

촉매를 고려한 배압 계산에서의 인자 결정 연구

이 원 근¹⁾ · 임 효 재^{*2)}

현대자동차¹⁾ · 호서대학교 기계공학과^{*2)}

Parameter Study of Exhaust Pressure in Catalytic Converter

Wongeun Lee¹⁾ · Hyojae Lim^{*2)}

¹⁾Hyundai Motor Company, 772-1 Jangduk-dong, Hwasung-si, Gyeonggi-do 445-855, Korea

^{*2)}Department of Mechanical Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea

(Received 19 April 2003 / Accepted 4 July 2003)

Abstract : A parametric study was conducted on pressure drop in a catalytic converter for automobile. In this work, we proposed a new pressure drop relation which contains the various parameters needed to calculate and got a few results. In a monolith of catalyst, the flow originally turbulent flow changes to laminar flow and thus the pressure drop through the monolith is linearly proportional to the velocity. The exhaust pressure is doubly affected by the increase of mean velocity and length when we decrease the diameter of monolith while the volume keeps constant. Theoretical parameters such as α and β are suggested to use as a reference value when there is no a experimental data. Especially in the part load test, these values should be modified to consider the property change of exhaust gas.

Key words : Catalytic converter(촉매변환장치), Pressure loss(압력손실), Geometric surface area(GSA, 기하학적 표면적), Open frontal area(OFA, 전면개방면적)

Nomenclature

A : total frontal area of monolith, m²
D_h : hydraulic diameter, m
f : Fanning friction factor, $f = \tau_{wl} / (\rho V^2 / 2)$
K : pressure loss factor
P : pressure, N/m²
Po : Poiseuille number
Q : volumetric flow rate, m³/s
Re : Reynolds number
T : Temperature, °C
t : thickness of substrate, m
 \vec{v} : velocity vector, $V = |\vec{v}|$, m/s

α, β : coefficients
 λ : flow length of monolith, m
 μ : viscosity, kg/(m · s)
 ρ : density, kg/m³

Subscripts

c : coating
i : tensor index
o : reference monolith

1. 서론

1993년도에 Weltens¹⁾ 등이 유동의 균일도(uniformity index)에 의한 촉매면 유동 균일도 정량화 방법을 제안한 이래로, 배기 다기관 의 형상 및 배기계 레

*To whom correspondence should be addressed.
hylim@office.hoseo.ac.kr

이아웃 구성이 촉매 면으로의 유동 균일도에 미치는 영향을 전산유체해석(CFD)을 통해서 예측하려는 연구와,^{2,3)} 실험적으로 압력손실을 측정하려는 연구가 계속되어 왔다.⁴⁾ 전산 해석에서 촉매 부분은 다공질 물질로 상사되어 모델링 되었는데, 촉매에 의한 배압의 증가를 구현하기 위해서 일반적으로 다음과 같은 식으로 표현되는 압력증가 항을 사용하였다.⁵⁾

$$\frac{dP}{dx_i} = -(\alpha_i \vec{v} + \beta_i) v_i \quad (1)$$

이것은 촉매에 의한 배압의 증가가 유속에 비례하는 항과 유속의 제곱에 비례하는 항으로 나누어진다는 것을 의미한다. 상용코드(STAR-CD 등)를 이용한 실제 계산에서 α 와 β 의 값을 주기 위해서는 실험값을 사용하는 방법이 있으나, 모든 촉매에 적용하기 어렵고, 고온인 배기가스의 물성치 변화를 고려한 실험 자료는 매우 부족한 실정이다. 따라서, 압력 특성을 모르는 촉매에서 α 와 β 의 값을 가정하기 위한 검토가 필요하다. 이 방법을 이용하면 촉매의 사양을 변경하였을 때 배압에 어떤 영향을 미치는지를 정량적으로 예측하는 단서를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구내용 및 결과

촉매의 규격을 나타내는 단위로는 cps/mil (cells per square inches / mili-inch)이 많이 쓰이는데, cell의 밀도와 substrate의 두께를 나타낸다. 예를 들어, 400/6.5의 사각형 cell 단면을 갖는 촉매라고 한다면, 1 평방인치에 400 cell이 있으므로 사각형의 한 변은 1.27 mm이고, substrate 두께는 6.5/1000 인치이므로 0.1651mm라는 의미이다. 여기에 washcoat를 코팅하면 그 단면은 Fig. 1과 같은 형상이 된다.

