

임펠러 형상변수가 원심펌프 성능에 미치는 영향

김 성*, 최 영 석**†, 김 준 형**, 윤 준 용***

한양대학교 대학원/한국생산기술연구원*, 한국생산기술연구원**, 한양대학교 기계공학과***

Effect of impeller geometrical parameter on the performance of a centrifugal pump

Sung Kim*, Young-Seok Choi**†, Joon-Hyung Kim**, Joon-Yong Yoon***

ABSTRACT: This paper presents effects of impeller geometrical parameters on the performance of a centrifugal pump impeller. The effects of meridional parameters and vane plane development parameters on the performance of the impeller were numerically studied using a commercial CFD code and DOE(design of experiments) software. Geometrical parameters in a method of meridional view and vane plane development were selected and defined to generate the 3D impeller shape. The response variables are defined in a total head and efficiency curve with flow rate. The influences of selected design variables on the various objective functions were examined as a result of the calculation using 2k factorial.

Key words: Centrifugal pump(원심펌프), Vane plane development(날개 전개도), Meridional view(자오면), Front view(전면), Design of experiments(실험 계획법)

기 호 설 명

Efficiency : 효율 [%]
Ht : 전양정 [m]
Q : 유량 [CMH]

하첨자

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

1. 서 론

원심펌프는 외부로부터 동력을 받아 회전하는 임펠러를 통하여 기계적 에너지를 유체의 압력 및 운동에너지로 변환하는 대표적인 유체 기계이다. 원심펌프의 성능에 가장 큰 영향을 주는 임펠러의 3차원 형상설계를 위해서는 날개형상과 날개각을 나타내는 자오면(meridional view)과 전면(front view)에 대한 정보가 있어야 한다.

임펠러 자오면과 전면에 대한 고전적인 설계 방법에서는, 펌프의 요구사양이 주어질 경우, 기본적인 펌프이론과 경험적인 측면⁽¹⁾에서 접근하여 자오면과 전면의 설계에 필요한 주요 변수가 정해진다. 날개형상을 설계할 때, 날개의 입구각과 출구각도는 자오면 형상이나 경험적인 측면에 의해 주로 결정되며 날개 길이와 관련이 있는 스윙각도(sweep angle)는 정해진 입/출구각도를

† Corresponding author
 Tel.: +82-41-589-8337; fax: +82-41-589-8330
 E-mail address: yschoi@kitech.re.kr

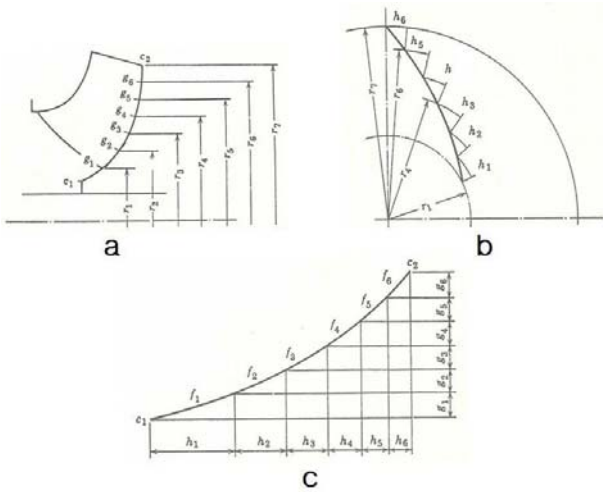


Fig. 1 Traditional impeller design method
a) meridional view, b) front view, c) vane plane development⁽¹⁾

부드럽게 연결하는 방법^(1,2)으로 설계를 하기 때문에 임펠러 설계의 중요한 변수라기보다 결정되는 값에 주로 포함된다. 또한 임펠러 형상은 자오면과 전면의 정보를 이용하여 날개전개도(vane plane development)로 표현이 가능하다.

