

소형선박용 200마력급 Water Jet의 유동특성에 관한 수치해석

이중섭*, 정재훈⁺, 이종수⁺, 윤지훈⁺⁺

(논문접수일 2011. 06. 02, 수정일 2011. 07. 26, 심사완료일 2011. 08. 02)

A Numerical Analysis on Flow Characteristic of 200HP Grade Water Jet for Small Ship

Chung Seob Yi*, Jae Hoon Jeong⁺, Jong Su Lee⁺, Ji Hun Yun⁺⁺

Abstract

Water jet propulsion system has low efficiency than screw propeller at low speed, but has been applied in high speed ship due to its better cavitation performance and high rotation capacity. In this study, a numerical analysis was conducted to understand the flow in the propulsion system of 200HP grade water jet for small ship. As the result, it could be confirmed that total pressure and force of the flow was increased through the impeller and the straight-ability of discharging flow to outlet was improved by guide vane. Also, the reliability of numerical analysis was secured by comparing peripheral velocity calculated by design values with that calculated by numerical analysis.

Key Words : Water jet(물분사), Impeller(임펠러), Stator(스테이터), CFD(전산유체역학)

1. 서론

현재 선박의 추진시스템은 거의 스크류 프로펠러 추진기에 의해 추진력이 발생할 수 있도록 되어 있으며, 그 장치구성에 따라 여러 가지로 나눌 수 있다. 이는 다른 추진장치에 비해 구조가 간단하고, 넓은 속도범위 내에서 추진효율이 비교적 높으면서 제작비용도 높지 않기 때문에 선박 전반적으로 널리 적용되는 추진시스템이다. 그러나 Water Jet 추진 장치는 저속에서 추진 효율이 일반 스크류 프로펠러에 비해 낮지만, 캐비테이션 성능이 우수하여 임펠러의 고속회전이 가능하기 때문에 고속선의 추진기로 많이 사용되고 있다.

Water jet 추진장치는 선저의 흡입구로 유입된 물을 임펠러와 스테이터로 압력과 속도를 증가시킨 후 선미로 향한 토출구인 노즐을 통해 분사함으로써 발생하는 운동량의 차이로 추진

된다. 노즐을 통해 분사된 물의 방향은 Steering Duct와 Reverse Bucket을 이용하여 분사 방향을 조절할 수 있도록 되어있다.

외국의 경우 다수의 제조 메이커가 장기간에 걸쳐 개발을 완료하고, 다양한 규격을 갖추고 있어 고부가가치 상품으로 인식하고 있어 현재에도 고출력 Water Jet의 개발을 적극적으로 추진 중에 있다. 그러나 국내의 경우 수요가 적고, 특수한 경우 선급관련 규격을 만족하지 못해 해외 선진국에 비해 기술력과 관련규격이 미비한 것도 사실이다.

Roberts 등⁽¹⁾은 흡입부 형상과 각도에 따른 유동특성을 풍동 실험을 통해 유동분포 형태를 연구하였고, Bonaiuti 등⁽²⁾은 CFD를 이용하여 펌프와 임펠러에 대한 형상에 대한 Parametric 연구를 통해 최적화된 모델에 대하여 실험을 통해 검증하는 연구를 수행하였다. 또한 Kim 등⁽³⁾은 수륙양용 궤도차량용 Water jet의 임펠러 Tip Clearance 따른 저항변화와 출력변화에 대한

* 경상대학교 BK21(첨단기계항공) (cs_yi@hotmail.com)

