



## 원자력 발전소용 순환수 펌프의 성능해석

이 명 수,<sup>\*1</sup> 한 병 윤,<sup>1</sup> 황 도 연,<sup>1</sup> 유 성 수,<sup>1</sup> 박 형 구<sup>2</sup>

### THE PERFORMANCE ANALYSIS OF A CWP PUMP FOR A NUCLEAR POWER PLANT

M.S. Lee,<sup>\*1</sup> B.Y. Han,<sup>1</sup> D.Y. Hwang,<sup>1</sup> S.S. Yoo<sup>1</sup> and H.K. Park<sup>2</sup>

*The objective of this study is to investigate the suitable design for a domestic CWP pump, which is used in cooling-water intakes for the unit 3 and 4 of Yeonggwang nuclear power plant. All the simulations are performed, using CFD method with a commercial code STAR-CCM+ version 3.02. After modeling a present design of the pump, the flow around the rotating blade was calculated by using quasi-static method and sliding mesh method with the almost same condition as an actual state. Based on fundamental simulations with various depth of sea water, the reference pressure for the boundary condition of the present study was decided. To verify the reliability of the calculation results, the suction flow rate of the data was compared with that of the experimental data. As a result of this comparison, it is confirmed that two results are fairly consistent. For the improvement of the suction flow rate, computational analysis was done by changing a flow channel and blade shapes. It is shown that the suction flow rate of the new pump was improved.*

**Key Words :** CWP Pump(순환수 펌프), Suction Flow Rate(흡입유량), CFD(전산해석), Optimization(최적화)

### 1. 서 론

에너지의 안정적 공급을 위해 정부에서 원자력 발전 도입을 추진한 이래로 현재 우리나라에서는 원자력 발전기 20기가 상업 운전 중에 있으며, 발전량과 이용률에 설립 이래로 수배로 증가하였다. 가동률 및 발전용량에 있어서도 세계 6위에 속하는 등 우리나라의 에너지 발전 설비로서 큰 역할을 하고 있다.

특히 정부에서는 원자력 발전소의 발전 설비의 운영 뿐만 아니라, 설비의 국산화 및 보급, 아울러 미자립 핵심·원천기술의 확보와 기술자립형 독자노형 확보를 위하여 많은 투자를 하고 있다.

영광원자력 발전소 3,4호기에서 사용하고 있는 순환수 펌

프의 경우 독일 KSB사에서 수입한 제품으로 아직까지 발전 설비와 관련된 기계 부품에 있어서는 외국에 의존하고 있는 것이 현실이다. 현재 우리나라의 기술력을 바탕으로 국산화를 이루어 내기 위해서는 무엇보다도 많은 시간과 자본이 요구된다. 특히 원자력 발전소에 사용되는 모든 설비는 안전에 직결되기 때문에 이를 제작하는데 있어서 많은 투자가 필요하다. 하지만 전산해석(Computational Fluid Dynamics,CFD)을 선행적으로 수행해봄으로써 다양한 DATA에 대한 매개변수 해석(para-metric study)을 통해서 설계주기를 줄일 수 있다. 뿐만 아니라 소요되는 실험분량을 줄임으로써, 투자의 효율성 또한 높일 수 있다.

현재까지 원전기술에 대한 국산화를 위하여 많은 노력이 있었던 것에 비해 설비 기술에 대한 국내 연구의 경우 전산해석을 이용하는 부분에서는 극히 미비한 것이 현실이다. 김민환[1]등은 일체형원자로에 사용될 냉각재순환펌프에 대하여 임펠러 설계 입력자료를 FINE/Turbo 소프트웨어를 사용하여 전산해석을 수행하였다. 서영수[2]등은 원자력 발전소에 설치되는 입형 사류펌프의 구조적 안전성 평가를 위해 펌프의 동

1 학생회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 전남대학교

\* Corresponding author, E-mail: lmsgolf@naver.com



적 거동 및 진동특성을 평가하기 위해 동적 해석을 수행하였으나 해석방법이 FEM으로써 유동 관련 성능해석을 예측할 수가 없었으며, 정재경[3]은 본 연구와 같은 영광원자력 발전소 3,4호기 순환수 펌프에 관한 연구를 수행하였으나 해수온도에 대한 발전기출력 성능 연구에 국한되었다.

