

## Waterjet 추진장치의 중량감소 펌프 개발

안종우<sup>†</sup>\*, 김건도\*, 김기섭\*, 박영하\*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소\*

### Development of the Weight Reduction Pump for Waterjet Propulsion

Jong-Woo Ahn<sup>†</sup>\*, Gun-Do Kim\*, Ki-Sup Kim\* and Young-Ha Park\*

Maritime and Ocean Engineering Research Institute (MOERI)/ KORDI\*

#### Abstract

In order to control the weight balance of the waterjet propulsion ship, the pump's weight needed to be decreased. We reduced length of pump hub, overall length of pump and chord length of impeller and stator. To keep pump efficiency and cavitation performance similar to the 1<sup>st</sup> design pump, optimum design and experiment were conducted. This paper describes experimental method and numerical analysis for pump design. At the blade design stage, performance analysis of the pump is conducted using commercial CFD codes (BladeGen<sup>†</sup>, CFX-10). Required performance and cavitation characteristics of the design pumps were measured and observed using the stand-alone test apparatus. The weight of the pump was successfully decreased through a series of pump design processes composed of blade design, performance analysis and model test.

※Keywords: Mixed-flow pump(사류형펌프), Waterjet propulsion(waterjet 추진장치), Weight reduction(중량감소), Pump design(펌프설계)

#### 1. 서론

Waterjet 추진장치는 펌프, 유도관, 분사노즐, 조향장치 등으로 구성되는데, Waterjet 추진장치를 장착한 선박의 전반적인 성능을 평가하기 위해서는 유도관, 펌프, 노즐 각각의 단독 성능이 우선적으로 평가되어야 한다. 특히 펌프는 임펠러와 스

테이터로 구성되는데, 고속선박용 waterjet 추진장치에 있어서 가장 중요한 핵심 요소이다. 따라서, 성능이 우수한 waterjet 추진장치를 개발하려면 최적의 펌프를 설계하는 것이 우선적으로 요구된다. 일반적으로 펌프 초기설계 단계에서 대상선의 저항성능과 기존에 DB 자료를 이용하여 펌프의 입구직경, 요구유량, 요구양정 등의 기본적인 설계 자료를 얻는다. 또한 펌프의 종류도 결정할 수 있다. 대상선은 추진축은 3축으로 3기의 Waterjet 모두 사류형 펌프를 요구한다.

접수일: 2009년 10월 18일, 승인일: 2009년 12월 10일  
† 교신저자: ajwprop@moeri.re.kr, 042-868-7254

초기 설계자료를 이용하여 추진효율 및 캐비테이션 성능을 고려하여 대상선에 최적의 펌프를 1차 설계하였다(1st pump). 그러나, 대상선의 중량 초과로 전반적인 중량감소가 요구되었다. Waterjet 추진장치도 중량감소를 요구받은 바, 펌프의 중량을 감소하지 않을 수 없었다. 펌프의 중량감소는 1개의 중앙(center)과 2개의 측면(wing) 펌프 모두 요구되었지만, 중량감소를 위한 설계과정과 개념이 비슷하므로 본 논문에서는 중앙펌프만을 언급한다. 펌프중량을 감소하기 위하여 임펠러와 스테이터의 허브 및 코오드 길이, 펌프의 전반적인 길이 등이 감소되었다. 1차설계 펌프와 비슷한 효율과 캐비테이션 성능을 유지하는 펌프를 개발하기 위하여, 최적설계, 성능해석 및 모형시험 등으로 구성되는 개발과정이 반복적으로 수행되었다.

본 연구를 위하여 3개의 펌프가 기존(Oh and Kim 2001, Oh et al. 2003) 및 최근 개발된(Ahn 2008) 설계방법에 따라 설계되었다. 설계된 3개의 펌프는 입구직경 190mm인 모형으로 제작되어 중형캐비테이션터널에 설치된 펌프단독 시험장치에서 성능이 계측되었으며, 캐비테이션 특성이 관찰되었다(Ahn 2005). 초기 단계에서 설계펌프의 성능해석은 상용 CFD 코드인 BladeGen<sup>+</sup>를 이용하여 수행하였으며, 더욱 정도높은 성능해석을 위하여 임펠러와 스테이터를 동시에 해석하고, 임펠러 날개끝 간격을 고려할 수 있는 상용 CFD 코드인 CFX-10을 사용하였다.

