

폐수 처리용 수중 축류 펌프 개발

윤 정 의*†

* 강원대학교 삼척캠퍼스 메카트로닉스공학과

Development of Submersible Axial Pump for Wastewater

Jeong-Eui Yun *†

* Dept. of Mechatronics, Kangwon Nat'l Univ.

(Received June 19, 2012 ; Revised January 23, 2013 ; Accepted January 24, 2013)

Key Words: Blade Length(날개 길이), Blade Shape(날개 형상), Wastewater Pump(폐수 펌프), Axial Pump (축류펌프)

초록: 본 연구는 7kW 모터로 18.5m³/min의 유량을 양정(H) 0.5m로 공급할 수 있는 고농도 폐수처리용 3엽 수중 펌프의 블레이드를 개발하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 블레이드의 축방향 비틀림 각, 블레이드의 길이 및 반경방향 비틀림 각을 설계변수로 선정하여 이들이 블레이드 효율에 미치는 영향을 상용 해석용 프로그램을 사용한 (ANSYS BladeGen, Turbo Grid, CFX) 전산해석을 통해 수행하였다. 해석 결과 블레이드의 축방향 비틀림각(β)가 펌프의 효율에 가장 민감한 변수임을 알 수 있었으며, 축방향 비틀림각(β)=20°, 반경방향 비틀림 각 (α)=110° 그리고 블레이드의 길이 (l)=240 mm 일 때 펌프의 최고 효율을 가지게 됨을 알 수 있었다.

Abstract: This study was performed to develop a high efficiency submersible axial pump for concentration wastewater treatment. To do this, we simulated the effect of some parameters such as the axial twist angle of a blade(β), the radial twist angle of a blade(α) and the length of a blade (l) on pump efficiency using commercial code, ANSYS CFX and BladeGen. The results showed that the axial twist angle of a blade(β) was the most sensible parameter on the pump efficiency. And the pump efficiency had a maximum at β =20°, α =110° and l =240 mm.

1. 서 론

전체 펌프 시장의 50% 정도를 차지하는 원심 펌프의 경우 그동안 실험 및 컴퓨터 시뮬레이션 등을 통해 보다 높은 효율과 신뢰성 확보를 위한 연구가 임펠러 설계를 중심으로 집중되어 왔으나, 슬러리 이송용 축류 재순환 펌프의 경우 상대적으로 연구결과가 많지 않다. 폐수 이송용 축류 재순환 펌프의 경우는 일반적인 축류 펌프와 달리 주로 고상의 입자가 상당수 포함된 액체를 대량으로 수송하는 용도로 사용하는 펌프로 비속도(specific speed)가 2,500[rpm, m³/s, m] 이상의 값을 가지고 있다. 이와 같이 비속도가 2,500 이상의 값을 가지는 경우 Stefanoff 등이 제시한 기

존의 방식을 사용할 경우 축류 펌프의 날개 수는 2개로 설계를 하지만 폐수 이송용의 경우 양정 확보를 위해 3개로 설계하고 있다.^(1,2) 이와 같이 기존의 일반 펌프에 사용되는 설계 식을 그대로 적용할 수 없는 폐수 이송용 축류 재순환 펌프 설계와 관련한 연구를 살펴보면, 먼저 최영석 등은 축류펌프 날개의 경사각, 입구각, 날개팁 코드 길이 등이 유량과 효율에 미치는 영향을 해석하였으며,⁽²⁾ 2006년 고성호 등은 고농도 폐수 정화를 위한 교반기에 사용되는 축류 수중 믹서와 관련하여 FLUNT를 사용하여 임펠러 입구형상이 유동 특성에 미치는 영향을 해석한 연구를 확인할 수 있다.⁽³⁾ 그리고 최근 축류 펌프 임펠러 형상과 관련하여서는 김성 등이 2개의 날개를 가진 축류 펌프에 대해 익형의 형상변화에 대한 성능 해석을 ANSYS-CFX로 수행하였으며,⁽⁴⁾ 박현창 등

† Corresponding Author, jeyun@kangwon.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