실제로 원자력발전소에서 사용하고 있는 펌프에 대해서는 현재까지 연구가 미비한 상황이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 실제 작동 조건을 바탕으로 해석이 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 현재 영광원자력 발전소 3,4호기에서 사용하고 있는 순환수 펌프에 대해서 흡입유량에 초점을 맞추어 성능해석을 수행하였다. 전산해석 상용코드인 STAR-CCM+ Version 3.02을 이용한 비정상 3차원 해석을 통해 얻어진 DATA를 기반으로 하여, 흡입유량 향상 방안에 대하여 제시해보고자 한다. 특히 효율에 미치는 여러 요인들 가운데 블레이드의 형상과 Shaft casing과 같은 유로의 형상에 초점을 맞추어 개선효과를 분석해 보았다.

## 2. 본 론

### 2.1 순환수 펌프의 구조

순환수 펌프의 일반적인 구조는 Fig. 1과 같이 이루어져 있으며 세부적으로는 Thrust bearings, Motor stool, Discharge elbow, Column pipe, Impeller, Hydraulics, Entry nozzle 등으로 구성된다. 순환수 펌프의 성능해석을 위해서는 실제 작동 유체가 흐르는 Entry nozzle에서부터 토출곡관인 Discharge elbow까지의 유동해석이 필요하며 Motor stool과 Shaft casing의 내부 및 bearing부위의 해석은 생략이 가능하다.

Fig. 2는 영광원자력 발전소 3,4호기에서 사용하고 있는 순환수 펌프의 구조이다. 순환수 펌프의 경우 임펠러가 항상 수중에 있고 시동이 쉽고, 흡입조건이 좋으며, 임펠러의 원자상의 위치에서 압력차가 없으며 대 구경에 적합하다는 이점을 가지고 있다.

회전하는 임펠러에 의해 해수의 유동이 발생하며 압력차로 인하여 Entry nozzle 부분에서 유동이 발생되어 유로를 따라 해수가 이동한다. 이러한 구조를 바탕으로 손실을 최소화하며 흡입유량을 극대화하기 위해서는 순환수 펌프에 대한 유동장 해석이 선행되어야 한다.

### 2.2 지배방정식 및 난류모델

순환수 펌프의 작동유체는 해수로서 비압축성으로 계산하였으며, 연속방정식과 Navier-stokes 방정식은 유차원 지배방정식을 사용하였다. 식 (1)은 연속방정식이며, 식 (2)는 운동량 방정식이다.

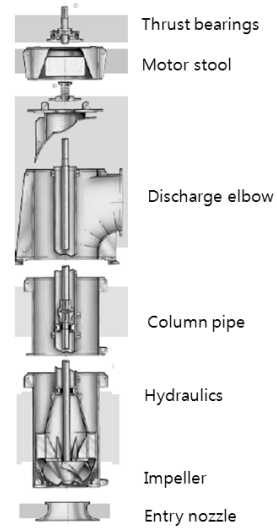


Fig. 1 Schematic of tubular casing CWP pump

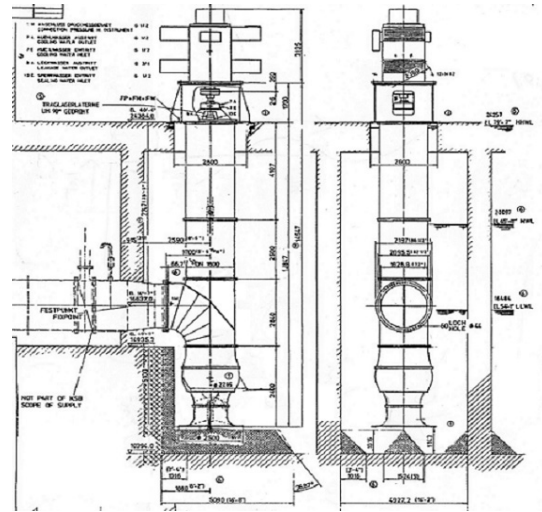


Fig. 2 Schematic of CWP pump of Yeonggwang nuclear power plant

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + g_i \tag{2}$$

난류모델의 경우 새로운 와전도 방정식과 평균 제곱 와도 변동의 역학식에 기초를 둔 새로운 소산율 모델 방정식을 적용시킨 Realizable k-ε 난류모델을 사용하였다. 이는 난류 경계



층의 벽면효과 Non-local 효과를 잘 묘사하는 것으로 알려져 있으며 최근 공학적으로 많이 사용되고 있는 난류 모델이다 [4]. 그 식은 식 (3), (4)와 같다.

