

폐수 이송용 원심펌프의 성능해석에서 표면 거칠기의 영향

윤 정의^{*†}, 김 주 호^{**}

* 강원대학교 삼척캠퍼스 메카트로닉스공학과, ** 강원대학교 대학원 기계·자동화공학과

Effect of Surface Roughness on Performance Analysis of Centrifugal Pump for Wastewater Transport

Jeong-Eui Yun^{*†} and Joo-Ho Kim^{**}

* Dept. of Mechatronics Engineering, Kangwon Nat'l Univ. Samcheok Campus

** Graduate School of Mechanical & Automation Engineering, Kangwon Nat'l Univ. Samcheok Campus

(Received July 5, 2013 ; Revised November 11, 2013 ; Accepted November 15, 2013)

Key Words: Centrifugal Pump(원심펌프), CFD(전산유체역학), Impeller(임펠러), Surface Roughness(표면 거칠기)

초록: 본 연구는 폐수처리용 원심 펌프 설계과정에서 수행하는 3차원 유동해석에 있어서 표면 거칠기를 고려한 해석 결과와 고려하지 않은 해석 결과가 성능 예측에 미치는 영향을 살펴보고자 수행하였다. 이를 위해 비교적 기하학적 형상이 복잡한 폐수처리용 원심펌프의 표면 거칠기 변화가 유동 해석 결과에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 실제 해석 대상 펌프를 사용한 실험 결과 값과 해석 결과 값을 서로 비교 해봄으로써 표면 거칠기를 고려한 펌프의 해석 값과 고려하지 않은 해석 결과 값 차이에 대한 정량적인 분석을 제시하였다. 그 결과, 해석 시 표면 거칠기를 고려한 해석결과는 실험결과와 잘 일치하는 함을 보였으며, 표면 거칠기는 펌프의 성능해석에 약 7% 범위에서 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract: This study was performed to evaluate the effect of surface roughness on pump performance. To this end this, using commercial codes, ANSYS CFX and BladeGen, we simulated pump performance in terms of efficiency, head and shaft power, both with and without surface roughness. Finally simulation and experiment results were compared for a quantitative analysis. The results of this comparison showed that surface roughness led to an about 7% reduction in pump efficiency.

1. 서 론

환경이 중요한 산업 기술의 키 워드가 되면서 폐수 처리 기술이 중요한 산업화 기술로 부각하고 있다. 이러한 폐수 처리용 설비에 있어서 가장 중요한 기계부품 중의 하나가 펌프이며, 펌프의 효율이 폐수처리 설비 시스템의 전체 효율을 지배하게 된다. 지금까지는 폐수처리용 펌프로는 주로 이물질에 의한 막힘 현상을 최소화 하고자 볼텍스 형태의 펌프를 산업현장에서 많이 사용하여 왔지만 약 50%정도 밖에 되지 않는 효율 때문에 문제가 되어 왔다. 현재는 이러한 효율을 개선한 폐수처리용 원심 펌프가 활발한 연구를 통해 약 70% 이상의 효율을 가진

폐수 처리용 원심 펌프가 소개 되고 있다.⁽¹⁻⁸⁾

본 연구에서는 이러한 폐수처리용 원심 펌프 설계에 있어서 좀 더 정확한 성능 예측 개발을 위해 사용되어 지고 있는 3차원 유동 해석에 있어서 표면 거칠기를 고려한 해석 방법과 고려하지 않은 해석 방법이 펌프의 설계 과정에 수행하는 성능 예측 과정에 미치는 영향을 평가 제시하였다. 그리고 실제 펌프를 사용한 실험값과 해석 값들을 서로 비교 해봄으로써 표면 거칠기를 고려한 펌프의 해석 값과 고려하지 않은 해석 결과 값 차이에 대한 정량적인 분석을 제시하고자한다.

2. 수치해석

Fig. 1은 해석하고자 하는 폐수 이송용 펌프 임펠러의 3차원 구성을 보여주고 있는 그림으로 고

† Corresponding Author, jeyun@kangwon.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

형물에 의한 막힘을 최소화 하고자 허브(Hub)와 2개의 날개(Blade) 그리고 날개를 덮어 흡입되는 물의 통로를 구성하는 덮개(Shroud)로 이루어져 있다. 그리고 펌프의 성능에 절대적인 영향을 미치는 임펠러의 형상 설계에서는 날개의 기본 형상을 표현하는 자오면(Meridional view)을 기준으로 Fig. 1의 흡입 폭(b_1), 출구 위치(h_o) 및 폭(b_2)과 경계면을 구성하는 허브 및 슈라우드 곡선이 중요한 설계변수가 된다.⁽¹⁻⁵⁾

본 연구는 이전 연구⁽¹⁻⁵⁾에서 결정된 이들 설계 값으로 구성된 기하학적 형상의 임펠러를 사용하여 해석을 수행하였다($b_1=73\text{mm}$, $b_2=67\text{mm}$, $h_o=71.5\text{mm}$).