은 축류 펌프 후단에 설치한 안내 깃이 펌프의 성능에 미치는 효과를 ANSYS-CFX로 해석하였다.⁽⁶⁾ 기타 축류 펌프와 관련된 여러 연구들이 있지만 몇몇 연구를 제외한 대부분의 연구는 순수한 물을 수송하는 블레이드에 대한 연구에 집중되어져 있다.^(6,7)

본 연구는 580rpm 7kW 모터로 18.5m³/min의 유량을 양정(H) 0.5m로 공급할 수 있는 고유량 저양정형 폐수처리용 수중 펌프의 블레이드를 개발하기 위해 수행하였다(이 경우 비속도=4195. 폐수처리용 경우 양정의 확보에 어려움이 있기 때문에 순수한 물을 수송하는 경우 보다 날개의 개수를 많이 가지게 설계를 하게 되며, 본 연구에서도 기존의 설계책 등에서 제시하고 있는 2개의 날개보다 1개 더 많은 3개의 날개를 가진 블레이드를 기준으로 펌프설계를 시작하였다. 그리고 이 경우 블레이드의 축방향 비틀림 각(β), 블레이드의 길이(l) 및 반경방향 비틀림 각(α)을 해석변수로 선정하여 이들이 블레이드 효율에 미치는 영향을 상용 해석용 프로그램을 사용한(ANSYS BladeGen, Turbo Grid, CFX) 전산해석을 통해 규명하였다.

2. 수치해석

2.1 블레이드 형상 모델링 및 주요해석변수

Fig. 1은 본 연구에서 개발하고자하는 축류 펌프 블레이드의 3차원 구성 및 3-D 유동해석을 통해 결정하고자 하는 변수들을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 날개의 3차원 형상을 구성하는 날개의 길이 (l)과 두 개의 비틀림 각도(α , β)는 펌프의 성능에 절대적인 영향을 미치는 중요 설계변수가 된다. 이들 설계변수는 Stepanoff 등의 펌프설계 서적 등에 제시된 식 등을 사용하여 단순 계산을 통해 결정할 수 있는 설계변수와는 달리 3차원 유동 해석을 통해서만 결정할 수 있는 값들이다.^(1,6,7)

2.2 전산유동 해석방법

Fig. 2는 해석에 사용한 격자의 모습이다. 격자는 형상의 복잡성 보다는 격자를 만드는데 소요되는 시간을 줄이기 위해 사면체 격자를 주로 사용하였으며 벽면에는 계산의 정확성을 위해 8층의 프리즘 격자 층을 배치하였다. 그리고 계산 시간을 고려하여 두 개의 날개 중 한 개의 날개