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon - Y_M \quad (3)$$

$$\frac{D(\rho \epsilon)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + G_1 \rho S \epsilon + C_2 \frac{\rho \epsilon_2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (4)$$

난류의 큰 영향을 받을 것으로 예상되는 벽 근처 영역의 경우 식 (5), (6)과 같은 wolfstein Model을 사용하였다[5].

$$l_\epsilon = c_{1\mu} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{Re_y}{A_\mu}\right) \right] \quad (5)$$

$$\frac{\mu_t}{\mu} = Re_y C_\mu^{1/4} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{Re_y}{A_\mu}\right) \right] \quad (6)$$

여기서  $A_\mu = 2c_{1\mu}$  과  $c_{1\mu} = \kappa C_\mu^{-3/4}$ 이다. 난류의 점성은 식 (4)와 같으며,  $A_\mu = 70$ 이다.

위 방정식들을 고려하여 구하고자 하는 변수인 각 방향의 속도, 압력, 난류 등에 대하여 적절한 계수를 사용하여 계산을 수행하였다.

### 2.3 수치해석 방법

CFD 기법 가운데 회전하는 모델을 해석하는 방법에는 여러가지가 있다. 그 중 다좌표계법(MRF, multiple reference frame method)은 회전속도가 다른 두 영역이 격자로 연결되어 있는 형태로 Implic의 특성상 2개 이상의 passage를 사용하는 Implicit MRF 방법과 회전영역의 연결부에서 격자가 일치하지 않아 Frame 간의 격자를 명시적으로 연결해주고 경계조건을 서로 일치시켜주는 Explicit MRF 방법이 있다[6]. 다좌표계법의 경우 원심팬의 내부유동을 정상상태로 가정하여 유동장을 계산하는 방법으로서 원심팬과 디퓨저의 상호작용이 약하거나 유동장의 근사적인 값이 요구될 때 사용되어진다

이에 반해 비정상 유동을 가정하여 이를 해석하는 이동격자법(Sliding mesh method)은 회전 영역과 비회전 영역으로 구분하여 해석을 수행하는 방법으로서 격자가 이동하는 동안 경계면의 격자를 임의의 각도로 회전영역의 격자를 이동시키는 방법으로서 실제 문제와 가장 유사한 조건으로 해석을 할 수 있으나 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다[7].

본 연구에서는 회전하는 모델을 해석하는 두 방법을 모두

이용하여 결과를 비교한 후 적절한 해석방법을 선택하였다

### 2.3 작동유체의 물성값

영광 원자력 발전소의 취수구로 유입되는 해수는 발전소 주변의 해수로서 해수 유동은 해안선을 따르는 왕복성 조류이며, 평균 유속은 20~50cm/s를 유지한다. 우리나라의 경우 4 계절이 공존하기 때문에 해수의 온도를 평균적으로 고려해야만 한다. Table 1은 2008년 영광 원자력 발전소의 취수구로 유입되는 해수의 월간 수온 및 염분 분포이다[8].

취수구로 유입되는 평균 해수온도는 약 23.893℃로서 본 연구에서는 약 20℃로 가정하여 해석을 수행하였다. 또한 해수에 포함된 염분은 세계 바다의 평균염분농도 35‰로 고려하였으며, 이 때의 해수에 대한 물성값은 Table 2와 같다.

### 2.4 모델링 및 격자 생성

실제 영광 원자력 발전소의 순환수 펌프의 높이는 약 10m에 가깝다. 그러나 해수의 유동 영역만을 고려하였을 때는 대략 6m로 고려할 수 있다. 해석하고자 하는 모델에 대해서는 영광 원자력 발전소에서 도면을 제공받았다 복잡하고 큰 스케일에 대해서 편리하게 모델링을 할 수 있는 CATIA V5를 사용하여 순환수 펌프를 설계하였다.

