기의 온도는 표 2의 실제 온도 분포의 최대값인 958K로



[그림 6] TWC의 설계 매개변수와 응답함수

[표 6] 설계 매개변수의 범위

Design parameter	Low value	High value
T_{inlet} (K)	373	1300
Q_f (W/m ³)	0	6×10^5
Q_r (W/m ³)	0	6×10^5
h (W/m ² °C)	5.55	38.85
V_{inlet} (m/s)	5	52.5

설정하였다. 대류열전달계수는 삼원 촉매 표면에서의 평균값을 이용하여 구하였다. 열유동 경계조건 예측에 사용될 매개변수로 대류열전달계수의 범위는 최대 대류열전달계수는 평균 대류열전달계수의 175%로 선정 하였고 최소 대류열전달계수는 평균 대류열전달계수의 25%로 하였다. 따라서 최소 대류열전달계수는 평균 대류열전달계수 22.2 W/m²K의 25%인 5.55 W/m²K로, 최대 대류열전달계수는 평균 대류열전달계수 22.2 W/m²K의 175%인 38.85 W/m²K이다.

4. 열유동 경계조건의 평가

4.1 열유동 매개변수의 정의

그림 6은 열유동 반응표면모델에 사용할 매개변수와 반응변수를 도식적으로 나타낸 것이다. 매개변수는 입구 온도와 유속, 전방과 후방의 촉매 반응열, 대류열전달계수이고 반응변수는 출구온도로 설정하였다. 열유동 매개변수로서 삼원촉매변환기의 입구 온도 범위는 표 2의 전방 온도 최대 온도와 최소 온도의 50%를 가감한 값을 취하였다. 즉, 삼원촉매변환기의 입구 온도범위는 전방 온도 최소값 200 °C(473K)의 50%인 100 °C(373K)에서 전방 온도 최대값 683 °C(958K)의 150%인 956 °C(1300K)까지로 설정 하였다. 표 6은 열유동 반응표면모델에 대한 매

개변수의 범위를 나타낸 것이다. 표 7은 D-optimal 실험 계획에 의한 26회 전산 실험에 대한삼원촉매변환기의 출구 온도를 나타낸다.

[표 7] D-optimal 실험계획과 열유동 해석결과

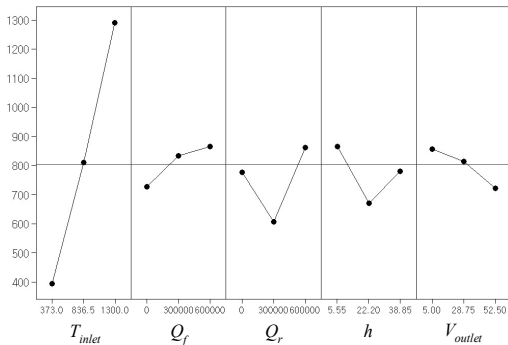
No.	Design parameter					Response
	T_{inlet} (K)	Q_f (W/m ³)	Q_r (W/m ³)	h (W/m ² °C)	V_{inlet} (m/s)	T_{outlet} (K)
1	1300	0	600000	38.85	52.5	1231
2	1300	300000	600000	38.85	5	1319
3	1300	600000	0	38.85	5	1266
4	373	0	300000	5.55	5	389
5	1300	0	0	38.85	5	1101
6	373	0	0	5.55	52.5	372
7	373	0	600000	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 8] (a) 반응표면모델에 대한 적합성

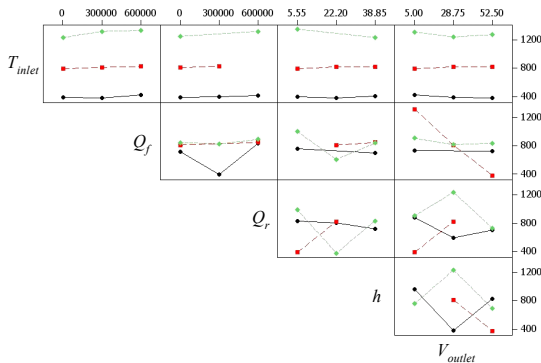
Model	DOF	Sum of squares	Mean square	F-value	P-value
Mean	1	16805208	16805208		
Linear	5	4420693	884138.6	326.938	<0.0001
Quadratic	5	5333.94	1066.789	0.876	0.556
2FI	10	42665.53	4266.553	3.736	0.025
Cubic	5	6086.59	1217.318		
Residual	0	0	0		
Total	26	21279987	818461		

