

내연기관의 흡·배기계내 가스유동해석용 알고리즘의 고정도화

金丸一廣* · 최재성**

Improvement of algorithm for the calculation of gas flow in intake and exhaust system on diesel engines

K. Kanamaru* · J-S Choi**

Key words : Diesel engines(디젤기관), Intake and exhaust system(흡배기계), The method of characteristic(특성곡선법),

Abstract

Many simulation programs included intake and exhaust system on diesel engines have been developed. However, existing programs using 1-D numerical analytic methods in manifold gas flow by the method of characteristic have some problems to be solved. Especially to optimizing the engine system, a simulation program which had more efficiency and accuracy is required newly.

In this paper, a improved method for application limit and efficiency as well as mass conservation named constant mesh explicit method of characteristic was described. And some calculation results by this method were compared with experimental results and orther calculation results. Also, it was confirmed that the results by the proposed method were more agreed with experimental results.

1. 머리말

환경문제에 대처하기 위하여 승용차, 트럭, 버스 등의 차량전반에 있어서, 구동계를 포함한 내연기관의 시스템화는 매우 다양한 방법으로 행하여지고 있으며, 시스템화의 방식에 따라 얻어지는 내연

기관의 출력특성은 다르게 된다. 내연기관의 성능을 이와같이 다양한 부하특성에 적합시키기 위하여는 주어진 하나의 조건에서의 현상파악과 예측에 한정하지 않고 최적화 알고리즘을 이용한 현상의 제어나 시스템의 최적화에 이용되어야 한다. 이는 시뮬레이션프로그램을 이용하고 안하고의 문

* 日本京都大學 機械工學教室(원고접수일 : 2000년 4월)

** 한국해양대학교 기관시스템공학부

제가 아니라, 시스템전체 즉 제어계를 포함한 차량의 주행상태에서의 최적화를 도모해야 할 필요가 있기 때문이다.

기관시스템의 최적화법으로서는 최적화용 알고리즘을 사용하기 쉽게 시뮬레이션프로그램을 재구성하는 방법이 있다.⁽¹⁾ 그러나, 시스템이 복잡하게 됨에 따라 이와같은 방법은 곤란하게 된다. 시뮬레이션프로그램을 있는 그대로 이용하여 최적화를 하기 위하여는 시뮬레이션프로그램의 능률⁽²⁾과 적용가능 범위가 문제가 된다.

내연기관에 있어서 흡배기과정은 기관의 성능에 크게 영향을 미치기 때문에 일찍부터 시뮬레이션프로그램이 개발되었고, 현재는 어느정도 완성되었다고 할 수 있다. 그러나, 시뮬레이션프로그램을 이용하여 기관시스템의 최적화를 행한다는 관점으로부터, 1차원 가스유동의 대표적 해석수법의 하나인 특성곡선법을 평가하면,

- (1) 정격자법, 이동격자법, 또 이중격자법⁽³⁾으로 격자생성법이 복잡하게 되고, 수치해석은 양해법으로부터 음해법으로 고정도화가 피해져 왔으나, 고정도화는 능률을 희생하고 있다는 점,
- (2) 특성곡선법에서는 질량의 보존성을 잃기 쉬운 결점이 있다는 점, (고정도화에 동반되는 보존성은 개선되어 왔지만, Lux-Wendorf법⁽⁴⁾ 정도로 보충된 것은 아니며, 테이퍼관의 취급⁽⁵⁾에 있어서는 아직도 문제가 남아 있다고 생각된다.) 등이 해결되어야 할 문제로서 지적할 수 있다.

본 연구에서는 정격자 특성곡선법에 대하여 보존성의 확립을 도모하고, 능률과 고정도화를 동시에 만족하는 알고리즘을 개발하고, 이를 디젤기관의 몇가지 예에 적용하여 평가하고자 하였으며, 양호한 결과를 얻었기에 이에 관하여 보고하고자 한다.

