

미세버블펌프 수치모델평가 및 검증

이상문 · 장춘만[†]
한국건설기술연구원

Evaluation for the Numerical Model of a Micro-Bubble Pump

SANG-MOON LEE, CHOON-MAN JANG[†]

Environmental & Plant Engineering Research Div., Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,
(Daehwa-Dong) 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi, 10223, Korea

Abstract >> Hydraulic performance of a micro-bubble pump has been analyzed by numerical simulation and experimental measurements. Flow recirculation apparatus between the pump inlet and outlet reservoirs has been adopted to measure pump performance according to flow conditions sequentially. To analyze three-dimensional flow field in the micro-bubble pump, general analysis code, CFX, is employed. SST turbulence model is employed to estimate the eddy viscosity and compared the pump performance to k- ϵ model. Unstructured grids are used to represent a composite grid system including blade, casing and inlet casing. It is found that the numerical model used in the present study is effective to evaluate the pump performance. From the numerical simulation, low velocity region due to pressure loss is decreased where pump efficiency has maximum value. Detailed flow field inside the micro-bubble pump is also analyzed and compared.

Key words : Micro-bubble pump(미세버블펌프), Numerical model(수치모델), Experimental apparatus(실험장치), Performance curve(성능곡선), Turbulence model(난류모델)

Nomenclature

D : impeller diameter, mm
p : pressure rise, bar
Q : flow rate, lpm
T : torque, N·m
y⁺ : non-dimensional wall distance
: rotational frequency, rad/s

1. 서 론

수처리용 미세버블 펌프(micro-bubble pump)는 반도체 공장에서 배출되는 산업폐수처리를 비롯하여, 축산, 하수, 페인트 등 전 산업분야에 걸쳐 다양하게 사용되고 있다. 국제적으로는 용존공기부상법(dissolved air flotation)에 의한 미세기포 생산으로 각종 수처리에 효과적으로 적용되고 있으나, 미소기포발생에 필요한 미세버블펌프의 국산화 기술이 미흡한 실정이다. 미세버블펌프는 종래의 폭기용 펌프에 비하여, 펌프 토출측에 미세버블(micro-bubble)을 발생시킴으로써 미생물의 반응을 촉진시키는 역할을 한다. 미세버블펌프는 일부 선진국에서만 상용화되었으며,

[†]Corresponding author : jangcm@kict.re.kr

Received : 2015.12.2 in revised form : 2015.2.5 Accepted : 2016.2.28

Copyright © 2016 KHNES

현재 수처리 시장에서 적용이 급속히 확대되고 있다.

재생형 펌프는 높은 양정과 안정적인 유량배출로 상대적으로 낮은 효율에도 다양한 산업분야에 적용되고 있다. Meakhal과 Park¹⁾은 재생형 펌프의 해석을 위한 개선모델을 제시하고, 서로 다른 날개형상에 대하여 분석하였다. 즉, 비틀린 날개형상이 직선형상보다 익간 접선면에서 발생하는 와류(vortex flow)를 감소시켜 효율이 상승함을 밝혔다. Karanth et al.²⁾은 재생형 펌프의 수치해석으로 다양한 날개형상에 대한 펌프성능을 비교하였다. 즉 날개 수의 증가는 입출구의 압력상승을 가져오며, 스플리트 베인(splitter vane)도 압력상승에 유효함을 밝혔다.

본 연구에서는 일본 NIKUNI사 재생형 미세버블 펌프(모델명 : 25NPX11)³⁾를 기본으로 하였으며, 펌프의 성능평가를 위한 수치해석모델을 평가하였다. 즉 수치해석모델 구축을 위하여 계산영역(computational domain), 격자의존성 시험(grid dependency test) 및 난류모델특성 평가를 수행하였다. 수치모델에 따른 펌프성능검증을 위하여 미세버블펌프 성능시험장치를 구축하여 펌프성능특성을 비교, 분석하였다.

