

자동차용 촉매변환기의 활성화 성능 향상을 위한 횡방향 가변 셀 밀도법의 수치적 평가: 활성화 촉매변환기를 중심으로

Numerical Evaluation of a Radially Variable Cell Density Strategy for Improving Light-off Performance: Focusing on Light-off Catalyst

정수진*, 김우승**
Soo-Jin Jeong, Woo-Seung Kim

ABSTRACT

The optimum design of auto-catalyst needs a good compromise between the pressure drop and flow distribution in the monolith. One of the effective methods to achieve this goal is to use the concept of radially variable cell density. However, there has been no study of evaluating the usefulness of this method on light-off catalyst. We have computationally investigated the effectiveness of variable cell density technique applied to the light-off catalyst using a three-dimensional integrated CFD model, in which transient chemical reacting calculations are involved. Computed results show that variable cell density technique can reduce the accumulated emissions of CO and HC during the early 100sec of FTP cycle by 86.78 and 80.87%, respectively. The effect of air-gap between the monoliths has been also examined. It is found that air-gap has a beneficial effect on reducing pressure drop and cold-start emissions.

주요기술용어 : Light-off catalyst(저온활성 촉매변환기), Variable cell density technique(가변 셀 밀도 법), Air-gap(공기 간극), Light-off(활성화)

Nomenclature

a_v : geometric surface area, m^2/m^3
 c_p : specific heat, J/kgK
 h : heat transfer coefficient(W/m^2K)
 M_i : molecular weight for species i
 \dot{m}_g : feed gas mass flow rate(kg/s)
 T : temperature(K)
 t : time(sec)
 x,y,z : Cartesian coordinate

Ψ : orthotropic heat conductivity factor
 λ : conductivity(W/mK)
 ϵ : porosity

Subscripts

i,o : initial, inlet condition
f,s : fluid, solid

1. 서론

촉매변환기 개발에 있어서 가장 중요시 되는 인자는 모노리스 내의 유속 균일도이며 지난 20

* 회원, 동해대학교 자동차공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학과

여 년 동안 많은 연구가 진행되어져 왔다.^{1,2)} 그러나 배기계의 레이아웃은 점차 조밀해져 촉매변환기의 입구 확대부 및 배기관의 형상최적화는 사실상 많은 제약이 있으므로 모노리스 내에서의 유속 균일도의 향상은 실 설계에서 기대하기 어렵다. 더욱이 냉간시동 시 빠른 활성화를 얻기 위하여 배기 매니폴드 가까이 설치된 활성화 촉매변환기(light-off catalyst) 및 직결촉매변환기(closed-coupled catalyst)의 경우는 공간적 제약으로 인하여 모노리스의 효율적 사용이 더욱 더 어렵다.

최근 들어, Kim과 Son¹⁾ 등은 횡방향으로 UCC의 모노리스에 각기 다른 셀밀도의 모노리스를 조합하여 3차원 유동해석을 수행한 결과 균일한 셀밀도의 경우보다 높은 유속균일도를 얻을 수 있었음을 보고하였다. 그러나 횡방향 가변 셀밀도법이 촉매변환기의 활성화 성능에 미치는 영향에 대해서는 연구되지 못했다.

그러나 최근에 저자²⁾ 등은 촉매변환기의 열, 유동 및 화학적 거동의 통합적인 해석방법⁴⁾을 사용하여 바달밀 촉매변환기에 대한 최적 셀밀도 조합을 구하였다. 또한 횡방향 가변 셀밀도법은 압력강하를 최소화하면서 유속 균일도를 극대화시킬 수 있는 전망 있는 설계방법임을 입증하였다.

최근 들어 냉간 배출물 억제를 목적으로 직결 촉매나 활성화 촉매의 사용이 빈번해 졌다. 이러한 촉매 변환기들은 엔진과의 거리가 짧고 또한 엔진과의 간섭을 피하기 위하여 협소한 공간에 장착해야 하는 관계로 모노리스 내의 균일한 유속 분포를 얻기 힘들다. 따라서 이러한 기하학적 난점을 극복하기 위하여 횡방향 셀밀도법을 적극적으로 고려해 볼 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 3차원 유동해석과 모노리스 내에서의 화학반응에 따른 열 및 물질전달 해석을 통합적으로 해석 할 수 있는 통합적 수치기법을 사용하여 횡방향 가변 셀 밀도법의 적용 시 활성화 촉매변환기의 모노리스를 구성하는 여러 가지 셀밀도의 조합 특성이 활성화 성능에 미치는 영향에 대

한 연구를 수행하였다. 또한 모노리스에 공간간극을 설정하여 이것이 압력강하 및 냉간 배출물 억제에 미치는 영향에 대해서도 연구하였다.

2. 해석 모델 및 수치해법

2.1 해석 대상 촉매변환기

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 3.2 ℓ V6 엔진에 장착된 촉매 시스템으로 각각 1개의 저온활성화 촉매변환기와 UCC를 장착한 한 쌍의 촉매 시스템으로 이루어져 있다.

