

수중 카고 펌프의 흡입성능에 관한 수치해석적 연구

김준형* · 최영석** · 이경용*

A numerical study on the suction performance of a submerged cargo pump

Joon-Hyung Kim*, Young-Seok Choi**, Kyoung-Yong Lee*

Key Words : Submerged cargo pump(수중 카고 펌프), suction performance(흡입 성능), Inlet shape(입구 형상), Suction well(흡수정)

ABSTRACT

In this paper, effects of inlet shape on the performance of a submerged cargo pump were numerically studied using a commercial CFD code ANSYS-CFX. The inlet shape, especially the gap between pump and suction well, is an important parameter in a point of view of performances of submerged cargo pump due to its effects on the residual and also hydraulic performance of the pump, respectively. To investigate the optimized gap, the overall performance degradations were calculated with the gap. In addition to that, the flow field through the gap was investigated to explain the effect of velocity non-uniformity on the performance of the pump impeller.

1. 서론

수중 카고 펌프(Submerged Cargo Pump)는 조선용 기자재의 핵심 유체기계로써 임펠러의 형상이나 입구부 형상 등이 펌프의 흡입 성능에 매우 중요한 역할을 하므로, 현재 기술력이 확보된 국외의 선진업체가 절대적인 위치에 있으며 국내 조선업체에서 사용되는 수중 카고 펌프 시스템은 대부분 외국 메이커에서의 수입에 의존하고 있는 것이 현실이다.

그에 따라 국내에서도 수중 카고 펌프에 대한 연구

가 진행되고 있으며 적용대상은 다르지만 일정 비속도 범위에 대하여 펌프 제작 회사나 연구기관 별로 수차례 연구 결과가 보고된바 있다.(1) 수중 카고 펌프 시스템의 고성능화를 위한 연구에서 중요하게 고려되어지는 요소는 크게 임펠러 설계 변수와 임펠러 외 수중 카고 펌프 시스템의 입구 형상 등의 외부 형상 설계 변수로 나누어진다. 임펠러의 설계 변수만을 고려한 연구는 수중 카고 펌프 시스템의 성능에 직접적으로 큰 영향을 주지만 실제 수중 카고 펌프 시스템의 요구조건을 만족하는 결과를 산출하기 위해서는 외부 형상 설계 변수를 고려하는 연구가 요구되어진다. 특히 입구 유로가 파이프에 연결된 일반적인 펌프와는

* 한국생산기술연구원 열유체시스템 팀

† 교신저자, E-mail : yschoi@kitech.re.kr

달리, 수중 카고 펌프 시스템은 유체에 잠겨서 작동하는 방식이다. 따라서 하적 작업이 수행되는 과정에서 외부 형상 변수에 따른 손실로 인하여 펌프 성능 저하가 발생하게 되며 하적 마무리 단계에서는 수위가 일정 높이 이하로 떨어질 경우 공동 현상(cavitation)등의 원인으로 펌프의 흡입 성능에 영향을 미친다.

이처럼 펌프의 외부 형상 변수들은 양정 손실 등의 펌프의 성능 저하에 영향을 미칠 뿐만 아니라 최근 선박의 하적 요구사항이 잔류량에 대한 규제를 강화하고 있는 실정에서 공동 현상 등 흡입 성능과 연계된 유로 시스템을 고려한 설계 즉, 외부 형상 설계 변수를 고려한 설계가 더욱 중요시 되고 있다.(2)

본 연구에서는 외부 형상 변수들 중에서 잔류량과 직접적인 관련이 있는 펌프 입구부(벨마우스 입구부)와 흡수정(suction well) 사이 간격에 의한 영향성 평가를 수행하였다. 연구 수행을 위하여 임펠러와 벌류트 만을 수치해석하여 기본 비교 기준으로 선정하고 펌프 시스템 전체를 간격에 따라 수치해석을 수행한 후 각 각을 비교하여 입구부와 흡수정 사이 간격이 펌프 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 또한 간격에 따른 흡입성능 특성에 대한 수치해석을 수행하여 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격이 펌프의 흡입 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

2. 수치해석 모델 및 경계조건

2.1 수치해석 모델

본 연구를 수행하기 위해 수치해석 대상 모델을 Fig. 1과 같이 임펠러와 벌류트 만을 단순화하여 수치해석을 수행하는 비교 기준 모델(모델 1)과 Fig. 2와 같은 전체 펌프 시스템을 수치해석하는 모델(모델 2)로 구분하였다. 또한 모델 2는 간격(h)에 따라 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 30mm의 5개의 모델로 나누었다.

