

# 4사이클 전기점화기관에서 흡·배기관내 비정상 유동특성 해석에 관한 연구

## A Study on the Unsteady Flow Characteristics Analysis of Intake and Exhaust Pipe in 4 Cycle Spark-Ignition Engine

정수진\* · 김태훈\*\* · 민규식\*\* · 장형성\*\*  
S. J. Jeong · T. H. Kim · G. S. Min · H. S. Jang

### ABSTRACT

This study describes result of comparison of two other numerical method, method of characteristics (MOC) and Lax-Wendroff method(LWM) applied at wave action analysis of intake and exhaust pipe. Partiality FCT(Flux Correct Transport) scheme is appended to LWM to protest unacceptable overshoots, occurring near discontinuity. The final conclusion of this study is that MOC should be replaced by a second order finite difference approach(such as the LW method). Clear benefits we can get by change are faster calculation, higher accuracy, conservation of mass and consistent calculation method.

### 기 호 설 명

t	: 시간(sec)	e	: 비 내부 에너지(J/kg)
Z	: 무차원시간( = $a_{ref} \cdot t / x_{ref}$ )	p	: 압력(N/m <sup>2</sup> )
x	: 관의 길이방향 좌표	a	: 음속(m/s)
X	: 무차원 길이( = $X / X_{ref}$ )	A	: 무차원 음속( = $a / a_{ref}$ )
F	: 관의 단면적(m <sup>2</sup> )	A <sub>A</sub>	: 엔트로피 수준
F	: 상징적 벡터 함수	$\lambda, \beta$	: Riemann 변수
W	: 상징적 벡터 함수	k	: 비열비
S	: 상징적 벡터 함수	f	: 마찰 계수
D	: 관의 지름(m)	f <sub>c</sub>	: 압력 손실 계수

\* 쌍용자동차 차량연구개발실

\*\* 마산전문대학 자동차과

- m : 질량(kg)
- M : 마하수( = u/a)
- n : 사이클 수
- N : 기관 회전수(rpm)
- q : 벽면을 통한 단위 면적당, 단위시간 당 열전달율
- Q : 무차원 열전달율( =  $q \cdot X_{ref} / p_{ref} \cdot a_{ref}$ )
- g : 마찰력
- G : 무차원 마찰력( =  $g \cdot X_{ref} / a_{ref}^2$ )
- R : 기체 상수( =  $287 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
- Re : 레이놀즈 수
- T : 온도(K)
- u : x 방향의 유체속도(m/s)
- U : 무차원 유체속도( =  $a_{ref} / x_{ref}$ )

## 1. 서 론

내연기관의 흡·배기과정중의 상태변화와 흡·배기관내의 유동에 관한 연구는 동력발생과정중의 상태변화에 중요한 영향을 미친다. 흡·배기과정중의 실린더내 상태변화는 흡·배기관내의 가스유동에 좌우되며 따라서 보다 나은 사이클 계산을 위해서는 관내에서의 가스유동이 중요한 문제로 대두된다. 흡·배기관내의 유동은 크게 일차원 방법과 다차원 방법이 있으나 다차원의 유동해석법은 많은 계산시간과 비용문제로 인하여 기관의 초기설계에 적합하지 못한 단점이 있어 일차원 방법이 주로 연구되어 오고있다. 일차원 방법으로 특성곡선법과 유한차분법이 있다. 그중 특성곡선법(MOC)은 엔진내 관유동에 적용시킬 수 있는 인기있는 수치해석 방법이다. Winterbone<sup>1)</sup>은 MOC를 왕복형내연기관의 흡·배기계에 적용하여 실험값에 근접한 타당한 결과를 얻어냈다. MOC는 엔진내 관 유동의 본질적인 특성인 압력파를 추적하는 방법으로 격자점(lattice-point)법과 그물망(mesh)법이 있는데 전산화 하기 쉬운 후자를 많이 사용하고 있다. 후자는 직교좌표계 상에서  $U \pm A$ 의 속도로 전파되는 특성곡선을 계산하는 방법으로 Benson & Grag<sup>2)</sup>에 의해 최초로 엔진에 적용되었다. 이 방법은 각 격자점에서의 값들을 얻기 위해서 Riemann 변수를 보간해야 하는데 이것이 바로 MOC의 치명적인 제약이며 이로 인하여 보간오차(interpolation error)가

