

# CFD에 의한 입형 다단 원심펌프 유동특성에 관한 연구

모장오\* · 남구만\* · 김유택\*\* · 이영호\*\*\*

## A Study on Flow Characteristics of Vertical Multi-stage Centrifugal Pump by CFD

Jang-Oh MO\*, Koo-Man NAM\*, You-taek KIM\*\*, Young-Ho LEE\*\*\*

Key Words : Vertical Multi-stage Centrifugal Pump(입형 다단 원심펌프), Impeller(회전차), Guide Vane(안내깃), Power Efficiency(동력효율), Total Head(전양정)

### ABSTRACT

A commercial CFD code is applied to analyze the 3-D viscous flow field within vertical multi-stage centrifugal pump including impeller with 6 blades and guide vane with 11 blades and is performed by changing flow rate from 10 to 26 m<sup>3</sup>/h at the constant 3500rpm. The purpose of this 3-D numerical simulation is to confirm how much the effect of blade inlet angle of guide vane has an influence on the performance of vertical multi-stage centrifugal pump. these results performed by 20°, 30° inlet angle of guide vane are compared with grundfos performance data. The vertical multi-stage pump consist of the impeller, guide vane, and cylinder. The characteristics such as total pressure coefficient, total head, shaft horse power, power efficiency, discharge coefficient are represented according to flow rate changing.

### 1. 서론

터보기계의 설계는 유체공학과 관련된 광범위한 지식이 필요하며 이론적인 면과 경험적인 것을 동시에 요구하는 매우 어려운 분야중의 하나이다. 현재의 터보기계의 성능개선의 관점에서 효율은 한계점에 도달해 왔으며 기존의 설계방법을 수정하여 1%의 성능을 향상시키는 것은 에너지의 이용 관점에서 상당한 경제적인 효과를 과급하게 된다.<sup>(1)</sup>

현재 산업용 펌프로 많이 사용되고 있는 횡형 펌프는 같은 용량에서 최소의 면적을 차지하면서 고성능을 낼 수 있는 입형 다단 Booster 펌프로 대체 되고 있는데 국내에서는 일부 외국 제품을 모방하여 제작하고 있으나 자체기술을 완

전하게 확보하지 못하여 고효율의 Booster 펌프는 거의 수입하여 조립하는 실정이다. 특히, 어떤 Chemical에도 내식성이 우수한 티타늄 펌프는 전량 수입에 의존하고 있다.

본 연구에서는 입형 다단 원심펌프의 유동특성을 규명하고, 이를 설계에 반영시키기 위하여 상용코드인 TASCflow를 이용하여 3-D 점성 유체 영역을 비압축성, 정상상태로 계산하였다. 임펠러와 안내 깃의 설계는 CFX-Bladegen를 이용하여 초기 설계를 함으로서 설계 시 소요되는 전체 설계시간을 단축시켰다.

### 2. 유동해석

#### 2.1 지배방정식 및 난류모델

CFX-TASCflow는 비압축성 난류유동의 해석에 3차원

\* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부

\*\*\* 한국해양대학교 기계·정보공학부

Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS)방정식과 연속방정식을 지배방정식으로 하며, 이는 유한체적법에 의해 이산화된다. 수치해석은 3차원 비 압축성 정상상태 조건에 의하여 수행되었으며,  $k-\omega$  난류모델을 적용하였다. 일반적으로 상용코드에서 기본으로 제공하는 표준  $k-\epsilon$  모델의 경우, 표면이나 벽면에서의 유동박리를 정확하게 예측하지 못하는 단점을 가지고 있다. CFX-TASCflow는 또한  $k-\omega$  모델을 제공하고 있는데,  $k-\omega$  모델은 일반적으로 심한 유동박리가 발생하는 경우를 제외하고 상당히 정확한 예측을 가능하게 한다고 알려져 있다.<sup>(2)</sup> 따라서 블레이드 표면에서 발생하는 유동박리에 대한 영향을 반영하여 해석의 정확도를 확보하기 위해 본 연구에서는  $k-\omega$  모델을 적용하였으며, 대류항의 이산화 기법으로 2차 정확도를 가지는 수정 (Modified) LPS 기법을 사용하였다.<sup>(3)</sup>