여기서 간격(h)는 펌프의 입구부와 흡수정 사이의 간격을 의미한다. 대상 간격이 줄어들면 연료 하적 후 잔류 연료량이 감소하게 된다. 하지만 간격이 일정 수준 이하로 감소할 경우 연료 흡입 장애에 따라 펌프 성능이 저하된다. 따라서 펌프의 입구부와 흡수정 사이 간격은 펌프 성능 및 잔류 연료에 직접적인 영향을 미치는 요소이다.

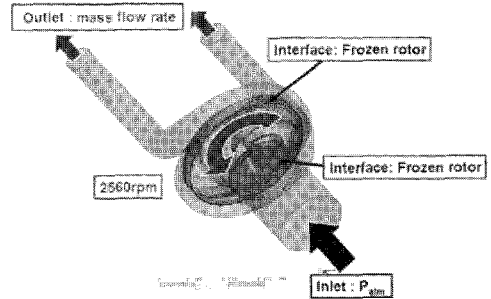


Fig. 1 Configuration and boundary condition of model 1

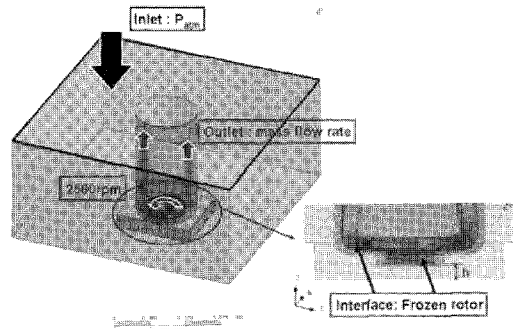


Fig. 2 Configuration and boundary condition of model 2

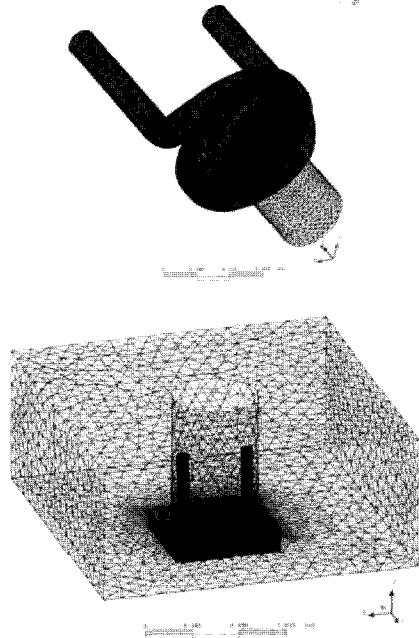


Fig. 3 Mesh of Model 1 & Model 2

2.2 격자계

대상 모델에 대한 수치해석을 수행하기 위하여 격자생성 프로그램인 CFX-mesh와 ICEM CFD 툴을 사용하여 Fig. 3과 같이 격자를 생성하였다. 모델 1의 경우 생성된 격자계는 약 60만개의 사면체 격자로 구성되어있으며 모델 2는 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격에 따라 격자의 계수가 130만개-135만개 사이 사면체 격자로 구성되었다.

2.3 수치해석 기법 및 경계 조건

본 연구에서는 상용 3차원 점성유체 해석 프로그램인 ANSYS-CFX-10을 사용하여 수치해석을 수행하였다.

펌프시스템의 유동장 특성을 알아보기 위한 비압축성 난류 유동해석을 위하여 3차원 평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 수치해석 계산에 사용한 지배방정식은 유한 체적법으로 이산화 되었으며, 이산화 기법으로는 2차 이상의 정확도를 갖는 고해상도기법(high resolution scheme)을 사용하였다. 난류유동의 해석을 위한 난류모델은 유동박리형상 등에 적절한 전단이송(shear stress transport)모델^(3,4)을 사용하였다.

