

워터제트 선박추진용 사류펌프의 설계 및 성능해석

윤의수* · 오형우* · 안종우**

Design and Performance Analysis of Mixed-Flow Pumps for Waterjet Marine Propulsion

Eui-Soo Yoon*, Hyoung-Woo Oh*, Jong-Woo Ahn**

Key Words: Waterjet Propulsion (워터제트 추진), Mixed-Flow Pump (사류펌프), Mean Streamline Analysis (평균유선 해석), Performance Characteristics (성능특성), Commercial CFD Code (상용 CFD코드)

ABSTRACT

The hydraulic design optimization and performance analysis of mixed-flow pumps for waterjet marine vehicle propulsion has been carried out using mean streamline analysis and three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) code. In the present study, the conceptual design optimization has been formulated with a non-linear objective function to minimize the fluid dynamic losses, and then the commercial CFD code was incorporated to allow for detailed flow dynamic phenomena in the pump system. Newly designed mixed-flow model pump has been tested in the laboratory. Predicted performance curves by the CFD code agree very well with experimental data for a newly designed mixed-flow pump over the normal operating conditions. The design and prediction method presented herein can be used efficiently as a unified hydraulic design process of mixed-flow pumps for waterjet marine vehicle propulsion.

1. 서 론

화물운송은 운송비용이 고가이지만 신속한 항공운송 방법과, 상대적으로 비용이 저렴하고 대규모의 수송이 가능하지만 운송기간이 긴 재래식 선박에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 재래식 해상운송에서 물류비용 및 운송시간에 대한 문제를 동시에 해결하기 위해서는 해상교통수단의 고속화가 절실히 요구되는데, 여기에 장착되는 추진시스템을 기존의 프로펠러 형식(재래식)으로 택할 경우, 유동에 의한 침식 및 소음 등으

로 추진성능 저하에 많은 영향을 주기 때문에 선속증가에 한계가 있다. 반면에 펌프의 토출유동에 의한 반작용을 추진력으로 이용하는 워터제트(waterjet) 추진 선박의 경우, 기존의 프로펠러 형식보다 가속능력, 조향 및 제동성능이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 또한 워터제트 추진시스템은 회전수가 동일하다면 선속에 관계없이 거의 일정한 동력을 흡수하기 때문에 과부하가 감소되어 평균 기계수명이 상대적으로 길다. 이러한 이유로 최근에 선박용 추진장치로서 워터제트 시스템의 도입이 활발히 이루어지고 있다. 여러 가지 워터제트용 펌프의 운전조건을 검토하여 본 결과, 무차원 비속도(specific-speed, $\omega\sqrt{Q}/(gH)^{0.75}$)는 1.9 ~ 2.5의 범위에 존재하는 것으로 나타났고, 이 펌프는 Fig. 1에

* 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

** 한국해양연구원 해양운송시스템연구본부

책임저자 E-mail : esyoon@kimm.re.kr

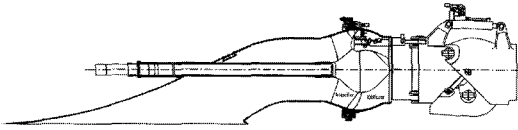
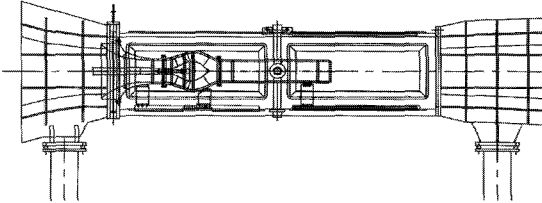
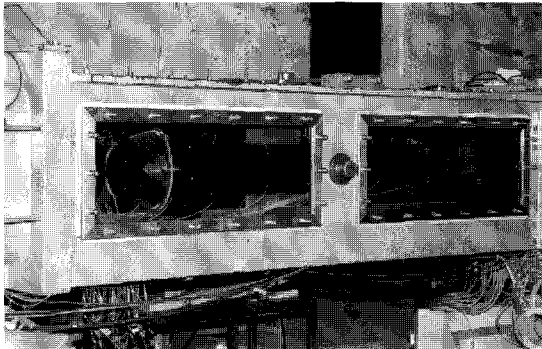


Fig. 1 Overview of a waterjet marine vehicle propulsion system



(a) Schematic diagram of performance test setup



(b) View of test setup

Fig. 2 Test setup

보이고 있는 것과 같이 사류형에 속한다.

