

Lax - Wendroff 방법을 이용한 4행정 전기점화 기관의 흡·배기관내의 유동 및 소음 특성 해석

김 태 훈* · 정 수 진**

Numerical Simulation of Intake and Exhaust Flows and Noise in 4 Stroke S.I. Engine using the Lax - Wendroff Method

T. H. Kim* · S. J. Jeong**

Key words : Unsteady Flow (비정상 유동), Intake and Exhaust Pipes(흡배기관), LWM(Lax - Wendroff 방법), FCT (Flux Corrected Transport), Method of Characteristics(특성곡선법)

Abstract

This study presents result of comparison between two other numerical method, method of characteristics(MOC) and Lax - Wendroff method(LWM) applied at wave action analysis of intake and exhaust pipe in terms of calculated pressure, velocity and emitted noise, in the time and the frequency domain, by means of fast Fourier transform analysis. Particularly FCT(Flux Corrected 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 because of larger contributions due to high frequency components than the results from the method of characteristics. Clear benefits we can get by change are faster calculation, higher accuracy, conservation of mass and consistent calculation method

기호설명

a : 음속
A : 무차원음속(=a/a_{ref})
p : 압력

F : 관단면적
D : 관직경
f : 마찰상수
t : 시간
T : 온도

* 마산대학 자동차과(원고접수일 : 98년 6월)
** 한양대학교 대학원

- R : 가스상수
- q : 가스의 단위질량 당 열전달율
- u : 속도
- U : 무차원속도(=u/u_{ref})
- X : 무차원거리(=x/L_{ref})
- Z : 무차원시간(=a_{ref}t/x_{ref})
- κ : 비열비
- ρ : 밀도
- ρû : 진폭
- f_n : 주파수
- j : 복소연산자
- J : Bessel함수

1. 서 론

흡·배기 과정중의 실린더 내 상태변화는 흡·배기관내의 가스유동에 좌우되며 따라서 사이클 해석을 위해서는 관내에서의 가스유동이 중요한 문제로 대두된다. 흡·배기관내의 유동은 크게 일차원 방법과 다차원 방법이 있으나 다차원의 유동 해석법은 많은 계산시간과 비용문제로 인하여 기관의 초기설계에 적합하지 못한 단점이 있어 일차원 방법이 주로 연구되어 오고 있다. 일차원 방법으로는 특성곡선법과 유한차분법이 있다. 그중 특성곡선법(MOC)은 엔진 내 관유동에 적용시킬 수 있는 가장 잘 알려진 수치해석 방법이다. Winterbone⁽¹⁾⁽²⁾은 특성곡선법을 왕복형 내연기관의 흡·배기계에 적용하여 타당한 결과를 얻어내었다. 특성곡선법은 엔진내 관 유동의 본질적인 특성인 압력파를 추적하는 방법으로 격자점(lattice-point)법과 격자(mesh)법이 있는데 전산화하기 쉬운 후자를 많이 사용하고 있다. 후자는 직교좌표계 상에서 $U \pm A$ 의 속도로 전파되는 특성곡선을 계산하는 방법으로 Benson & Grag⁽³⁾에 의해 최초로 엔진에 적용되었다. 이 방법은 각 격자점에서의 값들을 얻기 위해서 Riemann⁽¹⁾ 변수를 보간해야 하는데 이것이 바로 특성곡선법의 치명적인 제약이며 이로 인하여 보간오차(interpolation error)가 존재한다. 또한 이는 압력파의 산(peak)을 둔화시키는 결과를 초래한다⁽⁴⁾. 또한 가변 엔트로피(non-homentropic)유동의 해가 필요한 경우에는 입자