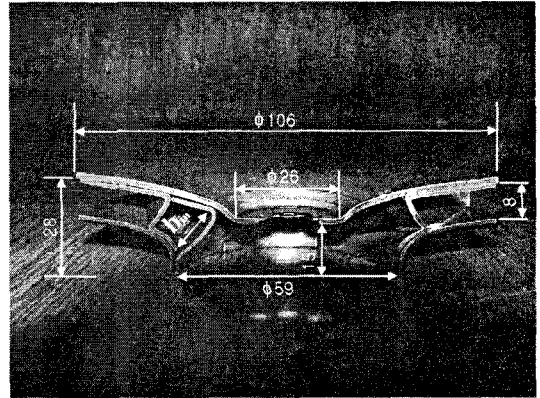


Fig. 1 Dimension of centrifugal impeller

## 2.2 입형 원심다단펌프 설계 조건

Fig. 1, 2는 본 연구에서 사용된 임펠러와 안내깃의 설계 조건을 나타내고 있으며, 임펠러의 외경, 내경, 입구폭, 출구폭은 각각 106, 59, 11.5, 8mm, 안내 깃의 입구폭과 출구폭은 7, 12mm이다. Fig. 3은 유입각  $20^\circ$  인 안내 깃을 모델링한 것이다. 본 연구에서는 임펠러 출구를 빠져나온 유체가 안내 깃 입구로 들어가도록 통로 역할을 해주는 안내 깃에 대하여 입구각을  $20^\circ, 30^\circ$  로 변화시키면서 수치해석을 행하였다. Stepanoff는 효율이 좋고 실용적인 출구각도를  $17^\circ 30' \sim 27^\circ 30'$  사이의 값을 권장하고 있으며 일반 펌프에서는  $20^\circ \sim 30^\circ$  가 가장 많고, 보통  $22^\circ 30' \sim 25^\circ$  를 사용하기 때문에 본 연구에서는 임펠러의 유입각과 유출각을  $24.67^\circ, 22.5^\circ$  로 설계하였다. 임펠러와 안내 깃의 형상설계는 CFX-Bladegen를 이용하였으며, 임펠러 자오면의 hub와 shroud는 Bezier 곡선으로 형상을 초기화 하여 설계하였다.

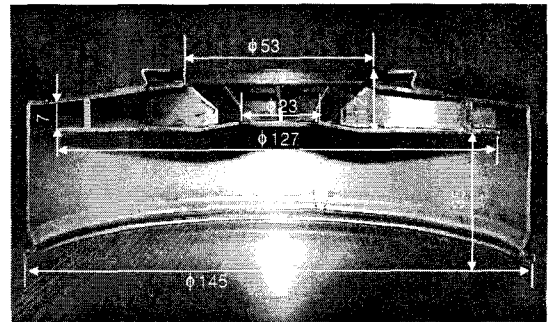


Fig. 2 Dimension of guide vane

## 2.3 입형 원심다단 펌프 형상 및 계산격자

본 연구의 수치해석 대상으로 사용된 입형 다단 원심 펌프는 총 5단으로 구성되어 있으며, 1단은 6개의 깃을 가진 임펠러와 11개 깃을 가진 안내 깃으로 구성된다. 원심펌프는 하나의 축에 5개의 임펠러가 물리면서 고속으로 회전하게 되고, 임펠러의 고속 회전에 의해 임펠러 출구부로 빠져 나온 유체는 다음 단의 임펠러 입구부로 유입하기 위해서 안내 깃을 통과해야만 한다. 일반적인 안내깃의 역할은 임펠러의 바깥둘레에 입구를 두고 펌프 본체에 완전히 고정되어, 고압을 필요로 할 때 임펠러에서 나온 유체의 속도에 너지