## 2. 펌프의 설계

### 2.1 설계조건

Pump-10, Pump-12, Pump-14로서 명명된 3개의 사류형 펌프들은 기존에 개발된 설계과정(Pump-10 & 12)과 당소에서 개발된 설계과정(Pump-14)에 따라 설계되었다. 설계조건은 당소에서 개발된 초기성능 해석프로그램과 대상선의 저항 성능해석 결과를 사용하여 도출된다. Table 1은 대상선의 center 펌프의 설계조건을 보여주고, 성능해석을 위한 무차원계수들은 Table 2에 정리되어 있다.

Table 1 Design condition of the center pump

Item	Design condition
Inlet Diameter, $D_i$	108 cm
Ship Speed, $V_s$	40 knots
Rotational speed	660 RPM
Required Power	6665 kW
Design $J_Q$	0.9087
Design $C_H$	3.3107
Design $K_Q$	0.5262

Table 2 Non-dimensional coefficient

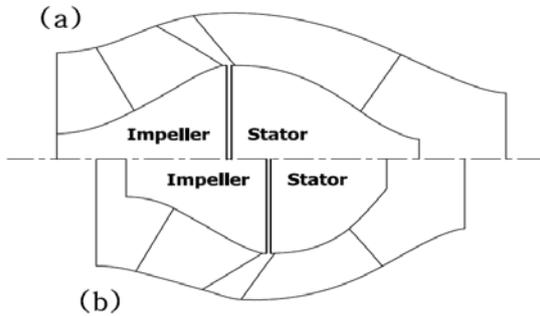
Coeff.	Explanation
$C_H$	Head coefficient, $gH/r^2D^2$
$J_Q$	Flowrate coefficient, $Q/nD^3$
$K_T$	Thrust coefficient, $T_H/\rho r^2D^4$
$K_Q$	Torque coefficient, $T_Q/\rho r^2D^5$
$\eta$	Pump efficiency, $\rho gHQ/2\pi nT_Q$

### 2.2 중량감소 요구조건

1차 설계펌프는 당소에서 개발되어 왔던 표준펌프의 형상을 사용하여 설계되었다 (Ahn 2005). Fig. 1에 나타난 Pump-10은 대상선의 Waterjet 추진장치에 적합한 효율과 캐비테이션 성능을 만족한다. 그러나, 중량감소가 요구되면서 펌프 각각의 중량도 약 0.5톤 정도 감소되는 것이 요구되었다 (3개의 펌프에서 약 1.5톤 감소). 우선 제작사의 요구사항을 바탕으로 펌프의 주요구성품인 임펠러와 스테이터의 허브길이를 줄이면서 펌프의 전반적 길이 감소하였고, 임펠러와 스테이터 날개의 코오드 길이를 감소하였다. Fig. 2는 표준 및 중량감소펌프의 자오면형상(Meridional view)을 보여주며, Fig. 2-(b)의 형상으로 Pump-12 & 14를 설계하였다.



Fig. 1 3-dimensional shape of Pump-10



(a) Standard Pump (b) Weight reduction pump  
**Fig. 2** Comparison of pump geometry