의 속도 U로 전파되는 궤적선을 사용해야 할 필요가 있다. 이것은 가변엔트로피 특성곡선법은 Eulerian 과 Lagrangian 해법의 혼합임을 의미한다. 이러한 수치해석방법은 본질적으로는 전산화하기는 쉬우나 반면에 이해하기가 어렵다. 이러한 해에다 엔트로피를 포함시키려는 노력이 많이 있어왔고 대부분 궤적선에 의해 전달되는 물성치들을 선형적으로 보간하는 방법에 기초하고 있다. 또한 특성곡선법에 궤적선이 포함되어 있다는 것은 많은 계산시간이 소요됨을 의미한다. 가변엔트로피 특성곡선법의 장점은 배기관을 통과하는 여러종의 가스를 해석할 수 있다는 것이고 이는 엔진의 배출물과 촉매변환기의 해석에 유용하게 쓰일 수는 있다⁽⁴⁾. 그러나 궤적선의 선형보간으로 인하여 각각의 물성치에 많은 오차를 유발시킨다. 이에 반해 유한차분법 중 하나인 Lax - Wendroff Method(LWM)⁽⁵⁾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 특성곡선법이 이해하기가 어려운 Riemann 변수를 사용하여 계산을 수행하는 반면 LWM은 이해하기 쉬운 밀도, 압력, 운동량등을 변수로 사용하여 푼다는 것이다. 그러나 2차의 유한차분법인 LWM은 불연속점에서 불가피하게 나타나는 과도응답(overshoot)으로 인하여 EVO(Exhaust Valve Open)시의 급격한 온도 및 압력의 불연속이 존재하는 배기관에 직접 적용하기 힘들다⁽⁶⁾. 따라서 본 연구에서는 불연속점에서의 해의 진동을 억제하기 위해서 FCT (Flux Corrected Transport) 방법을 사용하였다⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

본 연구에서는 1차원 압축성 유동을 2가지의 수치해법, 즉 특성곡선법과 LWM+FCT를 사용하여 4행정 내연기관의 흡·배기관유동에 적용하여 시간 및 주파수 영역에서 속도 및 압력파형을 비교 분석하였으며, 배기관 미단에서 방출되는 소음을 FFT분석하여 두 수치해법의 소음 예측 성능 또한 분석함으로써 LWM+FCT가 엔진의 유동 시뮬레

이전에 적합한 방법임을 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.

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

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

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

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

$$\frac{p}{\rho} = RT, \quad q = \frac{2f}{D} \frac{k}{k-1} R |u| (T_w - T_{og}),$$

$$e = C_v \cdot T = \frac{P}{(k-1)\rho} \quad (4)$$

그러므로 에너지 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{u^2}{2} \cdot \rho \frac{P}{x-1} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho u^3}{2} + \frac{x}{x-1} \cdot uP \right)$$

$$= -\rho qp - \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} \left(\frac{\rho u^3}{2} + \frac{1}{x-1} \cdot uP \right) \quad (5)$$

2.2 특성곡선법

특성곡선법은 압축성유동에서 일어나는 압력과 해석에 기초하고 있으므로 기울기를 가지고 있는 특성곡선을 따라 $U \pm A$ 의 속도로 움직이고 있는 Riemann 변수의 도입이 불가피하다. 무차원으로 표시된 공간의 도면에서 특성곡선의 기울기는 아래와 같다.

$$\frac{dX}{dZ} = U \pm A \quad (6)$$

Riemann 변수 λ 는,

$$\lambda = U \mp \frac{x-1}{2} \cdot A \quad (7)$$

여기에 덧붙여서 가변엔트로피 유동에서는 Riemann 변수가 유체를 통과할 때 수정이 필요하다. 즉 시간의 증분에 따라 λ 가 변한다. 이것은 아래와 같은 방정식으로 수정할 수 있다.

