

# 자오면 고정 형상에서 사류펌프 임펠러 및 디퓨저 날개형상 설계

김 성\*, 최영석\*, 이경용\*

한국생산기술연구원/에너지설비기술지원센터\*

## Blade Shape Design of Mixed-flow Pump Impellers and Diffusers in a Fixed Meridional Geometry

Sung Kim\*, Young-Seok Choi\*\*, Kyoung-Yong Lee\*

**ABSTRACT:** In this paper, the flow characteristics of the mixed-flow pump impellers and diffusers were numerically predicted by commercial CFD software and DOE(design of experiments). We also discussed how to improve the performance of the mixed-flow pump by designing the impeller and diffuser in the mixed-flow pump. Geometric design variables were defined by the vane plane development which indicates the blade-angle distributions and length of the impeller and the diffusers. Firstly, the design optimization of the defined impeller geometric variables has been done. After that, the flow characteristics were analyzed in the point of incidence angle at the diffuser leading edge for the optimized impeller. Then design of the defined diffuser shape variables has been performed. The reason for the performance improvement was discussed by examining the flow characteristics through the diffuser.

**Key words:** Mixed-flow Pump(사류펌프), Vane plane development(날개전개도), CFD(전산유체 역학), Design of experiments(실험계획법)

### 기 호 설 명

$\beta$  : 날개각 [°]  
 $i\beta$  : 입사각 [°]

### 하첨자

1 : 입구  
 2 : 출구  
 h : 허브 (hub)  
 m : 중간면 (mid span)  
 s : 슈라우드 (shroud)

### 1. 서 론

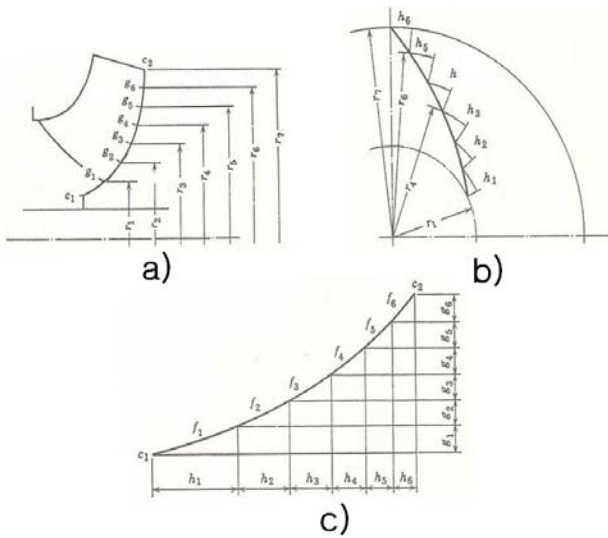
산업현장에서 사용되는 사류펌프는 수천 kW급의 소비동력이 매우 큰 에너지 다소비형 기계로서 최근 고유가 시대에 맞물려 효율 개선을 통한 에너지 절약은 매우 중요한 문제로 대두되고 있다.

미국, 독일, 일본 등의 선진업체들은 100년 이상 축적된 자체 기술력을 통하여 국제경쟁력을 확보하고 있으며, 특히 고부가가치산업(원전, 해수담수화)에 사용되는 펌프의 경우 효율 및 특이 현상에 대한 성능이 주된 이슈로서 기술력이 확보된 선진업체가 절대적으로 유리한 입장에 있는

† Corresponding author

Tel.: +82-41-589-8337; fax: +82-41-589-8330

E-mail address: yschoi@kitech.re.kr



**Fig. 1** Traditional impeller design method  
a) meridional view, b) front view, c) vane plane development<sup>(1)</sup>

실정이다. 그에 따라 국내에서도 사류펌프를 비롯한 펌프에 대한 연구 활동이 진행되고 있으며, 펌프 제작 회사나 연구기관 별로 수차례 연구 결과가 보고된 바 있다.

