

CFRP 임펠러를 사용한 선박용 해수펌프의 최적설계와 성능특성

정선용¹, 이석호¹, 서형석², 이계복^{1*}
¹충북대학교 기계공학부, ²중소조선연구원

Optimum design and performance of marine sea water pump with impeller using CFRP

Jeong, Seon Yong¹, Rhi, Seok Ho¹, Seo, Hyoung Seock², Lee, Kye Bock^{1*}

¹School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

²Research Institute of Medium & Small Shipbuilding

요약 해수의 접촉이 많은 금속 임펠러는 해수의 염분에 의해 부식이 되므로 탄소섬유로 제작된 임펠러를 사용한 해수펌프가 개발되었다. 해수펌프의 임펠러와 와류실의 최적설계를 수치해석을 통해 수행하였고 관련인자(임펠러 두께, 표면 거칠기)의 영향을 평가하였다. 임펠러의 두께는 무게 때문에 재료에 따라 제한된다. 탄소섬유를 사용한 임펠러는 경량이므로 최대효율을 나타내는 임펠러 두께를 사용할 수 있다. 표면 거칠기의 경우 같은 운전 조건에서 펌프의 효율에 7% 범위에서 영향을 주는 것을 확인하였다.

Abstract Marine sea water pump with impeller using carbon fiber block was developed to prevent the impeller corrosion by the salinity. A numerical analysis was carried out in order to optimize the impeller and volute design for marine sea water pump and to investigate the sensitivity of the related parameters(impeller thickness, surface roughness) using CFD commercial code. The impeller thickness is limited because of the weight. Since the impeller using the carbon fiber lights, the thickness which has a maximum efficiency can be used. The results show that the surface roughness leads to an 7% reduction in pump efficiency.

Keywords : CFRP(Carbon Fiber Reinforce Plastic), Impeller, Marine sea water pump, Optimum design, Surface roughness

1. 서론

최근 해양수송기기 분야는 이산화탄소 배출규제에 맞추어 수송기기를 구성하고 있는 각각의 부품의 경량화를 위해 노력하고 있다. 특히 해수펌프에 들어가는 임펠러도 이 목적에 맞는 제품을 개발하기 위해 중요성이 커지고 있다. 우리나라 소형 선박은 약 10만 여척이 등록되어 있고 연간 100여척이 건조되고 있으며 해양레저 수요의 증대로 소형선박의 수요는 증가하고 있다. 해수펌프에 사용되는 임펠러의 경우 대부분 금속기반의

stainless steel을 주재료로 사용하고 있으나 금속 재질의 임펠러는 해수, 화학성분이 포함된 액체 등에 접촉이 자주 되므로 해수에 의해서 부식이 되거나 화학제품에 의해 금속 재질이 약해져 내화학성이 취약해진다. 또한 고효율, 에너지 절감이라는 관점에서 따라서 steel 대신 탄소 복합재료를 사용하여 부식을 막고 그 외에 경량, 강도 및 강성, 진동감쇠 등의 큰 장점을 갖게 된다. 해수의 접촉이 많은 금속 임펠러는 시간 경과에 따라 해수의 염분에 의해 부식이 되어 짧게는 2년 후에 교체를 해야 하나 탄소 임펠러의 경우 부식이 되지 않으므로 긴 제품수명

본 논문은 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 광역경제권거점기관지원사업(탄소밸리구축사업)의 지원으로 연구되었음.

*Corresponding Author : Kye Bock, Lee(Chungbuk National University)

Tel: +82-43-261-3232 email: kblee@chungbuk.ac.kr

Received August 5, 2015

Revised (1st October 8, 2015, 2nd October 15, 2015)

Accepted November 6, 2015

Published November 30, 2015

을 갖게 된다. 해수펌프를 장착하고 있는 해양레저용 선박은 성장률이 계속 증가하고 있으며 탄소 임펠러의 수요는 더 증가될 것으로 예상된다.