2. 미세버블펌프

본 연구에서는 재생형 임펠러로 구성된 미세버블 펌프를 대상으로 하였으며, 최고효율점에서의 사양은 Table 1에 나타낸다. 미세버블펌프는 임펠러(impeller)와 케이싱(casing)으로 구성되며, 형상을 Fig. 1에 나타낸다. 재생형 임펠러를 갖는 미세버블펌프는 48개

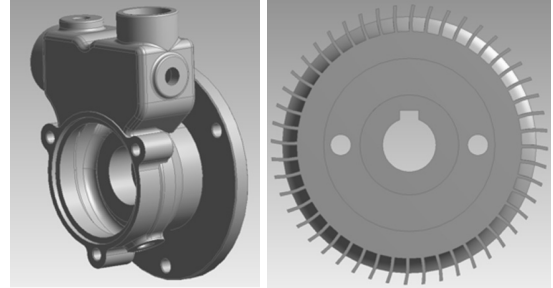


Fig. 1 Micro-bubble pump

의 임펠러 날개로 구성되며, 2극 모터사용으로 모터 구동 회전수는 3,550 rpm이다. 임펠러 구동에 의하여 물과 공기가 혼입 유입되어 미세버블을 발생시킨다. 본 연구에서는 기초연구로서 미세버블 상류측의 흡입공기를 차단하고, 순수한 물 유입만을 고려하여 펌프 성능을 평가하였다.

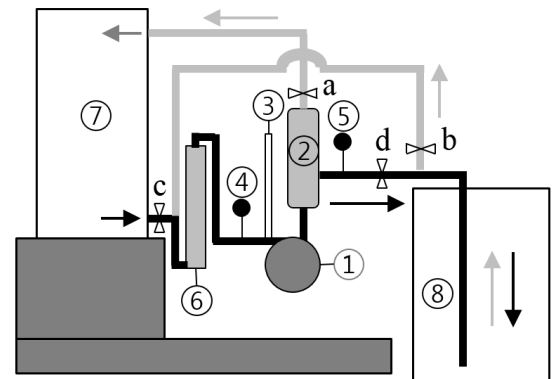
3. 실험장치 및 방법

미세버블펌프의 압력 및 유량을 측정하기 위한 실험장치의 구성도를 Fig. 2에 나타낸다. 압력은 펌프 ① 전후압력차(⑤-④)로, 유량은 입형 물유량계(water flow meter, ⑥)를 사용하여 측정하였다.

본 실험장치는 유량변화에 따른 연속적인 성능측

Table 1 Specification of a micro-bubble pump (at maximum efficiency condition)

Name	Value
Flow Rates	50 lpm
Total Head	22 m
Rotational Frequency	3,550 rpm
Efficiency	31%
Number of Impeller blades	48 ea



① micro-bubble pump ② receiver tank ③ air intake tube ④ upstream pressure gauge ⑤ downstream pressure gauge ⑥ water flow meter ⑦ upper reservoir ⑧ lower reservoir a, b, c, d : flow control valves

Fig. 2 Schematic view of an experimental apparatus

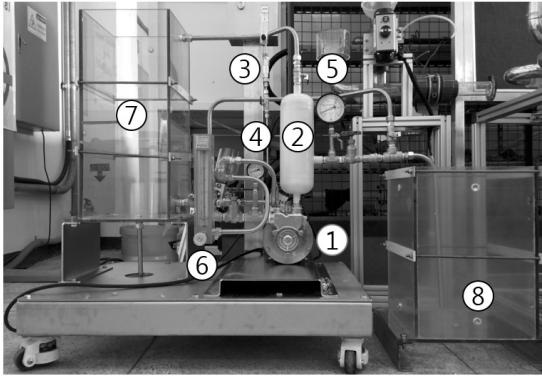


Fig. 3 Perspective view of an experimental apparatus

정을 위하여, 양방향 유량제어방법을 할 수 있도록 설계하였다. Fig. 2의 구성도에서와 같이 미세버블펌프의 압력 및 유량을 측정할 때에는 밸브 a 및 b를 닫고 밸브 c 및 d는 개방한다. 즉 그림에서 검정색선이 펌프성능측정에 따른 물 흐름을 나타낸다. 한편 상류 저장조(7)의 물 부족 시에는 밸브조작을 이전과 반대로 하여 하류 저장조(8) 물을 펌프가동으로 상류로 이송하도록 하였으며, 이때의 물 흐름도를 회색선으로 나타낸다. 실험에 사용한 펌프성능시험장치 사진을 Fig. 3에 나타낸다.