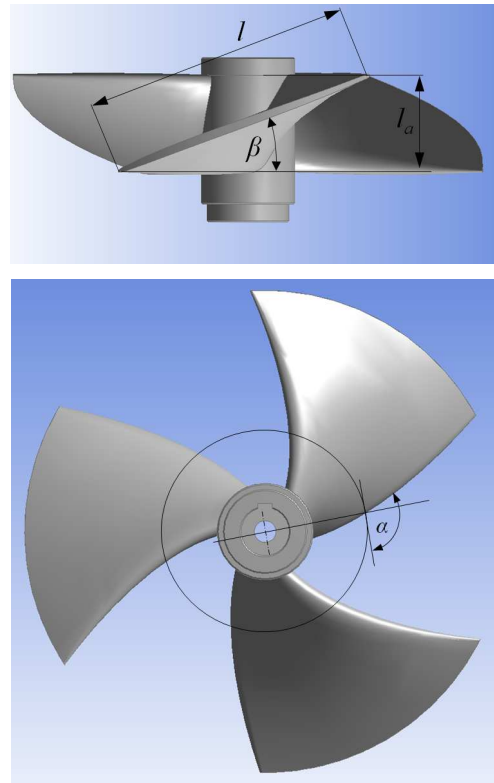


Fig. 1 Definition of design variables for impeller design

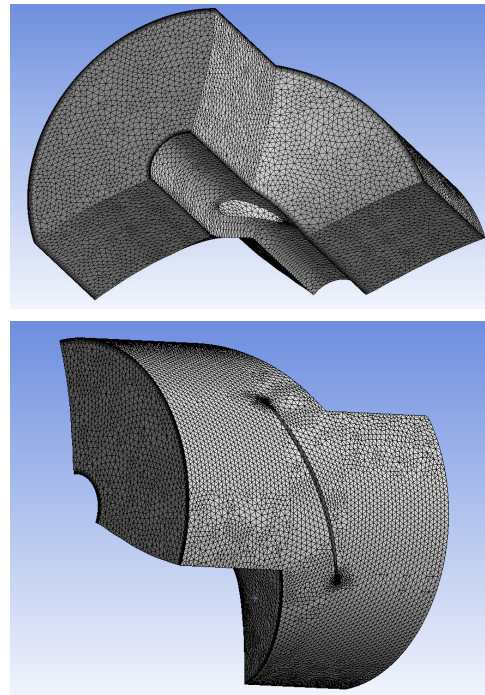


Fig. 2 Grid of impeller for simulation

영역에 대해서만 해석을 수행하였으며 전체적으로는 약 80만개의 요소로 구성하였다. 수치해석

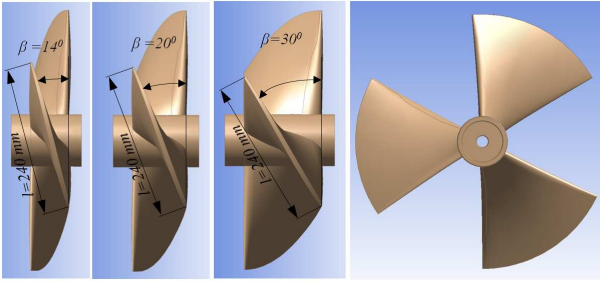


Fig. 3 Effect of β angle on impeller geometry. In all cases, $\alpha=90^\circ$, $l=240$ mm

은 상용 해석 프로그램인 ANSYS CFX-12를 사용하였으며, 작동유체는 시제품 제작 후 검증과정을 고려하여 물로 설정하였다. 전체적으로는 에너지 방정식을 제외한 연속방정식 및 운동량 방정식을 사용하였으며, 난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델을 채택하여 해석을 수행하였다. 해석 시 경계 조건으로는 입구 측에서는 압력(1bar)을 출구 측에서는 유량($18.5 \text{ m}^3/\text{min}$)값을 사용하였으며, 해석은 580 rpm 조건에서 수행하였다. 그리고 해석은 임펠러에 대해 회전 좌표계를 설정하여 해석하는 RFR(Reference Frame Rotation) 방식을 사용하였으며, 입구부위와 출구 측 부분은 반대방향으로 회전하는 회전 벽(Counting-Rotating Wall)으로 경계 조건을 주어 해석을 수행하였다.⁽⁸⁾

3. 유동해석 결과 및 고찰

Fig. 3은 비틀림 각도(β)의 변화가 펌프의 성능에 미치는 효과를 알아보기 위해 모델링한 임펠러의 형상이다. 그림을 살펴보면 날개의 외경($D_o=400$ mm), 내경($D_i=80$ mm), 바깥 측 날개 길이 ($l=240$ mm), 비틀림 각도($\alpha=90^\circ$) 등은 고정한 채, 또 다른 비틀림 각도(β)를 바꾸게 되면 날개의 비틀림 형상과 함께 축 방향 길이(l_a)도 함께 증가한다는 것을 알 수 있다. 해석은 유량(Q)을 $18.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 으로 주었을 때 β 의 값을 14° 부터 2° 씩 증가하여 30° 까지 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 해석 결과 β 의 변화가 펌프의 형상과 효율, 양정 및 축 동력에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 먼저 Fig. 3을 살펴보면 β 가 변화하여도 정면에서 바라본 형상은 일정하지만 β 가 증가함