주소: 경상남도 진주시 가좌동 진주대로 501

+ 경인테크 기술연구소

++ 경상대학교 대학원

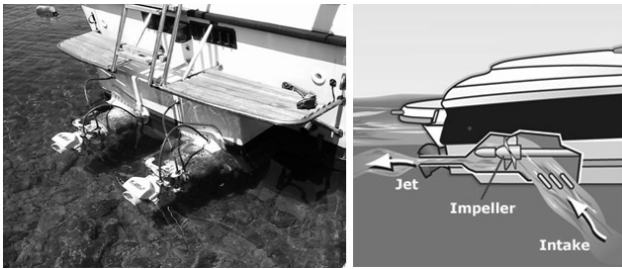


Fig. 1 Inboard type water jet

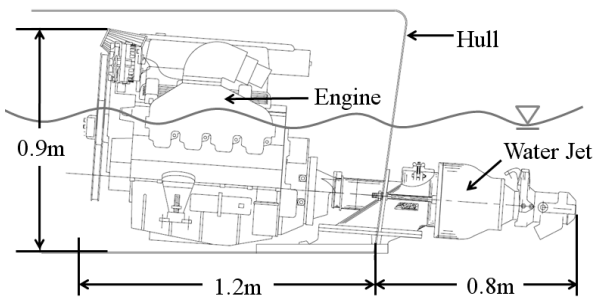


Fig. 2 Position of water jet

연구를 수행하였다.

Water Jet 추진 장치의 가장 큰 장점 중에 하나는 수심이 얇은 곳에서도 사용이 가능하며, 스크류 프로펠러와 같이 수중에서 돌출되어 회전하는 장치가 없기 때문에 인명피해나 수중생물에 대한 피해가 없는 것이 장점이다. 따라서 국내 서해나 남해안의 근해에서 운항되는 어선 및 양식장 관리어선의 경우 Water Jet 추진 장치를 적용할 경우 적합할 것으로 기대된다. 또한 전진과 후진이 스크류 프로펠러에 비해 신속하게 이루어질 수 있어 기동성이 우수한 반면, 스크류 프로펠러에 비해 무겁고, 펌프 임펠러에 대한 검사 및 유지보수가 불편하다. 그리고 입구부 캐비테이션에 대한 대책이 필요한 것도 큰 단점으로 작용하고 있다⁽⁴⁻⁶⁾.

Fig. 1은 본 연구대상과 같은 Inboard type의 Water jet 추진 장치를 설치한 선박을 보여주고 있으며, Fig. 2는 전반적인 엔진과 Water jet 추진 장치가 결합되었을 경우에 대한 크기를 대략적으로 나타내고 있다. 본 연구는 국내 연근해용으로 200마력 정도의 소형선박에 적용되는 Water jet 추진 장치 내부 유동을 수치해석을 통해 분석하고자 한다.

2. 수치해석방법

Fig. 3은 Water jet의 내부형상을 나타내고 있으며, Fig. 4는 CATIA V5를 통해 설계된 Water jet에 대한 형상을 나타내고 있다. 이 모델을 통해 유동해석을 수행하기 위해 Fig. 5와 같이 유체영역을 모델링하여 경계조건을 부여하였다.