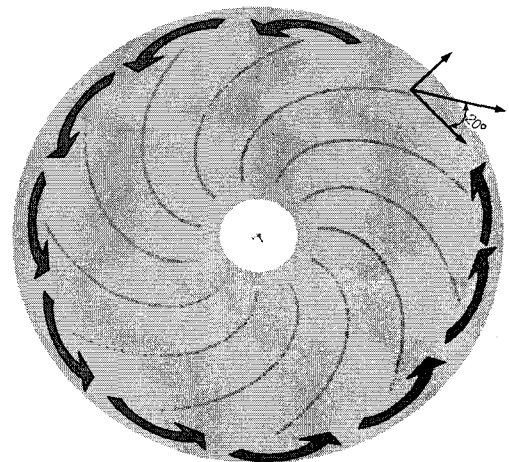
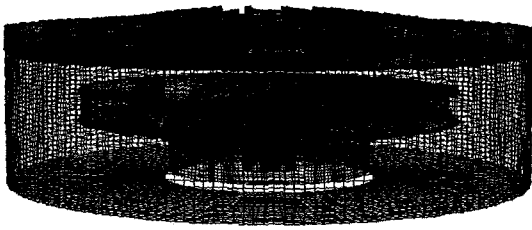
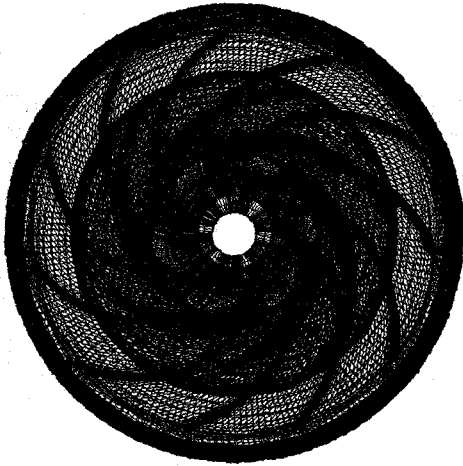


Fig. 3 Modeling of guide



(a) Side grid of vertical multi-stage pump



(b) Front grid of vertical multi-stage pump

Fig. 4 Total grid of multi-stage pump

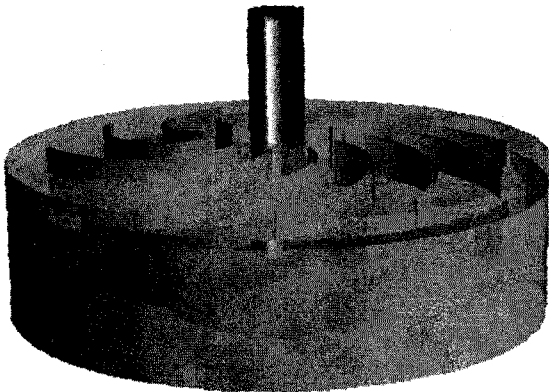


Fig.5 Multi-stage pump configuration

를 될 수 있는 대로 손실을 적게 하여 압력에너지로 회수하는 역할을 담당하지만 본 연구에서의 안내 깃의 역할은 임펠러를 빠져 나온 유체가 다음 단의 임펠러 유입부로 유입하도록 연결해 주는 하나의 통로 역할을 한다.

Fig. 4 (a), (b)는 측면과 정면에서 본 격자 생성도를 나타내고 있다. 계산에 사용된 총 격자 수는 73만개이다. 임펠러와 안내 깃의 격자는 터보기계 전용 격자 생성기인 Turbo-Grid를 사용하여 생성하였으며 임펠러와 안내 깃을 연결하는 원통 부분에 대해서는 ICEM-CFD를 이용하였다. 격자를 생성하는 과정에서 임펠러 주위에서의 우수한 격자를 확보하기 위하여 전체 도메인을 9블록으로 나누었으며, TASCflow 계산시 요구되는 최소각인  $10^\circ$  보다 훨씬 큰  $36^\circ$  각을 확보하여 수치계산시 발생하게 되는 오차에러를 최소한으로 줄였으며 임펠러와 안내깃은 각각  $25^\circ, 15^\circ$ 의 각을 확보하였다. Fig. 5은 다단펌프에서 1단의 형상에 대한 개략도를 나타내고 있다. Fig. 6, 7은 임펠러와 안내깃의 자오면 형상을 나타내고 있으며 CFX-Bladegen에 의하여 설계되었다.