2. 알고리즘

2.1. 기초식

관의 단면적(S)이 완만하게 변화하는 경우를 포함하여 1차원 비정상 관내가스흐름에 대하여 보존

량(질량, 운동량, 에너지)에 관한 기초식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho u S}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) S}{\partial x} - p \frac{dS}{dx} = (\pi d) p \delta_p \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho (e + u^2/2)}{\partial t} + \frac{\partial \rho u (e + u^2/2 + p/\rho) S}{\partial x} = (\pi d) p \delta_p \tag{3}$$

단, $\delta_p = -\zeta \frac{1}{2} u |u|$, $\delta_q = \frac{4\alpha(T_w - T)}{d}$

여기서, ζ 는 관의 곡간손실, 관벽의 마찰저항등에 기인하는 압력손실계수를 나타낸다. α 는 관벽과의 열전달계수, T_w 는 관벽온도를 나타낸다.

특성곡선을 유도하기 위하여 상태식 및 열역학 관계식을 이용하면 식(1)~(3)을 ρ , u , p 에 관한 다음의 식(4)~(6)으로 변형시킬 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + p \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{pu}{S} + \frac{dS}{dx} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + p \frac{1}{p} + \frac{\partial p}{\partial x} = \delta_p \tag{5}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + p \alpha^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{pu}{S} \frac{dS}{dx} = (\kappa - 1)p(\delta_q - \mu \delta_p) \tag{6}$$

단, $\alpha^2 = \kappa \frac{p}{\rho} = (\kappa RT)$

식(6)은 가스비열의 온도의존성 유무에 관계없이 성립한다. 충격파는 발생하지 않는 것으로 가정하고, 좌표계 및 물리량을 식(7)에 의하여 무차원화 한다.

$$P = \frac{p}{p_0}, A = \frac{\rho}{\rho_0}, \alpha = \frac{\alpha}{\alpha_0}, U = \frac{u}{\alpha_0} \tag{7}$$

$$X = \frac{x}{\Delta x}, \tau_0 = \alpha_0 \frac{\Delta t}{\Delta x}, \tau = \tau_0 \frac{t}{\Delta t}, a = \frac{S}{t_{in}}$$

식(5), (6)에 식(7)을 이용하여 얻어지는 무차원화식에 특성곡선

$$\frac{dX}{d\tau} = U \pm A \tag{8}$$

의 관계를 이용하여 변형시키고, 얻어진 두식을 가

감산하여 얻어지는 식을 Fig.1에 보이는 계산격자를 이용하여 각각의 특성곡선에 따라 적분하면, 식(9)와 식(10)이 얻어진다.

$$\frac{dX}{d\tau} = U \pm A \text{에 대하여}$$

$$U_z = U_+ - \left[\frac{\bar{A}}{\kappa} \right]_+ \ln \frac{P_z}{P_+} - \Sigma^+(\alpha) + \Delta_+ \quad (9)$$

$$\frac{dX}{d\tau} = U - A \text{에 대하여}$$

$$U_z = U_- + \left[\frac{\bar{A}}{\kappa} \right]_- \ln \frac{P_z}{P_-} - \Sigma^-(\alpha) + \Delta_- \quad (10)$$

단, $\Sigma^+(\alpha) = \int_{X_+}^0 \frac{AU}{U \pm A} \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dX} dX$

$$\Delta_{\pm} = \int_{\tau_+}^{\tau} (\delta'_p \pm (k-1)(\delta'_q - U\delta'_p)) d\tau$$

식(9)와 식(10)의 유도에 있어서 온도의 함수인 (A/k) 에는 각각의 특성곡선상에서의 평균치를 이용하는 것으로 한다. 또, δ'_p, δ'_q 는 각각 δ_p, δ_q 의 무차원량을 나타내고 있다.

식(4)와 (6)을 이용하여 유체와 함께 이동하는 특성곡선식(11)에 연하여 적분을 하면 식(12)가 얻어진다.

$$\frac{dX}{d\tau} = U \quad (11)$$

$$\frac{A}{A_u} = \left(\frac{P}{P_u} \right)^{\frac{1}{k}} \int_{\tau}^{\tau} \exp \left[-(k-1) \frac{\delta'_q - U\delta'_p}{A} \right] dt \quad (12)$$

이 때, 우변 제1항의 k 에는 역시 특성곡선상의 평균치를 이용하는 것으로 한다. 이상의 방법으로 부터 특성곡선법을 구성하는 기초식을 적분형으로 나타낼 수 있다.

