

# 실 운전조건에서의 배기유동패턴이 근접장착 촉매변환기의 성능 및 신뢰성에 미치는 영향에 관한 수치적 연구

정수진<sup>1)</sup> · 김우승<sup>\*2)</sup>

동해대학교 자동차공학과<sup>1)</sup> · 한양대학교 기계공학과<sup>\*2)</sup>

## Numerical Study on the Effect of Exhaust Flow Pattern under Real Running Condition on the Performance and Reliability of Closed-Coupled Catalyst

Soo-Jin Jeong<sup>1)</sup> · Woo-Seung Kim<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Automotive Engineering, Donghae University, Gangwon-do 240-713, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do 425-791, Korea

(Received 6 January 2004 / Accepted 20 February 2004)

**Abstract** : The engine-out flow is highly transient and hot, and may place tremendous thermal and inertial loads on a closed-coupled catalyst. Therefore, time-dependent and detailed flow and thermal field simulation may be crucial. The aim of this study is to develop combined chemical reaction and multi-dimensional fluid dynamic mathematical model and to study the effect of unsteady pulsating thermal and flow characteristics on thermal reliability of closed-coupled catalyst. The effect of cell density on the conversion performance under real running condition is also investigated. Unlike previous studies, the present study focuses on coupling between the problems of pulsating flow pattern and catalyst thermal response and conversion efficiency. The results are expressed in terms of temporal evolution of flow, pollutant and temperature distribution as well as transient characteristics of conversion efficiency. Fundamental understanding of the flow and thermal phenomena of closed-coupled catalyst under real running condition is presented. It is shown that instants of significantly low values of flow uniformity and conversion efficiency exist during exhaust blowdown and the temporal variation of flow uniformity is very similar in pattern to one of conversion efficiency. It is also found that the location of hot spot in monolith is directly affected by transient flow pattern in closed-coupled catalyst.

**Key words** : Closed-coupled catalyst(근접장착촉매변환기), Exhaust flow(배기유동), Reliability(신뢰성), Thermal aging(열열화), Key word(주요용어), Durability(내구성)

### 1. 서론

배기가스의 열을 효과적으로 활성화에 이용하기 위하여 엔진의 배기 매니폴드 가까이 촉매변환기를 위치시키는 근접장착촉매장치(Closed-Coupled Cata-

lyst, CCC)를 최근 많이 사용하고 있다. 근접장착촉매와 엔진의 근접한 위치로 인한 높은 열응력과 내구성 및 피독성 문제는 최근 촉매의 열 및 화학적 안정성을 높일 수 있는 첨가제 등이 개발되어 해결되어가고 있으며 따라서 CCC의 실효성이 증가하고 있다. 그러나 엔진 부대장치의 증가 및 점차 협소해

\*To whom correspondence should be addressed.  
wskim@hanyang.ac.kr

지는 엔진룸의 공간으로 인하여 모노리스 내를 통과하는 가스의 공간속도 분포의 불균일도가 심화되어 냉간 운전 시 횡방향으로의 큰 온도구배로 인한 열응력 발생 및 직결촉매의 성능저하가 불가피한 실정이다. 이를 개선하기 위하여 열적저항이 우수한 담체와 화학적 안정성이 뛰어난 촉매개발에 많은 노력을 하고 있지만 모노리스 내의 공간속도 불균일에 따른 근본적인 해결책이 되지는 못하고 있는 실정이다. 따라서 근접장착촉매변환기에 있어서 가장 심각한 문제는 높은 열응력으로부터 발생하는 내구성 문제이다. 근접장착 촉매변환기의 고장 및 파손은 우선 반복적인 열적 팽창과 수축으로 인한 하우징으로부터 담체의 이탈현상(substrate loosening), 열응력 및 기계적인 굽힘과 진동으로 인한 담체의 파괴, 파단된 하우징 박판으로의 맥동가스의 유출로 인한 단열매트의 부식, 그리고 용접 및 하우징 박판의 파손, 과열로 인한 담체의 용융현상등으로 대부분이 열적 신뢰성과 관련되어져 있다. 따라서 최근들어 FEM을 사용하여 내구성 및 열적 신뢰성을 예측하기 위한 수치적 연구<sup>1,2)</sup>가 수행되어지고 있다. 이러한 열유동해석과 연계된 열응력해석은 고장분석 예측 분석 및 피로파괴해석에 직접 입력조건으로 사용되어진다. 왜냐하면 근접장착 촉매변환기는 운전 시 높은 배기가스 및 화학반응열에 노출되어 있어 이러한 가열과정(heating process)에 있어서 담체의 온도분포를 정확히 해석할 수 있어야 하기 때문이다. 결국 엔진에 근접하게 장착된 근접장착 촉매변환기의 복잡한 열유동 특성의 정확한 이해와 해석능력은 열적 신뢰성 및 고장분석 관련 촉매변환기의 CAE 해석 중 가장 중요하며 결국 해석 정확도를 결정짓는다고 할 수 있다. 그러나 현재까지의 국내외에서 발표된 연구들은 대부분 유동특성에 관한 해석<sup>3,4)</sup>이거나 매니홀드의 형상을 무시한 2차원적 해석<sup>5)</sup>이었다. 따라서 본 연구에서는 근접장착 촉매변환기의 비정상적 맥동 유동특성이 모노리스의 열적거동 및 변환효율에 미치는 영향을 연구하기 위하여 엔진에서 일어나는 비정상적 유동특성과 모노리스에서의 3차원적 열유동 및 화학적 거동을 연계하여 동시에 해석할 수 있는 해석기법을 개발하였다. 이를 이용하여 직렬 6기통 가솔린엔진