위와 같은 cell 형상을 일반화하여 배압에의 영향을 규명하고자 하는 연구는 많이 있었는데 그 결과는 Park 등⁶⁾의 논문에 잘 정리되어 있다.

Fig. 2는 코팅한 후 cell의 형상을 나타내기 위한 도식이다.⁶⁾ 이 형상은 다음과 같은 규칙적인 형태를 갖는다.

$$L = \frac{1}{\sqrt{N(\text{cps})}} \quad (\text{in}) \quad (2)$$

$$= \frac{25.4}{\sqrt{n(\text{cps})}} \quad (\text{mm})$$

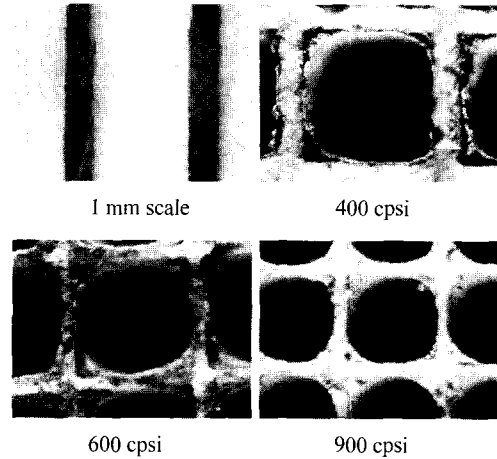


Fig. 1 Enlarged pictures of various cells

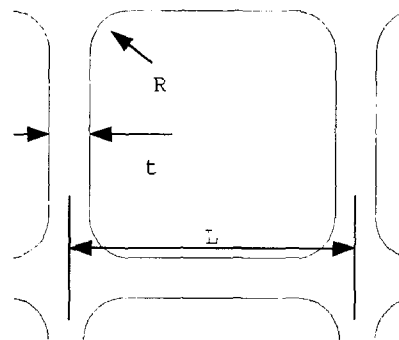


Fig. 2 Dimension of square cell

$$t = \frac{25.4 \times M(\text{mil})}{1000} \quad (\text{in}) \quad (3)$$

$$= \frac{2 \times t_c(\mu\text{m})}{1000} \quad (\text{mm})$$

여기에서, t_c 는 코팅의 두께이고, R은 코팅에 의해 형성되는 코너의 곡률반경이다. 참고로 Fig. 1에서 보면 R은 cell 밀도와 거의 무관함을 알 수 있다. 따라서 단면의 형상은 저밀도 cell에서는 사각형에 가까우나 고밀도 cell이 될수록 원형에 가까워진다.

촉매의 형상을 규정하기 위한 인자(parameter)로 널리 쓰이는 것으로는 GSA와 OFA가 있다. GSA(geometric surface area)는 촉매의 단위 체적당 washcoat의 면적을 나타내며, OFA(open frontal area)는 촉매의 전체 단면적 대비 열린, 즉 유동이 흐르는 면적의 비율이다. 위의 값들은 Fig. 2를 참조로 하여 사각형 cell에서는 다음과 같이 계산된다.

$$GSA = \frac{4}{L^2} \left[(l-t) - (4-\pi) \frac{R}{2} \right] \quad (4)$$

GSA의 단위는 in^2/in^3 , mm^2/mm^3 , m^2/liter , cm^2/cm^3 등이 일반적으로 사용된다. 또한 OFA는 다음과 같이 계산되며 차원은 무차원이다.

$$OFA = \frac{1}{L^2} [(L-t)^2 - (4-\pi) R^2] \quad (5)$$

전체 촉매의 단면적을 A라 하면 사각형 cell 내부의 유동이 흐르는 부분에서의 평균속도는 다음과 같다.

$$|\vec{v}| = \frac{Q}{(OFA \times A)} \quad (6)$$

Taylor 등⁷⁾은 촉매변환기 내의 유동분포에 관한 논문에서, 촉매 내부에서 발생하는 압력손실을 설명하였다. Hagen-Poiseuille 유동을 원형관이 아닌 경우로 확장하고 입구 효과(entrance effect)를 추가하면, 압력강하의 관계식은 다음과 같이 된다.⁸⁾

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho |\vec{v}|^2} = \left(\frac{Q}{(OFA \times A)} \right) \quad (7)$$

여기서 f는 Fanning friction factor이다.

$$f = P_o / Re \quad (8)$$

Poiseuille 계수 P_o 는 cell의 모양에 따라 정해지는데, 정사각 cell에서는 14.227이고, 관유동에서는 16.000이다.⁹⁾

따라서, R이 거의 일정하고 cell의 크기가 작아질수록 원형에 가까워지는 점에 착안하여 사각형 cell에서는 임시로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_o = \min \left(16, 14.227 + 1.773 \times \frac{2R}{L-t} \right) \quad (9)$$

여기에서 레이놀즈수와 수력반경은,

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (10)$$

$$D_h \equiv \frac{4 \times \text{area}}{\text{wetted perimeter}} = \frac{4 \cdot OFA}{GSA} \quad (11)$$

와 같이 정의된다.