2.2. 알고리즘

정격자법에서는 격자점을 고정하여 취급한다. 이 때문에 시간 τ 에서의 P, A, U 의 값으로부터 시간 $\tau + \tau_0$ 에 있어서의 격자점에서의 값을 정하기 위하여는 $P_{\pm}, U_{\pm}, P_U, U_U$ 등 격자사이의 값을 알 필요가 있다. 따라서, 격자점사이에서의 P, A, U 에 관한 공간내삽법을 이용한다.

1) 관의 단면적이 일정한 경우

P, U 의 내삽식을 구함에 있어서 특성곡선식(8)에 주목한다. P 또는 U 를 ψ 로 표시하면 식(8)은 다음과 같다.

$$\left. \frac{d\psi}{d\tau} \right]_{\pm} = \left. \frac{\partial\psi}{\partial\tau} \right]_{\pm} + (U \pm A) \left. \frac{\partial\psi}{\partial X} \right]_{\pm} \quad (13)$$

단면적이 일정한 경우 ψ 의 1계도함수는 연속이기 때문에 2개의 특성곡선의 교점인 격자점에서는 다음의 관계가 성립한다.

$$\left. \frac{d\psi}{d\tau} \right]_{\pm} = \left. \frac{\partial\psi}{\partial\tau} \right]_{\pm} \text{ and } \left. \frac{\partial\psi}{\partial X} \right]_{+} = \left. \frac{\partial\psi}{\partial X} \right]_{-} \quad (14)$$

따라서, 격자점에 있어서 ψ 의 X 에 관한 도함수는 다음 식으로 근사시킬 수 있다.

$$\left. \frac{d\psi}{dX} \right]_z = \frac{\psi_- - \psi_+}{\partial X} \quad (15)$$

격자점간의 내삽식은 서로 이웃하는 격자점에서의 ψ 값과 그 구배 $(\partial\psi/\partial X)$ 를 이용하여 X 의 3차식으로 나타낸다.

A 의 내삽식에 관하여는 특성곡선(11)에 주목한다. 이 특성곡선은 식(12) 이외에 시간 τ 일 때 Fig.1에 있어서 $X_U \sim 0$ 사이에 있는 유체는 τ_0 시간 후에는 이웃격자사이로 이동하는 것도 나타내고 있다. 이 관계를 계산알고리즘에 포함시키면 Fig.2로부터 질량의 보존성이 유지됨을 알 수 있다.

격자점 $j \sim j+1$ 사이의 밀도분포를 서로 이웃하는 2개의 격자점에서의 값 A_j, A_{j+1} 및 격자간의 중앙에서의 값 $A_{j+1/2}$ 를 연결하는 절선으로 근

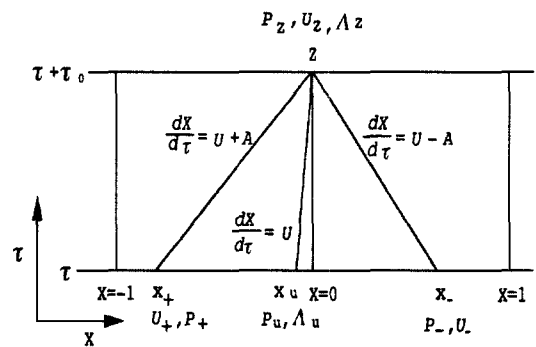


Fig. 1 Calculation mesh and notation

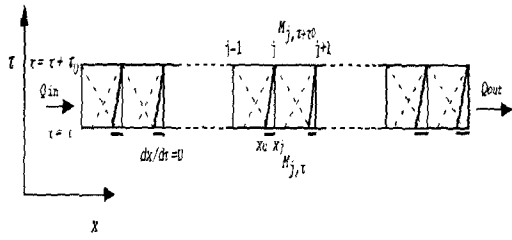


Fig. 2 Schematic diagram on the algorithm to fulfil the mass conservation

사한다. $A_{j+1/2}$ 는 이 격자점 사이에 있는 유체의 질량과 대응시켜 다음 식으로부터 구한다.

$$A_{j+1/2} = M_{j, \tau} - \frac{1}{2} (A_j + A_{j+1}) \quad (16)$$

단, $M_{j, \tau} : j \sim j+1$ 격자사이의 무차원화 질량 $M_{j, \tau}$ 에 대하여 τ_0 시간후의 질량 $M_{j, \tau + \tau_0}$ 은 Fig.2로부터 시간 τ 에서의 값을 이용하여 다음 식으로부터 구한다.

$$M_{j, \tau + \tau_0} = M_{j, \tau} - \frac{1}{2} (A_{u, j} + A_j) X_{u, j} + \frac{1}{2} (A_{u, j+1} + A_{j+1}) X_{u, j+1} \quad (17)$$

단, $X_{u, k} (k=j, \text{ 또는 } j+1)$ 는 격자점 k 로부터의 거리로서, 부호를 포함하여 나타낸 것이다.

