

저소음 대형 캐비테이션 터널 구동 펌프 개발

안종우^{†*}, 김건도*, 김기섭*, 이진태*, 설한신*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소*

Development of the Driving Pump for the Low Noise Large Cavitation Tunnel

Jong-Woo Ahn^{†*}, Gun-Do Kim*, Ki-Sup Kim*, Jin-Tae Lee* and Hanshin Seol*

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

Abstract

It is reported to develop the driving pump for the Low Noise Large Cavitation Tunnel(LOCAT) which is under construction at Maritime & Ocean Engineering Research Institute(MOERI). For low background noise condition of the LOCAT, it is crucial not only the best pump efficiency but also no cavity occurrence at any operating conditions. Design condition of the pump is determined by considering the required pump headrise, flow quantity, shaft rotation velocity and pump diameter. Performance analysis of the pump is conducted using commercial CFD codes (BladeGen⁺, CFX-10), and the predicted results are verified by a series of model tests. Cavity was not observed at any operating condition in the model test, which were conducted at the midium cavitation tunnel of MOERI. The optimum pump for LOCAT, named as LP-11, was successfully developed through a series of pump design processes composed of blade design, performance analysis and model test.

※Keywords: Driving pump(구동펌프), Low noise(저소음), Cavitation(캐비테이션), Required headrise(요구양정)

1. 서론

한국해양연구원에서 건설 중인 저소음 대형 캐비테이션터널(이후 'LOCAT')의 시스템 종합설

계는 본체 수력설계, 구조설계, 토목/건축설계 및 운용시스템설계로 구분되어 진행되었다. 이중 저소음화를 위하여 집중적으로 검토해야 할 분야는 본체 수력설계 분야이다. 수력설계 분야는 유동손실을 최소화 하면서 캐비테이션이 어디에서도 발생하지 않도록 하기 위한 터널 내부 형상설계 및 구동펌프 설계로 분류될 수 있다(Kim et al. 2006).

접수일: 2008년 1월 19일, 승인일: 2008년 7월 9일

† 교신저자: ajwprop@moeri.re.kr, 042-868-7254

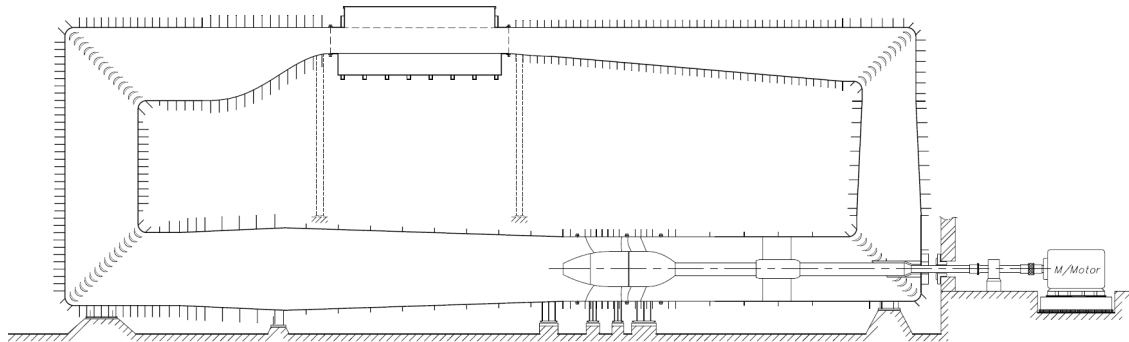


Fig. 1 Schematic drawing of LOCAT

구동펌프는 가장 큰 소음원이 되어 LOCAT의 전반적인 배경소음을 높일 수 있는 가능성이 있으므로 높은 효율과 함께 어떤 조건에서도 캐비테이션이 발생하지 않도록 설계되어야 한다. Fig. 1은 최종 수력설계된 LOCAT 정면도로서 축류형의 구동펌프는 하부에 축계와 함께 나타난다. 구동펌프는 임펠러와 스테이터로 구성되며, 설계사양은 Table 1과 같다. 설계사양은 수력설계 결과로부터 도출된 LOCAT 형상을 분석하여 관측부에서의 설계 최대유속인 15m/s를 기준으로 도출되었다.

