

Waterjet 선박추진용 사류펌프의 설계 및 성능해석

황순찬* · 윤의수* · 오형우* · 최범석* · 박무룡* · 안종우**

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

Soon-Chan Hwang*, Eui-Soo Yoon*, Hyoung-Woo Oh*, Bum-Seog Choi*,
Moo-Ryong Park*, Jong-Woo Ahn**

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

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. New 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 methods 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 등으로 추진성능 저하에 많은 영향을 주기 때문에 선속 증가에 한계가 있다. 반면에 펌프의 토출압에 의한 반작용을 추진력으로 이용하는 waterjet 선박의 경우, 기존의 프로펠러 형식보다 가속능력, 조향 (maneuverability) 및 제동성능이 뛰어나고, 회전수가 동일하다면 선속에 무관하게 거의 동일한 동력을 흡수하기 때문에 과부하로 인한 성능저하 현상이 감소되어 평균 기계수명이 상대적으로 길다. 이러한 이유로 최근에 선박용 추진장치로서 waterjet 시스템의 도입이 활발히 이루어지고 있다. Waterjet 선박추진용 시스템의 구조 (Fig. 1) 및 운항조건 등을 고려해 보면, waterjet 추진용 펌프의 형식은 사류형 (mixed-flow

* 한국기계연구원 열유체공정기술연구부
** 한국해양연구원 해양운송시스템연구본부
E-mail : esyoon@kimm.re.kr

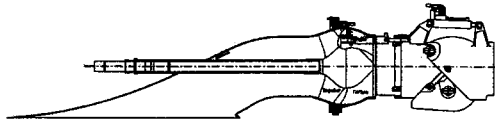
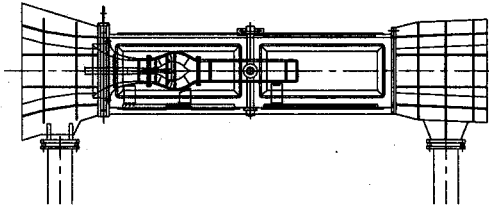
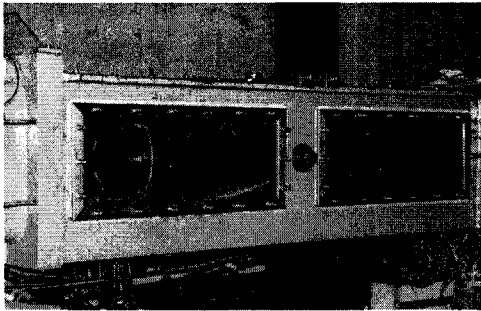


Fig. 1 Overview of a waterjet marine vehicle propulsion system



(a) Schematic diagram of performance test setup



(b) View of test setup

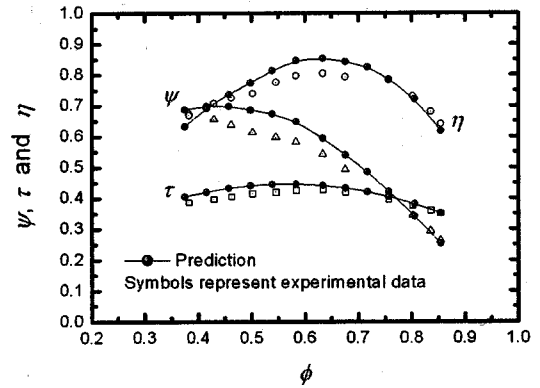
Fig. 2 Test setup

type)의 무차원 비속도 영역 (specific speed, $\omega\sqrt{Q}/(gH)^{0.75} = 1.9\sim 2.5$)에 속한다.

본 연구에서는 기존의 터보기계 성능예측^{(1)~(3)} 및 최적설계기법^{(4),(5)}을 바탕으로 선박추진시스템에 적합한 구조의 사류형 펌프에 대한 최적설계 및 성능해석을 수행하고자 한다. 초기의 최적설계단계에서 제시되는 자오면 형상은 수력학적 손실모델을 바탕으로 한 평균유선해석기법 (mean streamline analysis method)을 통해 결정된다. 그리고 이미 여러 문헌^{(6),(7)}에서 예측성능이 입증된 해석코드인 AEA Technology Engineering Software사의 CFX 계열 상용 CFD (Computational Fluid Dynamics) 코드⁽⁸⁾를 이용하여 상세설계 및 내부유동 현상을 고려한 성능예측을 수행



