모델엔진 실린더내의 유동에 대한 다차원 수치해석

Multidimensional Numerical Simulation of Flows in the Cylinder of a Model Engine

정 진 은*, 김 응 서**
Jin Eun Chung, Eung Seo Kim

ABSTRACT

A multidimensional numerical simulation for flows in an engine with axisymmetric geometry was performed.

Three kinds of differencing schemes, namely, skew upwind differencing scheme (SUDS), interpolated upwind differencing scheme (IUDS), upwind differencing scheme (UDS), are used in a comparative study. Simultaneously, the effects of the artificial dampings and the grids on numerical results are estimated.

Compared with the measurements, the calculations with SUDS and proper artificial damping show very similar qualitative tendency with observed results. But there are some discrepancies due to numerical errors and unclear boundary conditions.

기 호 설 명

I : 내부 에너지
J : 열전달률 벡터
k : 난류 운동에너지
P : 압력
$\dot{Q}_c$: 반응열
R : 실린더 좌표의 반경
$\underline{u}$: 속도 벡터
T : 온도
t : 시간
W_k : 화학종 k의 질량
x_n : 벽근접 거리
$\underline{\sigma}$: 점성응력 벡터
σ_θ : 실린더 좌표의 점성 응력
∇ : 구배 벡터
ρ : 평균 밀도
ρ_k : 화학종 k의 밀도
ϵ : 난류 확산율

1. 서 론

내연기관의 실린더내에서 발생하는 유동은 흡입 및 연소과정을 조절하는 가장 중요한 인자의 하나이다. 전기점화기관에서는 화염전파를, 압축점화기관에서는 연료-공기 혼합과 연

* 정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과
** 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

소율을 결정하며, 공해물질생성에도 지대한 영향을 미친다.[1] 이러한 내연기관의 유동현상에 대한 충분한 이해는 최고 출력과 최저 유해 배출물을 추구하는 기관설계자에게 필수적이다. 그러나 내연기관 실린더는 물질, 운동량, 에너지의 난류 이동, 난류화염전파, 벽열전달 등을 포함하는 극히 복잡한 시스템이므로 기존의 전통적 해석방법으로는 유용한 결과를 구하기 어렵다. 그러므로 설계자는 실험과 수치해석의 상호보완을 통하여 필요한 자료를 신속하게 획득하여야 한다. 실험은 모델엔진 또는 실제엔진에서 가시화연구를 통하여 유동의 전반적 특성을, 열선 또는 LDV[2]를 사용하여 속도를 측정하므로 상세한 자료를 제공한다. 한편 수치해석은 컴퓨터와 수학적 모델이 발달하므로 새로운 해석 도구로 각광을 받고 있다. 특히 다차원 수치해석[3]은 영차원 또는 유사일차원[4]과 같은 방법이 상당한 경험치를 요구하는 것에 비하여 근본적으로 순수한 예측방법이 될 수 있다는 관점에서, 많은 컴퓨터 기억용량과 계산시간을 요하는 단점에도 불구하고 커다란 잠재력을 가지고 이에 대하여 간단한 축대칭 모델 엔진의 유동에 관한 연구[6]부터 시작되어 3차원 유동 및 연소현상에 관한 연구[6]로 확장되고 있다.

본 연구에서는 내연기관 실린더내의 유동 및 연소현상에 대한 수치해석 패키지 개발을 목표로 하고, 1단계로 축대칭 모델엔진의 유동에 대한 다차원 수치해석 프로그램을 개발하였다. 복잡한 형상과 다양한 속도의 유동계산에 적절한 것으로 증명된 ICED-ALE[7] 방법을 기본으로 하여, skew upwind differencing scheme[8]과 $k-\epsilon$ 난류모델[9]을 사용하여 수치해를 구하였다. 간단한 형태의 2차원 축대칭 모델엔진의 흡입과정을 3가지의 differencing scheme, 인위적 감쇠량, 계산격자에 대하여 계산하고 실험치[10]와 비교함으로써 해석의 타당성을 검토하였다.