존재한다. 또한 이는 압력파의 산(peak)을 둔화시키는 결과를 초래한다<sup>3)</sup>. 또한 가변 엔트로피(nonhomentropic)유동의 해가 필요한 경우에는 입자의 속도 U로 전파되는 궤적선을 사용해야 할 필요가 있다. 이것은 가변엔트로피 MOC는 Eulerian과 Lagrangian 해법의 혼합임을 의미한다. 이러한 수치해석방법은 본질적으로 전산화하기는 쉬우나 반면에 이해하기가 모호하고 어렵다. 이러한 해에다 엔트로피를 포함시키려는 노력이 많이 있어 왔고 대부분 궤적선에 의해 전달되는 물성치들을 선형적으로 보간하는 방법에 기초하고 있다. 또한 MOC에 궤적선이 포함되어 있다는 것은 많은 계산시간이 소요됨을 의미한다. 가변엔트로피 MOC의 잇점은 배기관을 통과하는 여러종의 가스를 해석할 수 있다는 것이고 이는 엔진의 배출물과 촉매정화기의 해석에 유용하게 쓰일 수 있다<sup>3)</sup>. 그러나 궤적선의 선형보간으로 인하여 각각의 물성치에 많은 오차를 유발시킨다. 또한 MOC는 작동유체를 완전가스로 가정한다. 이러한 가정은 많은 열전달을 수반하는 화학반응 유동을 계산하는데 많은 제약이 있다. 이에 반해 유한차분법중 하나인 Lax-Wendroff Method(LWM)는 Taylor 급수로 전개한 2차의 정확도를 가지고 있고 계산과정 중 압력파를 고려하는 장점을 가지고 있다. LWM은 1단계 방법과 2단계 방법이 있는데 모두 정확도에 있어서는 동일하지만 전자는 Jacobian 행렬을 푸는 약간 복잡한 방법을 쓰고 후자는 보조단계를 집어넣어 이 복잡성을 해소하였다. 또한 LWM의 장점은 MOC가 이해가 모호한 Riemann 변수를 사용하여 계산을 수행하는 반면 LWM은 이해하기 쉬운 밀도, 압력, 운동량 등을 변수로 사용하여 푼다는 것이다.

따라서 본 연구에서는 1차원 압축성 유동을 2가지의 수치해법, 즉 MOC와 LWM을 사용하여 4사이클 내연기관의 흡·배기관유동에 적용하고 비교분석함으로써, 다른 shock capturing 방법보다 정확하고 큰 시간증분에 적용할 수 있는 LWM가 엔진의 유동시물레이션에 적합한 방법임이 입증하고자 한다.

## 2. 이론해석

### 2.1 1차원 비정상 압축성 유동방정식

1차원 압축성유동은 연속, 운동, 에너지 방정식의 3가지의 편미분방정식으로 표현될 수 있으며, 이러한 일반적인 방정식들과 함께 상태방정식에 의한 유체의 해석에 필요한 방정식들은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho u}{F} \frac{dF}{dx} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G = 0 \quad \dots\dots (2)$$

여기서  $G = f \frac{u^2}{2} \frac{u}{|u|} \frac{4}{D}$

$$q \rho F = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho F \left( e + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho u F \left( e + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서 q는 단위시간, 단위질량당의 열전달율을 말하며 아래의 식으로 구한다.

$$q = \frac{2f}{D} \frac{k}{k-1} R |u| (T_w - T_{og}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

이상기체에선 내부에너지를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e = C_v \cdot T = \frac{P}{(k-1)\rho} \quad \dots\dots\dots (6)$$

그러므로 에너지 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{u^2}{2} \cdot \rho \frac{P}{k-1} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho u^3}{2} + \frac{k}{k-1} \cdot uP \right) = -\rho q P - \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} \left( \frac{\rho u^3}{2} + \frac{1}{k-1} \cdot uP \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

### 2.2 특성곡선법

MOC는 압축성 유동에서 일어나는 압력파의 해석에 기초하고 있으므로 기울기를 가지고 있는 특성곡선을 따라  $U \pm A$ 의 속도로 움직이고 있는 Riemann변수의 도입이 불가피하다. 무차원 시, 공간의 도면에서 특성곡선의 기울기는 아래와 같다.

$$\frac{dX}{dZ} = U \pm A \quad \dots\dots\dots (8)$$

Riemann 변수는,

$$\lambda = U \mp \frac{k-1}{2} \cdot A \quad \dots\dots\dots (9)$$

여기에 덧붙여서 가변엔트로피 유동에서는 Riemann 변수가 유체를 통과할 때 수정이 필요하다. 즉 시간의 증분에 따라  $\lambda$ 가 변한다. 이것은 아래와 같은 방정식에 의해서 수정될 수 있다.

