

반응표면기법을 이용한 원심펌프 임펠러 최적설계 및 볼류트 설계

편권범* · 김준형** · 최영석*** · 윤준용****†

Design Optimization of a Centrifugal Pump Impeller using RSM and Design of Volute

Kwon Bum Pyun*, Joon Hyung Kim**, Young Seok Choi***, Joon Yong Yoon****†

Key Words : Response surface methodology(반응표면기법), Centrifugal pump(원심펌프), Impeller(임펠러), Optimization(최적화), Volute(볼류트), Stepanoff theory(스테파노프 이론)

ABSTRACT

In this study, optimization of the impeller and design of volute were carried out in order to improve the performance of a centrifugal pump. Design parameters from vane plane development for impeller design were selected, and effect of the design parameters on the performance of the pump was analyzed by using Response Surface Methodology(RSM) to optimized impeller. In addition, total pump design method was suggested by designing volute which was suitable for the optimized impeller through volute design where Stepanoff theory was applied and numerical analysis.

1. 서론

산업 전반에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있는 펌프는 외부로부터 동력을 받아 회전하는 임펠러를 통하여 기계적 에너지를 유체의 압력 및 운동에너지로 변환하는 기능을 수행하는 대표적인 유체기계이다. 그 중 원심펌프는 배수나 상하수도 설비 및 화학공업용으로 산업적인 다목적분야에서 널리 사용되고 있으며, 그에 따라 사용 목적에 맞는 다양한 기종의 원심펌프 설계를 위해 수많은 연구가 수행된 바 있다. 최근 산업의 발달로 더욱 향상된 성능을 갖는 펌프 성능이 요구됨에 따라 양정 향상과 동시에 높은 효율을 갖는 펌프 설계를 위하여 역학적 개념을 도입한 최적화 설계에 대한 연구가 수행되고 있는 추세이다.^[1]

임펠러는 펌프의 성능에 가장 큰 영향을 끼치는 요소이며, 펌프로 유입된 유체는 임펠러를 통해 에너지가 생성되므로 임펠러의 성능이 펌프의 성능을 좌우한다고 하여도 과언이 아니다. 따라서 임펠러 설계 시 각 설계 변수들이 펌프의 성

능에 미치는 영향성을 정확히 파악하고, 이를 통한 최적 설계가 이루어져야 한다.^[1]

또한, 임펠러 출구부의 유동을 모아 파이프로 전달하는 기능을 담당하는 볼류트는 내부의 동압 손실에 의하여 펌프 성능이 저하되므로 불균일 유동을 억제하기 위한 역학적 개념 설계가 요구된다. 이를 위해 볼류트 입구에서 출구까지의 각도에 따른 단면적을 제어하는 Stepanoff 이론을 통한 설계법이 제시된 바 있다.^[2]

본 연구에서는 Table 1의 요구사항을 만족하는 펌프 설계를 위하여 임펠러 최적 설계를 수행하였다. 임펠러 최적 설계 수행 시 설치 제한조건으로 인하여 자오면은 고정하였으며, 임펠러 날개각에 대한 설계 변수를 선정하였다. 수치해석을 통하여 선정된 설계 변수가 펌프성능에 미치는 영향성을 파악하였고, 반응표면기법을 이용하여 최적 모델을 산출

Table 1 Design specifications of the pump

Flow rate	4400 [CMH]
Head	60 [m]
Rotating speed	600 [rpm]
Specific speed	240
Efficiency	85 [%]
Diameter	550 [mm]

* 한양대학교 대학원 기계공학과
** 한양대학교 대학원 기계공학과 / 한국생산기술연구원
*** 한양생산기술연구원 에너지설비센터
**** 한양대학교 기계공학과
† 교신저자, E-mail : jyooun@hanyang.ac.kr

하였다. 추가적으로 Stepanoff 이론을 적용한 벌류트 설계를 수행하였으며, 벌류트 내부 단면적 설계와 수정 및 수치 해석을 이용한 성능평가를 통하여 최적 설계된 임펠러에 적합한 벌류트 설계안을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 최적화 기법