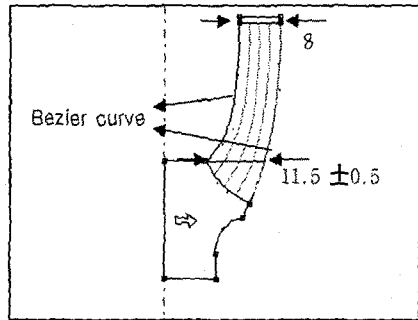


Fig. 6 Meridional section of impeller

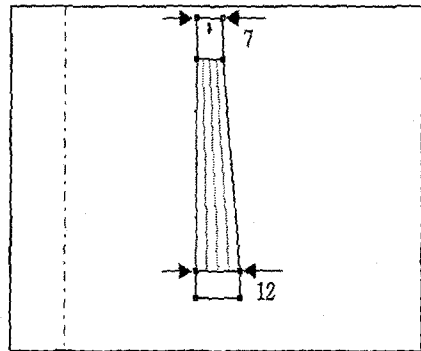


Fig. 7 Meridional section of guide vane

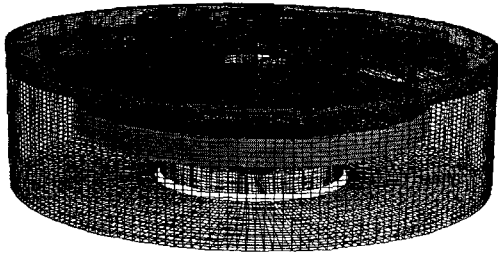


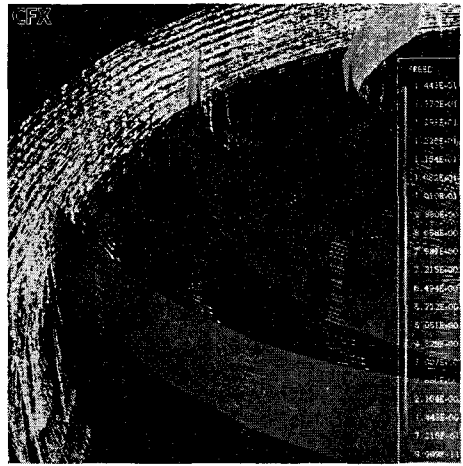
Fig. 8 Grid attaching of impeller and cylinder

### 2.4 경계 조건

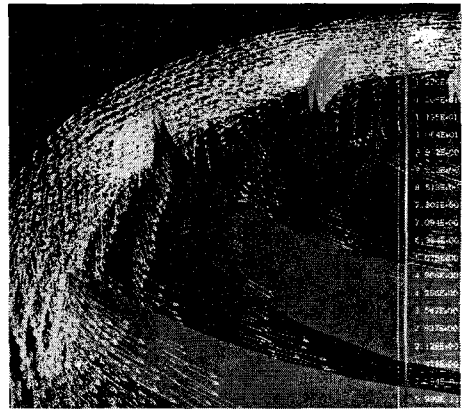
CFD를 통한 다단펌프의 해석에 있어서 적절한 가정을 통하여 수치계산에 소요되는 시간과 비용을 현저히 줄일 수 있다. 그러나 본 연구에서는 주기경계 조건 적용시 발생할 수 있는 수치영역의 모호한 설정 때문에 주기경계 조건없이 임펠러와 안내깃을 포함한 전체영역을 수치계산 대상으로 하였다. 수치계산에 사용된 경계조건으로 입구경계에서는 동일 압력 경계조건, 출구에서는 동일 유량조건을 지정하였으며 그 외의 영역에서는 벽면경계조건을 주었다. 본 수치계산의 경우 계산 영역 안에 임펠러인 회전부와 원통과 안내깃을 포함하는 두 개의 정지부를 갖고 있으므로 MFR(Multiple Frame of Reference)를 사용하였다. 따라서 임펠러를 포함하는 회전부의 벽은 상대좌표계에서 정지된 매크러운 벽으로 처리하였으며 원통과 안내깃을 나타내는 정지부의 벽은 절대 좌표계에서 정지된 매크러운 벽으로 취급하였다. 여기서 회전부와 정지부 사이의 경계면에서의 정보 전달 방법은 "Frozen Rotor" 방식을 사용하였다.<sup>(4)</sup> 본 연구의 입형다단 원심펌프의 수치해석의 격자는 임펠러와 안내깃 그리고 실린더의 3개의 블록으로 이루어져 있기 때문에 면과 면이 만나는 경계면에서 격자를 매칭을 할 필요가 있다. 그림 Fig. 8 임펠러와 안내깃의 격자 매칭을 나타내고 있다.

