배기계 형상에 따른 비정상 유동에서의 배기매니폴드와 촉매 입구 유동현상 해석

이재호* · 김대우* · 곽호철* · 박심수**†

Study on the Exhaust Flow Analysis of Unsteady Flow with Various Exhaust Manifolds and Catalyst Geometries

Jae-Ho Lee, Dae-Woo Kim, Ho-Chul Kwak and Simsoo Park

ABSTRACT

In recent year, as the current and future emission regulations go stringent, the research of exhaust manifold and CCC has become the subject of increasing interest and attention.

This study is concerned with the systematic approach to improve catalyst flow uniformity and light-off behavior through the basic understanding of exhaust flow characteristics. Computational approach to the unsteady compressible flow for exhaust manifold of 4-1 type and 4-2-1 type and CCC system of a 4-cylinder DOHC gasoline engine was performed to investigate the flow distribution of exhaust gases. In this study, through calculation, the effects of geometric configuration of exhaust manifold on flow structure and its maldistribution in monolith were mainly investigated to understand the exhaust flow patterns in terms of flow uniformity. Based on the design guidance resulting from this fundamental study, the flow uniformity of 4-2-1 type exhaust manifold demonstrated the more improved exhaust characteristics than that of the 4-1 type one.

Key Words : Uniformity index, Unsteady flow, Exhaust manifold, CCC, PZEV

기 호 설 명

BDC	Bottom Dead Center	DOHC	Double Overhead Camshaft
BMEP	Break Mean Effective Pressure	EVO	Exhaust Valve Open
CA	Crank Angle	PZEV	Partial Zero Emission Vehicle
CCC	Close Coupled Catalyst	γ	Uniformity index

1. 서 론

최근 북미를 중심으로 가솔린자동차의 배출가스를 근본적으로 차단하기 위한 PZEV 기술이 엔진 연소계 및 배기가스 후처리 부분에서 상당부분 진행되고 있어 국내 자동차 업계에서도 PZEV 규제 대응을 위한 연구 개발이 시급히 요구되는 시점이다.

PZEV 규제 대응을 위해 배기 시스템 개발 시 배기 매니폴드 유동 예측 기술 확립이 필수적인데 이를 위해서는 배기계의 유동 최적화가 요구되며, 특히 배기 매니폴드의 유동개선은 날로 강화되는 배기가스규제와 배기계의 내구성확보에

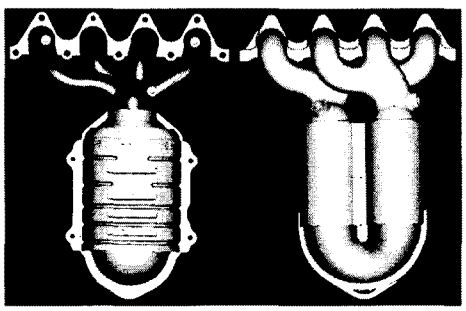
* 고려대학교 기계공학과 대학원
† 연락저자, spark@korea.ac.kr
** 고려대학교 기계공학과

필수적 과제 중의 하나이다. 배기 매니폴드 유동 개선안 마련을 위해서는 전산 해석 Process와 배기 시험을 적절히 병행, 활용하는 것이 개발 기간 단축 및 비용 절감 측면에서 효과적이다.

따라서 본 연구의 최종 목표는 CFD를 이용한 이론적 해석을 통해 가솔린 엔진 배기 매니폴드의 Base 사양 설계도면을 이용하여 모델링과 유동해석을 수행하고 이를 기초로 하여 개선안을 설계하고 해석, 비교한 후에 PZEV 규제 대응을 위한 배기계 설계 기술을 확립하여 개발기간을 단축하고 효율적인 배기계 설계 가이드라인을 제시함을 목적으로 한다.