촉매변환기의 성능해석의 정확도에 영향을 미치는 확산계수 및 그 밖의 물성치는 Table 1과

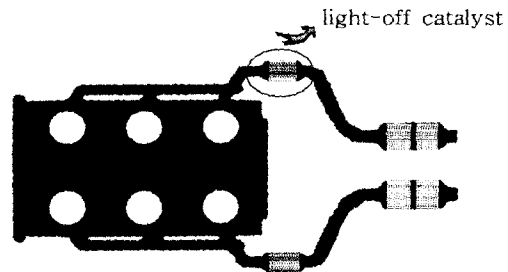


Fig. 1 The catalytic converter considered in this study

Table 1 Physical properties involved in the model

Gas properties	density: ideal gas law conductivity($Wm^{-1}K^{-1}$): $k_g=2.269 \times 10^{-4}T_g^{0.832}$ heat capacity($Jkg^{-1}K^{-1}$): $C_{pg}=1009.1248+0.21819T_g$
Monolith	porosity: 0.76 cell density: 62cpsc hydraulic channel dia.: $1.1 \times 10^{-3}m$ wall thickness : $0.12 \times 10^{-3}m$ washcoat thickness: $25 \times 10^{-6}m$ geometric surface area: $27.2cm^2/cm^3$ volume: 1.08 ℓ (WCC) 1.8 ℓ (UCC) PM loading: WCC: 30g/ft ³ UCC: 10.1g/ft ³ heat capacity($Jkg^{-1}K^{-1}$): $C_{ps}=1071+0.156T_s-3435 \times 10^{-4}/T_s^2$
Mat (3M Interam 100)	conductivity($Wm^{-1}K^{-1}$):0.194 heat capacity($Jkg^{-1}K^{-1}$):1110

Table 2 Characteristics of cordierite ceramic substrates

Cell density(cells/cm ²)	31	62	73	93
Wall thickness(mm)	0.15	0.15	0.15	0.1
Material porosity(%)	35			
Geometric surface area (cm ² /cm ³)	20.41	27.70	29.79	34.85
Hydraulic diameter of channel(mm)	1.65	1.12	1.020	0.937
Open frontal area	0.8399	0.7744	0.76	0.816

같이 온도의 함수로 계산하였다.

횡방향 가변 셀 밀도법이란 모노리스 전 영역에서 균일한 유속을 얻기 위하여 횡방향으로 셀 밀도가 다른 몇 가지의 모노리스를 조합하여 국부적인 유량집중을 억제하고 모노리스 전체에서 균일한 공간속도분포를 얻을 수 있는 기법이다.

본 연구에서는 Table 2와 같은 4가지의 서로 다른 기하학적 치수를 지닌 모노리스를 각각 조합한 6가지의 경우에 대해서 해석을 수행하였다.

2.2 해석 조건

본 연구에서는 활성화 촉매변환기에 적용한 횡방향 셀밀도 변화가 냉간 시동시의 성능에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험으로 구한 FTP-75 주행 시 활성화 촉매변환기로 유입되는 온도상승 곡선을 유입경계 조건으로 사용하였으며 이때 유입유량은 25g/s이며 유입되는 가스 조성은 Table 3과 같이 아이들링 시의 배출조건을 사용하였으며 전 계산시간 동안 일정하게 유지하였다. 출구면에서는 모든 종속변수의 확산항을 출구방향에 대해 0으로 설정하였다. 모노리스 입,출구면은 단열로 처리하였으며 모노리스의 외피에서는 외부공기로의 자연대류에 의한 열손실을 고려하였다.⁴⁾

본 연구에서 고려된 셀 조합방법은 2가지의 각기 다른 셀밀도를 지니는 모노리스를 조합시키는 것이며 중심부에서 외곽으로 갈수록 낮은

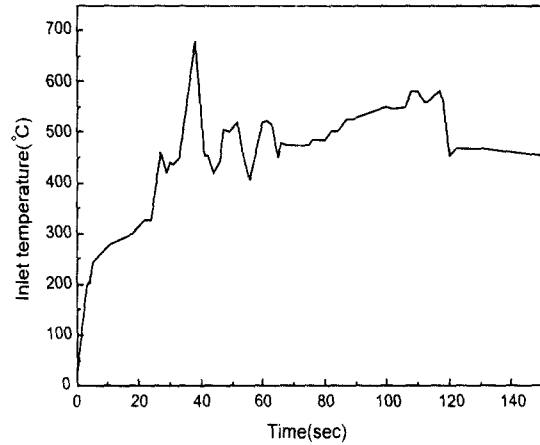


Fig. 2 Inlet temperature variation during FTP-75

Table 3 Concentrations of species in inlet gas

CO	1.52%
C ₃ H ₆	1900ppm
CH ₄	307ppm
H ₂	0.39%
NO	825ppm
O ₂	2.06%

셀 밀도의 모노리스를 위치시켰다.