기초식(9), (10), (12)를 유도함에 있어서 κ, A 의 값에 관하여는 특성곡선상의 평균치를 필요로 한다. 또, X_{\pm}, X_U 를 구하기 위하여는 τ_0 시간후의 물리량의 예측치를 필요로 한다. 이들의 예측치는 격자점에서의 구배를 식(4)~(6)에 적용하여 Euler 방법으로 산출한다. 이 때, ψ 의 구배는 식(14)에 의하여 구하고, A 의 구배는 다음과 같은 차분형으로 주어진다.

$$\left. \frac{\partial A}{\partial X} \right|_z = (A_{j+1/2} - A_{j-1/2}) \quad (18)$$

2) 테이퍼관의 경우

테이퍼관의 취급을 검토함에 있어 Hove 등¹⁵⁾은 알고리즘테스트용으로 제시한 Fig.3의 모델을 그대로 이용한다. 테이퍼관과 직관과의 연결부위

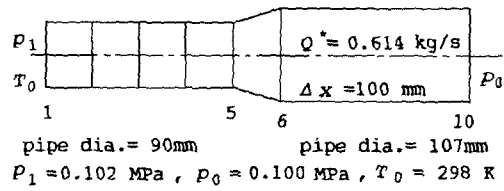


Fig. 3 Model examined by Hove and Sierens

에 주어지는 격자점 5와 6에서는 ψ 의 값 자체는 연속이지만, 그 구배는 연속이 아니다. 또, 격자점6과 5의 단면적의 비는 $\alpha = S_6/S_5 = 1.41$ 로 상당히 큰 값이다. 유속은 단면적에 반비례하여 변화하고, 유속의 변화에 동반하여 압력도 변한다. 이 변화는 단면적이 일정한 경우 여러개의 격자 이상의 변화이다. 더욱이 X_{\pm} 점의 예측오차는 $\mathcal{S}^{\pm}(\alpha)$ 의 값에 크게 영향을 미친다. 이상의 이유로부터 단면적이 일정한 관의 취급방법을 그대로 테이퍼관에 적용할 수 없다.

앞에서 언급한 바와 같이 유속 U 자체는 X 에 대하여 비선형적으로 크게 변화하지만, $\rho u S$ 에 대하여는 그 변화도 작고 선형적으로 변화한다고 하여도 좋을 것이다. 보존식(1)과 (3)에 있어서 $p/\rho + (\kappa - 1)u^2/2$ 에 대하여도 같이 취급할 수 있다고 가정한다. 즉, 다음의 관계가 성립한다.

$$\xi = (\xi_6 - \xi_5)X + \xi_5$$

$$\xi = \alpha \Delta U \text{ or } \frac{P}{A} + \frac{\kappa - 1}{2} U^2$$

밀도에 관하여는 관단면적이 일정한 경우 격자 중앙점을 대표점으로 하여 취급하였지만, 테이퍼관에서는 격자점5와 6에서의 밀도의 값 및 테이퍼관 내부의 가스질량을 X 의 2차식으로 나타내고, 위 식을 함께 이용하여 테이퍼관 내부의 가스상태를 구한다. 특성곡선식(11)의 시작점과 격자점 사이에 있는 유체질량의 산출에 있어서는 단면적의 변화를 고려한다. 따라서, 테이퍼관 내부의 위치 X 를 지정하면, A 가 정하여 지고, 이 값을 이용하여 U 및 P 를 정할 수 있다. 또, 그 구배도 알 수 있기 때문에 Euler방법을 이용하면 특성곡선

$$\int_{X_{\pm}}^0 \frac{dX}{U \pm A} \approx \tau_0$$

와 $\Sigma^*(\alpha)$ 를 동시에 수치적으로 구할 수 있다. 특성곡선(11)에 관하여도 마찬가지로 취급할 수 있다.