경계조건으로 모델 1의 경우 Fig. 1과 같이 임펠러 입구에 연결된 직관의 입구부에 균일한 상태의 대기압을 주었고 벌류트 출구부에는 $600\text{m}^3/\text{h}$ 에 해당하는 질량유량을 주었으며 임펠러의 회전 속도는 2560 rpm이다. 또한 회전하는 임펠러와 회전하지 않는 벌류트, 입구 직관부 사이 접촉면에는 Frozen rotor interface 조건을 적용하였다.

모델 2의 경계조건은 Fig. 2와 같이 수면에 해당하는 입구부에 균일한 상태의 대기압을 주었으며 NPSH (Net Positive Suction Head) 계산을 수행하는 경우 수면에서의 입구부 압력을 낮추어 가면서 수치해석을 수행하였다. 기타 경계 조건은 모델 1과 동일하다. 펌프 내 작동유체는 두 모델 모두 물과 증기(Two phase flow)를 사용하였다.

3. 수치해석 결과

해석 결과 분석을 위하여 Fig. 4와 같이 구간에 따른 단면(Plane)을 생성하였다.

이때 Plane 1은 외부 탱크의 수면 근처의 유동 단면이며 Plane 2는 흡수정으로 유동이 흘러들어가는 지점

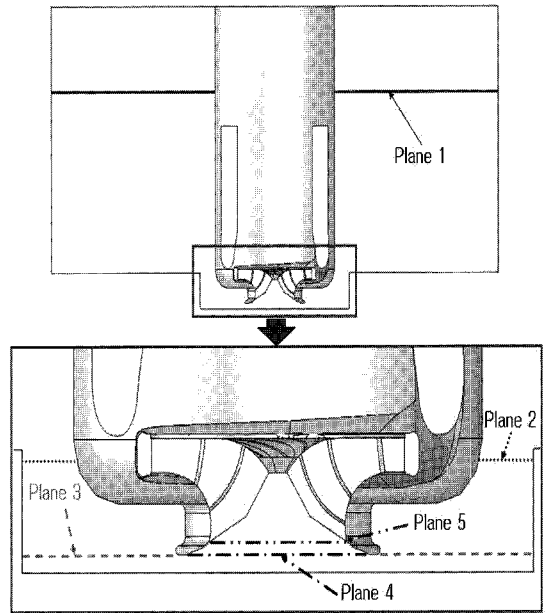


Fig. 4 Position of each Plane

에서의 펌프 케이싱 외부 유동 단면을 나타낸다. Plane 3은 펌프입구부가 시작되는 지점에서의 펌프 케이싱 외부의 유동 단면을 나타내며 반대로 Plane 4는 펌프의 입구부가 시작되는 지점에서의 펌프 케이싱 내부의 유동 단면을 나타낸다. 마지막으로 Plane 5는 펌프의 입구부로 흘러간 유동이 임펠러 날개로 유입이 시작되는 유동 단면을 나타내고 있다.

Plane 5는 모델 1의 경우에도 동일한 위치에 단면을 설정하였다.

3.1 간격에 따른 펌프 성능 평가

Fig. 5는 모델 1과 모델 2의 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격에 따른 전양정량을 비교한 그래프이다.

그림에서 볼 수 있듯이 펌프 전체 시스템을 수치해석한 모델 2의 전양정량이 임펠러와 벌류트 만을 수치해석한 모델 1의 전양정량에 비해 작은 결과 값을 나타내고 있으며 이러한 양정 손실은 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격이 줄어들수록 증가하는 것을 볼 수 있다.