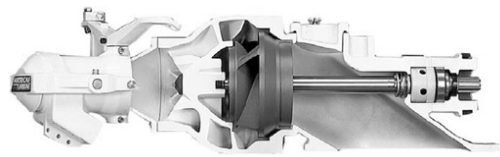


Fig. 3 Inner shape of water jet

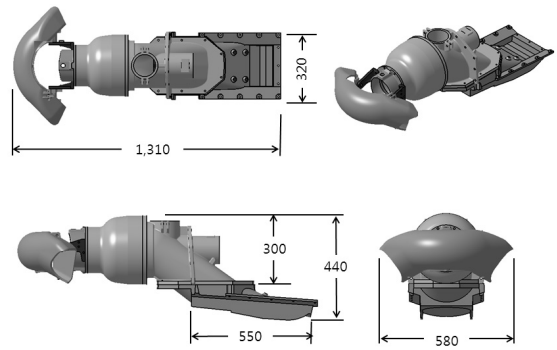


Fig. 4 3D modeling of water jet

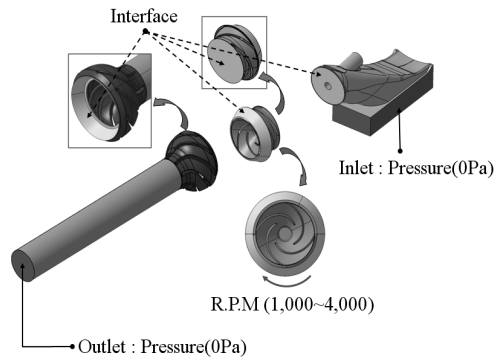


Fig. 5 Boundary conditions

입구와 출구에서의 경계조건은 수중(水中)이지만 해수면에 거의 가깝기 때문에 대기압이 작용하고, 표면장력은 무시하는 것으로 가정하고, 입구에서 5%의 난류강도와 배기관 직경의 10%인 난류 혼합거리를 설정하는 조건을 부여하였다. 또한 출구에서의 유동 안정성을 확보하기 위해 각각의 직경에 6배로 증가시켜 계산을 수행하였다⁽⁵⁻⁹⁾.

작동유체가 회전영역인 임펠러와 고정영역인 케이싱 및 배관 사이는 두 영역의 물리량이 전달될 수 있도록 Interface를 설치하여 MRF(Moving Reference Frame)기법을 적용하여 정상상태일 때를 가정하여 계산을 수행하였다. Water jet의 임펠러 회전 속도는 1,000rpm ~ 4,000rpm까지 500rpm씩 증가시켜 입출구의 유동형태와 배압분포를 확인하였다.

Fig. 6은 Water jet 추진 장치에 대한 유동특성을 확보하기 위해 범용 CFD코드인 STAR-CCM+를 사용하여 약 60만개의 다면체 격자(Polyhedral)를 생성하여 계산을 수행하였다. 난류

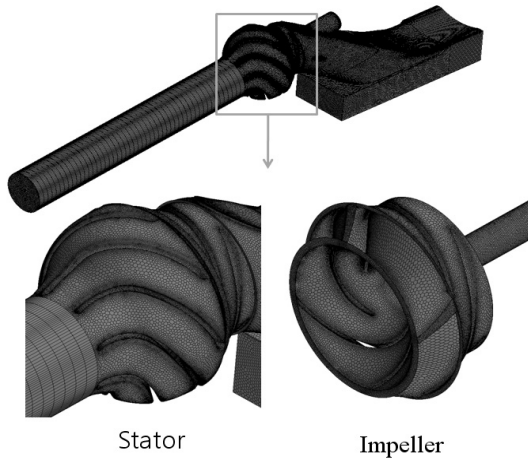


Fig. 6 Calculation grid system

모델은 Realizable k-ε Two-Layer 모델을 적용하였고, 속도장과 압력장의 연결은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)에 따른 Segregate Flow 알고리즘을 적용하여 종속변수 잔차 값이 10^{-3} 이하일 때 수렴한 것으로 판단하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 속도분포 해석결과

수치해석에서 정확성을 객관적으로 판단하기 위해 식 (1)을 통해 이론적으로 임펠러 주속도를 구해 수치해석 결과와 비교하였다.

$$D = \frac{60u}{\pi N} [m]$$

$$u = \frac{\pi DN}{60} = \frac{\pi \times 0.2455 \times 4000}{60} = 51.39 (m/s) \quad (1)$$

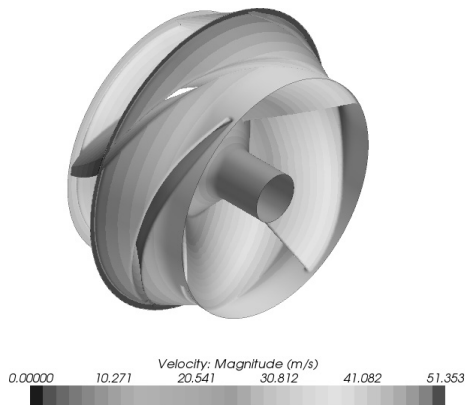


Fig. 7 Velocity distribution on the impeller surface

여기서, u 는 임펠러 주속도, D 는 임펠러 외경, N 은 회전수를 나타낸다.

