

범용 열/유체 유동해석 프로그램 NUFLEX의 개발

허남건,¹ 원찬식,² 유홍선,³ 손기현,² 김사량⁴

DEVELOPMENT OF GENERAL PURPOSE THERMO/FLUID FLOW ANALYSIS PROGRAM NUFLEX

Nahmkeon Hur,¹ Chan-Shik Won,² Hong-Sun Ryou,³ Gihun Son² and Sa Ryang Kim⁴

A general purpose program NUFLEX for the analysis 3-D thermo/fluid flow and pre/post processor in complex geometry has been developed, which consists of a flow solver based on FVM and GUI based pre/post processor. The solver employs a general non-orthogonal grid system with structured grid and solves laminar and turbulent flows with standard/RNG $k-\epsilon$ turbulence model. In addition, NUFLEX is incorporated with various physical models, such as interfacial tracking, cavitation, MHD, melting/solidification and spray models. For the purpose of evaluation of the program and testing the applicability, many actual problems are solved and compared with the available data. Comparison of the results with that by STAR-CD or FLUENT program has been also made for the same flow configuration and grid structure to test the validity of NUFLEX.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 유한체적법(FVM), 범용프로그램(General Purpose Program), 일반비직교좌표계(General Non-Orthogonal Coordinate System), 구조격자계(Structured Grid), 전/후처리장치(Pre/Post Processor)

1. 서 론

실제 산업 현장에서 컴퓨터를 이용한 설계 및 제품의 성능 해석 등은 일반화되고 있는 추세이다. 특히 이론적 방법 및 실험에 의한 연구가 주를 이루던 열 및 물질 전달과 관련된 유동 해석에 있어서 전산유체역학의 역할은 나날이 증가하고 있으며, 이제 설계상의 하나의 루틴으로 인식되고 있다. 이러한 전산유체역학에 의한 열/유동 해석은 많은 분야에 적용/응용 되고 있으며, 이를 위한 해석 프로그램 개발 연구[1-3]도 국내/외적으로 활발히 진행되고 있다. 그러나 국내의 경우 특정한 문제에 적용되는 프로그램을 개발하거나 또는 기존의 것을 변경, 개선하여 사용하고 있다. 또한 많은 사용료를 지불하는 STAR-CD, FLUENT, CFD-ACE, CFX 등의 외국 상용 프로그램을 사용하고 있으며, 그 활용도 및 의존도가 커지고

있다.

이와 같이 범용성을 갖춘 유동해석 프로그램의 수요가 증가하고 있으나 이에 부응하는 상용프로그램의 국내 개발은 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 범용성을 갖는 프로그램 개발의 중요성을 인식하고, 대부분의 상용 프로그램에서 채택하고 있는 것과 같은 골격을 갖는 프로그램을 개발하였다. 특히 본 연구의 경우 2001년 12월부터 과학기술부 특정연구개발과제 공학용 해석 소프트웨어 기술개발사업의 일환으로 시작되었으며 다년간에 걸친 연구 개발을 통하여 다양한 물리적인 현상을 다룰 수 있는 범용 프로그램을 개발하였다.

2. 유동해석 프로그램

2.1 프로그램의 특징

본 연구에서는 다음과 같은 특징을 갖는 프로그램을 개발하였다. 즉, 복잡한 형상에서의 유동 현상을 해석하기 위하여 일반비직교좌표계를 사용하였으며 유한체적법에 근간을 둔 비엇물림격자계를 사용하였고 직교좌표 속도성분을 종속변수로 하였다. 또한 본 프로그램에서는 층류 및 난류 유동해석이

접수일: 2007년 3월 17일, 심사완료일: 2007년 6월 22일.

- 1 종신회원, 서강대학교 기계공학과
- 2 정회원, 서강대학교 기계공학과
- 3 정회원, 중앙대학교 기계공학과
- 4 종신회원, 강릉대학교 정밀기계공학과

* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

가능하며 장애물이 있는 유동장의 해석이 가능하다. 이러한 본 프로그램의 특징을 현재 많은 산업 분야에서 널리 사용되고 있는 상용 프로그램 STAR-CD와 비교하여 Table 1에 나타내었다.