2. 해 석

2.1 지배방정식

기관 실린더 내의 유동의 지배방정식은 질량보존식, 운동량보존식, 에너지 보존식과 이상기체의 상태방정식으로 구성된다. 이들을 축대칭 원통좌표계에서 tensor형태로 표현하면 다음과 같다.[13]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \underline{u})+\frac{1}{R}\nabla\cdot(R\rho\underline{u})=0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\underline{u})+\frac{1}{R}\nabla\cdot(R\rho\underline{u}\,\underline{u})=-\nabla P+\frac{1}{R}\nabla\cdot(R\sigma)-\frac{\sigma_\theta}{R}\nabla R$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho I)+\frac{1}{R}\nabla(R\rho I\underline{u})=-\frac{P}{R}\nabla\cdot(R\underline{u})+\sigma_\theta\underline{u}\cdot\nabla R-\frac{1}{R}\nabla\cdot(RJ)+\dot{Q}_c$$

$$P=R_g T\sum_k(\rho_k/W_k)$$

2.2 수치해석

본 연구에서는 시간에 대하여 Harlow의 Implicit-Continuous fluid-Eulerian Description (ICED)[11]와 공간에 대하여 Hirt의 Arbitrary-Lagrangian-Eulerian (ALE)[12] mesh를 사용하여 지배방정식의 수치해를 구하였다. 이 ICED-ALE 방법은 완전 비선형, 비정상의 Navier-Stokes 방정식을 해석하는데 적합하다는 것이 증명되었고, 특히 복잡한 기하학적 형상과 다양한 속도의 실린더 유동해석에 적절하다. CONCHAS Code[13]에서 이 방법을 구체적으로 활용하였으며, 사용된 수치 알고리즘을 간단히 설명하면 다음과 같다.

지배방정식을 임의의 속도로 움직이는 제어체적에 대하여 적분하고 시간에 대하여 세단계로 나누어 계산한다. 첫 단계에서, 유체가 제어체적과 같은 속도로 이동한다고 가정하면 지배방정식의 대류항이 제거된다. 이러한 상태에서 전단계의 변수값을 이용하여 속도와 내부에너지를 계산한다. 둘째 단계에서, 압력구배력에 의한 새로운 속도와 압력을 계산한다. 세째 단계에서, 격자에 대한 유체의 상대운동을 고려한, 즉 대류항을 포함하여 최종적으로 변수값을 계산한다.

한편, 편미분지배방정식을 유한차분방정식으로 차분화하는 과정은 수치해석의 기본이 된다. 이러한 차분화방법(differencing scheme)에는 정확하지만 안정성이 극히 나쁜 centered differencing scheme(CDS), 안정성은 좋지만 너무 확산적인 upwind differencing scheme (UDS), 정확도를 높이기 위하여 UDS에 CDS를 부분적으로 도입한 interpolated upwind differencing scheme(IUDS), 기존의 UDS과 같은 1차 정확도를 가지나 속도벡터의 방향을 고려하여 수치확산을 감소시키는 skew upwind differencing scheme(SUDS), 수치확산을 완전히 배제하는 quadratic upstream interpolation for convective kinematics(QUICK)[14] 등이 사용되고 있다.

경사진 흡입구가 있는 실린더의 유동장은 여러개의 재순환영역을 포함한다. 재순환영역에서는 유동방향이 계산격자에 대하여 경사지게 되므로 수치확산이 발생한다. 그러므로 수치해석상의 오차를 최소로 하는 정확한 해석방법이 절실히 필요하다. 본 연구에서는 약간 복잡한 형태이지만, 이러한 오차를 획기적으로 감소시키는 것이 입증된[15] SUDS를 사용한다. 또한 차분화방법, 인위적 감쇠량, 계산격자수가 수치결과에 미치는 영향을 파악한다.

2.3 난류 모델

피스톤운동에 의하여 유도되는 실린더 내의 유동은 일반적으로 난류이므로, 수치해석과정에서 난류의 영향을 고려하여야 한다. 난류의 중요특징은 물질, 운동량, 에너지 전달의 증가와 고유한 large-scale 구조의 존재이다. 이러한 난류의 특징은 난류모델을 통하여 수치해석에 반영된다.