본 연구에서는 다좌표계법과 이동격자법을 모두 이용하였다. 하나의 모델링에 대하여 해석조건이 차이만을 고려하여 연구를 수행할 수 있다는 상용코드의 장점을 고려하여 회전 영역과 비회전 영역으로 구분 한 후 상용코드인 STAR-CCM+ 3.02 version을 사용하여 미소체적인 격자를 Surface mesh에서

Table 1 Sea water temperature of Yeonggwang in 2008

	DATE	Sea water temperature
Maximum	2008.10.09	39.809℃
Minimum	2008.04.27	13.6℃
Average	-	23.893℃

Table 2 Property of sea water at average temperature

Property	Value
Density	1026kg/m <sup>3</sup>
Dynamics Viscosity	0.00108pa·s
Specific Heat	3993J/kg·K
Thermal Conductivity	0.596W/m·K
Thermal Expansion Coefficient	0.0003/K
Turbulent Prandtl Number	7.2

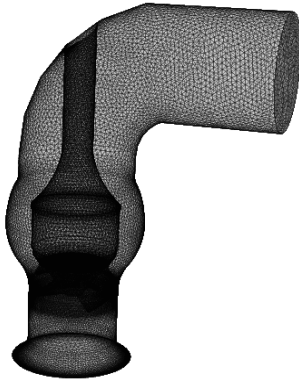


Fig. 3 Grid system of CWP pump

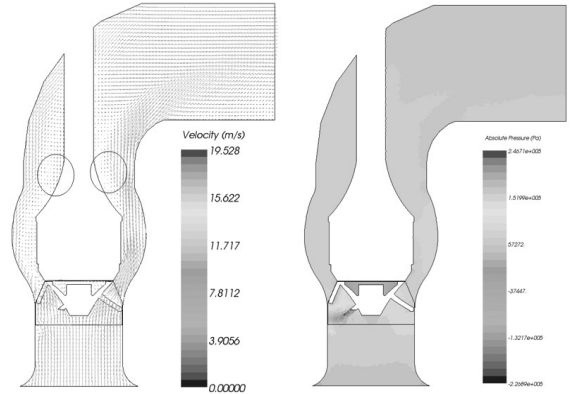


Fig. 5 Velocity vector and Pressure contours about CWP pump using MRF

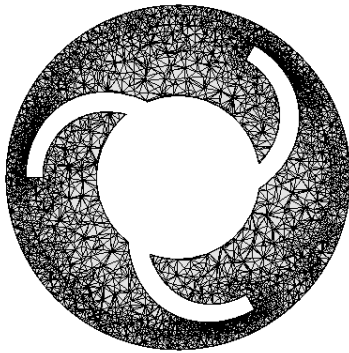


Fig. 4 Computational grid of mixed-flow

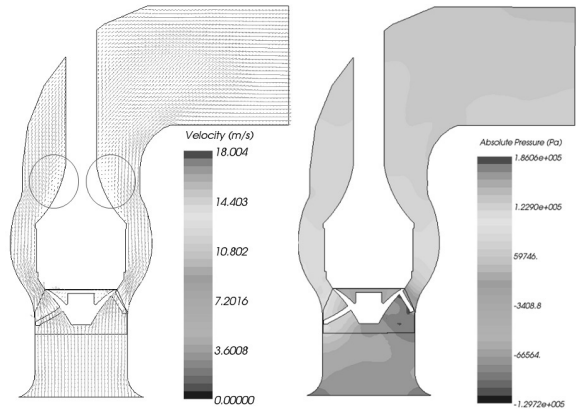


Fig. 6 Velocity vector and Pressure contours about CWP pump using Sliding mesh method

Volume mesh로 생성하였다.

위 상용코드에서 지원하는 세 종류의 격자 가운데 격자의 수에 비해 비교적 생성이 용이한 Tetrahedral mesh를 이용하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 회전영역과 비회전영역에 생성된 격자의 모습으로서 약 80만개와 약 120만개로서 계산의 정확도를 향상하기 위해서 회전하는 영역에 대해서 경계층을 고려하여 4개의 layer를 사용하여 계산을 수행하였다.

### 2.5 계산조건

본 연구에서 사용된 순환수 펌프는 작동 시 바닷속에 입구가 잠겨있기 때문에, 입구 영역은 수두압에 의한 압력 경계조건을 고려하였으며, 출구의 경우는 해수면 위에 위치해 있기 때문에 대기압 압력경계조건을 주었다. Casing의 경우 No-slip boundary condition을 적용하였다.