국내외에서 제작되는 금속 임펠러의 경우 기본 금속 재료를 가지고 절삭 등의 가공을 통해 제작을 하는 반면 CFRP 임펠러의 경우 국내 개발이 거의 전무한 실정으로 탄소 재료가 가지고 있는 특성을 손상시키지 않는 공정법의 개발이 필요하다. 탄소 임펠러를 제작하기 위해 carbon fiber block을 제작하고 가공단계에서 층간분리를 막을 수 있는 결합력 강화 기술이 필요하다. 본 연구에서는 소형선박용 해수펌프의 최적 설계를 수행하여 주요 인자의 영향을 검토하고 임펠러의 표면 거칠기에 따른 펌프의 성능을 해석하려고 한다.

2. 본론

소형 선박에 사용되는 해수펌프의 최적설계를 위해 설계값으로 양정 37 m, 유량 2 m³/min 가 되도록 회전차와 와류실의 주요 변수를 변화시키며 최적설계를 수행하였다. 임펠러 두께(t), 임펠러 안지름(D), 블레이드 출구폭(b)은 펌프의 주요 설계변수이고[1], Fig. 1은 해수 펌프 임펠러의 형상을 보여준다.

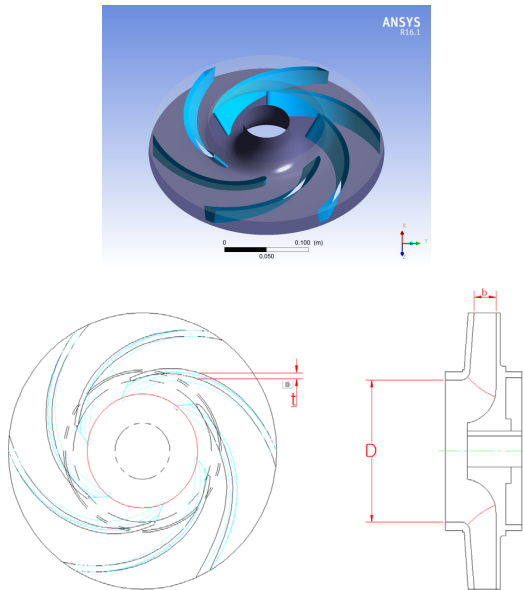


Fig. 1. Structure of marine sea water pump impeller

2.1 수치해석과 지배방정식

3차원 기하학적 진공펌프의 성능특성을 상용 CFD 코드인 FLUENT V6.3.26을 사용하여 수치적으로 해석하였다. 유동장의 격자생성은 Gambit 2.4.6을, 비구조격자계와 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 수치 알고리즘은 SIMPLE method가 사용되며, 대류항은 1차 상류도식(first order upwind scheme)을 사용한다. 3차원 압축성 비정상적 유동이며 회전하는 구조에서의 연속 방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

$$\text{여기서, } \tau_{ij} = [\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] \quad (3)$$

ρ 는 밀도, t 는 시간, x_i , u_i 는 좌표와 속도성분을 각각 나타내며, p 는 정압을 τ_{ij} 는 응력 텐서를 나타내며, ρg_i 와 F_i 는 각각 중력과 외부 힘에 의한 체적력을 나타낸다.

원심펌프의 내부 유동은 난류유동이므로 난류 모델에 대한 고려가 필요하다. 난류운동에너지 비소멸률(specific dissipation rate)을 사용한 k - w 난류 모델은 층류저층의 w 에 대한 수학적인 표현이 가능하므로 벽 근처에서 복잡한 감쇄함수를 사용하지 않고, 로그영역의 w 식과 층류저층영역의 w 식을 결합하여 벽에 인접한 바로 다음 노드 점의 위치를 제한하는 k - ϵ 난류 모델보다 더 간편하고 좋은 결과를 얻는다[2-3]. 따라서 본 연구에서는 SST k - w 난류 모델을 사용하였고 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho w u_i) = \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_w \frac{\partial w}{\partial x_j}) + G_w - Y_w + D_w + S_w$$