2. 해석 모델 및 격자

2.1 해석 모델



(a) 4-1 type (b) 4-2-1 type

Fig. 1 Comparison of geometric configuration for two type of exhaust manifolds and catalysts

Fig. 1은 본 연구의 해석 대상 배기매니폴드의 형상을 나타내 것으로 기존 사양인 4-1 type과 개선 사양인 듀얼형 4-2-1 type을 나타낸다.

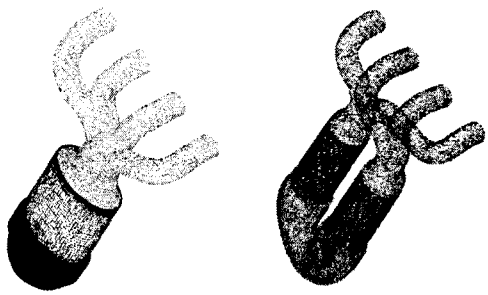
Table 1 The specification of the adopted exhaust system

Engine	Displacement	1.5ℓ	
	Firing Order	1-3-4-2	
	No. of Cylinder	4	
	Valve Timing	5/35 43/5	
Exhaust Manifold	Type	4-1	4-2-1
	Inlet area	$1.032\times10^{-3}m^2$	
	Hydraulic Diameter	3.625㎜	
Catalyst	Substrate type	Oval	Round
	Density/ Wall thickness	400/6.5	
Operating Condition	Engine speed/ Load	2000rpm/ 6.0 bar BMEP	

Table 1은 본 연구에서 사용한 엔진 제원, 배기 시스템의 형상과 주요 특성치를 나타내었으며 엔진 rpm과 Load 조건은 2000rpm, 6.0 bar BMEP이며 밸브 타이밍은 5/35 43/5 이다. 각 배기밸브는 228°CA동안 열리게 되며 1번 실린더의 EVO말기와 3번 실린더의 EVO 초기에 56° CA동안 배기밸브 중첩 구간이 존재한다.

2.2 해석 격자

본 연구에서는 실제 형상에 대한 CAD data를 상용 CAD 프로그램인 Pro-Engineer로부터 격자 생성을 위하여 표준 그래픽 형식인 IGES형식으로 변환시켰다. 그리고 IGES 형식을 상용 격자 생성 프로그램인 Pro-am을 이용하여 격자를 생성하였다. 연구에 사용된 전체 격자수는 4-1 type의 경우 358,504개, 4-2-1 type의 경우 316,622개이다. Fig. 2에 두 사양에 대한 3차원 격자의 형상을 나타낸다.



(a) 4-1 type (b) 4-2-1 type

Fig. 2 3-D mesh configuration of exhaust manifold and CCC systems

3. 수치해석

3.1 담체 전면에서의 균일도 지수

촉매변환기에 있어서 배기관으로부터 유입되는 가스의 유속분포는 배출가스의 정화 효율과 촉매의 내구성에 영향을 미친다. 그러므로 이에 대한 지표를 설정하는 것이 매우 중요하다. 균일도 지수는 촉매입구 유동의 균일 정도를 파악하기 위한 것으로 본 연구에서는 Welten[1] 등이 제안한 다음의 식을 사용한다.

$$\gamma = 1 - \sum_{i=1}^{N} \frac{|v_i - \bar{v}|}{2\bar{v}S} S_i \quad (1)$$

S : cross-sectional area of a monolith

v_i : local flow velocity in channel i

$\bar{v}$: average velocity

S_i : cross-sectional area of channel i

3.2 담체의 수학적 모델

담체는 높은 정화효율을 얻기 위해서 단면적을 최대한 증가시킨 구조로 많은 수의 사각형 셀로 이루어져 있고 이런 구조로 인하여 가스가 담체를 통과할 때 마찰손실로 인하여 큰 압력강하가 일어난다. 전산해석에서는 촉매 담체의 각각의 셀을 격자로 만들어 해석하기가 거의 불가능하므로 실험을 통한 촉매 담체 전후에서의 압력차를 측정한 후 식 (2)의 촉매 담체에서의 유량에 따른 압력강하의 관계를 이용하여 수치적으로 모델링하고 있다. 이러한 사실을 응용하여 담체는 유동이 단지 축방향으로만 지나갈 수 있도록 제한하는 다공성 셀로 모델링할 수 있고 상용코드인 Star-CD[2]에서는 다공성 매질에서의 유량에 따른 압력강하 특성에 대한 모델로 다음과 같은 압력과 저항력 사이의 관계식을 이용한다.