임펠러를 설계할 때, 임펠러 3차원 형상을 나타내는 자오면과 날개전개도의 설계변수를 나열하게 되면 매우 많게 되며, 이러한 설계변수가 원심펌프 성능에 어느 정도 영향을 미치는 지를 분석하는 것은 펌프 설계기술을 확립하는데 있어서 매우 중요한 과정이라 할 수 있다.

본 연구에서는 임펠러의 설계변수가 원심펌프 성능에 미치는 영향에 대하여 알아보고 정립된 설계변수에 대하여 설계변수의 변화에 따른 성능 변화를 체계적으로 분석하여 설계변수의 중요도를 파악하고자 한다.

2. 임펠러의 변수

2.1 임펠러 형상

임펠러의 형상은 자오면과 전면으로 나타낼 수 있다. Fig. 1에서 a)는 임펠러의 날개 형상을 나타내는 자오면으로써 임펠러의 축 방향 및 반경 방향(z, r)의 정보를 나타낸다. b)는 임펠러의 날개 각도를 나타내는 전면으로 반경 및 회전방향(r, θ)을 나타낸다. 또한 c)는 임펠러의 자오면과

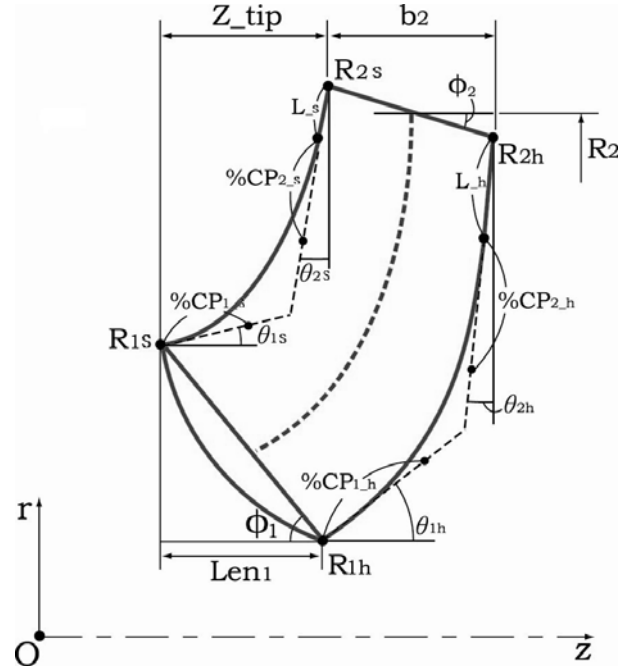


Fig. 2 Design variables in a meridional plane

전면을 수평과 수직선상에서 전개한 날개전개도이며 임펠러 날개의 입/출구각도 및 날개길이를 쉽게 표현한 것이다.

2.2 자오면 변수

자오면 변수에 의한 임펠러의 성능을 알아보기 위해 Fig. 2과 같이 변수를 결정하였고 다음과 같이 정의 하였다.

임펠러 입구부에서 R1h는 허브부분을 R1s는 쉬라우드 부분의 입구부 반경을, Phi1은 임펠러 날개전단(leading edge)의 기울어진 각을 말하며 $R_{LE}/(LEN1/\cos(\Phi1))$ 은 임펠러 날개전단의 곡선 여부를 판단하는 변수를 의미한다. 임펠러 출구부에서 R2는 임펠러 외경(출구부 직경)을 나타내며, B2는 임펠러 날개후단(trailing edge)에서의 날개폭을, Phi2는 날개 후단의 기울어진 각을 나타낸다. 그리고 임펠러 출구부 허브와 쉬라우드에서의 직선 부분을 각각 %L_h, %L_s로 정의 하였다. 임펠러 입구부와 출구부를 연결하기 위해 부드러운 곡선을 표현할 수 있는 베지어 곡선을 사용하였다. 베지어 곡선은 기울기가 정해진 두 기준점(시작 및 끝점)에서 조정점(control point)을 이용하여 부드럽게 연결하는 곡선인데 조정점의 위치에 따라 곡선의 형태도 달라진다.

