

배기 매니폴드 확관부 형상 최적화에 관하여

조 석 현*

(2004년 5월 7 일 접수, 2004년 7월 21일 심사완료)

About the Shape Optimization of Ex-Manifold Diffuser

Sok-Hyun Jo

Key Words : Shape Optimization(형상 최적화), Flow Uniformity(유동 균일도)

Abstract

Shape optimization method was coupled with a conventional CFD analysis to find the optimal shape of ex-manifold diffuser which decreases the maldistribution of flow above the catalyst. Shape optimization results show that flow uniformity above the catalyst was increased about 28% for the axi-symmetric case and about 18% for the asymmetric case. The axi-symmetric type can be applied to the diffuser of under floor catalyst and the asymmetric type can be applied to the diffuser of close coupled catalyst.

기호설명

- γ : 유동 균일도 지수
- R : 반경
- L : 길이
- A : 촉매 개구부 면적
- u : 촉매 연직방향 속력
- u_m : u 의 면적 평균
- b,c,d,e,f : 형상 변수
- Q : 배기가스 체적 유량
- V : 촉매 체적
- s : 방향벡터 승수
- n : 탐색 순서

1. 서론

촉매의 정화효율은 촉매의 열적·화학적 특성(열용량, 귀금속 담지량 등) 뿐만 아니라 시스템 형상(배기다기관과 확관부 형상, monolith 크기와 설치 위치 등)에 의해서도 달라지게 된다.⁽¹⁻³⁾ 특히

close-coupled type의 촉매에서 확관부의 형상은 정화효율에 많은 영향을 미치기 때문에 형상의 변화가 정화효율에 미치는 영향에 대한 연구가 많이 진행되어져 왔다.^(4,5)

엔진에서 배출된 배기가스는 촉매시스템 확관부를 통해 monolith의 작은 관들로 분배되게 된다. 확관부에 의한 유동의 불균일한 분배는 일부 monolith 관에서의 체적유량(volumetric flow rate)을 상승시키게 된다. 일정한 정화효율(conversion rate)을 가진 촉매에서 이러한 체적유량의 상승은 촉매 내에서 머무는 시간을 감소시키고 결국 정화효율의 감소를 가져온다. 또한 배기가스의 불균일한 분배는 촉매의 국부적인 부분이 필요 이상 고온화되어서 귀금속의 열화(sintering)가 발생하게 되고 그로 인해 귀금속 접촉면적이 줄어들어 촉매의 효율과 수명이 감소된다.⁽⁶⁾

냉간 시동 시 정화효율을 결정짓는 변수는 바로 활성화 시간(LOT, light-off time)이다. 촉매에 의한 매연의 정화 정도는 촉매의 온도에 따라 달라진다. 일반적으로 정화효율은 촉매가 일정 작동온도(약 250 도)에서 높아진다. 촉매의 온도가 이 이하일 경우 많은 매연이 정화되지 않고 배출되므로 촉매가 얼마나 빨리 활성화 온도에 도달하는가가 촉매의 정화효율을 결정짓는 매우 중요한 변수이다. 촉매의 온도가 이 이하일 경우 많은 매

* 회원, 현대자동차 선행해석팀
E-mail : josh@hyundai-motor.com
TEL : (032)369-5475 FAX : (031)368-5818

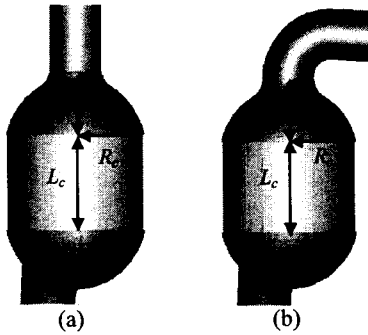


Fig. 1 Catalytic converter geometry ($L=50\text{mm}$, $R_i=21\text{mm}$, $R_c=28.5\text{mm}$, $L_c=75\text{mm}$, spec. : 350cpi, 0.5mil)

연이 정화되지 않고 배출되므로 촉매가 얼마나 빨리 활성화 온도에 도달하는가가 촉매의 정화효율을 결정짓는 매우 중요한 변수이다. 활성화 온도는 촉매의 구성과 ageing 정도 그리고 space velocity(Q/V)의 함수이다. 하지만 활성화 시간은 시스템 설계에서도 영향을 받는다. 확관부 형상 역시 시스템 설계의 한 요소로 고온의 배기가스를 얼마나 잘 촉매 중앙부로 유도하는가에 따라 외벽으로의 열손실량과 촉매 온도의 상승 속도를 결정짓는다.