3) 불연속면의 설정

충격파를 취급하지않는 범위에서는 ϕ 는 관내 어느 곳에서도 연속이지만, 유체와 함께 이동하는 온도 및 가스조성은 관입구의 경계조건에 의하여 불연속적으로 변화한다. 예를 들면, 내연기관에 있어서는 배기밸브가 열렸을 때 유출하는 가스온도는 불연속적으로 고온이 된다. 또, 흡기밸브로부터 흡기매니폴드로의 역류, 밸브오버랩시의 유출입은 온도, 가스조성 모두 불연속적으로 변화한다. 이러한 경우 온도에 관하여는 밀도를 이용함으로써 수치확산이 어느정도 경감되지만, 밀도변화가 작은 가스조성의 변화에 대하여는 무력하다. 온도, 가스조성의 변화를 충실하게 재현하기 위하여는 불연속면을 고려하여야 한다.

불연속면의 발생은 경계조건에 의하기 때문에 쉽게 고려할 수 있다. 압력, 유속은 불연속면의 영향을 받지 않기 때문에 경계에 불연속면이 발생한 후는 특성곡선⁽¹¹⁾에 따라서 그 위치를 쉽게 추적할 수 있다.

3. 알고리즘 적용에

앞에서 언급한 알고리즘은 종래의 특성곡선법과 비교하여 다음의 특징을 갖는다.

- (1) 기초식이 모두 적분형으로 주어져 있다.
- (2) 보조적으로 Euler방법을 이용하면 되풀이 계산을 동반하지 않는 양해법으로 해가 얻어질 수 있다.
- (3) 질량의 취급은 Lux-Wrendorf 법과 비슷한 형을 하고 있다.
- (4) 테이퍼관의 경우 특성곡선의 시작점과 끝점(격자점)에서의 물리량은 그 내부 격자점에서의 값을 이용하여 특성곡선에 따라 적분을 하고 있다.
- (5) 격자점 사이에서의 물리량은 내삽식을 도입하고 있기 때문에 불연속면의 취급이 쉽다.

이러한 특징을 가진 새로운 알고리즘을 이후 정격자양해법이라 부르고, 종래의 정격자법과 구별

하며, 이들의 특징을 시뮬레이션 프로그램에 반영시킨 예에 관하여 언급한다.

3. 1. 기주진동(氣柱振動)

공기를 피축정가스로 하는 기주진동 발생장치의 개략을 Fig.4에 나타낸다. 그림에 있어서 내경 60mm ϕ , 길이 9,024mm의 원관의 한쪽 끝을 폐지단으로 하고, 반대편의 끝단에는 기밀성이 있는 박막이 설치되어 있다. 박막에는 관과 동심원상으로 니크롬선을 붙이고, 그 직경은 관의 내경보다 크게 하였다. 건조공기를 관내에 충전시키고 관내공기온도가 대기온도와 같게, 그리고 압력과 대기압력과의 비가 일정한 값(=1.5)이 된 것을 확인한 후 니크롬선에 많은 전류를 순간적으로 흐르게 한다. 이 때 박막은 원형상으로 녹아서 갈라지고, 이 관단은 개방단으로 되어 관내의 공기는 대기중으로 유출한다. 이후, 관내에는 공기의 관성의 영향으로 기주진동이 발생한다.

기주진동의 제1주기에서는 관내의 공기는 단일 팽창에 가까운 상태로 되고, 그 온도는 대기온도에 비하여 상당히 저하한다. 이 후 관내에 공기가 유입하는 상태가 일어나지만 유입공기는 유출한 공기가 아닌 주위의 공기가 대부분이다. 이로부터 관내에는 온도경계면이 생긴다.