(b) 설계 매개변수의 민감도

Parameter	DOF	Sum of squares	Mean square	F-value	Effective ratio
T_f	1	4152094	4152094	1535.4	98.9
Q_f	1	14149.97	14149.97	5.2	0.3
Q_r	1	11317.97	11317.97	4.2	0.3
h	1	14961.78	14961.78	5.5	0.3
V_{inlet}	1	6983.797	6983.79	2.6	0.2
Residual	20	54086.07	2704.30		
Total	25	4474779		1,552.9	100



[그림 7] 출구 온도에 대한 설계 매개변수의 주효과



[그림 8] 출구 온도에 대한 교호작용 영향

4.2 열유동 경계조건의 반응표면모델

표 8은 MINITAB R14[21]를 이용한 반응표면모델에 대한 적합성과 설계 매개변수의 민감도의 크기를 나타낸 것이다. 선형회귀모델의 P 값이 0.0001이하이고 2차 회귀 모델의 P 값은 0.556이라는 것은 반응표면의 곡면 효과가 작다는 것을 의미한다. 따라서 반응표면은 선형항으로 구성된 선형회귀모델을 기초로 축소모델을 만들어야 한다. 그러나 선형회귀모델에 포함된 모든 항은 열유동 경계조건에 필요한 매개변수이므로 표 7의 모든 항을 기초

로 반응표면을 구성해야 한다. 따라서 출구 온도에 대한 회귀모델은 표 8(a)의 분산분석 결과를 이용한 선형회귀 모델로 선정한다. 표 8(b)에서 입구온도 T_{inlet} 는 출구온도 T_{outlet} 에 대한 민감도가 가장 크게 나타난다. 전방 연소열 Q_f , 후방 연소열 Q_r , 대류열전달계수 h , 배기가스 유속 V_{inlet} 는 출구온도에 대하여 적은 민감도의 크기를 가진다.

그림 7은 출구 온도에 대한 주효과를 나타낸 것이다. 그림에서 입구온도가 가장 큰 영향을 미치고 있다. 그러나 전방 연소열 Q_f , 후방 연소열 Q_r , 대류열전달계수 h , 배기가스유속 V_{inlet} 는 출구온도에 미치는 민감도가 적은 파라미터인 것으로 생각된다.

그림 8은 출구온도에 대한 각 매개변수간의 교호작용을 나타낸 것이다. 그림에서 각 인자들 사이에 일정한 교호작용은 존재하고 있지는 않지만 전방 촉매 반응열과 배기가스 사이에 약간의 교호작용이 존재하고 있다. 따라서 출구온도에 대한 반응표면은 각 설계 매개변수간의 교호작용을 고려하지 않았다. 표 8의 선형 항만을 이용하여 각 반응변수에 대한 출구 온도의 반응표면을 나타내면 식 (5)와 같다.