2.2 지배방정식

본 유동해석 프로그램에 사용된 지배방정식은 질량, 운동량, 스칼라량 보존방정식이며, 직교좌표계와 일반좌표계와의 좌표변환 cofactor를 사용하여 다음과 같이 표시할 수 있다. 아래 수식에서 비정상항은 생략하였다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} (\rho u_m \beta^{mj}) = s_m \tag{1}$$

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [(\rho u_m u_i - T_{mi}) \beta^{mj}] = s_i^u \tag{2}$$

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [(\rho u_m \phi - q_m) \beta^{mj}] = s_\phi \tag{3}$$

난류유동을 해석하기 위하여 식 (2)의 응력 텐서를 표현하는 점성계수를 유효점성계수로 처리하였다. 이 경우 유효점성계수를 구하는 방법에 따라 여러 가지 난류 모델이 존재한다. NUFLEX에는 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 표준/RNG k-ε 2방정식 난류 모델을 적용하였다.

Table 1 Comparison between commercial CFD code (STAR-CD) and NUFLEX

	STAR-CD	NUFLEX (to be upgraded)
Coordinate	3-D General, Non-Orthogonal	3-D General, Non-Orthogonal
Mesh	Unstructured	Structured (Block-Structured)
Physics Model	Steady, (Pseudo-)Transient	Steady, Transient
	Incompressible, Compressible Flow	Incompressible Flow
	Free Surface, VOF only	Free Surface, VOF, LS, CLSVOF
	Two-Phase Flow	Two-Phase Flow
	N/A	Melting/Solidification, MHD, Spray
Turbulent Model	k-ε/High, Low Reynolds, RNG, Chen, Cubic, Quadratic k-L, LES/ Smagorinsky, KL Model	k-ε/ Standard, k-ε/RNG (More Turbulence Model)
	Cavitation	Cavitation
Boundary Condition	Inlet, Outlet, Wall, Symmetry, Pressure, Cyclic, Stagnation, Baffle, Attach	Inlet, Outlet, Wall, Symmetry, Pressure, Cyclic (Attach)
Pre/Post Processor	Command & GUI Based	CAD Interface, Command & GUI Based

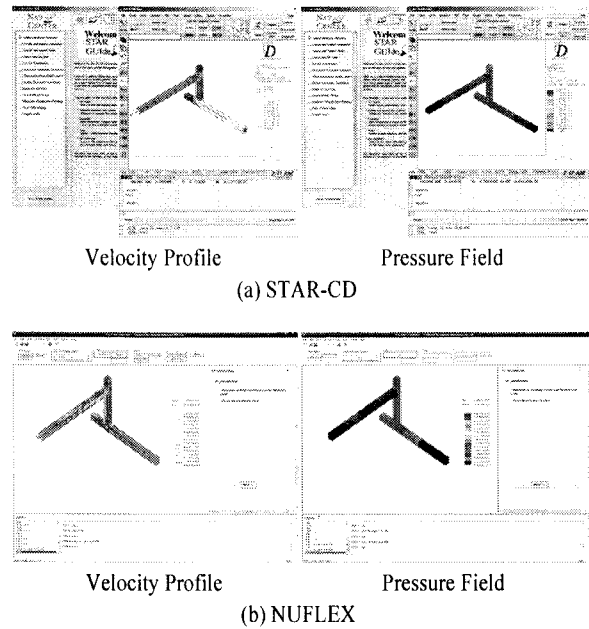


Fig. 1 Comparison between the flow analysis results of NUFLEX and STAR-CD

2.3 계산 알고리즘 및 경계조건 처리

위의 지배방정식을 유한체적법(FVM, Finite Volume Method)을 이용하여 이산화하였으며, 주요기법은 Peric[3]의 방법을 택하였다. 미소체적의 임의의 한 면을 통과하는 확산항은 수직 및 교차 확산 성분으로 나타내고, 압력항은 생성항으로 처리된다. 대류항 이산화시 검사면 값의 선택은 여러 가지 방법이 개발되어 사용되고 있으나 NUFLEX에는 현재 가장 널리 쓰이고 있는 상류차분법(Upwind Differencing Scheme)을 적용하였다. 상류차분법은 오류확산(False Diffusion)의 문제는 있으나 수치해의 안정성이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 압력장을 풀기 위해서는 연속방정식으로부터 압력을 계산할 수 있는 방정식을 유도하여 속도와 압력을 서로 연관시켜 계산하는 알고리즘이 필요하며, 본 연구에서는 그 형태가 간단하고 가장 많이 사용되는 SIMPLE 알고리즘[4]을 사용하였다. 또한, 비엇물림격자 사용시 발생하는 압력의 decoupling 방지를 위하여 운동량 보간을 사용하였다. 이산화 방정식의 최종적인 해를 구하기 위한 해법으로 속도 및 스칼라량의 계산에는 SIP(Strongly Implicit Procedure)[5]를, 압력에는 CGM (Conjugate Gradient Method)[6]을 사용하였다.