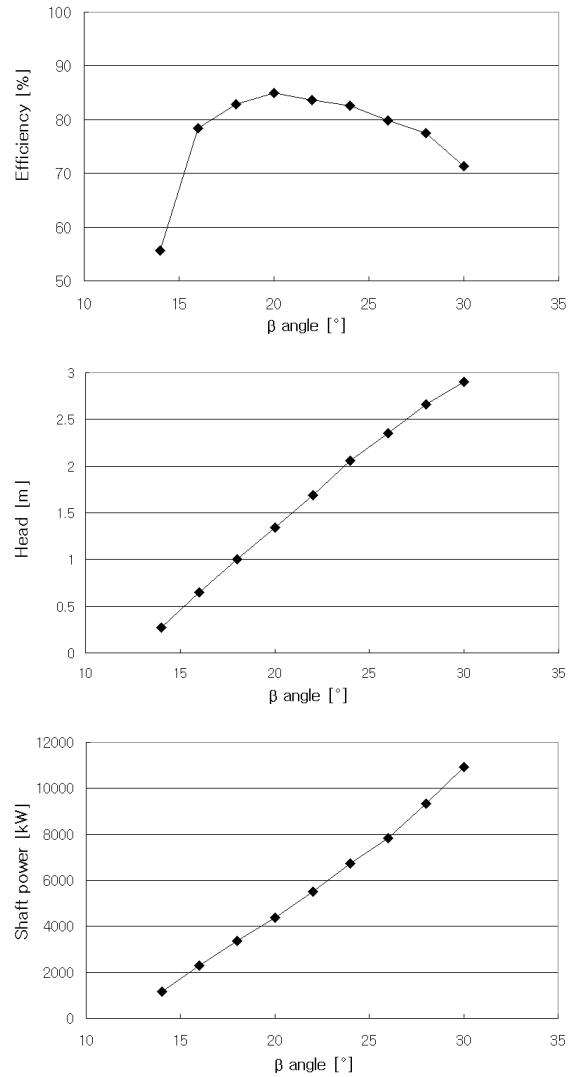


Fig. 4 Effect of blade angle β on total efficiency, head and shaft power of pump. In all cases, $\alpha=90^\circ$, $l=240$ mm, $N=580$ rpm, $Q=18.5 \text{ m}^3/\text{min}$

에 따라 날개의 축 방향 길이(l_a)와 함께 회전방향 면적은 증가한다는 것을 보여준다. Fig. 4 그림을 살펴보면 β 가 증가하면 양정 및 수두의 경우는 β 와 함께 지속적으로 증가하지만 효율의 경우는 $\beta=20^\circ$ 까지만 증가하며, 그 이상의 값에서는 오히려 감소하는 특성을 보여준다. 이러한 이유는 다음과 같이 이해할 수 있다. 해석 시 날개의 길이(l)는 일정하지만 β 가 증가함에 따라 날개의 축 방향 길이(l_a)와 함께 회전방향 면적 또한 증가하게 됨에 축력과 수두가 증가하게 된다. 그러나 Fig. 4 그림을 살펴보면 β 가 증가함

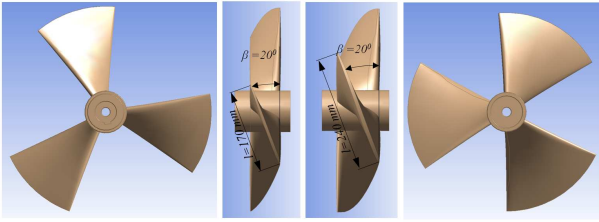


Fig. 5 Effect of blade length l on impeller geometry. In all cases, $\beta = 20^\circ$, $\alpha = 90^\circ$