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (6)$$

위의 방정식에서 k 는 난류 운동에너지(turbulence kinetic energy)를 말하며, w 는 비소멸률(specific dissipation rate)을 나타낸다. $\bar{G}_k$ 은 평균 속도 구배에 의한 난류 운동에너지의 발생을 나타내며, G_w 은 비소멸률 w 의 생성을 나타내고, Y_k 와 Y_w 은 난류에 의한 각각 k 와 w 의 소멸을 의미한다. 또한, D_k 는 Cross-diffusion term을 나타내며, S_k S_w 은 소스항을, Γ 는 난류 확산계수를 나타낸다.

2.2 격자 구조

펌프의 성능은 압력과 속도의 영향을 받기 때문에 흡입구, 회전차(impeller), 송출구의 설계가 중요하다. 따라서 본 연구에서는 펌프의 최적효율을 얻기 위하여 와류실과 회전차의 주요변수 중에 펌프 흡입구 직경, 임펠러 두께, 블레이드 출구폭을 변화시키며 영향을 분석하였다.

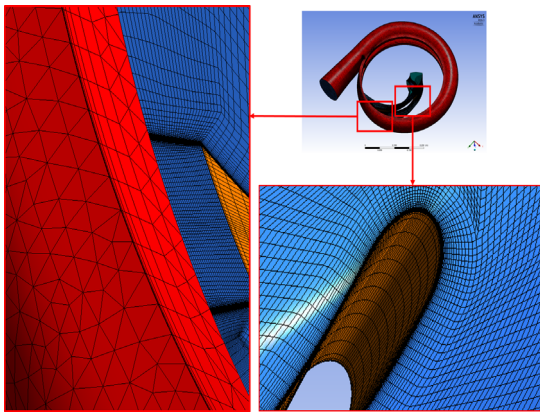


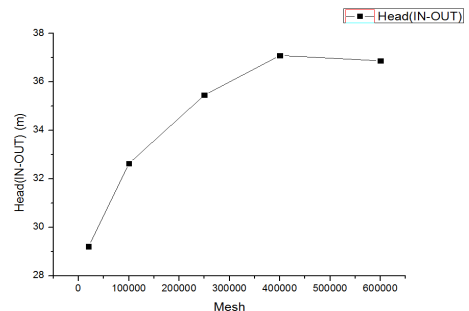
Fig. 2. Computational mesh of marine sea water pump

Fig. 2는 본 연구에서 수치해석한 펌프의 설계모형을 나타낸다. 격자는 비정렬 격자를 사용하였고 벽면효과를 고려하여 벽면 주위에 격자를 조밀하게 구성하였고 구조가 복잡한 유동 공간은 조밀하게 격자를 구성하였다. 격자의 개수는 해석시간과 비례하기 때문에 구조가 단순하

고 벽에서 먼 곳의 격자를 비율적으로 계산하여 격자의 간격이 커지도록 조정하였다.

해석영역 내부는 회전차를 포함하는 회전부와 입구, 케이스 및 출구관의 정지부를 갖는 미끄럼 격자(sliding mesh modeling)를 사용하고 회전부에 일정 회전수를 부여하여 회전차가 회전하는 것을 모사하였다. 따라서 회전부의 면들은 상대좌표계에서 정지된 no-slip 조건의 벽으로 설정하였고, 정지부의 면들은 no-slip 조건의 벽으로 처리하였으며, 회전부와 정지부의 경계면은 인터페이스 처리를 하여 경계면에서의 정보전달 방식을 사용하였다.

