

Meshless CFD S/W를 이용한 터보기계 CFD 해석 응용

원영수*

1. 서론

수치해석을 통해 터보기계가 작동하는 유동장 해석과 이를 통한 터보기계 성능해석을 위한 연구는 컴퓨터의 발달과 함께 많은 연구가 진행되어 오고 있다.

전통적인 방식의 수치해석 기법들은 주로 유한요소법 (FEM, finite element method)이나 유한체적법 (FVM, finite volume method) 등을 이용하여 유동장을 지배하는 비선형 편미분 방정식으로 구성된 Navier-Stokes 방정식을 경계조건을 만족하도록 대수행렬을 계산함으로써 유동장 내 터보기계의 유동 특성 등을 계산하는 방식이다. 따라서 기존의 방법으로 터보기계의 공력 특성 등에 대한 정밀한 계산 결과를 얻기 위해서는 터보기계와 이를 둘러싼 유동장의 격자 (mesh)를 얼마나 조밀하고 효율적으로 구성하는가에 달려있다고 해도 과언이 아닐 정도다.

조밀한 격자를 만드는 것은 계산 결과의 정밀도와 직접적인 연관이 있으며, 효율적으로 격자를 만드는 것은 계산결과의 정밀도를 유지하면서도 계산 시간을 단축하는 것과 밀접한 연관이 있게 되므로, 대부분의 CFD 해석 공학자들은 조밀하면서도 효율적인 격자를 제작하기 위해 많은 시간을 투자하고 있는 것이 현실이다.

1950대 이후부터 격자를 제작하지 않고 유동 수치계산을 하기 위한 많은 시도들이 이어져 왔다.¹

- ▶ Molecular Dynamics (MD)
- ▶ Monte Carlo (MC)
- ▶ Direct Simulation by Monte Carlo
- ▶ Lattice Boltzmann Method (LBM)
- ▶ Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)
- ▶ Vortex Method
- ▶ Element-Free Galerkin Method (EFGM)

상기의 규정들은 meshfree 기법으로 유동장 해석을 위해 연구된 방법들로 오랫동안에 걸쳐 많은 연구가 수행되어져 왔으며 연구주제별 연대순으로 정리하면 아래 Table 1과 같다.²⁾

Table 1 Some typical meshfree methods in chronological order

Methods	References	approximation
Smoothed panicle hydrodynamics (SPH)	Lucy, 1977; Gingold and Monaghan, 1977, etc.	Integral representation
Finite point method	Liszka and Orkisz, 1980; Onate et al., 1996, etc.	Finite difference representation
Diffuse element method (DEM)	Nayroles et al., 1992	Moving least square (MLS) approximation Galerkin method
Element free Galerkin (EFG) method	Belytschko et al., 1994, 1996; 1998; etc.	MLS approximation Galerkin method
Reproduced kernel particle method (RKPM)	Liu et al, 1995;1996,etc.	Integral representation Galerkin method
HP-cloud method	Duarte and Oden, 1996 etc.	MLS approximation, Partition of unity.
Free mesh method	Yagawa and amada 1996; 1998, etc.	Galerkin method
Meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) method	Atluri and Zhu, 1998; 1999; Atluri and Shen, 2002; etc.	MLS approximation Petrov-Galerkin method
Point interpolation method (PIM)	Liu and Gu, 1999; 2001, ad: Gu and Liu. 2001a,c; Liu, 2002; Wang and Liu, 2000; 2001; 2002	Point interpolation, (Radial and Polynomial basis), Galerkin method. Petrov-Galerkin method
Meshfree weak-strong form (MWS)	Liu and Gu, 2002; 2003c; 2003; etc.	MLS, PIM, radial PIM (RPIM), Collocation plus Petrov-Galerkin

* (주) 델타이에스
E-mail : young@deltaes.co.kr

위에서 언급한 방법들을 실제 적용하는데 있어 각각의 기법들이 지닌 장점을 충분히 활용하고자 meshfree 기법들은 meshfree + meshfree 또는 meshfree + 전통적인 수치해석 기법들과 함께 연동 (coupling)되어 빠른 시간 내 정밀한 유동장 수치계산을 하기 위한 시도가 있었다. 예를 들어 SPH 는 FEM과 연동되고 (Attaway et al., 1994; Jonson, 1994; Century Dynamics (현 ANSYS Autodyn), Rotterdamse Weg 183C, 2629HD, ESI Group 2006)³⁾, EFG는 BEM과 연동되어 (Gu and Liu, 2001b; Liu and Gu, 2000b) 계산을 수행하는 연구가 활발히 전개되어 왔었다.