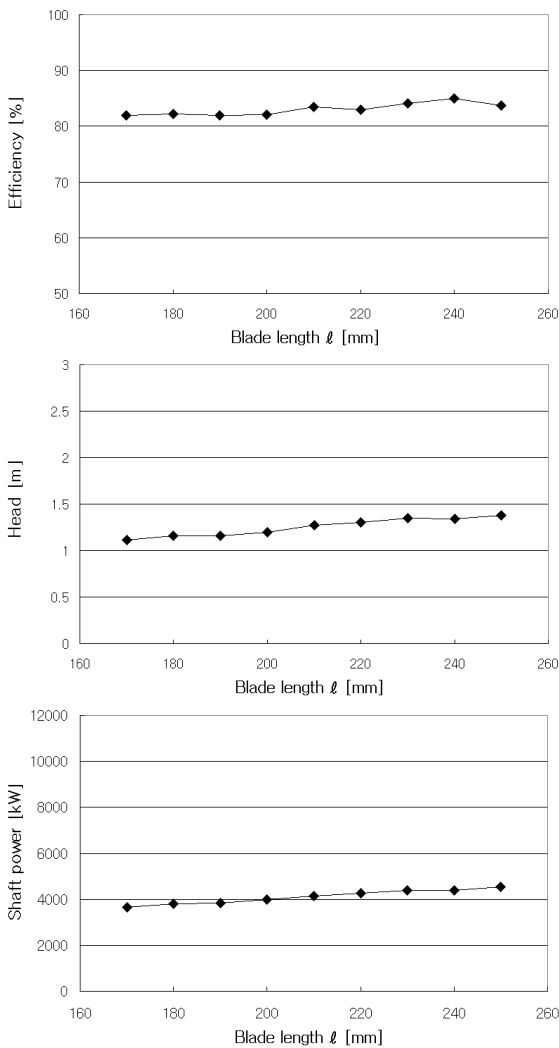


Fig. 6 Effect of blade length l on total efficiency, head and shaft power of pump. In all cases, $\beta = 20^\circ$, $\alpha = 90^\circ$, $N = 580$ rpm, $Q = 18.5$ m³/min

에 따른 수두의 증가에 비해 축력의 증가가 급하므로 효율의 경우는 $\beta = 20^\circ$ 에서 최대 점을 가지게 된다는 것을 알 수 있다(total efficiency $\eta = \gamma QH/P \times 100\%$, γ : specific weight, Q : flow rate, H : head P :

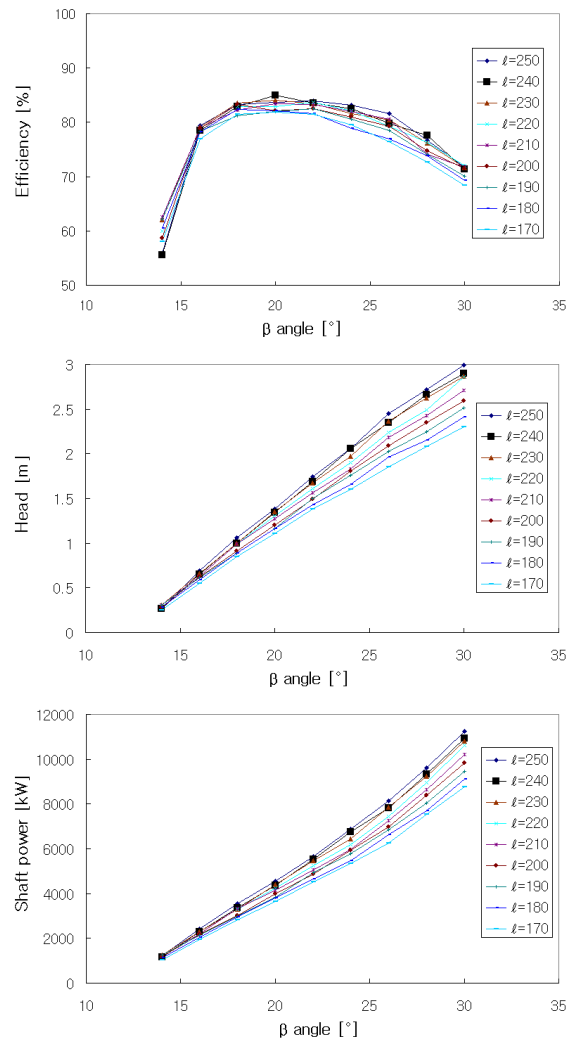


Fig. 7 Effect of blade angle β and length l on total efficiency, head and shaft power of pump. $N = 580$ rpm, $Q = 18.5$ m³/min. In all cases, $\alpha = 90^\circ$

shaft power). 그리고 $\beta = 20^\circ$ 에서 수두(H)는 1.34 m 축 동력(P)은 4.4 kW 값을 가지므로 목표 값 $H > 0.5$ m, $P < 7$ kW에 부합되는 결과 값을 알 수 있다.