회전조건인 경우 실제 작동 속도인 357rpm을 주었으며, 회전방향은 시계방향이다. 위 DATA는 영광원자력 발전소에서

사용하는 순환수 펌프의 제작사인 독일 KSB사의 작동 DATA에 제시받아 이를 이용하였다. 또한 임펠러에 대해서는 이동격자계법 사용 시 시간 간격(time-step)마다 2°의 회전에 따른 계산 수행을 위해서 약 9.337e-4을 적용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 유동해석 결과에 대한 신뢰성 검토

KSB사에서 제공한 순환수 펌프의 작동 DATA에 의하면 흡입유량의 경우 약 8503kg/s으로 이를 전산해석 결과와 비교하였을 때 다좌표계법 사용 시 8453.445 kg/s이며, 이동격자계법 사용 시 약 11회전 후의 흡입유량은 8400.206 kg/s이다. 실제의 유량값과 유동해석의 정량적인 결과에 대한 차이는 다좌표계법의 경우 0.58%, 이동격자계법의 경우 1.2%로 측정

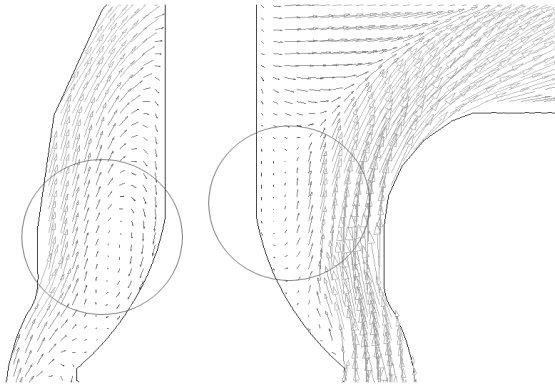


Fig. 7 Original shaft casing and blade shape of a CWP pump about CFD results

오차와 난류모델 및 대류항 처리기법 등에 의한 수치해석의 오차가 이에 포함된다

계산 오차가 크지 않으며 정성적으로 결과가 일치함을 알 수 있으며, 이를 통하여 전산해석의 신뢰성을 확보 하였다

### 3.2 기본모델 유동장

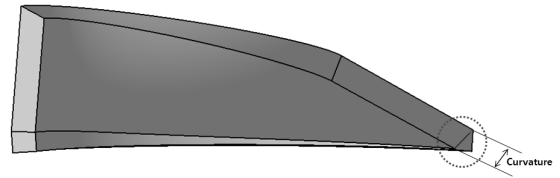
Fig. 5는 다좌표계법을 Fig. 6는 이동격자계법을 이용하여 전산해석을 수행한 속도벡터와 압력장으로서 이동격자계법의 경우 약 10회전 후의 결과이다. 회전하는 모델에 대하여 해석을 수행하는 두 가지 방법을 각각 비교해 보면 정성적인 결과가 상당히 유사함을 확인할 수가 있다

또한 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 Shaft casing 주변에서 유동 박리현상이 발생함을 확인할 할 수 있다. 이는 곧 유동장 내 유동 손실 및 소음의 원인이 될 수 있다 이러한 문제 해결을 위해서 유로의 형상 변경을 통해 유동박리를 해결할 필요가 있다.

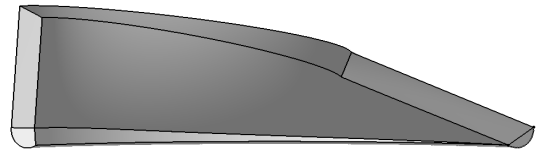
### 3.3 블레이드 형상 변경의 영향

블레이드의 형상이 직각에 가까울 때 유체가 벽면에서 충돌이 발생하는데, 이는 유체가 날카로운 형태의 직각 모서리를 따라 흐를 수 없기 때문에 소음 및 진동 등을 유발시키며 흡입유량을 저하시키는 원인이 된다. Fig. 9는 실제 순환수 펌프의 내의 임펠러로서 블레이드의 형상이 직각에 가까움을 확인할 수가 있다. 이러한 문제해결을 위해 블레이드의 형상을 변경할 필요가 있다. 이 현상을 극복하기 위해서는 블레이드 입구부에서의 입사각과 블레이드의 각을 고려하여 블레이드 입구에 대하여 흐름이 충돌 없이 유입되어야 한다[9].