다른 공학계산에서와 마찬가지로 실린더 유동계산에서도 $k-\epsilon$ 난류모델이 많이 사용된다. 이 모델은 난류의 전달과 시간에 따른 변화를 고려하므로 난류강도 등 난류특성을 계산할 수 있다. 표준 $k-\epsilon$ 모델은, 높은 Re수의 2차원 완전난류 유동에서는 상당히 정확한 해를 제공하지만 실린더 유동과 같이 복잡한 유동에는 적합하지 않다. 이러한 경우에는 벽면의 영향, 유선곡률의 영향 등을 고려한 수정된 $k-\epsilon$ 모델을 사용한다. 다른 난류모델로, 계산 mesh 안에서 정확히 나타낼 수 없는 아주 작은 난류유동만을 모델링한다는 기본개념하에서 시작된 subgrid scale(SGS) 모델이 있다. 이 모델은 필요한 모델링 수를 줄이고, large-scale 고유구조가 존재하는 유동에 적절하다는 장점이 있으나, 구체적 난류특성치를 계산할 수 없고 좋은 결과를 위해 미세한 mesh가 요구되는 단점도 있다. 본 연구에서는 다음과 같은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{1}{R}\nabla\cdot(R\rho k \underline{u}) = \frac{1}{R}\nabla\cdot(R\mu_t \nabla k) + P - \rho\epsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{1}{R}\nabla\cdot(R\rho\epsilon \underline{u}) = \frac{1}{R}\nabla\cdot(R\mu_t/\sigma_\epsilon \nabla_\epsilon) + (C_{\epsilon 1} P - C_{\epsilon 2}\rho\epsilon)\,\epsilon/k + C_{\epsilon 3}\rho\epsilon\nabla\cdot\underline{u}$$

여기서 P는 생성항이며 사용된 상수는 다음과 같다.

C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_{\epsilon 3}$	σ_ϵ
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

2.4 계산조건 및 경계조건

수치해석의 타당성을 입증하기 위하여 Morse 등의 실험결과[10]와 비교한다. 실험에 사용된 모델엔진은 직경 75mm의 투명실린더, 투명한 평면 실린더헤드, 실린더헤드에 대해 60° 경사진 축대칭 흡입구, 행정 60mm 이고 200rpm으로 단순조화 운동을 하는 피스톤으로 구성되었다. Fig.1에서 개략도를 보여준다. Morse 등은 laser doppler anemometer를 사용하여 크랭크각 36°, 90°, 144°와 270° ATDC일 때 실린더 내 여러 곳의 속도를 측정하였다. 이러한 엔진제원과 작동조건, 동적상사성(dynamic similarity)의 가정하에서 기관회전수 1,200rpm, 그리고 다음의 경계조건을

입력자료로 하여 ATDC 0°부터 90°까지 계산을 수행하였다. 동적상사성은 유동형태가 Mach수와 Re수에 무관하다는 가정이다. 실제로 Mach수는 흡입구 근처에서, Re수는 벽면 근처에서 유동에 영향을 미치나 대부분 영역에서는 동적상사성을 가정할 수 있다.[16]

흡입구에서는 피스톤 이동에 의한 부피의 변화와 같이 양이 균일하게 흡입되고, 난류에너지는 평균흡입속도에 근거한 운동에너지의 2%라고 가정하고, 벽근처에서는 1/7-law 의 난류벽법칙을 적용한다. 그리고 초기조건으로, TDC에서 모든 유체는 정지상태이고, 난류에너지는 평균피스톤 속도에 근거한 운동에너지의 18%[16]이고, 소산율은 다음 식으로 표현된다고 가정한다.

$$\epsilon = 0.4\, k^{3/2}/x_n$$

3. 결과 및 토론

실린더 유동에 대한 수치해석의 특징을 파악하기 위하여 Fig.1의 모델엔진을 사용하여 TDC부터 ATDC 90°까지 계산을 수행하였다. Fig.2와 Fig.3에서 SUDS과 격자수 40×40을 사용하여 계산한 유동장의 전반적 형태를 보여준다. 실린더 중심의 시계방향의 큰 vortex와 실린더 헤드와 벽 사이의 반시계 방향이 작은 vortex가 보인다. 흡입과정이 진행됨에 따라 피스톤과 실린더 벽 근처에서 반시계 방향의 3번째 vortex가 발생한다. 이러한