본 연구에서는 Fig. 1에 도시된 두 가지 경우- (a) 배기가스가 연직 상방에서 유입할 경우, (b) 배기가스가 연직 상방과 일정 각도를 가지고 유입할 경우-에 대한 최적화 탐색을 통해 냉간 시동 시 정화효율에 큰 영향을 미치는 촉매 상단의 유동 균일도를 상승시키는 방법에 대해 논의하고자 한다.

2. 본 론

임의의 변수공간에서 미분함수를 구할 수 있다면 Second-Order Gradient Method 류의 탐색방법이 최적화에 적합하고⁽⁷⁾ 많은 위치에서의 함수값을 구할 수 있다면 실험계획법(Design of Experiment method) 또는 Response Surface Method가 적합하다.⁽⁸⁾ 하지만 CFD 해석의 경우 이 두가지 요구를 만족시키기 힘들다. 그러므로 본 논문에서는 CFD 해석에 적합한 임의 방향 탐색법(Random direction searching method)을 사용하여 촉매 확관부 최적 형상을 찾도록 하겠다.⁽⁹⁾ 이 방법은 최적화 변수 영역에서 임의 방향 벡터를 정하고 그 방향으로 목적함수의 최대값을 찾은 후 또다시 무작위로 방향을 정하여 다음 최대값을 찾은 후 또다시 무작위로

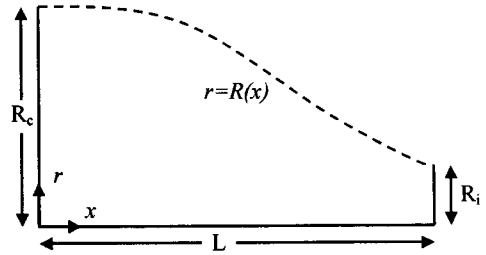


Fig. 2 Shape function of the diffuser(axi-symmetric type)

방향을 정하여 다음 최대값을 찾아가는 방법이다. 이 방법은 임의의 위치에서 목적함수의 기울기를 찾기 어려운 문제에 매우 유용하다.

2.1 배기가스가 연직 상방에서 유입할 경우

배기유동이 촉매 연직 상단부에서 유입될 경우 [Fig. 1(a)]의 촉매 확관부 형상을 모사하기 위해 다음과 같은 함수를 도입하였다.

$$R(x)=(R_c-R_i)R_1(x')+R_i \tag{1}$$

$$R_1(x')=x'^4+bx'^3+cx'^2-(2+b+c)x'+1 \tag{2}$$

여기서, $x'=x/L$

이 함수는 변수 범위 내에서 임의의 형상을 표현할 수 있는 함수이고(Fig. 2), 탐색을 통해 결정해야 하는 변수는 b, c 두개의 변수이다.

목적함수는 식 (3)에 정의된 촉매 상단부 유동의 균일한 정도를 나타내는 지수 γ 로 한다.

$$\gamma=1-\int_A(u-u_m)dA/2Au_m \tag{3}$$

여기서, $u_m=\int_A u dA/A$

2.2 배기가스가 연직 상방과 일정 기울기를 가지고 유입할 경우

배기유동이 촉매 연직 상단부와 일정 기울기를 가지고 유입되는 경우[Fig. 1(b)]의 확관부 형상은 다음과 같이 대칭-비대칭 함수를 중첩 시켜서 확관부의 형상을 표현하도록 한다(Fig.3).

$$R(x)=(R_c-R_i)R_1(x')+R_i+Ru(x) \tag{4}$$

$$R_1(x')=x'^4+bx'^3+cx'^2-(2+b+c)x'+1 \tag{5}$$

$$Ru(x')=dx'(x'-1)\{x'^2+(e+1)x'+(1+e+f)\}\cos\theta \tag{6}$$

여기서, $x'=x/L$

이때 목적함수는 배기가스가 연직 상방에서 유입할 경우와 마찬가지로 촉매 상단부 유동의 균일한 정도를 나타내는 지수 γ 로 한다.