K 값은 채널 유동의 입구효과를 나타내는 값으로, 무한이 긴 관에서 1.43의 최대값을 갖는다고 알려져 있다.⁸⁾

그러나, 이 값의 의미를 생각해 보면, 난류 유동이 유입되어 층류로 천이되기 전까지의 영향이 포함되는 것으로 생각할 수 있다. 촉매는 직경이 매우 작은 cell이 촘촘히 배열된 형태이므로, 그 내부를 흐르는 유동의 Reynolds 수는 낮으며, 난류 유동이 유입되어도 곧바로 층류로 천이된다. 따라서, 층류유동의 저항 식을 이용하면 속도에 비례하는 압력강하를 예측할 수 있으나, 실제로는 천이되기 전의 난류유동 성분 등에 의해 약간의 비선형성이 생긴다.

따라서 압력강하 식을 정리해 보면 다음과 같이 된다.

$$\Delta P = \frac{4 \cdot \lambda \cdot P_o}{D_h} \left(\frac{\mu}{\rho |\vec{v}| D_h} \right) \frac{\rho}{2} |\vec{v}|^2 + K |\vec{v}|^2 \quad (12)$$

$$\Delta P = \frac{\mu \cdot \lambda \cdot P_o}{8} \left(\frac{GSA}{OFA} \right)^2 \frac{Q}{(OFA \times A)} + K \frac{\rho}{2} \frac{Q^2}{(OFA \times A)^2} \quad (13)$$

위 식에서 모든 단위는 MKS 단위계를 사용한다. 그리고 압력이 Pa로 나오기 위한 각각의 단위는 $GSA[\text{m}^2/\text{m}^3]$, K는 압력손실계수로 무차원, ρ 는 밀도로 $[\text{kg}/\text{m}^3]$, μ 는 점성계수로 $[\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}]$, A는 촉매의 전 단면적으로 $[\text{m}^2]$, l은 촉매의 길이로 $[\text{m}]$ 이다.

따라서 $V=Q/A$ 로 정의되는 상용코드에서 식 (13)과 식 (1)을 비교하면, α 와 β 의 식을 유도할 수 있다.

$$\alpha = \frac{\rho K}{2 \lambda OFA^2}, \quad \beta = \frac{\mu \cdot P_o}{8} \frac{GSA^2}{OFA^3} \quad (14)$$

촉매의 축 방향 성분은 이 값을 주고, 기타 방향 성분은 충분히 큰 값(10^7 정도)으로 준다.

3. 결과 검토

3.1 GSA와 OFA의 일반적인 경향

촉매에서의 압력강하에 대해서는 여러 촉매 업체에서 측정 또는 계산한 결과가 있으며, 대표적으로 아래와 같은 Corning사의 결과를 제시한다.¹⁰⁾ 이 결과는 유량 300 kg/h, 온도 800°C의 조건에서 GSA와 OFA의 경향에 따른 압력 손실을 나타낸 것으로, substrate의 밀도나 벽두께, 코팅 등의 영향을 모두 포함하는 것이다.

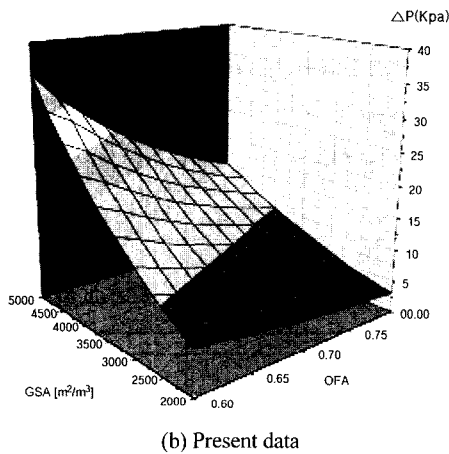
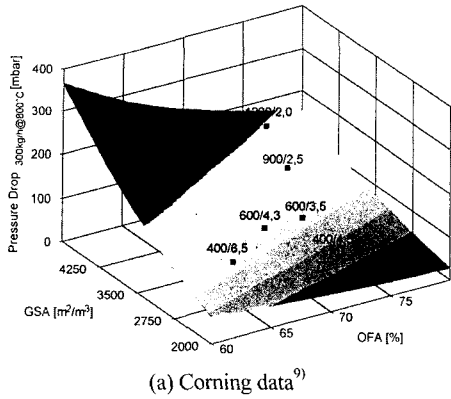