임펠러에 대한 속도분포 결과 Fig. 7과 같이 이론속도는 51.39(m/s)이며, 수치해석에서 임펠러 속도는 51.35(m/s)로 이론과 거의 동일한 해석 결과를 얻을 수 있다. 따라서 수치해석에 대한 검증은 충분히 확인되었다고 판단된다.

수치해석에서는 케이싱 위치에 따라 속도분포가 다소 다르게 나타났다. 그 이유는 케이싱 와류실의 위치에 따라 압력분포가 다르기 때문에 그 압력의 영향으로 Impeller 주속도가 국소적으로 약간의 차이를 보였다. 그러나 전반적인 속도분포는 이론속도와 유사하였다. 따라서 본 수치해석 결과에 대한 신뢰를 보장할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 Water jet 추진 장치 중심단면에서의 속도크기 분포를 나타내고 있다. 회전수가 증가할수록 임펠러 출구에서의 속도가 증가함을 확인할 수 있었다. 임펠러를 빠져나온 작동유체는 양쪽 Bowl을 통과하여 Bowl 출구에서 하나로 합쳐져서 출구로 빠져나가는 구조로 되어있다. 또한 Bowl 내부에는 임펠러에서 발생한 에너지를 추력으로 변환시키기 위해 Stator를 설치하여 토출속도를 고루 분포시켜 추진력을 증가시킬 수 있는 구조로 되어있다.

Water jet 추진 장치의 흡입쪽을 보면 작동유체를 임펠러 입구로 유입하기 위한 각도로 꺾여 있다. 실제 유입방향으로 선체가 진행하기 때문에 임펠러로 유체진행 방향은 자연스럽게 이루어져 흡입부에서 유동박리는 발생하지 않는다. 그러나 본 해석에서는 엔진회전수 증가에 따라 선체속도를 모르기 때문에 정지된 상태에서 흡입하여 토출되는 유동흐름으로 되어있다. 따라서 임펠러가 회전하면서 발생하는 임펠러 입구쪽 부압에 의해 흡입되는데 임펠러 입구와의 각도로 인해 임펠러 위쪽은 흡입이 잘되는 반면 아래쪽은 흡입시 저항이 발생하게 된다. 결국, 위쪽과 아래쪽과의 속도차가 발생함에 따라 임펠러 입구에서 흡입부까지 유동박리가 발생하게 된다. 이러한 입구쪽에서 발생한 속도차는 출구에서도 마찬가지로 토출부에서 속도차가 발생하여 토출유동이 Vortex를 발생시켜 회전 하면서 토출된다. 이렇게 되면 토출속도가 감소하게 되고, 결국 선체가 추진하는데 불리하게 작용하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 Bowl에 Stator를 설치하여 Vortex가 발생하는 것을 억제시켜 토출부 가장자리와 중심부에서의 속도차를 제거할 수 있었다.

또한, 일반적으로 임펠러 단면에서 속도분포를 보면 Blade 사이에 속도변화는 적은 것이 대체적이나 본 연구에 적용된 임펠러의 경우 Blade 개수가 적어 간격이 길기 때문에 Blade사이의 속도차가 많이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 임펠러 토출구에서 균일한 속도로 토출되지 못하고 Blade 간격에 의한 맥동유동이 발생할 가능성이 있는 것으로 판단된다. 그러