Fig.4의 점A에 있어서 압력 및 온도의 변화를 측정하였다. 각각의 측정에는 스트레인게이지식 압력계와 직경 5 μ m ϕ , 길이 5mm의 텅스텐선을 이용하였다. 이 측정치와 온도경계면을 불연속면으로 하여 취급한 정격자양해법에 의한 계산결과를 Fig.5에 나타낸다. 온도의 측정결과와 텅스텐선의 열용량, 텅스텐선과 지지대와의 사이에서 발

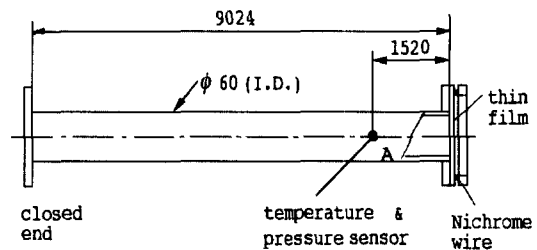


Fig. 4 Schematic diagram of an apparatus used for oscillating flow generation

생하는 열저항 등의 보정을 데이터처리과정에서 전혀 하지 않은 것이다. 그럼에도 불구하고 유입공기가 최초의 관측점을 통과할 때에 매우 급격한 온도변화를 나타내고 있는 것으로부터 분명한 온도경계면이 발생되고 있는 것을 알 수 있다. 정격자양해법에서는 이 관계를 충분히 재현시키고 있다고 생각된다. Fig.5의 하단에는 불연속면의 위치를 나타내고 있지만, 이 관계로부터 온도경계면의 거동 및 기주진동의 감쇠상태를 잘 알 수 있다.

비교를 위하여 Fig.5에는 종래의 정격자법에 의한 계산결과도 같이 나타내고 있지만, 정격자법으로는 온도경계가 분명하게 나타나지 않고 있다. 압력파의 계산결과에는 양자의 사이에 커다란 차이가 보이지는 않지만, 역시 압력파의 진폭, 변화상태 모두 양해법에 의한 결과가 측정치에 가까운 것을 알 수 있다.

개방단으로부터 유출입한 공기질량과 관내공기질량과의 합을 $m(t)$ 로 표시하면, $m(t)$ 는 시간에 관계없이 일정할 것이다.

$$m(t) = \int_0^L Q dt + \int_0^L \rho S dx$$

단, Q : 개방단유량, L : 관길이

Fig.2의 관계로부터 당연하지만 이는 불연속면의 도입여부에 관계없이 성립한다. 계산결과 $m(t)$

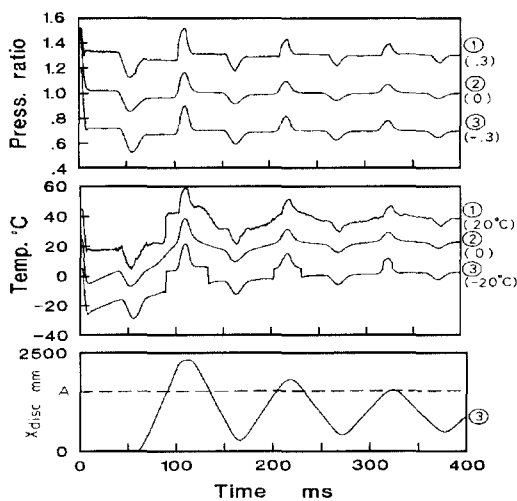


Fig. 5 Comparison of calculated results with observed gas flows.

는 $m(t=0)$ 을 기준으로 하여 $\pm 0.25\%$ 정도의 오차를 보였다. 불연속면을 도입하지 않은 경우는 $-0.3\% \sim 1.2\%$ 의 오차를 나타냈다.

그러나, 배기관에서의 온도변화는 이 계산예의 경우보다 크다. 밸브개시에 불연속면을 도입하였다 하더라도 그 후에도 상당한 온도변화가 있다. 또, 배기가스터빈 과급기관의 성능예측에 있어서는 과급기의 작동영역의 예측이 중요하다. 과급기의 작동영역에 따라서는 유량오차가 확대되기 때문에 과급기의 작동영역, 결과적으로는 기관성능 예측이 크게 차이가 날 염려가 있다. 따라서, Fig.2의 관계를 이용하여 질량을 보존형으로 취급해야 한다.

정격자양해법의 연산시간은 종래의 정격자법에 비하여 1/1.5로 단축된다. 연산시간을 희생하지 않고 고정도화가 얻어졌음을 알 수 있다. 또, 종래의 정격자법에 불연속면을 도입하면 온도의 재현성은 개선되지만 연산시간의 차이가 크게 되는 것에 주의가 필요하다.