에 장착된 근접장착 촉매변환기를 대상으로 비정상적 유동특성, 온도 및 농도분포, 그리고 변환효율을 3차원적으로 분석하였으며 또한 모노리스의 셀밀도의 변화가 CCC의 성능에 미치는 영향을 연구하였다.

## 2. 해석모델 및 수치해석

### 2.1 해석모델

본 연구의 해석대상 촉매변환기는 직렬 6기통 가솔린 엔진에 장착된 듀얼형 직결촉매변환기 시스템이며 Fig. 1에 3차원 형상과 계산격자를 나타내었다. 계산격자는 총 520,650개의 육면체 격자가 사용되었다. 본 연구에서의 고려된 CCC 모노리스의 주요 기하학적 치수를 Table 1에 나타내었다.

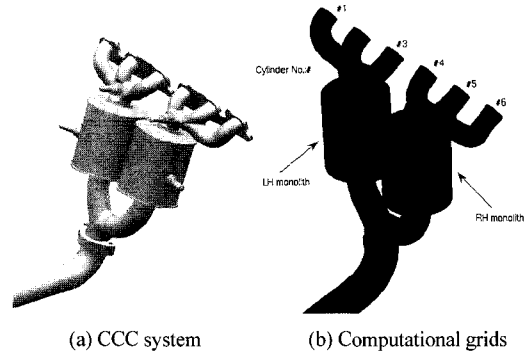


Fig. 1 Schematic representation of CCC system and computational grids

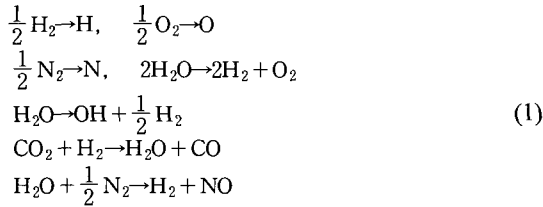
Table 1 Characteristics of cordierite ceramic substrates

Cell density(cells/cm <sup>2</sup> )	62	93	124
Wall thickness(mm)	0.15	0.1	0.05
Material porosity(%)	35		
Geometric surface area (cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	27.70	34.85	42.06
Hydraulic diameter of channel(mm)	1.12	0.937	0.848
Open frontal area	0.7744	0.816	0.892

### 2.2 수치해석

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 CCC로 유입되는 배출가스의 비정상적 열 및 유동특성을 계산하기 위하여 본 연구대상 CCC가 장착되어져 있는 엔진

의 흡배기 시스템을 특성곡선법<sup>6)</sup> 및 열역학적 모델링<sup>7)</sup>을 사용하여 계산하였다. 실린더 내의 연소는 2영역모델<sup>6,7)</sup>을 사용하였으며 배기 조성 계산을 위하여 아래와 같은 7가지의 화학반응을 고려하였다.



NO의 생성기구는 확대 Zeldovich 기구에 NO<sub>2</sub>의 4개의 반응식을 부가한 Annand 모델<sup>6)</sup>을 사용하였으며 CO의 농도계산은 Benson<sup>6)</sup>의 방법을 따랐다. Fig. 2와 Fig. 3에 1200rpm과 3000rpm, WOT에서의 RH쪽 CCC의 매니홀드 유입부에서의 유량과 온도의 시간에 따른 변화를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 3개의 산을 온도 및 유량곡선에서 각각 찾아볼 수 있으며 CCC의 모노리스는 이러한 온도 및 유량의 시간에 따른 급격한 변화를 주기적으로 겪으므로 운전 중 열 및 화학적 거동이 매우 복잡한 양상을 띄게 된다.