반응표면기법(Response surface methodology, RSM)은 1951년 Box와 Wilson에 의해 소개된 방법이며 모든 독립변수가 각 수준들에 대한 요인설계실험을 실시하지 않고 여러 독립변인들의 조합효과를 추정하는 방법이다.^[3] 적어도 두 종류 이상의 변수를 대상으로 하며, 독립변수들의 반응변수 간의 함수관계를 데이터로부터 추정하여 독립변수들의 값이 변화에 따른 변동성을 예측한다. 이를 기반으로 독립변수들이 어떤 값에서 반응량이 최적화가 될 것인가를 찾아내는 최적화 알고리즘이다. 반응표면실험의 종류에는 반응표면의 추정식이 1차식일 때 사용하는 2수준 요인배치법과 추정식이 2차식일 때 사용하는 3수준 요인배치법, 중심합성법(Central Composite Design), Box-Behnken법 등이 있으며 본 연구에서는 중심합성법을 근거한 최적화 기법을 적용하였다.

2.2 임펠러 최적 설계 및 성능 평가

2.2.1 임펠러 기본 모델 형상 설계

임펠러 최적 설계 작업을 수행하기 위하여 임펠러 기본 모델(Base model)의 형상을 설계하였다. 기본 모델의 자오면 형상은 선행 연구들을 통하여 보유 중인 데이터베이스에서 설치제한 조건을 만족시키는 형상으로 설계하였다.

기본 모델의 입구각은 Fig. 1과 같이 표현되는 속도 삼각형 이론을 기반으로 선정하였다. 여기서 $V_{n(h,s)}$ 는 허브(h)와 쉬라우드(s)에서의 자오면 속도, $U_{(h,s)}$ 는 회전 속도, $V_{(h,s)}$ 는 유동속도, $\alpha_{(h,s)}$ 는 유동각을 각각 나타낸다.

자오면 속도($V_{n(h,s)}$)는 식 (1)과 같이 단면적과 유량의 관계에 의해서 정의된다.

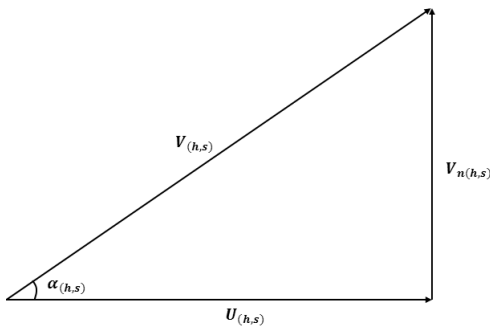


Fig. 1 velocity triangle method

$$V_{n(h,s)} = \frac{Q}{A} \tag{1}$$

임펠러의 회전 속도($U_{(h,s)}$)는 식 (3)과 같이 각속도(ω)와 허브반경(r_h) 또는 쉬라우드 반경(r_s)의 곱으로 정의된다.

$$\omega = N \times \frac{\pi}{30} \tag{2}$$

$$U_{(h,s)} = \omega r_{(h,s)} \tag{3}$$

위에서 정의된 자오면 속도 성분과 회전 속도 성분을 바탕으로 유동각($\alpha_{(h,s)}$)을 식 (4)와 같이 산출할 수 있다.

$$\alpha_{(h,s)} = \tan^{-1} \left(\frac{V_{n(h,s)}}{U_{(h,s)}} \right) \tag{4}$$

위의 속도 삼각형 이론에 의해서 산출된 기본 모델에 대한 입구 유동각은 허브의 경우 37° , 쉬라우드의 경우 21° 의 값을 나타내었으며, 산출된 입구 유동각의 값을 기본 모델의 입구각($\beta_{1(h,s)}$)으로 선정하였다. 이의 입사각은 0° 임을 뜻한다. 기본 모델의 출구각($\beta_{2(h,s)}$)은 선행 연구 결과를 바탕으로 경험적인 값에 의존하여 선정하였으며, 선정된 출구각은 허브와 쉬라우드 모두 25° 이다.

위 과정을 통해 기본 모델에 대한 형상 설계를 수행하였으며, 설계된 기본 모델형상은 Fig. 2와 같다.

2.2.2 설계변수 및 해석 Set 선정

펌프 임펠러를 설계하기 위해서는 Fig. 3과 같이 날개의 기본 형상을 표현하는 자오면(a)과 날개각도 및 길이의 정보를 표현하는 날개 전개도(b)에 대한 정보가 요구되어 진다.