$$d\lambda = -\frac{k-1}{2} \frac{AU}{F} \frac{dF}{dX} dZ + A \frac{dA_\lambda}{A_\lambda} - \frac{k-1}{2} \frac{2fL_{ref}}{D} U^2 \frac{U}{|U|} \cdot \left( 1 - (k-1) \frac{U}{A} \right) dZ + \frac{(k-1)^2}{2} \frac{qL_{ref}}{a_{ref}^2} \frac{1}{A} dZ \quad \dots\dots (10)$$

이러한 방정식들은 일반적으로 각각의 격자점에 서 계산된다. 그러므로 Riemann 변수값을 각각의 격자점에 적용시키기 위하여 보간을 해야 한다. 이러한 이유때문에 해는 준선형적(quasi-linear)이 된다. 이 보간이 어떤 상황에서는 압력파를 둔화시키는 결과를 초래한다<sup>3)</sup>. 이로 인해서 정확도도 1차로 떨어진다<sup>4)</sup>. 또한 가변엔트로피 유동에서는 엔트로피의 불연속이 존재하고 이 불연속이 전파되는 것을 감지해야 하는데 이것은 국부속도로 움직이고 있는 입자가 이동하는 궤적선을 정의하고 엔트로피 수준을 격자점에 대해 선형적으로 보간하는 Eulerian 방법에 의해서 얻어진다.

방정식 (9), (10)을 살펴보면 k가 포함되어 있는 것이 명백하고 이것은 MOC가 가지고 있는 또 다른 약점을 의미한다. k가 포함되어 있는 방정식들을 분석해보면 k는 음속 a와 에너지항을 표현하고 있음을 알 수 있다. 이것은 2가지 목적을 위하여 k가 사용됨을 의미한다. 즉, 전파속도를 정의하고 에너지수준을 나타내기 위해서다.

사실, 이 각각에 사용되고 있는 k값은 다른값이 되어야 한다. 왜냐하면 "a"를 정의하기 위해서 필요한 값은 국부온도에서의 실제 k값인데 반해 에너지를 정의하는 것은 특정한 위치에서 흐름이 갖는 전에너지를 나타내는 적분평균치(integrated value)이기 때문이다<sup>3)</sup>. 여기에 MOC가 불완전 가스에서 필요로 하는 가변물성치 적용의 한계를 갖는 이유가 있다. 비록 가변비열에 기초하였다고 주장<sup>5)</sup>하는 계산이 나왔지만 이러한 불일치성은 극복하지 못하였다.

2.3 2단계 Lax-Wendroff 방법

Bulaty & Niessner<sup>6)</sup>들은 엔진의 대기관에 1단계 LWM을 성공적으로 적용하였다. 그들은 Jacobian 행렬을 계산함이 수치계산상 아무런 어려움도 발생시키지 않는다고 주장하였지만, 매 시간증분마다 행렬을 풀다는 것은 전산화과정에서 어려움이 따른다. 그러므로 Richtmeyer<sup>7)</sup>등이 제안한 2단계 LWM을 본 연구에 사용하였다. Poloni, Winterbone<sup>5)</sup>등은 이 방법을 관에 적용하여 MOC의 결과와 비교하였다. (1)~(3)식의 1차원 압축성 유동 방정식을 벡터함수를 도입하여 나타내면 아래와 같다.

$$W = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \frac{1}{2} \rho u^2 + \frac{\rho}{k-1} P \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \\ \frac{1}{2} \rho u^3 + \frac{k}{k-1} uP \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$S = \begin{bmatrix} -\frac{\rho u}{F} \frac{dF}{dX} \\ -\rho \frac{u^2}{F} \frac{dF}{dX} - \rho \frac{4f}{d} u \frac{|u|}{2} \\ \rho qP \frac{1}{F} \frac{dF}{dX} \left( \frac{1}{2} \rho u^3 + \frac{k}{k-1} uP \right) \end{bmatrix}$$

그러면 이 방정식계는 1차 쌍곡선 편미분방정식이 되고 다음과 같은 벡터형으로 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S \quad (12)$$

여기서 W, F, S는 3차원 벡터들이고 W = W(x, t)는 종속변수, x, t는 독립변수이다. ρ, u, P는 W로 각기 표시될 수 있고 F는 W의 함수이다.

위의 방법들은 모두 2차 정확도를 가진 방정식들이며 Jacobian 행렬을 풀어야 하는 단점을 보완하기 위해서 Richtmeyer는 two-step Lax Wendroff method라는 방법을 제안하였는데 본 연구에서는 half-mesh increments를 사용하여 Jacobian 행렬을 제거시킨 two step Lax-Wendroff method를 사용하였다.

이 방법은 아래와 같다.