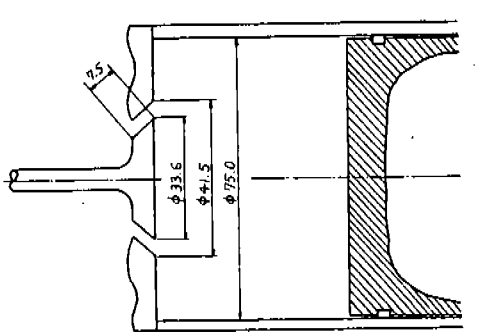
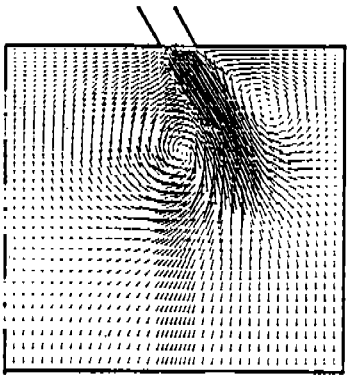
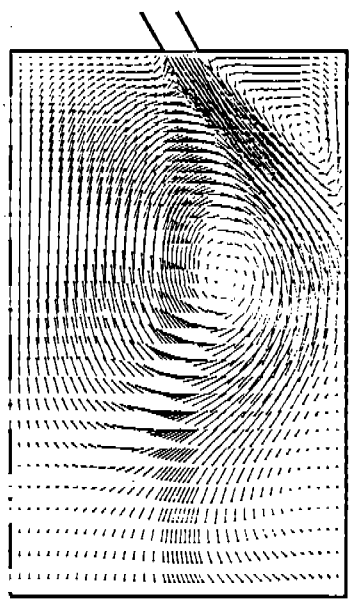


Fig.1 Schematic diagram of piston-cylinder assembly

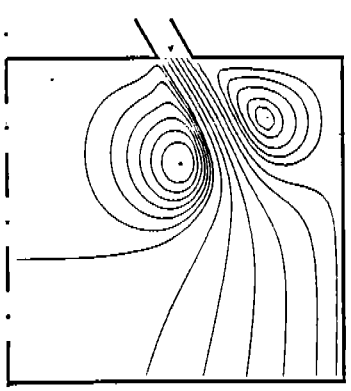


(a) 36° ATDC

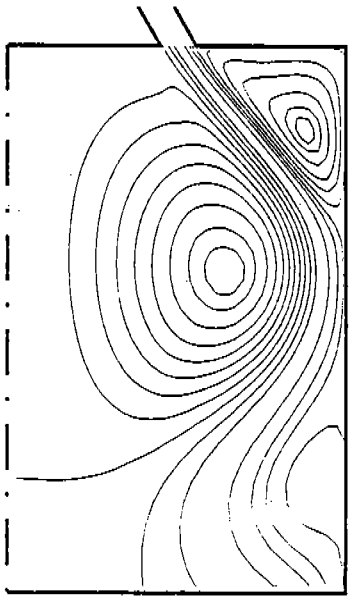


(b) 90° ATDC

Fig.2 Computed velocity vector plot



(a) 36° ATDC



(b) 90° ATDC

Fig.3 Stream line contours

계산결과들은 Mores 등[10]의 실험치와 비교적 잘 일치함으로 수치계산의 가능성을 보여준다.

수치해석에서 중요한 요소인 차분방법, 인위적 감쇠량, 계산 격자수가 결과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 각각 3가지의 다른 경우에 대하여 계산을 수행하고 Mores의 실험결과[10]와 비교하였다.

Fig.4에서 SUDS, IUDS, UDS의 차분방법을 사용한 축방향평균 평균속도 분포를 보여준다. 격자수는 40×40이며, 36° ATDC에서는 실린더 헤드로부터 10, 20, 30mm, 90° ATDC에서는 10, 20, 30, 40, 50mm 단면에서 나타내었다. SUDS의 경우는 실험치와 비교적 잘 일치하나 36° ATDC의 축간영역에서 큰 오차를 보인다. IUDS과 UDS의 경우는 비교할 수 없을 정도로 큰 오차를 보이고 있다. 이것은 IUDS나 UDS의 고유한 불안정성과 부정확성에 경사진 흡입구에 따른 기하학적 복잡성으로 인한 수치확산이 추가되어 더욱 악화되었다.