$$\frac{dP}{dx_i} = -\left(\alpha_i|\bar{v}| + \beta_i\right)u_i \qquad (2)$$

식 (2)의 계수 α_i, β_i는 주어진 담체마다의 특성값으로 담체의 반경방향에 대해서는 질량전달이 없어야 하므로 유동을 억제하기 위해 큰 값(10^6)으로 설정하였으며 유동 방향으로는 각각 6.3, 1472.3의 값을 지정하였다.[3][4][5]

3.3 수치해석 조건

비정상상태에서의 유동해석은 정상상태의 유동해석과 달리 초기조건에 큰 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 먼저 1번, 2번 실린더의 배기밸브가 동시에 열려있을 때 정상상태의 유동을 계산한 후 유동이 안정된 결과로부터 비정상상태의 해석을 수행하였다.[6]

경계조건으로는 배기 매니폴드 입구는 유량조건으로 지정하고 출구 조건은 압력경계조건을 사용하였으며 압력값은 실험적으로 구한 배압을 이용하였다. 2000rpm의 운전 조건에 대해 계산간격은 0.5°CA로 진행시키면서 각 시간단계에 대해 수렴시켰다. 대류항 및 밀도 계산을 위해서는 상류 차분법(Upwind scheme) 및 이상기체 상태방정식을 사용하였고 운동량 방정식의 계산에는 PISO algorithm을 적용하였다.

4. 해석결과

실제 기관에 장착된 배기시스템은 기하학적으로 복잡한 곡면을 갖는 3차원 형상이며 그 내부에는 담체의 저항, 유동간섭 등을 비롯한 여러 가지 요인들이 존재하므로 실린더에서 유입된 배기가스는 복잡한 3차원 유동형태이다. 이를 해석하기 위해 본 연구에서는 유동 조건을 비정상상태로 해석을 수행하여 제반인자들이 혼합 특성 및 유동분포 그리고 촉매입구의 유동균일성에 각각 어떤 영향을 미치는가에 관해 조사하였다.

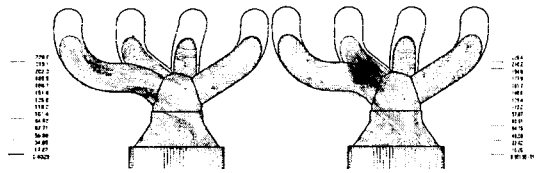
4.1 유동분포

Fig. 3은 4-1 type의 배기매니폴드와 혼합부에서의 속도분포를 나타내고 있으며 각 분기관에서 나온 배기가스가 디퓨저 형태의 혼합부를 거쳐 촉매로 유입된다.