외국의 대형터널인 LCC(Wilson and Etter, 1992), GTH(Boissinot and Fournier 1991), HYKAT(Friesch, 1991), FNS(Miyagawa and Saro 2003)등 도 유동소음을 저감시키기 위하여 수력설계 및 구동펌프 개발에 많은 연구를 수행하였다. 임펠러의 날개수도 일반 공업용펌프에 비하여 많은 것으로 나타난다. 예로서 임펠러 날개수는 LCC 7개, GTH 10개, HYKAT 11개, FNS 7개

이다. 저소음화를 위한 노력이 날개수 선정부터 나타나고 있음을 알 수 있다. LOCAT 구동펌프는 임펠러 7개, 스테이터 9개로 날개수를 결정하였다.

본 논문의 목적은 구동펌프를 설계하고, 그 성능을 검증하여 LOCAT에 설치될 펌프를 최종적으로 결정하는 것이다. 날개수 및 직경만이 결정된 상태에서 임펠러/스테이터의 형상을 변화시켜 총 11번의 설계 및 성능해석을 반복적으로 수행하였다. 초기설계 단계에서의 성능평가는 비교적 성능계산 시간이 짧은 상용코드인 BladeGen⁺을 이용하여 수행하였으며, 정도높은 성능해석은 임펠러와 스테이터를 함께 해석이 가능하며, 날개끝 간격을 고려할 수 있는 CFX-10 상용코드를 이용하여 수행하였다. 코드들의 타당성 검증을 위하여 1단계로 설계된 펌프(LP-9)의 모형을 만들어 소형 캐비테이션 터널에서 성능시험을 수행하였으며, 펌프의 캐비테이션 발생특성도 관찰하였다.

모형시험 결과와 비교해서 BladeGen⁺로 예측한 펌프양정이 높은 값을 주는 것으로 판정되면서 CFX-10의 성능해석을 기반으로 LP-11을 설계하였고, 모형시험을 통하여 성능을 검증하였다.

2. 구동펌프의 설계

구동펌프 설계사양(Table 1)에서 유량계수(J_Q)와 양정계수(C_H)는 다음과 같이 정의된다.

$$J_Q = \frac{Q}{nD^3} = 0.7111$$

Table1 Specification of LOCAT pump

	Impeller	Stator
Diameter(D), m	4.5	4.5
Blade No.	7	9
Hub Ratio	0.55	0.55
N, rpm	70 (c.w)	고정
Tip clearance	0.001D	
Headrise(H_p), m	3.92	
Flowrate(Q), m ³ /s	75.6	

$$C_H = \frac{gH_P}{n^2 D^2} = 1.3946$$

여기서, g 는 중력가속도, n 은 rps이다.

임펠러의 날개단면은 NACA66 단면을 기초로 하여 초기설계 되었다. 즉 임펠러 날개는 허브와 날개 끝을 등간격으로 나눈 반경에서의 단면을 기준으로 두께 형상, 캠버 및 피치를 정의한다. 정의된 형상은 날개형상 생성 프로그램을 이용하여 상용코드인 BladeGen 프로그램에 입력자료로 다시 생성되었다.

펌프 임펠러와 디퓨저는 날개형상 생성 프로그램을 이용하여 반경별 단면 형상을 정의하고 이를 BladeGen 프로그램에 입력하여 펌프 형상에 적합한 날개앞날과 뒷날 형상으로 약간 수정하여 다시 정의하였다. 새로 정의된 날개형상을 입력으로 하여 BladeGen⁺ 프로그램에서 성능특성을 계산하였다. 우선 최대유량에서 요구양정이 도출될 때까지 임펠러 형상을 변화시켰으며, 어느 정도 요구성능이 만족된 후에는 스테이터와 임펠러의 상호작용을 고려하여 펌프후류의 회전유동 최소화와 요구양정에서 효율 최대화를 위하여 반복적인 형상수정 및 성능계산을 수행하였다.

BladeGen⁺ 프로그램에서는 임펠러와 스테이터를 동시에 해석할 수 없으므로 임펠러의 성능을 계산한 후 날개끝에서의 절대압력 및 속도 벡터를 계산하고 이를 디퓨저 설계를 위한 입력자료로 사용한다. 디퓨저의 입력자료는 회전방향 평균값을 취하여 사용하였다.