Fig.5에서는 SUDS과 격자수 40×40, 인위적 감쇠량이 0.050, 0.035, 0.020인 경우의 축

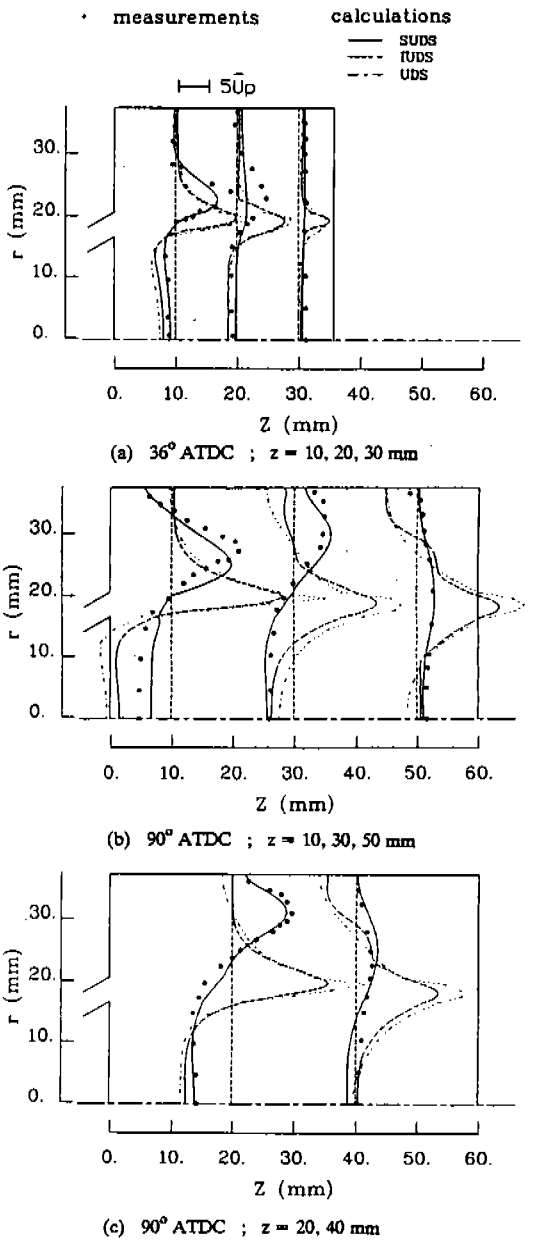


Fig.4 Mean axial velocity profiles with 3 different differencing schemes

방향 평균속도 분포를 보여준다. 감쇠량에 따라 유동장의 형태가 상당히 변한다. 감쇠량이 적어지면 3번째 vortex가 커진다. 이것은 SUDS 차분방법의 고유한 불안정성으로 인한 진동현상이다. 그러므로 이러한 불안정성을 억