Fig. 2는 Fig. 1에서 나타낸 임펠러를 중심으로 전체 펌프를 구성하는 볼류트 및 입 출구를 포함한 형상을 중심으로 구성된 해석에 사용한 격자의 모습이다. 격자의 구성은 전체적으로 임펠러는 약 120만개, 볼류트는 약 82만개 흡입 및 배출관 약 36만개의 격자로 구성되어 있으며 수치해석은 상용 유동 해석 프로그램인 ANSYS CFX-12를 사용하여 수행하였다. 해석 영역에 대한 지배 방정식은 에너지 방정식을 제외한 연속 방정식 및 운동량 방정식을 사용하였으며, 난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델을 채택하여 해석을 수행하였

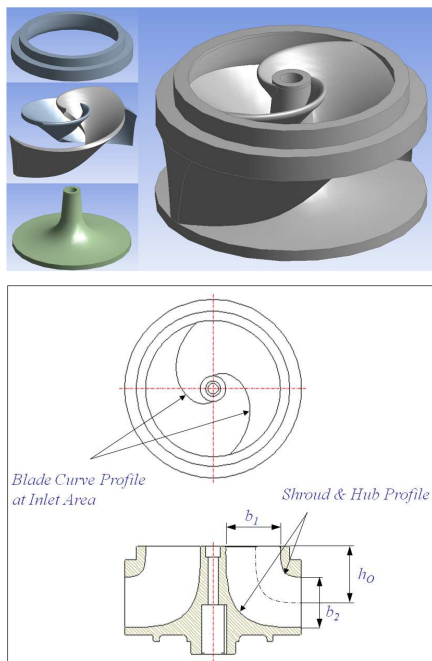


Fig. 1 Configuration of impeller. Where, b_1 : inlet width of blade, b_2 : outlet width of blade, h_o : outlet position of blade

다. 또한 격자 구성시 형상의 복잡성으로 사면체 격자를 주로 사용하였으나 벽면에는 계산의 정확성을 위해 8층의 프리즘 격자 층을 배치하여 CFX 프로그램에서 추천하는 y^+ 값이 150 이하의 값을 유지하도록 구성하였다.⁽¹⁰⁾ 해석 시 경계 조건으로는 입구 경계면에서는 오픈 경계 압력 (1bar)을, 출구 경계면에서는 설계 유량 ($4\text{m}^3/\text{min}$) 값을 중심으로 $2\text{m}^3/\text{min}$ 에서 $7\text{m}^3/\text{min}$ 까지 유량을 바꾸어 가며 해석을 수행하였으며, 회전수는 1,750 rpm 일정 조건에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 Fig. 2의 격자를 사용하여 원심펌프의 유동 해석을 수행한 결과중의 하나이다. 해석은 실제적인 상황을 고려하여 입구조건으로 오픈링 경계조건(Opening boundary condition)을 주어 수행하였다. 그리고 볼류트 및 입출구에 대해서는 고정 프레임(Stationary frame), 임펠러에 대해서는 회전 프레임(Rotating frame)을 적용한 후 이들 프레임 사이의 연결 방식(Interface condition)으로 CFX에서 제공하는 Frozen-rotor 방식을 채택하여 MFR(Multi Frame Reference) 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 Frozen-rotor 방식으로 MFR 해석을 30° 간격으로 수행한 결과 중 총압분포(Total pressure distribution)를 나타낸 그림이다. 그림을 통해 알 수 있듯이 볼류트형 원심펌프의 경우 회전 중 임펠러의 상대적인 위치에 따라 펌프 성능(Fig. 4 경우는 압력분포)이 바뀌게 된다.