본 특집에서는 유동의 지배방정식으로 볼츠만 (Boltzmann) 방정식 - 입자의 분포가 확률적으로 표현되고, 통계역학 특히 입자간의 운동학 이론 (kinetic theory)를 통하여 압력, 속도, 밀도와 같은 거시적 물리량과 입자의 분포함수가 연관되어 입자의 흐름 (streaming)과 충돌 (collision) 향으로 표현하여 유동 해석 시 격자를 만들지 않고 해석을 수행할 수 있는 기법 - 과 SPH (smooth particle hydrodynamics) 입자해석 기법을 연동하여 개발된 meshless CFD 해석 프로그램인 XFLOW를 이용하여 터보기계 성능해석을 수행하고, 전통적인 CFD 해석 S/W를 사용한 결과와 비교한 연구 사례를 소개하고자 한다.

2. 입자해석 기법

meshfree를 표방하는 입자해석 기법의 대표적인 S/W로는 미 MIT 공대 출신들로 구성되어 개발된 격자볼츠만방법(LBM, lattice Boltzmann method)을 사용하는 상용 CFD S/W인 미 EXA의 PowerFlow를 들 수 있다. 이 제품은 LBM 기법을 이용하여 15년 전부터 수많은 엔지니어링 컨설팅과 기술용역 등의 과정을 거쳐 상용화 되었으며, 현재는 자동차 분야의 업체 및 연구소에서 많이 사용되고 있다.

LBM 기법은 역사적으로 LGA (lattice gas automata)로부터 발전되었으며, 볼츠만 방정식에서 직접 격자볼츠만 방정식 (LBE)이 유도됨으로써 이론적인 바탕이 세워지게 되었다고 한다.⁶⁾ 여기에 입자들간의 충돌항을 선형충돌 모형인 BGK (Bhatnagar-Gross-Krook) 근사로 대체하고, Chapman-Enskog 가정을 적용하여 이산화 방정식을 구현후, 수치계산을 수행하는 방법이다. 즉, LBM은 기존의 연속체 개념을 사용하지 않고 분자 운동론을 따르는 가상의 입자를 이용하여 유동을 해석하는 방법으로 선형적인 형태로 이루어진 방정식을 계산하기 때문에 기존의 전통적인 방법에 비해 알고리즘 측면에서 간단하다고 할 수 있다. 또한 LBM은 유체 유동을 격자점에서 계산하므로, 병렬화가 가능하고 병렬화 시 CPU 증가에 따른 속도증

가의 선형성이 매우 뛰어난 것으로 알려져 있다.⁴⁾

SPH 기법은 1970년대 천체물리학자들에 의해 주로 사용되어 오다가 실제 현상에 대한 모델링 기술 발전과 함께 고체해석, 구조해석 및 유체해석 등의 분야에 사용되고 있다.⁵⁾

meshless CFD 해석 S/W인 XFLOW는 LBM과 SPH의 연동 해석 솔버를 채택하여 CFD 해석 수렴성이 뛰어나고, 계산속도가 빠르다는 장점이 있다, 무엇보다 기존의 LBM 기법을 이용한 솔버가 슈퍼컴퓨터나 고성능 컴퓨터 (HPC, high performance computer) 등 에서만 작동하는데 반해 XFLOW는 데스크 PC 및 PC급 워크스테이션에서도 계산을 수행할 수 있다는 이점이 있다.

입자해석 기법과 관련된 LBM과 SPH 등의 방정식에 대한 소개는 이미 오래전부터 연구되어 발표된 문헌들이 많이 있으므로, 관심있는 분들께서는 참고문헌의 자료를 참조하시면 좋을 것이라 생각하여, 본고에서는 지면상의 이유를 들어 생략한다.

그림 1은 수치해석 기법 중 FEM, FVM, ALE, SPH 등을 사용한 해석결과를 나타낸다. 해석 결과의 경향에 대해서는 서로 비슷한 경향을 나타내지만, 실제 현상을 구현하는 측면에서는 입자해석 기법이 매우 실제적인 물리현상을 나타내는 것으로 보여 진다.