**2.3 중량감소펌프의 설계**

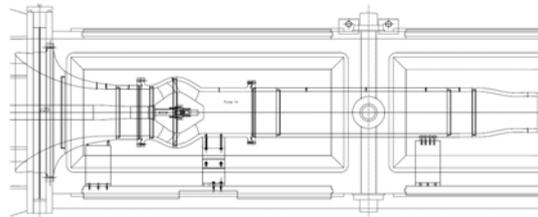
펌프중량을 감소시키기 위하여 Pump-12와 Pump-14를 설계하였다. Pump-12는 기존의 설계 방법을 사용하여 설계하였는데(Yoon 2003, Oh et al. 2003), 요구된 성능을 만족하지 않았다. Pump-14는 이런 문제점을 해결하고자 당소에서 개발된 펌프설계기법에 따라 설계되었다. 펌프 크기의 감소에도 불구하고 펌프효율 및 캐비테이션 성능을 유지하는 것이 설계의 필수적인 요건이었다. 우선 임펠러 날개설계를 위하여 고효율 단면형상을 적용 하였으며, 펌프 하류에서 회전유동을 최소화하였다. 우선 자오면상의 형상, 날개의 입구 및 출구각도 등 기본형상을 도출하였다. 펌프의 길이가 감소되면 펌프 양정 및 효율 등이 떨어진다. Pump-14의 임펠러 입구각도는 Pump-10보다 크게 하고, 날개단면은 NACA66 단면을 기반으로 설계하여 임펠러 토오크를 최소화하고 펌프효율을 증가시키고자 하였다. 기존 펌프설계기법에서는 임의의 날개단면 적용 및 전체적인 날개각도 조절이 어려운 점이 있었다. 당소에서 개발한 펌프설계기법은 단면 및 전체 날개각도 변경이 가능한 특징을 가지고 있다(Ahn et al. 2008). 사류형펌프를 표현하기 위한 날개단면은 동등한 간격으로 구분된 5개의 반경에서 정의된다. 각각의 반경에서 두께, 캠버, 피치분포를 정의하였고, 날개형상 생성프로그램을 이용하여 임펠러 및 스테이터의 전체적인 날개형상을 도출하였다. 임펠러 및 스테이터 날개형상은 설계유량에서 요구된 양정이 도출될 때까지 변경된다. 요구된 성능이 도달된 후에 효율을 증가하고 펌프하류에서의 회전유동을 최

소화하기 위한 날개형상 변경 및 성능계산을 반복적으로 수행하였다.

**3. 모형시험 및 성능해석**

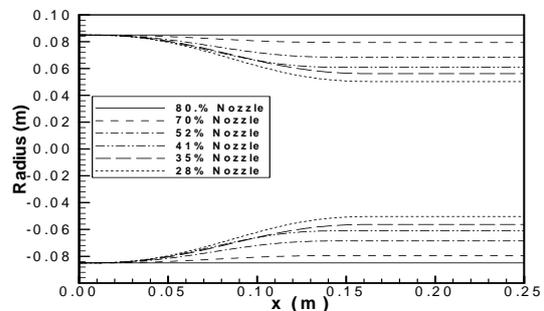
**3.1 모형펌프의 성능시험**

펌프성능시험을 위하여 펌프전용 성능시험장치를 설계·제작하는 것은 많은 시간과 비용을 요구한다. 이런 문제를 해결하기 위하여 Fig. 3에 보여지는 것과 같이 한국해양연구원이 보유한 중형 캐비테이션 터널 시험부에 펌프 단독시험장치를 설치하여 펌프 성능시험과 분석을 수행하였다(Ahn et al. 2005).



**Fig. 3** Schematic diagram of experimental device

Fig. 3은 사류형펌프를 위한 성능시험장치를 보여준다. 펌프 입구와 출구의 직경은 각각 190mm, 170mm이다. 추력, 토오크 및 임펠러 회전수는 캐비테이션터널에 설치된 J25 동력계에서 측정된다. 임펠러와 케이싱의 날개끝 간격은 0.5mm이다. 넓은 유량 범위에서 성능시험을 수행하고자 Fig. 4에 나타난 것과 같이 여러 가지 면적비를 가진 노즐들이 시험장치 하류 끝단에 설치된다. Fig. 4에 나타난 노즐 크기에 따른 명칭은 임펠러 입구에서의 면적과 노즐 출구에서의 면적의 비를 나타낸다. 설계 펌프들의 성능특성을 파악하기 위하여 펌프양정, 유량, 토오크가 예측되고 캐비테이션 거동이 관찰되었다.