1) 첫번째 단계는 Lax Method로 이산화 시킨다.

$$\begin{aligned} & \frac{W_{i+1/2}^{n+1/2} - \frac{1}{2}(W_{i+1}^n + W_i^n)}{\Delta t/2} \\ & + \frac{W_{i+1}^n - W_i^n}{\Delta x} = \frac{S_{i+1}^n + S_i^n}{2} \\ W_{i+1/2}^{n+1/2} & = \frac{1}{2} [W_{i+1}^n + W_i^n] - \frac{\Delta t}{2} \left[ \frac{F_{i+1}^n - F_i^n}{\Delta x} \right] \\ & + \frac{\Delta t}{4} (S_{i+1}^n - S_i^n) \quad (13) \end{aligned}$$

2) 2번째 단계는 leap frog로 이산화 시킨다.

$$\begin{aligned} & \frac{W_i^{n+1} - W_i^n}{\Delta t} + \frac{F_{i-1/2}^{n+1/2} - F_{i+1/2}^{n+1/2}}{\Delta t} \\ & = \frac{1}{2} (S_{i+1/2}^{n+1/2} + S_{i-1/2}^{n+1/2}) \\ W_i^{n+1} & = W_i^n - \Delta t \left[ \frac{F_{i+1/2}^{n+1/2} - F_{i-1/2}^{n+1/2}}{\Delta x} \right] \\ & + \frac{\Delta t}{2} (S_{i+1/2}^{n+1/2} - S_{i-1/2}^{n+1/2}) \quad (14) \end{aligned}$$

여기서  $F_{i+1/2}^{n+1/2}$  항은 통상적으로 다음과 같은 의미를 가진다.

$$F[U_{i+1/2}^{n+1/2}] = \left[ \frac{W_i^{n+1/2} - W_{i+1}^{n+1/2}}{\Delta x} \right]$$

또는

$$\frac{1}{2} [F(W_i^{n+1/2}) + F(W_{i+1}^{n+1/2})]$$

$W_i^{n+1}$ 이 다음 시간증분 (n+1)에서의 상태벡터 (ρ, u, P)를 나타낸다.

LWM의 안정조건은 아래와 같다.

$C = (|U|+a)\Delta t/\Delta x < 1$  여기서 C는 courant number라 하며,

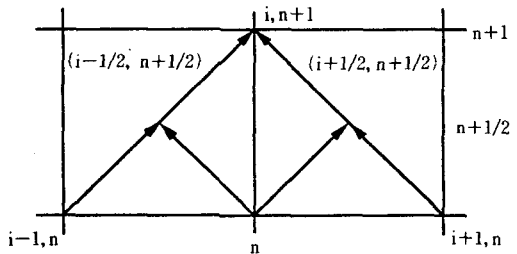


Fig. 1 Grid point and mesh diagram for two step lax-wendroff

일반적으로 courant 수가 감소 할수록 해의 진동은 심해진다고 알려져 있다<sup>6)</sup>.

아래 Fig. 1은 2단계 LWM의 관내의 적용방법을 나타내고 있다.

2.4 FCT(Flux Corrected Method) 방법

1차 정확도보다 높은 선형 유한차분법은 1차원 비정상유동에 적용하였을 때 불연속점에서 불가피하게 overshoot를 만들어 낸다. LWM 역시 불연속점을 전후해서 진동을 하는 분산적(dispersive)인 성격을 가지고 있다<sup>2)</sup>.

1차의 정확도를 갖는 수치해법은 온도불연속이나 압력충격(pressure shock)이 별로 문제되지 않는다. 왜냐하면 수치해법 자체에서 충격이 스며들어 퍼지기 때문이다. 그러므로 우리는 이러한 낮은 정확도 때문에 때때로 불연속의 위치나 존재들을 발견할 수 없다. 그러나 2차 이상의 정확도를 갖는 방법은 대부분 적절한 압력충격의 위치를 나타내 주지만 충격(shock)의 전·후면에서 overshoot을 유발한다.

내연기관의 유동 시뮬레이션에 있어서 특히 배기관을 계산할 때 온도충격(temperature shock)을 만나게 된다. 엔진이 소기를 시작할 때 즉, 배기밸브가 열린 직후에 고온의 배기가스가 배기관 뒤에 있는 찬공기와 만나게 된다. 다른 가스 조성과 더불어 이러한 층사이의 온도차이는 1000K를 초과한다. 사실 모든 2차이상의 정확도를 가진 유한차분법은 불연속이 존재하는 부근에서 비 물리적인 overshoot이 발생한다. 이로인해 안정조건을 만족하는 시간증분은 작아지고 많은 시간단계가 지난 후에는 해는 틀려지게 된다. 이런 충격완화 방법에는 인공점성항(artificial viscosity)을 추가한다거나 smoothing를 시키거나 하는 등 많은 방법이 있으나 본 연구에서는 IKEDA 등<sup>10)</sup>이 발표한 FCT1방법을 이용하여 온도나 압력불연속점에서 발생하는 계산상의 overshoot를 제거하는데 사용하였다. 이는 LWM의 다음단계로 사용되었으며 알고리즘은 다음과 같다.