특히 15mm의 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격까지는 양정 손실량이 크지 않지만 15mm 간격 이하 즉, 10mm 간격에서 양정 손실량이 급격히 증가하며 5mm의 간격에서는 매우 큰 양정 손실이 발생하는 것을 확

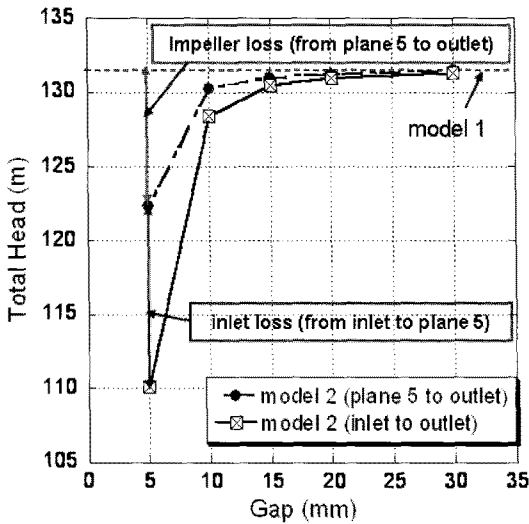


Fig. 5 Comparison of total head rise between model 1 and model 2

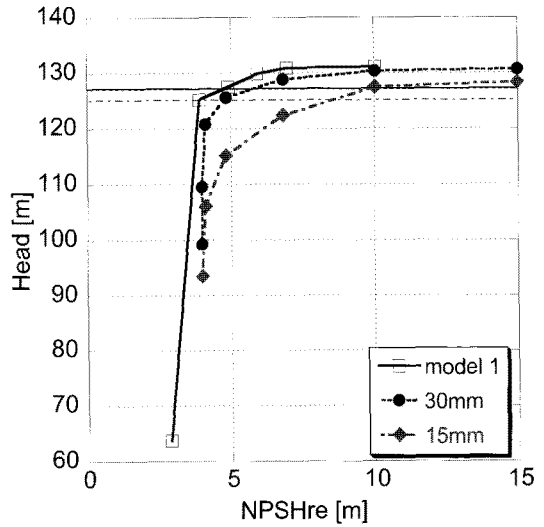


Fig. 6 NPSH curve of model 1 & model 2

인할 수 있다.

이러한 양정 손실이 발생하는 원인으로, 외부 유로에 따른 흡입 손실과 임펠러 입구부에서의 불균일한 유동의 유입으로 인한 임펠러의 성능 저하에 따른 것으로 분리하여 살펴볼 수 있다. 각각의 원인에 따른 양정 손실량을 알아보기 위해 Fig. 5의 모델 2에 대한 전양정량 결과를 측정 구간에 따라 2가지로 나타내었다. 그림에서 실선은 입구부에서 출구부까지의 전양정량 결과로써, 점선으로 표시된 모델 1의 전양정량 결과와의 차이는 입구부에서 출구부까지의 총 양정 손실량을 나타낸다. 일점쇄선은 임펠러 입구부(Plane 5)에서 출구부(Outlet)까지의 전양정량 결과로써 모델 1의 전양정량 결과(점선)와의 차이는 임펠러 성능 저하에 따른 양정 손실량을 의미하며, 입구부에서 출구부까지의 전양정량 결과(실선)와의 차이는 외부 유로에 따른 흡입 손실량으로 구분할 수 있다. 예를 들어, 간격 5mm의 경우 모델1과 비교한 전체 양정 손실의 차이는 약 21m이며, 이 중에서 임펠러 입구부까지의 손실은 12m로 전체 양정 손실 차이의 57.1%이고, 유동 불균일에 의한 임펠러 및 벌류트 내부손실은 9m로 전체 양정 손실 차이의 42.9%를 차지하고 있다.

대상 카고 펌프 시스템에서 펌프 외형과 흡수정 사이의 유동은 매우 복잡한 난류유동을 나타내고 있다. 이러한 유동의 불균일성으로 인하여 양정 손실이 발생하는 것으로 판단된다. 또한 외부 유로에서의 불균일

한 유동은 임펠러 입구부로 유입되어 임펠러 성능 저하에 영향을 미치게 된다.⁽⁵⁾

3.2 간격에 따른 펌프 흡입 성능 평가

펌프 입구부와 흡수정 사이 간격에 따른 흡입 성능 평가를 위해서 간격에 따른 NPSH 특성값을 Fig. 7과 같이 나타내었다.