디퓨저의 성능은 디퓨저 후류에서의 회전방향 속도 성분이 충분히 상쇄되고 수두손실이 최소화되도록 설계한다. 즉 임펠러에 의하여 유기된 회전방향 속도 성분이 디퓨저에 의해 충분히 상쇄되고 수두손실이 적어야 펌프의 성능이 최적화 될 수 있다.

9번의 반복설계 및 성능해석을 통하여 설계된 LP-9은 3차원 형상은 Fig. 2에서 보여진다.

BladeGen⁺ 프로그램을 이용한 LP-9의 성능해석 결과와 LOCAT의 수두손실의 관계는 Fig. 3에 나타난다. 100% 유량($J_Q=0.7111$)에서 양정이 거의 일치함을 볼 수 있다. LP-9은 실험모형을 제작하여 중형 캐비테이션 터널에서 성능 및 캐비테이션 시험이 수행되었다.

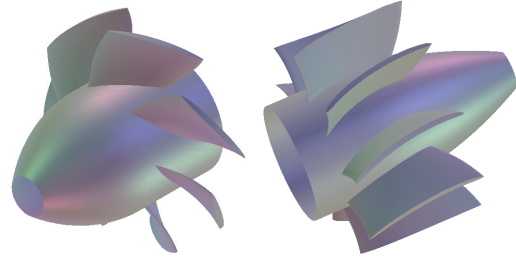


Fig. 2 3-D Perspective view of LP-9

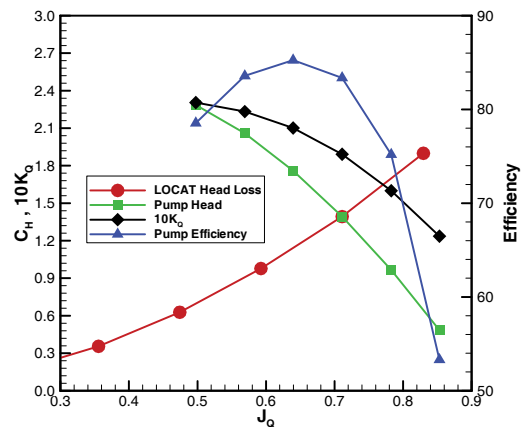


Fig. 3 Matching of LP-9 and LOCAT head loss(Calculation using BladeGen⁺)

3. 구동펌프의 단독모형시험 및 성능해석

펌프의 성능시험을 위하여 전문적인 전용 시험장치를 설계제작하는 것은 매우 많은 시간 및 비용 등이 요구된다. 본 연구에서는 Fig. 4에 나타난 것과 같이 한국해양연구원이 보유하고 있는 중형캐비테이션 터널 시험부에 설치되는 펌프 시험장치를 이용하여 펌프의 모형시험이 수행되었다.

펌프의 성능시험 및 해석방법은 기존에 개발된 방법을 이용하였다(Ahn et al. 2005, Kim et al. 2003). 계산된 펌프 수두와 LOCAT 손실수두로부터 도출된 펌프 설계조건(유량, 회전수, 양정 등)에 따라 설계 제작된 모형 펌프의 단독성능을 실험적으로 검증하였다. 펌프의 단독 성능시험을 위해서는 펌프 케이싱, 관로 등이 설치된 펌프 시험장치가 필요하며, 원활한 캐비테이션 시험과 충분한 유량범위에 걸쳐

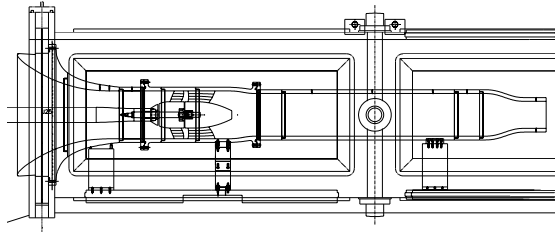
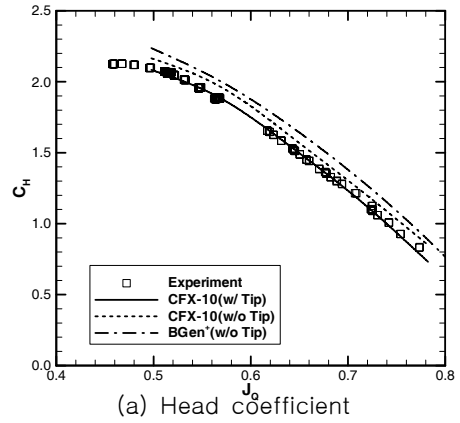