Fig. 5는 Frozen-rotor 방식으로 MFR 해석을 30° 간격으로 수행한 결과 중 임펠러의 상대적인 위치변화에 따른 양정(Head)변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 임펠러의 상대적 위

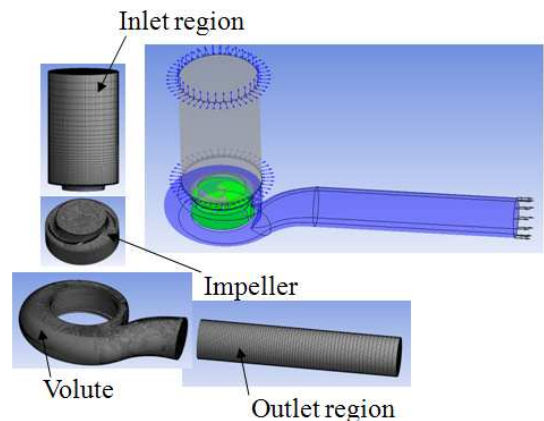


Fig. 2 Grid of pump for simulation

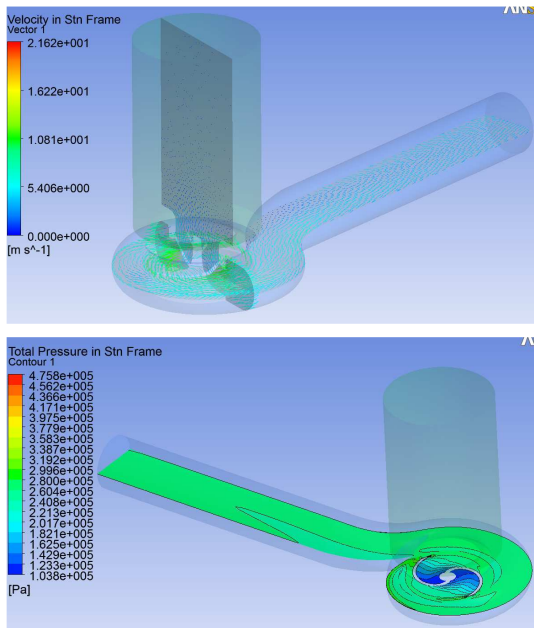


Fig. 3 Simulation results at 0° impeller position, at which the outer edge of blade coincides with volute tongue ; velocity vector and total pressure in stationary frame

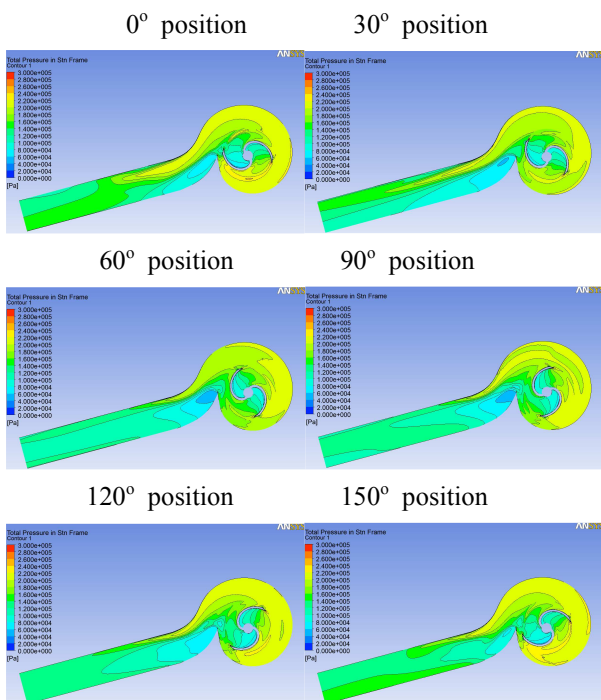


Fig. 4 Simulation results at each impeller position ; total pressure in stationary frame. 1750rpm, Q=4m³/min condition