수치해(numerical solution)의 정확성에 영향을 미치는 인자로는 계산격자수, 격자계의 구조, 수치도식(numerical scheme) 등을 비롯한 여러 가지가 있으나, 복잡한 3차원 유동해석에서는 격자계의 구조와 계산격자수가 계산의 정확성에 미치는 영향이 크다[4]. 본 연구에서는 임펠러에는 육면체 격자(hexahedron mesh)를 와류실에는 사면체 격자를 사용하여 해석해의 정확도를 확보하는 동시에 격자수를 최소화하여 수치해석을 수행하였다. 일반적으로 격자의 수가 많을수록 수치해의 정확도가 높으나, 해석시간은 격자수가 많아짐에 따라 비례적으로 늘어나므로 효율적 경제적인 격자수를 파악하기 위해서 Fig. 3과 같이 임펠러의 경우 60만개, 와류실은 100만개 까지 격자수를 구성하여 민감도 분석을 수행하였다. 수치해석 결과 임펠러의 경우 40만개 이상, 와류실의 경우 90만개 이상의 격자수를 가져야 하는 것을 알 수 있다. 따라서 각각의 수치해석 과정에서도 이 조건을 충족시키며 해석을 수행하였다.



(a)

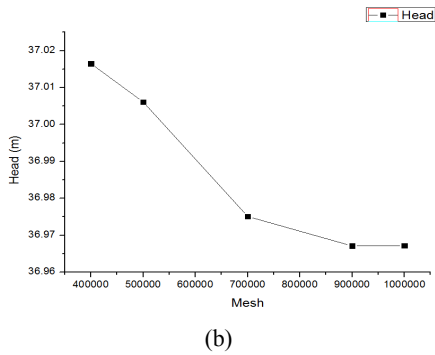


Fig. 3. Grid dependency test on different mesh number
(a) impeller (b) volute

2.3 경계 조건

해수 펌프의 내부 유동 해석을 위해서 사용한 경계 조건으로 입구 부분에 압력조건을, 출구 부분에 유량조건을 적용하였다. 또한 정지해 있는 입·출구 파이프와 회전하는 부분인 펌프와의 접합면에 서로 다른 노드(node)를 시간에 따라 연결하기 위해 인터페이스(interface) 경계 조건을 사용하였다. 로터와 베인은 벽 경계 조건인 비활(no-slip) 조건을 사용하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 유동의 계산영역 경계면은 입구경계면(inlet boundary), 출구경계면(outlet boundary), 벽경계면으로 나누고 회전하는 임펠러를 모사하기 위해서 수치해석 경우별로 회전부에 회전수를 설정하였고, 임펠러의 벽은 상대좌표계에서 정지된 no-slip 조건의 벽으로 설정하였다. 또한 정지부의 벽면들은 no-slip 조건의 벽으로 처리하였다.

3. 유동해석

양정 37 m, 유량 $2 \text{ m}^3/\text{min}$ 을 갖는 해수 펌프를 설계하기 위해 펌프 성능에 영향을 미치는 회전차와 와류실의 주요 설계인자를 변화시키며 설계 목표치인 유량과 압력에서 높은 효율을 나타내는 최적 설계를 수행하였다. Fig. 4는 유량에 따른 양정과 효율 곡선을 나타낸다. 주요설계변수인 $t = 6 \text{ mm}$, $D = 139 \text{ mm}$, $b = 22 \text{ mm}$ 에서 설계 목표치인 유량과 압력 근처에서 최대 효율을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 최적설계 조건에서 회전차 내의 속도분포와 압력분포를 나타낸다. 최적설계 된 펌프의 압력 변화를 나타낸 것으로 임펠러의 회전력으로 상승한 압력에너지는

와류실로 전달되며, 임펠러 내부의 속도분포로부터 펌프를 통과하는 유체는 유동의 박리현상이 없는 것을 확인할 수 있다.