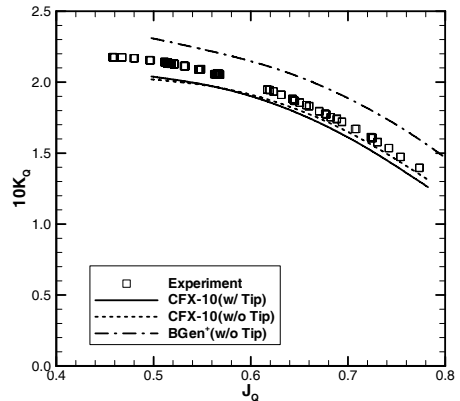
Fig. 4 Schematics of experimental apparatus

실험을 수행하기 위하여 면적비가 다른 여러 개 노즐을 사용하여 모형시험을 수행하였다. 펌프의 단독 성능 및 캐비테이션 특성을 판단하기 위한 유량계측, 양정계측, 추력 및 토오크 계측, 캐비테이션 발생시험을 수행하였다.

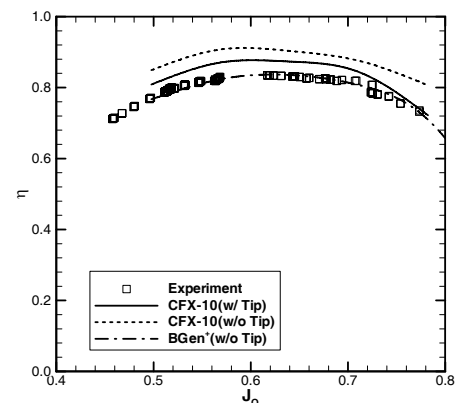
펌프모형은 직경이 190mm($\lambda=23.68$)로서 임펠러 회전수 30rpm에서 실험이 수행된다. 실험결과 해석결과와 비교된다. 임펠러 날개끝과 케이싱과의 간극(Tip)은 0.5mm이다. BladeGen+은 간극을 고려할 수 없는 반면에 CFX-10은 간극을 고려할 수 있다. Fig. 5에서 보인 바와 같이 CFX-10을 이용하여 간극을 고려한 경우(w/ Tip)의 양정계수(C_H)는 실험과 해석결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. BladeGen+의 결과는 양정이 실험보다 크게 예측되는 것으로 나타났는데, 간극을 고려하지 못함에 따라 나타나는 현상이라 사료되어 간극을 고려하지 않은 경우(w/o Tip)에 대하여 CFX-10으로 성능을 해석하였다. 성능해석 결과 간극의 영향은 확실히 나타나지만, BladeGen+으로 해석된 결과만큼 증가되지는 않은 것으로 나타난다. 초기설계시 주요한 성능예측 도구인 BladeGen+는 정도높은 성능예측에 한계가 있음을 볼 수 있다. 토오크는 CFX-10을 이용한 성능해석 결과가 실험보다 약간 작게 예측되었지만, BladeGen+의 결과는 매우 크게 예측됨을 볼 수 있다. 펌프단독효율은 양정과 마찬가지로 간극의 영향이 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 3에 나타난 BladeGen+로 예측한 펌프양정 예측결과는 요구양정과 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 모형시험 결과와 비교해서 양정이 매우 크게 예측됨에 따라 실선펌프의 양정도 크게 예측이 되었으리라 사료된다. 따라서, LP-9은 재설계가 요구되며, 성