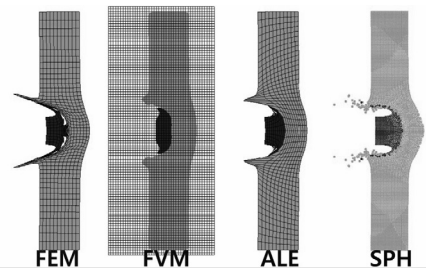


Fig. 1 수치해석 기법에 따른 해석결과 비교

Table 2 water pump 유동해석을 위한 XFLOW 세팅조건

S/W	XFLOW V0.93
parameter	Single Phase Internal Flow, 3D Transient, Incompressible.
Turbulence Model	LES model (WALE, wall-adapting local-eddy)
Material Properties	water 75°C, density=975.16 kg/m ³ viscosity=0.0011kg/m·s
Operating Condition	Operating Pressure=101325 Pa, 중력 항 무시
Rotating Simulation	- impeller zone: Forced condition, rigid body motion. - other zone: Fixed condition.
Particle Number	1,000,000,000, Refinement Level:1

Table 3 water pump 유동해석을 위한 경계 조건

Zone ID	Zone Type	Values
Impeller	Rotational Rigid-body	Rotational Speed=4000 rpm
Suction	velocity-inlet	velocity magnitude: 120 lpm
Discharge	pressure-outlet	Gauge Pressure=300000 Pa

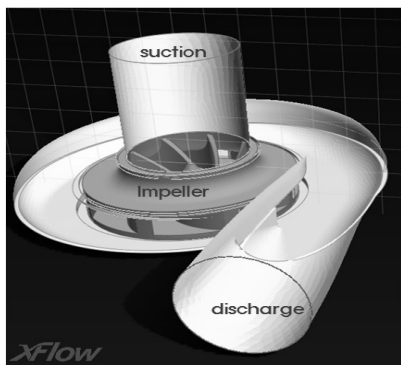


Fig. 2 water pump 해석 모델 전체 형상

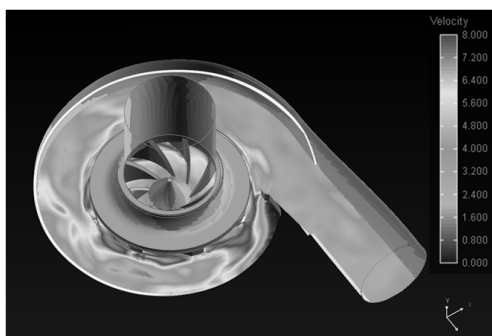


Fig. 3 water pump 속도분포, time=0.081sec

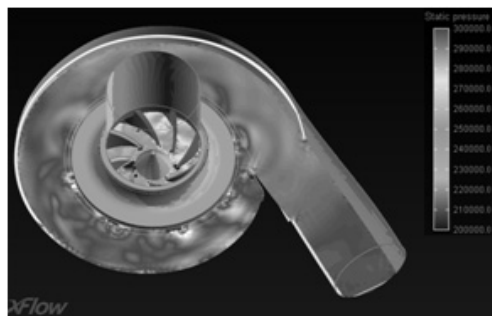


Fig. 4 water pump 정압분포, time=0.081sec

3. 터보기계 성능해석 적용

meshless CFD XFLOW를 사용하여 water pump의 기계효율 해석을 수행하였다. 비교할 수 있는 시험결과를 확보하지 못하여, FVM 기법을 채택하여 사용하고 있는 상용 CFD 중 널리 사용되고 있는 FLUENT V6.3 해석 결과와 비교하여 보았다.

본 해석에 사용된 water pump의 형상은 아래 Fig 2와 같다.

XFLOW는 mesh를 만들 필요가 없는 CFD 해석 S/W이므로, water pump의 3D CAD 형상을 프로그램으로 가져오기만 하면 이때 해석의 80%는 완료된 것으로 보아도 충분하다. 현재 XFLOW는 .STEP, .STL, IGES 등의 3D CAD 파일을 불러올 수 있으며, .STEP 파일로 형상을 가져오는 것이 비교적 문제를 일으키지 않는다.

본 해석에 사용된 XFLOW의 세팅조건은 Table 2와 같다.

Water Pump의 CFD 해석을 수행하기 위한 경계조건으로는 Table 3과 같이 제공되어 졌다.

Fig 3 및 4는 meshless CFD S/W인 XFLOW로 water pump의 unsteady 유동해석을 수행하고 그 결과를 가시화한 속도 및 정압분포를 각각 나타낸다.