본 연구에서는 기존의 터보기계 성능예측^{(1)~(3)} 및 최적설계기법^{(4),(5)}을 바탕으로 워터제트 추진시스템에 적합한 사류형 펌프에 대한 최적설계 및 성능해석을 수행하고자 한다. 초기의 최적설계단계에서 제시되는 자오면 형상은 수력학적 손실모델을 바탕으로 한 평균유선해석기법을 통해 결정된다. 그리고 이미 여러 문헌^{(6),(7)}에서 예측성능이 입증된 해석코드인 AEA Technology Engineering Software사의 CFX 계열 상용 CFD코드⁽⁸⁾를 이용하여 상세설계 및 내부유동 현상을 고려한 성능예측을 수행하였다. 이러한 일련의 기본설계 및 상세설계를 통하여 모델펌프를 설계하고, 이의 제작·성능시험 과정을 반복하여 목표성능을 만족하는 워터제트 추진용 사류펌프를 개발하였다.

2. 유동해석코드의 검증

본 연구에서는 워터제트 추진용 펌프의 임펠러 (또

는 로터) 및 디퓨저 (또는 스테이터)에 대한 상세설계를 위해 상용 CFD코드⁽⁸⁾를 사용하였다. 먼저, 사용하는 해석코드의 예측성능을 검증하기 위해 모델펌프에 대한 성능시험결과와 계산결과를 비교하기로 한다.

Fig. 2는 성능시험장치의 개략도와 사진을 나타낸 것이다. 이 측정 시스템에는 캐비테이션 터널 내에 피시험 펌프를 설치하여 가변속 모터로 구동시키고, 수력성능을 측정하기 위해 펌프 입출구 측에 정압공, 구동축에 토크미터, 펌프 토출 측에 유량측정용 노즐을 장착하였다. 펌프의 전양정 (H)은 펌프 입·출구에서의 정압 측정치와 유량/유로면적에 의한 속도로서 계산된다. 회전속도는 주동력계의 유니버설조인트 측에 설치된 광전식 근접 스위치에 의해, 그리고 토크는 회전축에 부착된 토크미터에 의해 측정된다.

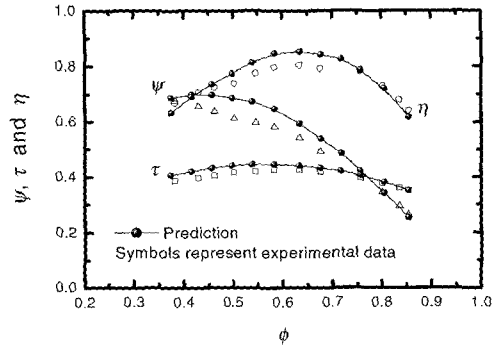
성능특성곡선에서 각종 물리량들 즉, 부피유량 ($Q[m^3/s]$), 회전속도 ($\omega[rad/s]$), 중력가속도 ($g[m/s^2]$), 전양정 ($H[m]$), 축동력 ($P_{in}[W]$), 유체밀도 ($\rho[kg/m^3]$)의 조합을 효율적으로 표현하기 위해 무차원 변수들을 도입하기로 한다. 여기서 $\phi (10 \times Q / (\omega D_{2r}^3))$, $\Psi (10 \times gH / (\omega^2 D_{2r}^2))$, $\tau (100 \times P_{in} / (\rho \omega^3 D_{2r}^5))$, $\eta (\rho gHQ / P_{in})$ 는 각각 유량계수, 전압력계수, 동력계수, 펌프효율을 의미한다. Fig. 3은 모델펌프 I에 대한 3차원 형상과 성능특성곡선을 나타낸 것이다. 이 그림에서 성능의 예측치와 실험치를 비교해 보면, CFD 해석코드는 전압력계수에 대한 실험결과를 다소 과도하게 예측하고 있으나, 동력 및 효율곡선의 경우 작동유량범위 내에서 대체적으로 만족스러운 예측경향을 보이고 있다. 최대 효율 지점 이상의 유량범위에서 예측성능이 비교적 정확하기 때문에 새로운 모델을 개발할 때에 이 상용코드를 적용하는 것은 타당성이 있다고 볼 수 있다.