**Fig. 4** Nozzles with different area ratio

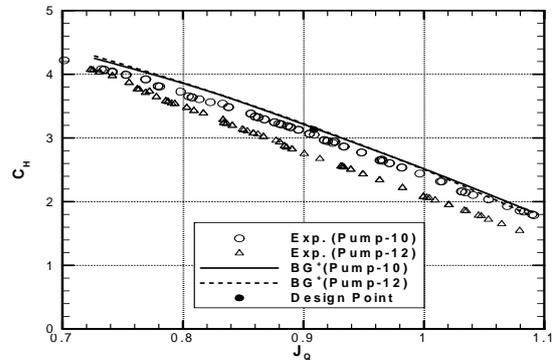
### 3.2 펌프 성능계산

설계펌프들은 초기설계 단계에서 상용 CFD 성능 해석 코드인 BladeGen<sup>+</sup>를 이용하여 성능을 해석하였다. 성능계산은 성능시험 모형(임펠러 입구직경 0.19m)을 대상으로 수행되었고, 시험결과와 비교되었다. 펌프 성능 해석을 위한 임펠러 회전수는 25rpm 이고, 유량범위는 0.8~1.2Q<sub>d</sub>(설계유량)이다. 펌프 양정, 토오크 및 효율이 0.1Q<sub>d</sub> 간격으로 각각의 유량에서 계산되었다.

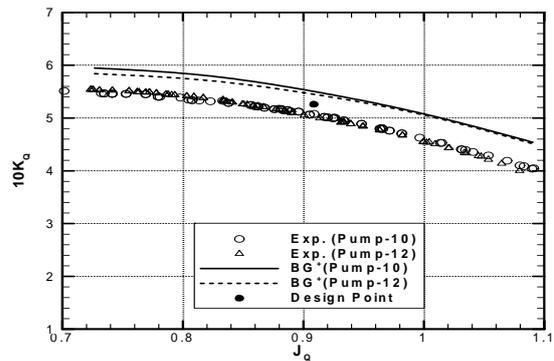
BladeGen<sup>+</sup>는 사용이 편리하고 계산시간이 빠른 장점을 가지고 있지만, 임펠러 날개끝 간격을 고려할 수 없고, 임펠러와 스테이터를 동시에 해석할 수 없다는 큰 단점을 가지고 있다. 스테이터 성능은 미리 계산된 임펠러 정보(총압력 과 유동각도)를 가지고 해석된다. 더욱 정도높은 성능해석을 위하여 상세설계 단계에서 임펠러와 스테이터를 동시에 해석하고, 임펠러 날개끝 간격을 고려할 수 있는 상용 CFD 코드인 CFX-10을 사용하였다.

### 3.3 성능실험과 계산 결과의 비교

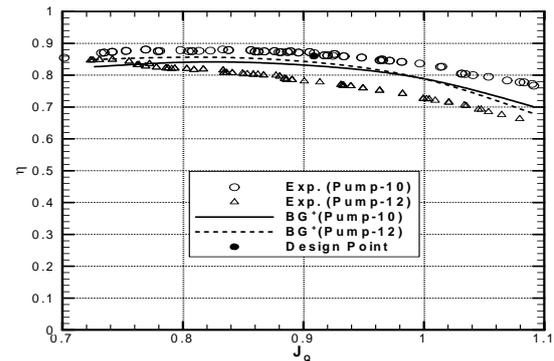
성능실험 결과들은 상용 CFD 코드로 계산된 결과와 비교되었다. Pump-10과 Pump-12의 실험과 계산 결과의 비교는 Fig. 5에 보여진다. BladeGen<sup>+</sup>를 이용하여 계산된 Pump-12의 성능해석 결과는 Pump-10과 비슷하다. 그러나, 실험결과는 많은 차이를 보여준다. 특히, Pump-12의 펌프 양정과 효율은 Pump-10보다 낮은 값이 예측된다. Fig. 2는 Pump-10(a)과 Pump-12(b)의 자오면 형상을 보여준다. Pump-12의 자오면 형상으로부터 판단해 볼 때 스테이터 허브에 경사가 매우 급하여 스테이터 하류에서 박리유동이 생성될 가능성이 있다. 그러나, Fig. 6에서 보여지는 BladeGen<sup>+</sup>의 계산영역을 볼 때 박리유동을 예측하기는 어렵다고 사료된다. BladeGen<sup>+</sup>는 준비과정에서 오류만 없다면 수렴된 결과를 도출할 가능성이 높기 때문에 사용시 많은 주의를 요한다. 더욱 정확한 성능예측결과를 얻기 위하여 CFX-10을 이용하여 Pump-12의 유동장을 계산하였으나, 수렴된 해석결과를 얻지 못하였다. 결국 Pump-12는 요구된 성능을 만족하지 못하였기 때문에 또 다른 펌프가 설계되어야만 했다.