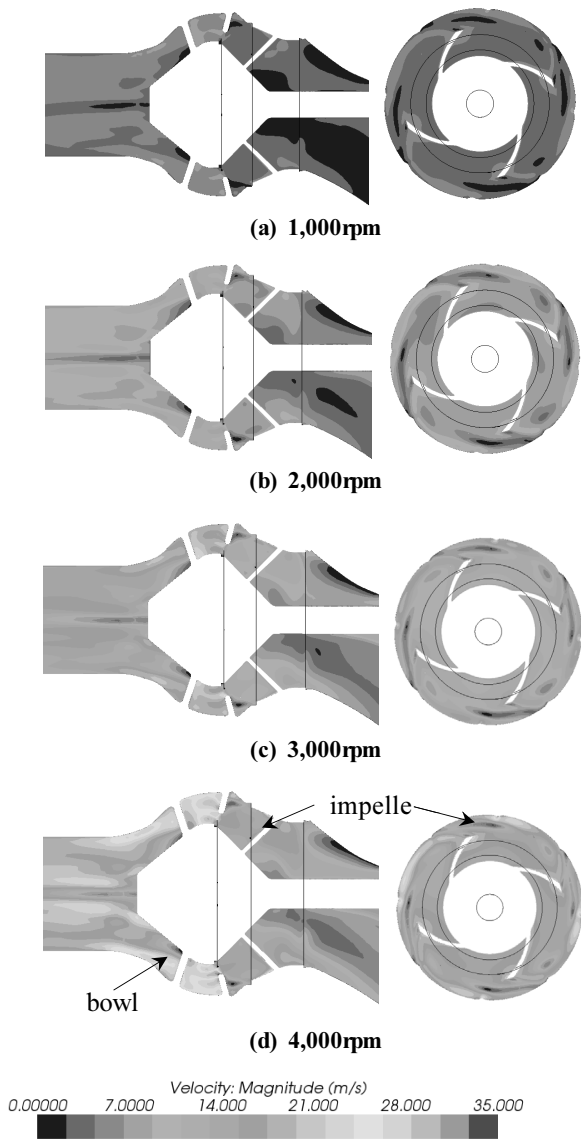


Fig. 8 Distributions of velocity magnitude in the bowl and impeller

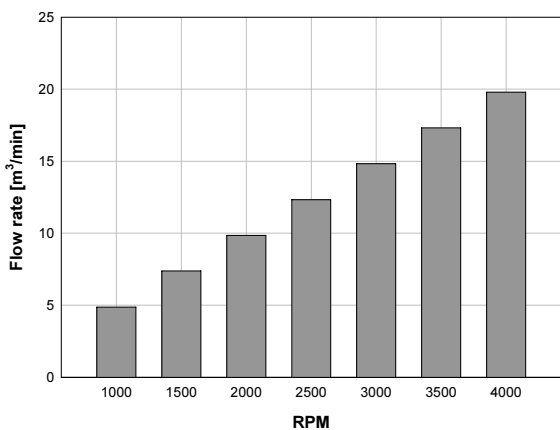


Fig. 9 Flow rates at water jet outlet according to engine speed

나 Water jet 사용목적상 이물질이 유입될 경우 오히려 Blade 개수가 많을 경우 불리할 수 있다.

Fig. 9는 출구로 토출되는 체적유량을 나타내고 있다. 회전수가 1,000rpm일 경우 약 5m³/min로 토출되고 있으며, 회전수가 증가할수록 토출유량이 증가하여 4,000rpm에서 약 20m³/min의 토출유량을 확보할 수 있었다. 작동유체가 Water이기 때문에 비압축성 유체이므로 회전수 증가에 따른 토출유량의 증가는 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

3.2 압력분포 해석결과

Fig. 10은 Water jet 추진 장치 중심단면의 전압(Total pressure) 분포를 나타내고 있다. 출구가 개방되어 있기 때문에 실제 정압(Static pressure)은 대기압에 가깝게 된다. 임펠러에서 압력이 상승하였다가 출구로 빠져나가면서 압력회복을 이루는데 이때