1) 예비단계로 큰 확산유동항(diffusive flux)를 도입하여 충격을 완화한다.

LWM으로 부터 얻어진 n+1단계의  $W^{n+1}$ 로 부터 유동항  $F1(W)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$F1_{i+1/2}^{n+1}(W) = \frac{\omega}{4}(W_{i+1} - W_i) \dots\dots\dots (15)$$

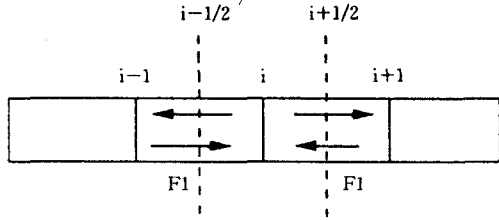


Fig. 2 Schematic of diffusive flux

즉 cell의 경계  $\chi_{i+1/2} = 0.5(\chi_{i+1} + \chi_i)$ 를 확산유동항  $F1$ 이 이 경계를 통해 유출입 함을 의미한다.

확산연산자 DW를 도입하면,  $DW_i = F1_{i+1/2}(W) - F1_{i-1/2}(W)$

그러므로 확산단계는 다음과 같다.

$$*W = W^{n+1} + DW^{n+1}$$

여기서 확산단계를 통하여 smoothing 효과까지 고려되었다. 왜냐하면 시간수위 n+1에서의 벡터 W의 차이로부터 DW의 값이 얻어졌기 때문이다. 또한  $\omega$ 는 양의 상수인데 Bulaty<sup>6)</sup>등은  $\omega \geq 0.5$ 일 때 overshoot를 완전히 없애준다고 하였다. 그러나 안정성조건은  $|C| \leq \sqrt{1 - 0.5 \times \omega}$ 로 떨어뜨린다고 발표하였다.

2) 반-확산(anti-diffusion)단계를 통하여 비 물리적인 overshoot가 일어나지 않는 점에서 일시적 해인 \*W가 갖는 과잉 확산항을 제거하고 또 이러한 overshoot이 존재하는 격자점에서는 이 확산항을 유지시켜 overshoot을 제거하는 것이다.

$$W^{n+1} = *W^{n+1} + AW^{n+1}$$

여기서 반-확산 연산자 AW는 다음과 같이 정의된다.

$$AW^{n+1} = -F1^{ad}(W)_{i+1/2}^{n+1} + F1^{ad}(W)_{i-1/2}^{n+1} \dots\dots\dots (16)$$

FCT의 중요한 특징은 반-확산 단계가 F1항을 새로운 최대·최소치들로 만들지 않도록 방지하는 양적인 방법으로 치환하는 것이다. 이는 아래와 같이 표현된다.

$$F1^{ad}(W) = S \cdot \text{Max} \left[ 0, \text{Min} \left( \frac{5}{8} S \Delta_{i+1/2}^{n+1}, \frac{1}{8} \right) \right]$$

$$\left| \Delta_{i+1/2}^{n+1} \left| \frac{5}{8} S \Delta_{i+3/2}^{n+1} \right| \right)$$

여기서  $\Delta_{i+1/2}^{n+1} = *W_{i+1}^{n+1} - *W_i^{n+1}$

$$S = \text{sign}(\Delta_{i+1/2}^{n+1}) \dots \dots \dots (17)$$

$$\omega_1 = 5/8, \omega_2 = 1/8, \omega_3 = 5/8$$

### 2. 결과 및 고찰

본 연구에 모델기관은 4사이클 전기점화기관이며 Table 1은 기관제원을 나타낸 것이다.

Table 1 Specifications of engine

Engine type		Water cooled 4-cycle 1-cylinder MPI SOHC engine	
Bore×Stroke		mm 85×86	
Total displacement		cc 1468	
Compression ratio		8.5	
Intake/Exhaust pipe Length(m)		0.9/1.8	
Ignition timing		BTDC 5°±1°/700rpm	
Valve timing	Intake	Open	BTDC 16°
		Close	ABDC 54°
	Exhaust	Open	BBDC 52°
		Close	ATDC 12°

본 연구의 주목적은 특성곡선법과 LWM+FCT 방법을 흡·배기관에 적용하여 유동해석 결과를 비교검토하는 것이며 계산은 PC 486DX-33을 사용하였다. Fig. 3은 수치해석을 적용한 기관의 외형도이다.