3. 2. 테이퍼관

Fig.3의 모델에 대한 Hove들의 결과를 Fig.6에 그대로 인용하여, 정격자양해법으로 얻어진 결과를 같은 그림에 나타냈다. Hove들의 결과와 완전히 일치하는 결과가 얻어졌으나, 알고리즘으로서 상당한 차이가 있다. Hove들은 테이퍼관을 여러개의 직경이 다른 원관으로 치환하고, 관직경이 계단상으로 변화하는 관의 연결부위를 경계문제로서 취급하고 있다. 정격자양해법에서는 내삼식

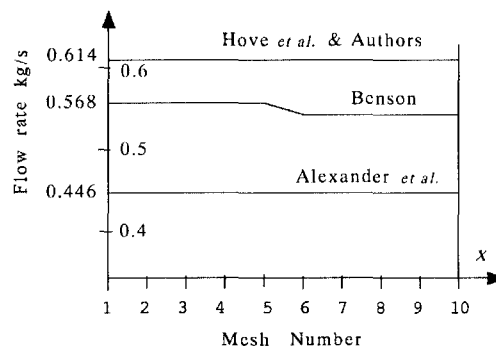


Fig. 6 Calculated results of the test model

을 이용하여 수치적분을 함으로서 3개의 특성곡선 및 $\Sigma^*(\alpha)$ 의 값을 구하고 있다. 수치적분에 있어서 각종 피적분 함수는 수치적으로 구하고 있으나, 테이퍼관으로서 그대로 취급하고 있다.

Fig.6으로부터 정격자양해법에 의하면 테이퍼관을 모델화 할 필요 없이 양호한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 특성곡선법에서는 테이퍼관의 취급이 안 되는 것은 아니지만 간략적인 취급에 무리가 있다고 생각된다. 기초식이 의미하는 바에 따라 충실하게 수치처리를 함으로서 테이퍼관의 취급도 충분히 가능하게 됨을 Fig.6은 나타내고 있다.

3.3. 디젤기관의 흡·배기관

내연기관의 배기관내에서는 가스온도 및 비열비가 변화함과 동시에, 유체자체의 변화도 기주진동이나 Hove들의 모델과는 매우 다르다. 내연기관 흡배기관에서의 질량보존성을 평가하기 위하여 Fig.7에 보이는 4행정사이클 6실린더 디젤기관(행정용적 8.822l)을 대상기관으로 선정하였다.

배기관은 그 중앙에 테이퍼관이 있고, 테이퍼부의 형상은 Fig.3과 상사로 설정하였다. 입구직경을 50mmφ로 하면, 출구직경은 59.4mmφ, 테이퍼부의 길이는 55.6mm로 된다. 이 테이퍼관의 전후에 각각 길이 750mm의 직관을 접속하여 배기관으로 하였다. 흡기관은 직경 58mmφ, 길이 1,750mm의

직관으로 하였고, 테이퍼관이 있는 배기관과 함께 알고리즘 테스트용 흡배기관으로 하였다. 흡기관 출입구(점B, A), 테이퍼부 출입구 및 배기관의 출입구(점D, C)에서의 유량오차를 전부하 상태에서 기관회전수를 파라메타로 하여 구한 결과를 Table 1에 나타냈다. 그 결과는 가스온도 또는 조성에 대한 불연속면을 도입하지 않고 얻어진 값이다.

비교를 위하여 Table 1에는 정격자법으로부터 얻어진 결과도 나타내고 있다. 종래의 정격자법 그 자체로는 테이퍼부의 취급이 곤란하기 때문에 배기관은 직관만으로 취급하였으며, 양자의 연산시간은 거의 같게 하여 얻어진 결과이다.

수렴조건은 체적효율에 대하여 다음과 같이 설정하였다.

$$|\eta_{v,i} - \eta_{v,i+1}| \leq 0.5 \times 10^{-3}$$

단, i : 계산사이클수

배기관에서의 격자간격은 직관부에서 정하고 있기 때문에 테이퍼부의 길이와는 다르다. 테이퍼부에서의 쿠란수(Courant number)가 1을 넘지 않는 한 격자간격은 테이퍼부의 길이에 무관하게 설정할 수 있다.