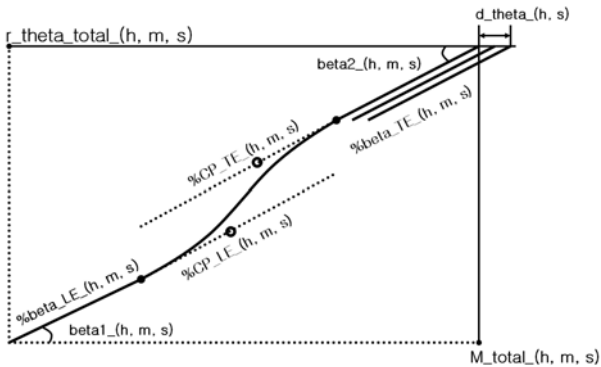


Fig. 3 Design variables in a vane plane development⁽³⁾

조정점이 결정되면 입/출구부 각도에 따라 곡선이 부드럽게 연결된다. 임펠러 허브 곡선이 수평, 수직선과 이루는 입구부각과 출구부각을 Theta1_h, Theta2_h로 나타내었고 임펠러 쉬라우드는 Theta1_s, Theta2_s로 나타내었다. 그리고 허브 입구부분과 출구부분의 베지어 조정점을 각각 %CP1_h, %CP2_h로 나타내었고 쉬라우드는 %CP1_s, %CP2_s로 나타내었다. Z_tip는 쉬라우드 입구부와 출구부의 축방향 길이를 의미한다.

2.3 날개전개도 변수

날개전개도 변수에 의한 임펠러의 성능을 알아보기 위해 Fig. 3와 같이 변수를 결정하였고 다음과 같이 정의 하였다. 날개전개도상에서 임펠러 날개를 표현하는데 있어 적어도 허브, 중간면 및 쉬라우드의 날개 정보가 필요하므로 각각에 대해 변수를 정의하였다. 임펠러 스윙각도와 관련이 있는 r_theta_total(h, m, s)은 임펠러 전면에서 각 반경에서 원호길이의 합을 모두 더해준 값이며 Fig. 1c)의 횡축에 해당한다. M_total(h, m, s)은 자오면에서의 날개길이를 모두 더해준 값이며 Fig. 1c)의 종축에 해당한다. beta1(h, m, s)는 임펠러 날개의 입구 각도를 나타내며 beta2(h, m, s)는 임펠러 날개의 출구 각도를 나타낸다. d_theta(h, s)는 임펠러 출구부의 허브와 쉬라우드에서의 원주방향으로 기울어진 정도를 나타낸다. %beta_LE(h, m, s)와 %beta_TE(h, m, s)는 날개전개도상의 입/출구부 날개각이 입/출구날개각과 동일한 값을 유지하는 정도를 나타

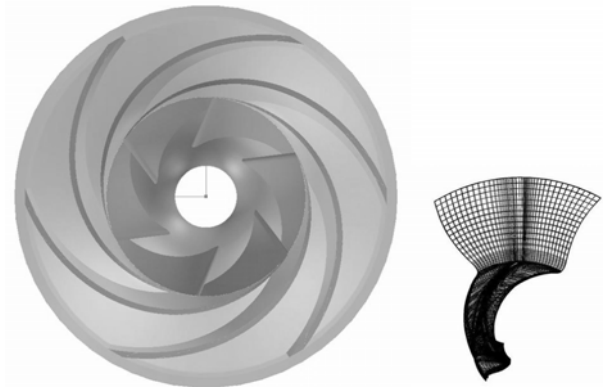


Fig. 4 3D geometry and grid system of the impeller

내며 날개전개도에서는 선형적인 특징을 보인다. 표기에서 h는 허브를 m은 미드스팬을 s는 쉬라우드를 의미한다⁽³⁾.