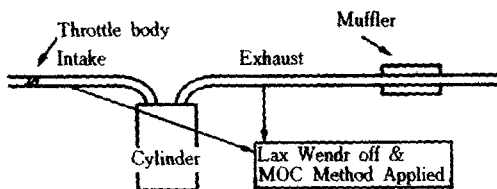


Fig. 3 Schematic diagram of engine

계산에 사용된 경계조건은 특성곡선법과 동일하며 흡·배기관만을 LWM으로 대체하여 계산하였고 흡기관의 기화기는 단열압력강하가 일어나는 점으로 가정하여 계산하였으며, 소음기는 노즐로 계산

하였다. 배기관에서 EVO직후 블로우다운되어 배기관으로 유출되는 가스의 온도는 1500K이고 이때 실린더 내의 압력은 5.5bar로 설정하였고 흡기관의 초기온도와 압력은 각각 300K, 1bar로 설정하여 계산하였다.

Fig. 4와 5는 기관회전속도가 1500rpm일때 LWM+FCTM 방법과 MOC방법을 각각 흡기관과 배기관의 압력과형을 수치해법으로 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 LWM+FCT 방법과 MOC방법의 결과가 거의 일치하고 있으며 배기관의 경우 MOC가 계산한 첫번째 압력과의 산이 각각의 격자점에서의 보간으로 인하여 LWM+FCT가 계산한 결과보다 둔화되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 기관회전속도가 1500rpm에서 흡기관의 속도를 비교한 것이다. AVO기간 동안 1개의 산의 형태로 속도가 증가되어 감을 잘 나타내어 주고 있으며 각각의 해석방법이 같은 경향을 띄고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 기관회전속도가 1500rpm일때 배기관 내의 압력, 온도, 시간의 변화를 LWM+FCT로 계산하여 3차원 그래프로 나타낸 것이다. 압력의 변화에 따라서 높은 온도의 배기가스가 관내를 전파함으로써 관내의 온도변화가 유사한 형태로 변화되어 감을 알 수 있다.

Fig. 8과 9는 2000rpm에서의 각각 흡기관의 속도와 압력을 비교한 것이고, Fig. 10은 배기관의 압력과 속도를 시간에 대하여 LWM+FCT를 사용하여 계산한 것이다. 역시 2가지 수치해법이 같은 경향을 보이며, 배기관에서 압력과 속도가 타당한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 2는 MOC와 LWM+FCT와의 계산속도를 비교한 것으로 계산수행은 PC-486DX-33으로 하였다. 흡·배기 유동시간을 나타내는 720°를 계산하는데 걸린 시간은 다음과 같다.

Table 2 Comparison of computational time against MOC and LWM+FCT method

	MOC	LWM+FCT
Gas exchange section	90 sec	59 sec
total simulation		

여기서 알 수 있는 것은 많은 보간법을 수행하는 MOC보다 LWM이 해의 진동을 억제시키기 위한

FCT를 첨가시켰음에도 불구하고 많은 계산시간을 절약시킬 수 있음을 알 수 있다.

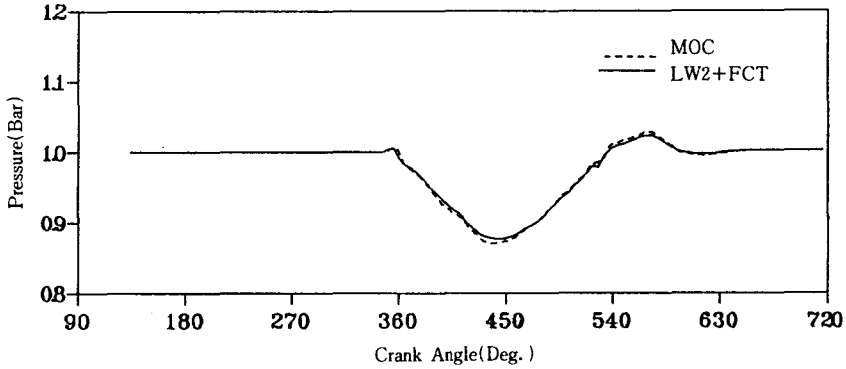


Fig. 4 Comparison of pressure traces in intake pipe using LW+FCT method and MOC at 1500 rpm