경계밀착 좌표계를 사용하는 본 프로그램은 경계조건으로 입구, 출구, 대칭면, 주기, 벽면 및 압력 조건이 가능하도록 개발되었다. 또한 이러한 경계 조건들은 경계면 임의의 위치에 부여될 수 있게 하였다.

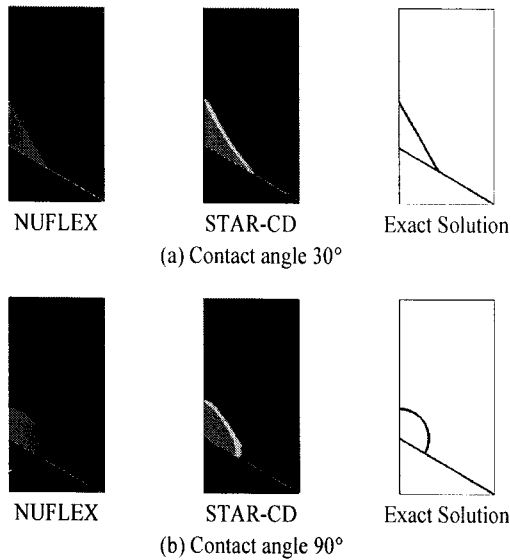


Fig. 2 Comparison of interfacial tracking results between NUFLEX and STAR-CD

3. 물리적 해석 모델 및 프로그램 검증

3.1 일반유동장

본 유동해석 프로그램 NUFLEX는 범용 유동해석 프로그램으로서의 면모를 갖추고 있으며 다양한 유동 현상에 대하여 구조격자계를 이용한 유동해석이 가능하다. Fig. 1에는 NUFLEX를 이용한 분기관 유동 해석 결과를 STAR-CD와 비교하였다. NUFLEX를 이용한 속도, 압력 등의 해석 결과는 STAR-CD의 결과와 동일하게 예측되었으며 그 해석 결과 후처리는 본 프로그램을 이용하여 손쉽게 나타내었다. 그러나 아직 GUI 보다 명령어 기반으로 이루어진 후처리 장치는 사용자의 편의에 있어서 기존 상용프로그램과 같이 원활하지 않지만 현재 지속적인 개발을 통해 그 편의성 증진이 이루어지고 있다. 또한 본 프로그램은 사용자의 요구사항이 적극적이고 신속하게 반영될 수 있는 장점을 지니고 있다. 즉 전처리나 후처리 사용시 사용자가 특정기능에 대한 필요사항이 발생하면 이를 바로 NUFLEX 전후처리장치에 적용이 가능하다. 아울러 경계면 추적, 캐비테이션, 전자기장, 용해/응고, 분무 등 다양한 물리적 해석 모듈을 가지고 있으며 이는 다음에 이어지는 절부터 설명하였다.

3.2 경계면 추적(Interfacial Tracking)

본 프로그램에는 경계면 추적(2상 유동) 해석을 위하여 수정된 Level Set 방법[7]을 사용하고 있다. 2상 유동에서 상경계면은 기상(Gas Phase)과 액상(Liquid Phase)의 거리함수로 정