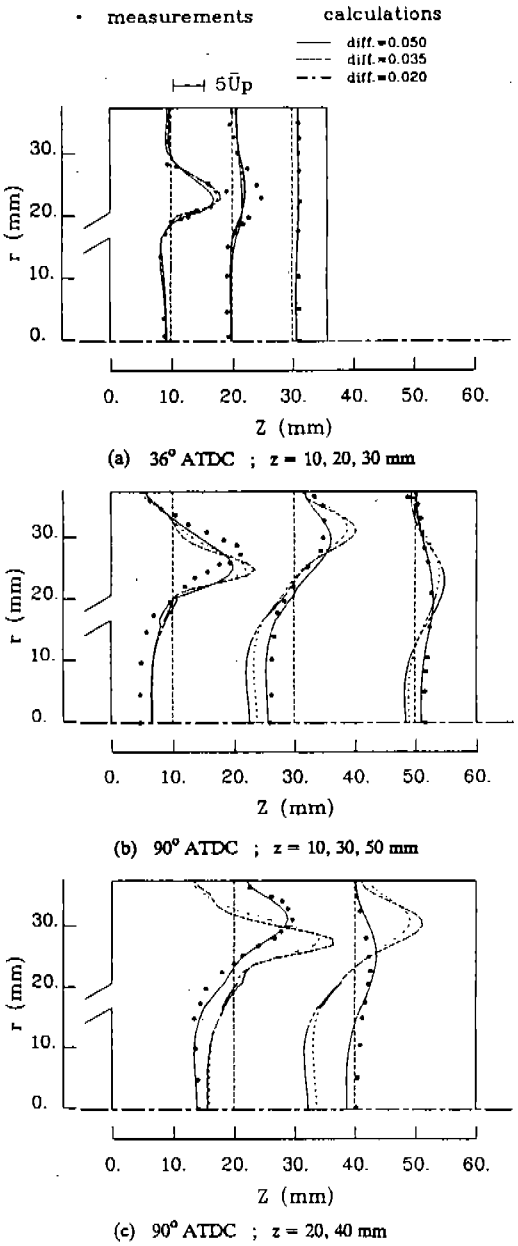


Fig.5 Mean axial velocity profiles with 3 different artificial dampings

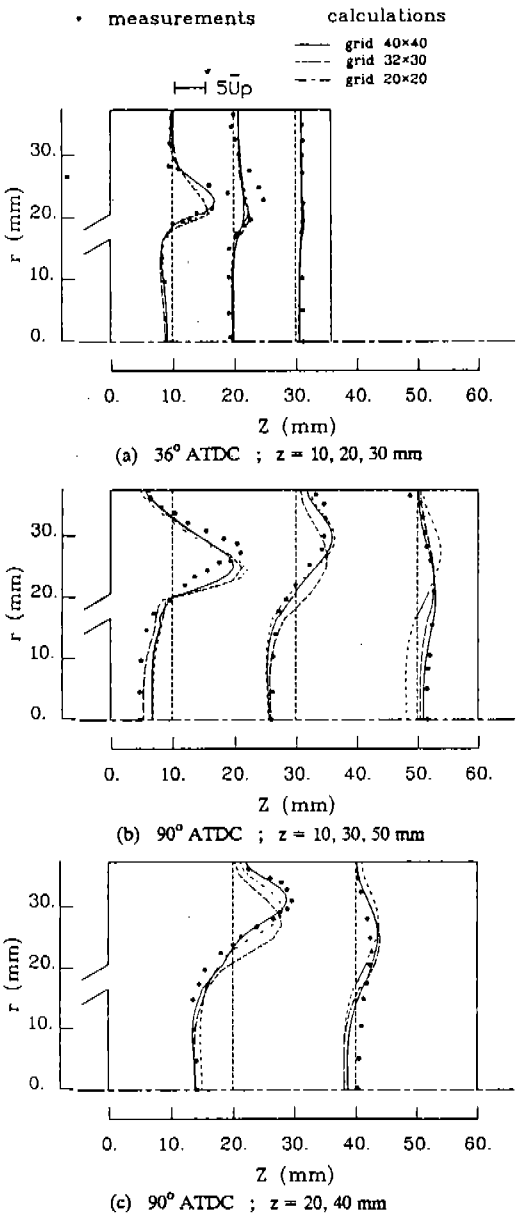


Fig.6 Mean axial velocity profiles with 3 different grids

제하기 위하여 적절한 인위적 감쇠량의 도입이 필요하다. 그러나 이러한 경우 정확도가 상실될 우려가 있으므로 그 양을 최소화 하여야 한다. 감쇠량이 0.050인 경우 전반적으로 실험치에 접근한다. 그러나 이때 3번째 vortex는 거의 보이지 않는다. 감쇠량이 0.035인 경우 피스톤헤드 근처의 3번째 vortex를 명확하게 보여준다. 36° ATDC의 중간영역에서의 오차는 여전히 크게 나타난다.

Fig.6은 SUDS와 확산량 0.050에 대하여 계산격자수가 각각 40×40, 32×30, 20×20

인 세 경우의 축방향 평균속도 분포를 보이고 있다. 전반적으로 격자수가 40×40인 경우에 실험치에 가장 근접하였다. 36° ATDC에서는 격자수의 영향이 거의 없으나, 90° ATDC에서는 상당히 크다. 계산영역이 좁을 때는 격자수 20×20도 충분하나 영역이 넓어짐에 따라 보다 많은 격자수가 필요함을 알 수 있다.

4. 결 론

기관 실린더의 흡입과정 유동에 대하여 ICED-ALE 방법을 사용한 다차원 수치해석을 수행하고 실험치와 비교함으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 계산결과가 실험치와 비교적 잘 일치함으로 수치해석의 가능성을 제시하였다.