Table 2와 Table 3에 연소모델 및 식 (1)로부터 계산된 1200rpm과 3000rpm에서의 각 실린더로부터의 배출물의 사이클 평균농도를 나타내었다. 본 연구에서 H<sub>2</sub>는 CO의 1/3로 가정하였으며 HC는 본 해석프로그램으로 계산되지 않으므로 실험값<sup>7)</sup>을 사용하였다. 이때 총 배출된 탄화수소화합물 중 90%는 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>로 고려하였고 나머지 10%는 CH<sub>4</sub>로 간주하였다.<sup>8)</sup>

Fig. 2와 Fig. 3 그리고 Table 2의 계산결과는 3차원 열유동 해석 시 입구경계조건 값으로 사용되어지며 입구의 농도값은 각 실린더의 값을 평균하여 사용하였다. CCC의 비정상적 열유동 특성을 해석하기 위하여 유동을 3차원 압축성 난류유동으로 고려하였으며 이때 모노리스는 다공성 물질로 처리하였다.<sup>11)</sup> 또한 와쉬코트 표면과 배기가스와의 열 및 물질전달을 고려하였으며 와쉬코트에서 일어나는 Table 4와 같은 5가지 화학반응을 계산하였다.<sup>5,9)</sup>

본 연구의 운전조건은 충분히 CCC가 워업되어 화학반응이 율속단계에 도달한 경우로 정하였

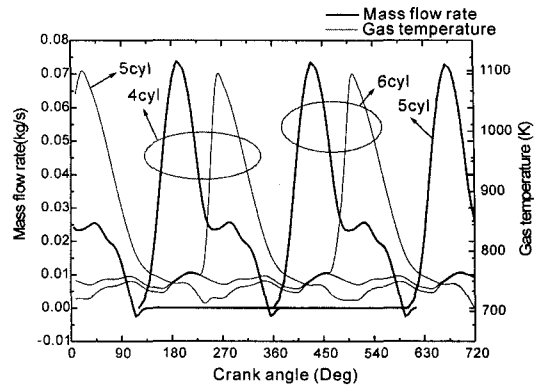


Fig. 2 Transient mass flow rate and temperature profiles, 1200rpm, WOT

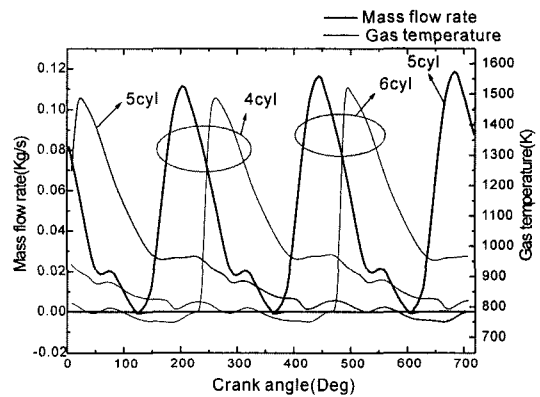


Fig. 3 Transient mass flow rate and temperature profiles, 3000rpm, WOT

Table 2 Transient inlet concentrations, 1200rpm(A/F=15.52)

Cylinder	NO (ppm)	CO(%)	HC (ppm)	O <sub>2</sub> (%)
1	5722.54	0.8	320	1.54
2	5715.49	0.8	320	1.54
3	5710.15	0.79	320	1.52
4	5719.10	0.79	320	1.52
5	5722.65	0.81	320	1.56
6	5713.37	0.80	320	1.54

다.<sup>12)</sup>

CCC의 각 배기관으로의 유입 유량, 온도, 배출물의 농도비는 흡배기관의 사이클 시뮬레이션 결과를 이용하였으며 난류강도는 유입속도의 2%로 가정하였다. 유출조건은 균일 압력조건을 주었으며 배기관 및 모노리스 외곽표면에서의 외부로의 열손실

Table 3 Transient inlet concentrations, 3000rpm(A/F=15.52)

Cylinder	NO (ppm)	CO(%)	HC (ppm)	O <sub>2</sub> (%)
1	7017.13	0.92	374	1.76
2	7062.61	0.94	374	1.79
3	7072.10	0.95	374	1.81
4	7060.01	0.94	374	1.79
5	7058.80	0.94	374	1.79
6	7065.67	0.95	374	1.81

Table 4 Chemical reactions included in the simulation model

1	$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$
2	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$
3	$\frac{1}{3} C_3H_6 + \frac{3}{2} O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
4	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
5	$CO + NO \rightarrow CO_2 + \frac{1}{2} N_2$