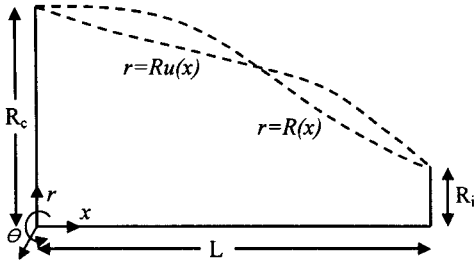


Fig. 3 Shape function of the diffuser (asymmetric type)



Fig. 4 Computational grids

또 주변 부품과의 간섭을 제한하기 위해서 확관부 형상에 다음과 같은 제한 조건을 가한다.

$$dR/dx|_{x=0} < 0 \tag{7}$$

비대칭 확관부 형상 최적화의 경우 결정해야 하는 변수는 b, c, d, e, f 다섯 개의 변수로 늘어났다. 동시에 다섯 개의 변수에 대한 최적화 탐색을 통해 확관부 형상을 결정 짓기 보다는 제작성을 고려해 두 단계로 나누어 탐색을 수행하였다.

첫번째 단계는 확관부 형상을 축대칭형으로 간주($Ru=0$)하여 b, c 두 개의 변수에 대해 최적화 탐색을 수행한다. 두 번째 단계에서는 이전 단계에서 찾아진 b, c 두 변수 값을 고정하고 d, e, f 세 개의 변수에 대한 최적화 탐색을 수행하여 비대칭 확관부 형상을 결정한다.

2.3 배기계 유동 해석

주어진 확관부를 가지는 배기다기관의 열유동 해석은 상용 CFD code 인 STAR-CD 를 사용하였다.

배기 유동은 Reynolds averaged Navier-Stokes equation 에 standard $k-\epsilon$ 모델을 적용하고 압축성, 정상상태로 가정하여 해석을 수행하였다. 이때, 촉매 monolith 는 Poros media 로 그 내부의 유동은 층류로 가정되었고 압력강하는 Darcy Law 에 따른다.

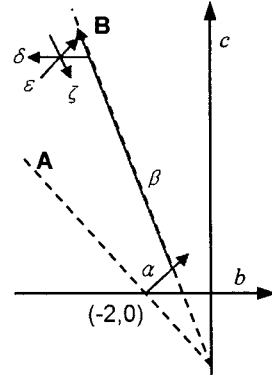


Fig. 5 Searching history on the variable domain

지배방정식의 이산화 방법은 운동량 방정식 대류항의 경우 Self-filtered central differencing 을 연속 방정식의 경우 중앙차분을 사용하였다.

해석에 사용된 격자모델은 Fig. 4 와 같고 입출구부의 경계조건은 다음과 같다.

입구 조건 : 10.2kg/min, 923K

출구 조건 : 1.2bar

3. 결 과

3.1 배기가스가 연직 상방에서 유입할 경우

식 (1),(2) 에서 확관부 형상을 결정짓는 두 변수 b, c 의 domain (Fig. 5)에서 탐색 출발점은 (-2,0) 로 설정하고 탐색방향은 $\alpha, \beta, \delta, \dots$ 순서로 찾아갔다.

이때 선분 $A(b+c+2=0)$ 는 확관부 하단의 기울기가 0 이 되는 것($dR/dx|_{x=0}=0$)을 의미하고 선분 $B(2b+c+2=0)$ 는 확관부 상단의 기울기가 0 이 되는 것($dR/dx|_{x=L}=0$)을 의미한다.

설정된 탐색방향에서의 극대값은 다음과 같은 방법을 통해서 찾았다.