4. 수치해석 및 경계조건

4.1 수치해석방법

본 연구에서는 복잡한 케이싱 구조와 회전 임펠러를 갖는 미세버블펌프의 내부유동장 특성을 해석하기 위해 비정렬격자계를 채택한 상용해석 소프트웨어인 ANSYS CFX 16.0⁴⁾을 사용하였다. 비압축성 삼차원 정상유동에 대한 연속방정식과 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 방정식 등의 지배방정식은 유한체적법으로 이산화되며, 대류항과 확산항의 이산화 방법으로는 각각 수정된 상류차분도식과 중심차분법이 사용되었다. 유동장 내부에서 발생하는 난류를 해석하기 위한 난류모델 선정을 위하여 $k-\epsilon^5)$ 및 SST⁶⁾ 모델을 비교하여 평가하였다.

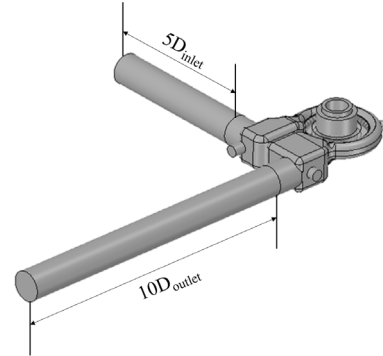


Fig. 4 Computational domain

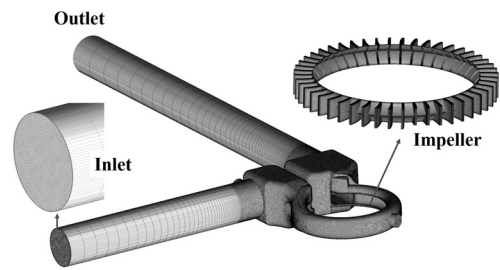


Fig. 5 Computational grid

미세버블펌프의 삼차원 유동해석을 위하여 케이싱 및 커버의 내부와 임펠러를 제외한 유동장을 도출하였다. 미세버블펌프의 수치해석영역은 후류에 의한 wake발생을 고려하여, 입구부 덕트길이는 입구덕트경의 5배를, 출구부에서는 출구덕트경의 10배로 각각 선정하였으며, 형상은 Fig. 4에 나타낸다.

4.2 계산격자 및 경계조건

회전하는 펌프 임펠러와 정지하는 케이싱의 복잡한 형상과 경계조건을 원활히 설정하기 위하여 Fig. 5에서와 같이 임펠러부와 케이싱부로 분리하여 각각에 계산격자를 형성시켰다. 계산격자는 임펠러 및 케이싱 내부는 사면체를 이용한 비정렬격자로 구성하였으며, 흡입 및 배기구 덕트의 내부에는 육면체 격자로 형성하였다.

비대칭형 케이싱 형상을 고려하여, 임펠러를 포함하는 내부 유동장 전체에 격자를 형성하여 계산하였

다. 미세버블펌프의 케이싱과 임펠러 사이의 간극은 0.1 mm로 하여, 실제 펌프의 형상을 모사하였다.

수치해석 경계조건으로 입구에서는 0 Pa의 정압을, 출구에서는 질량유량을 사용하였다. 벽면은 점착 조건(no-slip condition) 및 단열조건(adiabatic condition)을 사용하였다. 임펠러의 회전영역(rotation domain)과 케이싱의 정지영역(stationary domain)의 경계면에는 frozen rotor interface를 사용하여 임펠러의 회전에 따른 유동현상을 계산할 수 있도록 하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 격자의존성 평가

수치모델의 효율성 확보를 위하여 격자의존성시험(grid dependency test)을 수행하였다.

두 종류의 난류모델(SST, k-ε)을 사용한 격자의존성시험 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 본 계산의 유량조건은 60 lpm으로 하였다. 그림에서 가로축은 수치모델에 사용된 격자수를, 세로축은 압력 및 효율을 각각 나타낸다. 격자수는 최소 3,100,000개에서 최대 9,100,000개로 변화시켜 격자의존성시험을 하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 격자수가 약 6,500,000개 이상일 때 격자의존성이 사라짐을 확인할 수 있었다.