(a) Head coefficient



(b) Torque coefficient



(c) Pump efficiency

Fig. 5 Model test and predictions of LP-9



Fig. 6 Cavitation inception at $J_Q=0.6988(\sigma_n=5.0)$

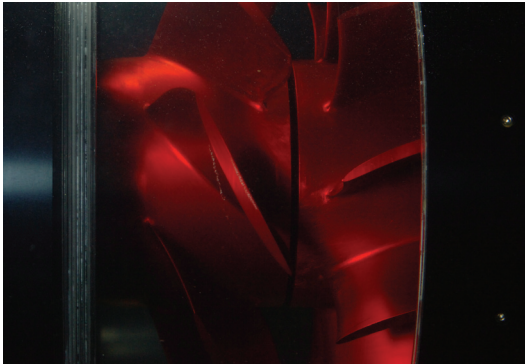


Fig. 7 Cavitation inception at $J_Q=0.7204(\sigma_n=3.9)$

능해석은 CFX-10으로 수행되어야 한다. 캐비테이션 발생시험은 설계유량 또는 실제 운전점 근처의 몇 개 유량계수를 일정하게 유지하여 캐비테이션이 발생하지 않는 영역부터 캐비테이션 터널의 압력 조절 한도까지 터널 내부압력을 조절하여 캐비테이션 발생 변화를 관찰하였다. 임펠러와 같은 회전체의 경우 캐비테이션수는 펌프 입구의 압력(P_o) 및 증기압(P_v), 회전수(n)를 가지고 다음과 같이 정의한다.

$$z\sigma_n = \frac{P_o - P_v}{0.5\rho n^2 D^2}$$

LOCAT의 터널 내부에서 임펠러가 최고 작동 회전수(70RPM)와 관측부 최저압력에서 작동할 경우 캐비테이션수(σ_n)가 약 12.35정도이며, 설계점($J_Q=0.7111$)보다 약간 작은 유량에서는 캐비테이션

수 5.0에서(Fig. 6), 약간 높은 유량에서는 캐비테이션수 3.9에서(Fig. 7) 캐비테이션이 초기발생하였다. 따라서, 펌프 캐비테이션은 어떤 작동조건에서도 나타나지 않을 것으로 사료된다.

4. 구동펌프의 설계수정 및 성능개선

LP-9 펌프는 모형시험 결과로부터 양정이 낮게 설계된 것으로 나타났으며, 양정의 증가 및 효율 개선을 위하여 수정이 요구되었다. 수정펌프의 설계개념은 전 유량에서의 양정증가 특히 설계유량 및 설계유량 이상의 영역에서 효율증가 및 양정의 감소를 방지하는 것이다. 우선 LP-9의 모형시험 결과와 수치해석 결과를 바탕으로 양정의 증가를 위하여 임펠러 지로면 날개 각도를 캐비테이션 성능을 고려하여 수정하였다. 스테이터의 수정은 설계점에서 스테이터 내부유로를 따라서 나타나는 평균 회전속도 성분을 최소화 및 펌프 출구 폭(span)방향 회전속도 성분의 최소화를 위하여 임펠러와 스테이터의 축방향 거리 및 스테이터 날개 형상을 수정하여 최적형상을 도출하였다. 대형터널 수두손실은 대형터널 관측부에 모형설치를 고려하지 않고 도출됨에 따라, 수정설계시 설계유량에서 요구양정을 약간 높게 고려하였다. 일반적으로 대형터널의 관측부 단면적은 설치모형의 단면적이 관측부 단면적에 10%를 넘지 않는 범위에서 결정된다. 기존 대형터널 설계자료에 따르면 설치모형의 단면적이 약 15%일 때 약 6% 정도의 수두손실이 나타난다고 조사된 바 있다. 당소의 대형터널은 10%를 넘지 않을 예정이므로 약 5% 이내에 수두손실 여유를 갖고자 한다. 수정 설계시 2개의 펌프가 설계되었으며, 성능해석 결과 LP-11이 효율측면에서 약간 유리하였다. LP-11은 3차원 형상은 Fig. 8에서 보여진다.