따라서 자오면과 날개 전개도의 설계 변수들을 고려하여 최적화 작업을 수행하는 것이 바람직하다. 하지만 본 연구 대상 펌프의 경우 설치 제한조건으로 인해 임펠러 크기에 영향을 미치는 자오면 수정이 불가능하여 자오면에 대한 설계 변수는 고려하지 않았다.

임펠러 자오면에 대한 설계 변수 외에 펌프 양정이나 효율

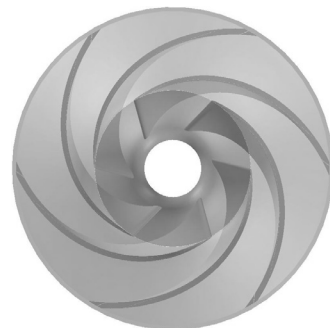
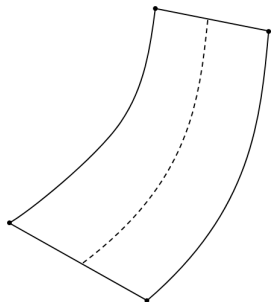
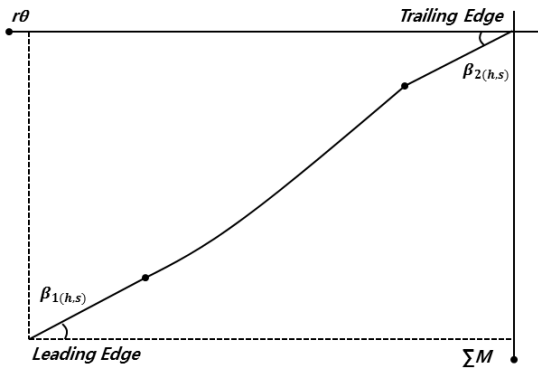


Fig. 2 Shape of the base model

에 크게 영향을 미치는 변수로 날개의 입구각과 출구각을 들 수 있다. Fig. 3 (b)의 날개전개도에서 표현된 임펠러의 입구각($\beta_{1(h,s)}$)과 출구각($\beta_{2(h,s)}$)을 최적화 작업을 위한 설계 변수로 고려하였으며, 설계 변수 적용 시 입구각은 유동각과의 차이를 나타내는 입사각(incidence angle)의 개념을 도입하여 허브에 대한 입사각 i_beta_h 와 쉬라우드에 대한 입사각



(a) Meridional plane view



(b) Vane plane development

Fig. 3 Meridional view & vane plane development for impeller design

Table 2 Numerical analysis set of RSM

	i_beta_h	i_beta_s	$beta2$
center	0	0	25
case1	-2	-2	22
case2	2	-2	22
case3	-2	2	22
case4	2	2	22
case5	-2	-2	28
case6	2	-2	28
case7	-2	2	28
case8	2	2	28
case9	-3.3635	0	25
case10	3.3635	0	25
case11	0	-3.3635	25
case12	0	3.3635	25
case13	0	0	19.95
case14	0	0	30.0454

i_beta_s 로 정의하였고 출구각은 허브와 쉬라우드의 값을 동일하게 가져가는 구속조건을 주어 $beta2$ 로 정의하였다.

선정된 i_beta_h , i_beta_s , $beta2$ 총 3가지 변수를 바탕으로 반응표면기법 수행을 위한 15개의 시험 set을 생성하였다. 시험 set의 기준이 되는 center 모델은 앞서 설계되었던 기본 모델 형상(base model)을 적용하였으며 각각의 모델에 대한 변수값들은 Table 2와 같다.

2.2.3 수치해석을 이용한 임펠러 성능평가

산출된 반응표면기법 시험 set에 대한 성능 평가를 수행하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 해석을 위하여 각각의 시험 set을 상용프로그램 ANSYS BladeGen을 이용하여 3차원 형상으로 변환하여 Fig. 4(a)에 나타내었고 ANSYS TurboGrid 프로그램을 통해 Fig. 4(b)와 같이 격자를 생성하였다. 이 때 생성된 격자는 정렬 격자이며 Fig. 5의 격자테스트 결과를 바탕으로 하나의 날개 유동 영역에 대하여 약 9만 개 격자수를 적용하였다.