치에 따라 펌프의 순간 성능 값이 변하게 되므로 대표 값을 결정하기 위해서는 이 값들을 평균할

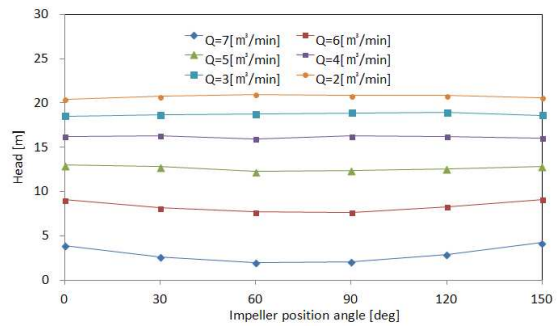


Fig. 5 Variation of head at each impeller position

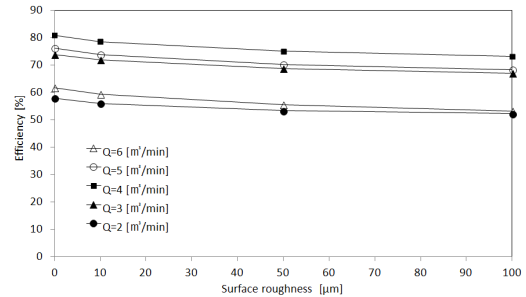
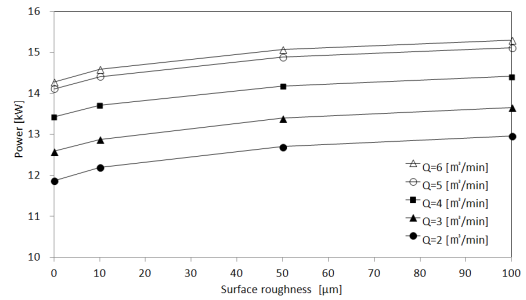
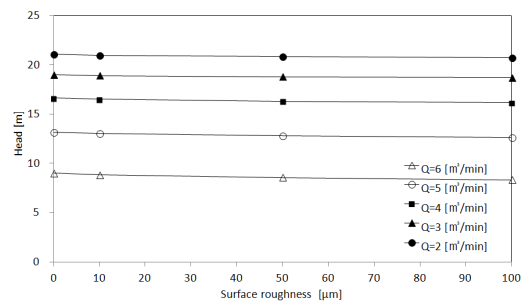


Fig. 6 Pump performance as a function of surface roughness and flow rate

필요가 있음을 알 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 하나의 운전 조건에 대해 Frozen-rotor 방식의 MFR 해석을 30° 간격으로 6개의 위치에 대해 유동해석을 수행한 후 이들 값을 평균하여 대표 값을 결정하는 방식을 취하였다.

Fig. 6은 해석 과정에서 펌프의 표면 거칠기를 상용펌프의 최대 표면 거칠기 값으로 알려진 100μm 까지 바꾸어가면서 펌프의 성능(효율, 수두, 축동력)

을 계산한 결과 값들이다. 그림을 살펴보면 표면 거칠기가 증가함에 따라 양정 값은 감소하며, 축동력은 증가하여 그 결과 효율은 감소하는 결과를 보여주고 있다. 이러한 이유는 표면 거칠기가 벽면에서 난류 생성을 증가시켜 벽면 전단응력 값이 증가하기 때문이다. CFX 프로그램의 경우 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용할 경우 계산의 정확성 및 수렴성 확보를 위해 벽 근처에서는 벽 법칙을 사용하며, 벽 법칙 사용 시 표면 거칠기에 의한 영향을 아래 식 (1)과 같은 무 차원 대수 속도 식 u^+ (Logarithmic velocity profile)에서 표면 거칠기 따른 항 ΔB 를 추가로 고려하여 반영해준다(여기서, κ : von Karman constant, u^+ : dimensionless velocity, y^+ : dimensionless distance from wall, B : log-layer constant).⁽¹⁰⁾

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B - \Delta B \quad (1)$$

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 Fig. 6의 표면 거칠기 변화에 따른 펌프 성능 값들의 변화를 좀 더 확대하여 정량적으로 분석하고자 거칠기를 가진 표면을 조건으로 계산한 결과 값과 매끄러운 표면으로 해석한 결과 값을 사용하여 서로 빼주거나 나누어서 그 값들을 처리한 결과이다. 먼저 Fig. 7의 양정결과 그림을 살펴보면, 표면 거칠기가 증가하면

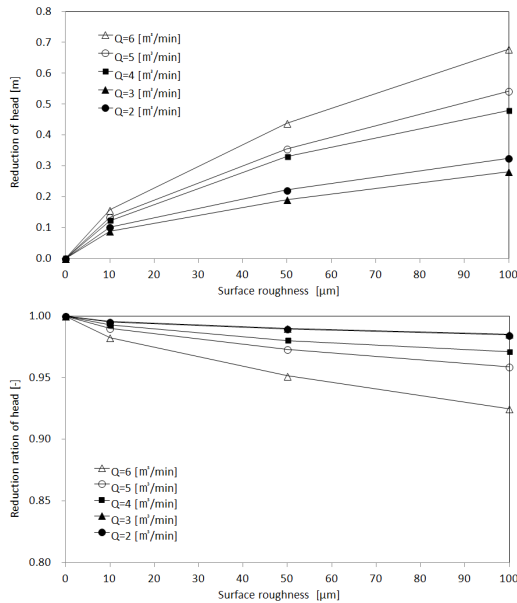


Fig. 7 Effect of surface roughness on head. In these figures, Reduction of head = (Head @ smooth surface) - (Head @ rough surface), Reduction ratio of head = (Head @ rough surface) / (Head @ smooth surface)