임펠러의 고전적인 설계방법에 의하면 임펠러 날개 길이는 입/출구각도를 부드럽게 연결해주는 곡선으로 정의하였기 때문에 임펠러 입/출구각도에 의해서 날개 길이 및 스윙각도가 정해진다. 따라서 날개전개도는 임펠러의 입/출구각도에 따라 날개 길이와 스윙각도가 달라진다. 만약 날개 스윙각도가 고정되어 있다면 임펠러의 입/출구각도에 의해 날개 길이가 부드럽게 연결되지 않을 수 있다.

부드러운 날개전개도를 얻기 위해서 베지어 곡선(Bezier curve)을 이용하였다. 베지어 곡선의 입구부와 출구부의 조정점을 %CP_LE(h, m, s)와 %CP_TE(h, m, s)로 정의 하였다.

3. 임펠러 변수에 의한 임펠러 성능 분석

3.1 수치해석 형상 및 기법

임펠러 3차원 형상(3D-geometry)은 ANSYS CFX-BladeGen 프로그램을 사용하여 생성하였으며, 생성된 날개형상에 대하여 유체기계 격자생성 프로그램인 ANSYS CFX-TurboGrid를 사용하여 정렬 격자계(structured grid)를 생성하였다. 이 과정에서 임펠러만의 성능을 확인하기 위해 임펠러 입구부의 벨마우스(bell mouth) 및 출구부 이후의 벌루트(volute)를 제외하고 입구부는 축방향으로 일정한 면적을 갖는 파이프(pipe) 형

Table 1. Numerical analysis set of 2^k factorial

	ibetal_h	ibetal_s	beta2	R1h/R2	R1s/R2	R2	B2/R2	Z_tip/R2
case1	0	0	17	-10	-10	-10	-10	-10
case2	6	0	17	-10	-10	10	10	10
case3	0	6	17	-10	10	-10	10	10
case4	6	6	17	-10	10	10	-10	-10
case5	0	0	27	-10	10	10	10	-10
case6	6	0	27	-10	10	-10	-10	10
case7	0	6	27	-10	-10	10	-10	10
case8	6	6	27	-10	-10	-10	10	-10
case9	0	0	17	10	10	10	-10	10
case10	6	0	17	10	10	-10	10	-10
case11	0	6	17	10	-10	10	10	-10
case12	6	6	17	10	-10	-10	-10	10
case13	0	0	27	10	-10	-10	10	10
case14	6	0	27	10	-10	10	-10	-10
case15	0	6	27	10	10	-10	-10	-10
case16	6	6	27	10	10	10	10	10
center	3	3	22	0	0	0	0	0

상으로 근사화 하였으며 출구부는 반경방향으로 폭이 감소하는 베인리스 디퓨저(vaneless diffuser)로 단순화 하였다^(3,4). 임펠러의 날개 수는 6개이나 수치해석에 사용된 임펠러의 날개 형상이 동일하므로 주기 조건(Periodic condition)을 사용하여 임펠러 1개의 날개 영역에 대해서만 수치 해석을 수행하였고, 임펠러의 3차원 형상과 격자계는 Fig. 4에 나타내었다. 생성된 격자계의 개수는 약 8만개이다.

수치해석은 상용 3차원 점성유체 해석 프로그램인 ANSYS CFX-10을 사용하였다. 임펠러 내부의 비압축성 난류유동해석을 위하여 3차원 레이놀즈 평균 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 난류모델(turbulence model)로는 유동박리 등의 예측에 적절한 전단이송(shear stress transport) $k-\omega$ 모델을 사용하였다. 경계조건으로는 임펠러의 입구부에 균일한 상태의 대기압을 주었고 출구부에는 질량유량을 주어 해석을 하였으며 임펠러의 회전속도는 593rpm을 주었다. 작동유체는 물을 사용하였다.