LP-11의 성능해석은 해석정도가 검증된 CFX-10을 이용하여 수행된다. Fig. 9는 LOCAT의 수두손실과 LP-11의 수치해석결과를 보여준다. 도출된 결과가 어떤 범위에 있는가를 판정하기 위하여 LOCAT 수두손실에 $\pm 5\%$ 의 범위를 표시하였다, LP-11의 경우는 약 5%정도의 수두 여유를 가지고 설계된 것으로 나타난다. 설계점에서의 펌

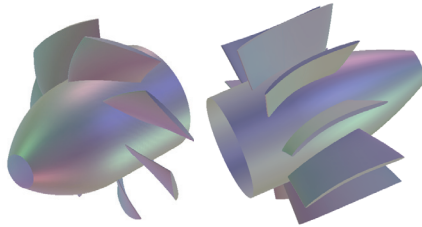


Fig. 8 3-D Perspective view of LP-11

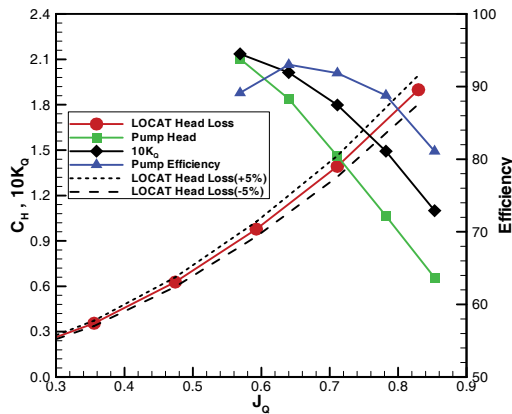


Fig. 9 Matching of LP-11 and LOCAT Head Loss (prediction using CFX-10)

프 효율은 약 92%정도로 소요마력은 약 3,310kW 이다. Fig. 5에 나타난 비교결과에 따르면 CFX-10의 토오크 계산결과가 작게 예측되는 정도는 약 5% 미만이며, 이에 따라 소요마력을 5% 증가시키면 3475kW가 된다. 현재 구동모터의 최대 마력은 70RPM에서 3,690kW이므로 작동범위에서 문제는 없으리라 사료된다.

Fig. 10은 LP-9과 LP-11의 자오면상의 형상 비교를 보여준다. LP-11은 임펠러와 스테이터 간격을 가장 효율이 높다고 알려진 0.2D정도로 조절하였다(Mitagawa and Sato 2003). 또한 양정을 높이기 위하여 임펠러 피치를 증가하였으며, 노모 형시험에 의한 성능평가를 위하여 LP-11 펌프의 모형을 제작하여 Fig. 4에 나타난 실험장치를 이용하여 LP-9과 동일한 실험조건에서 모형실험을 수행하였다. Fig. 11은 LP-11과 LP-9 펌프에 대하여 실험결과와 CFX-10을 이용한 해석결과의 비교를 보여준다. 날개간격을 고려하여 해석한 양

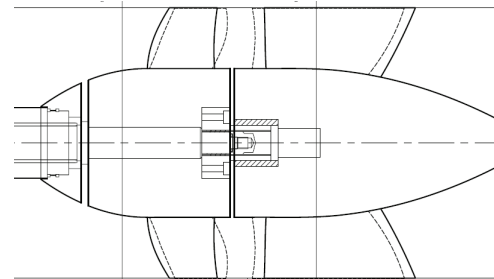
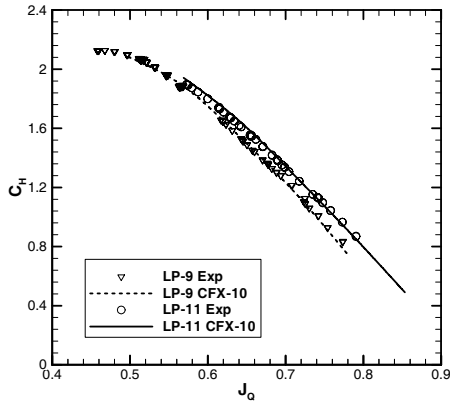


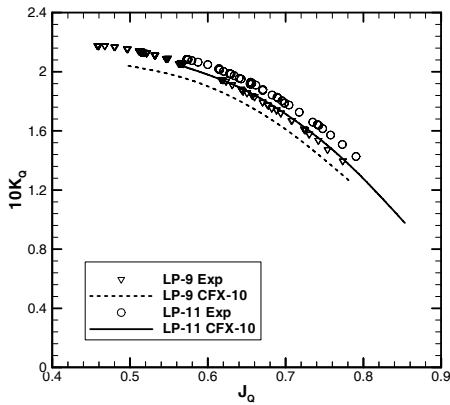
Fig. 10 Comparison of meridional view (--- LP-9, — LP-11)