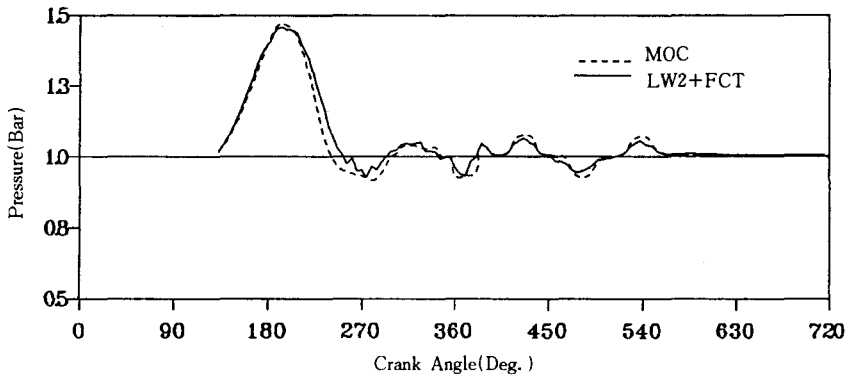


Fig. 5 Comparison of pressure traces in exhaust pipe using LW+FCT method and MOC at 1500 rpm

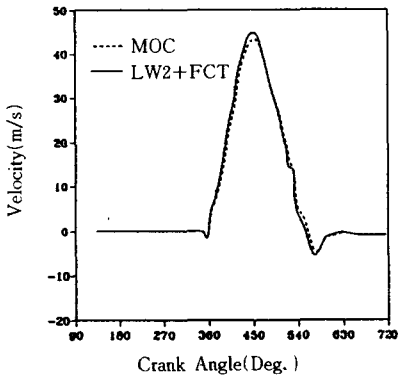


Fig. 6 Comparison of velocity traces in intake pipe using LW+FCT method and MOC at 1500 rpm

앞으로 많은 관의 계산이 필요한 대기통기관의 수치계산에 이러한 유한차분법을 적용한다면 많은 계산시간을 절약할 수 있을 것으로 생각되며, 또한 개념적인 간편성에서도 유한차분법의 적용이 많은 잇점을 가져올 것으로 판단된다.

Fig. 11은 각 수치방법에 대한 배기관에서의 3가지 위치에서의 질량유량을 계산하여 질량보존(mass conservation)도를 비교한 것이다. 결과 LWM+FCT이 질량보존도에서도 월등한 정확도를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 LWM이 2차의 정확도를 가지고 있기 때문으로 생각된다.

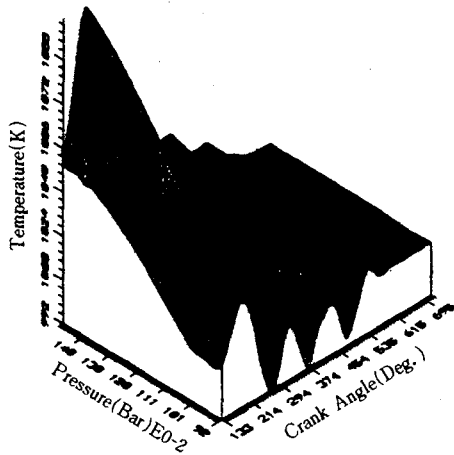


Fig. 7 Comparison of pressure and temperature traces against time in exhaust pipe using LW+FCT method at 1500 rpm

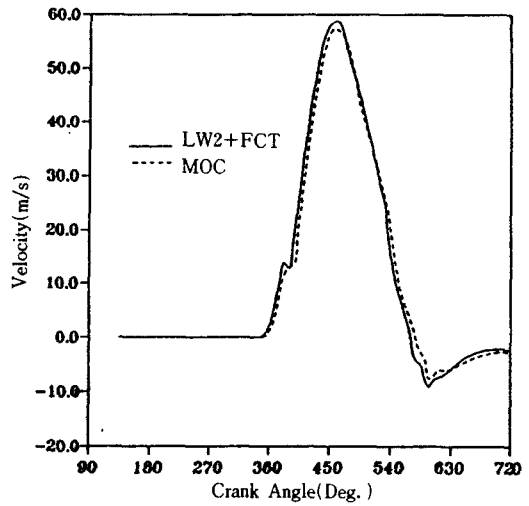


Fig. 8 Comparison of velocity traces in intake pipe using LW+FCT method and MOC at 2000 rpm