양정은 전체적으로 감소하는 경향을 가지며, 펌프의 최적 유량(설계 유량 값 =4m³/min)에 상관없이 유량이 증가할수록 감소하는 정도가 심해진다. 이러한 이유는 유량이 증가할 경우 유속이 Fig. 8의 표면 거칠기 변화에 따른 축동력 손실의

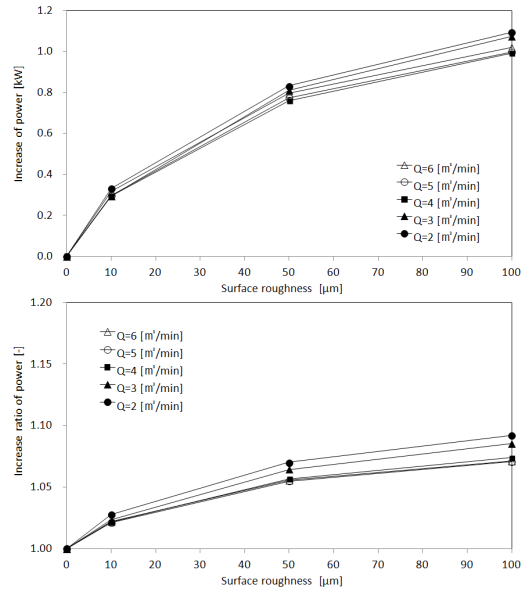


Fig. 8 Effect of surface roughness on power. In these figures, Increase of power = (Power @ rough surface) - (Power @ smooth surface), Increase ratio of power = (Power @ rough surface) / (Power @ smooth surface)

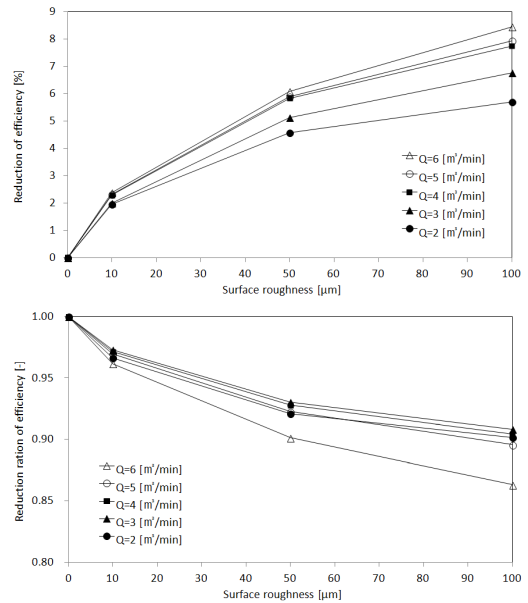


Fig. 9 Effect of surface roughness on efficiency. In these figures, Reduction of efficiency = (Efficiency @ smooth surface) - (Efficiency @ rough surface), Reduction ratio of efficiency = (Efficiency @ rough surface) / (Efficiency @ smooth surface)

변화 결과를 살펴보면, 축동력은 표면 거칠기에 의한 마찰력 증가에 따라 로그함수 형태로 증가하는 경향을 가진다. 특히 유량의 변화에 따라



Fig. 10 Photo of pump performance test for verification

표면 거칠기가 축동력에 주는 영향은 Fig. 7에 표현된 양정에 비해 상대적 적은 값을 가진다.

Fig. 9의 효율의 경우는 양정에 비례하고 축동력에 반비례하므로 Fig. 7결과와 Fig. 8의 결과가 연동되어 최종결과로 나타나게 된다. 전체적으로 표면 거칠기가 증가하면 효율은 로그함수 형태로 감소하는 경향을 가지며, 100 μm 증가 시켰을 때 설계 유량 값 4 m^3/min 에서 약 7% 감소하는 결과를 나타낸다. 그리고 표면 거칠기 증가에 따른 효율의 감소 경향은 유량에 비례하여 커지는 경향을 가지게 됨을 알 수 있다.