### 3. 계산 결과 및 고찰

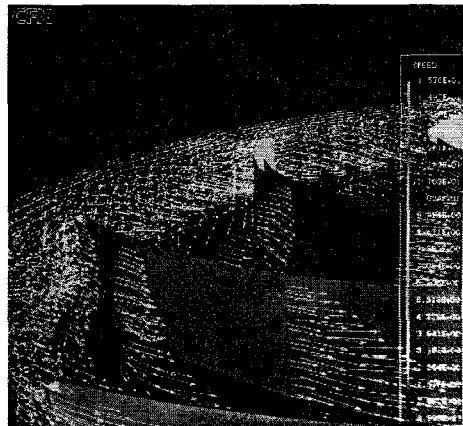
본 연구에서는 6개의 깃을 가진 임펠러와 11개의 깃을 가진 안내깃으로 구성된 입형 다단원심펌프의 1단에 대하여 일정회전수, 가변유량을 적용하여 3차원 점성 유동 계산을 수행하였다. Fig. 9(a) ~ (c)는 안내깃의 스펜 방향 50%지점에서 유량이 각각 10, 16, 26m<sup>3</sup>/h 일 때의 속도 분포를 나



(a) Flow rate : 10 m<sup>3</sup>/h



(b) Flow Rate : 16 m<sup>3</sup>/h



(c) Flow Rate : 26 m<sup>3</sup>/h

Fig. 9 Velocity vector distributions at the 50% position of span direction

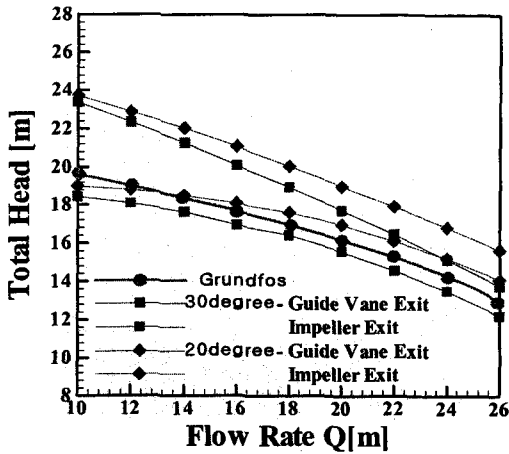


Fig. 10 Q - Total Head

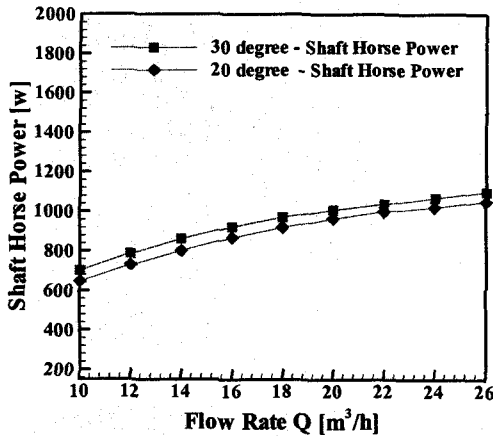


Fig. 11 Q - Shaft Horse Power

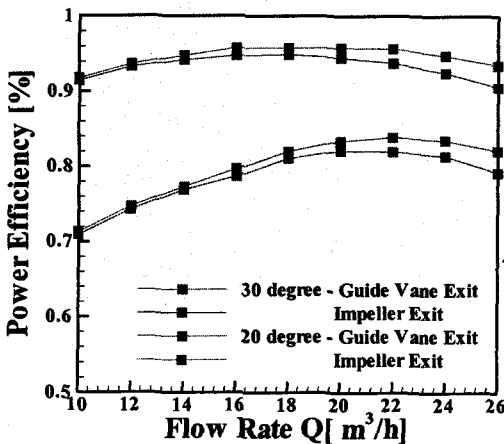


Fig. 12 Q - Power Efficiency

타내고 있다. 임펠러 출구를 빠져 나온 유체가 반시계 방향을 따라 돌면서 안내깃 입구부로 흘러 들어가고 있음을 확인 할 수 있다. 유량이 10, 16m<sup>3</sup>/h인 경우는 유체가 안내깃을 따라 잘 흘러 들어가 지 못하고 입구부에서 박리가 발생하여 유체의 압력을 감소시키고 있음을 알 수 있으며, 고유량인 26m<sup>3</sup>/h지점에서는 박리없이 유체가 잘 흘러 들어가고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 유량 변화에 따른 전양정 변화를 나타내고 있다. 안내 깃의 입구각이 20°로 재설계 한 경우가 입구각이 30°보다 전유량에 걸쳐서 양정이 높게 나타나고 있다. 기존의 설계는 설계점에서 양정값은 17m의 정도이지만, 안내 깃 입구각을 20°로 재설계한 경우 1m정도가 상승한 약 18m의 값을 보였다. 현재 시판되고 있는 Grundfos사 제품의 5단 입형 다단 원심펌프의 경우 약90m 양정을 내며, 1단의 경우에 대해서는 약 18m의 정도의 양정값을 보이는데 재설계한 안내 깃은 설계유량 이상에서 Grundfos사 제품보다 다소 양정이 높게 나타났으며, 저유량에서는 다소 낮게 나타났다.

Fig. 11 유량변화에 따른 축동력 변화를 나타내고 있다. 새로 재 설계한 경우가 기존의 경우보다 동력이 낮게 나타나고 있다. 이는 안내 깃의 형상이 동력에 큰 영향을 미치는 설계인자인 것으로 판단이 된다.

Fig. 12는 임펠러와 안내 깃 출구면에서 유량의 변화에 따른 동력 효율(Power Efficiency)의 변화를 나타낸 결과이며, 식(1)은 동력효율 계산시 사용된 식이다.