결과 그래프에서 x축으로 표시된 NPSH값은 설정된 입구 압력값과 포화증기압에 의해서 결정되는 값으로 $NPSH = (P_m - P_{vapor}) / \rho g$ 의 식으로 계산된다. 즉, 입구 압력값을 낮춰 주면서 그에 따른 NPSH 값을 산출하게 되며 양정 손실이 3% 이상이 되는 지점을 NPSH_{re} 지점으로 나타낸다.

그림에서 볼 수 있듯이 NPSH_{re} 값은 모델 2의 값 (30mm : 5.75m, 15mm : 8.56m)에 비해 모델 1의 값 (4.78m)이 작은 결과 값을 보이고 있다.

또한 모델 2의 경우 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격이 작아질수록 NPSH_{re} 값이 커지는 것을 확인할 수 있다. 위 결과를 바탕으로 펌프의 입구부 형상이 펌프 흡입 성능에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격이 작아질수록 이러한 영향성이 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6과 같이 모델 및 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격에 따라 NPSH 특성에 차이가 있는 원인을 분석하기 위하여 Fig. 7과 같이 각각의 모델을 대상으로

하여 NPSHre 해석과정에서 볼 수 있는 공동 현상을 NPSH 지점에 따른 날개면에서의 기포 발생정도로 비교하였다. Fig. 7의 결과에서 볼 수 있듯이 기포 발생 영역이 모델 1에 비해 모델 2에서 상대적으로 많은 영역을 차지하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 모델 2의 경우 펌프 입구부와 흡수정 사이에 간격이 작아질수록 발생하는 기포량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 펌프 입구부에서 불균일한 유동의 영향으로 펌프 입구부 근처에서의 압력 차이가 발생하게 되고 이때 포화증기압 이하로 압력이 떨어지는 지점에서 발생된 기포가 펌프 내부로 유입되는 공동 현상이 발생하게 되며 이러한 공동현상은 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격이 작아질수록 증가하고 있다.

펌프 입구부에서의 기포 발생을 가시적으로 나타내기 위하여 ANSYS-CFX의 isosurface tool을 사용하여 NPSH 6.8m 지점에서의 각 모델에 대한 포화 증기압 이하의 구간을 Fig. 8과 같이 표시하였다. NPSHre 지점에 도달하지 않은 모델 1에서는 임펠러 날개부에만 미량의 기포가 발생된 것을 확인할 수 있었다. 반면에 모델 2의 펌프 입구부와 흡수정 사이간격 30mm의 경우는 NPSHre 지점 근처로써 기포가 펌프 입구부와 임펠러 날개부에 걸쳐 넓게 퍼져있는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 15mm 간격 모델은 NPSHre지점을 크게 벗어난 지점에서 해석된 결과이기 때문에 흡수정과 펌프 간격부분에서도 다량의 기포가 존재하고 임펠