상용 삼차원 점성유체 해석 프로그램인 ANSYS CFX v.12를 사용하여 수치해석을 수행하였으며 펌프 내 유동장은 압축성 난류 유동장으로 가정한 3차원평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 수치 해석에 사용된 지배방정식은 유한체적법으로 이산화 되었으며 이산화 기법은 2차 이상의 정확

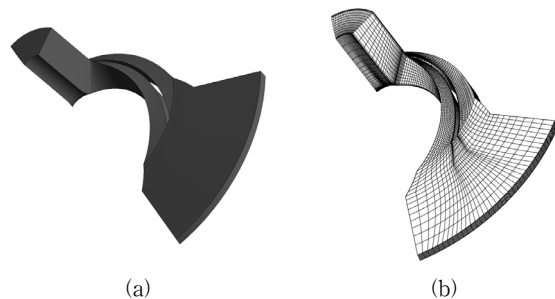


Fig. 4 Sharpe and grid system of the impeller

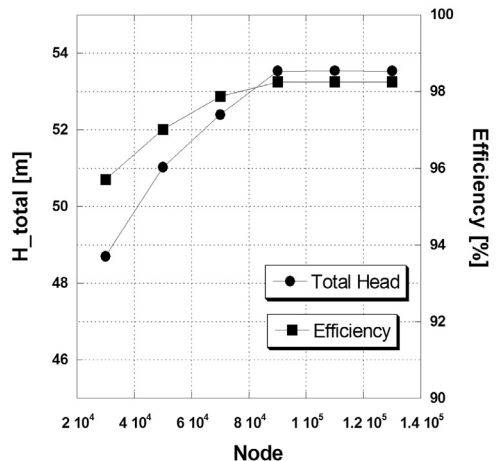


Fig. 5 Result of the mesh test

도를 갖는 고해상도기법(high resolution scheme)을 사용하였다. 임펠러 내부의 난류유동 해석을 위한 난류모델은 유동 박리현상 등에 적절한 전단이송(shear stress transport)모델을 사용하여 해석되었다.

수치해석 시 작동 유체는 표준상태의 물을 사용하였고 입구부에 대기압 조건과 출구부에 질량 유량 조건을 부여하였다. 수치해석 시간을 최소화하기 위하여 날개와 날개 사이 인접 면에 주기 조건을 부여하여 날개 1개의 유로 영역에 대한 수치해석을 수행하였다.

2.2.4 임펠러 설계 변수 영향성 평가

각각의 시험 set 수치해석 결과를 바탕으로 설계 변수들이 펌프의 성능에 미치는 영향성을 분석하기 위하여 Fig. 6과 Fig. 7과 같이 양정, 효율 성능에 대한 주영향도표(main effect plot)를 나타내었다.

결과를 통하여 임펠러의 양정은 허브의 입사각 i_beta_h 와 쉬라우드의 입사각 i_beta_s 와 비교하면 출구각 $beta_2$ 의 영향을 많이 받으며, $beta_2$ 가 증가함에 따라 양정이 증가하는 경향이 있는 것을 확인할 수 있었다.

효율 성능 또한 양정과 마찬가지로 $beta_2$ 의 영향이 크지만, 그 영향성은 양정의 경우 $beta_2$ 와 비례하여 증가하는

데 반해, 효율은 $beta_2$ 가 일정 수준 이상으로 증가할 때 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

2.2.5 반응표면기법을 이용한 임펠러 최적화

임펠러 최적화 작업을 수행하기 위해 목적값을 선정하였으며, 이는 본 연구대상 펌프의 목표 사양에 별류트에 의한 손실 및 설계 마진을 고려하여 양정은 64 m로, 효율은 maximum 값으로 선정하였다.

Fig. 8과 같이 반응표면기법을 이용하여 선정된 목적값을 만족하는 임펠러 최적 모델을 예측한 결과, i_beta_h 와 i_beta_s 는 -3° , $beta_2$ 는 28° 일 때, 양정은 약 64.6 m, 효율은 약 98.2%의 값을 예측하였다.