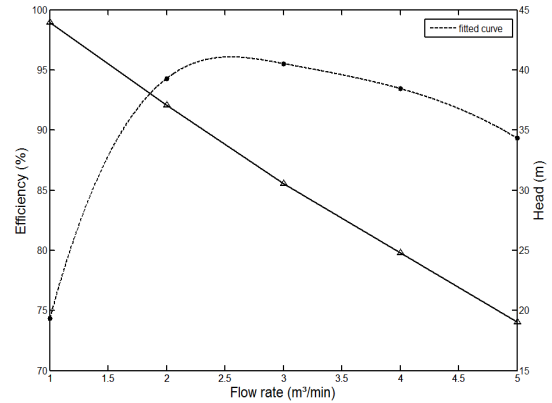


Fig. 4. Pump characteristic curve and efficiency

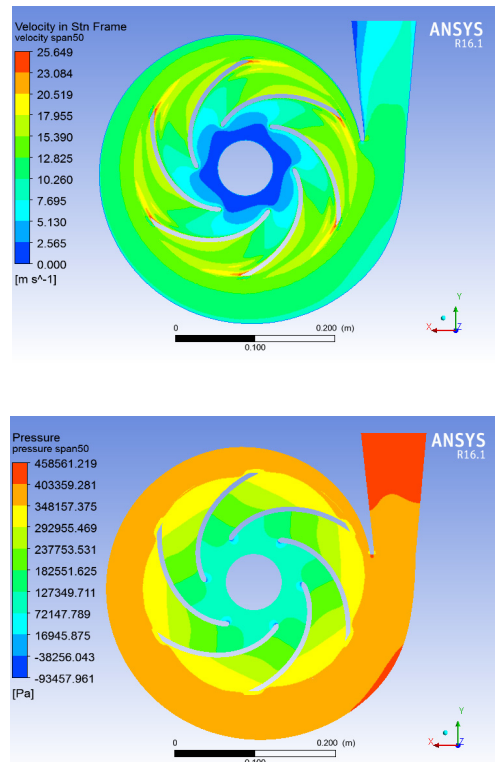


Fig. 5. Velocity and pressure distribution

펌프 성능에 영향을 미치는 여러 인자 중에 임펠러 두께가 펌프 내부 유동 특성에 미치는 영향에 대한 결과를 Fig. 6

에 나타났다. 펌프 임펠러의 두께는 회전차를 통하여 와류실로 들어가는 작동유체의 속도에 영향을 주는 변수로 임펠러 두께가 6 mm 까지 효율이 증가하다가 이후 10 mm 까지는 효율이 거의 일정한 것을 알 수 있다. 임펠러의 두께는 임펠러의 재료에 따라 제한을 받는다. 금속 임펠러의 경우 임펠러 외경이 200 mm 이하일 경우 무게를 고려하여 2-3 mm 이하를 추천한다. 그러나 탄소섬유를 사용한 임펠러는 금속에 비해 경량이므로 최대효율을 나타내는 두께를 선택할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 무게를 고려하여 두께 6 mm를 선택하였다.

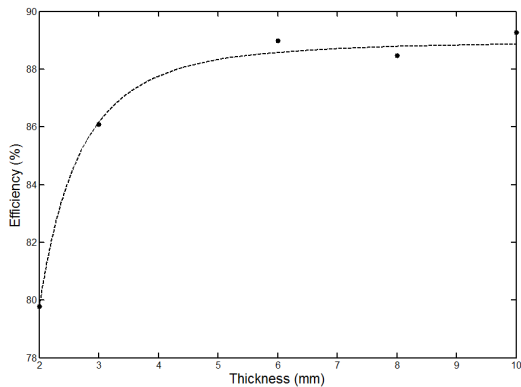


Fig. 6. Effect of impeller thickness on pump efficiency

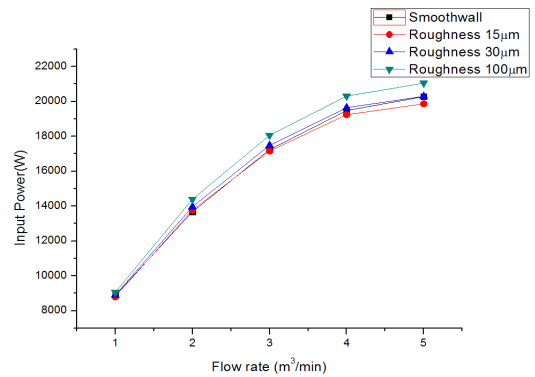
펌프의 표면 거칠기에 따른 펌프의 성능특성을 해석하였다. Fig. 7은 펌프의 표면 거칠기에 따른 펌프의 양정, 축동력, 효율을 나타낸다. 펌프의 효율은 CFD 해석을 통하여 구한 압력과 토크로 산출할 수 있으며 다음의 식에서 구할 수 있다.