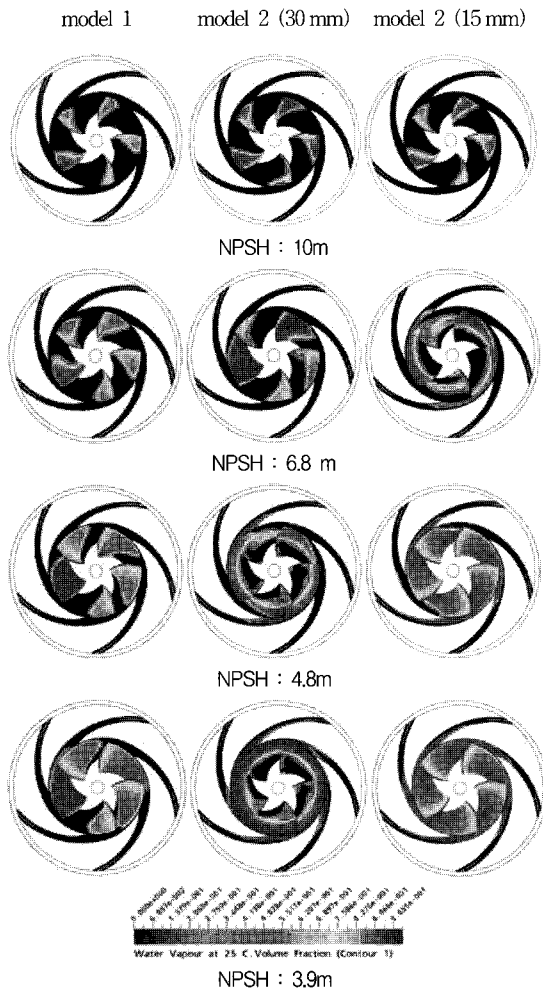


Fig. 7 Volume fraction of model 1 & model 2

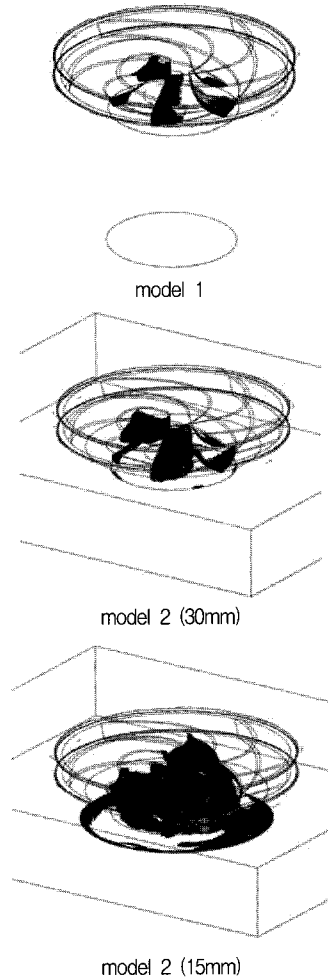


Fig. 8 Isosurface of vapor pressure for model 1 & model 2(gap : 15, 30mm) at NPSH = 6.8m

러 날개부의 많은 부분에서 기포가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

결과적으로 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격이 작아질수록 공동 현상의 영향성이 증가하여 Fig. 6의 결과와 같이 펌프 흡입 성능에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

추가적으로 보다 정확한 펌프 흡입 성능을 예측하기 위해서 공동 현상과 더불어 펌프의 흡입 성능에 큰 영향을 미치는 sump 현상에 대한 비정상상태 수치해석이 요구되어진다.

4. 결론

본 연구를 통하여 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격이 수중 카고 펌프의 흡입 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

- (1) 모델 2의 경우 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격이 작아질수록 양정 손실이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 외부 유로에 따른 손실과 유동의 불균일성 등 이상 유동에 의한 펌프 성능 저하에 따른 손실의 영향으로 판단된다.
- (2) NPSH 특성에 대한 수치해석을 통하여 모델 2가 모델 1에 비하여 흡입 성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 모델 2의 경우 펌프 입구부와 흡수정 사이 간격이 작아질수록 간격을 통과하는 압력손실이 커져서 캐비테이션 발생이 용이하게 되며, 이로 인해 펌프의 흡입 성능이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

- (3) 보다 정확한 펌프의 흡입 성능을 예측하기 위하여 캐비테이션 특성은 물론이고, 표면 및 벽에서 기포가 발생하는 sump 현상에 대한 비정상상태 수치해석이 요구되어진다.

후 기

본 연구는 부품·소재 기술 개발 사업 “Submerged Cargo Pump Module 개발” 연구의 일환으로 진행되었으며 이에 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) “Development of submerged cargo pump module,” 2007, Annual report, Components and materials technology development program.
- (2) Motohiko Nohmi, Yuka Iga, Akira Goto and Toshiaki Ikohagi, 2003, “CAVITATION CFD IN A CENTRIFUGAL PUMP,” Fifth International Symposium on Cavitation.
- (3) Choi, Y. S., Lee, Y. K., Hong, S. S. and Kang, S. Y., 2001, “Performance Analysis of the Centrifugal Pump Impeller Using Commercial CFD Code,” Journal of Fluid Machinery, Vol. 4, No.1, pp. 38~45.
- (4) Menter, F.R., 1993, “Zonal Two Equation k-Turbulence Models for Aerodynamic Flows,” AIAA, 93-2906. pp. 789~792.
- (5) Choi, Y. S., Kim, J. H. and Lee, K. Y., 2007, “Effects of inlet shape on the performance of a submerged cargo pump,” Journal of Fluid Machinery Vol.10, No.6, pp. 44~49.