임펠러 최적화 모델의 정확한 성능평가를 위하여 최적화 모델에 대한 수치해석을 수행하였으며, 그에 따른 최적화 모델의 성능은 Table 3과 같이 기본 모델의 성능과 함께 표시하여 비교분석 하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 수치해석을 통해 산출된 임펠러의 양정은 약 64.5 m, 효율은 약 98.2%로 반응표면기법을 통한 예측값과 거의 유사한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 임펠러 최적화 모델에 대한 성능 결과 값은 기본 모델과 비교해 볼 때, 양정은 약 2.5 m 증가하였으나 효율은 약 0.3% 감소하였다. 이는 설계 변수 영향성 분석 결과를 통해 확인하였듯이, 양정에 대한 목적값을 만족시키기 위하여 $beta_2$ 가 증가함에 따라 효율이 약간 감소한 것으로 판단된다. 하지만 이러한 효율 감소는 매우 미량으로 펌프 성능에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단되므로, 반응표면기법을 통하여 설계된 임펠러 최적화 모델을 최종 임펠러 최적화 모델로 결정하였다.

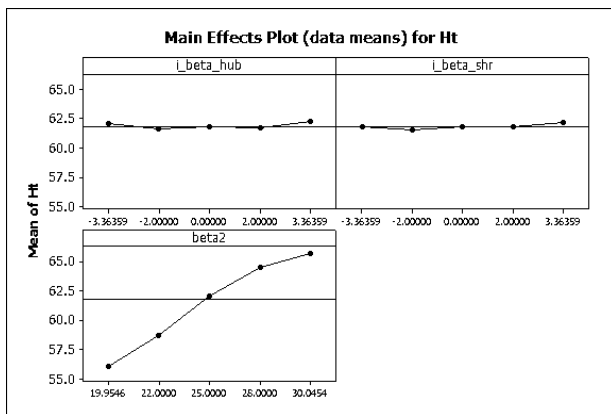


Fig. 6 Main effect plot for total head

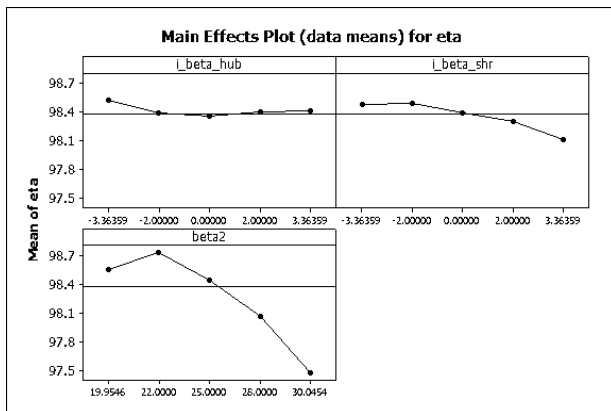


Fig. 7 Main effect plot for efficiency

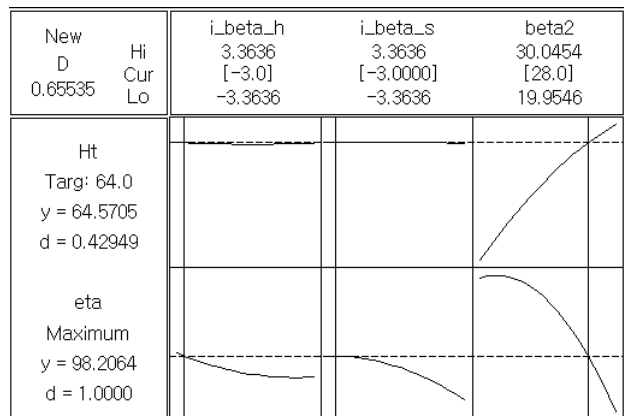


Fig. 8 Plot for response optimization

Table 3 Comparison to center model and optimized model

	Head [m]	Efficiency [%]
Base model	62.021	98.484
Optimized model	64.545	98.201

2.3 벌류트 설계 및 성능평가

2.3.1 벌류트 형상설계

벌류트는 임펠러의 토출 유동을 모아 나선형의 파이프로 연결하는 장치로써 케이싱의 형태가 단순하고 제작이 용이하여 원심펌프에 주로 사용된다. 벌류트의 설계 시 벌류트의 혀(tongue)에서 출구까지의 단면적은 Fig. 9와 같이 각도에 비례하여 증가하게 된다. 이때 부적절한 단면적 분포는 벌류트 내부의 유체압력손실을 야기할 수 있으므로, 벌류트 설계 시 각도에 따른 유동 단면적 분포는 매우 중요한 설계 변수가 된다.^[2]