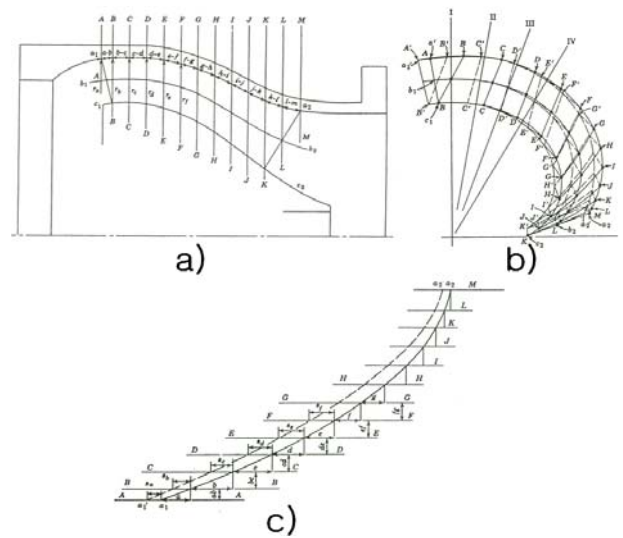
본 연구에서는 사류펌프 성능향상을 위해, 사류펌프 임펠러 최적설계 및 디퓨저 형상 변수가 사류펌프 성능에 미치는 영향 분석에 대해 수행하였다. 사류펌프의 최적설계를 위한 연구에서 중요하게 고려되어 지는 요소는, 크게 임펠러 설계 변수와 디퓨저 설계 변수로 나누어진다. 임펠러의 최적설계를 위하여, 자오면이 고정된 상태에서 임펠러 날개전개도에 대한 제어 변수들을 정의하였으며, 고전적 설계 방식과 실험계획법을 통하여 임펠러의 최적화를 수행하였다.

디퓨저 설계는, 최적설계된 임펠러형상 및 유동특성을 분석하고, 분석된 결과를 이용하여 설계 하였다. 디퓨저 역시 자오면이 고정된 상태에서 디퓨저 날개전개도를 제어하는 변수들을 정립하였고, 고전적 설계 방식과 실험계획법을 통하여 디퓨저 날개전개도 변수가 사류펌프 성능에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

## 2. 펌프 설계 방법

### 2.1 고전적 설계 방법

임펠러 및 디퓨저 형상은 Fig. 1-2와 같이 자



**Fig. 2** Traditional diffuser design method  
a) meridional view, b) front view, c) vane plane development<sup>(1)</sup>

오면과 전면으로 나타낼 수 있다.<sup>(1)</sup> Fig. 1-2에서 a)는 날개형상을 나타내는 자오면(meridional view)은 날개의 축 방향 및 반경방향 ( $z, r$ )의 정보를 나타낸다. b)는 날개 각도를 나타내는 전면(front view)은 반경 및 회전방향( $r, \theta$ )을 나타낸다. 또한 c)는 임펠러 및 디퓨저 자오면과 전면을 수평과 수직선상에서 전개한 날개전개도(vane plane development)이며 날개의 입/출구각도 및 날개길이를 쉽게 표현한 것이다.

임펠러 및 디퓨저 자오면과 전면에 대한 고전적인 설계 방법은, 펌프의 요구사양이 주어질 경우, 기본적인 펌프이론과 경험적인 측면에서 접근하여 자오면과 전면의 설계에 필요한 주요 변수가 정해진다.<sup>(1,2)</sup> 날개형상을 설계할 때, 날개의 입구각과 출구각도는 주어진 자오면 형상에서 펌프설계이론에 의한 입/출구 유동각에 의해 주로 결정되며, 날개길이와 관련이 있는 스위프각(sweep angle)의 경우는 입/출구각도가 정해지면 이를 부드럽게 연결하는 방법<sup>(1,2)</sup>으로 설계를 하기 때문에 임펠러 및 디퓨저 설계의 중요한 변수라기보다 결정되는 값에 주로 포함된다.

날개각도 및 날개길이를 쉽게 표현하는 날개전개도는 임펠러 및 디퓨저 형상을 결정하게 되어 사류펌프 성능에 많은 영향을 미치기 때문에, 날개전개도를 구성하는 다양한 설계인자의 변화에 따른 펌프의 성능특성을 파악하고 각 인자의 기여도 및 최적설계조건을 찾는 것이 필수적이다.