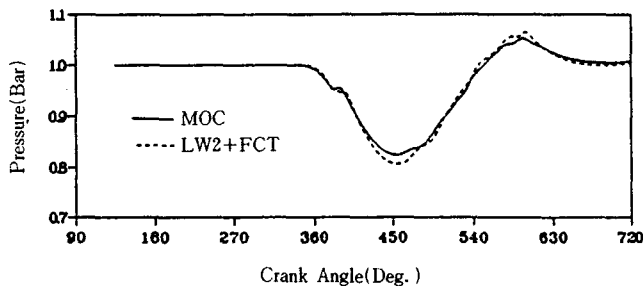


Fig. 9 Comparison of pressure traces in intake pipe using LW+FCT method and MOC at 2000 rpm

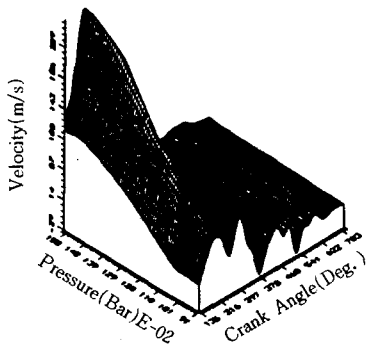
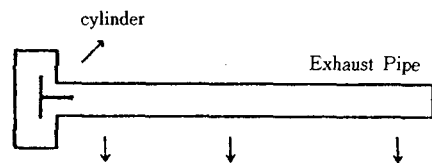


Fig. 10 Comparison of pressure and velocity traces against time in exhaust pipe LW+FCT method at 2000 rpm



mass Flow ratem	0.00226	0.00216	0.00207	(LWM+FCT)
(kg/cycle)	0.00208	0.00195	0.00177	(MOC)

Fig. 11 Comparison of mass conservation



#### 4. 결 론

- 1) LWM을 엔진의 흡·배기관의 유동해석에 적용할 때 압력 및 온도불연속이 존재하므로 LWM 자체만으로는 해석이 어려우며 이에 대응책으로 FCT방법을 사용하여 만족스러운 결과를 얻었다.
  - 2) 2차 정확도를 가지고 있는 LWM+FCT는 MOC보다 정확한 결과를 보인다.
  - 3) LWM+FCT는 MOC보다 계산속도가 빠르다.
  - 4) LWM은 질량 보존도 면에서 MOC보다 높은 정확도를 보이고 있다.
- 이러한 결과를 바탕으로 특성곡선법은 Lax-Wendroff법으로 대치되어야 하며 이로 인하여 흡·배기관내의 압력파의 거동(wave action)해석을 더욱 정확하고 빠르게 수행할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- 1) R. S. Benson, The thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engines , Vol. 1, pp. 241~325, Clarendon Press, 1982.
- 2) R. S. Benson & Garg, A numerical solution of unsteady flow problems, Int. Jnl. of Mechanical Sciences Vol. 6, pp. 117~144, May, 1964.
- 3) D. E. Winterbone, Numerical Simulation of intake & Exhaust flows in a high speed multi-cylinder petrol engine using Lax-Wendroff methods, IMechE, Vol. 15, pp. 91~99, May, 1991.
- 4) C. A. J. Fletcher, Computational Techniques for Fluid Dynamics 2, Springer-Verlag, 1990.
- 5) Poloni, M., Winterbone, D. E., Nicols, J. R., Flow with variable specific heats in the exhaust pipe system of the internal combustion engine, SAE FISTA Congress paper, No. 885094, 1988.
- 6) T. Bulaty & H. Niessner Calculation of 1-D Flows in Pipe Systems of I. C. Engines, J. of Fluids Engineering Vol. 107, 1985.
- 7) Richtmeyer, R. D., Difference methods for initial value problems, Interscience, New York, 1967.
- 8) A. F. Bicen, Steady and Unsteady Air Flow Through the Intake Valve of a Reciprocating Engines, Journal of Fluid Engineering, Vol. 107, 1985.
- 9) P. Petric, M. Poloni, Exhaust System noise optimization using mathematical modeling, Intl' Mech Eng., 1991.
- 10) Ikeda, T. et al, On the SHASTA FCT Algorithm for Equation for  $\partial \rho / \partial t + \partial (\nu(\rho)\rho) / \partial x = 0$ , Math. Comp., Vol. 33, pp. 1157~
- 11) P. A. Lakshminarayanan et al, Prediction of Gas Exchange Process in a Single Cylinder Internal Combustion Engine, SAE, 1979.
- 12) D. A. Ander, J. C. Tannehill, R. H. Pletcher, Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Mc-Graw Hill, 1984.
- 13) Lax, P. & Wendroff, B., Systems of Conservation Laws, Comm. Pure Appl. Math., Vol. 13, No. 3, pp. 217~237, 1960.
- 14) Book, D. L., Boris, J., P. Flux-Corrected Transport2 Generalization of the Method, J. Comp. Phys., Vol. 8, pp. 248~283, 1975.