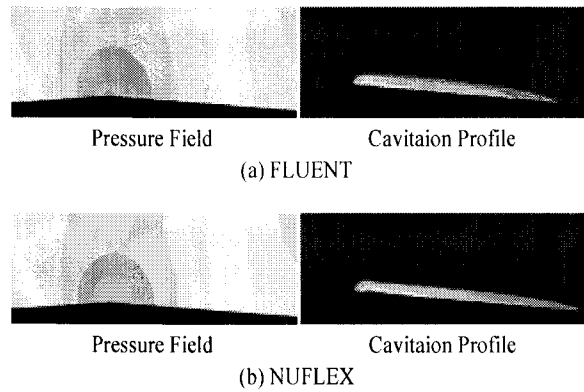


Fig. 3 Comparison of cavitation results between NUFLEX and FLUENT

의된 LS 함수(ϕ)에 의해 계산된다. 이때 기상은 음의 값으로 액상은 양의 값으로 정의된다. 프로그램에 적용된 LS 함수는 비압축성 유동일 때 다음과 같은 방정식을 통하여 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} \phi = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = S_t (1 - |\nabla \phi|) \tag{5}$$

$$S_t = \phi_0 / \sqrt{\phi_0^2 + \Delta_m^2} \tag{6}$$

Fig. 2는 30° 경사진 중력을 고려하지 않은 경우의 액적 거동 해석을 나타내었다. 이 경우 액적 거동은 표면적을 최소화 하는 방향으로 진행된다. 그림에서도 볼 수 있듯이 기존의 상용프로그램이 대부분 각 상의 체적이 잘 보존되는 장점 때문에 많은 연구에서 VOF(Volume of Fraction)를 사용하고 있으나, 미분 함수가 불연속인 VOF 함수로는 상경계면의 곡률을 정확하게 계산하기 어려운 단점이 있다. 본 프로그램에서는 이를 보완한 알고리즘을 적용함으로써 보다 정확한 해석 결과를 예측한다.

3.3 캐비테이션(Cavitation)

유체기계 및 다양한 분야에서 캐비테이션은 시스템의 성능 및 수명 등에 큰 영향을 미치는 중요한 물리적 현상이며 이에 대한 정확한 해석이 요구되고 있다. 따라서 본 프로그램에서도 캐비테이션 모델을 도입하였으며 이에 대한 다양한 해석을 통하여 모듈의 정확성 및 안정성을 검증하였다. 캐비테이션 모델은 Ashok 등[8]이 제안한 Full Cavitation 모델을 사

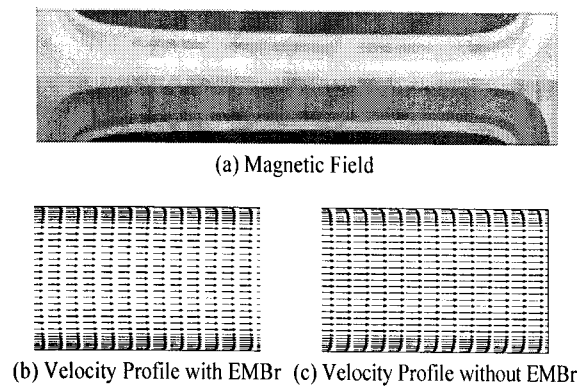


Fig. 4 Results of the MHD flow

용하였으며 액상의 체적비 H 를 계산하기 아래의 식을 추가하였다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla H = S \tag{7}$$

여기서 S 는 Full Cavitation 모델인 경우,

$$S = \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \sqrt{\frac{2}{3} \frac{1}{\rho_l} \frac{1}{|P_v - P|}} [C_c(p - p_v)^- H + C_c(p - p_v)^+(1 - H)] \tag{8}$$

이고, V_{ch} 는 국소난류속도 변화량, $C_c(0.004)$ 와 $C_c(0.01)$ 는 각각 증발과 응축 계수이다.

NUFLEX의 캐비테이션 모델을 검증하기 위하여 수축, 확장 채널에서 발생하는 비정상 상태의 캐비테이션 현상을 해석하여 상용해석프로그램인 FLUENT와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 이 경우 NUFLEX, FLUENT가 각각 증기 생성량 (Vapor Fraction)은 2.03×10^{-2} , 2.31×10^{-2} , 증기 체적(Vapor Volume)은 $7.44 \times 10^{-7} \text{ m}^3$, $8.09 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ 으로 두 결과 값이 대체로 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 물론 증기 생성량은 상용 프로그램보다 다소 많지만 증기 생성 위치 및 형상 등 전체적으로 비슷한 경향을 보여준다.