Fig. 3(a)에 62 pcsc(cells per square centimeter)의 균일밀도의 계산에서의 모노리스 입구면으로부터

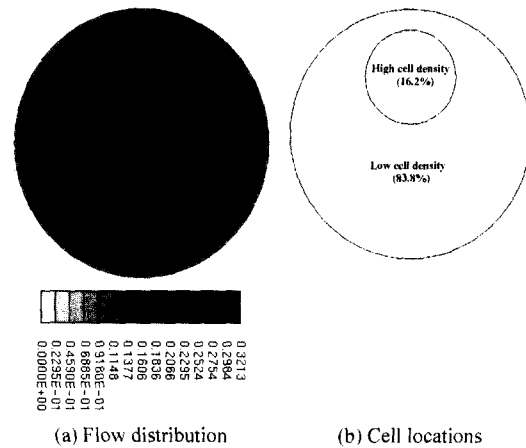
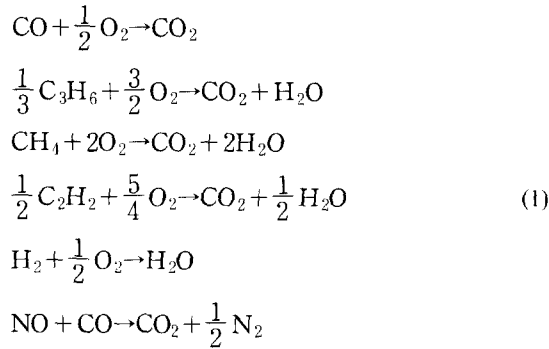


Fig. 3 Flow distribution contour and schematic diagram for two cell density combinations

터 5mm 떨어진 단면에서의 유입속도로 무차원화된 속도분포를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 전체 단면적의 16.2%에 28%의 유량이 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 각 모노리스의 경계는 Fig. 3(b)에서와 같이 62cpsc의 균일밀도의 계산에서 28%의 유속이 통과하는 영역을 그 경계로 설정하였다. 본 연구에서 고려된 조합의 경우는 62, 93/62, 93/31, 73/31, 93/73, 62/31cpsc의 총 6개의 경우이다.

2.3 수치 해석

본 연구에 사용된 해석모델은 아래와 같은 6가지의 화학반응식을 고려하였으며 자세한 반응속도식과 수치해법은 참고문헌^{2,4)}에 자세히 설명되어 있으므로 본 논문에서는 생략하였다.



모노리스 채널에서의 열전도 방정식은 아래 식으로 계산되어진다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T_s^*}{\partial t^*} - \frac{\partial}{\partial z^*} \left(\Lambda \frac{\partial T_s^*}{\partial z^*} \right) \\ & - \xi \left[\frac{\partial}{\partial x^*} \left(\Lambda \frac{\partial T_s^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\Lambda \frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} \right) \right] \\ & = T_f^* - T_s^* + \sum_{j=1}^n H_j^* R_j^* \end{aligned} \quad (2)$$

촉매 표면에서의 물질평형 방정식은 아래 식과 같다.

$$Y_{g,i} - Y_{s,i} = Le_i \cdot \sum_{j=1}^n \eta_j M_i^* R_j^* \quad (3)$$

식(2), (3)에 사용된 무차원 변수들은 아래와 같이 정의된다.

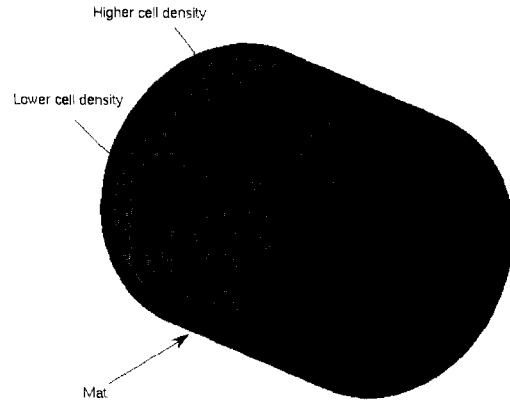


Fig. 4 Computational grids of monolithic brick of warm-up catalyst

$$\begin{aligned} t^* &= \frac{ta_i h}{(1-\epsilon)\rho_s C_{p,s}}, T_f^* = \frac{T_f - T_i}{T_o - T_i}, \\ T_s^* &= \frac{T_s - T_i}{T_o - T_i}, \xi = \frac{\psi}{1-\epsilon}, \eta_j = a(x)M_i \\ z^* &= \frac{za_i h}{\epsilon\rho_o u_o C_{p,f}}, \Lambda = \frac{4Nu\lambda_g A_s \lambda_s}{m_g^2 C_{p,f}^2}, \\ R_j^* &= \frac{R_j C_{p,f}}{a_i h}, Le_j = \frac{h}{\rho_g k_{m,i} C_{p,f}} \end{aligned}$$

무차원 변수 중 무차원 고체 열전도 상수 Λ 는 활성화 성능을 좌우하는 중요한 자이다.⁷⁾

Fig. 4에 모노리스 내에 횡방향 가변 셀 밀도법을 구현하기 위한 격자계를 나타내었으며 2개의 촉매변환기를 포함한 전체 배기계를 구성하는데 소요된 계산 셀은 320,000개이다.

모노리스 전체영역에서의 균일한 속도분포를 수치화 하기 위하여 Welten 등³⁾이 사용한 유속 균일도 지수(γ)를 사용하였으며 각각의 모노리스 셀을 통과하는 유속의 균형된 배분을 수치화 하여 나타내기 위하여 아래 식(4)~(6)과 같은 유량 대 면적의 비를 나타내었다. 이 지수는 1.0에 근접할수록 균일한 유속분포를 의미하며 1.0보다 높으면 중심부에, 작으면 외곽 영역으로 유동이 집중됨을 의미한다.

$$FR = \frac{\text{flow rate from high cell density area}}{\text{flow rate from low cell density area}} \quad (4)$$

$$AR = \frac{\text{low cell density area(edge)}}{\text{high cell density area(center)}} \quad (5)$$

$$FAR(\text{flow-area ratio}) = FR \times AR \quad (6)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 유동 및 화학적 성능평가

횡방향 가변 셀 밀도법의 활성화 촉매변환기의 적용에 따른 성능평가를 하기 위하여 우선 유속균일도의 향상 여부를 고찰하였다. Fig. 5는 62 cpsc의 균일 셀밀도의 경우 및 73/62cpsc의 조합의 경우에 대한 유동입자 궤적을 나타내었다.