(a) Three-dimensional configuration



(b) Performance characteristic curves

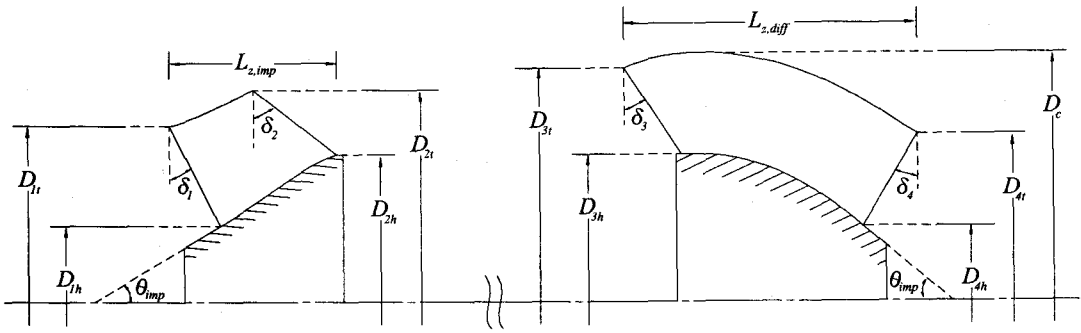
Fig. 3 Model pump I for waterjet marine propulsion

하였다. 이러한 일련의 예비설계 및 상세설계의 반복·검증작업을 통해 얻어진 모델펌프시스템을 제작·실험함으로써, 목표성능을 만족시키는 waterjet 추진용 사류펌프를 설계하였다.

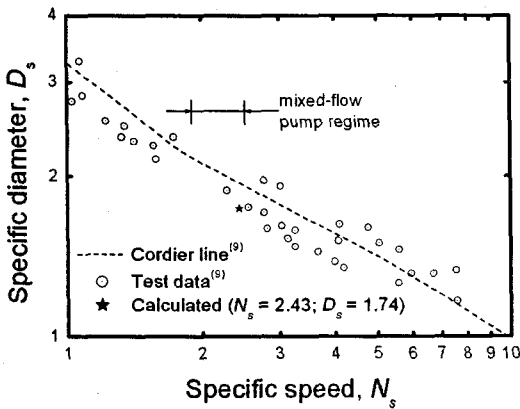
2. 유동해석코드의 검증

본 연구에서는 waterjet 추진용 펌프의 임펠러 및 디퓨저에 대한 상세설계를 위해 상용 CFD코드⁽⁸⁾를 사용하였다. 먼저, 도입된 해석코드의 예측성능을 검증하기 위해 모델펌프에 대한 성능시험결과와 계산결과를 비교한다.

Fig. 2는 성능시험장치의 개략도 (schematic test rig)를 나타낸다. Waterjet 추진장치용 펌프 (모델펌프 I, Fig. 3(a))의 유체역학적 출력특성 (펌프의 전양정,



(a) Meridional cross-section



(b) Specific speed - specific diameter

Fig. 4 Conceptual design optimization of model pump II

H)을 도출하기 위해 펌프 입·출구에서 평균정압을 측정하고, 출구노즐에서 계산된 펌프의 토출유량을 정압이 계속되는 각 지점에서 면적평균함으로써, 동압을 계산한다. 회전속도는 주동력계의 유니버설조인트 축에 광전식 근접 스위치를 설치하여 측정된다. 한편, 토크는 회전축에 부착된 스트레인게이지를 통해 측정된다.

성능곡선 (Fig. 3(b))에서 각종 물리량들 즉, 부피유량 ($Q[m^3/s]$), 회전축 각속도 ($\omega[rad/s]$), 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. 여기에서 φ ($10 \times Q/(\omega D_{2t}^3)$), ψ ($10 \times gH/(\omega^2 D_{2t}^2)$), τ

($100 \times P_{in}/(\rho \omega^3 D_{2t}^5)$), η ($\rho gHQ/P_{in}$)는 각각 유량계수, 전압력계수, 동력계수, 펌프효율을 의미한다. 성능결과를 비교해 보면, CFD 해석코드는 전압력계수에 대한 실험결과를 다소 과도하게 예측(overpredicted)하고 있으나 동력 및 효율곡선의 경우 작동유량범위 내에서 대체적으로 만족스러운 예측경향을 보이고 있다. 한편, 최대 효율 지점 이상의 유량범위에서 예측성능이 상대적으로 정확하기 때문에 새로운 모델 선정을 위한 설계시 본 연구에서 도입한 상용코드를 적용하는 것은 타당하다.