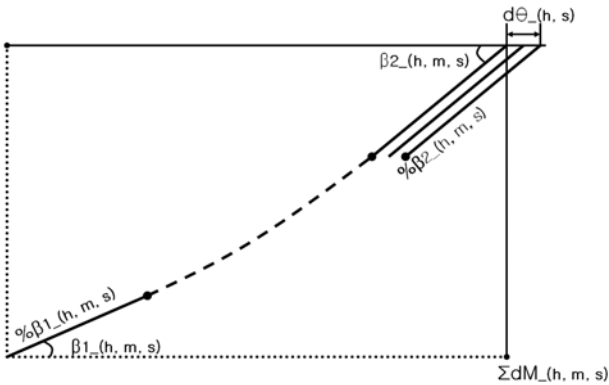


Fig. 3 Impeller design variables in a vane plane development<sup>(3)</sup>

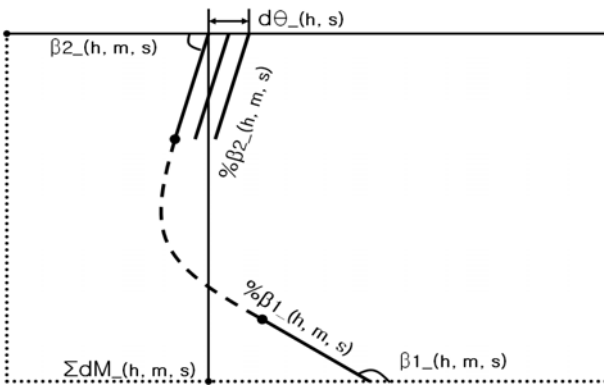


Fig. 4 Diffuser design variables in a vane plane development<sup>(3)</sup>

## 2.2 날개전개도 변수 정의

고전적 설계 방법을 이용하여 임펠러 및 디퓨저의 최적화 작업을 수행하기 위하여, Fig. 3-4와 같이 날개전개도 변수를 정의하였다.<sup>(3)</sup> 이때, 자오면은 경험적인 측면 및 선진업체 자오면을 분석 후, 설계하여 고정하였다.

그림에서  $\Sigma dM(h, m, s)$ 는 자오면에서의 날개길이를 모두 더해준 값을 의미한다.  $\% \beta_1(h, m, s)$ ,  $\% \beta_2(h, m, s)$ 는 날개전개도상의 입/출구부 날개각이 입/출구날개각과 동일한 값을 유지하는 정도를 나타내며 날개전개도에서는 선형적인 특징을 보인다.  $\beta_1(h, m, s)$ 는 임펠러 및 디퓨저 날개의 입구 각도를 나타내며,  $\beta_2(h, m, s)$ 는 임펠러 및 디퓨저 날개의 출구각도를 나타낸다.  $d\theta(h, s)$ 는 임펠러 및 디퓨저 출구부의 허브와 쉬라우드에서의 원주 방향으로 기울어진 정도를 나타낸다. 입구부분과 출구부분은 각도가 일정하게 변해가는 부드러운 곡선으로 연결하였다. 표기에서  $h$ 는 허브,  $m$ 은 중간면,  $s$ 는 쉬라우드를 의미한다.<sup>(3)</sup>

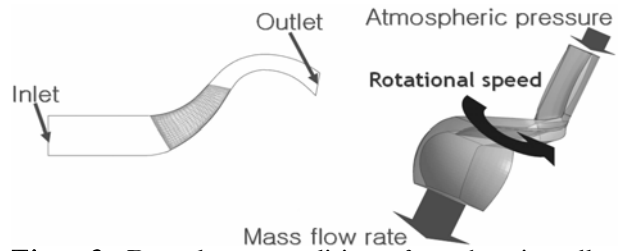


Fig. 6 Boundary condition for the impeller calculation

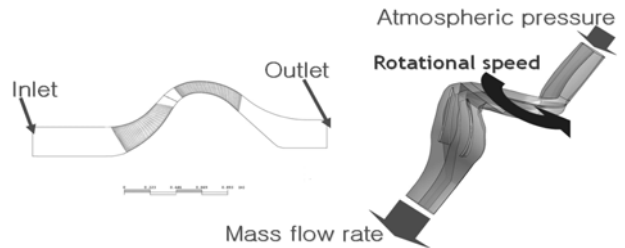


Fig. 7 Boundary condition for the impeller and diffuser calculation

## 3. 수치해석 기법

임펠러 및 디퓨저 3차원 형상은 ANSYS CFX-BladeGen 프로그램을 사용하여 생성하였으며, 생성된 형상에 대하여 유체기계 격자생성 프로그램인 ANSYS CFX-TurboGrid를 사용하여 정렬격자(structured grid)를 생성하였다.<sup>(3)</sup>