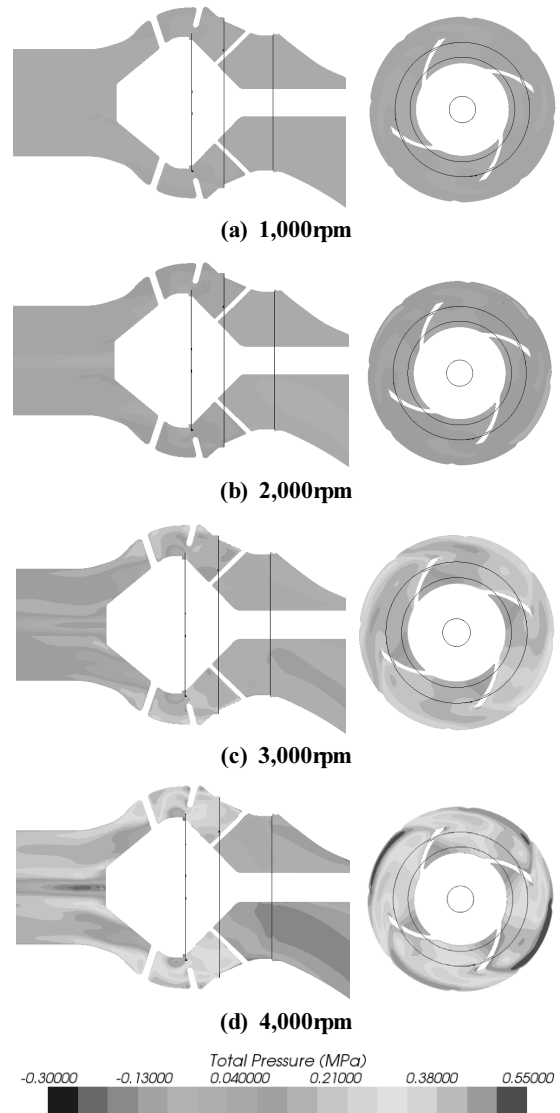


Fig. 10 Distributions of total pressure in the bowl and impeller

압력에너지는 줄어들고 속도에너지가 증가되어 속도압인 동압 (Dynamic pressure)이 크게 증가하게 된다.

따라서 본 연구에서는 정압과 동압의 합으로 이루어진 전압으로 압력분포를 확인하고자 한다. 이는 Water jet 특성상 정압보다 동압이 크게 발생하여 출구로 작동유체의 유속을 증가시키는 것이 더욱 중요하기 때문이다. 따라서 정성적인 압력분포를 분석할 경우 정압으로 판단하는데 이 경우는 흡입부에서 부압이 발생하여 임펠러를 통과하면서 압력상승을 통해 케이싱을 빠져나와 출구로 향하면서 압력이 회복되는 특성을 가지고 있기 때문에 회전수 증가에 따른 토출구에서 발생하는 압력분포를 분석하기에는 부적합한 것으로 판단되었으므로 전압을 기준으로 압력분포를 평가하였다.

임펠러 입구의 경우 회전에 의해 흡입되기 때문에 부압이 발생하고 임펠러를 통과하면서 압력이 점차 상승되어 Bow에서 압력이 크게 증가되어 출구로 빠져나가는 것을 확인할 수 있었다. 또한 속도분포 결과에서 설명한 바와 같이 흡입부에서 위쪽과 아래쪽의 압력차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 유동박리에 의해 유동이 정체되고 이는 결국 정압상승으로 이어져 속도는 감소하게 된다. 따라서 결국 속도압인 동압이 감소하여 전압이 낮아지는 현상을 초래하였다. 이는 실제 운전시 유동박리가 크게 발생하지 않기 때문에 무시해도 무방할 것으로 사료된다.

Fig. 11은 Water jet 추진 장치 입출구와 임펠러 입출구에서 발생하는 압력차를 나타낸 것이다. Water jet 입구인 흡입부에서는 대기압 상태에서 임펠러가 회전하면서 흡기부압이 발생하게 되는데 그 부압이 대기압 기준에서 약간 낮기 때문에 압력차를 확인하면 거의 Water jet 출구압력과 비슷한 결과를 나타내고 있다. 반면 임펠러의 경우 입구쪽 흡기부압은 비슷하나 임펠러가 회전하면서 토출되는 작동유체의 유속이 급격하게 증가하게 되므로 정압과 동압이 급상승하게 되어 전체의 전압 상승으로 이어지게 된다. 따라서 임펠러에서 발생한 전압은 출