Table 4 XFLOW를 이용한 water pump Unsteady 유동해석 결과

Volume Flow [lpm]	Pressure rise [Pa]	Pump Head [m]	Water HP [W]	Impeller Torque [N-m]	Pump HP [W]	Pump Eff. [%]
120	69234	7.24	138.7	0.5114	214.2	64.7

Table 5 FLUENT를 이용한 water pump Steady 유동해석 결과

Volume Flow [lpm]	Pressure rise [Pa]	Pump Head [m]	Water HP [W]	Impeller Torque [N-m]	Pump HP [W]	Pump Eff. [%]
120	79624.61	8.32	159.25	0.52301	218.9689	72.7

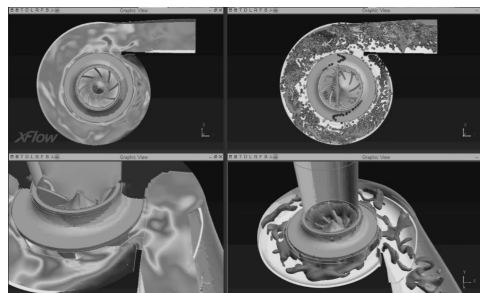


Fig. 5 작동중인 water pump의 속도, 입자 및 vorticity 분포

Fig 5는 작동중인 water pump의 유속, 입자 및 vorticity 분포를 나타낸다. 게재된 그림들은 XFLOW의 해석 결과 가시화 처리 프로세스를 통해 구현되었다. XFLOW는 unsteady solver를 내장하고 있으므로, 계산되는 모든 값은 time domain에서 얻어진 값이며, 정상상태의 값과 비교하기 위해서는 평균값으로 처리를 하여 비교하여야 한다.

Water pump에 대해 XFLOW를 이용하여 3D unsteady CFD 해석을 수행한 후, 결과의 신뢰성을 파악하기 위해, steady state로 가정하고 CFD 해석을 수행한 FLUENT V6.3 해석 결과와 비교하여 보았다.

Table 4와 5는 각각 XFLOW와 FLUENT V6.3을 이용하여 Unsteady State 해석과 Steady State 해석을 수행한 결과여서, 직접적으로 비교하는 것은 의미가 없을 수도 있으나, CFD 해석 결과에 대한 경향을 관찰한다는 점에서 의의가 있다고 하겠다.

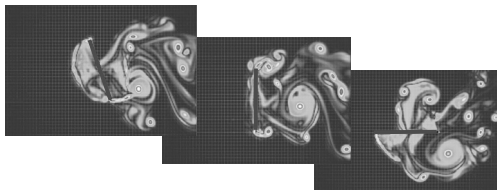


Fig. 6 XFLOW를 사용한 회전 중심축이 있는 평판 FSI 유동해석 사례

Water pump의 CFD 해석을 수행한 후 성능해석 결과를 비교하기 위한 항목으로 임펠러에 걸리는 토크와 펌프 마력 및 효율 등을 비교함으로써 해석결과에 대한 대략적인 경향을 예측할 수 있다.

XFLOW와 FLUENT를 사용하여 계산한 임펠러 토크와 펌프의 마력 차이는 FLUENT 해석 결과가 XFLOW에 비해 약 2% 정도 오차가 있는 것으로 얻어졌다. 펌프의 효율에 대한 비교에서는 FLUENT 해석 결과가 XFLOW에 비해 약 11%로 과도 예측을 하는 것으로 나타났다.

통상 CFD 해석 결과는 복잡한 실제 형상을 온전히 표현하지 못하기에 유동의 큰 흐름에 영향을 받지 않을 것으로 생각되는 형상일부를 제거하거나 수정하고, 실제 물리적 현상을 표현할 수 있는 수학적 모델의 불충분 등에 의해 실제 현상보다 좀 더 큰 값으로 계산 결과가 얻어지고는 한다.

실제로 FLUENT 해석 결과가 약 5%의 오차 범위에서 실험 결과와 유사하였다는 고객의 보고를 생각하지 않는다 하더라도, XFLOW는 난류모델 중 가장 정밀도가 높은 것으로 알려진 WALE LES 모델을 사용하여 계산을 수행하였다.

이에 반해 FLUENT 해석은 정해진 계산시간 내 결과 데이터를 확보하기 위해 정상상태 해석을 수행하였으며, 난류모델로서 RANS 모델을 사용하였었다.

해석 조건과 난류모델로 보아 XFLOW 해석 결과가 FLUENT V6.3 해석 결과보다 실제현상에 더 가까운 값일 것 이라고 생각하는데 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

Water pump 해석을 통해서 체득한 해석 프로세스를 이용하여 신재생 에너지의 일환으로, 최근 들어 강조되고 있는 풍력 발전기의 터빈날개에 대한 유동해석에 적용하여 보았다.