Fig. 10은 최종적으로 설계된 임펠러를 직접 제작하여 성능 시험을 준비하는 모습으로 실험은 임펠러 제작과정에서 발생할 수 있는 오차를 함께 평가하고자 동일한 설계를 가지고 제작한 2set 펌프 (Sample#2, Sample#3)를 사용하여 25°C 맑은 물을 용수로 수행하였다. 펌프를 구성하는 임펠러 및 볼류트는 주철을 사용한 일반 주물공법을 통해 제작하였으며, 이 경우 표면 거칠기는 Ra=10~20 μm 정도의 값을 가지는 것으로 알려져 있다.⁽¹¹⁾

Fig. 11은 실험 결과 및 해석 결과 값을 함께 그려 놓은 그래프이다. 양정의 그림을 살펴보면 유량의 증가에 따라 양정이 감소하는 전형적인 유량 양정 곡선을 보이고 있으며, 해석 값과 실험값은 정성적인 측면과 정량적인 측면 모두에서 잘 일치하고 있다. 다음으로 축동력의 경우 고 유량 영역으로 갈수록 해석의 결과 값이 실험값에 비해 과소평가한다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 유동해석의 결과에는 운전 중 펌프의 베어링 등에서 발생하는 기계적 마찰손실이 포함되어 있지 않기 때문이다. 일반적으로 마찰손실은 유량(Q)이 증대하면 선형적으로 증대하는 경향을 가지는 것으로 알려져 있다⁽⁸⁻⁹⁾. 마지막으로 이러한 양정(H)과 축동력(P)으로부터 계산되어지는 효율($\eta = \gamma QH/P$) 결과 값을 살펴보면, 효율의 경우 설계점(Design point)인 4 m^3/min 에서 최고의 효율을 보이며, 설계점을 벗어난 탈 설계점(Off-design point)영역에서는 임펠러의 입구 측 형상에 기인하는 충격 손실(Shock loss)로 인해 효율이 급격히 떨어지는 원심펌프의 전형적인 형태를 실험결과와 해석결과 모두에서 잘 보여주고 있다. 해석결과와 실험결과를 정량적으로 살펴보면, 표면 거칠기를 고려하지 않고 매끈한 표면을

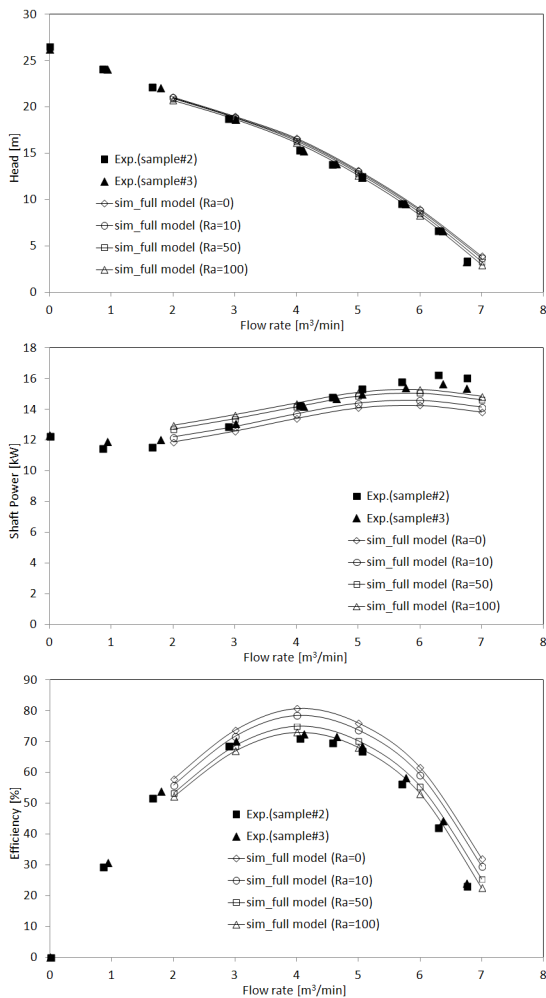


Fig. 11 Comparison between simulation and experiment results. Ra means equivalent sand-grain surface roughness [μm]