임펠러만을 수치해석하는 경우에는 정확한 성능을 확인하기 위해 출구 후단부를 Fig. 6과 같이 실제 디퓨저 형상과 동일한 형태로 처리하였으며 임펠러 유로 영역은 날개를 기준으로 동일한 형태를 띄고 있으므로, 주기 조건(Periodic condition)을 적용하여 임펠러 날개 하나의 유동 영역에 대해서만 수치해석을 수행하였다. 임펠러 및 디퓨저를 동시에 수치해석 하는 경우에도 주기 조건을 적용하여 Fig. 7과 같이 임펠러 날개 하나의 유동 영역과 그에 해당하는 디퓨저 유동 영역에 대하여 수치해석을 수행하였다. 이때 임펠러와 디퓨저가 결합되는 면은 Stage average조건을 주어 해석하였다.

수치해석은 상용 3차원 점성유체 해석 프로그램인 ANSYS CFX-11을 사용하였다.<sup>(3)</sup> 내부의 비압축성 난류유동해석을 위하여 3차원 레이놀즈평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 수치해석 계산에 사용한 지배방정식은 유한체적법으로 이산화 되었으며, 이산화 기법으로는 2차 이상의 정확도를 가지는 고해상도기법(high resolution

scheme)을 사용하였다. 난류유동의 해석을 위해 사용한 난류모델로는 유동박리 등의 예측에 적절한 전단이송(shear stress transport)  $k-\omega$  모델을 사용하였다. 경계조건으로는 임펠러의 입구부에 균일한 상태의 대기압을 주었고 출구부에는 각각의 설계 사양에 해당하는 질량유량으로 설정하였으며, 임펠러 회전속도는 580rpm으로 설정하였다. 작동유체는 물을 사용하였다.

#### 4. 실험계획법

실험계획법(design of experiments)은 근대적 통계해석법을 기반으로 이상변동을 가져오는 많은 원인 중에서 중요한 원인을 적은 비용으로 선정하고 그 효과를 수량적으로 측정하는 방법이다. 그리고 동시에 두 종류 이상의 인자를 대상으로 하여 그들의 효과를 개별적으로 측정할 수 있다. 설계인자의 수가 많은 경우 어떤 설계인자가 성능에 영향을 미치는 정도가 큰 지를 대략적으로 알아보는 것이 중요하게 되고, 이러한 과정에서 다음 설계단계에서 인자의 수를 줄이는 인자의 screening 과정도 가능하게 된다.

본 연구에서는 최적설계를 위한 수치최적화기법으로 실험계획법의  $2^k$ 요인실험과 반응표면기법을 사용하였다.

##### 4.1 $2^k$ 요인실험

$2^k$ 요인실험( $2^k$ factorial)은 통상  $k^n$ 으로 나타낸다. 이는 인자의 수가  $n$ 개이고 각 인자의 수준수가  $k$ 인 실험계획법으로 모든 인자간의 수준의 조합에서 실험이 이루어진다. 반복이 되지 않아도 최소한  $k^n$ 개의 실험이 실시되어야한다. 요인실험은 모든 요인들의 주효과(인자만의 효과)와 교호작용효과(인자간의 효과)를 추정할 수 있는 장점이 있다. 실험계획 초기에 관련된 인자가 많을 때 핵심인자를 찾아내는데 좋은 기법(screening)이다. 중요한 인자 중에서 최적치를 찾아주고, 최적치 주위에서 변화를 알아볼 수도 있다. 최적치 주위에서 변화를 알아보는 데는 반응표면분석이 이용된다. 본 연구에서는 관심 있는 인자의 수, 실행할 수 있는 실험의 수, 비용, 시간 등을 고려하여 의미가 적은 고차의 상호작용을 교락 시켜서 실험의 횟수를 적게 하는 일부실시설계

Table 1. Numerical analysis set of RSM for the impeller design

	$\beta_{2,h}$	$\beta_{2,s}$	Total head	Efficiency
case1	32	32	68.3854	97.8062
case2	38	32	72.3932	97.7454
case3	32	38	72.7581	97.6867
case4	38	38	75.3703	97.7479
case5	30.7574	32	70.4983	97.6809
case6	39.2426	32	74.4938	97.7275
case7	35	30.7574	70.2915	97.7505
case8	35	39.2426	74.6756	97.7035
case9	35	35	72.6210	97.7852

(fractional factorial designs)로  $2^k$ 요인실험을 수행하였다.