$$d\lambda = -\frac{x-1}{2} \frac{AU}{F} \frac{dF}{dX} dZ + A \frac{DA_A}{A_A}$$

$$- \frac{x-1}{2} \frac{2fL_{ref}}{D} U^2 \frac{U}{|U|} \cdot \left(1 - (x-1) \frac{U}{A} \right) dZ$$

$$+ \frac{(x-1)^2}{2} \frac{qL_{ref}}{a_{ref}^2} \frac{1}{A} dZ \quad (8)$$

이러한 방정식들은 일반적으로 각각의 격자점에서 계산된다. 그러므로 Riemann 변수값을 각각의 격자점에 적용시키기 위하여 보간을 해야 한다. 이러한 이유 때문에 해는 준선형적(quasi-linear)이 된다. 이 보간이 어떤 상황에서는 압력파를 둔화시키는 결과를 초래한다⁽⁴⁾. 이로 인해서 정확도도 1차로 떨어진다⁽⁹⁾. 또한 가변엔트로피 유동에서는 엔트로피의 불연속이 존재하고 이 불연속이 전파되는 것을 감지해야 하는데 이를 위하여 국부속도로 움직이고 있는 입자의 궤적선을 정의하고 엔트로피 수준을 격자점에 대해 선형적으로 보간하는 Eulerian 방법을 사용한다.

2.3 2단계 Lax-Wendroff 방법

Bulaty & Niessner⁽⁷⁾들은 엔진의 다기관에 1단계 LWM을 성공적으로 적용하였다. 그들은 Jacobian 행렬을 계산함이 수치계산상 아무런 어려움도 발생시키지 않는다고 주장하였지만, 매 시간증분마다 행렬을 풀다는 것은 전산화과정에서 어려움이 따른다. 그러므로 Richtmeyer⁽¹⁰⁾등이 제안한 2단계 LWM을 본 연구에서 사용하였다. Poloni, Winterbone⁽¹¹⁾등은 이 방법을 관에 적용하여 특성곡선법의 결과와 비교하였다. (1)-(3)식의 1차원 압축성 유동 방정식을 벡터함수를 도입하여 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 W &= \left[\begin{array}{c} \rho u \\ \frac{1}{2} \rho u^2 + \frac{P}{x-1} \end{array} \right] \\
 F &= \left[\begin{array}{c} \rho u \\ \frac{1}{2} \rho u^3 + \frac{x}{x-1} uP \end{array} \right] \\
 S &= \left[\begin{array}{c} \frac{-\rho u^2}{F} \frac{dF}{dX} \\ -\rho \frac{u^2}{F} \frac{dF}{dX} - \rho \frac{4f}{d} u \frac{|u|}{2} \\ \rho qP - \frac{1}{F} \frac{dF}{dX} \left(\frac{1}{2} \rho u^3 + \frac{x}{x-1} uP \right) \end{array} \right]
 \end{aligned} \tag{9}$$

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

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S \tag{10}$$

여기서 W, F, S 는 상정적 벡터함수로서 3차원 벡터들이고 $W=W(x, y, z, t)$ 는 종속변수, x, y, z, t 는 독립변수이다. ρ, u, P 는 W 로 표기될 수 있고 F 는 W 의 함수이다. 위의 방법들은 모두 2차 항의 정확도를 가진 방정식들이며 Jacobian행렬을 풀어야 하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 Richtmeyer는 two-step Lax Wendroff 이라는 방법을 제안하였는데 본 논문에서는 half-mesh increments(중간 시간증분)를 사용하여 Jacobian행렬을 제거시킨 2단계 Lax-Wendroff 방법을 사용하였다.

이 방법은 아래와 같다.

i) 첫번째 단계는 1차 쌍곡선편 미분방정식을 Lax Method로 이산화시킨다.

$$\begin{aligned}
 &\frac{W_{i+1/2}^{n+1/2} - \frac{1}{2}(W_{i+1}^n + W_i^n)}{\Delta t/2} \\
 &\quad + \frac{W_{i+1}^n - W_i^n}{\Delta x} = \frac{S_{i+1}^n + S_i^n}{2} \\
 W_{i+1/2}^{n+1/2} &= \frac{1}{2} [W_{i+1}^n + W_i^n] \\
 &- \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{F_{i+1}^n - F_i^n}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta t}{4} (S_{i+1}^n + S_i^n) \tag{11}
 \end{aligned}$$

ii) 두번째 단계는 leap frog로 이산화시킨다.