가진 것으로 가정하여 해석한 효율결과는 실험값보다 설계점에서 약 10% 이상 큰 값을 예측하게 되며 설계점 이상의 유량에 대해서는 유속증가에 따른 거칠기 효과의 증대가 고려되지 않음으로 인해 그 차이가 더 커지게 된다. 그러나 표면 거칠기를 고려할 경우 실험값에 근접한 결과 값을 예측함을 보여준다. 즉 일반적인 주철 표면의 경우 표면 거칠기는 $Ra=10\sim 20\mu m$ 정도의 값을 가지는 것으로 알려져 있으며, 이 경우 매끄러운 표면 결과 과에 비해 좀 더 실험값에 근접하는 결과 값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 표면 거칠기를 고려하였을 경우 효율 값을 보다 정확하게 예측하게 되는 이유는 $k-\epsilon$ 난류 모델을 채택하여 수치해석을 수행하는 경우, 벽 법칙에서 사용하는 대수영역(Log layer)의 식을 표면 거칠기에 따라 보정을 해주기 때문에 표면 거칠기를 적절하게 고려할 경우 임펠러 표면에서 전단력이 실제적인 값으로 계산되어 축동력을 보다 정확하게 예측하기 때문이다.

4. 결 론

이상의 해석 및 실험 결과를 통해 아래의 결과를 도출하였다.

(1) 펌프 임펠러 설계를 위해 전산해석을 수행할 시 표면 거칠기를 고려할 경우 정량적인 측면에서 개선된 펌프의 성능(효율, 양정, 축동력) 결과를 제공해준다.

(2) 표면 거칠기가 증가하면 효율은 로그함수 형태로 감소하는 경향을 가지며, 설계 유량 값 $4m^3/min$ 에서 표면 거칠기를 $10\mu m$ 까지 증가시킬 경우 2.5%, $100\mu m$ 까지 증가 시켰을 때 효율은 약 7% 감소하는 결과를 나타낸다. 그리고 표면 거칠기 증가에 따른 효율의 감소 경향은 유량에 비례하여 커지는 경향을 가지게 됨을 알 수 있다.

(3) 볼류트를 포함한 전체 펌프모형을 사용하여 전산 해석을 수행할 경우 설계점 주변뿐만 아니라 상당히 넓은 탈 설계점 범위까지 정성적으로 좋은 성능평가 결과를 제공해준다.

후 기

본 연구는 지식경제 기술혁신사업(에너지기술

개발사업, 과제명: “비막힘형 고효율 고유량/고양정 수중펌프 개발,” No.2010T100100983)으로 수행된 결과임을 알려드립니다. 관계기관의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Yun, J. E. and Kim, J. H., 2013, "Performance Analysis of Centrifugal Pump for Wastewater Transport Considering Surface Roughness," *KSME Spring Conference*, Vol. 1, pp. 585~589.
- (2) Yun, J. E., 2012, "Effects of Impeller Shape of Submersible Non-clogging Pump on its Performance," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 36, No. 12, pp. 1201~1207.
- (3) Yun, J. E., 2012, "Numerical Study of Some Design Parameters of Submersible Double-channel Non-clogging Pump Impeller on Performance," *Proc. of 4th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science*.
- (4) Yun, J. E., 2012, "Development of High Efficiency Submersible Non-clogging Pump Impeller (I) - High Flow Rate Version," *KSME Spring Conference*, Vol. 1, pp. 396~400.
- (5) Yun, J. E., 2011, "CFD Analysis of Submersible Slurry Pump with Two Blades," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 3, pp. 263~268.
- (6) Kim, S., Choi, Y. S., Yoon, J. Y. and Kim, D. S., 2008, "Design Optimization of Centrifugal Pump Impeller Using DOE," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 11, No. 3, pp. 36~42.
- (7) Kim, D. J., Suh, S. H. and Sung, S. K., 1988, "Effects of the Impeller Shapes on the Non-Clogging and the Screw-type Centrifugal Pump Performances," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 1, No. 1, pp. 81~89.
- (8) Imaichi, K., Murakami, Y., Tsurusaki, H. and Cho, K. R., 2002, *The Basis of Pump Design*, Daeyoung Sa.
- (9) Stepanoff, A. J., 1957, *Centrifugal and Axial Flow Pumps*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 69~137.
- (10) ANSYS CFX, 2009, Release 12.0 User's

guide, Solver theory guide, ANSYS

- (11) Ryu, K. S., 2008, Effects of Surface Roughness on Centrifugal Pump Efficiency,

Master's Thesis of Chunnam National University, pp. 16~20.