##### 4.2 반응표면기법

반응표면기법(Response Surface Method)이란 하나 또는 그 이상의 반응인자와 정량적인 실험인자 또는 인자 집합과의 관계를 규명하는데 사용하는 실험 설계방법으로 반응인자를 최적화 할 수 있는 인자의 조건을 찾는 데 목적이 있다. 본 연구에서는 목적값에 많은 영향을 미치는 주요인자를 중심합성법(central composite)을 사용하여 수치해석 실험세트를 생성하였고, 반응표면기법에 적용하였다.

#### 5. 사류펌프 최적 설계

##### 5.1 임펠러 최적 설계

임펠러 최적설계를 위해, 자오면 고정 형상에서 임펠러 성능을 나타내는 헤드와 효율에 많은 영향을 미치는 2가지 주요변수를  $\beta_{2,h}$ ,  $\beta_{2,s}$ 로 추렸으며, 이 2가지 변수로 반응표면기법 중에서 중심합성법을 사용하여 13개의 수치해석 실험조건을 생성하였다. 주요변수 2개를 제외한 나머지 변수들은 경험적인 측면을 적용하여, 고정시킨 후 반응표면기법을 적용하였다. 고정된 임펠러 설계형상 값으로는  $\%i\beta_{1,h}$ 는 20%,  $\%i\beta_{1,s}$ 는 20%로 고정하였고, 입구부의 허브, 쉬라우드의 입사각(incidence angle)으로써 유동각과 날개각의 차이를 나타내는 변수인  $i\beta_{1,h}$ 는 6°,  $i\beta_{1,s}$ 는 2°로 고정하였다.

Table 1은 반응표면기법을 적용한 구체적인 실

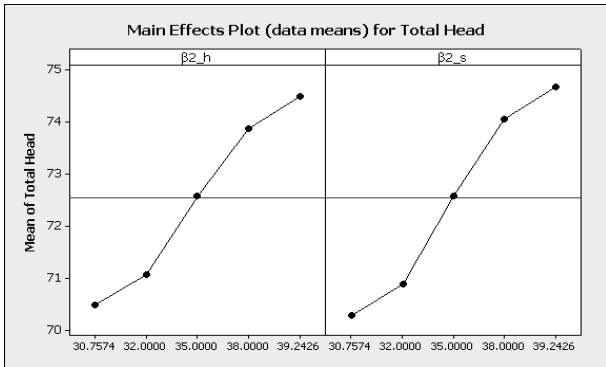


Fig. 8 Main effects plot for total head

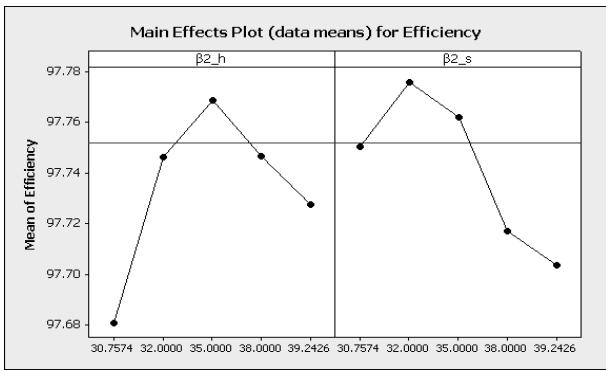


Fig. 9 Main effects plot for Efficiency

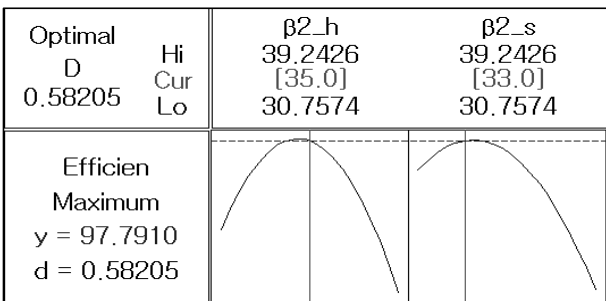


Fig. 10 Plot for response optimization

협조건을 보여주고 있다. 2개의 변수로 구성되는 반응면기법의 실험횟수는 13회인데, 그 중 5개 항목은 실험오차를 측정하기 위해 같은 실험조건으로 구성 되어있다. 전산수치해석에서는 실제실험에서 발생하는 실험오차가 없다고 가정하여 10-13번까지의 반복 실험조건을 생략하였다.