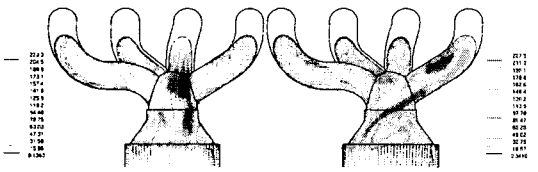
Fig. 3(a)는 1번 실린더의 주유동이 배출될 때의 속도분포이다. 이 때는 1번 실린더의 피스톤이 BDC가 지난 7°CA의 경우로 Blowdown 과정으로 인해 급격하게 유속이 증가되는 부분이다. 이때의 빠른 유속으로 1번 배기관에서 나온 유동은 큰 관성력을 가지게 되고 1번 분기관이 혼합부에 수평하게 유입되므로 혼합부의 우측으로 편심되어 지나게 된다. 담체까지 내려온 배기가스는 담체의 저항과 급속히 전달되는 많은 배기유량으로 인하여 담체의 일부분만을 사용하게 되고 담체내로 들어가지 못한 배기가스는 주유동 옆으로 재순환된다. Fig. 4(a)는 1번 실린더의 주유동이 촉매면에 수직하게 유입되는 성분의 유동분포를 나타내고 있다. 담체로 유입된 배기가스는 Fig. 3(a)에서 나타난 것과 같이 유동이 오른쪽으로 편심된 결과를 보여준다. 또한 촉매 입구의 외곽 원주부분에는 유동이 거의 흐르지 않는 영역(Dead Zone)이 존재하는데, 이는 디퓨져 형태의 혼합부와 촉매의 연결 부위가 급속확대관의 역할을 하기 때문이다. 이러한 경향은 Fig. 4 (b), (c), (d)에서 나타난 것과 같이 2, 3, 4번 실린더에도 동일하게 나타나는 현상이다.

Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)는 2번 실린더의 주유동이 배출될 때의 유동분포를 나타낸다. 1번 배기관보다 혼합부에 수평하게 연결된 정도는 덜하나 1번 배기관과 같이 2번 배기관도 혼합부의 좌측에서 연결되고 이러한 결과 유동은 우측으로 편심된다. 주유동이 2번 배기관을 지나면서 기하학적 형상으로 인해 1번과 4번 배기관의 말단에 재순환 영역이 생성되고, 담체까지 내려온 배기가스는 담체의 오른쪽으로 편심되고 주유동 옆으로 재순환 영역이 존재한다. 이러한 촉매 입구에서 발생하는 재순환 영역은 유동 균일도에 악영향을

미칠것으로 보인다.

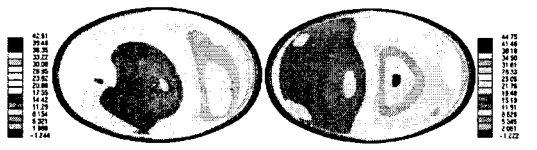


(a) No. 1 cylinder (7°CA) (b) No. 2 cylinder (547°CA)

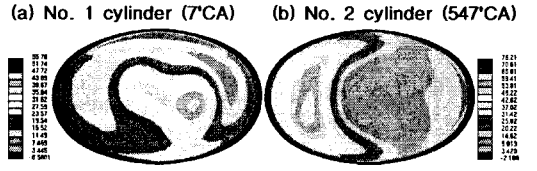


(c) No. 3 cylinder (187°CA) (d) No. 4 cylinder (367°CA)

Fig. 3 Velocity distribution of exhaust manifold and mixing zone (4-1 type)



(a) No. 1 cylinder (7°CA) (b) No. 2 cylinder (547°CA)



(c) No. 3 cylinder (187°CA) (d) No. 4 cylinder (367°CA)

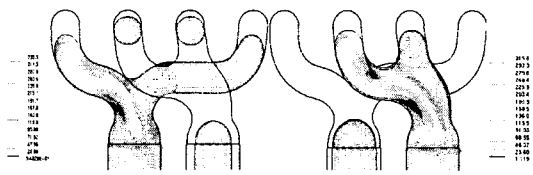
Fig. 4 Flow distribution of catalyst frontal face (4-1 type)

3번 실린더의 주유동이 배출될 때인 187°CA에서의 유동 형태를 보여주는 Fig. 3(c), Fig. 4(c)에서는 주유동이 혼합부에 거의 수직하게 유입된다. 1번과 2번 실린더의 주유동이 촉매 우측으로 치우친 데 비해 3번 실린더의 주유동은 촉매 중앙으로 유입됨을 확인할 수 있다. 촉매의 좌·우측으로 재순환 영역이 존재하나 1번, 2번 실린더에 비해 많이 축소된 모습을 보여준다.