은 대류 경계조건을 사용하였으며 이때 대류열전달 계수는 실험식을 사용하였다.<sup>9)</sup> 본 연구에서는 Jeong<sup>9,12)</sup>과 동일한 수치모델과 경계조건을 사용하였으며 상세한 내용은 참고문헌<sup>9,12)</sup>에 나타나 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 배기유동특성과 CCC와의 관계

각 실린더의 배기포트에서 주기적으로 토출되는 배기가스의 유동특성이 RH 모노리스 내의 유속균일도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 전부하 1200, 3000rpm에서의 모노리스 전면에서 5mm 떨어진 단면에서의 유속균일도<sup>3)</sup>를 Fig. 4에 나타내었다. 우선 1200rpm의 경우 6개의 유속균일도 급강하점(dip)을 볼 수 있다. 이 중 화살표로 표시해 놓은 급강하점은 각 실린더의 배기과정 시에 해당하며 이는 한 실린더의 불로우다운 시 배기관 내의 가스의 유속보다 다른 실린더로 연결되어 있는 배기관 내의 가스의 유속은 매우 작으므로 모노리스 유입부를 통과하는 유속분포가 매우 편중되기 때문이다. 그 외의 급강하점은 모든 실린더의 배기과정이 끝난 후에 발생하며 모노리스를 통과하는 유량이 매우

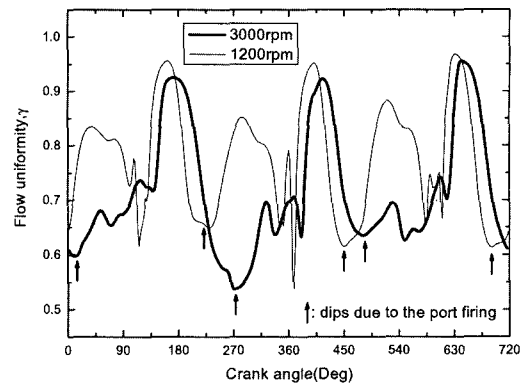


Fig. 4 Transient flow uniformity

작으므로 신뢰성 측면에서 고려대상이 아니다.<sup>10)</sup> 1200rpm의 경우 유속균일도의 최대변동폭은 33%이다. 3000rpm의 경우는 유체 관성이 커지므로 각 실린더의 불로우다운 시에 발생하는 3개의 균일도의 급강하점이 확연하게 발견되었으며 최대 변동폭은 33.9%이고 1200rpm의 경우보다 크게 변하지 않았다. 이 결과로부터 CCC의 경우 엔진의 회전수의 변화에 따른 유속균일도의 비정상 변동폭은 크게 변화하지 않고 배기 다지판의 형상에 강하게 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6에 각 운전조건에서 CO 및 HC의 시간에 따른 변화를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 1200rpm의 경우는 유속균일도의 경우와 같이 6개의 급강하점을 볼 수 있으며 그 중 화살표로 나타낸 3개는 각 실린더의 불로우다운 직후에 나타나고 있음을 알 수 있다. CO의 경우 시간에 따른 최대 변동폭은 5.66%이며 HC의 경우는 9.75%였다. HC의 경우 모든 실린더의 배기과정이 끝난 후에 큰 폭으로 변환효율이 떨어지나 이 경우 배출되는 HC양이 매우 미소하므로 변동폭 계산 시 고려하지 않았다. CO에 비해 HC의 변환효율이 낮고 변동폭이 큰 것은 CO에 비해 HC의 산화반응율과 확산계수값이 낮고 CO의 억제효과(inhibiting effect) 때문이다. 3000rpm의 경우는 CO의 시간에 따른 최대 변동폭은 14%이며 HC의 경우는 14.4%의 최대 변동폭을 나타내었다. 운전속도가 증가함에 따라 CO 및 HC의 변환효율이 낮게 분포하는데 이는 모노리스 채널 내 배기가스의 속도가 증가하므로 충분한 화학반응이 일어나기 위한 배출물과 와류코트층과의 접