(a) Head coefficient



(b) Torque coefficient



(c) Pump efficiency

Fig. 5 Performance of Pump-10& 12

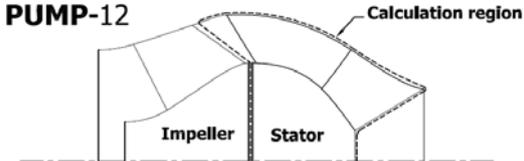


Fig. 6 Calculation region of a stator

Fig. 7은 당소에서 개발된 설계방법을 사용하여 설계된 Pump-14의 3차원 형상을 보여준다. 또한 Fig. 8은 Pump-14와 Pump-12의 자오면상의 형상 비교를 보여준다. 가능한 박리유동을 피하기 위하여 Pump-14의 스테이터 허브 형상이 개선된 것을 볼 수 있다. Fig. 9는 Pump-14와 Pump-10에 대하여 실험과 CFD(BladeGen<sup>+</sup>) 계산결과들의 비교를 보여준다. 성능 예측결과의 경향은  $J_Q=0.8$  이하를 제외 하고는 실험의 경향과 비슷하다. 설계점( $J_Q=0.9087$ )에서 Pump-14의 펌프양정과 토오크는 Pump-10 보다 작다. 그러나, 펌프효율은 CFD 계산결과 및 실험 모두 설계점 주위에서 거의 비슷하다. 추가적인 성능향상이 요구될 지라도 중량감소펌프인 Pump-14는 요구된 성능을 만족한다.

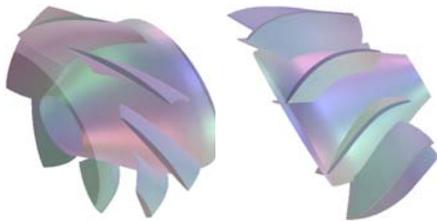
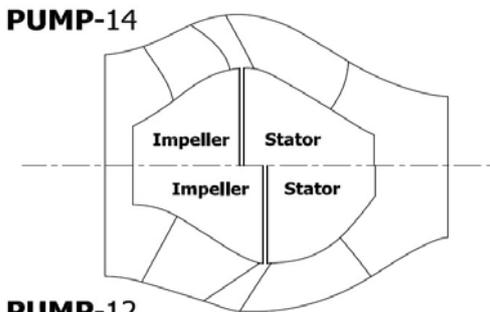
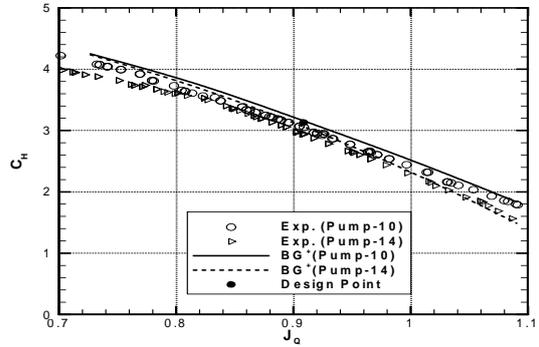