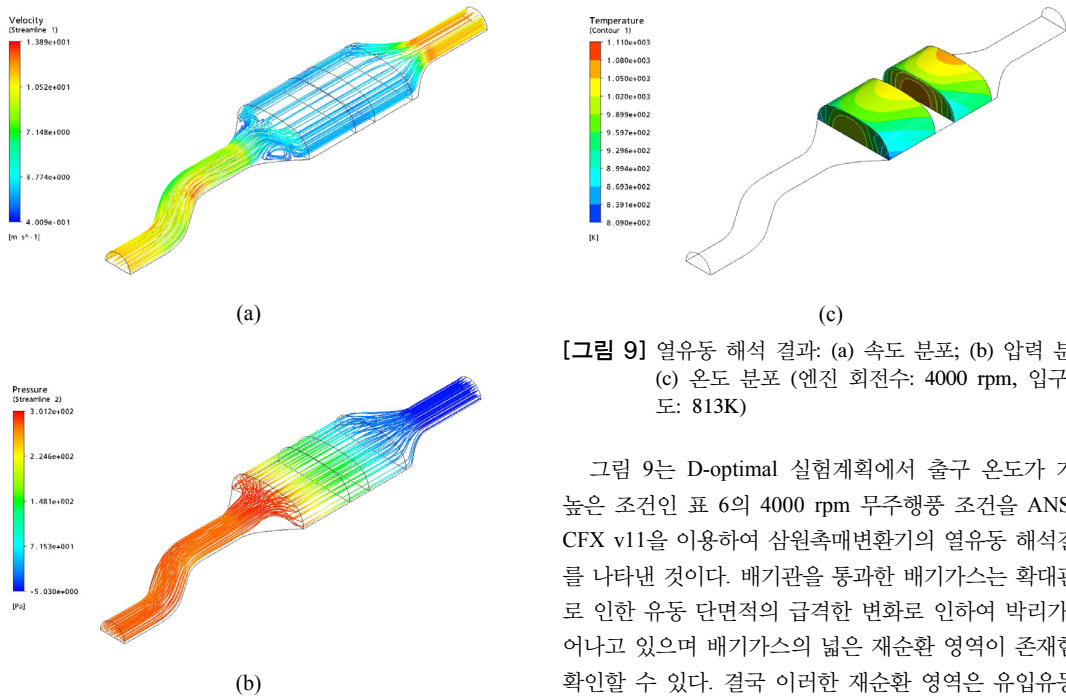
$$y_{T_r} = 48.45 + 0.95 T_f + (8.41 \times 10^{-5}) Q_f + (7.32 \times 10^{-5}) Q_r - 1.54 h - 0.77 V_e \quad (5)$$

식 (5)는 P 값이 0.0001보다 적어 반응변수에 의한 출구온도의 변동이 전체 변동의 대부분을 나타내고 있다. 이러한 반응표면모델에서는 반응변수의 범위 안에서 출구온도의 최소값과 최대값이 존재하게 된다. 따라서 이러한 값을 이용하여 삼원촉매변환기의 출구온도에 적합한 열유동 경계조건을 파악할 수 있다. 본 논문에서는 MINITAB R14에 포함되어있는 만족도 함수와 반응최적화 방법(response optimization)[14,15]을 이용하여 출구온도의 망목값을 구하였다.

표 9는 표 2의 실차시험에서 측정된 출구 온도 데이터를 기초로 만족도 함수를 이용하여 출구 온도 데이터의 망목치에 적합한 열유동 해석의 경계조건을 구한 결과이다. 또한, 실제 경계조건과 반응표면모델에 의한 경계조건과의 차이를 실제 경계조건으로 나눈 상대 오차를 구하였다. 최대 오차는 2.4×10^{-4} %로 공학적 오차 범위내에 충분히 있으므로 열유동 해석의 경계조건으로 적합한 것으로 생각된다. 따라서 이러한 경계조건을 기초로 열유동 해석을 수행하여 열응력 해석에 필요한 온도 분포를 구하였다.

[표 9] 실차 실험조건의 열유동 해석을 위한 경계조건에의 예측

Test conditions		Response		Design parameter				
Engine speed (rpm)	Wind speed (m/s)	T_{outlet} (K)	T_{inlet} (K)	Q_f (W/m^3)	Q_r (W/m^3)	h ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$)	V_{inlet} (m/s)	Relative error (%)
1000	0	552	515	42724	529418	12.7	12	1.8×10^{-4}
	5	429	433	266614	304158	36.2	26	2.3×10^{-4}
	10.3	414	400	489729	540088	38.0	49	2.4×10^{-4}
	16.5	441	418	343954	555448	38.1	21	0
2000	0	682	672	41695	529961	7.3	48	1.5×10^{-4}
	5	610	583	495330	536486	36.8	22	1.6×10^{-4}
	10.3	633	558	517459	415850	9.1	8	1.6×10^{-4}
	16.5	601	568	65553	439313	8.2	17	1.7×10^{-4}
3000	0	746	739	399699	213171	13.2	45	1.3×10^{-4}
	5	694	695	408844	401210	28.2	47	1.4×10^{-4}
	10.3	696	673	54911	409494	12.9	10	1.4×10^{-4}
	16.5	686	679	482002	72174	12.8	45	1.5×10^{-4}
4000	0	837	813	201791	489450	7.7	34	1.2×10^{-4}
	5	801	809	186661	467202	22.8	41	1.2×10^{-4}
	10.3	770	814	69185	265151	28.8	44	1.3×10^{-4}
	16.5	784	774	422811	309049	27.4	21	1.3×10^{-4}
5000	0	935	953	467844	107524	24.0	39	1.1×10^{-4}
	5	909	956	203352	67162	29.6	32	2.2×10^{-4}
	10.3	887	850	537840	442025	21.1	20	2.3×10^{-4}
	16.5	882	879	422747	274579	19.0	38	1.1×10^{-4}