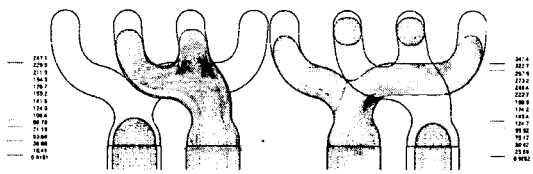
Fig. 3(d)와 Fig. 4(d)는 4번 실린더의 주유동이 배출될 때의 속도분포를 나타낸다. 유동은 4번 배기관이 혼합부의 우측에서 결합되어 배기관에서 나온 유동은 확대관의 좌측벽면을 따라 편심되어 지나간다. 담체까지 내려온 배기가스는 담체의 왼쪽으로 편심되고 반시계방향의 재순환 영역이 존재한다.

따라서 담체 입구에서의 급속한 확대로 인한 Dead zone 뿐만 아니라 각 배기관이 혼합부에 수평하게 연결되는 형상으로 인해 배기 간섭이 생기게 되고 또한 담체 입구로 유입되는 유동이 편심된 결과를 가져와 유동 균일도에 악영향을 미칠 것으로 보인다.

Fig. 5는 4-2-1 type의 배기매니폴드와 혼합부에서의 유동 분포를 나타내며 Fig. 6은 촉매면에 수직하게 유입되는 성분의 유동분포를 나타낸다.

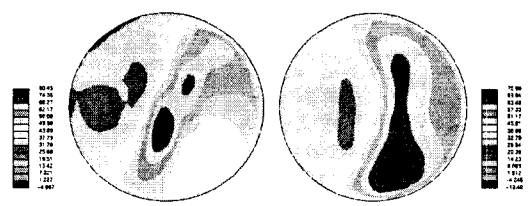


(a) No. 1 cylinder (7°CA) (b) No. 2 cylinder (547°CA)

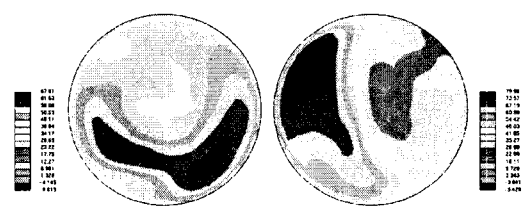


(c) No. 3 cylinder (187°CA) (d) No. 4 cylinder (367°CA)

Fig. 5 Velocity distribution of exhaust manifold and mixing zone (4-2-1 type)



(a) No. 1 cylinder (7°CA) (b) No. 2 cylinder (547°CA)



(c) No. 3 cylinder (187°CA) (d) No. 4 cylinder (367°CA)

Fig. 6 Flow distribution of catalyst frontal face (4-2-1 type)

Fig. 5(a), 6(a)의 1번 실린더의 주유동이 배출될때의 양상은 1번 분기관이 혼합부에 완만하게

유입되어 혼합부의 우측으로 다소 편심되나 주유동은 담체의 중앙으로 유입된다.

2번 실린더의 주 유동이 배출될 때의 유동분포를 나타내는 Fig. 5(b), 6(b)에서는 1번 배기관과 같이 2번 배기관도 혼합부의 좌측에서 결합하고 이러한 결과 유동은 우측으로 치우치게 된다. 4-2-1 type의 경우 1번 4번 배기가스는 좌측 담체로 유입되고 1번과 3번 배기관의 배기가스는 우측으로 유입된다. 따라서 4-2-1 type의 경우 연소순서에 따라 담체로 유입되는 유동은 180° CA 마다 유입되므로 실린더간의 간섭이 적어 때문에 재순환영역은 4-1 type보다 현저하게 줄어든다.