$$\begin{aligned}
 &\frac{F_i^{n+1} - W_i^n}{\Delta t} + \frac{F_{i+1/2}^{n+1/2} - F_{i-1/2}^{n+1/2}}{\Delta x} \\
 &= \frac{1}{2} (S_{i+1/2}^{n+1/2} + S_{i-1/2}^{n+1/2}) \\
 W_i^{n+1} &= W_i^n - \Delta t \left[\frac{F_{i+1/2}^{n+1/2} - F_{i-1/2}^{n+1/2}}{\Delta x} \right] \\
 &\quad + \frac{\Delta t}{2} (S_{i+1/2}^{n+1/2} + S_{i-1/2}^{n+1/2}) \tag{12}
 \end{aligned}$$

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

$$C = (|U| + a)\Delta t / \Delta x < 1 \tag{13}$$

여기서 C 는 Courant number이다. Fig.1은 2단계 LWM의 관내의 적용 방법을 나타내고 있다.

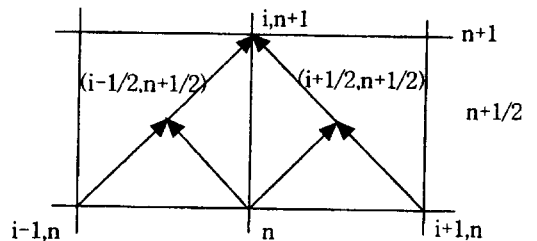


Fig. 1. Grid points and mesh diagram for two step Lax - Wendroff method

한편 격자간격에 따른 두 방법의 차이를 살펴보면 특성곡선법에 있어서 최적의 격자간격과 시간증분의 관계는 아래의 식(14)로부터 결정되어진다.

$$\Delta a = \frac{360N L_{min}}{a + |u|} \tag{14}$$

여기서 N 은 엔진의 회전수이고, L_{min} 은 mesh length이다. 따라서 격자 및 시간 증분은 식(14)를 기준으로 계산되어지며 이는 LWM와 MOC의 경우 모두 동일하게 계산하였다.

2.4 FCT(Flux Corrected Method) 방법

특성곡선법과 같은 1차항의 정확도를 가진 유한 차분법은 1차원 비정상유동에 적용하였을 때 불연속점에서 불가피하게 overshoot를 만들어 낸다. LWM 역시 불연속점을 전후해서 진동을 하는 분

산적(dispersive)인 성격을 가지고 있다⁽³⁾.

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

따라서 이를 억제하기 위하여 본 연구에서는 Ikeda⁽¹²⁾ 등이 발표한 FCT^(6*7*8) 방법을 사용하였다. 이는 LWM의 다음단계로 사용되었으며 알고리즘은 다음과 같다.

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

$$DW_i = Fl_{i+1/2}(W) - Fl_{i-1/2}(W)$$

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

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

$$AW^{n+1} = -Fl^{ad}(W)_{i+1/2}^{n+1} + Fl^{ad}(W)_{i-1/2}^{n+1}$$

$$Fl^{ad}(W) = S \cdot \text{Max}\{0,$$

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

(16)

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

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

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

2.5 FFT를 이용한 압력, 속도, 방사 소음의 스펙트럼 분석

특성곡선법이나 LWM+FCT로 계산된 배기관내의 속도 및 압력파형의 스펙트럼 분석을 하기 위하여 FFT 알고리즘을 사용하였다. 배기관 미단의 개방단에서 방출되는 소음은 개방단에서의 속도 파형으로부터 구할 수 있다⁽¹³⁾. 즉 주어진 시간에 대한 질량 유속을 FFT(Fast Fourier Transform)을 이용하여 아래식과 같이 각각의 주파수에 대한 함수로 나타낼 수 있다.

$$\rho u = \hat{\rho} \hat{u}^{jk(n,d)} \quad (17)$$

여기서, $k_n = \frac{\omega n}{a_0} = \frac{2\pi f_n}{a_n}$ 이다.