정은 실험과 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 토오크와 단독효율도 실험과 해석의 경향을 잘 보여주고 있다. 펌프 단독효율의 경우 LP-11이 LP-9보다 설계유량($J_Q=0.7111$)에서 약 1~2%정도 높아진 것으로 나타나는데, 더 중요한 것은 LP-9의 경우 유량이 설계점보다 높아지는 경우 급격히 효율이 감소하지만, LP-11은 설계유량보다 높은 유량에서도 효율이 유지된다. 이는 매우 중요한 성능개선효과인데, LOCAT의 손실수두를 실제보다 크게 평가한 경우 Fig. 9에 나타난 것과 같이 설계점보다 높은 유량에서 펌프가 작동할 가능성이 있기 때문이다.

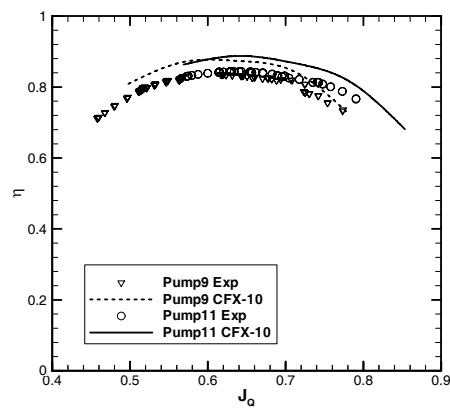
Fig. 12는 CFX-10을 이용하여 해석한 모형과 실선의 비교를 보여준다. 실선은 모형에 비해 양정 및 토오크가 동시에 증가하는데, 양정의 증가도가 토오크의 그것보다 더 커짐에 따라 효율은 5%이상 증가된다. 토오크는 양정이 증가하면서 함께 증가를 하는데, 레이놀즈 수의 효과에 따라 증가정도가 감소된 것으로 사료되며, 양정의 증가정도가 높은 것은 레이놀즈수 효과도 존재하지만 임펠러 날개끝 간극의 차이도 영향을 주리라 사료된다. 모형의 간극은 임펠러 직경기준 0.26%이고, 실선의 경우는 0.1%이다. 따라서, 실선펌프의 경우 모형에 비하여 설계점에서 약 5% 정도의 효율이 증가될 것으로 보인다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 CFX-10을 이용하여 예측한 실선펌프 효율을 모형실험 결과를 바탕으로 약 5% 정도 낮추어 약 87%로 예측하였는데, 현재 설계점에서 LP-11의 모형 펌프효율은 82% 이상인 바, 실선 펌프효율은 약 87% 이상 도출될 것으로 사료된다.



(a) Head coefficient

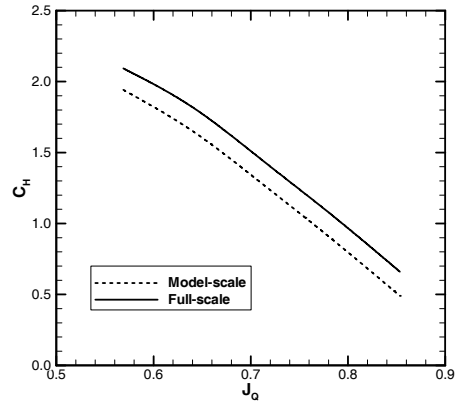


(b) Torque coefficient

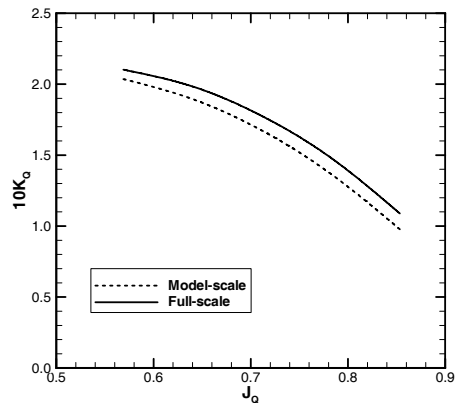


(c) Pump efficiency

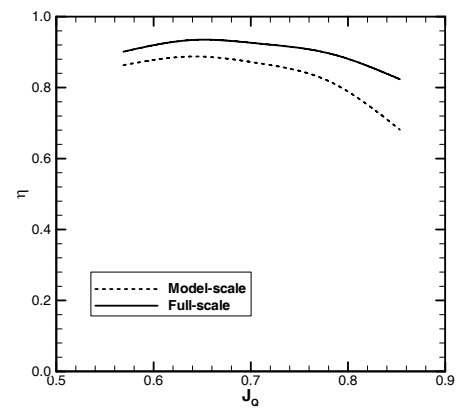
Fig. 11 Comparison of experiment and prediction