- (1) 탐색 방향을 임의로 정한다.
- (2) 만약 $(\gamma_n - \gamma_{n-1}) / \Delta s_n < 0$ 이면 다른 방향으로 탐색한다.
- (3) 탐색은 $(\gamma_n - \gamma_{n-1}) / \Delta s_n * (\gamma_{n-1} - \gamma_{n-2}) / \Delta s_{n-1} < 0$ 일 때 종료하고 이때의 극값은 다음과 같은 방법으로 찾는다 : 극값이 존재하는 위치 근방($s=s^*$)에서 목적함수를 다음과 같이 Taylor 급수로 전개한다.

$$\gamma(s) = \gamma(s^*) + \gamma'(s^*)(s-s^*) + 1/2 \gamma''(s^*)(s-s^*)^2 + \dots$$

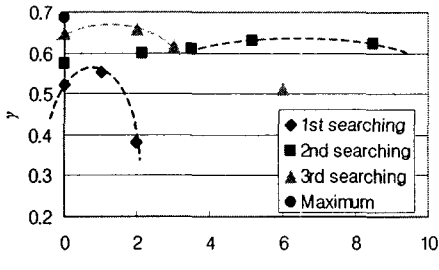


Fig. 6 Searching history of the object function

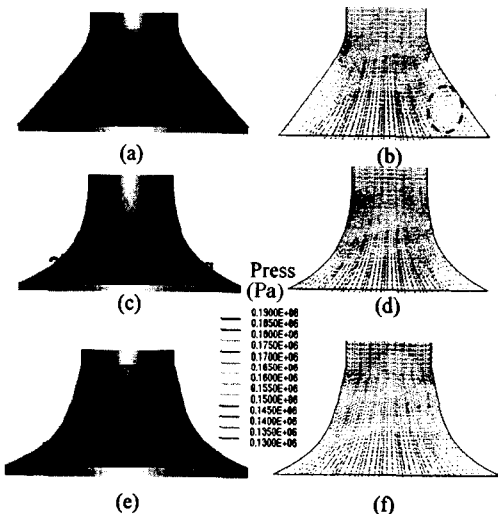


Fig. 7 Diffuser shapes and its velocity vector and pressure contours of each searching result

극값이 존재하는 위치($s=s^*$)에서 일계 미분은 사라지므로 γ 를 이차함수로 가정할 수 있다. 그러므로 극값 근방에서의 3 개의 값을 근거로 극값의 위치와 그 값을 구할 수 있다.

(4) 최대 값을 찾을 때까지 (1)-(3)의 순서를 반복한다.

이와 같은 방법으로 찾아진 목적함수 - γ ; uniformity index - 값의 변화와 그 극값은 Fig. 6 과 같다.

전형적인 oval 형상을 가진 초기 출발점 A 에서 유동균일도는 0.511 이었고 최종 탐색 모델의 경우는 0.685 로 초기 모델에 비해 34%가 향상되는 결과를 얻을 수 있었다.

탐색결과 찾아진 확관부 형상과 그 유동장은 Fig. 7 과 같다.

최적화된 축대칭형 확관부 형상은 일반적으로 많이 사용되고 있는 oval 형상이 아니라 louder speaker 의 형상[Fig. 7(e)]을 가진다. 그 이유는 louder speaker 모양의 확관부가 에너지의 손실 없이 소리를 가장 균일하게 외부로 전달하기 때문인데,⁽¹⁰⁾ 각 탐색 단계에 따라 압력분포가 더 균일해 진다는 것을 보면 가시적으로도 확인할 수 있다. 그 결과로 축매 상단부의 유동 균일도가 향상되는 건 자명하다.

부가적으로 최종 형상에서는 축매 시스템의 압력손실도 감소(33.6kPa -> 27.1kPa) 하는데 확관부에서 압력손실을 일으키는 주 요인인 재순환 영역[Fig. 7(b) 점선영역]이 외벽의 축소로 사라졌기 때문이다. 이러한 재순환 영역 제거로 인한 배압의 감소는 엔진의 성능 향상에 좋은 영향을 주게 된다.