위의 식(17)에서 각각의 주파수에 대한 진폭($\hat{\rho} \hat{u}$)을 알고 있으므로 이것을 아래식(18)에 대입하면 각각의 주파수에 대해서 배기관으로부터 직접 도달하는 압력파의 평균 제곱값을 구할 수 있다.

$$(P_{rms})^2_{source} = \frac{\pi^2 f_n^2 d^4 |\hat{\rho} \hat{u}|^2}{32R^2} \times \left\{ \frac{2J_1\left(\frac{\pi f_n d}{a_0} \sin \theta\right)}{\pi f_n \frac{d}{a_0} \sin \theta} \right\} \quad (18)$$

또한 아래식(19)에 진폭을 대입하여 계산하면 지면의 반사에 의한 압력파의 평균제곱값을 구할 수 있다.

$$(P_{rms})^2_{image} = \frac{\pi^2 f_n^2 d^4 |\hat{\rho} \hat{u}|^2}{32(R \sec \phi)^2} \times \left\{ \frac{2J_1\left(\frac{\pi f_n d}{a_0} \sin \phi\right)}{\pi f_n \frac{d}{a_0} \sin \phi} \right\}^2 \times \left\{ \frac{2J_1\left(\frac{\pi f_n d}{a_0} \sin \theta\right)}{\pi f_n \frac{d}{a_0} \sin \theta} \right\}^2 \quad (19)$$

여기서, $\left\{ \frac{2J_1(x)}{x} \right\}$ 는 방향함수이다.

즉, 전체 음압의 평균제곱값은 각각의 주파수에 대한 진폭을 이용하여 배기관에서 직접 도달하는 평균제곱음압과 지면의 반사에 의한 평균제곱음압을 구한 후 이를 더하여 구하였다.

$$(P_{rms})^2_{total} = (P_{rms})^2_{source} + (P_{rms})^2_{image} \quad (20)$$

이는 아래식(21)에 의하여 dB로 변환하였다.

$$\text{SPL} = 10 \log_{10} \frac{(P_{rms})^2}{(P_{ref})^2} \text{ dB} \quad (21)$$

여기서 $P_{ref} = 2.0 \times 10^{-5} \text{ (Pa)}$ 이다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에 모델기관은 4행정 전기점화기관이며 표1은 기관제원을 나타낸 것이다.

Table 1. Specification of engine

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

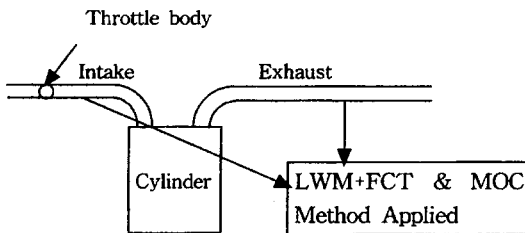


Fig. 2. Schematic diagram of engine

Fig. 2는 수치해석을 적용한 기관의 개략도이다 계산에 사용된 경계조건은 특성곡선법과 동일하며 흡·배기관관을 LWM으로 대체하여 계산하였고 흡기관의 스톱바디는 단열압력강하가 일어나는 불연속점으로 가정하여 계산하였다. 배기관에서 EVO직후 불로우다운되어 배기관으로 유출되는 가스의 온도는 1500K이고 이때 실린더 내의 압력은 5.5 bar로 설정하였고 흡기관의 초기온도와 압력은 각각 300K, 1bar로 설정하여 계산하였다.

Fig.3은 기관회전속도가 1500, 2000rpm에서 흡기관의 중간부분의 속도를 비교한 것이다. AVO기간 동안 1개의 산의 형태로 속도가 증가되어감을 잘 나타내어 주고 있으며 각각의 해석방법이 같은 경향을 띄고 있음을 알 수 있다.