3.3 2^k 요인실험

실험계획법은 근대적 통계해석법을 기반으로 이상변동을 가져오는 많은 원인 중에서 중요한

원인을 적은 비용으로 선정하고 그 효과를 수량적으로 측정하는 방법이다⁽⁵⁾. 그리고 동시에 두 종류 이상의 인자를 대상으로 하여 그들의 효과를 개별적으로 측정할 수 있다. 본 연구에서는 최적설계를 위한 수치최적화기법으로 2^k 요인실험(factorial designs)의 실험계획기법을 사용하였고, 분석은 상용프로그램인 Minitab14를 이용하였다. 본 논문에서는 관심 있는 인자의 수, 실행할 수 있는 실험의 수, 비용, 시간 등을 고려하여 의미가 적은 고차의 상호작용을 교락 시켜서 실험의 횟수를 적게 하는 일부실시설계(factorial designs)로 2^k 요인실험을 수행하였다. 일부실시설계의 해상도는 IV수준으로 주 효과가 2차 상호작용과 교락되지 않으나, 2차 상호작용 간에는 교락된 형태로 인자수 8개로 16개의 수치해석 실험 조건을 생성하였다. 2^k 요인실험에서 선택한 변수들은 자오면 변수 5개, 날개전개도 변수 3개를 지정 하였다.

자오면 변수 중에서 성능에 영향을 미칠 것이라 인식되는 변수를 다음과 같이 정의하였다. 임펠러 입구부에서 R1h는 입구부 허브반경을 R1s는 쉬라우드 반경을 나타내고, 임펠러 출구 폭 B2, 쉬라우드 입구부와 출구부의 축방향 길이를 Z_tip을 R2로 무차원화하여 정의하였다. 결론적으로 R2와 무차원화 된 R1h/R2, R1s/R2, B2/R2, Z_tip/R2와 R2를 자오면 변수로 지정하였다.

Phi1은 임펠러 날개 전단의 기울어진 각인 Phi1과 날개 후단의 기울어진 각인 Phi2는 기존 설계대상 임펠러 기준으로 고정하였으며 임펠러 날개전단의 곡선 여부를 판단하는 변수 R_LE/(LEN1/cos(PHI1))은 곡선이 아닌 직선으로 고정하였고 임펠러 출구부 직선 부분인 %L_h, %L_s도 설계대상 임펠러 기준으로 고정하였다.

임펠러 허브, 쉬라우드의 입구부 시작하는 각과 출구부 끝나는 각 Theta1_h, Theta2_h, Theta1_s, Theta2_s와 허브, 쉬라우드 입구부분과 출구부분을 연결하는 베지어 커브를 조정하는 조정점 %CP1_h, %CP2_h, %CP1_s, %CP2_s도 설계대상 임펠러 기준으로 고정하였다.

날개전개도 변수 중에서 성능에 영향을 미칠 것이라 인식되는 변수들 즉 입구각과 관련있는 ibetal_h, ibetal_s와 출구각인 beta2를 변수로 지정하였고, 날개 스윙각인 Theta_(h, m, s)는 설계