3.2 배기가스가 연직 상방과 일정 기울기를 가지고 유입할 경우

여기에 배기가스가 연직 상방과 일정 기울기를 가지고 유입할 경우의 확관부 형상을 나타내는 식 (4),(5) 의 다섯 변수 b,c,d,e,f 를 결정하기 위해서는 다음과 같이 두 단계를 거쳐서 대칭·비대칭 확관부 형상을 결정하였다.

(1) 1st STEP : 확관부 형상을 축대칭 형상으로 가정($UR=0$)하고 3.1 절의 확관부 형상 결정과정과 동일한 방법에 따라 변수 b,c 의 값을 탐색 결정한다.

(2) 2nd STEP : 1st STEP 에서 결정된 변수값 b_0,c_0 를 고정시키고, 비대칭 형상을 모사하는 식 (6)을 결정하는 변수 d,e,f 를 탐색한다. 이때 제한 조건식 (7)은 다음과 같이 표현될 수 있고

$$d(1+e+f) \geq -(2+b_0+c_0) \tag{8}$$

이 제한조건을 만족시키기 위해 Zoutendijk's method 나 Rosen's gradient method 의 정의에 따라 탐색방향을 조정하도록 한다.

탐색결과 확관부 형상은 Fig. 8 과 같다.

축대칭 형상을 결정짓는 1st STEP 의 결과[Fig. 8(c)]를 보면 배기유동이 수직 상단부에서 유입될 때의 결과[Fig. 7(e)]에 비해 넓은 스커트를 가지는 종모양 형태이다. 그 결과 유동의 균일도 (uniformity index)는 0.58 에서 0.645 로 향상되게 되는데 그 이유를 살펴보면 다음과 같다.

Oval type 의 확관부로 유입되는 유동장은 한쪽 벽면으로 치우쳐서 축매 상단부 중앙에 커다란 재

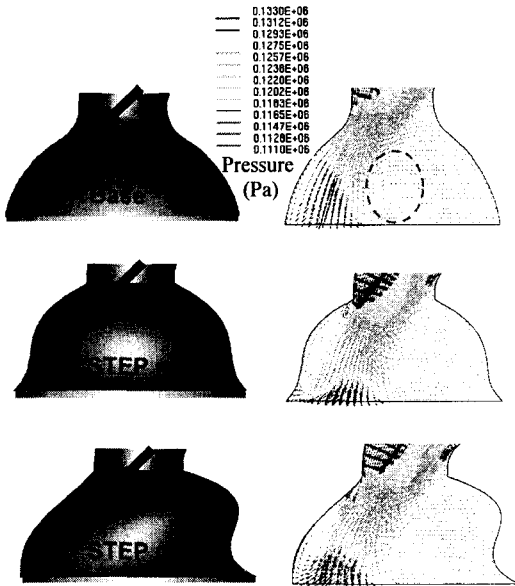


Fig. 8 Diffuser shapes and its velocity vector and pressure contours of each searching result

순환 영역을 만들게 된다[Fig. 8(b) 점선영역]. 이 재순환 영역은 주유동이 촉매로 균일하게 유입되는 것을 방해하는데 확관부 벽면이 외곽으로 확장되게 되면 재순환 영역을 중심에서 바깥쪽으로 끌어 당기게 되고 결과적으로 주유동이 촉매 중심부로 유도될 수 있어서 유동의 균일도가 향상된다. 부가적으로 이러한 변화는 주유동이 배기계 벽면과의 직접적인 접촉에 의한 열손실도 막아줄 수 있어서 촉매의 활성화 시간(Light-off time) 단축에 좋은 영향을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

비대칭 형상을 결정짓는 2nd STEP의 결과를 보면[Fig. 8(e)] 종모양에 비해 주유동이 진입하는 부위는 하면이 부풀고 그 반대편은 상단이 부풀어진 모양을 가짐을 볼 수 있다. 확관부 하면의 변화는 확관부 하면의 유동을 균일하게 그리고 반대편 상부의 변화는 확관부 상단의 유동을 균일하게 만드는 효과가 있다. 그 결과 유동의 균일도는 0.685로 oval 모양 확관부를 가지는 초기 모델에서의 유동균일도(0.58) 대비 18%가 향상되었다. 하지만 이 경우 배압 하강효과는 나타나지 않았다.