3. 개념적 설계최적화

Waterjet 추진용 펌프의 3차원 형상설계를 수행하려면 먼저 기초형상자료가 제시되어야 한다. 즉, 개념설계를 통해 입·출구 날개각도, 자오면상의 펌프시스템에 대한 설계변수 등이 결정되어야 한다. 본 논문에서는 waterjet 추진용 사류펌프의 개념적 최적설계를 수행하기 위해서 과거 산업용 사류펌프의 설계에 적용했던 최적화 프로그램⁽⁵⁾을 적용하기로 한다. Waterjet 펌프효율의 손실 ($1-\eta$)을 목적함수 (objective function)로 지정하고, 이것을 최소화하는 비선형 최적화 문제 (nonlinear optimization problem)를 다룬다. 여기에 필요한 기하학적·유체역학적 제한조건 (constraints)의 대부분은 산업용 펌프의 연구에서 제시했던 자료에 기초를 두고 있다. Table 1은 기존의 산업용 사류펌프에 대한 설계제한조건⁽⁵⁾과 달리 waterjet 선박추진용 펌프 시스템에 필요한 조건과 추가적으로 고려해야 될 사항들을 나타낸다. 참고로 개념설계에 의해 결정되는 자

Table 1 Additional design constraints for waterjet pump system

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

Note: Z =number of blades, b =width,
 D_{in} =diameter of inlet duct.

오면상의 대표적인 설계변수들을 Fig. 4(a)에 나타내었다.

본 연구에서 설계목표로 하는 선박사양에 근거한 waterjet 추진시스템은 무차원 비속도 2.43의 사류펌프로서 유량계수 0.756에서 전압력계수 0.548의 성능을 만족시켜야 한다.

평균유선해석에 의해 최적화 된 사류펌프 (모델펌프 II)의 무차원 비속도와 비지름 (specific diameter, $D_{2t}(gH)^{0.25}/\sqrt{Q}$)은 각각 2.43과 1.74로 기존의 효율적인 터보기계들에 대한 현장자료⁽⁹⁾의 분포 (industrial field data)상에 존재함을 알 수 있다 (Fig. 4(b)). 그림에서 점선은 여러 산업체 자료들을 근거로 한 통계적인 예측곡선 (코디어선도⁽⁹⁾, Cordier line)으로서 비속도 전영역에 대한 비지름의 관계를 도식적으로 나타낸다. 위의 비교를 통해서 본 연구에서 수행한 전체적인 자오면 형상에 대한 개념적 설계최적화는 신뢰할 만한 범위 내에서 이루어졌음을 알 수 있다.

4. Waterjet 추진용 사류펌프의 상세설계

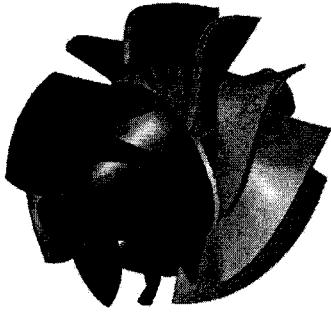
개념설계를 통해 결정된 자오면 설계자료를 바탕으로 블레이드의 상세설계 작업을 수행한다. 이를 위해 본 연구에서는 상용코드⁽⁸⁾를 도입하여 그래픽 환경

(graphic user interface) 하에서 기하학적 3차원 형상을 결정한다. 그리고 일련의 CFD 작업을 통해 펌프시스템 내부의 유동현상을 고찰함으로써 기하학적 형상의 타당성을 검토하는 반복설계과정을 수행한다. 이러한 상세설계시 고려해야 할 대표적인 설계인자들을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 블레이드 내부의 속도분포 (블레이드 하중, blade loading)를 최적화하는 날개각도를 분포시키고 펌프효율 및 탈설계점에서의 성능을 향상시키기 위해 입사각 (incidence angle = flow angle - blade angle)을 고려한다. 한편, 디퓨저의 경우 waterjet 펌프의 추진성능 (propulsive performance)을 향상시키기 위해 출구축 유동의 회전속도성분 (swirl velocity component, V_{sw})을 최소화시키는 방향으로 형상설계 (blading)를 수행한다.

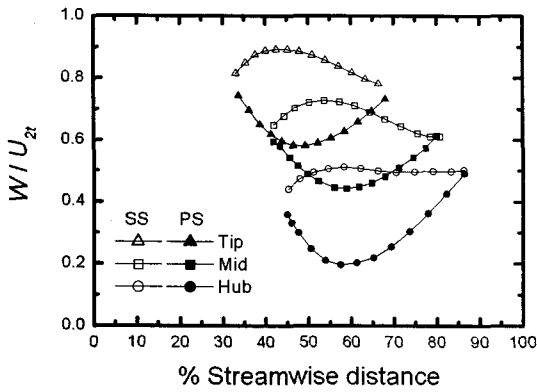
위의 상세설계 과정에 의해 설계된 waterjet 추진용 모델펌프 II의 3차원 형상을 Fig. 5(a)에 나타내었다.