[그림 9] 열유동 해석 결과: (a) 속도 분포; (b) 압력 분포; (c) 온도 분포 (엔진 회전수: 4000 rpm, 입구 온도: 813K)

그림 9는 D-optimal 실험계획에서 출구 온도가 가장 높은 조건인 표 6의 4000 rpm 무주행풍 조건을 ANSYS CFX v11을 이용하여 삼원촉매변환기의 열유동 해석결과를 나타낸 것이다. 배기관을 통과한 배기가스는 확대관으로 인한 유동 단면적의 급격한 변화로 인하여 박리가 일어나고 있으며 배기가스의 넓은 재순환 영역이 존재함을 확인할 수 있다. 결국 이러한 재순환 영역은 유입유동을 방해하여 빠른 유속을 촉매 중심부로 집중시키고 있음을 알 수 있다. 또한 배기가스가 빠른 유속으로 중심부를 통과한다. 따라서 배기가스 유속이 운반하는 대부분의 대류

열유속이 중심부를 통과하므로 촉매상류 중심 부분에서 높은 온도 상승을 보인다. 촉방향 온도 구배에 비하여 반경방향으로의 온도 구배가 훨씬 더 크다. 이러한 결과는 촉매 외곽 부분을 통과하는 유속이 중심부 유속에 비하여 작으므로 배기가스에 의한 유입 열유속이 작으며 외부의 열손실이 크기 때문이다.

4. 결론

본 논문은 삼원촉매변환기의 온도분포를 실차시험에 의해 얻고 이 온도분포를 기반으로 열유동 해석의 경계조건을 예측하였다. 중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 삼원 촉매의 열유동 경계조건의 동정을 위한 설계 매개변수로서는 입구온도, 배기가스 입구 유속, 전방 및 후방 삼원 촉매의 발생 열량과 반응함수로는 출구온도를 설정하였다.
- (2) 출구온도에 대한 주효과를 분석한 결과 입구온도가 가장 큰 영향을 미치고 있다. 또한 출구온도에 대한 각 매개변수 사이의 교호작용은 존재하고 있지 않다.
- (3) 입구온도와 유속, 전방 및 후방 삼원 촉매의 발생 열량, 대류열전달계수에 대한 출구온도의 반응표면모델은 D-optimal 실험계획을 이용하여 구하였으며 P 값이 2.4×10^{-4} 정도로 공학적 신뢰성을 확보하고 있다.

참고문헌

[1] H. T. Choi, J. K. Mok, E. H. Lee, J. Yoo, and J. W. Lee, "An Experimental Study on the Fluid Flow in Monolithic Catalyst Supports," *Energy Engg. J*(in Korean), Vol. 4, No. 2, pp. 288-296, 1995.

[2] S. J. Jeong, and W. S. Kim, "A Study of Light-off Performance of Catalytic Converter with the Effect of Flow Characteristics," *Trans. of the KSAE*, Vol. 7, No. 5, pp. 107-120, 1999.

[3] T. Shamim, H. Shen, S. Sengupta, S. Son, and A. A. Adamczyk, "A Comprehensive Model to Predict Three-Way Catalytic Converter Performance," *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 124, No. 2, pp. 421-428, 2002.

[4] J. G. Kim, S. J. Yoo, and S. S. Kim, "Evaluation of ZSM-5 Supported Metal Catalyst for NOx Removal,"

J. Acad. Ind. Technol., Vol. 10, No. 8, pp. 2015-2020, 2009.

[5] H. T. Jang, and W. S. Cha, "Development of Composite Catalyst for Hazardous Gas Treatment using the Heat of Aviary Heating Equipment," *J. Acad. Ind. Technol.*, Vol. 10, No. 10, pp. 2779-2785, 2009.