$$Power_r = \rho g Q H \quad (\text{수동력}) \quad (7)$$

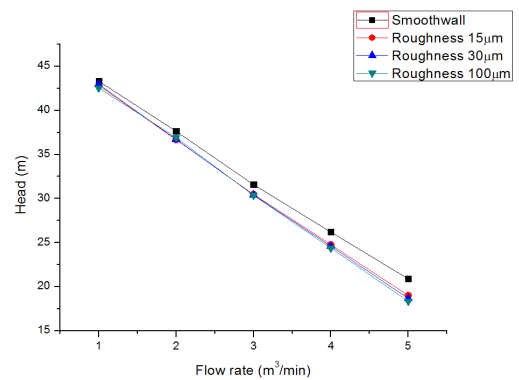
$$Power_s = T \cdot \frac{2\pi N}{60} \quad (\text{축동력}) \quad (8)$$

$$\eta = \frac{Power_r}{Power_s} = \frac{\rho g Q H}{T \cdot \frac{2\pi N}{60}} \quad (9)$$

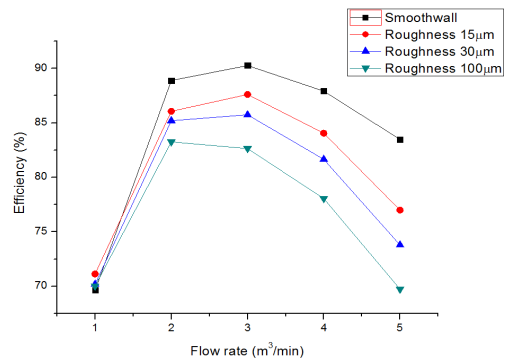
펌프 효율을 위 식과 같이 수동력과 축동력의 비로 나타낸다. 펌프 최적설계 시 펌프의 수동력을 상승시키면 축동력도 상승하는 경향을 보인다. 따라서 축동력의 변화를 최소화하고 수동력을 상승시키는 변수를 찾는 것이 펌프 최적설계에서 중요하다[5-6].



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Effect of surface roughness on pump performance characteristics with flow rate (a) Input power (b) Head (c) Efficiency

난류유동에서 표면 거칠기를 고려할 경우 벽 근처에서의 대수속도분포는 매끄러운 표면과 비교하여 속도분포의 기울기는 변하지 않고 속도분포가 종축으로 이동하여 감소하게 된다. 즉 다음 식과 같이 상수 B 만 ΔB 만큼 줄어든다.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B - \Delta B \quad (10)$$

ΔB 는 평균조도높이(h)에 따라 변하게 되고 다음과 같은 함수로 표현된다.

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln \left(1 + 0.3 \frac{hu_r}{\nu} \right) \quad (11)$$

FLUENT의 경우 $k-\omega$ 난류모델의 경우 계산의 정확성 및 수렴성을 높이기 위해 벽근처에서 벽법칙과 점성저층의 속도분포를 결합하여 사용한다. 벽법칙을 사용할 경우 표면 거칠기의 영향을 위 식을 사용하여 고려하게 된다.

표면 거칠기가 증가하면 축동력은 증가하나 양정이 감소하므로 효율이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 표면 거칠기가 증가하면 마찰계수가 커져서 벽면전단응력을 증가시키기 때문이다. 표면 거칠기를 $100\mu\text{m}$ 로 고려할 경우 설계유량에서 효율이 7 %까지 떨어지는 것을 알 수 있다.