Fig. 3 Pressure drop in a various catalytic converter

Fig. 3(a)를 보면 GSA에 주로 영향을 미치는 것은 cell의 밀도이며, OFA에 주로 영향을 미치는 것은 substrate의 두께인 것을 알 수 있다. Fig. 3(a)는 식 (13)을 이용하여 Fig. 3(b)와 같이 재현될 수 있었다. 따라서 식 (13)은 타당한 결과를 얻는 것을 알 수 있었다.

3.2 상온에서의 실험결과와의 비교

위의 식을 이용하여 압력손실을 계산할 때 GSA와 OFA가 들어가는데, 이 값은 코팅 정도에 의해 달라지므로 코팅의 정도가 배압에 미치는 영향 또한 무시할 수 없는 요인이 된다. 코팅이 안 된 substrate 라면 400/3.0 cell과 900/2.0 cell의 OFA가 같아야 하지만, 실제로 코팅이 되면 900/2.0 cell의 OFA가 400/3.0보다 더 작게 된다.

Schmidt 등¹¹⁾의 연구에 의하면, cell 수가 많을수

록, 그리고 substrate가 얇을수록 압력손실은 커진다. 또한 600/3.5인 특정한 촉매에 대한 실험 결과 코팅을 한 촉매는 코팅하지 않은 촉매에 비해 코팅의 두께에 따라 압력손실이 증가하며 최대 40%까지 증가함을 보였다.

Schmidt 등¹¹⁾의 실험 결과를 본 연구에서 제안한 식 (13)으로 증명하기 위한 계산을 수행하였다. 먼저 코팅이 안 된 촉매를 상온에서 300 kg/h의 유량을 통과시키며 얻은 압력 결과를 비교하였다. K 값은 1.43을 사용하였는데, 상온에서의 체적유량이 크지 않으므로 큰 영향은 없었다. 비교적 이론값과 잘 일치하는 결과를 보이는 것을 알 수 있다. Table 1에서 알 수 있듯이 고밀도 촉매로 갈수록 cell의 밀도뿐만 아니라 substrate의 두께 또한 상당히 중요한 요인이 되는 것을 알 수 있다. Table 1에서 기준 촉매는 400/6.5 촉매이며 이때 기준값은, $\alpha_o=4.70$, $\beta_o=1,457$, $\Delta P_o=7.8kPa$ 이다.

다음으로 코팅 량에 따른 배압 증가의 영향을 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 기준 촉매는 600/3.5 촉매이며 이때 기준값은, $\alpha_o=2.98$, $\beta_o=1,562$, $\Delta P_o=8.1kPa$ 이다. Fig. 1의 사진을 참고로 하여 $R=0.3$ mm로 일정하게 보고, 코팅 두께를 low=11.5, medium=16, high=27.5 μm 정도로 가정했을 때 실험값과 근사한 값을 얻을 수 있었다. Poiseuille 계수 Po 는 식 (9)를 적용하여 14.227~16 사이의 값을 적용하였다.

이와 같이 코팅량에 따라 압력손실이 좌우되는 경향이 있으므로 cell의 규격만으로 배압을 예측하기가 어렵게 된다.

3.3 고온에서의 압력 증가 경향

압력손실계수 K가 1.43 정도의 값이라고 가정하고 배기온도 및 압력에 대해 실제 배기조건에 상당하는 값을 대입하면, α 는 2~5 정도이고 β 는 1000~3000 정도의 값이 나오는데, 이것은 담체 내의 유동이 거의 층류라는 가정과 일치하며, α 보다 β 값의 적절한 적용이 배압 예측에 결정적인 영향을 미침을 알 수 있다. 계수 α 는 유량-압력의 비선형성과 관계되는 것으로, 유량이 증대할 고속-전부하 조건에서 중요성이 커진다. 동일한 촉매에서도 배기 유동의