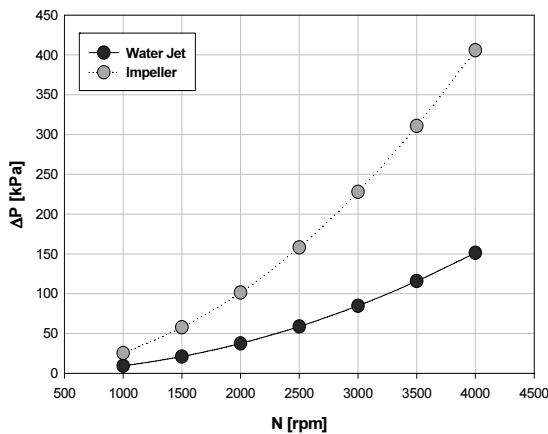


Fig. 11 Comparison of ΔP at water jet and impeller

구로 빠져나가면서 관로마찰과 출구쪽 대기압 작용에 의한 압력회복 등의 요인에 의해 절반 이상으로 압력이 낮아져 토출된다. 이는 결국 압력감소 만큼의 추진력을 잃게 되는 것으로 Bowl의 설계가 아주 중요한 요소임을 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 임펠러에서 발생하는 토크를 나타낸 것이다. 토크는 유동에 의한 임펠러에 발생하는 토크이므로 실제 Water jet의 토크 곡선과는 다를 수 있다. 그 이유는 이론토크이기 때문이다. 그러나 개발모델의 출력을 통해 이론적으로 토크를 계산하면 아래의 식 (2)를 통해 계산할 수 있고, 이 결과를 CFD결과와 비교하면 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

실제 설계시는 안전율을 더하기 때문에 CFD 계산결과에서 안전율 1.1정도를 보정하면 374(N·m)가 나오므로 실제와 유사한 결과를 얻을 수 있다.

$$T = \frac{9549.3 \times kW}{rpm} = \frac{9549.3 \times 150}{3800} = 377 [N \cdot m] \quad (2)$$

Fig. 13은 Water jet 추진 장치에서 위의 식 (2)를 사용하여 축동력을 역산하고, CFD에서 구한 이론동력을 계산하여

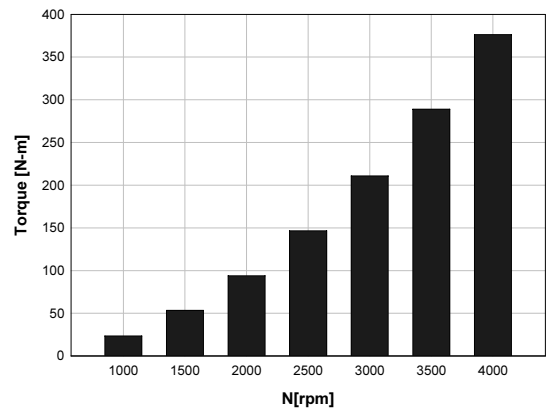


Fig. 12 Distribution of torque from impeller

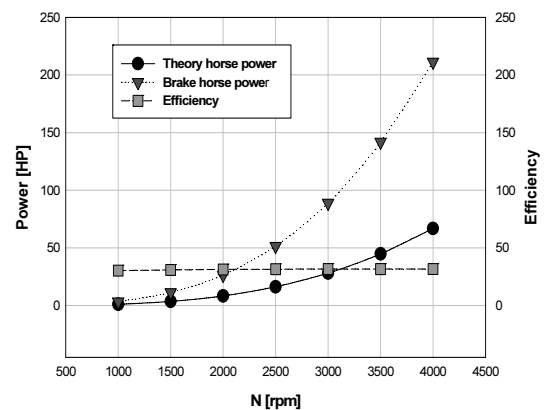


Fig. 13 Comparison of power and efficiency

Water jet의 효율을 구한 것이다. 이론동력은 식 (3)을 통해 구할 수 있으며, 효율은 약 30%에 달하는 것으로 나타났다. 또한 회전수가 낮을 경우 이론동력과 축동력은 유사하지만 회전수가 증가할수록 축동력이 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 따라서 축동력과 이론동력과 차이가 크게 발생함에 따라 효율이 낮게 나타남을 확인할 수 있었다.

$$L_{th}[kW] = \frac{Q[m^3/min] \times Pa[mm.Aq]}{6120} \quad (3)$$

여기서, L_{th} 는 이론동력을 나타내며, Q 는 유량, Pa 는 정압을 나타낸다.