Fig. 7 3-dimensional shape of Pump-14

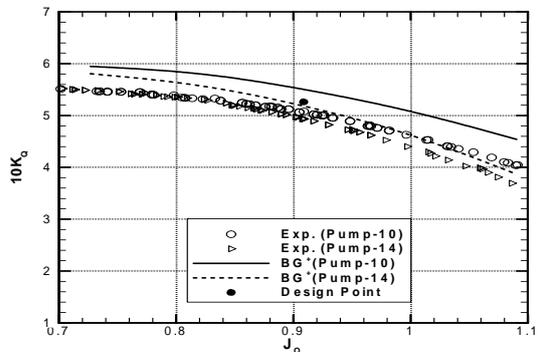


PUMP-12

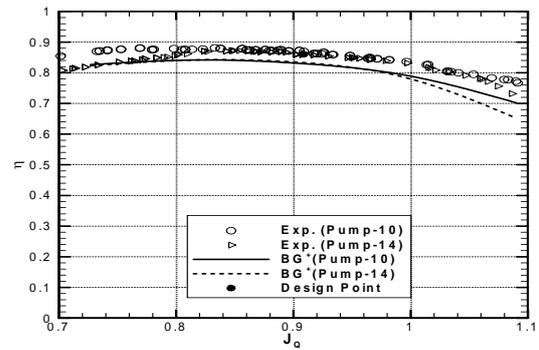
Fig. 8 Meridional view of Pump-14 & 12



(a) Head coefficient



(b) Torque coefficient



(c) Pump efficiency

Fig. 9 Performance of Pump-10 & 14

### 3.4 CFX-10을 이용한 성능해석

초기설계 단계에서 BladeGen<sup>+</sup>를 사용하여 펌프 양정 등의 성능이 도출하고 펌프 후류의 회전유동을 최소화 시키는 설계 및 성능해석을 수행한다. 상

세설계 단계에서는 임펠러 날개끝 간격을 고려하고, 임펠러 및 스테이터를 포함하는 펌프 전체를 해석할 수 있는 더욱 정도 높은 CFX-10을 이용하여 성능을 해석하여야 한다. 우선, 임펠러 날개끝 간격을 고려한 모형펌프의 성능을 계산하였다. Pump-14에 대한 실험과 계산결과의 비교는 Fig. 10에 나타난다. CFX-10에 의하여 계산된 펌프양정은  $J_0=0.8$  이하를 제외하고는 비교적 실험결과와 일치된다. 그

러나, 실험 및 계산 모두 설계점( $J_0=0.9087$ )에서 요구양정보다는 낮은 값을 나타낸다. 계산된 토오크는 실험결과보다 작아짐에 따라 계산된 펌프 효율은 약 2%정도 높게 나타난다. 전반적인 실험과 해석결과의 경향은 잘 일치하는 것으로 나타났으며, CFX-10에 의한 계산결과들이 BladeGen<sup>+</sup> 보다 실험결과와 더 일치된 것으로 나타났다. 따라서, 더욱 정도높은 해석을 위하여 CFX-10이 유용한 도구임을 알 수 있다. 설계펌프의 요구성능은 실선을 대상으로 도출된다. 레이놀즈 효과로 인한 실선과 모형사이에 성능 차이가 있으므로, 실선펌프의 성능을 검토하기 위하여 CFX-10를 이용하여 계산을 수행한다. Fig. 11은 모형과 실선성능의 비교를 보여준다. 실선펌프의 양정과 토오크는 모형펌프의 값들보다 더 크게 나타난다. Fig. 11-(a)에서 펌프양정을 검토해보면 계산된 수치가 실험 수치보다 약간 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서, 모형펌프와 실선펌프의 수치계산 결과의 경향은 잘 일치함을 알 수 있다. 모형펌프 수치결과와 비교하여 실선펌프의 양정의 증가량은