Fig.4(a),(b)는 기관의 회전속도가 1000, 2000rpm 에서 특성곡선법과 LWM+FCT와 배기관 내의 압력 및 속도 파형을 계산하여 각각 비교한 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 LWM+FCT 방법과 특성곡선법 방법의 결과가 각각의 파형은 서로 비슷한 경향을 띄고 있으나 배기관의 경우 특성곡선법으로 계산한 첫번째 압력파의 산이 각각의 격자점에서의 보간으로 인하여 LWM+FCT가 계산한

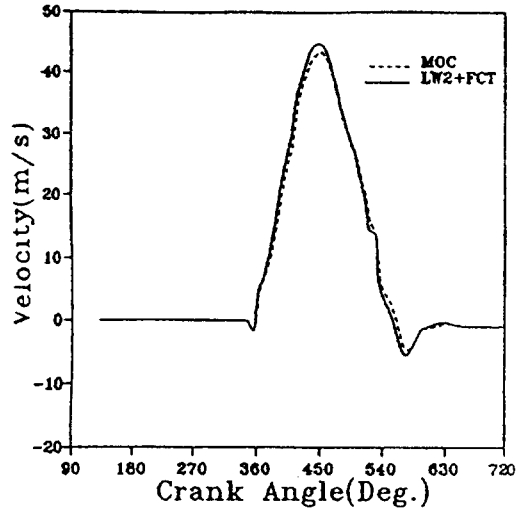


Fig. 3a. Comparison of velocity traces in intake pipe using LWM+FCT method and MOC at 1500 rpm

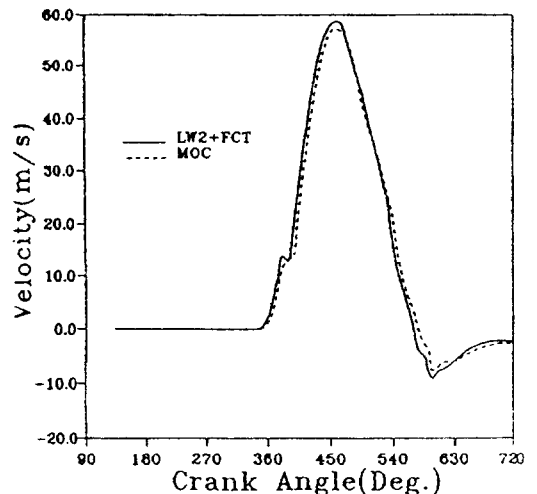


Fig. 3b. Comparison of velocity traces in intake pipe using LWM+FCT method and MOC at 2000 rpm

결과보다 둔화되고 반면에 LWM+FCT의 결과가 특성곡선법의 결과보다 산의 봉우리가 더 예리함을 알 수 있다. 이는 흡기관의 경우와는 달리 배기관의 경우 배기밸브열림시 온도와 압력의 급격한 불연속점이 생성되기 때문에 특성곡선법의 경우, 각 격자점의 선형 보간으로 인하여 압력파의 파형을 둔화시키고 있어 2차항 정도를 가진 LWM+FCT보다 압력파의 최대치가 무더짐을 알 수 있다.