Fig. 5는 블레이드 길이 l 의 변화가 펌프의 형상에 미치는 효과를 보여주는 그림이다. 그림을 살펴보면 펌프의 형상과 관련하여 l 이 증가하면 축 방향 길이(l_a)와 함께 날개의 폭도 증가하는 형상을 가지게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 블레이드 길이 l 을 170 mm부터 250 mm 까지 10 mm씩 변화시켜가면서 펌프의 효율, 양정 및 축 동력을 계산한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 l 이 증가하면 효율과 양정 그리고

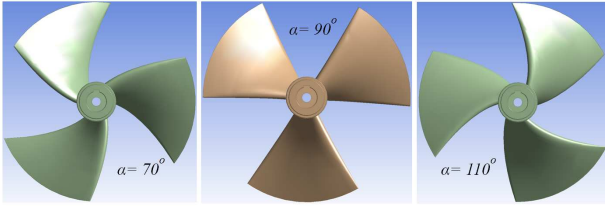


Fig. 8 Effects of α angle on creation of blade profile. In all cases, $\beta = 20^\circ$, $l = 240$ mm

축 동력 모두가 조금 증가하는 경향을 보여준다. 그리고 효율의 경우 240 mm에서 최대 값을 가지며, 그 이상에서는 다시 감소하는 결과 경향을 보여주고 있다. 이러한 결과로부터 설계변수 l 은 β 에 비해 상대적으로 민감도가 적다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 β 및 l 의 변화가 펌프의 효율, 양정 및 축 동력에 미치는 영향을 살펴보기 위해 81 개의 3-D 모델을 사용하여 해석한 결과이다. 그림을 살펴보면 앞에서 언급하였듯이 설계변수 l 은 β 에 비해 효율측면에서는 상대적으로 민감도가 적으나, 수두와 축 동력 측면에서는 β 가 큰 값을 가지는 영역에서는 중요하다라는 것을 보여준다. 그리고 모든 l 값에 대해 축 동력이 수두에 비해 빠르게 증가하므로 인해 효율 값이 특정 β 값 ($\beta = 20^\circ$)에서 최대를 가지게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 비틀림 각 α 의 변화가 펌프의 형상에 미치는 효과를 보여주는 그림이다. 그림을 살펴보면 펌프의 형상과 관련하여 (그림에서 펌프는 반시계방향으로 회전한다) α 가 증가하면 펌프의 날개 회전방향으로 형상이 휘어지는 모습을 가지게 된다는 것을 알 수 있다. 축 방향 길이(l_a)와 함께 날개의 폭도 증가하는 형상을 가지게 된다.

Fig. 9에서는 α 의 값을 40° 부터 10° 씩 증가하여 140° 까지 변화시켜가면서 펌프의 효율, 양정 및 축 동력을 계산한 결과이다. 그림을 살펴보면 알 수 있듯이 α 가 증가하면 효율과 양정 그리고 축 동력 모두가 조금 증가하는 경향을 보여준다. 그리고 효율, 양정 그리고 축 동력 모두 $\alpha = 110^\circ$ 에서 최대 값을 가지며 그 이상에서는 다시 감소하는 결과 경향을 보여주고 있다. 이러한 결과로부터 설계변수 α 는 l 보다는 펌프성능에 상대적으로 민감도가 크다는 것을 알 수 있다(해석 범위 내에서 약 11% 변화).