유량의 증가에 따라 양정이 감소하는 것을 알 수 있고 표면 거칠기가 클수록 같은 유량에서 양정이 줄어드는 것을 알 수 있다. 유량에 따른 효율곡선으로부터 표면 거칠기가 클수록 효율이 감소하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

소형선박용 해수펌프의 최적 설계를 CFD 수치해석을 통해 수행하였고 임펠러의 두께, 표면 거칠기와 같은 주요 인자의 영향에 따른 펌프의 성능을 해석하여 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 소형 선박에 사용되는 해수펌프의 최적설계를 수행하여 양정 37 m, 유량 $2\text{ m}^3/\text{min}$ 부근에서 높은 효율을 나타내는 주요변수에 대한 설계 자료를 도출하였다.
- (2) 펌프성능에 영향을 미치는 주요 인자 중에 임펠러 두께는 무게 때문에 임펠러의 재료에 따라 제한을 받는다. 본 연구에서는 임펠러 두께가 6 mm 까지 효율이 증가하다가 10 mm 까지 거의 일정한 효율을 나타낸다. 탄소섬유를 사용한 임펠러는 금속에 비해 경량이므로 6 mm의 두께를 선정하였다

- (3) 펌프의 표면 거칠기에 따른 펌프의 성능특성을 해석하였다. 수치해석으로 구한 펌프의 유량-양정 특성곡선으로부터 표면 거칠기가 클수록 같은 유량에서 양정이 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 표면 거칠기가 클수록 효율이 감소한다.

References

- [1] S. L. Dixon, Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, Butterworth Heinemann, pp. 15-80, 1998.
- [2] Y. S. Choi, Y. K. Lee, S. S. Hong, S. Y. Kang, "Performance Analysis of the Centrifugal Pump Impeller Using Commercial CFD Code", Journal of Fluid Machinery, Vol. 4, No. 1, pp. 38-45, 2001.
- [3] D. S. Kim, Y. S. Choi, S. G. Jeon, J. Y. Yoon, "A Numerical Study on the Effect of Volute Geometry on the Performance of Centrifugal Pump", Proceedings of the KFMA Annual meeting, pp. 497-502, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/KFMA.2006.9.2.044>
- [4] J. H. Kim, Y. S. Choi, K. Y. Lee, J. Y. Yoon, "Effect of inlet shape on the performance of a submerged cargo pump", Journal of Fluid Machinery, Vol. 10, No. 6, pp. 44-49, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/KFMA.2007.10.6.044>
- [5] J. E. Yun, J. H. Kim, "Effect of Surface Roughness on Performance Analysis of Centrifugal Pump for Wastewater Transport," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 38, No.2, pp. 147-153, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.2.147>
- [6] S. Kim, Y. S. Choi, J. Y. Yoon, D. S. Kim, "Design Optimization of Centrifugal Pump Impeller Using DOE", Journal of Fluid Machinery, Vol. 11, No. 3, pp. 36-42, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/IJFMS.2009.2.2.172>

정 선 용(Kye-Bock Lee)

[준회원]



- 2015년 2월 : 충북대학교 기계공학부 (공학사)
- 2015년 8월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학과 대학원 석사과정

<관심분야>
유체기계, 전산유체

서 형 석(Hyoung-seock Seo)

[정회원]



- 2004년 8월 : University of Utah, Mechanical Engineering (Master of Science)
- 2008년 9월 : University of California at Los Angeles, Mechanical Engineering (Ph. D)
- 2010년 10월 ~ 2012년 2월 : 삼성중공업, 책임연구원

• 2012년 3월 ~ 현재 : 중소조선연구원, 책임연구원

<관심분야>

구조해석, 복합소재, 조선해양 구조물 최적화 설계

이 석 호(Seok-Ho Rhi)

[정회원]



- 1996년 3월 : 캐나다 오타와대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2000년 10월 : 캐나다 오타와대학교 기계공학과 (기계공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

열교환기, 히트파이프, 열전발전, 열공학

이 계 복(Kye-Bock Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1983년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1987년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

난류유동, 유체기계, 전산유체