그림 5에서 볼 수 있듯이 62cpsc의 균일 모노리스의 경우 모노리스 상부에 유적선들이 집중되어 있으나 이 부위에 높은 셀밀도를 위치시킨 93/73 cpsc의 경우는 유선들이 반경방향으로 분산되어 있음을 볼 수 있으며 따라서 우측에 형성된 재순환 영역도 상당히 감소함을 알 수 있다.

Fig. 6에 62 cpsc의 경우와 93/62cpsc의 경우의 모노리스 유입부 단면에서의 무차원 속도분포를 나타내었다.

그림 6에서 볼 수 있듯이 균일 셀밀도의 경우 상부에 집중되어 있는 유속분포는 93/62cpsc의 경우 상당히 완화되어 있음을 확인할 수 있으며 이는 결국 반경방향으로의 속도구배를 완화시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7에 촉매변환기 유입 확대부 내의 무차원 유입유속($U/U_m=0.8$)의 등가표면을 여러 셀밀도 조합에 대해서 나타내었다.

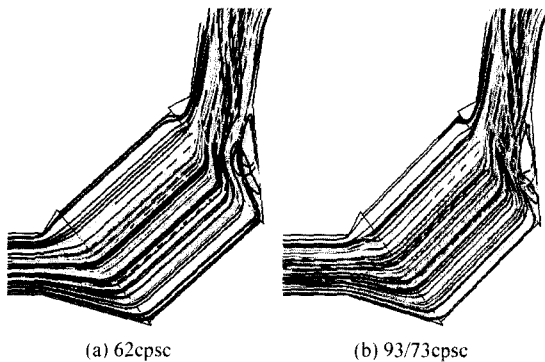


Fig. 5 Particle streak lines of cell combination of 62 and 93/73cpsc

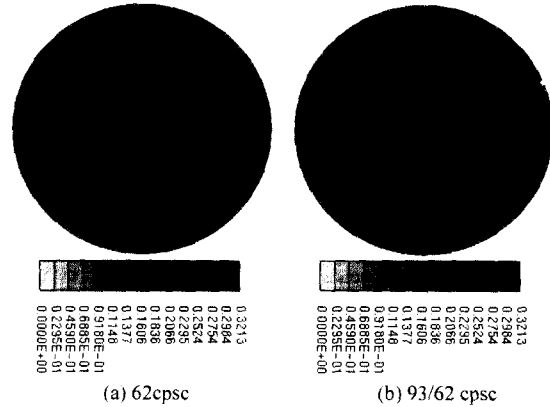


Fig. 6 Flow distributions(U/U_{in}) on the monolith face for 62 and 93/62 cpsc

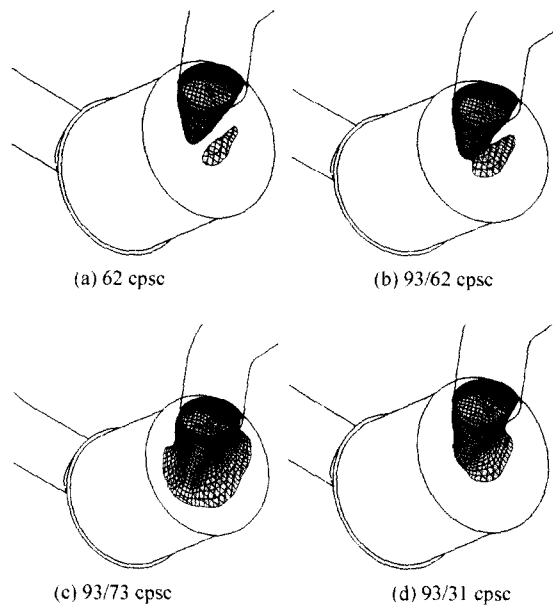


Fig. 7 Plots of iso-surface of non-dimensional flow velocity ($=0.8$) in inlet diffuser for various cell combinations

균일 셀밀도의 경우 유입유속이 상부로 집중됨을 알 수 있으며 가변 셀 밀도법을 적용한 경우는 유속집중도가 보다 완화되어 있음을 볼 수 있다. 특히 93/73의 경우 등가표면이 일부 모노리스 영역에 집중되지 않고 반경방향으로 고르게 확장되어 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9에는 각 셀밀도 조합에 대한 유속 균일도 및 유동-면적비(FAR)를 각각 나타내었다.