벌류트 유로 단면적 설계 시 Stepanoff 이론을 이용한 설계 방법이 주로 사용된다. 이 방법은 벌류트 내의 유체 속도를 일정하게 유지할 수 있도록 각도에 따라 일정하게 변하는 단면적을 적용하여 설계하는 이론이다.^[4,5]

Stepanoff 이론은 벌류트 내에서 일정하게 유지되는 유동 속도를 비속도에 상응하는 상수값 K 를 이용하여 보정해준다. 여기서 상수 값 K 는 실험에 의한 값으로 식 (1)과 같다.

$$K = \frac{2.18}{N_s^{0.32}} \quad (1)$$

베르누이 방정식으로부터 도출한 K 값에 따른 벌류트 내부 유동 속도는 다음과 같다.

$$V = K\sqrt{2gh} \quad (2)$$

산출된 벌류트 내부 유동 속도에 따른 각도 별 벌류트의 면적은 다음과 같이 정의된다.

$$A(\theta) = \frac{Q}{V} \times \frac{\theta}{360} \quad (3)$$

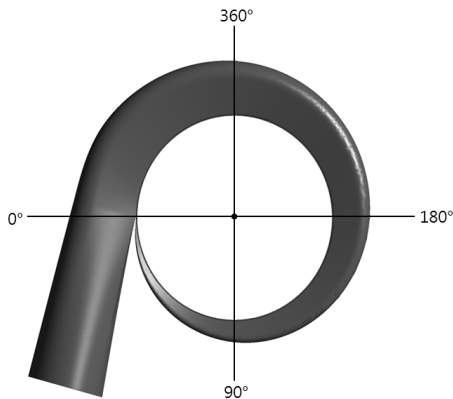


Fig. 9 Angle position with volute geometry

여기서 Q 는 펌프 유량을 나타낸다.

본 연구에서는 이러한 Stepanoff 이론을 이용하여 벌류트 단면적 설계를 수행하였다. 그 결과 벌류트 내부 유속은 13 m/s로 산출되었으며, 그에 따른 단면적 분포는 Fig. 10과 같다.

앞에서 언급하였듯이 벌류트 내부 유속 산출 시 사용되는 상수 K 값은 실험에 의한 값으로 내부 유속 산출을 위한 최적 값이라고 단정할 수 없다. 그에 따라 Table 4와 같이 Stepanoff 이론을 통해 산출된 단면적 분포를 기준(Center)으로 4가지 단면적 분포를 추가로 선정하였다.

벌류트 내부 단면적 형상은 Fig. 11과 같다. 여기서 임펠러 출구부와 연결되는 폭 b 는 100 mm, 벌류트 내부로 진입되는 유동 확장각 θ 를 15°로 고정하였다. 그 외에 설계 변수

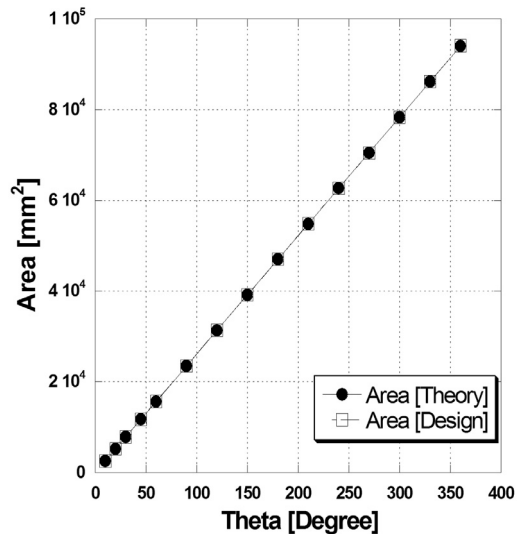


Fig. 10 Area distributions of Center volute

Table 4 Area distributions of volute models (mm²)

Case1 (80%)	Case2 (90%)	Center (100%)	Case3 (110%)	Case4 (120%)
2088	2349	2623	2880	3138
4176	4684	5234	5741	6251
6268	7026	7852	8621	9401
9400	10550	11770	12913	14104
12546	14107	15687	17218	18820
18797	21192	23540	25844	28210
25067	28186	31385	34474	37621
31344	35280	39197	43094	47000
36762	42295	47063	51737	56412
43876	49379	54860	60380	65818
50150	56406	62703	68953	75213
56416	63482	70523	77552	84619
62655	70497	78349	86182	94027
68960	77582	86186	94808	103417
75222	84673	94067	103433	112828