본 연구에서는 임펠러 내부의 날개부하 (blade loading)를 결정하기 위해 허브에서 팁방향으로의 입사각을 $5.6^\circ \sim 6.4^\circ$ 로 분포시켰다. 이것은 임펠러의 압력면 (pressure surface, PS)으로부터 입구유동에 대해 운동량이 추가적으로 공급되는 효과를 가져온다. 설계유량 조건 ($\phi=0.756$)에서 계산된 임펠러 내부유동 분포 (Fig. 5(b))를 살펴보면, 허브에서 팁까지의 상대속도 (relative velocity, W)가 이상적 (ideal)으로 분포 (임펠러 팁 날개속도로 무차원화 됨)하고 있음을 알 수 있다. 디퓨저의 경우, 출구축 유동에서의 회전속도성분 (swirl component, V_{sw})을 감소시키고 펌프시스템의 전양정 성능요구조건 ($\psi=0.548$)을 만족시키기 위한 방향으로 설계를 수행 (참고로 선박추진용 펌프를 설계 하는데 먼저 고려해야 될 사항은 주어진 선박운항속도 즉, 펌프 유량에 대한 추진성능에 해당하는 설계점 양정을 만족시키는 것임)한 결과, 임펠러 출구축의 유동각과 디퓨저의 입사각 사이에 적절한 정보전달 (component matching)이 이루어지지 않았다. 이것은 디퓨저 입구의 팁 부근에서 과도한 음의 입사각 (-15.5°)이 형성되어 입구축 흡입면 (suction surface, SS)에 유동박리 (flow separation)로 인한 유로폐쇄 (flow blockage)를 발생시킨다. 이러한 이유로 디퓨저 입구 팁 부근에서 압력면과 흡입면 사이의 역전된 절대속도 (absolute velocity) 분포가 나타나게 된다 (Fig. 5(c)).

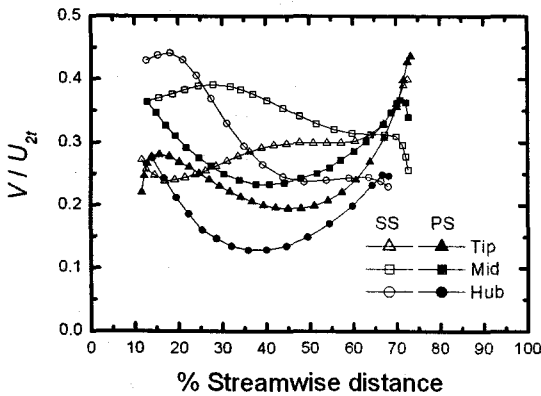
Waterjet 추진시스템의 조향성능을 향상시키기 위해



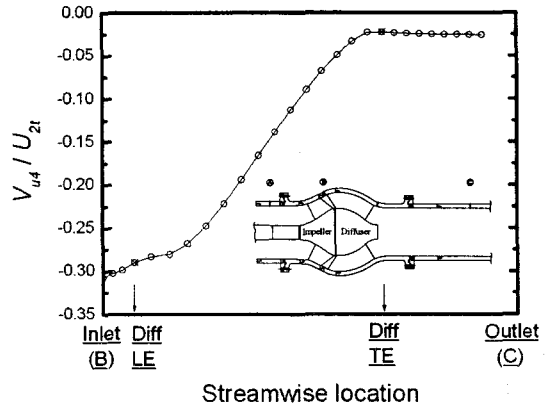
(a) Three-dimensional configuration



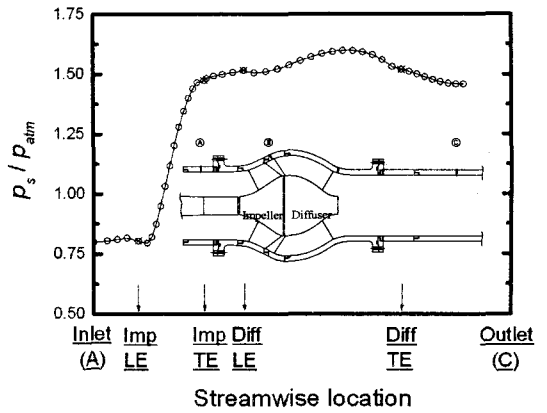
(b) Relative velocity distributions around the impeller for the design flow rate