3.4 전자기장(MHD)

전자기 유동은 그동안 상용프로그램에서는 많이 다루어지지 않았으나 실제적인 산업현장에서는 폭넓게 사용되고 있다. 특히 연속주조공정의 경우 전자기장은 유동에 아주 중요한 영향을 미친다. 이러한 전자기장의 효과를 해석하기 위하여 로렌즈 힘을 생성함에 추가하고 이를 무한 덕트 내에 국부적

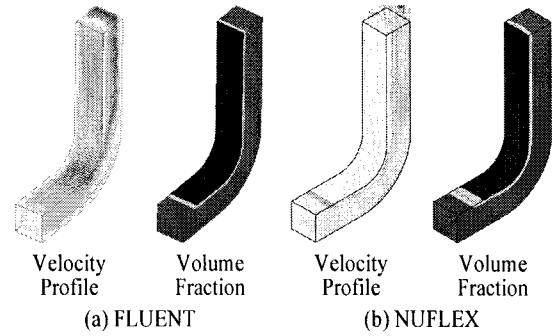


Fig. 5 Comparison of solidification results between NUFLEX and FLUENT

으로 작용하는 자기장을 고려하여 검증하였다. 로렌즈 힘은 다음과 같은 관계식에 의해 계산되고 운동량 방정식의 생성항으로 처리하였다.

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \tag{9}$$

여기서 \vec{J} 는 전류밀도 벡터, \vec{B} 는 자기장 벡터이다. 따라서 주어진 자기장에 대하여 전류밀도를 알면 로렌즈 힘을 계산할 수 있게 된다. 전류밀도는 다음과 같은 Maxwell 방정식을 사용한다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \tag{10}$$

$$\vec{J} = \sigma_{el}(\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B}) \tag{11}$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \tag{12}$$

Fig. 4는 직선관에서 자기장의 유무에 따른 해석 결과를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 자기장이 작용하는 경우 일반적인 유동 프로파일(Fig. 4(c))과 다르게 'M'자형 유동의 특성(Fig. 4(b))을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이는 로렌즈 힘이 NUFLEX에서 적절히 작용하고 있음을 나타낸다.

3.5 용해/응고(Melting/Solidification)

NUFLEX는 상변화 해석을 위하여 Voller[9]등이 제안한 엔탈피 방법(Enthalpy Method)을 적용하였다. 엔탈피 방법은 이동 상경계에서 열 및 질량 조건들이 적절한 생성항의 정의에 의해 지배방정식에 적용된다. 따라서 액체와 고체에 모두 같은 지배방정식을 적용할 수 있고, 정확한 상경계의 위치를 알 필요성이 없다. 또한, 격자를 재 생성할 필요가 없어서 계산이 용이하기 때문에 응고 및 용해의 상변화 해석시 가장 많

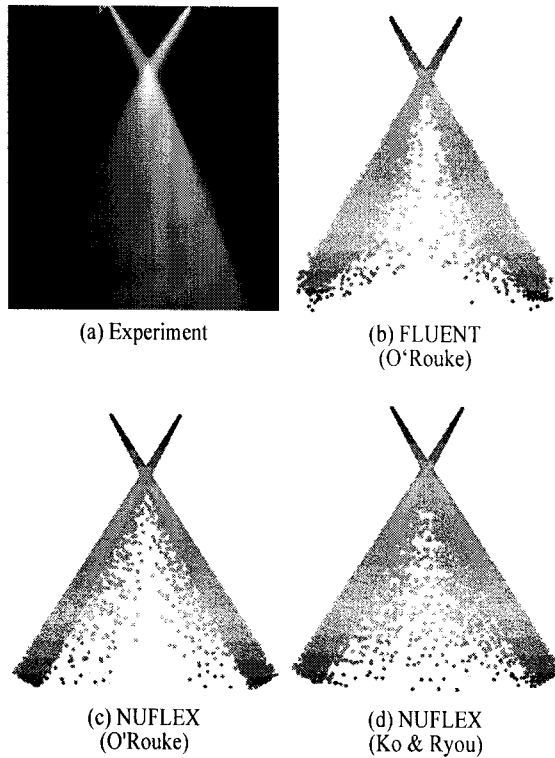


Fig. 6 Validation of spray collision models

이 사용되는 방법이다. 본 프로그램에서는 이를 확장하여 3차원, 비직교좌표계에서 혼합물의 응고/융해 문제를 해석할 수 있도록 하였다. 지배방정식중 에너지방정식 생성항에 총엔탈피를 현열($h = c_p T$)과 잠열(ΔH)로 나누어서 나타내었다.