3번 실린더의 주유동이 배출될 때인 187°CA에서의 유동형태는 Fig. 5(c), 6(c)에서와 같이 주유동이 혼합부에 거의 수직하게 유입된다. Fig. 5(c)에서 유동의 일부가 2번 배기관의 벽면을 따라 흐르게 되어 형상에 의한 간섭이 일어난다. Fig. 6(c)에서는 1번과 2번 실린더의 주유동이 담체 우측으로 치우치나 3번 실린더의 주유동은 담체 앞쪽으로 다소 치우쳐 유입된다.

Fig. 5(d), 6(d)는 4번 실린더의 주유동이 배출될때의 속도분포를 나타내며 4번 배기관이 혼합부의 우측에서 결합되어 배기관에서 나온 유동은 혼합부의 좌측 벽면을 따라 편심되어 지나 담체 입구에서도 좌측으로 치우치게 된다.

4.2 유동 균일도

촉매 담체 입구의 균일도는 배기 유동이 촉매 입구로 유입될 때 촉매 단면에서의 유동 분포의 균일한 정도를 나타낸 것으로 촉매의 정화 성능 및 촉매의 내구성과 밀접한 관련이 있는 매우 중요한 척도이므로 배기매니폴드와 혼합부의 형상 결정시 고려해야할 인자이다. Fig. 7은 두 가지 사양의 배기시스템에 대하여 담체 입구에서 계산한 한 사이클 동안의 비정상상태 균일도를 1번 실린더의 EVO를 기준으로 나타낸 것이다. 4-1 type의 균일도 지수는 0.51에서 0.81사이로 산술평균으로 0.76의 값을 나타낸다. 전체적으로 한 사이클 동안 네 번의 급격한 감소가 존재한다. 이 급격한 감소는 Blowdown 과정으로 인해 주유동이 한쪽으로 편중되므로 큰 폭으로 떨어지는 경향을 보인다. 4번 실린더의 경우 더욱 큰 값으로 균일도가 떨어지게 되는데 이는 Fig. 4(d)에서 본 바와 같이 유동 편중이 심화되어 좁은 부분에서 빠른 속도로 담체에 유입되기 때문이다.

4-2-1 type의 경우 2개의 독립된 담체를 지니고 있으므로 좌측과 우측의 유동균일도를 연소순서에 따라 실제 유동이 지나는 구간만 고려하여 도시하였다. 균일도 지수는 0.61에서 0.98사이로 평균 균일도는 0.952 수준이다. 4-2-1 type의 평균 균일도 분포는 4-1 type의 경우와 유사하게 전체적으로 한 사이클 동안 네 번의 급격한 감소가 존재한다. 이 급격한 감소는 4-1 type과 같이 Blowdown 과정으로 인한 주 유동이 한쪽으로 편중되므로 큰 폭으로 떨어지는 경향을 보인다.

4-2-1 type의 유동 균일도는 4-1 type에 비해 0.196(26%)의 개선을 보였다.

4-2-1 type 유동 균일도 향상의 원인으로는 1) 각각의 담체에 360°CA 간격으로 유동이 유입되고 2) 4-1 type의 경우 촉매 입구 반경 방향의 끝 부분에 약 5mm 정도의 Dead zone이 존재하므로 담체 전면을 효율적으로 이용하지 못하나 4-2-1 type은 Dead zone이 없는 형상이므로 유동 균일도의 향상을 도모할 수 있다. 3) 4-2-1 type의 runner profile이 유동이 통과하기에 원만한 형상이고 촉매 입구에서 유동의 재순환이 축소되고 배기유동의 편심을 감소시킬 수 있다. 이러한 균일도 특성은 궁극적으로 부분 부하에서의 촉매 정화효율 향상에도 긍정적으로 작용하므로 배출가스 저감 효과가 기대된다.