$$E_p = \frac{\dot{m}}{\rho} \frac{P_{out} - P_{in}}{L_s}, L_s = T \cdot \omega \quad (1)$$

( 단,  $\rho$  : 밀도,  $L_s$  : 축동력 )

전체적으로 동력효율은 18~20m<sup>3</sup>/h 기준으로 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 저유량에서는 기존 설계한 경우보다 약간 효율이 높게 나타나지만, 유량이 증가할수록 임펠러와 안내 깃의 출구면에서의 효율이 기존의 설계보다 훨씬 높은 효율을 보이고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 입형 다단 원심 펌프의 유동특성을 규명하기 위하여, 안내 깃 입구 각이 20°, 30°인 6개의 깃을 가진 임펠러와 11개의 깃을 가진 안내깃으로 구성된 입형 다단 원심 펌프의 1단의 경우에 대해서 동일회전수, 가변 유량을 적용하여 임펠러와 안내깃 주위의 유동해석 및 성능 평가를

수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 설계유량과 이보다 낮은 경우에는 유체가 안내 깃을 따라 잘 흘러 들어가지 못하고 박리가 발생하며, 고유량 지점에서는 박리없이 유체가 원활하게 잘 흘러 들어가고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 안내 깃의 입구각이 20° 로 재 설계한 경우가 전 유량에 걸쳐서 양정이 높게 나타나고 있으며, 설계점에서의 양정은 약 18m이다.
- (3) 전체적으로 동력효율은 18~20m<sup>3</sup>/h 기준으로 점차 감소하는 경향을 보였으며, 저 유량에서는 기존 설계한 경우보다 약간 효율이 높게 나타났지만, 유량이 증가할수록 임펠러와 안내 깃의 출구면에서의 효율이 기존의 설계보다 훨씬 높은 효율을 보이고 있다. 새로 재 설계한 안내 깃의 경우 임펠러와 안내 깃의 성능을 모두 향상시켰으며, 안내 깃 입구 각에 아주 민감한 영향을 받고 있음을 확인 할 수 있었다. 앞으로

안내 깃의 형상과 설계변수에 관한 다양한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- (1) 강신정, 안경훈, 이영호 “2차정도 와류 패널법에 의한 소형 원심 펌프 성능해석”, 대한기계학회 부산지부 춘계학술대회논문집 pp,264-270, 1999
- (2) 최영석, 이용갑, 홍순삼, 강신형, “상용 CFD코드를 이용한 원심펌프 임펠러의 성능해석”, 유체기계저널: 제4권,제1호, 2001, pp38-45
- (3) 심창열, 홍순삼, 강신형, “상용코드를 이용한 원심펌프 임펠러 유동평가” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2000, pp285-292
- (4) CFX TASCflow user Documentation, Theory Documentaton.