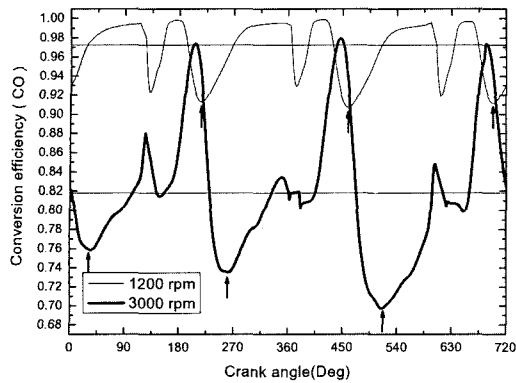


Fig. 5 Temporal variation of CO conversion efficiency

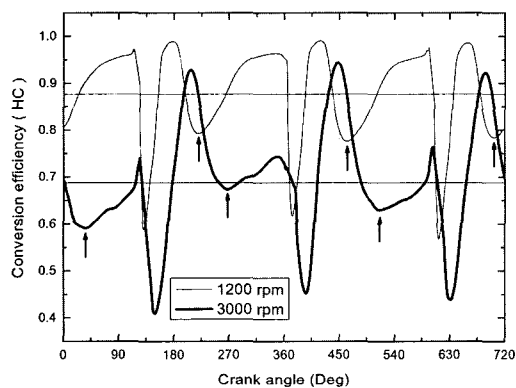


Fig. 6 Temporal variation of HC conversion efficiency

축시간이 불충분하여 물질전달의 한계상황(mass transfer limitation)이 발생하기 때문이다.

위의 결과로부터 실린더의 연속적인 배출과정으로 인한 모노리스 내의 불균일한 유속분포로 인하여 충분히 워업된 CCC라 할지라도 배출물의 주기적인 변환효율의 저하를 초래할 수 있음을 확인하였다. Fig. 7에 각 실린더의 최고질량유량을 토출하는 시점인 195°, 435°, 675°에서의 속도분포를 중앙단면에서 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 실린더에 연결된 배기관의 곡률 및 형상이 다르므로 각 실린더의 불로우다운 시의 모노리스를 통과하는 배기가스의 유속분포는 매우 편중되어 있음을 알 수 있다. 이러한 유속분포는 Fig. 8과 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 CCC 내의 온도분포 및 배출물의 농도분포에 결정적인 영향을 미친다. Fig. 8에서 보듯이 각 실린더의 불로우다운 시 토출된 가스가 집중되어 흐르는 영역은 낮은 온도가 분포되어 있음을 알 수

있으며 이는 모노리스 유입부에서의 빠른 유속의 가스로 인한 과도한 대류냉각에 기인한다. 결국 각 실린더에서 불로우다운시 발생하는 높은 속도의 토출가스의 편중된 흐름은 모노리스 내에 바닥밀 축매변환기(UCC)에서는 볼 수 없는 불균일한 온도분포를 형성하고 있음을 확인 할 수 있다. Fig. 9는 중앙 단면에서 CO의 농도분포를 입구농도로 무차원화하여 %로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 모노리스 내 가스의 온도분포와 농도분포는 매우 유사함을 알 수 있으며 또한 본 결과에서 주목할 점은 유속이 집중되는 영역에서는 높은 수준의 농도분포가 존재하고 유속이 느린 외곽영역에 낮은 수준의 농도가 분포하고 있다는 것이다. 유속이 집중하는 영역을 제외한 외곽부위에 높은 변환율을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 UCC에서의 결과와 상반된 것이다. UCC의 경우는 높은 대류열 유속이 통과하는 유속집중영역에서 높은 온도 및 변환효율을 나타낸다. 그러나 CCC의 경우 대류열 유속이 집중되는 영역에서 오히려 변환율이 낮게 분포하는데 이는 엔진과의 근접거리에 장착되어 있는 이유로 UCC에 비해 매우 빠른 유속이 통과하므로 유속집중영역에서 배출물과 와쉬코트와의 접촉시간이 매우 짧아 충분한 화학반응이 일어나지 못하여 물질전달의 한계가 존재하며 또한 화학반응에 의한 발열량보다 빠른 가스의 유속으로 인한 하류로의 대류열전달량이 증가함에 따른 과도한 냉각이 일어나기 때문이다. 본 연구의 계산결과로 부터 CCC에 있어서 모노리스의 균일한 공간속도의 분포가 열적 신뢰성 향상에 중요한 설계인자임을 확인할 수 있다. 또한 기존의 UCC의 연구결과와는 다르게 CCC의 경우는 높은 유속으로 인하여 유속집중영역보다는 주변영역에서 국부적인 고온영역이 발생하며 따라서 심각한 온도구배를 야기시킬 수 있다. 특히 EPA는 10%의 부가적인 부하를 줄 수 있는 에어컨을 켜 상태에서 배기가스를 측정하는 시험 사이클을 제안한 상태이므로 CCC의 열적 신뢰성은 모노리스로의 유입배기매니홀드 및 확대부의 형상 최적화로 인한 균일한 공간속도분포에 좌우된다고 해도 과언이 아니다. 그러나 현실적으로 좁은 엔진룸의 공간적 제약으로 인하여 균일한 공간속도를