4. 결론

Water jet용 임펠러에 대한 유동해석과 구조해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 유동해석 결과에 대한 신뢰는 임펠러 주속도에 대한 이론 설계 값을 기준으로 판단하였을 경우 수치해석 결과에 대한 신뢰성을 확보하였다.
- (2) 임펠러 입구의 유입각도로 인한 유입속도 차에 의해 임펠러 입구에서 흡입부까지 유동박리가 발생하지만 Bowl에 Stator가 설치되어 있어 Vortex가 발생하는 것을 억제시켜 토출부 가장자리와 중심부에서의 속도차를 제거할 수 있는 구조로 되어 있었다.
- (3) 압력분포 특성은 입구에서 부압이 발생하여 임펠러를 통과 하면서 압력상승을 통해 케이싱을 빠져나와 출구로 향하면서 동압 크게 발생되어 전압상승이 발생하였고, 결국 이 전압상승을 통해 토출되는 유체의 힘이 커지게 되는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 임펠러 입구부에서 작동유체가 예회전하여 유입되고, 출구에서도 선회하면서 토출되는데 Bowl에 설치된 Guide vane에 의해 선회유동을 풀어 출구쪽으로 토출되는 작동 유체의 직진성을 향상시켰음을 확인할 수 있었다.
- (5) 임펠러 표면에서 작동유체에 의해 발생하는 압력은 원심력이 가장 크게 받는 블레이드 출구부에서 가장 높게 나타났다.

후 기

본 연구는 2010년 중소기업기술개발지원 사업에 의해 수행된 결과이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Roberts, J. L., and Walker, G. J., 1998, "Experimental Determination of Ingestion Streamtubes for Waterjet Propulsion Intakes," *13th Australasian Fluid Mechanics Conference*, pp. 107~110.
- (2) Bonaiuti, D., Zangeneh, M., Aartjarvi, R., and Eriksson, J., 2010, "Parametric Design of a Waterjet Pump by Means of Inverse Design, CFD Calculations and Experimental Analyses," *J. Fluids Eng.*, Vol. 132 Issue. 3, 031104.
- (3) Kim, M. C., and Chun, H. H., 2007, "Experimental Investigation into the performance of the Axial-flow-type Waterjet according to the Variation of Impeller Tip Clearance," *Ocean Engineering*, Vol. 34, Issue. 2, pp. 275~283.
- (4) Lee, Y. H., Kim, C. S. and Choi, M. S., 1991, "Water-jet Propulsion," *KOSME*, Vol. 15, No. 2, pp. 126~139.
- (5) Son, Y. R., Lee, J. S. and Choi, W. H., 2004, "Development and Test of Prototype Water-jet Propulsion Boat," *Proceeding of the KWS Fall Annual Conference*, pp. 213~215.
- (6) SNAK, 2009, *Resistance and Propulsion of Ships*, Jisung, Korea, pp. 363~390.
- (7) Kim, M. H., Kim, J. I., and Park, J. S., 2001, "Prediction of Axial Pump Performance using CFD Analysis," *KFMA*, Vol. 6, No. 1, pp. 14~20.
- (8) Hwang, S. C., Yoon, E. S., Oh, H. W., Choi, B. S., Park, M. R., and Ahn, J. W., 2002, "Design and Performance Analysis of Mixed-flow Pump for Waterjet Marine Propulsion," *Proceedings of the KFMA Annual Meeting*, pp. 47~53
- (9) Yi, C. S., Suh, J. S., Song, C. K., and Yoon, J. H., 2010, "A Study on Performance of Cooling Fan for Auto Transmission Oil Cooler in the Large-size Diesel Engine," *KFMA*, Vol. 13, No. 6, pp. 71~76.