임펠러 변수가 헤드와 효율에 미치는 영향을 주효과도표(Main effects plot)를 이용하여, Fig. 8-9에 제시하였다. 헤드와 효율에 영향을 미치는 변수를 분석해 보면,  $\beta_{2\_h}$ ,  $\beta_{2\_s}$ 의 변수가 클수록 헤드가 증가하는 것을 볼 수가 있고, 효율에 대해서는  $\beta_{2\_h}$ 는 35,  $\beta_{2\_s}$ 는 32에서 효율이 높게 예측하는 것을 알 수가 있다.

Table 2. Numerical analysis set of  $2^k$ factorial for the diffuser design

	$i\beta_{1\_h}$	$i\beta_{1\_s}$	$\beta_{2\_s}$	$\beta_{2\_s}$
case1	3	3	77	77
case2	9	3	77	83
case3	3	9	77	83
case4	9	9	77	77
case5	3	3	83	83
case6	9	3	83	77
case7	3	9	83	77
case8	9	9	83	83
case9	6	6	80	80

임펠러 최적설계에서는 임펠러의 헤드가 70m 이상을 만족하고 동시에 최대 효율점을 갖는 모형을 설계 목표값으로 설정하였다. 반응표면기법 실험조건에 의한 임펠러형상의 모든 수치해석결과가 헤드 70m 이상을 만족하기 때문에 최대 효율점을 갖는 한 가지 목표값을 만족하는 형상을 결정하기 위하여 반응최적화(response optimization) 기법을 이용하여 Fig. 10과 같은 반응최적화 도표를 도식하였다. 반응최적화 결과  $\beta_{2\_h}$ 는 35°,  $\beta_{2\_s}$ 는 33°에서 효율은 97.79%로 예측되었다.

이 결과는 설계 목표값을 만족하여 최적화형상(optimization design)으로 선택하였다. 선택된 최적화형상을 수치해석 하였고, 수치해석 결과는 97.84%로 예측되었다. 이때 헤드는 71.56m로 설계 목표값 70m 이상을 만족하는 것을 알 수가 있다.

## 5.2 디퓨저 날개전개도 변수가 사류펌프 성능에 미치는 영향

디퓨저 날개전개도 변수에 의한 사류펌프 성능에 미치는 영향 분석을 위해, 임펠러 형상을 앞에서 최적설계된 형상으로 고정하였고, 디퓨저 날개전개도 변수만 정의하여  $2^k$ 요인실험을 적용하였다. 일부실시설계의 해상도는 IV수준으로 주효과가 2차 상호작용과 교락되지 않으나, 2차 상호작용 간에는 교락된 형태로 인자수 4개로 중심값을 포함한 9개의 수치해석 실험조건을 생성하였다. Table 2는  $2^k$ 요인실험이 적용된 실험조건을 보여주고 있다.  $2^k$ 요인실험에서 선택한 변수들은 날개전개도의 변수 중에서 사류펌프 성능에 영향을 미칠 것이라 인식되는 변수들 즉, 디퓨저 입구각과 관련 있는  $i\beta_{1\_h}$ ,  $i\beta_{1\_s}$ 와 디퓨저 출구각

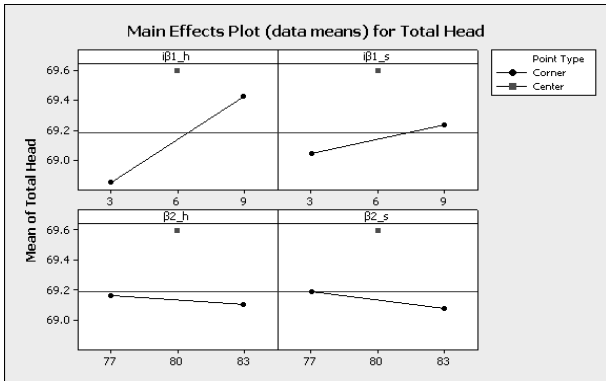


Fig. 11 Main effects plot for total head

인  $\beta_{2,h}$ ,  $\beta_{2,s}$ 로 정하였다.

이때, 경험적인 측면 및 선진업체 디퓨저 날개 전개도를 분석하여,  $i\beta_{1,h}$ 는 30%,  $i\beta_{1,s}$ 는 5%로 고정하였고, 변수들의 변화범위는 각각의 설계 기준값에서  $i\beta_{1,h}$ ,  $i\beta_{1,s}$ ,  $\beta_{2,h}$ ,  $\beta_{2,s}$ 는  $\pm 3^\circ$ 로 정하였다.