(a) Head Coefficient



(b) Torque Coefficient



(c) Pump Efficiency

Fig. 12 Comparison of Model and Full-scale (Prediction using CFX-10)

5. 결론

저소음 대형 캐비테이션터널(LOCAT)을 위한 구동펌프의 설계 및 개발과정을 정리하였다. 최적의 구동펌프를 개발하기 위하여 11번의 반복설계 및 성능해석을 수행하였으며, 그중 LP-9 및 LP-11의 모형을 제작하여 소형 캐비테이션터널에서 펌프단독성능시험을 수행하였다. 모형시험 양정 예측결과는 상용해석코드인 CFX-10의 양정 해석결과와 일치하며, 토오크 및 효율의 경우에도 공학적으로 사용이 가능한 정도로 예측되어 해석 코드의 타당성을 검증할 수 있었다.

해석정도가 검증된 CFX-10 코드를 이용하여 개발된 LP-11은 LOCAT 시험부에 모형이 설치될 경우를 고려하여 약 5%의 수두손실 여유를 두고 설계하였으며, 성능해석 결과 4.7%의 수두손실 여유가 있는 것으로 나타났다. 또한 최대유속에서의 소요동력도 약 6% 정도의 여유가 있는 것으로 나타났다.

LP-11 펌프의 단독효율 경향은 설계유량보다 높은 영역을 포함하여 주위 영역에서 효율이 감소되지 않고 일정하게 유지되는 우수한 경향을 보여 준다. 기존에 펌프성능은 LP-9과 같이 설계유량보다 높은 영역에서 효율이 급격히 떨어지는 경향을 있어 실제 작동시 운용조건이 변경되어 고유량 영역에서 작동되는 경우에 효율이 감소되는 문제점이 있었다.

저소음의 가장 큰 영향을 미치는 임펠러 캐비테이션의 경우 관측부 최저압력에서 임펠러가 최고 회전수(70RPM)로 작동할 경우의 캐비테이션 수가 캐비테이션 초기 발생하는 캐비테이션 수보다 매우 높다. 따라서, 캐비테이션의 발생가능성은 없는 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2007년도 산업자원부 산업기술기반 조성사업 및 2008년도 기본연구사업 연구과제 결과의 일부이다.

참 고 문 헌

- Ahn, J.W., Kim, K.S., Park, Y.H., Kim, K.Y., 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.
- Boissinot, P. and Fournier, P., 1991, "Acoustic Characterization of France's New Large Cavitation Tunnel," *NCA-Vol. 10, Hydroacoustic Facilities, Instrumentation and Experimental Techniques ASME*, pp. 23-30.
- Friesch, J., 1991, "HYKAT, The New Cavitation Test Facility of Hamburg Ship Model Basin," *International Symposium on Hydro- and Aerodynamics in Marine Engineering: HADMAR '91*.
- Kim, K.S. et al., 2003, Development of Medium- and Small-Sized Waterjet Propulsion System-Part I(for Warship) KORDI Report, Report No. M1-0190-00-0019.
- Kim, K.S. et al., 2006, Construction of the Low Noise Large Cavitation Tunnel (2nd Year Report), KORDI Report, Report No. UCG01260-06049.
- Miyagawa, K. and Sato., R., 2003, "Development of a Low Noise Pump by New Design Concept," *Proceedings of FEDSM'03, FEDSM2003-45306*, Hawaii, USA.
- Wilson, M.B. and Etter, R.J. 1992, "Hydrodynamic and Hydroacoustic Characteristics of the New David Taylor Model Basin Large Cavitation Channel," *Proc. of the 2nd International Symposium on Propellers and Cavitation*, Hangzhou, China.



< 안 종 우 >



< 김 건 도 >



< 김 기 섭 >



< 이 진 태 >



< 설 한 신 >