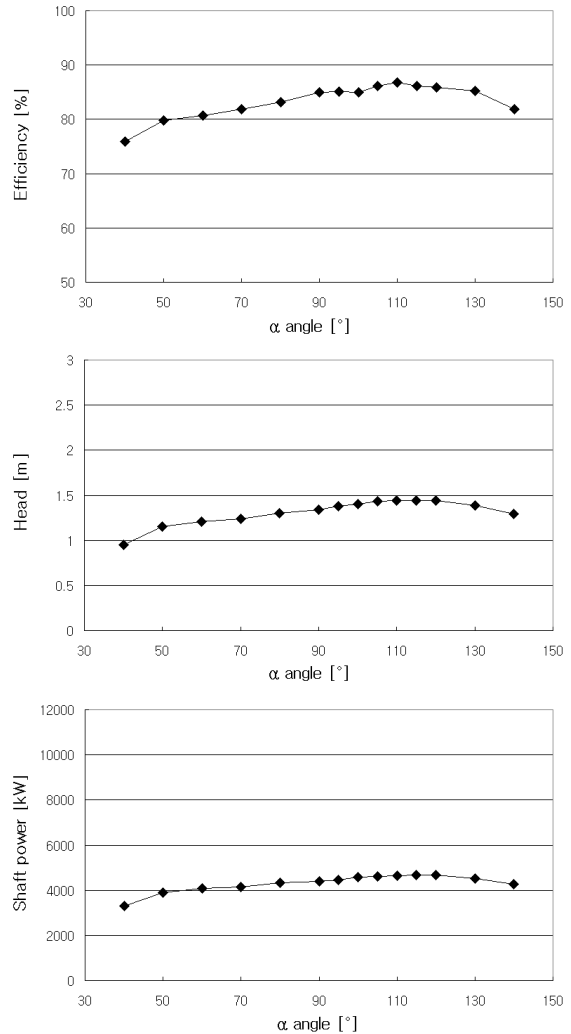


Fig. 9 Effect of α angle on total efficiency, head and shaft power of pump. $N = 580$ rpm, $Q = 18.5$ m³/min. In all cases, $\beta = 20^\circ$, $l = 240$ mm

4. 결론

본 연구는 7kW 모터로 18.5m³/min의 유량을 양정(H) 0.5m로 공급할 수 있는 고농도 폐수처리용 3엽 수중 펌프의 블레이드를 개발하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 블레이드의 축방향 비틀림각(β), 블레이드의 길이 (l) 및 반경방향 비틀림 각 (α)을 설계변수로 선정하여 이들이 블레이드 효율에 미치는 영향을 상용 해석용 프로그램을 사용한 (ANSYS BladeGen, Turbo Grid, CFX) 전산해석을 통해 수행하였으며, 그 결과 아래의 몇 가지 결론을 얻었다.

- (1) 축방향 비틀림각(β)가 증가하면 양정 및 수

두의 경우는 β 와 함께 지속적으로 증가하지만 효율의 경우는 $\beta=20^\circ$ 까지만 증가하며, 그 이상의 값에서는 오히려 감소하는 특성을 보여준다.

(2) 블레이드의 길이 (l)이 증가하면 효율과 양정 그리고 축 동력 모두가 조금 증가하는 경향을 보여준다. 그리고 효율의 경우 $l=240$ mm에서 최대 값을 가지며, 그 이상에서는 다시 감소하는 결과 경향을 보여주고 있다.

(3) 반경방향 비틀림 각 (α)이 증가하면 효율과 양정 그리고 축 동력 모두가 조금 증가하는 경향을 보여준다. 그리고 효율, 양정 그리고 축 동력 모두 $\alpha=110^\circ$ 에서 최대값을 가지며 그 이상에서는 다시 감소하는 결과 경향을 보여주고 있다.

참고문헌

- (1) Stepanoff, A. J., 1957, Centrifugal and Axial Flow Pumps, John Wiley & Sons, Inc.
- (2) Choi, Y. S., Lee, J. H. and Kim, S. I., 2000, "A Numerical Study on the Effect of Blade Shapes on the Performance of the Propeller - type Submersible Mixers," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 3, No. 2, pp. 31~35.
- (3) Ko, S. H., Kwack, Y. K., Lee, S. H. and Jang, Y. S., 2006, "A Numerical Study on Flow Characteristics of Submersible Mixer According to the Design Parameters," *Proceedings of the 4th National Congress on Fluids Engineering*, pp. 1205~1208.
- (4) Kim, S., Choi, Y. S., Lee, K. Y. and Kim, J. H., 2011, "Hydrodynamic Design of Axial-flow Pump Impellers," *Summer Conference of Society of Air-conditioning and refrigerating engineers of Korea*, pp. 1123~1126.
- (5) Park, H. C., Kim, S., Lee, K. Y., Kim, J. H., Yoon, J. Y. and Choi Y. S., 2011, "Effect of Design Variables on the Performance of Axial-flow Pump Guide Vanes," *Research and Development Conference of Fluid Machinery and Systems*, pp. 596~597.
- (6) Imaichi, K., Murakami, Y., Tsurusaki, H. and Cho, K. R., 2002, The Basis of Pump Design, Daeyoung Sa.
- (7) Gulich, J. F., 2010, Centrifugal Pumps, Springer.
- (8) ANSYS CFX, 2009, ANSYS CFX User's Guide Release 12.0, ANSYS Inc.