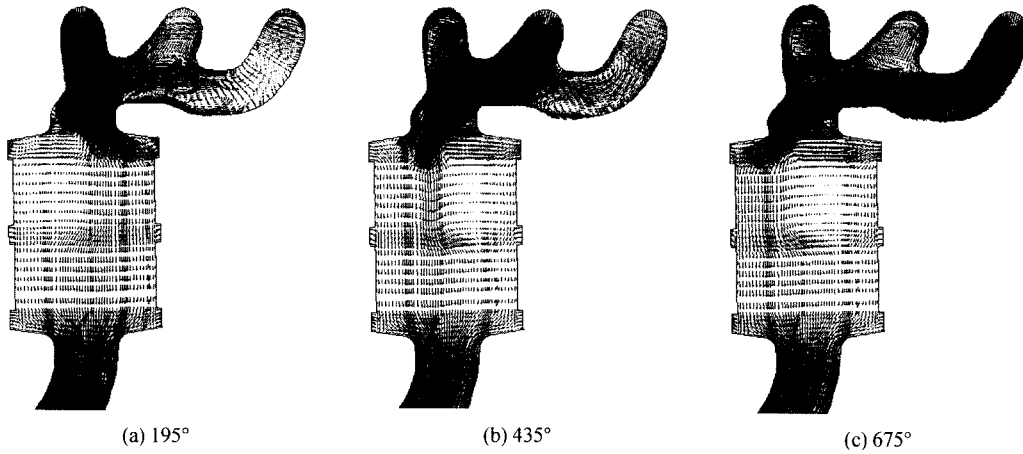


Fig. 7 Flow distribution within the CCC right after port firing

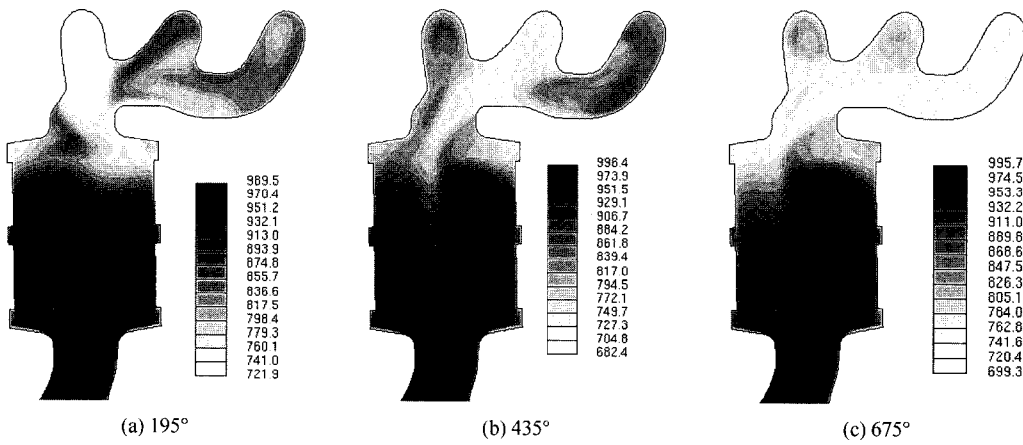


Fig. 8 Gas temperature(K) distribution within the CCC right after port firing

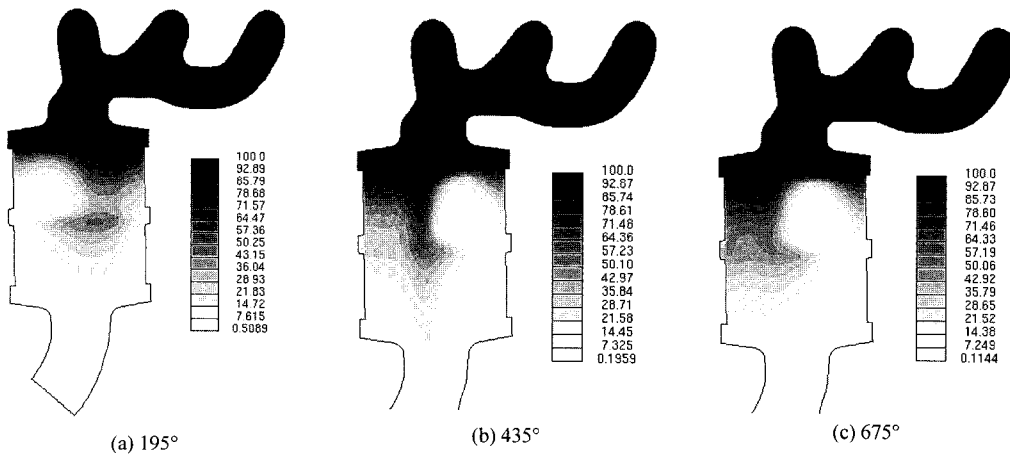


Fig. 9 CO concentration distribution(%) within the CCC right after port firing

얻기는 매우 어려우므로 본 연구에서 개발된 수치 해석 기법을 이용하여 가혹한 운전조건에서의 온도 분포를 예측하여 형상최적화를 피한다면 촉매의 노화를 방지하여 열적 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.

### 3.2 모노리스의 셀밀도와 CCC 성능

최근들어 활성화 시간을 단축하고 배기가스의 열을 효과적으로 활용하여 냉간 배출물을 억제하기 위하여 높은 셀밀도의 모노리스를 CCC에 적용하기 시작하였다. 본 연구에서는 셀밀도의 변화가 CCC의 성능에 미치는 영향을 연구하기 위하여 Table 1에 나타난 것과 같이 현재 상용되고 있는 3가지의 셀밀도를 적용하여 해석을 수행하였다. Fig. 10과 Fig. 11에 각각 1200rpm과 3000rpm의 경우에 대한 CO의 시간에 따른 변환효율을 나타내었다.