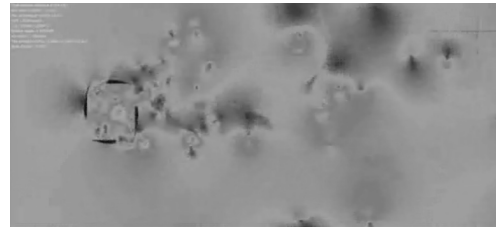


Fig. 7 XFLOW를 사용한 수직형 풍력발전기 터빈 날개 FSI 유동해석 사례

Fig 6은 평판으로 구성된 날개 중심에 회전축이 장착되어 있어 날개 전면과 후면 부를 지나는 공기의 유동특성에 의해 평판날개가 회전하는지의 여부를 확인하고, 공력특성에 의해 회전하는 경우 평판 날개의 분당 회전수를 계산하기 위한 예제로 XFLOW를 이용하여 유동해석을 수행한 것이다. 본 해석 결과에 의하면 좌측면에서 풍속이 $x=10\text{m/s}$, $y=3\text{m/s}$ 의 크기로 균일하게 들어오는 경우 계산 초기에는 반시계방향으로 3회전 정도 회전을 하다가 평판 후류의 영향으로 인해 그림 6에서 보는 것과 같이 시계방향으로 회전방향이 바뀌는 것을 관찰 할 수 있다. 이를 통해 회전 평판 후류의 공기 흐름이 유동장 전체에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 풍력발전기에서 날개와 타워간의 간섭 등으로 인해 발생할 수 있는 shadow effect가 풍력발전기 성능에 지대한 영향을 줄 수 있다는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다.

Fig 7은 수직형 풍력발전기 터빈 날개에 대한 유동해석 사례이다, 강풍에 의한 날개회전 축의 변형 방지를 위해 날개 앞전은 강체로 뒷전은 유연체로 가정하여 FSI를 포함하는 유동 해석을 수행 한 후, 풍력발전기 날개 통과풍에 대한 속도분포를 나타낸 것이다.

4. 결 언

Meshless CFD S/W인 XFLOW를 사용하여 터보기계의 기계적 성능해석을 수행하고 그 해석 결과를 FLUENT V6.3으로 해석한 결과와 비교하였다.

XFLOW에서 사용하고 있는 meshless 기법은 입자해석 기법 중 입자의 통계적 거동을 통해 유동해석을 함으로써, 가장 높은 신뢰를 받고 있는 LBM과 자유수면 등의 계산에서 높은 정밀도와 빠른 계산속도를 제공하는 Extended SPH 기법을 완전히 연동하여 수치계산을 수행하는 방법을 채택하여 사용하고 있다.

대부분의 입자해석 프로그램들에서와 같이 XFLOW도 Unsteady solver를 기본으로 하고 있으며, 난류모델은 3종류의 LES 모델만을 채택하고 있다. XFLOW에는 기본적으로 FSI 해석 기능과 공력소음해석 기능이 포함되어 있어, 다양한 물리 현상이 동시에 발생하는 다물리계에 대한 해석을 가능토록 하고 있다.

XFLOW는 meshless이므로, 전통적인 CFD 해석에 비해 해석 소요 기간을 크게 단축할 수 있으며, 격자를 제작하지 않아도 되기 때문에 사용이 쉬우며, 고정밀도의 난류모델 사용으로 정밀한 해석 결과를 확보할 수 있다. 또한, 격자의 품질에 의해 해석결과가 조금씩 달라지는 기존방식과는 달리 입자 개수를 입력하기만 하면 누구나가 동일한 해석 결과를 얻을 수 있다는 장점을 갖고 있다.

참고문헌

- (1) Joseph O. Hirschfelder, Charles F. Curtiss, R. Byron Bird, "MOLECULAR THEORY of GASES and LIQUIDS", University of Wisconsin Naval Research Lab., JOHN WILEY & SONS, INC., 1954.
- (2) G.R. Lui, M.B. Liu, "Smoothed Particle Hydrodynamics-a meshfree particle method-", World Scientific Publishing Co., Pte. Ltd., 2003.
- (3) Rotterdamse Weg, "High-velocity impact simulation by a hybrid SPH-FE method in PAM-SHOCK", 183C, 2629HD, Delft, the Netherlands, ESI Group., 2006.
- (4) http://www.exa.com/pages/pflow/pflow_physics.html
- (5) Alejandro J.C. Crespo, Moncho Gomes-Gesteira, Antonio Souto-Iglesias, Louis Delorme, Jose maria Grassa, "GSPHERIC-Smoothed Particle Hydrodynamics European Research Interest Community-, SECOND INTERNATIONAL WORKSHOP", Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Navales, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, May 23rd-25th, 2007.
- (6) He X, Luo L-S, "Theory of the lattice Boltzmann equation: from Boltzmann equation to lattice Boltzmann equation", Phys Rev E, Vol. 56, pp 6811-6817, 1997.