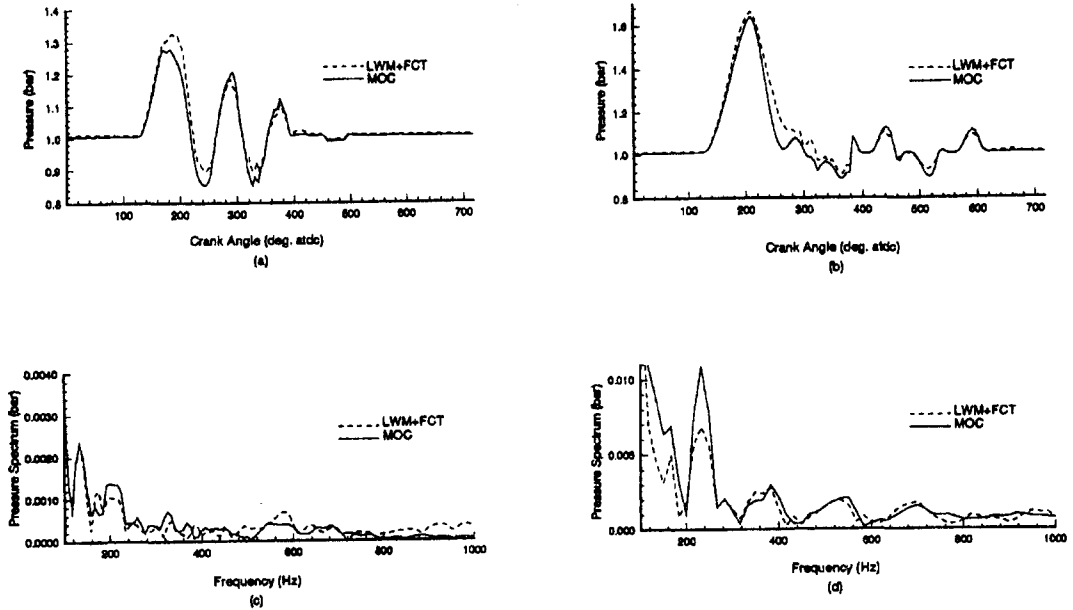


Fig. 4. Comparison of two - step Lax Wendroff(LW2) method and MOC in exhaust pipes for 4 stroke spark - ignition engine.
 (a) Pressure versus Crank angle(1000rpm)
 (b) Pressure versus Crank angle(2000rpm)
 (c) Pressure Spectrum versus Frequency(1000rpm)
 (d) Pressure Spectrum versus Frequency(2000rpm)

이러한 성향은 FFT를 통한 스펙트럼 분석에 있어서 더욱 두드러지게 나타난다. Fig. 4(c), (d)는 LWM+FCT가 배기가스 맥동으로 인한 소음특성 해석의 적용 타당성을 확인하기 위해 기관의 회전속도가 1000, 2000rpm 에서 특성곡선법과 LWM+FCT와 주파수에 대한 압력 스펙트럼을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 파형의 결과 비슷한 결과를 보이고 있으나 특성곡선법의 결과가 LWM+FCT보다 고주파 영역에서 낮은 파고를 형성하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 특성곡선법이 관내마찰, 관면적변화, 엔트로피, 열전달등을 고려하기 위해 궤적선(Path line)이라는 특성곡선을 이용하고 있고, 궤적선의 특성곡선은 격자점에서 선형보간하여 새로운 시간증분의 수렴조건을 만족하면서 계산하기 때문에 격자점에서 보간없이 계산된 LWM+FCT보다 계산시간이 느릴 뿐만 아니라 각 격자점에서 선형보간으로 인하여 산봉우리가 둔화되어 고주파 영역에서 많은 정보를 유실하

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

	MOC	LWM + FCT
gas exchange section	90 s	59s
total simulation		

여 정확도가 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 배기가스의 맥동에 의한 소음 특성 분석을 수행할 경우 특성곡선법 보다 LWM+FCT가 2차항의 정확도가 가지고 있으며 또한 계산시간이 빠르고, 질량유량의 보존도가 높으므로 특성곡선법 보다 정확한 결과를 내어주리라 생각한다.

표 2는 특성곡선법과 LWM + FCT와의 계산속도를 비교한 것으로 계산수행은 PC - 486DX - 33으로 하였다. 흡·배기 유동기간을 나타내는 720°를 계산하는 데 걸린 시간은 표 2와 같다.

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

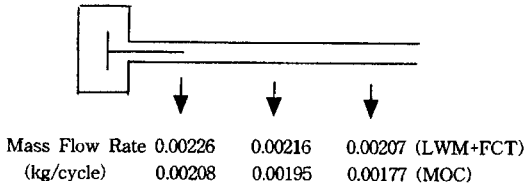


Fig. 5. Comparison of mass conservation

위한 FCT를 첨가시켰음에도 불구하고 계산시간을 많이 절약시킬 수 있음을 알 수 있다.