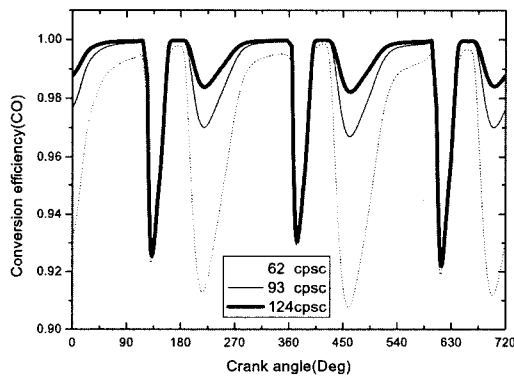


Fig. 10 Temporal variation of CO conversion efficiency for various cell densities, 1200rpm, WOT

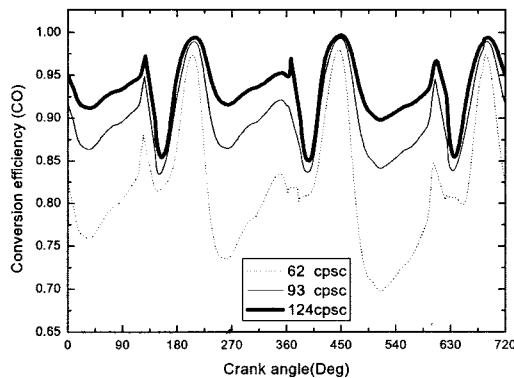


Fig. 11 Temporal variation of CO conversion efficiency for various cell densities, 3000rpm, WOT

그림에서 볼 수 있듯이, 셀밀도와 모노리스 전면부의 다공율이 높아질수록 각 채널에서의 가스 잔류시간이 증가하므로 실린더의 연속적인 배기과정에 의한 변환효율의 진동폭이 감소함을 알 수 있다. 특히 각 배기포트에서의 토출 직후의 가스의 잔류시간 부족에 의한 변환효율의 급격한 감소를 억제시킬 수 있음을 알 수 있다. 1200rpm일 때, 124cp/sc의 모노리스의 경우는 62cp/sc보다 시간에 따른 CO 변환효율의 최대 진동폭이 96.2% 감소하였다. 3000rpm의 경우는 CO의 최대 진동폭이 72.57% 감소하였다.

이러한 결과들은 높은 셀밀도와 얇은 채널벽두께를 지닌 모노리스의 CCC에 대한 적용은 배기가스 온도의 효율적 이용으로 인한 빠른 활성화를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 화학반응이 율속단계에 들어선 워업 된 상태에서도 블로우다운 시에 배출가스의 분자들이 촉매표면에 접촉할 수 있는 시간을 증가시켜 변환효율을 증가시킬 수 있음을 말해주는 것이다.