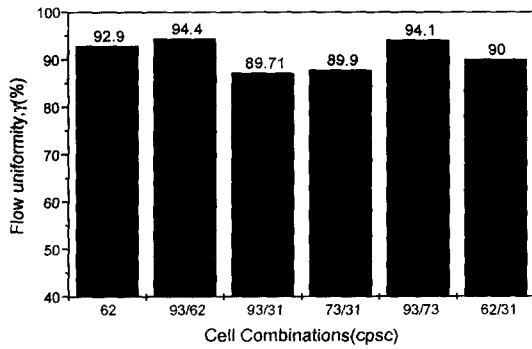


Fig. 8 Flow uniformity index with respect to cell combinations

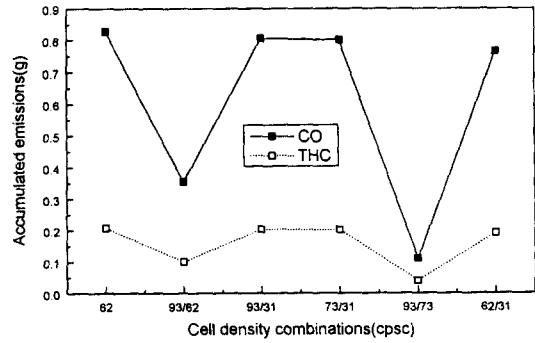


Fig. 10 Accumulated emissions during the early 120s of FTP-75 cycle for various cell combinations

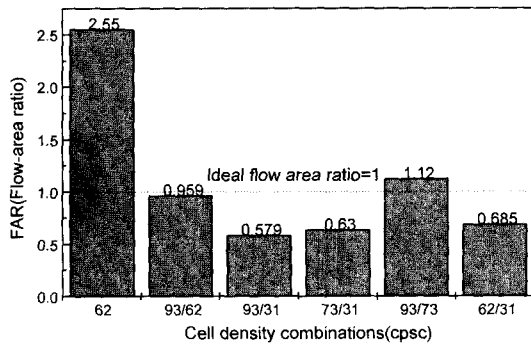


Fig. 9 The flow-area ratios for various cell density combinations

유속균일도의 경우 외곽부와 중앙부의 셀밀도의 차이가 커 외곽부로의 유동확산이 과도한 93/31, 73/31, 62/31의 경우는 균일 셀밀도의 경우보다 유속균일도 지수가 저하되었으나 93/62와 93/73의 경우는 평균 1.4% 정도 향상된 결과를 나타내었다.

유동-면적비 지수의 결과를 고찰하면 균일 셀밀도인 62cpsc의 경우 지수가 2.55로써 유동이 일정영역으로 상당히 집중되고 있음을 확인할 수 있으나 93/62와 93/73의 경우는 이상적인 유동-면적비인 1에 접근하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이들 경우는 전체 모노리스의 공간체적에 균일한 공간속도를 공급할 수 있다. 따라서 균일한 화학반응을 기대할 수 있으므로 활성화 성능의 향상을 기대할 수 있다.

Fig. 10에는 FTP-75 시험모드의 초기 120초 동

안의 CO와 THC의 축적된 배기량을 각 셀밀도 조합에 대해서 나타내었다.

그림에서 확인할 수 있듯이 유속 균일도와 유동-면적비가 높은 93/62 및 93/73의 경우는 균일 셀밀도에 비해 냉간 배출물 억제효과가 뚜렷히 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 특히 93/73의 경우는 균일 셀밀도의 경우에 비하여 CO 및 THC의 배출을 각각 86.7%, 80.87%만큼 저감시킬 수 있음을 알 수 있다. 93/62의 경우가 유속 균일도와 유동-면적비 지수가 93/73의 경우보다 높고 FAR도 1에 보다 근접하고 있음에도 불구하고 93/73의 경우가 배출물 저감 효과가 높은 이유는 Table 2에서 확인할 수 있듯이 GSA(Geometric surface area)가 93/73의 경우가 높아 냉간 시동시의 배기가스의 대류 열에너지를 보다 효과적으로 이용할 수 있어 빠른 워업을 통한 활성화 온도 도달 시간이 짧기 때문이다. 따라서 본 연구의 결과로부터 횡방향 가변 셀밀도법을 활성화 촉매 변환기에 적용 시 80% 이상의 냉간 배출물 억제 효과를 볼 수 있음을 알 수 있으며 또한 이러한 효과를 얻기 위해서는 유동-면적비 지수가 1에 접근하여 공간 속도의 고른 분포를 기대 할 수 있어야 하며 되도록 높은 GSA를 확보한 모노리스 조합이 유리함을 알 수 있다.

3.2 공기간극 효과

Weltens³⁾ 등은 이중 모노리스는 유체역학적인

관점에서 많은 이익을 얻을 수 있으므로 이의 사용을 권장할 바 있으며 이때 모노리스의 최대 축방향 길이는 12-15cm를 넘지 않아야 한다고 보고하였다. 또한 공기간극은 15mm를 넘지 않아야 하며 5mm 이하의 공기간극의 경우 첫 번째 모노리스 입구면에서의 유속균일도가 현저히 향상되었음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 활성화 촉매변환기의 모노리스에 공기간극을 설정하여 동일한 조건으로 유동 해석을 수행하여 유용성을 평가하였다. 첫 번째 담체와 두 번째 담체의 체적비(%)는 32:68이며,⁶⁾ 두 담체 사이에는 총 담체 체적의 8%에 해당하는 공기 간극을 두었다.