본 연구에서는 이를 고려하여 블레이드의 끝단에 기존 형상인 Fig. 8(a)에서 (b)에 곡률을 주어 유선형으로 형상변경을 하였다. 기존 형상에 대한 해석 결과에서 다좌표계법과 이동



(a)original blade shape



(b)modified blade shape

Fig. 8 Shape of blade

격자계법의 결과에 있어서 정량적, 정성적 차이가 크게 존재하지 않았기 때문에 해석 시간등을 고려하여 다좌표계법을 이용하였다.

곡률의 경우 블레이드 끝단의 두 지점을 지나는 원으로서 최소 반지름에 근접한 45mm부터 5mm씩 증가시켜 각 모델별로 전산해석을 수행하였다 그 결과 전체적인 유동의 큰 변화가 없음에도 불구하고 Table 3와 같이 흡입유량에 변화가 있음을 확인할 수 있었다. 수정 전 모델과 비교하였을 때 약 12%의 흡입유량의 향상이었는데 이는 임펠러의 회전으로 인해 유입되는 해수가 블레이드 끝단에 수직으로 충돌하기 때문에 손실이 발생하였으나, 이 부분에 적절한 곡률처리를 통해 설계한 임펠러의 경우는 기존모델보다 손실을 크게 줄여 흡입유량을 상승시킬 수 있었다.

반지름이 40mm일 때부터 흡입유량이 9400 kg/s 이상임을 확인할 수 있는데 오차등을 고려하면 곡률을 변경하여도 그 이상에서는 큰 차이가 없음을 확인할 수가 있다 이는 임의의 최적점이 존재한다기 보다 블레이드 끝단에 곡률처리를 해주는 것 자체로 흡입유량이 크게 상승한다는 것을 의미한다.

### 3.4 Shaft casing 형상 변경의 영향

Fig. 10는 Shaft casing의 형상이다. 유로는 형상이 적합하지 않을 경우 유체가 가지고 있는 속도 수두를 잃게 되는데 이는 유로를 따라 흐르지 못하고 박리되는 원인이 된다. 특히 운전비용 및 에너지 효율 차원에서 보면 큰 손실이 될 수 있으므로 이를 개선하는 문제는 매우 중요하다[10].

문제점으로 파악된 부분을 개선하기 위하여 Fig. 11과 같

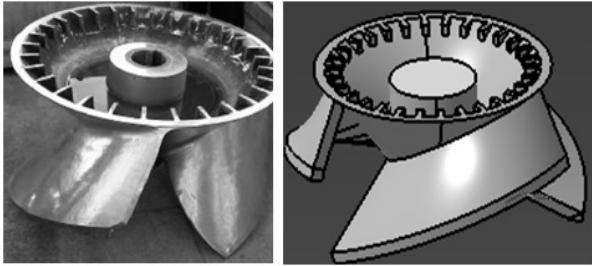


Fig. 9 The impeller of a CWP pump

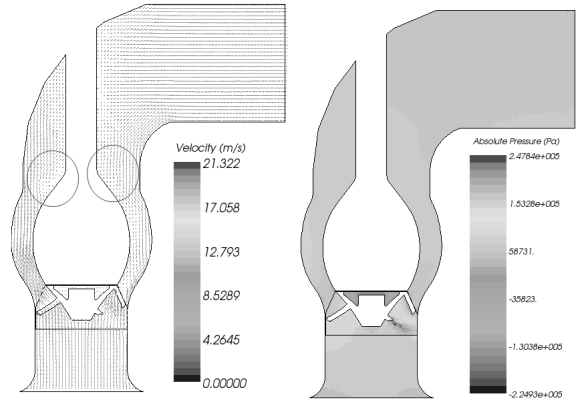


Fig. 11 Modified shaft casing and blade shape of a CWP pump about CFD results



Fig. 10 The shaft casing of a CWP pump

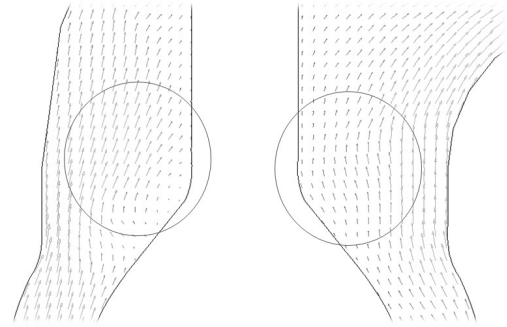


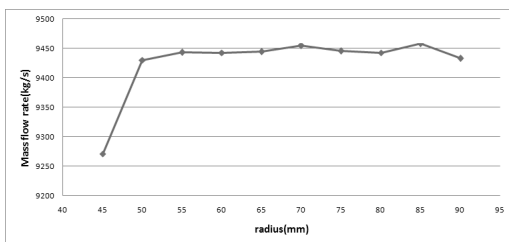
Fig. 12 Modified shaft casing and blade shape of a CWP pump about CFD results