Parameter Study of Exhaust Pressure in Catalytic Converter

Table 1 Effect of cell density

Density cell/in ²	mil	t _c	α/α ₀	β/β ₀	ΔP/ΔP ₀	ΔP/ΔP ₀
	in/1000	μm				Schmidt
400	6.5	0	1.00	1.00	1.00	1.00
400	4.3	0	0.82	0.82	0.78	0.80
600	4.3	0	0.89	1.34	1.23	1.25
600	3.5	0	0.82	1.23	1.13	1.15
900	2.4	0	0.77	1.74	1.55	1.50

Table 2 Effect of washcoat loading

Density cell/in ²	mil	t _c	α/α ₀	β/β ₀	ΔP/ΔP ₀	ΔP/ΔP ₀
	in/1000	μm				Schmidt
600	3.5	0	1.00	1.00	1.00	1.00
600	3.5	11.5	1.33	1.17	1.19	1.19
600	3.5	16	1.39	1.22	1.24	1.24
600	3.5	27.5	1.56	1.37	1.39	1.39

Table 3 Effect of operating condition and monolith size

Property unit	C1/len	C2/len	α/α ₀	β/β ₀	ΔP/ΔP ₀
	=α	=β			
1.01bar, 20℃	8.07	799	1.95	0.42	0.19
1.4bar, 700℃	4.15	1912	1.00	1.00	1.00
T=-10%	4.61	1793	1.11	0.94	0.85
T=+10%	3.77	2025	0.91	1.06	1.16
P=-10%	3.73	1912	0.90	1.00	1.11
P=+10%	4.56	1912	1.10	1.00	0.91
체적=-10%	4.61	1912	1.11	1.00	0.91
체적=+10%	3.77	1912	0.91	1.00	1.09
φ=-10%	3.36	1912	0.81	1.00	1.52
φ=+10%	5.02	1912	1.21	1.00	0.68
유량=-10%	4.15	1912	1.00	1.00	0.79
유량=+10%	4.15	1912	1.00	1.00	1.21

물성치에 의해 배압 증가는 큰 차이를 보이게 되는데, 이것은 밀도와 점성, 표면적과 길이의 영향을 받는 것이다. 문제는 이러한 경향들이 전산유체해석에서 그대로 나오는 것이 아니고 입력되는 계수 α와 β를 바꾸어 주어야 한다는 점이다.

밀도가 달라지면 동일한 질량 유량에 상당하는 체적 유량이 달라지고, 계수 α 역시 달라지게 된다.

점성이 달라지면 계수 β가 달라지므로, 점성계수는 Sutherland's Formula를 사용하여 온도에 따라 변화하도록 하였다.

길이변화와 면적변화 역시 배압에 영향을 미치는데, 계수 α에도 영향을 미친다.

위 결과를 종합하면 아래와 같다.

$$\alpha \propto \frac{P}{T\lambda}, \beta = f(T) \quad (15)$$

식 (13)을 이용하여 600/3.5 촉매, 코팅 16 μm에 대해 압력 1.4 bar, 배기온도 섭씨 700 도, 유량 300 kg/h 조건에 대해 몇 가지 변수를 10% 씩 증가, 감소 하면서 계산한 결과는 다음의 Table 3과 같다. 여기에서 기준 상태는, 1.4bar, 700℃이며, 이때 기준값은, α₀=4.15, β₀=1.912, ΔP₀=10.0kPa 이다. 물성치 변화가 압력 손실에 매우 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있으며, 그 경향은 위에서 언급한 바와 같다.

특히, 대기압/상온(1.01bar, 20℃)에서 측정된 압력 손실 경향으로 계수를 구하면, 그 값을 계산에서 그대로 적용하면 안 되고 실제의 고속-고부하 조건인 1.4 bar, 700℃ 정도에서는 α를 60%로, β를 2.8배 정도로 적용해야 한다는 것을 알 수 있다.

담체 직경이 10% 감소하면, 면적은 81%가 되므로 유속은 123%가 되는데, 체적을 유지하려면 길이 또한 123%가 되어야 하므로 촉매만의 이론적인 압력 손실은 (1/0.9)⁴인 152%가 된다. 마찬가지로 직경이 10% 증가하면 압력 손실은 68%가 된다. 이와 같이 담체 직경의 변화가 평균 유속 및 길이까지 증대시켜 직경 변화의 4승의 결과를 가져오는 것은 주목할 만하다.