Fig. 11에 각 셀밀도 조합에 대한 모노리스 유입면에서의 유속 균일도를 공기간극을 두지 않은 경우와 비교하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 평균 다공률이 82%를 넘는 셀밀도 조합의 경우(93/31: 83.6%, 73/31: 82.7%, 62/31: 82.9%)는 유속 균일도가 큰 차이를 보이지 않고 있으나 평균 다공률이 낮은 경우(93/62: 78.11%, 93/73: 76.91%)는 공기간극이 유속균일도를 저하시키고 있음을 알 수 있다. 이는 공기간극이 존재하는 경우 첫 번째 모노리스의 유동저항이 감소하기 때문이며 이는 낮은 다공율(큰 열적관성)을 지닌 셀조합의 경우 두드러지게 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면에 큰 다공률의 셀밀도 조합의 경우

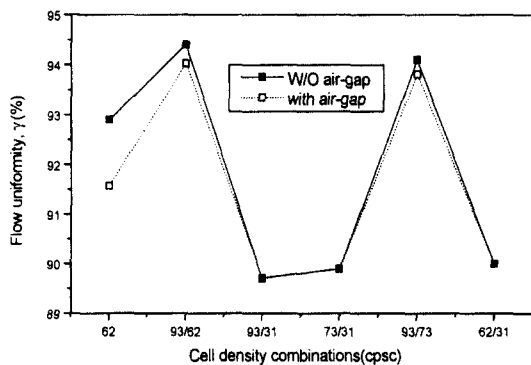


Fig. 11 Comparison of flow uniformities for various cell combinations for both cases with and without air-gap

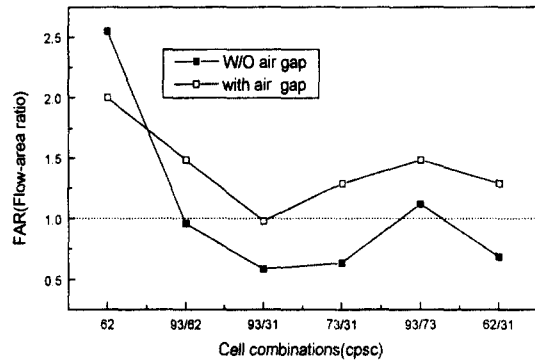


Fig. 12 Comparison of FAR for various cell combinations for both cases with and without air-gap

유동저항이 상대적으로 적으므로 공기 간극으로 인한 효과가 미미하게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 12는 공기간극의 유무에 대한 FAR의 변화를 각 셀밀도 조합에 따라 나타내었다. 그림으로부터 공기간극이 존재하는 경우는 전술한 바와 같이 첫 번째 모노리스의 유동저항이 적어지므로 FAR은 전반적으로 상승하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13에는 무차원화된 압력강하를 공기간극의 유무에 따라 각 셀밀도 조합 별로 나타내었다. 이 결과로부터 공기간극은 모노리스 내의 압력강하를 감소시키는 효과가 있음을 알 수 있으며 그 효과는 평균 셀 밀도가 높은 조합일수록 두드러짐을 알 수 있다. 공기간극이 없는 경우, Fig. 10에서와 같이 냉간 시동 배출물 억제에 최상의 효

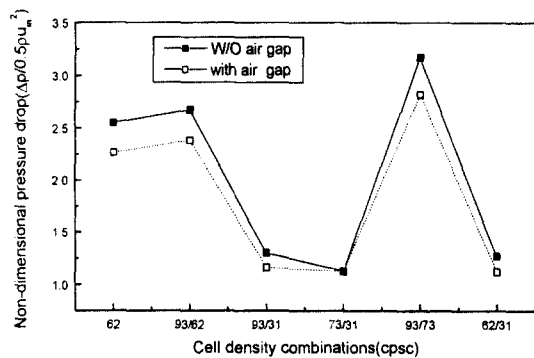


Fig. 13 Comparison of pressure drop for various cell combinations for both cases with and without air-gap

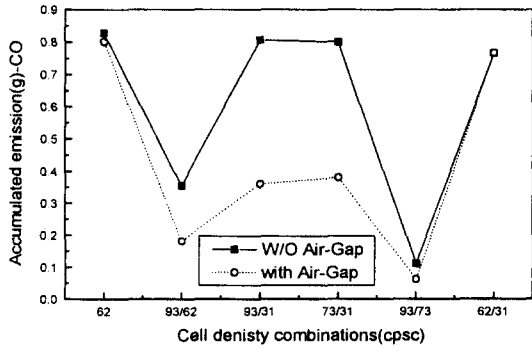


Fig. 14 Comparison of accumulated emissions(CO) during the early 120s of FTP-75 cycle for various cell combinations for both cases with and without air-gap

과를 보인 93/73의 조합의 경우 62cpsc의 균일 셀 밀도의 경우에 비해 24.3%의 압력손실이 증가되지만 80% 이상의 냉간 배출물 억제효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 14에 공기간극의 유무에 따른 FTP-75 시험모드의 초기 120초 동안의 CO의 축적된 배기량을 각 셀밀도 조합에 대해서 각각 비교하여 나타내었다. 해석결과 공기간극을 설정하였을 경우 62cpsc의 균일 셀밀도에 비해 62/31의 경우를 제외한 모든 셀밀도 조합의 경우에서 45% 이상의 냉간 배출물 억제 효과를 얻을 수 있었다. 특히 93/31의 경우 공기간극으로 인한 첫 번째 모노리스에서의 유동저항의 감소로 인하여 외곽부의 유속집중 현상이 완화되어 55.33%의 배출물 억제효과를 나타내었다.