일반적으로, 내삼식의 끝점에서의 구배를 이용하여 예측치를 구하는 것은 문제를 일으키는 경우가 많다. 테이퍼관 출입구에 있어서, Δt 시간후의 예측치를 구함에 있어서도 이 문제를 일으킬 염려가 있다. Fig.3의 경우를 포함하여 테스트케이스에서는 특별한 취급(예를들면 되풀이 연산)을 하지 않고도 Fig.6 및 Table 1의 결과가 얻어지고 있다.

Table 1로부터 알 수 있는 바와 같이 테이퍼부 출입구에서의 유량은 계산기의 유효수자의 범위 내에서 일치하고 있다. 또, 배기관 전체로서의 질량보존성도 충분한 것을 알 수 있다. 흡기관과 배

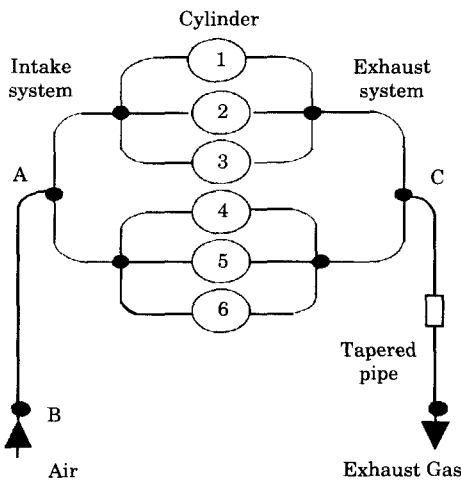


Fig. 7 Schematic diagram of intake and exhaust system in a 4 stroke cycle diesel engine

Table 1 Errors of mass flow for intake & exhaust manifold system in diesel engine. (%)

RPM	intake manifold		exhaust manifold		
	const. mesh	const. mesh, explicit	const. mesh	const. mesh, taper	const. mesh, explicit straight
1000	0.003	0.000	0.81	0.000	0.001
1300	0.027	0.000	1.50	0.000	0.001
1700	0.025	0.005	0.05	0.000	0.005
2100	0.034	0.003	1.17	0.000	0.000

기관에서의 오차를 비교해 보면 가스조성 및 온도에 의한 비열비의 변화를 고려하여도 계산정도에 문제를 일으키지 않는 것을 알 수 있다. 더욱이 양해법의 특징으로서 쿠란수가 질량보존성에 주는 영향은 작다. 이들로부터 양해법에서는 일반적으로 질량의 보존성이 보증되고 있다고 하여도 좋을 것이다.

5. 결 론

관내 가스유동해석수법의 하나인 특성곡선 정격자법에서는 질량보존성의 향상과 테이퍼관의 취급을 가능하게 할 필요가 있다. 본 연구에서는 이 관점으로부터 보존형을 이용하여 질량의 변화를 표현하는 새로운 알고리즘을 개발하고, 기주진동, 테이퍼관 모델 및 내연기관의 흡·배기관에 적용하였다. 그 결과 연산시간을 희생시키지 않고, 질량의 보존성을 충분히 만족함과 동시에 특성곡선법에 의하여 테이퍼관도 충분히 취급할 수 있는 것이 분명하게 되었다.

참고문헌

1. K. Kanamaru, et al., "A Method of Optimizing Turbocharged Engine Systems", *JSME Int. J., Series B*, Vol.37, No.4, 1994, pp.974~981
2. A.R. Conn, et al., "Recent Progress in Unconstrained Nonlinear Optimization without Derivatives", *Mathematical Programming*, 79, 1997, pp.397~414.
3. 織田剛, 他, "二重格子法による吸排氣管系内ガス流動の解析", *日本自動車技術會論文集*, Vol.24, No.1, 1993, pp.39~44
4. 김태훈, 정수진, "Lax-Wendroff 방법을 이용한 4행정 전기점화기관의 흡배기관내의 유동 및 소음특성 해석", *한국박용기관학회지*, 제22권 제5호, 1998, pp.693~125
5. W Van Hove and R Sierens, "Calculation of the Unsteady Flow in Exhaust Pipe System : New Algorithm to Fulfill the Conservation Law in Pipes with Gradual Area Changes", *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 1991, 205, pp.245~250

저 자 소 개



최재성(崔在星)

1952년 5월생. 1974년 한국해양대학교 기관공학과졸업. 1976년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 석사과정졸업. 1986년 일본경도대학 대학원 기계공학과 박사과정졸업. 1974년~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수