3. 개념적 설계최적화

워터제트용 펌프의 3차원 형상설계를 수행하려면 먼저 기초형상자료 (기본설계자료)가 제시되어야 한다. 기본설계를 통해 입·출구 날개각도, 펌프의 자오면에 대한 설계변수 등이 결정되어야 한다. 참고로 개념설계에 의해 결정되는 자오면상의 대표적인 설계변수들을 Fig. 4에 나타내었다. 본 논문에서는 워터제트용 사류펌프의 개념적 최적설계를 수행하기 위해서 산업용 사류펌프의 설계에 적용했던 최적화 프로그램⁽⁵⁾을 활용하기로 한다. 이 최적화 기법에서는 워터제트 펌프 효율의 손실($1-\eta$)을 목적함수로 지정하고, 이를 최소화



(a) Three-dimensional configuration



(b) Performance characteristic curves

Fig. 3 Model pump I for waterjet marine propulsion

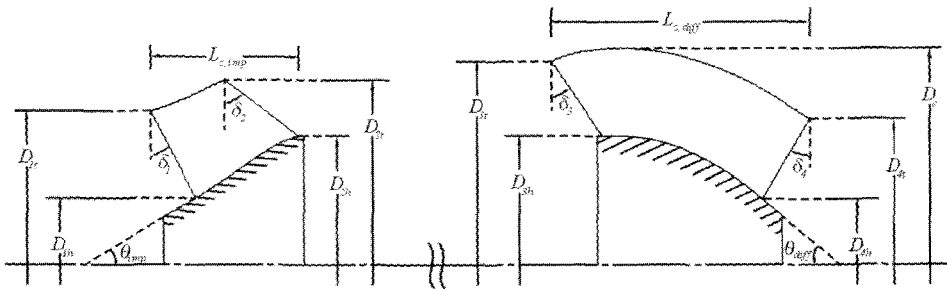


Fig. 4 Design variables in meridional cross-section

하는 비선형 최적화 문제를 다룬다. 여기에 필요한 기하학적, 유체역학적 제한조건은 대부분이 산업용 펌프의 자료에 기초를 두고 있다. Table 1은 기존의 산업용 사류펌프에 대한 설계제한조건⁽⁵⁾과는 다르게 선박추진용 워터제트시스템의 펌프에 필요한 조건과 추가적으로 고려해야 될 사항들을 나타낸다. 여기서 기호 및 첨자는 Fig. 4와 같이 정의된다.

본 연구에서 설계목표로 하는 선박사양에 근거한워터

제트용 펌프는 무차원비속도 2.43인 사류형로서, 유량계수 0.756에서 전압력계수 0.548의 성능을 만족시켜야 한다.

평균유선해석에 의해 최적화된 사류펌프 (모델펌프 II)의 무차원비속도와 무차원비지름 (specific-diameter, D_s) (gH)^{0.25} / \sqrt{Q})은 각각 2.43과 1.74로 기존의 효율적인 터보기계들에 대한 현장자료⁽⁹⁾의 분포 상에 존재함을 알 수 있다 (Fig. 5의 별표). Fig. 5에서 점선은 여러 산

Table 1 Additional design constraints for waterjet pump system

$0.25 \leq D_{1h}/D_{1l} \leq 0.50$	$0.6 \leq D_{4f}/D_{3t} \leq 0.9$
$13^\circ \leq \delta_1 \leq 30^\circ$	$1.0 \leq b_4/b_3 \leq 1.5$
$15^\circ \leq \delta_2 \leq 60^\circ$	$15^\circ \leq \delta_3 \leq 60^\circ$
$30^\circ \leq \theta_{imp} \leq 55^\circ$	$25^\circ \leq \delta_4 \leq 40^\circ$
$4 \leq Z_{imp} \leq 9$	$40^\circ \leq \theta_{diff} \leq 55^\circ$
$1.45 \leq D_c/D_{in} \leq 1.48$	$4 \leq Z_{diff} \leq 10$
$1.73 \leq L_{z,diff}/L_{z,imp} \leq 1.80$	

Note : Z=number of blades, b=width, Din=diameter of inlet duct.