윗식 (13)은 이상적인 가정이 포함된 것이고, 코팅 상태에 따라 GSA와 OFA도 달라지므로, 실제로 위의 계수를 실험이나 계산을 통해 구한 최적 값이 있으면 그 값을 사용하는 것이 좋을 것이다. 단, 이 경우에도 부하에 따른 물성치 변화는 고려해야 한다. 한 예로서 전부하 해석을 위해 600/3.5 촉매의 α와 β를 α=4, β=2,000로 적용하여 시험결과와 잘 맞았다면, 이 때의 압력 및 배기 온도가 1.55 bar, 830℃ 정도이므로 1.03 bar, 600℃의 부분부하에 적용하려면 식 (13)으로 계산된 값의 차이를 감안하여 α=3.6, β=1,800 정도로 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

4. 결론

1) 촉매 담체 내의 유동은 좁은 사각 덕트 내를 흐르는 층류유동으로 가정할 수 있으며, 담체 내에서 압력 강하는 속도의 제곱이 아니라 속도에 거의 비

레한다.

2) 입구 효과 등의 비선형성까지 고려하면 그 관계를 나타내는 압력-유량 관계식을 표현할 수 있으며, 이 식과 전산유체해석 코드의 관계로부터 압력저항 α , β 를 구하는 식 (14)를 제시하였다.

3) 제안된 식은 이전의 촉매업체에서 발표한 일반적인 경향이나 상온에서의 시험결과와 유사한 압력손실 값을 재현해 내는 것을 보였다.

4) 실제의 배기압력 및 온도에 해당되는 조건에서는 상온에서의 시험결과로 결정된 값을 사용할 수 없으며, α , β 값이 크게 변해야 한다. 그 값의 변화는 식 (14)에 들어가는 물성치의 변화에 따른다.

5) 같은 담체를 가지고 체적을 일정하게 유지하면서 직경을 축소시킨 경우는, 평균속도의 증가에 의한 영향과 길이의 증가에 의한 영향을 중복하여 받게 된다.

6) 배압 예측의 해석에 사용되는 이론적인 α 와 β 의 값은 이 값에 대한 측정값이 없는 경우의 추정치로 사용하도록 제안하며, 특정 촉매에 대해 측정값이 있으면 그 값에 대한 계산 값의 비율을 이용하여 상대치로 사용하는 것이 좋다.

7) 같은 촉매에 대해서도 부하 조건에 따라 가스 밀도 및 점성이 바뀌므로 α 와 β 를 보정해야 한다. 특히 상온이나 전부하 시험의 측정 data를 부분 부하에 사용할 때에는 세심한 주의를 요한다.

References

- 1) H. Weltens, H. Bressler, F. Terres, H. Neumaier, D. Rammoser, "Optimisation of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction," SAE 930780, 1993.
- 2) S. J. Chung, T. H. Kim, "CFD Investigation of the 3-Dimensional Unsteady Flow in the Catalytic Converter," SAE 971025, 1997.
- 3) S. B. Park, H. S. Kim, K. M. Cho, W. T. Kim, "An Experimental and Computational Study of Flow Characteristics in Exhaust Manifold and CCC (Close-Coupled Catalyst)," SAE 981028, 1998.
- 4) E. H. Lee, C. K. Lee, J. S. Yoo, J. H. Lee, "A Study on the Fluid Flow Characteristic in Catalytic Converter for Various Inlet and Outlet Header Shapes," Transactions of KSAE, Vol.7, No.7, pp.187 -194, 1999.
- 5) Star-CD User Manual, 2001.
- 6) S. S. Park, H. Y. Kim, Y. J. Kim, S. Y. Lee, K. J. Yoon, "Flow Analysis and Catalytic Characteristics for the Various Catalyst Cell Shapes," SAE 1999-01-1541, 1999.
- 7) W. Taylor, S. Ciray, "Flow Distribution in Catalytic Converters: Quantified Impact on Emissions and Restriction," Proceedings of the ASME Internal Combustion Engine Division, pp.1-8, 2000.
- 8) R. Shar, "A Correlation for Laminar Hydraulic Entry Length Solutions for Circular and Non-circular Ducts," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol.100, pp.177-179, 1978.
- 9) J. P. Holman, "Heat Transfer," 7th Edition, pp. 287-289, McGrawHill, 1992.
- 10) Corning Technical Data, Korea, 2001.
- 11) J. Schmidt, A. Waltner, G. Loose, A. Hirschmann, A. Wirth, W. Mueller, J. A. A. Tillaart, L. Mussmann, D. Lindner, J. Gieshoff, K. Umehara, M. Makino, K. P. Biehn, A. Kunz, "The Impact of High Cell Density Ceramic Substrates and Washcoat Properties on the Catalytic Activity of Three Way Catalysts," SAE 1999-01-0272, 1999.