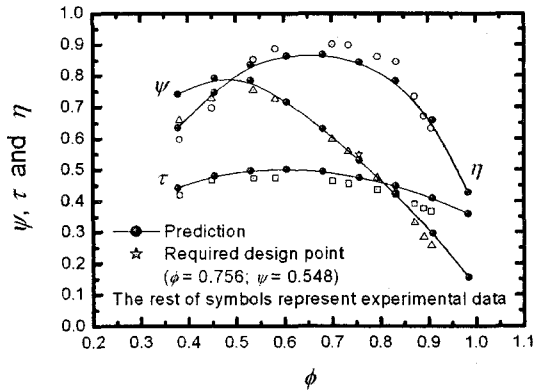
(c) Absolute velocity distributions around the diffuser for the design flow rate



(d) Swirl velocity distribution through the diffuser for the design flow rate



(e) Overall static pressure distribution of model pump II system for the design flow rate



(f) Performance characteristic curves

Fig. 5 Detailed design of model pump II for waterjet marine propulsion

추진용 펌프의 디퓨저 출구측 유동에 최소한의 회전속도 성분이 존재하도록 형상설계가 이루어져야 한다. Fig. 5(d)는 디퓨저 내부의 질량평균된 회전속도 (mass-averaged swirl velocity) 분포에 대한 계산결과를 나타내는데, 출구유동에 존재하는 무차원화된 와류속도 (V_{ω}/U_2)가 약 -0.025 로서 만족스러운 경향을 보여주고 있다.

Fig. 5(e)는 위와 같은 선박추진특성을 고려하여 설계된 펌프시스템의 전체 정압특성 (표준대기압으로 무차원화 됨)에 대한 예측 성능곡선으로서, 시스템 내부의 정압에 급속한 변화가 없이 원만하게 상승하고 있음을 보이고 있다.

Waterjet 선박추진용 사류펌프에 요구되는 성능조건은 $\varphi=0.756$, $\psi=0.548$ 로서 Fig. 5(f)에 '별표'로 나타내었다. 본 연구를 통해 수행한 상세설계 결과, 동일 유량계수조건 ($\varphi=0.756$)에서 계산된 전양정특성 (ψ)이 0.530 (상대오차 3.28%)로서 공학적 관점에서 비교적 정확하게 예측하고 있다.

이러한 일련의 개념설계·상세설계를 바탕으로 성능요구조건을 만족시키는 waterjet 추진용 사류펌프시스템 (모델펌프 II)을 결정하였다. 이 결과를 도면화하고, 실제 제작 (Fig. 5(a)의 형상 참조) 및 성능시험 과정을 수행하였다. Fig. 5(f)에서 보여지는 바와 같이 설계점 및 전체 작동유량 범위에서 미리 예측된 결과와 성능시험 결과가 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다. 비록 저유량 부근의 예측성능이 다소 부정확하지만 작동유량조건에서의 전양정 예측경향은 실험결과와 일치한다. 토크성능의 경우, 실험결과를 좀 높게 예측하고 있으나 전체적인 경향은 유사하다. 이러한 토크에 대한 해석의 차이가 효율예측에 영향 (under-predicted)을 주고 있으나, 실제 실험결과 모델펌프 II의 효율은 약 90%로서 수력학적으로 우수한 작동성능을 보이고 있다.

5. 결 론

최근 새로운 수치해석기법에 대한 개발과 컴퓨터 계산능력의 급속한 발전으로 인해, 기존의 유사한 터보기계에 대한 실험자료에 바탕을 둔 개념적 설계최적화에 상용 CFD 해석결과를 실질적으로 반영할 수 있게 되었다. 본 연구에서는 waterjet 추진용 사류펌프시스템의 최적설계, 성능해석 및 제작을 하는데 있어서

기존의 산업용 사류펌프에 대한 설계제한조건의 재검토 및 waterjet 추진시스템 특성을 고려한 제한조건을 제시하였고, 상용 CFD코드에 의한 해석결과를 도입하여 비교적 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

앞으로 디퓨저 입구측의 입사각 분포를 재검토함으로써 디퓨저 내부의 날개부하 성능특성을 개선하고, 출구측 회전속도성분을 제거하는 등의 연구가 수행되어야 한다. 한편, 펌프시스템에 대한 수력학적으로 고효율화 뿐 만 아니라 공동형상 (cavitation)에 대한 성능특성을 고려함으로써 시스템의 안정성을 높이는 연구가 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 한국유체공학학술대회논문집, pp. 643~646.
- (6) Koumoutsos, A., Tourlidakis, 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.