Koltsakis(5)는 식(2)에 포함된 무차원 열전도 상수(Λ)에 대한 화학반응을 무시한 1차원적 연구를 수행하여 이 값의 증가는 촉매변환기의 활성화 성능을 저하시킴을 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 여러 셀밀도 조합에 대한 평균 무차원 열전도 상수가 냉간 배출물에 미치는 영향을 해석하여 Fig. 15에 나타내었으며 중앙부와 외곽부의 무차원 열전도 상수비에 대한 활성화 성능을 계산하여 그 결과를 Fig. 16에 표시하였다.

해석결과 Λ 의 증가에 따라 활성화 성능은 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있으며 이는 활

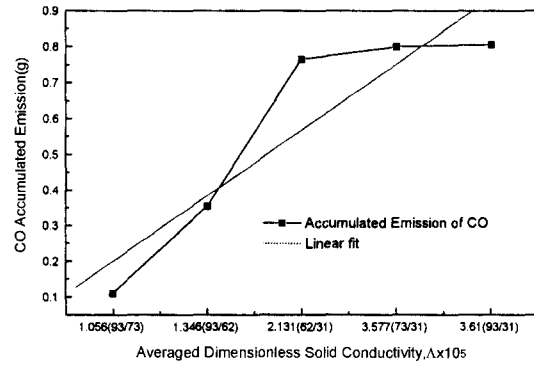


Fig. 15 Accumulated emission for different values of dimensionless solid conductivity Λ

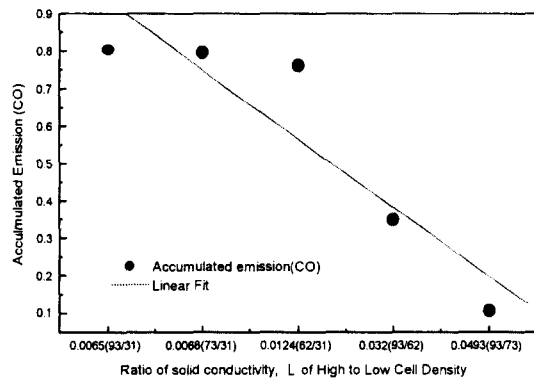


Fig. 16 Accumulated emission for different values of ratio of dimensionless solid conductivity Λ of high to low cell density

성화기간 중 배기가스의 비효율적 이용에 기인한다.⁷⁾ Fig. 16으로부터 중앙부와 외곽부의 Λ 의 비가 증가할수록 활성화 성능이 저하되고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 유동의 국부적 집중이 큰 활성화 촉매변환기에 횡방향 가변 셀 밀도법을 적용시킬 경우 가장 중요한 변수는 셀 조합을 이루고 있는 각 모노리스에서의 균일한 유량 및 열적관성의 분배에 있음을 알 수 있다.

Fig. 17에 공기 간극의 유무에 따른 활성화 기간 중 모노리스 내에서의 비정상 열적 거동을 연구하기 위하여 93/73의 셀밀도 조합의 경우 모노리스 중심축 단면에서의 온도분포를 시간에 따라 나타내었다.

결과로부터 공기 간극이 없는 경우는 모노리

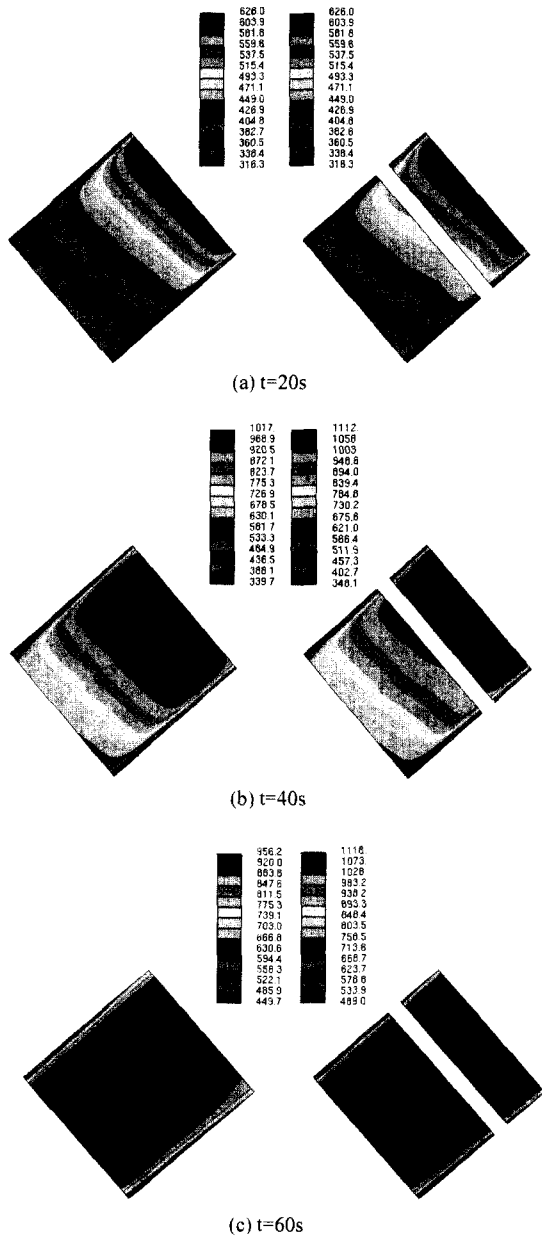


Fig. 17 Comparison of temporal thermal pattern in the monolith with or without air-gap