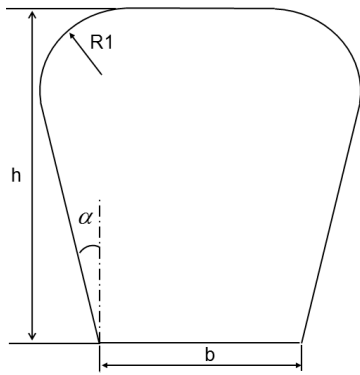


Fig. 11 Area concept of volute

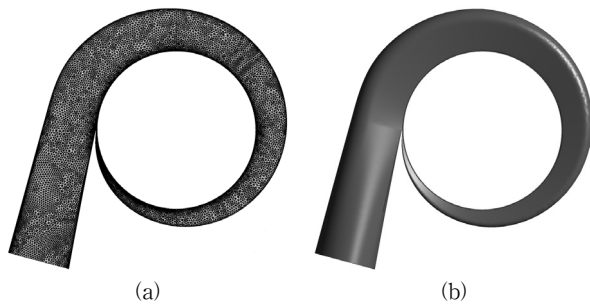


Fig. 12 Sharpe and grid system of the volute

인 h 와 $R1$ 을 조정하여 각각의 단면적 분포에 맞는 5가지의 벌류트 모델을 설계하였다.

2.3.2 수치해석을 통한 벌류트 성능평가

설계된 각각의 벌류트 모델에 대한 3차원형상은 Solidworks 2010을 이용하여 모델링하였으며, ANSYS CFX Mesh 프로그램을 이용하여 격자를 생성하였다. 생성된 격자계는 Fig. 12 (a)에서 볼 수 있듯이 비정렬 격자계로 $y+$ 값을 10 이하로 유지시켜주기 위하여 벽면 근처에 격자를 집중하였으며, 생성된 모델에 따른 격자수는 약 70~80만개이다.

각각의 벌류트의 성능확인을 위해 Fig. 12 (b)와 같이 임펠러 최적화 모델을 설계 벌류트에 장착하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 시 부수적인 수치해석 기법은 임펠러 수치해석과 동일하다. 수치해석을 통해 산출된 성능평가 결과는 Fig. 13과 Fig. 14에 각각 나타내었다.

Fig. 13의 유량에 따른 양정 성능 곡선을 통하여 내부 단면적 작은 모델일수록 저유량 영역에서 높은 양정을 나타내며, 내부 단면적이 큰 모델일수록 고유량 영역에서 높은 양정을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

이는 벌류트 내부 단면적변화에 따라 펌프 작동점이 변화함에 따른 것으로 판단된다. 이러한 경향성은 Fig. 14의 유량에 따른 효율 성능 결과에서도 동일하게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