4. 결론

촉매 상단부로 유입되는 배기유동의 균일도를 상승시키기 위해 일반적인 CFD 해석에 최적화 탐

색방법의 하나인 임의방향 탐색법을 적용하여 사차함수로 모사 되어진 대칭·비대칭의 촉매 확관부 형상을 결정하였다.

배기가스가 연직 상단부에서 유입될 경우의 확관부 형상 최적화 탐색 결과,

- (1) 촉매 상단부의 유동을 가장 균일하게 만드는 형태는 louder speaker 모양의 확관부를 가졌고,
- (2) 촉매 상단부의 유동 균일도는 0.511에서 0.658로 28% 가량 상승했다.

(3) 부가적으로 주유동 주변의 재순환영역의 제거로 배압도 하강하였다.

배기가스가 연직 상단부와 일정한 기울기를 가지고 유입될 경우의 확관부 형상 최적화 탐색 결과, (1) 촉매 상단부의 유동을 가장 균일하게 만드는 촉대칭형 확관부 형태는 종모양 형상을 가졌고 유동의 균일도는 0.58에서 0.645로 초기모델 대비 11% 향상되었다. (2) 촉매 상단부의 유동을 가장 균일하게 만드는 비대칭형 확관부 형태는 종모양에 비해 주유동이 진입하는 부위는 하면이 부풀고 그 반대편은 상단이 부풀어진 모양이다. 유동 균일도는 0.685로 초기모델대비 18%의 향상 되었다.

배기유동이 연직 상단부에서 유입될 경우에 찾아진 louder speaker 모양의 촉대칭형 확관부는 under floor catalytic converter에 유용할 것으로 생각되고, 배기유동이 연직 상단부와 일정 기울기를 가지고 유입할 경우에 찾아진 종모양의 촉대칭형 확관부와 위 아래가 부풀 모양의 비대칭형 확관부는 close coupled catalytic converter에 유용할 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Day, J. P., 1997, "Substrate Effects on Light off - PartII Cell Shape Contributions," SAE971024.
- (2) Kishi, N., Hashimoto, H., Fujimori, K., Ishii, K. and Komatsuda, T., 1998, "Development of the Ultra Low Heat Capacity and Highly Insulating(ULOC) Exhaust Mani-Fold for ULEV," SAE980937.
- (3) Heibel, A. and Spaid, M. A. A., 1999, "A New Converter Concept Providing Improved Flow Distribution and Space Utilization," SAE1999-01-0768.
- (4) Weltens, H., Bressler, H., Terres, F., Neumaier, H. and Rammoser, D., 1993, "Optimization of Catalytic Convert Gas Flow Distribution by CFD Prediction," SAE930780.
- (5) Martin, A. P., Will, N. S., Bordet, A., Cornet, P., Gondoin, C. and Mouton, X., 1998, "Effect of Flow Distribution on Emissions Performance of Catalytic Converters," SAE980936.
- (6) Baba, N., Yokota, K., Matsunaga, S., Kojima, S.,

- Ohsawa, K., Ito, T. and Domyo, H., 2000, "Numerical Simulation of Deactivation Process of Three-way Catalytic Converters," *SAE2000-01-0214*.
- (7) Choi, J. H., Kim, K. Y. and Chung, D. S., 1997, "Numerical Optimization for Design of an Automotive Cooling Fan," *SAE970935*.
- (8) Montgomery, D. T. and Reitz, R. R., 2000, "Optimization of Heavy-Duty Diesel Engine Operating Parameters Using A Response Surface Method," *SAE2000-01-1962*.
- (9) Choi, W. K., Choi, D. H. and Kim, M. U., 1999, "Optimization of Inlet Concentration Profile for Uniform Deposition in a Cylindrical CVD Chamber," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, No. 6, p. 1851.
- (10) Lighthill, J., 1979, "Waves in Fluids," *Cambridge Univ. Press*, p. 127.