(2) 3가지 차분방법을 상호 비교함으로 SUDS가 실린더 유동해석에 가장 적절함을 확인하였다.

(3) SUDS의 수치계산의 안정성을 위하여 0.050 정도의 인위적 감쇠량의 도입이 필요하다. 그러나 정확도를 높이기 위하여 그 양은 최소화하여야 한다.

(4) 계산영역이 넓어짐에 따라 계산격자수의 영향이 상당히 크며 경우에 따라 vortex의 유무에 관련된다. 그러므로 60×60 정도의 격자수를 필요로 하나 경제적인 면을 고려하면 40×40의 격자수가 적절한 것으로 생각된다.

(5) 인위적 감쇠량, 동적상사성 그리고 난류모델, 연소모델, 경계조건 및 초기조건에 대한 연구를 계속하면 압축·연소과정까지 포함한 정밀한 수치해석이 가능하다.

참 고 문 헌

1. John B. Heywood, "Fluid Motion within the Cylinder of Internal Combstion Engines - The 1986 Freeman Scholar Lecture," *ASME Journal of Fluids ENg.*, Vol.109, pp.3-35, 1987.
2. R. B. Rask, "Laser Doppler Anemometer Measurements of Mean Velocity and Turbulence in Internal Combustion Engines," *ICALEO '84 Conference Proceedings*, Vol.45 and 47, 1984.
3. T. D. Butler, L. D. Cloutman, J. K. Dukowicz, and J. D. Ramshaw, "Multidimensional Numerical Simulation of Reactive Flow in Internal Combustion Engines," *Progr. in Energy and Combust. Sci.*, Vol.7, pp.293-315, 1981.
4. J. N. Mattavi and C. A. Amann (eds.), Combustion Modeling in Reciprocating Engines, *Plenum Press*, New York, 1980.
5. A. D. Gosman, A. Melling, J. H. Whitelaw and A. P. Watkins, "Axisymmetric Flow in a Motored Reciprocating Engine," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol.192, pp.213, 1978.
6. A. A. Amsden, T. D. Cloutman, P. J. O'Rourke and J. D. Ramshaw, "KIVA-A Comprehensive Model for 2-D and 3-D Engine Simulations," *SAE Paper* No. 850544, 1985.
7. A. A. Amsden and C.W. Hirt,"YAQUI: An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computer Program for Fluid Flow at All Speed," *Los Alamos Scientific Laboratory report* LA-5100, March, 1973.
8. G. D. Raithby,"Skew Upstream Differencing Schemes for Problems Involving Fluid Flow," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.9, pp. 153-164, 2976.
9. B. E. Launder and D. B. Spalding, "The Numerical Computation of Turbulent Flows," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.3, pp. 269-289, 1974.
10. A. P. Morse, J. H. Whitelaw and M. Yianneskis, "Turbulent Flow Measurements

by Laser-Doppler Anemometry in Motored Piston-Cylinder Assemblers," *ASME Journal of Fluids Engineering,* Vol.101, pp. 208-216, 1979.

11. F. H. Harlaw and A. A. Amsden, "A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method for All Flow Speeds," *J. Comp. Phys.* Vol.11, p.348, 1973.
12. C. W. Hirt and A. A. Amsden," An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Flow Speed," J. Comput. Phys., Vol.14, p.227, 1974.
13. T. D. Butler, L. D. Cloutman, J. K. Dukowicz, and J. D. Ramshaw, "CONCHAS: An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computer Code for Multicomponent Chemically Reactive Fluid flow at All Speeds," *Los Alamos Scientific Laboratory report* LA-8129-MS, 1979.
14. B. P. Leonard, "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* Vol.19, p.59, 1979.
15. Leschziner, M. A., and Rodi, W., "Calculations of Annular and Twin Parallel Jets Using Various Discretization Schemes and Turbulence Model Variations," *ASME Journal of Fluids Eng.,* Vol.103, p.352, 1981.
16. S. H. El-Tahry," A Comparison of Three Turbulence Models in Engine-like Geometry," Proc. Int. Sympo. on Diagnostics and Modeling of Combustion in Reciprocating Engines, Sep. 1985.