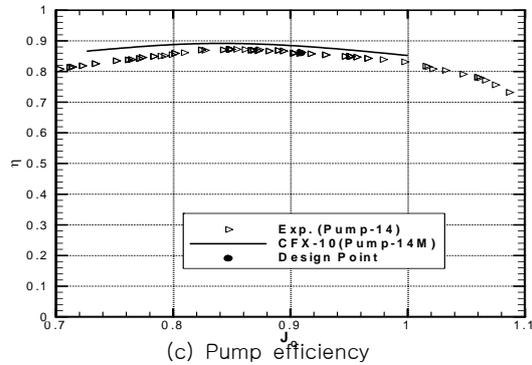
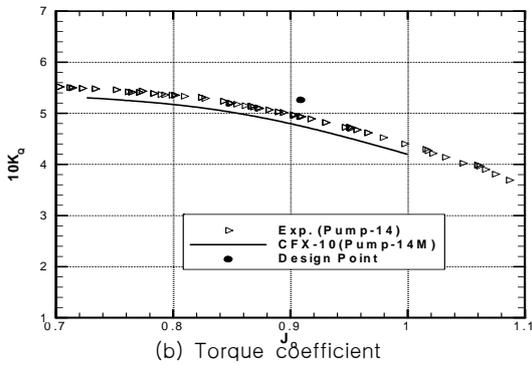
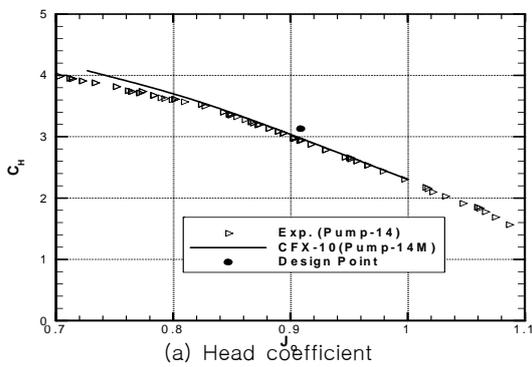
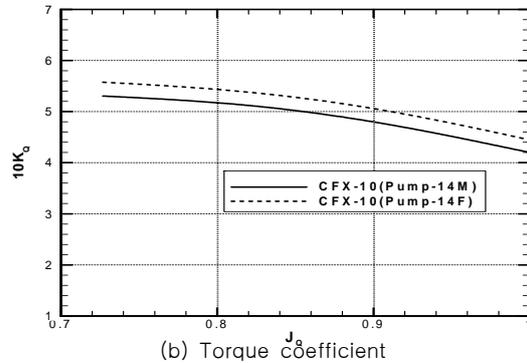
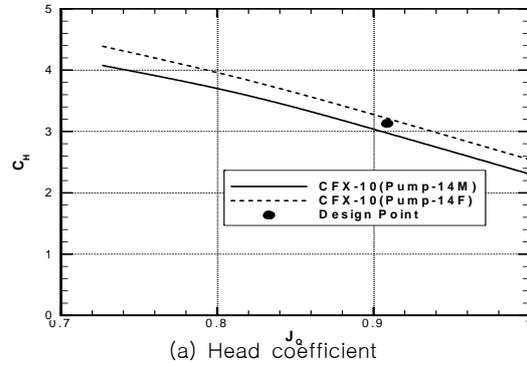


Fig. 10 Comparison of experiment and CFX-10



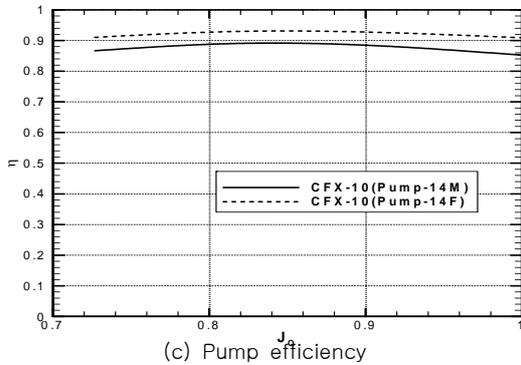


Fig. 11 Comparison of model and full-scale

토오크 증가량보다 크기 때문에 실선펌프의 효율은 모형펌프와 비교하여 약 4%정도 증가한다. 모형펌프의 실험결과를 고려해 볼 때 실선펌프의 효율은 90% 이상이 도출되리라 사료된다.

실험결과와 CFX-10 및 BladeGen<sup>+</sup>를 사용하여 계산된 수치결과로부터 판단해 볼 때, 중량감소펌프인 Pump-14는 성공적으로 개발되었다고 사료된다. 펌프양정이 Pump-10보다 약간 낮을지라도 실선펌프의 양정은 요구성능을 거의 만족한다. Pump-10에 비하여 상대적으로 짧은 펌프길기와 감소된 코오드 길이에 기인하여 낮은 유량에서 효율이 감소되는 영역이 있을지라도 설계점 부근 ( $0.9Q_d \sim 1.1Q_d$ )에서 두 펌프의 효율은 거의 비슷하다. 따라서, 추진성능에 문제는 없으리라 사료된다.