5.2 수치해석 타당성 검토

수치모델의 신뢰도 평가를 위하여 수치해석 결과를 실험값과 분석하여 Fig. 7에 나타낸다. 그림에서와 같이 난류모델도 두 종류를 선정하여 비교하였다. 그림에서 가로축은 미세버블펌프의 유량으로 로그 눈금 간격으로 나타냈으며, 세로축은 미세버블펌프의 전양정(total head)값을 나타낸다. 그림에서와 같이 실험 및 수치해석 결과 값은 최대 상대오차 5%이내의 값으로 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 이상의 실험값과의 비교를 통하여 본 수치계산 모델이

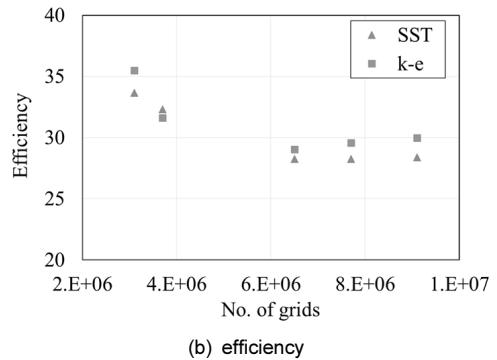
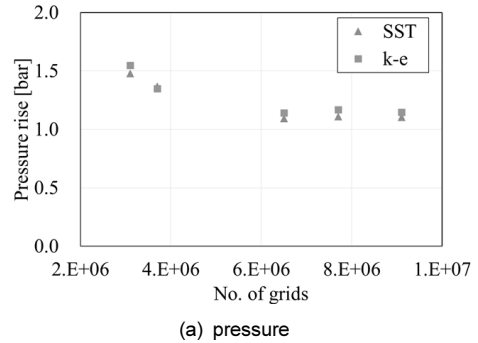


Fig. 6 Comparisons of pump performance

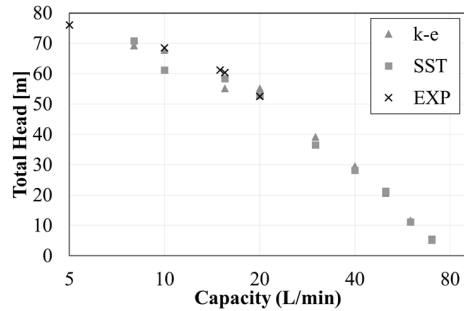


Fig. 7 Comparisons of numerical simulation and experimental measurements

타당함을 확인 할 수 있었다.

난류모델 비교평가에서는 10 lpm이하에서는 k-ε 모델이, 10 lpm 이상의 영역에서는 SST 모델이 실험 값과 상대적으로 유사한 전양정 값을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 8은 두 종류의 난류모델을 적용한 미세버블 펌프의 효율을 나타낸다. 그래프의 가로축과 세로축은 각각 유량 및 미세버블펌프의 효율을 나타낸다.

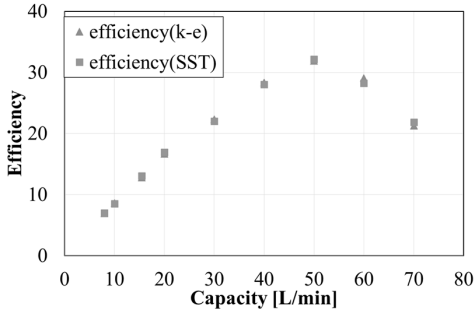


Fig. 8 Efficiency distribution for two turbulence models

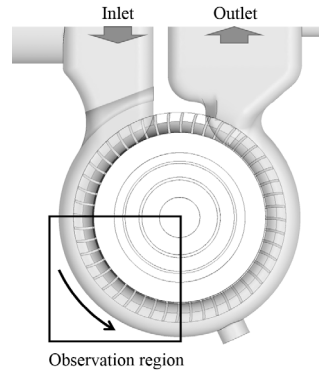
효율은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{Q \cdot \Delta P}{T \cdot \Omega} \quad (1)$$