### 4. 결론

본 연구에서는 근접장착촉매변환기의 열적 신뢰성을 예측 분석할 수 있는 해석 모델을 개발하여 6기통 엔진에 장착된 근접장착촉매변환기에 적용하여 열적 신뢰성에 밀접한 관계가 있는 3차원 유동특성 및 온도분포를 예측하였다. CCC 내의 가스의 맥동특성을 묘사하기 위하여 가스역학 모델과 3차원 CFD 모델을 연계하여 계산하였다. 계산결과, CCC 내의 유속균일도 및 CO와 HC의 변환효율은 블로우다운 직후에 매우 낮은 유속균일도를 보였다. 본 연구의 연속적인 블로우다운에 따른 유속균일도의 변화는 최대 33.9%의 변동폭을 보였으며 3000rpm의 경우 CO는 14%, HC는 14.4%의 최대 변동폭을 나타내었다. CCC의 모노리스 내의 시간에 따른 농도분포 및 온도분포의 변화는 각 실린더의 연속적인 블로우다운에 직접적인 영향을 받았음을 확인하였다. 유속이 집중되는 영역에서는 높은 수준의 농도분포가 존재하고 유속이 느린 외곽영역에 낮은 수준의 농도가 분포하였으며 온도분포 역시 가스가 집중되어 흐르는 영역에서 낮은 온도가 분포되어 있음을

알 수 있었다. 결국 각 실린더에서 블로우다운시 발생하는 높은 속도의 토출가스의 편중된 흐름은 모노리스 내에 바닥밀 촉매변환기(UCC)에서는 볼 수 없는 불균일한 온도분포 및 농도분포를 형성하고 있으며 이는 주기적인 변환효율의 저하를 초래함을 알 수 있었다.

CCC의 모노리스의 셀밀도의 변화가 성능에 미치는 영향을 해석한 결과 셀밀도와 모노리스 전면부의 다공율이 높아질수록 각 채널에서의 가스 잔류시간이 증가하므로 실린더의 연속적인 배기과정에서의 변환효율의 진동폭이 감소함을 알 수 있다.

이와 같은 연구결과로부터 본 연구에서 개발된 해석모델을 사용하여 설계초기 시 열적 피로에 의한 노화영역을 최소화할 수 있도록 직결촉매변환기의 형상을 최적화한다면 열적 신뢰성 및 성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지정 한양대학교 신뢰성분석연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- 1) Y. Chen, "Structural Analysis of Catalytic Converters in Automotive Exhaust Systems," SAE 2002-01-0062, 2002.
- 2) R. Yuting, R. George, K. Masumi, C. Derlon, Y. Paul, "Optimum Gap Design and Durability Analysis of Catalytic Converter Assembly," SAE 2001-01-0942, 2001.
- 3) H. Bressler, D. Rammoser, H. Neumaier, F. Terres, "Experimental and Predictive Investigation of a Closed Coupled Catalyst Converter with Pulsating Flow," SAE 960564, 1996.
- 4) Y. Koudai, M. Kouji, K. Shuji, "Numerical Analysis of Exhaust Gas Flow and Heat Transfer in a Closed-Coupled Catalytic Converter System during Warm-up," SAE 2001-01-0943, 2001.
- 5) G. C. Koltsakis, D. N. Tsinoglou, "Thermal Response of Closed-Coupled Catalysts during Warm-up," SAE 2003 -01-1876, 2003.
- 6) R. S. Benson, *The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal-Combustion Engines*, Clarendon Press, Oxford, 1982.
- 7) H. N. Gupta, "Theoretical and Experimental Investigation of Multi-Cylinder Spark-Ignition Engine with Air-Injection and Catalytic Reactor," Ph.D Thesis, UMIST, UK, 1977.
- 8) E. R. Becker, C. J. Pereira, "Computer-Aided Design of Catalysts," Marcel Decker, Inc., pp.261-262, 1993.
- 9) S. J. Jeong, W. S. Kim, "Simulation of Thermal and flow characteristics for an Optimum Design of Automotive Catalytic Converter," *Chemical Engineering Communications*, Vol. 189, No.10, pp.1314-1339, 2002.
- 10) M. E. Berkman, A. Katari, "Transient CFD: How valuable is it for Catalyst Design?," SAE 2002-01-0064, 2002.
- 11) M. Luoma, M. Häkönen, R. Lylykangas and J. Sohlo, "Optimization of the Metallic Three-way Catalyst Behavior," SAE 971026, 1997.
- 12) S. J. Jeong, W. S. Kim, "Three-dimensional Numerical Study of the Effect of Pulsating Flow on Conversion Efficiency inside a Catalytic Converter," *Journal of Automobile Engineering, Proceedings Part D*, Vol.215, pp.45-61, 2001.
- 13) S. J. Jeong, W. S. Kim, "A Study of Light-off Performance of Catalytic Converter with the Effect of Flow Characteristics," *Transaction of KSAE*, Vol.7, No.5, pp.87-100, 1999.