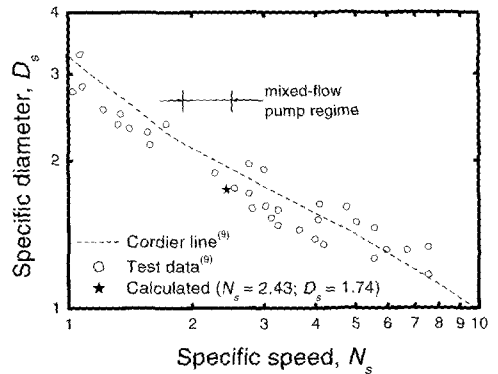


Fig. 5 Conceptual design optimization of model pump II (Specific speed - specific diameter)

입체의 자료들을 근거로 한 Cordier line⁽⁹⁾으로서 비속도 전 영역에 대한 비지름의 관계를 도식적으로 나타낸다. 이 검토를 통해서, 본 연구에서 수행한 기본설계에 대한 개념적 설계최적화는 신뢰할 만한 범위 내에서 이루어졌다고 볼 수 있다.

4. 워터제트 추진용 사류펌프의 상세설계

개념설계에서 자오면 설계자료에 근거하여 블레이드의 상세설계를 수행할 때에, 본 연구에서는 상용코드⁽⁸⁾를 사용한다. 상세설계한 후, CFD해석을 통해 펌프 내부의 유동현상을 고찰함으로써 기하학적 형상의 타당성을 검토한다. 이러한 일련의 형상설계, 유동해석 과정을 반복하여 설계를 완료한다. 상세설계 시 고려해야 할 대표적인 설계인자들을 살펴보면 다음과 같다. 임펠러에서는 블레이드 내부의 속도분포 (날개 하중, blade loading)를 최적화하도록 날개각도를 분포시키고, 펌프효율과 탈설계점에서의 성능을 향상시키기 위해 입사각 (incidence angle)을 적절히 분포시킨다. 디퓨저의 경우 날개부하를 적절히 분포시키고 동시에 워터제트 펌프의 효율을 향상시키기 위해 출구측 유동의 회전속도성분 (V_{θ})을 최소화시키는 방향으로 날개의 형상을 설계한다.

위의 상세설계 과정에 의해 설계된 워터제트 추진용 모델펌프 II의 3차원 형상을 Fig. 6(a)에 나타내었다. 임펠러 내부의 날개부하를 결정하기 위해 허브에서 팁 사이의 입사각을 5.6°~6.4°로 분포시켰다. 이것은 임펠러의 압력면 (PS)으로부터 입구유동에 대해 운동량이 추가적으로 공급하는 효과를 준다. 설계유량조건 ($\phi=0.756$)에서 계산된 임펠러 내부유동 분포 (Fig. 6(b))를 살펴보면, 허브에서 팁까지의 상대속도 (W)가 이상적으로 분포 (임펠러 팁 날개속도로 무차원화 됨)하고 있음을 알 수 있다. 디퓨저의 경우 (Fig. 6(c)), 출구측에서의 회전속도성분을 감소시키고, 펌프의 전양정 성능요구조건 ($\psi=0.548$)을 만족시키기 위한 방향으로 설계를 수행 (참고로 선박추진용 워터제트펌프를 설계하는데 먼저 고려해야 될 사항은 주어진 선박운동속도 즉, 펌프 유량에 대한 추진성능에 해당하는 설계점 양정을 만족시키는 것임.)한 결과, 임펠러 출구측의 유동각과 디퓨저의 입사각 사이에 매치가 적절히 이루어지지 않는 것으로 나타났다. 이것은 디퓨저 입구의 팁 부근에서 과도한 음의 입사각 (-15.5°)을 유발시킴으로써 입구측 흡입면 (SS)에 유동박리로 인한 유로폐

쇄를 발생시킨다. 이러한 이유로 디퓨저 입구 팁 부근의 압력면과 흡입면 사이에 절대속도분포가 역전되는 것으로 나타났다.

워터제트 추진시스템의 효율을 향상시키기 위해 추진용 펌프의 출구측 유동에 회전속도성분이 존재하지 않도록 디퓨저 날개의 형상을 설계해야 한다. Fig. 6(d)는 디퓨저 내부의 질량평균된 회전속도분포에 대한 계산결과를 나타내는데, 출구측에서 유동에 존재하는 무차원화된 와류속도 (V_{θ}/U_2)가 약 -0.025로서 아주 작아 만족스러운 경향을 보여주고 있다.

Fig. 6(e)는 펌프의 정압 (표준대기압으로 무차원화됨)에 대한 예측으로서, 그림에 보이고 있듯이 펌프 내부의 정압은 급속한 변화가 없이 원만하게 상승하고 있다.