### 3.5 캐비테이션 특성

Fig.12는 설계유량에서 Pump-10과 Pump-14의 캐비테이션 거동을 보여준다. 실험장치에서 조정될 수 있는 최소 절대압력은 30kPa이다. Pump-14의 캐비테이션 발생특성은 Pump-10보다 발생량도 적고 거동도 좋아 보인다. 두개의 펌프 모두 30kPa에서 양정이 급하게 떨어지지 않았다. 30kPa에서 흡입비속도(Suction specific speed,  $N_{ss}$ )는 11,000이상이었다. 펌프에서 캐비테이션 성능을 판단할 때 흡입비속도 11,000이상에서 양정이 2~3%까지 급격히 떨어지지 않으면 캐비테이션 문제는 없는 것으로 판단한다(Allison 1993). 따라서, 두개의 펌프 모두 캐비테이션 문제는 없는 것으로 판단된다.



(a) Pump-10



(b) Pump-14

Fig. 12 Cavitation behavior at 30kPa ( $J_Q=0.9087$ )

## 4. 결론

Waterjet 추진선박의 전반적인 중량감소를 위하여 펌프 중량이 감소될 필요가 있었다. 펌프는 한국해양연구원에서 개발된 설계기법에 따라 설계하였다. 펌프 크기의 감소에도 불구하고 펌프 효율과 캐비테이션 성능을 유지하기 위하여 임펠러에 고효율 단면을 적용하였고, 펌프 후류에 회전유동이 최소화되도록 펌프를 설계하였다. 중량이 감소된 펌프인 Pump-14는 Pump-10과 비슷한 효율을 보여주며, 실선 펌프의 요구성능을 만족한다. 캐비테이션 발생거동도 Pump-10보다 우수하였으며 캐비테이션 발생으로 인한 양정감소도 없었다. 날개단면 설계, 성능해석 및 모형시험으로 구성되는 펌프설계과정을 통하여 중량감소펌프가 성공적으로 개발되었다.

후 기

본 연구는 2009년도 한국해양연구원 산업원천 기술개발사업(PNS132B) 연구결과의 일부이다.

참 고 문 헌

- Ahn, J.W., Kim, K.S., Park, Y.H., Kim, K.Y. and Oh, H.W., 2005, "Performance Analysis of a Mixed-Flow Pump for Waterjet Propulsion," Journal of Ship and Ocean Technology, Vol. 9 No. 2, pp. 11-20.
- Ahn, J.W., Kim, K.D, Kim, K.S., Lee, J.T. and Seol, H.S., 2008, "Development of the Driving Pump for the Low Noise Large Cavitation Tunnel," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 4, pp. 370-378.
- Allison, J., 1993, "Marine Waterjet Propulsion", SNAME Transactions, Vol. 101, pp. 275-335.
- Balje, O.E., 1981, Turbomachines: A Guide to Design, Selection and Theory, John Wiley, New York.
- CFX-BladeGen & CFX-BladegenPlus, Version 4.1(AEA Technology Engineering Software Inc., El Dorado Hills).
- Oh, H.W. and Kim K.Y., 2001, "Conceptual Design Optimization of a Mixed-Flow Pump Impellers Using Mean Streamline Analysis," Proc. Instn Mech. Engrs, Part A : J. Power and Energy, Vol. 215(A1), pp. 133-138.

- Oh, H.W., Yoon, E.S., Kim, K.S. and Ahn, J.W., 2003, "A Practical Approach to the Hydraulic Design and Performance Analysis of a Mixed-Flow Pump for Marine Waterjet Propulsion," Proc. Instn Mech. Engrs, Part A : J. Power and Energy, Vol. 217, pp. 659-664.
- Yoon, E.S., Oh, H.W. and Ahn, J.W., 2003, "Design and Performance Analysis of Mixed-Flow Pumps for Waterjet Marine Propulsion," J. of Fluid Machinery, Vol. 6, No. 2, pp. 41-46.



< 안 종 우 >



< 김 건 도 >



< 박 영 하 >



< 김 기 섭 >