유량에 따른 양정 및 효율에 대한 두 가지 성능 결과를 중

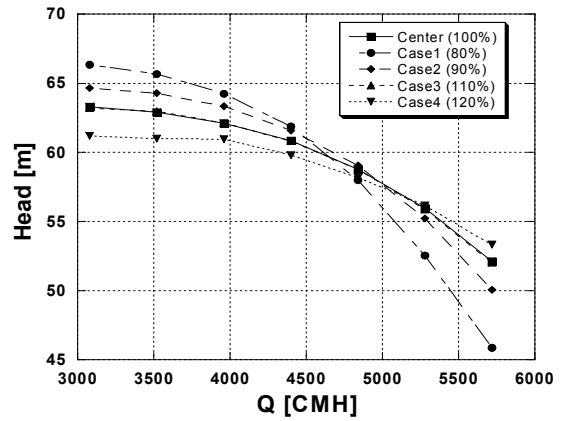


Fig. 13 Cross section area distributions of volute models

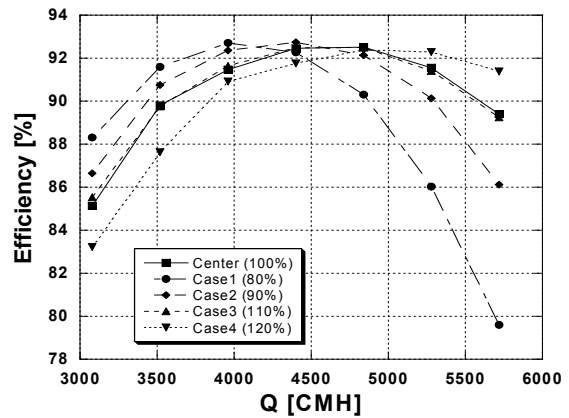


Fig. 14 Cross section area distributions of volute models

합하여 볼 때, 본 연구 대상 펌프의 설계 유량 지점(4400 [CMH])에서 Case2(90%)의 내부 단면적 분포로 설계된 벌류트 모델을 적용하였을 때 양정이 약 62 m, 효율이 약 92.6%로 가장 좋은 성능을 보이고 있다. 이러한 성능은 본 연구대상 원심 펌프의 목표 사양을 만족하는 성능이다.

결과에 따라 대상 벌류트 모델을 임펠러 최적화 모델에 적합한 벌류트 설계안으로 제시하였다.

3. 결론

본 연구를 통하여 목표사양을 만족시키는 원심 펌프 설계안을 제시하였다. 이를 위해 반응표면기법과 CFD를 이용한 임펠러 최적 설계 작업을 수행하였고, Stepanoff 이론을 적용하여 최적 설계된 임펠러에 적합한 벌류트를 설계안을 제시하였다.

- 1) 각각의 변수의 영향성 분석 결과 임펠러 출구각 임펠러의 양정 및 효율에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 출구각이 증가함에 따라 양정은 증가하는 반면,

효율은 일정수준 이상 출구각이 증가할 때 오히려 감소하는 경향성을 보였다.

- 2) 반응표면기법을 적용하여 임펠러 최적화 모델을 산출하였으며, 산출된 최적화 모델 성능을 기본모델과 비교결과 효율은 98.2%로 약간 감소(약 0.3%)하였으나, 양정은 64.5 m로 약 2.5 m 증가하여 목적값을 만족하였다. 그에 따라 대상모델을 최종 임펠러 최적화 모델로 선정하였다.
- 3) 임펠러 최적화 모델에 각각의 설계 벌류트들을 장착하여 수치해석을 통한 성능 평가 작업을 수행한 결과, 설계 유량 지점(4400 [CMH])에서 Case 2(90%)의 내부 단면적 분포로 설계되어진 벌류트 모델을 적용하였을 경우, 양정이 약 62 m, 효율이 약 92.6%로 가장 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그에 따라 대상 벌류트 모델을 임펠러 최적화 모델에 적합한 벌류트 설계안으로 제시하였다.

후 기

본 연구는 2011년도 2단계 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, S., 2007, "Design Optimization of a Centrifugal

Pump Impeller using DOE and RSM," Master Thesis, Hanyang university.

- (2) Kim, D. S., Choi, Y. S., Jeon, S. G., and Yoon, J. Y., 2006, "A Numerical Study on the Effect of Volute Geometry on the Performance of Centrifugal Pump," Journal of Fluid Machinery, Vol. 9, No. 2, pp 44~49.
- (3) Park, S. H., 2001, "Modern Design of Experiments," Minyongsa, Seoul, pp. 121~140.
- (4) A. J. Stepanoff., 1957, "Centrifugal and Axial Flow Pumps," Willy, New York.
- (5) Imaichi, K. and Murakami, Y. and Tsurusaki, H. and Cho, K. R., 2002, "The Basis of Pump Design."
- (6) Kim, J. H., Choi, Y. S., and Park, P. J., 2009, "Performance improvement of centrifugal pump with double volute," Journal of Fluid Machinery, pp 41~12.
- (7) Lee, S. P. and Ha, S. K., 2008, "Performance Evaluation for Coordinate Measuring Machine using Design of Experiments," Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 17, No. 4, pp 133~139.
- (8) Khin Cho Thin, Mya Mya Khaing, and Khin Maung Aye., 2008, "Design and Performance Analysis of Centrifugal Pump," World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 36, ISSN 2070-3740.
- (9) Lim, J. S., and Chae Hoon Sohn, C. H., 2010 "A Numerical Study on Hydraulic Efficiency of an Impeller for a Centrifugal Pump," Journal of Korea Society of Mechanical Engineers, Vol. 10, A, pp 3335~3338.