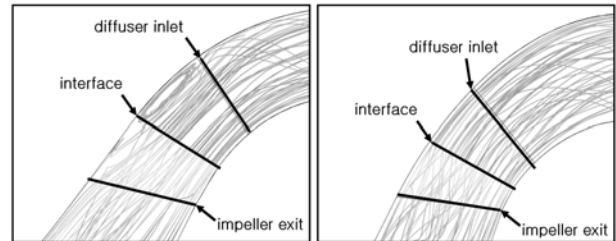
디퓨저 날개전개도 변수가 헤드에 미치는 영향을 주효과도표를 이용하여 4개 인자의 주 영향력을 분석하여 Fig. 11에 제시하였다. 헤드에 영향을 미치는 변수를 분석해 보면,  $i\beta_{1,h}$ ,  $i\beta_{1,s}$ 의 변수가 증가할수록,  $\beta_{2,h}$ ,  $\beta_{2,s}$ 의 변수가 감소할수록 헤드가 증가하는 경향이 있어, 입구부 변수와 출구부 변수가 반대의 경향을 보이고 있고, 디퓨저 출구부 변수보다 입구부 변수가 사류펌프 성능에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

효율은, 최적설계된 임펠러 형상을 고정하였기 때문에 효율의 감소 요인이 되는 토크(torque)가 변화가 없다. 따라서 디퓨저 날개전개도 변수 변화에 의한 사류펌프 입/출구 압력차 변화에 의해 헤드와 효율에 영향을 받기 때문에 헤드와 효율의 변화 경향은 같다.

Table. 3에서 설계기준 형상과 최적화된 임펠러 및 디퓨저 설계 시 성능이 좋은 중심값을 결합한 형상의 수치해석결과를 함께 비교 제시하였다. 그 결과 헤드는 약 24%, 효율은 약 0.16% 증가 하였다. 좀 더 정확한 분석을 위해 임펠러 및 디퓨저 자오면에서 속도벡터를 Fig. 12에 나타내었다. 설계기준 형상 사류펌프는 임펠러와 디퓨저가 만나는 쉬라우드 부분에서 유동박리(back flow)가 일어난다는 것을 알 수 있으나, 실험계획법을 통하여 설계된 사류펌프는 임펠러 및 디퓨저 변수를 제어함으로써 유동박리현상이 없어지는 것을 알 수 있다. 이는 사류펌프 성능향상을 위한 임펠러 및 디퓨저 최적설계의 가능성을 나타낸다.

Table 3. Comparison of total head and efficiency

	Ht	Efficiency
Base design model	55.96	93.86
Final design model	69.60	94.02



(a) Base design model (b) Final design model

Fig. 12 Comparison of steam lines near impeller exit and diffuser inlet

## 6. 결론

자오면이 고정된 상태에서 임펠러 및 디퓨저의 날개전개도 변수를 정의하였고, 임펠러 최적설계 및 디퓨저 날개전개도 변수가 사류펌프 성능에 미치는 영향을 알아보았다.

(1) 반응표면기법을 이용하여 임펠러 날개전개도 변수를 제어하여, 임펠러 최적설계를 수정하였으며, 목표값을 만족하였다.

(2) 2<sup>k</sup>요인실험을 이용하여 디퓨저 날개전개도 변수에 의한 사류펌프 성능에 미치는 영향을 분석하였고, 디퓨저 출구부 변수보다 입구부 변수가 사류펌프 성능에 많은 영향을 미침을 확인하였다.

(3) 설계기준 형상과 실험계획법을 활용하여 설계된 형상의 수치해석결과를 비교한 결과, 헤드는 약 24%, 효율은 약 0.16% 증가 하였다.

## 참고문헌

1. A. J. Stepanoff., 1957, Centrifugal and Axial Flow Pumps.
2. Imaichi, K. and Murakami, Y. and Tsurusaki, H. and Cho, K. R., 2002, The Basis of Pump Design.
3. Choi, Y. S., Lee, K. Y., Kim, J. H. and Kim, S., 2008, Design Optimization of Mixed-flow Pump Impellers and Diffusers, Proceedings of the KFMA Annual meeting, pp.57-62