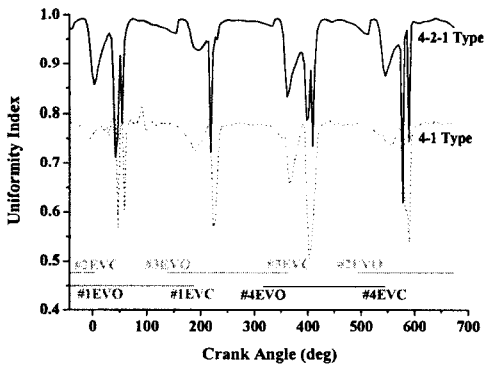


Fig. 7 Comparison of Uniformity index

5. 결 론

본 연구에서는 CFD를 이용한 이론적 해석을 통해 SULEV 대응을 위해 제안된 4-1 type 가솔린 엔진 배기 매니폴드 사양의 설계도면을 이용하여 모델링과 유동해석을 수행하고 이를 기초로 하여 4-2-1 type을 해석하고 비교한 후에 SULEV 및 PZEV 규제 대응을 위한 배기계 설계 기술을 확립하여 효율적인 배기계 설계 가이드라인을 제시를 목표로 한다. 이를 위해 각 사양의 배기시스템에 대해 그 형상을 모델링하고, 실제 엔진 배기 조건을 모사하기 위한 수치해석 모델을 확립함으로써 그 내부에서 발생하는 3차

원 압축성 비정상상태 난류 유동을 해석하였다. 그리고 이를 바탕으로 유동의 간섭과 담체의 저항, 배기시스템의 형상 등이 유동 특성 및 유동 균일도에 미치는 영향을 규명하였다. 이상의 연구에서 얻은 결론을 종합하면 다음과 같다.

(1) 2000 rpm의 운전조건에서 4-2-1 type의 유동 균일도는 0.61 ~ 0.98 수준이며 평균 균일도는 0.952 로 4-1 type에 비해 0.196(26%)의 개선을 보였다.

(2) 4-1 type의 경우 촉매 입구 반경 방향의 끝부분에 약 5mm 정도의 Dead zone이 존재하므로 담체 전면을 효율적으로 이용하지 못하나 4-2-1 type은 Dead zone이 없는 형상이므로 유동 균일도의 향상을 도모할 수 있다.

(3) 4-1 type에서는 실린더간 배기 간섭 및 혼합부의 재순환영역에 의한 배기계의 효율 저하를 방지하기 위하여 배기 매니폴드의 형상 개선이 요구된다.

(4) 4-2-1 type의 runner profile은 4-1 type에 비하여 유동이 통과하기에 유리한 형상이고 촉매 입구에서 유동의 재순환이 축소되므로 배기유동의 편심을 감소시킬 수 있다. 이러한 균일도 특성은 궁극적으로 부분 부하에서의 촉매 정화효율 향상에도 긍정적으로 작용하므로 배출가스 저감 효과가 기대된다.

후 기

본 연구는 NGV 및 현대자동차의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

[1] H. Weltens, H. Bressler, F. Terres, H. Neumaier, and D. Rammoser, "Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD prediction", SAE Paper 930780
[2] Star-CD User Manual, 2004
[3] 조영진, 박심수, 정진택, 윤금중, "촉매 단면 형상 변화에 따른 촉매 특성의 변화 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회, 98380179, 1998.
[4] 이선엽, 박심수, 김호영, 조경민, "촉매단면 형상변화에 따른 CCC내의 유동 해석", 한국자동차공학회 추계학술대회, 98380156, 1998.
[5] W. G. Lee, H. J. Lim, "Parameter Study of Exhaust Pressure in Catalytic Converter", Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 5, pp. 77-82, 2003
[6] H. S. Kim, K. Min, C. L. Myung and Simsoo Park, "A Combined Experimental and Computational Approach to Improve Catalyst Flow Uniformity and Light-Off Behaviour", Proc Instn Mech Engrs, Vol. 216 Part D: J Automobile Engineering, 2002.