[6] 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.

[7] S. T. Gulati, "Design Considerations for Advanced Ceramic Catalyst Supports," *SAE Paper No. 2001-01-0493*, 2001.

[8] 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," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 12, pp. 1157-1164, 2007.

[9] S. H. Baek, J. S. Park, M. G. Kim, and S. S. Cho, "A Study on Thermal Shock of Ceramic Monolithic Substrate," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 34, No. 2, pp. 129-138, 2010.

[10] Y. Hayasaka, S. Sakurai, and I. Sakehara, "A Method to Estimate Service Boundary Conditions for Hot-Gas-Path Components of a Gas Turbine by Using a Design of Experiments," *Trans. of the JSME(A)*, Vol. 68, No. 671, pp. 145-150, 2002.

[11] D. W. Lee, S. J. Lee, S. S. Cho, and W. S. Joo, "Failure of Rocker Arm Shaft for 4-cylinder SOHC Engine," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 12, pp. 405-412, 2005.

[12] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, Fifth Edition, John & Sons, 2001.

[13] S. H. Baek, K. M. Kim, S. S. Cho, D. Y. Jang, and W. S. Joo, "A Sequential Optimization Algorithm Using Metamodel-Based Multilevel Analysis," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 9, pp. 892-902, 2009.

[14] E. D. Castillo, D. C. Montgomery, and D. R. McCarville, "Modified Desirability Functions for Multiple Response Optimization," *Journal of Quality Technology*, Vol. 28, pp. 337-345, 1996.

[15] S. H. Baek, S. S. Cho, S. G. Shin, and W. S. Joo, "Size Effect on the Modulus of Rupture in Automotive Ceramic Monolithic Substrate using Optimization and Response Surface Method," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 11, pp. 1392-1400, 2006.

- [16] E. D. Castillo, D. C. Montgomery, and D. R. McCarville, "Modified Desirability Functions for Multiple Response Optimization," Journal of Quality Technology, Vol. 28, pp. 337-345, 1996.
- [17] 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.
- [18] ANSYS CFX, Release 11.0 User Manual, 2008, ANSYS Inc.
- [19] ANSYS ICEM CFD, ANSYS ICEM CFD/AI* Environment 10.0 User Manual, 2007, ANSYS Inc.
- [20] T. Ozyener, K. Satyamurthy, C. E. Knight, P. S. Jitendra, D. P. H. Hasselman, and G. Ziegler, "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, 1982.
- [21] MINITAB, MINITAB Release 14 User's Guide #2: Data Analysis and Quality Tools, 2000, Minitab Inc.

백 석 흠(Seok-Heum Baek) [정회원]



- 2001년 2월 : 동아대학교 기계공학(공학사)
- 2003년 2월 : 동아대학교 기계공학(공학석사)
- 2010년 2월 : 동아대학교 기계공학(공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 시간강사

<관심분야>

CAE응용/구조최적설계, 피로 및 신뢰성 평가

최 현 진(Hyun-jin Choi) [정회원]



- 2008년 2월 : 강원대학교 자동차공학과(공학사)
- 2010년 2월 : 강원대학교 산업대학원(공학석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 기계공학과 행정직원

<관심분야>

재료강도평가, 유동-구조 연성해석

김 광 흥(Kwang-Hong Kim) [정회원]



- 1990년 2월 : 한국해양대학교 기관공학과
- 2004년 2월 : 충남대학교 경영대학원(경영학석사)
- 1993년~현재 : 한국전력연구원 선임연구원

<관심분야>

원전설계 및 성능 평가

조 석 수(Seok-Swoo Cho) [정회원]



- 1991년 2월 : 동아대학교 기계공학과(공학사)
- 1993년 2월 : 동아대학교 기계공학과(공학석사)
- 1997년 2월 : 동아대학교 기계공학과(공학박사)
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대학교 자동차공학과 교수

<관심분야>

재료강도평가, 피로 및 파손해석