이 Shaft casing 의 형상을 기존 직각형에서 유선형으로 형상 변경을 하였다. 또한 블레이드 형상 변경을 통해 얻은 DATA 를 바탕으로 반지름이 85mm 인 경우에 대하여 전산해석을 수행하였다.

전산해석 결과 흡입유량이 9674.529kg/s로서 기존 모델에 비해 약 14%가 향상됨을 확인할 수 있었으며, Fig. 10은 속도 벡터와 압력장을 표현하였다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 유동 박리 현상 또한 현저하게 줄어들었음을 확인 할 수가 있었다.

### 5. 결 론

Table 3 In case of modified model following result of CFD



본 연구에서는 상용코드인 STAR-CCM+ Version 3.02를 이용하여 영광원자력 발전소 3,4호기의 순환수 펌프의 성능해석을 수행하였다. 또한 블레이드 및 Shaft casing의 형상 변경을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 실험 결과와 비교함에 있어서 오차가 다좌표계법의 경우 0.58%, 이동격자계법의 경우 1.2%로 정량적인 결과에 있어서 큰 오차가 없음을 확인함으로써 신뢰성을 확보하였다.
- 2) 블레이드 끝단의 형상을 유선형으로 변경하여 각 모델에 대해서 기존모델에 비해 약 12%의 흡입효율이 상승됨을 확인하였다.
- 3) 수정된 블레이드 끝단을 변경한 형상 중 가장 큰 흡입효율을 가진 모델을 바탕으로 Shaft casing의 유로를 변경한 결과 기본모델에 비해 약 14%의 흡입효율이 상승됨을 확인하였다.



- 4) Shaft casing의 형상을 기존의 직각형에서 유선형으로 형상 변경을 수행함으로써 유동박리를 줄일 수 있었다
- 5) 이로써 펌프 내부의 블레이드 형상과 Shaft casing이 흡입 유량에 미치는 영향이 지배적임을 확인할 수 있었다
- 6) 향후 블레이드 형상과 개수 그리고 유로를 개선함으로써 성능개선이 다각도로 이루어져야 할 것이다

### 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과이며 이에 감사드립니다

### 참고문헌

- [1] 2001, 김민환, 김종인, 박진석 “전산유체해석을 이용한 축류펌프의 성능예측” 한국전산유체공학회지 제6권, 제1호, pp.14-20.
- [2] 2006, 서영수, 임우섭, 정희택, “원자력 발전소용 입형 사류펌프의 동적해석에 관한 연구” 한국동력기계공학회지 제10권, 제4호, pp.71-77.
- [3] 2001, 정재경 “해수온도에 따른 영광원자력 3, 4호기 순환수펌프 운전에 관한 연구” 전남대 산업대학원 석사학위논문
- [4] 2004, 백영렬, “상업용 CFD software를 위한 V2F 난류모델(STAR-CD and Fluent),” 대학기계학회 기계저널, 제44권, 제4호, pp.18-19.
- [5] 2006, CD-adapco, STAR-CD:version 4.00 Methodology, pp.2\_1-2\_31.
- [6] 2006, 서정세, 이중섭, STAR-CD, 인터비전, pp.518-519.
- [7] 2005, SC/Tetra version6, Basics of CFD Analysis, pp.5\_40-5\_41.
- [8] 수온염분분포, 한국수력원자력발전소, 영광 원자력본부.
- [9] 2008, 하재현, 박상언, 서이수, 모양우, 유체기계, 보문당 pp.189-201.
- [10] 2001, 조종현, 조봉수, 조수용, “낮은 비속도를 갖는 터보펌프의 임펠러 형상 최적화에 관한 연구” 경상대학교 대학원 석사학위논문