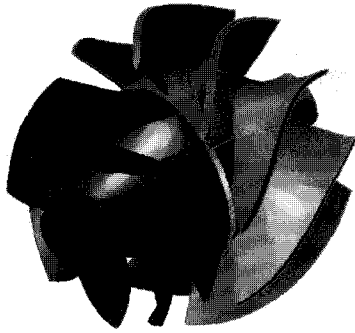
모델펌프 II에 요구되는 성능조건 (설계점)은 $\phi=0.756$, $\psi=0.548$ 로서 Fig. 6(f)에 '별표'로 표시된 바와 같다. 본 연구를 통해 설계한 결과, 설계점 유량계수 ($\phi=0.756$)에서 예측된 전양정계수 (ψ)가 0.530로서 요구조건 대비 상대오차가 3.28%이므로 공학적 관점에서 비교적 정확하게 설계된 것으로 나타났다.

이러한 일련의 기본설계, 상세설계를 통하여 성능요구조건을 만족시키는 워터제트 추진용 사류펌프 (모델펌프 II)을 결정하였다. 이 결과를 도면화하고, 제작 (Fig. 6(a)의 형상 참조) 및 성능시험 과정을 수행하였다. Fig. 6(f)는 모델펌프 II의 성능에 대한 예측치와 실험치를 보여주는 것으로서, 설계점 및 전체 작동유량 범위에서 예측된 결과와 성능시험 결과가 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다. 비록 저유량 부근의 예측성능이 다소 부정확하지만 작동유량조건에서의 전양정 (전압력계수) 예측경향은 실험결과와 일치한다. 토크성능 (동력계수)의 경우, 실험결과를 좀 높게 예측하고 있으나 전체적인 경향은 유사하다. 이러한 토크에 대한 해석의 차이가 효율예측에 영향 (underpredicted)을 주고 있으나, 실제 실험결과 모델펌프 II의 최대 효율은 설계점 유량 ($\phi=0.756$)에서 약 90%로서 수력학적으로 우수한 성능을 갖는 것으로 나타났다.

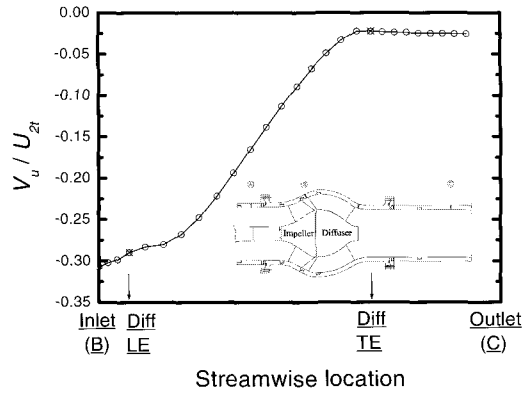
5. 결 론

최근 들어 새로운 수치해석기법의 개발과 컴퓨터 계산능력의 급속한 발전으로 인해, 기존의 유사한 터보기계에 대한 실험자료에 바탕을 둔 개념적 설계최적화에 상용 CFD 해석결과를 실질적으로 반영할 수 있