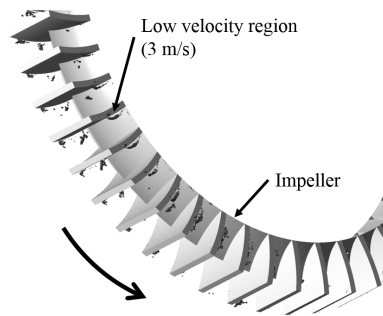
여기서 Q 는 유량을, ΔP 는 미세버블펌프 전후단의 압력차, T 와 Ω 는 임펠러의 토크 및 회전속도를 각각 나타낸다. 그림과 같이 본 미세버블펌프는 유량 50 lpm에서 가장 높은 효율을 나타낸다. 또한 두 종류의 난류모델에 의한 효율값은 전 유량영역에서 유사함을 알 수 있다.

5.3 내부유동장 분석

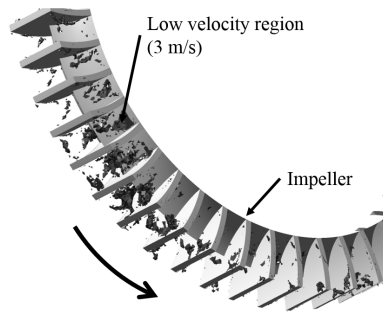
Fig. 9는 미세버블펌프 유량이 50 및 70 lpm일 때의 임펠러 내부의 상대속도가 3 m/s 인 영역을 나타낸다. 펌프의 입구를 지나 발생하는 임펠러 표면의 유동구조를 관찰하기 위하여 Fig. 9(a)와 같이 입구부를 지난 3사분면 영역에서의 유동구조를 살펴보았다. 그림에서와 같이 최고효율 유량점인 50 lpm에서 상대속도가 낮은 영역이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 한편 70 lpm의 경우 유량은 증가했으나 블레이드 끝단에서 발생하는 와류로 인하여 상대속도가 낮은 영역이 발생함을 확인할 수 있다. 임펠러 내부의 저속영역은 와류에 의해 야기된 유동의 압력손실로부터 기인한 것이기에 상대적으로 저속영역이 작은 50 lpm의 유량조건에서 펌프효율이 높게 된다.



(a) position of observation



(b) 50 lpm



(c) 70 lpm

Fig. 9 Isosurface having low velocity of 3 m/s

4. 결 론

본 연구에서는 미세버블펌프의 기초성능을 평가하기 위하여 펌프 유입공기를 차단하는 조건으로 성능평가장치를 이용한 성능실험 및 수치해석을 수행하였다. 수치해석모델은 성능평가장치의 실험결과를 기반으로 구축하였으며, 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 미세버블펌프의 성능평가를 위하여 성능평가장치를 설계, 제작하였으며, 성능평가장치를 통한 압력곡선은 수치해석 결과와 최대 상대오차 5%이내의 값으로 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있었다.
- 2) 수치모델의 구축을 위하여 격자의존성 평가 및 난류모델에 따른 신뢰도 평가를 수행하여 수치 신뢰도 및 계산 효율성을 확보한 수치모델을 확보할 수 있었다.
- 3) 미세버블펌프 임펠러 양 끝단에서 발생하는 저속영역은 끝단의 와류발생 및 압력손실로부터 기인한 것이기에 상대적으로 블레이드 양 끝단의 저속영역이 상대적으로 적은 50 lpm의 유량조건에서 펌프효율이 높게 됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2015년도 한국건설기술연구원의 주요 사업(20150434-001) 지원으로 수행되었습니다.

References

1. T. Meakhail and S. O. Park, "An Improved theory for regenerative pump performance", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 219, No. 3, 2005, pp. 213-222.
2. K. V. Karanth, M. S. Manjunath, S. Kumar and N. Y. Sharma, "Numerical Study of a Self Priming Regenerative Pump for Improved Performance using Geometric Modifications", International Journal of Current Engineering and Technology, Vol. 5, No. 1, 2015, pp. 104-109.
3. NIKUNI Co., Ltd., <<http://www.nikuni.co.jp/>>, 2015.
4. ANSYS 16.0 user manual, 2015.
5. D. C. Wilcox, "Turbulence modeling for CFD", 1998, La Canada, CA: DCW industries.
6. F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Model for Engineering Application", AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.