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

Fig. 5는 각 수치방법에 대한 배기관에서의 3가지 위치에서의 질량유량을 계산하여 질량보존도를 비교한 것이다. 그 결과 LWM+FCT 방법이 질량보존도에서도 월등한 정확도를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 2차의 정확도를 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

- (1) LWM을 엔진의 흡·배기관의 유동해석에 적용할 때 압력 및 온도 불연속이 존재하므로 LWM 자체만으로는 해석이 정확하지 못하므로 FCT 방법을 사용하여 만족스러운 결과를 얻었다.
- (2) 특성곡선법이 예측한 속도 및 압력 파형은 각 격자점에서의 선형 보간으로 인한 무더진 파형으로 인하여 LWM+FCT보다 정확한 예측을 할 수 없었으며 이는 FFT를 통한 스펙트럼 분석 결과, 특성곡선법은 고주파 영역에서 많은 결과를 유실 할 수 있는 가능성을 의미한다. 따라서 LWM+FCT은 흡·배기관내의 유동특성 해석은 물론 배기가스 맥동에 의한 소음특성의 해석에도 정확한 결과를 얻을 수 있다.
- (3) LWM+FCT는 특성곡선법보다 빠른 계산속도와 질량보존도 면에서 높은 정확도를 보이고 있음을 확인하였다.

참고문헌

- 1) R. S. Benson, "The thermodynamics and Gas dynamacis of Internal combustion engines", Vol.1, Clarendon Press, 1982.
- 2) A. Onorati, D. E. Winterbone and R. J. Pearson, "A comparison of the Lax - Wendroff Technique and Method of characteristics for Engine Gas Dynamic Calculation Using Fast Fourier Transform Spectral Analysis", SAE paper 930428, 1993.
- 3) R. S. Benson, Garg, "A numerical solution of unsteady flow problems", Int.Jn1.of Mechanical Science, Vol.6, 1964
- 4) D. E. Winterbone, et al. "Numerical Simulation of intake & exhaust flows in a high speed multi - cylinder petrol engine using Lax - Wendroff methods", IMechE, 1991
- 5) Lax, P., & Wendroff, B., "Systems of Conservation Laws", Comm. Pure Appl Math., Vol.13, pp. 217 - 237,1960.
- 6) P.Petric, M.Poloni, "Exhaust System noise optimization using mathematical modeling", Intl' Mech Eng., 1991.
- 7) T. Bulaty & H.Niessner, "Calculation of 1 - D Flows in Pipe System of I. C. Engines", J.of Fluids Engineering, Vol.107, 1985.
- 8) Book, D. L., Boris, J. ,P. "Flux - Corrected Transport 2 Generalization of the Method", J.Comp. Phys., Vol.18, pp.248 - 283, 1975.
- 9) C. A. J. Fletcher, "Computational Tehchniques for Fluid Dynamics 2", Springer - Verlag, 1990
- 10) Richtmeyer, R. D., "Difference methods for initial value problems", Interscience, New York, 1967
- 11) 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.
- 12) Ikeda,T. et al, "On the SHASTA FCT Algorithm for Equation for $\partial\rho/\partial t + \partial(v(\rho)v)/\partial x = 0$ ", Math. Comp., Vol.33, 1979.
- 13) G. P. Blair, S. W. Coates, "Noise Produced by Unsteady Exhaust Efflux from an Internal Combustion Engine", SAE paper 730160, 1973.

저 자 소 개



김태훈(金台勳)

1962년 11월8일생. 1986년 한양대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1988년 동대학원 기계공학과 졸업(석사) 1995년 동대학원 기계공학과 졸업(박사) 1994년 - 현재 마산대학 자동차과 조교수, 당 학회 회원



정수진(丁守鎭)

1965년 2월28 일생. 1991년 인하대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1993년 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사) 1997년 - 현재 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정, 당학회 회원