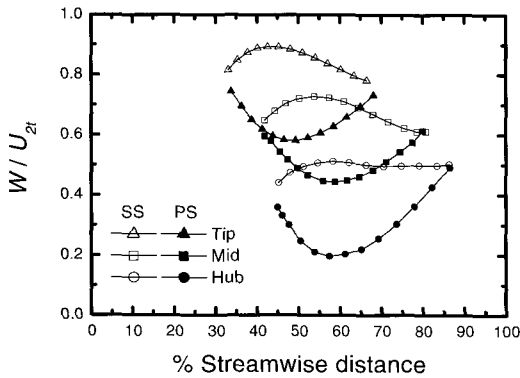
워터제트 선박추진용 사류펌프의 설계 및 성능해석



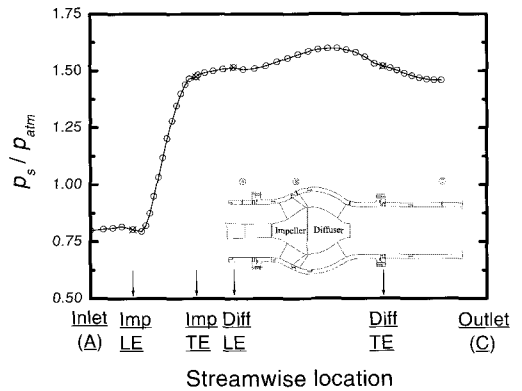
(a) Three-dimensional configuration



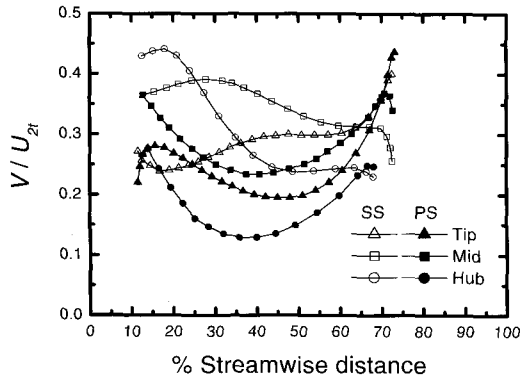
(d) Swirl velocity distribution through the diffuser at design flowrate



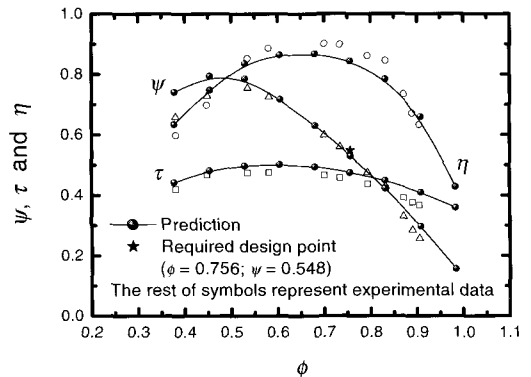
(b) Relative velocity distributions around the impeller at design flowrate



(e) Static pressure distribution of model pump II at design flowrate



(c) Absolute velocity distributions around the diffuser at design flowrate



(f) Performance characteristic curves

Fig. 6 Detailed design of model pump II for waterjet marine propulsion

게 되었다. 본 연구에서는 워터제트 추진용 사류펌프 시스템의 최적설계, 성능해석 및 제작을 하는데 있어서 기존의 산업용 사류펌프에 대한 설계제한조건외의 재검토 및 워터제트용 펌프의 특성을 고려한 제한조건을 제시하였고, 상용 CFD코드를 활용함으로써 신뢰성 있

는 설계기법을 확립하고, 이를 이용하여 고효율 (90%)의 워터제트용 사류펌프를 개발할 수 있었다.

앞으로 디퓨저 입구측의 입사각을 다시 분포시킴으로써 디퓨저의 날개부하를 개선하고, 날개각 분포를 개선함으로써 출구측에서의 회전속도성분을 제거하는

등의 연구가 수행되어야 한다. 또한 캐비테이션 성능을 고려하여 펌프의 안정성 및 내구성을 향상시키는 연구가 추가적으로 필요하다.

후 기

본 논문은 과학기술부 민군겸용기술사업으로 수행한 연구과제 내용의 일부입니다.

참고문헌

- (1) 오형우, 윤의수, 정명균, 1997, “원심 압축기의 성능 예측 및 손실 해석,” 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제6호, pp. 804~812.
- (2) 오형우, 윤의수, 하진수, 정명균, 1998, “혼류 펌프의 성능 해석,” 대한기계학회논문집(B), 제22권, 제1호, pp. 70~78.
- (3) 오형우, 김광용, 2000, “저유량 특성을 고려한 사류 송풍기의 성능 해석,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 110~115.
- (4) 오형우, 정명균, 김상철, 양근영, 하진수, 1999, “원심 펌프의 최적 설계,” 대한기계학회논문집(B), 제23권, 제2호, pp. 254~261.
- (5) 최희철, 김광용, 오형우, 2000, “사류펌프의 최적설계,” 제1회 한국유체공학기술대회논문집, pp. 643~646.
- (6) Koumoutsos, A., Toulidakis, A., Elder, R. L., 2000, “Computational Studies of Unsteady Flows in a Centrifugal Compressor Stage,” IMechE Journal of Power and Energy, Vol. 214, pp. 611~633.
- (7) 최영석, 이용갑, 홍순삼, 강신형, 2001, “상용 CFD 코드를 이용한 원심펌프 임펠러의 성능해석,” 유체기계저널, 제4권, 제1호, pp. 38~45.
- (8) CFX-BladeGen & CFX-BladeGenPlus, Version 4.1, AEA Technology Engineering Software Inc.
- (9) Balje, O. E., 1981, *Turbomachines: A Guide to Design, Selection and Theory*, John Wiley.