스 내부에서 고온영역(hot spot)이 존재하며($t=40s$) 이는 채널에서의 열전도로 인하여 하류로 향하고 있음을 알 수 있다. 이러한 최고 온도영역의 이동은 워업을 저하시키고 모노리스를 과열시킬 수 있으므로 열화를 가중시키는 주원인이

다.⁸⁾ 이에 비해 공기 간극이 있는 경우는 상류의 모노리스에서의 낮은 열적 관성으로 인한 빠른 활성화에 따른 화학적 발열량이 공기간극의 완충작용으로 인하여 두 번째 모노리스 내에 연속적으로 전달 될 수 없으므로 내부에 고온영역이 존재하지 않는다. 또한 워업초기($t=20,40s$)에는 첫 번째 모노리스의 유동저항의 감소로 공기간극이 없는 경우보다 첫 번째 모노리스 입구에서의 반경방향의 온도구배가 증가하고 있음을 볼 수 있다.

$t=60s$ 의 결과로부터 첫 번째 모노리스로부터 공급된 대류 열유속은 공기간극을 통하여 두 번째 모노리스에 전달되어 고온영역의 채널벽을 통한 열전도에 의존하는 공기간극이 없는 경우보다 빠르게 모노리스 전체를 워업시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 활성화 촉매변환기에 횡방향 가변 셀 밀도법 적용 시 유용성을 평가하기 위하여 FTP-75 시험조건 하에서 3차원적 수치해석을 수행하였다.

본 해석결과 가변 셀 밀도법은 FAR 지수가 1에 근접하고 평균 GSA가 높을수록 높은 냉간 배출물 억제 효과를 나타내었으며 93/73의 조합의 경우 FTP-75cycle의 초기 120초 동안의 CO 및 THC 배출이 62cpsc의 균일 셀 밀도 경우보다 각각 86.7%, 80.87% 억제되었음을 확인하였다. 이 경우 24.3%의 압력손실 증가가 발생하였다. 따라서 설치공간이 협소하여 유입배기관의 급격한 곡률과 큰 오프-셋이 존재하는 직결 촉매변환기나 활성화 촉매변환기에 횡방향 셀 밀도법을 적용한다면 촉매변환기에 여분의 장치 설치나 형상변화 없이 효과적으로 냉간 배출물을 억제할 수 있을 것이다.

가변 셀 밀도법을 적용한 모노리스를 이중 구조로 변경하여 공기 간극을 설치하여 동일한 조건 하에서 해석을 수행 한 결과 FAR가 첫 번째 모노리스에서의 유동저항 감소로 인하여 저하됨

을 확인하였다. 냉간 배출물의 경우 공기 간극을 설치함으로써 평균 45%의 배출물 억제 효과를 얻을 수 있었으며, 특히 셀밀도의 차이가 큰 셀밀도 조합의 경우(93/31) 유량분포의 편중성이 크게 완화되어 55.33%의 냉간 배출물 효과를 얻을 수 있었다. 또한 워업 기간중 공기간극이 존재하는 가변 셀 모노리스의 비정상적 열적 거동을 해석한 결과 모노리스 내의 공기간극은 고온영역(hot spot)의 생성을 억제시켜 보다 빠르게 워업에 도달할 수 있음을 확인하였다. 따라서 활성화 촉매변환기에 횡방향 가변 셀 밀도법 적용 시 공기간극은 고온영역의 생성 및 이동에 따른 촉매의 열화를 방지할 수 있는 효과를 나타낼 것으로 생각되어 진다.

후 기

이 논문은 2000년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) J. Y. Kim, S. Son, "Improved Flow Efficiency of a Catalytic Converter Using the Concept of Radially Variable Cell Density-Part I," SAE 1999-01-0769, 1999.
- 2) 정수진, 김우승, "변환효율 향상을 위한 횡방향 가변 셀 밀도법을 사용한 자동차용 촉매변환기의 수치적 설계," 대한기계학회논문집 B권, 제24권 제12호, pp.1596-1607, 2000.
- 3) H. Weltens, et al., "Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction," SAE 930780, 1993.
- 4) 정수진, 김우승, "자동차용 촉매변환기의 최적설계를 위한 열 및 유동특성에 대한 수치적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제17호, pp.841-855, 1999.
- 5) G. C. Koltsakis, "Warm-up Behavior of Monolithic Reactors under Non-Reacting Conditions," Chem. Eng. Sci., Vol.52, No.17, pp.2891-2899, 1997.
- 6) K. Umehara, et al., "Advanced Ceramic Substrate: Catalytic Performance Improvement by High Geometric Surface Area and Low Heat Capacity," SAE 971029, 1997.
- 7) M. J. Ryan, "Transient Heat and Mass Transfer in Two Monolith Reactor Passage," Master Degree Thesis, Rice University, Texas, USA, 1990.
- 8) M. Nonnenmann, "Metal Supports for Exhaust Catalysts," SAE 850131, 1985.