Fig. 5는 이에 대한 해석 결과를 FLUENT 결과와 비교하여 나타내었다. NUFLEX를 이용한 해석을 통해 상용 프로그램 결과와 유사한 해석 결과를 보여주었다.

3.6 분무(Spray)

분무 유동의 경우 액적간의 충돌에 의한 현상을 적절히 묘사할 수 있어야 하며 STAR-CD나 FLUENT 등 상용프로그램에서는 O'Rourke 모델[10]을 적용하여 계산을 수행한다. 그러나 이 모델의 경우 위성 액적을 고려하지 않는 등 몇 가지의 한계성을 가지고 있음이 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 O'Rourke 모델에 대한 검증을 수행하고 이를 보완하고자 Ko & Ryou 모델[11]을 도입하였다. Ko & Ryou 모델에서는 충돌 조건에 관련된 새로운 기준식을 제시하고 충돌 전후의 질량, 운동량 및 에너지 보존식을 근거로 한 새로운 액적 충돌 모델을 제안하였다. 제안된 모델에서 위성액적의 특성을 정의하기 위해서는 스트레칭 분리과정을 통해 충돌액적으로

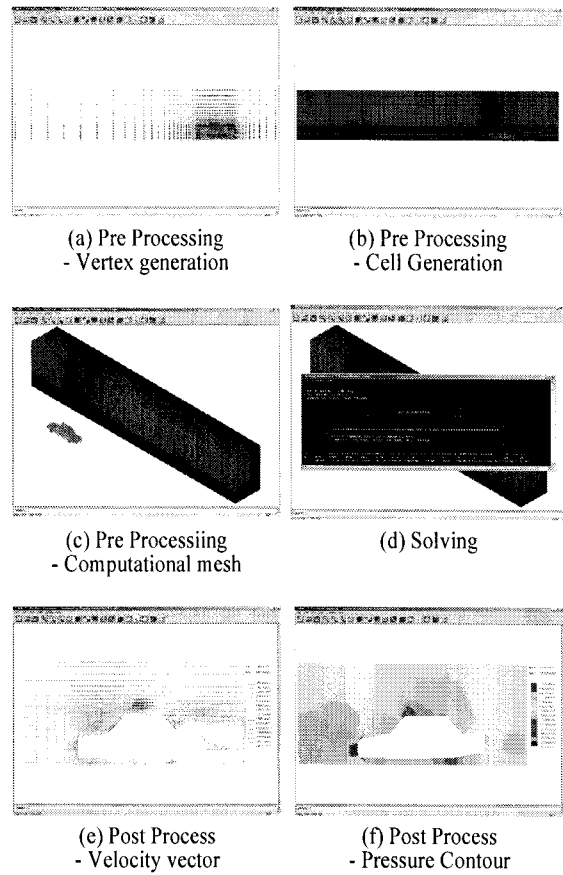


Fig. 7 Sequential processing of NUFLEX

부터 분리되는 질량(또는 체적)을 결정하는 것이 필요하다. 이러한 위성액적의 특성을 고려한 위성 액적의 직경 및 속도, 위성액적 수는 다음과 같다.

$$d_{sa} = \left[\frac{C_V(\phi_1 \Delta^3 + \phi_2)}{N} \right]^{1/3} d_2 \quad (13)$$

$$u_{sa} = \frac{\Delta^3(\phi_1 - \phi_2)}{(1 + \Delta^3)(\Delta^3 \phi_1 + \phi_2)} u \quad (14)$$

$$N = \left[\frac{N \cdot ES_{sa}}{\sigma \pi C_V^{2/3} (\Delta^3 \phi_1 + \phi_2)^{2/3} d_2^2} \right]^3 \quad (15)$$

Fig. 6에는 이에 대한 결과를 나타내었다. 새로 제안된 모델은 기존 모델에 비하여 보다 실험에 근사한 해석 결과를 나타내었다. 위성 액적을 고려하지 않는 O'Rourke 모델의 오차

가 Ko & Ryou 모델에 비해 상대적으로 매우 크게 나타나며, 이는 분사압력이 높은 고 We 수 영역에서 더 큰 차이를 보인다. We 수와 분사압력이 높을수록, 충돌에 의한 위성액적 수의 증가로 인해 액적의 평균직경과 SMD(Sauter Mean Diameter)가 작아지게 되기 때문이다.

4. 전/후처리 장치

범용 유동해석 프로그램의 개발에 있어서 해석 알고리즘의 개발과 함께 전/후처리 장치의 개발 또한 매우 중요하다. 컴퓨팅 환경의 발달과 함께 계산 격자 생성 및 계산 조건 설정을 위한 전처리 작업과 계산 결과 확인을 위한 후처리 작업의 구체적, 가시적인 표현, 효율성이 범용 유동해석 프로그램에서는 요구되어지기 때문이다. 이러한 점을 고려하여 본 해석 프로그램의 개발과 동시에 다양한 기능을 갖는 전/후처리 장치의 개발을 수행하고 있으며 현재 보다 나은 사용자 환경을 구성하기 위하여 지속적으로 연구를 진행하고 있다. Fig. 7에는 NUFLEX 전후처리 장치를 이용한 계산 격자 생성의 예(Mira 모델)가 나타내었다. 그리고 프로그램 해석의 일련 과정(전처리, 해석, 후처리)들을 함께 나타내었다.

5. 결 론

일반비직교격자계를 사용하여 복잡한 형상 모델의 3차원 난류유동을 해석할 수 있는 범용 유동해석 프로그램 NUFLEX를 개발하였다. 본 프로그램은 일반적인 유동장 해석 문제뿐만 아니라 경계면추적, 캐비테이션, 전자기장, 용해/응고 그리고 분무 유동 등을 해석할 수 있는 다양한 물리적 모델들을 가지고 있다. 아울러 독자적인 전/후처리 장치를 개발하여 해석 프로그램의 사용의 효율성 및 편의성을 도모하였다. 현재는 구조격자계 기반의 프로그램으로 통합되어 활용되고 있지만 향후 계획되어 있는 연구가 진행됨에 따라 일반 상용프로그램에 준하는 국내 독자적인 프로그램의 개발이 기대된다.

참고문헌

- [1] 이재현, 강신형, 이준식, 1992, "일반좌표계용 전산 열·유체 해법," *터보·동력기계 연구센터*.
- [2] 허남건, 조원국, 윤성영, 김광호, 1994, "일반비직교좌표계를 사용하는 3차원 범용 유동해석 프로그램의 개발," *대한기계학회논문집*, 제18권, 제12호, pp.3345-3356.
- [3] Peric M., 1985, "A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts," Ph.D Thesis, *Imperial College*.
- [4] Patankar, S.V. and Spalding D.B., 1972, "A Calculation Procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows," *Int.J. Heat Mass Transfer*, Vol.15, p.1787.
- [5] Stone, h.L., 1968, "Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations," *SIAM J. Numer. Anal.*, Vol.5, No.3, pp.530-558.
- [6] Kershaw, D.S., 1978, "The Incomplete Cholesky-Conjugate Gradient Method for the Iterative Solution of Systems of Linear Equations," *J. Comp. Physics*, Vol.26, pp.43-65.
- [7] Sussman, M., Fatemi, E., Smereka, P., and Osher, S., 1998, "An Improved Level Set Method for Incompressible Two-Phase Flows," *Comput. Fluids*, Vol.27, pp.663-680.
- [8] Ashok, k. Singhal, Mahesh, M. Athavale, Huiying, Li and Yu, Jiang, 2002, "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol.124, pp.617-624.
- [9] Voller, V.R. and Prakash, C., 1987, "A fixed grid numerical modeling methodology for convection/diffusion mushy region phase change problems," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.30, pp.1709-1719.
- [10] Peter J. O'Rourke, 1981, "Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays," Ph.D. Thesis, *Mechanical and Aerospace Engineering, Priston University, USA*.
- [11] Ko, G.H., Lee, S.H., Ryou, H.S. and Choi, Y.K., 2003, "Development and Assessment of a Hybrid Droplet Collision Model for Two Impinging Sprays," *Atomization and spray*, Vol.13, pp.251-272.