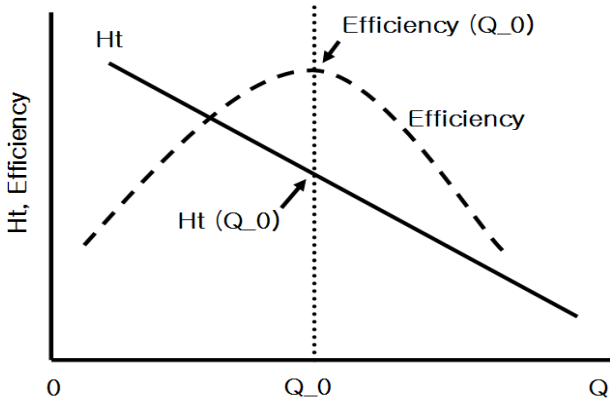


Fig. 5 Total head curve and Efficiency curve

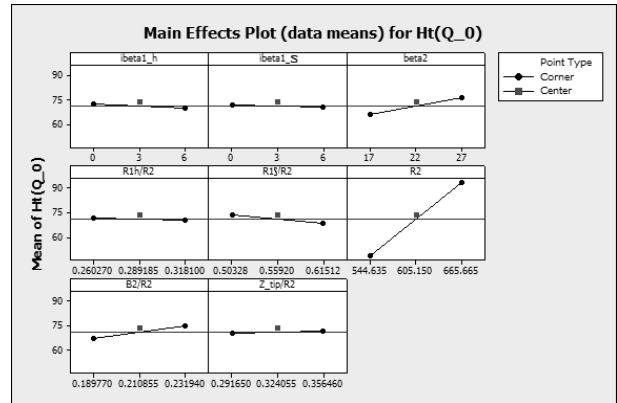


Fig. 7 Main effects plot for Ht(Q_0)

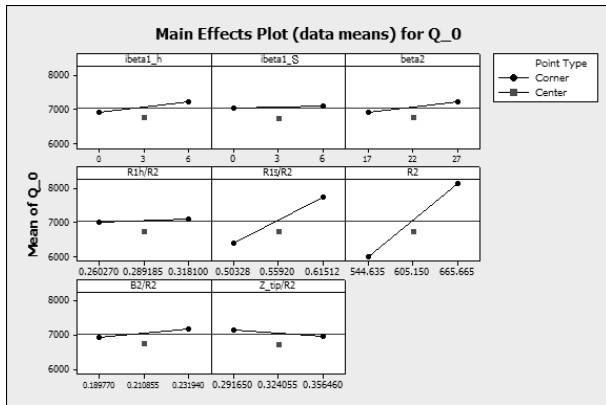


Fig. 6 Main effects plot for Q_0

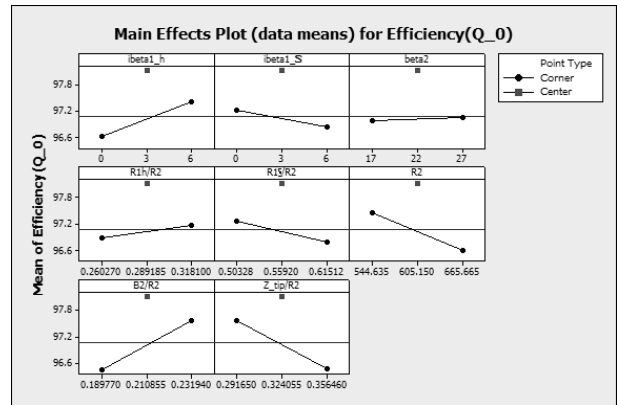


Fig. 8 Main effects plot for Efficiency(Q_0)

대상 임펠러의 스위각으로 고정하였으며, 날개전개도에서 입구부와 출구부 직선부분인 %BETA_LE(h, m, s)와 %BETA_TE(h, m, s)는 날개 전개도 수평축 전체길이 20%로 고정하였다. 날개 전개도 입/출구부 직선부분을 연결하는 베지어 곡선의 입구부와 출구부의 조정점 %CP_LE(h, m, s)와 %CP_TE(h, m, s)는 입구부 조정점은 베지어 곡선부의 25% 위치에 고정하였으며, 출구부 조정점은 베지어 곡선부의 75%로 고정하였다.

날개전개도에서 수직축을 나타내는 자오면 길이 $M_{total}(h, m, s)$ 는 자오면 형상에 의해 결정된다. $d_{theta}(h, s)$ 는 임펠러 출구부의 날개가 기울어지는 정도를 나타내는데 기울기가 없게 하기 위해 0으로 고정하였다.

임펠러 자오면과 날개 전개도의 변수 R1h/R2, R1s/R2, B2/R2, Z_tip/R2, R2, ibeta1_h, ibeta1_s, beta2의 변화범위는 각각의 설계 기준값에서 자

오면 변수 R1h/R2, R1s/R2, B2/R2, Z_tip/R2, R2는 $\pm 10\%$ 를 주었고 날개 전개도 변수 ibeta1_h, ibeta1_s는 $\pm 3^\circ$ 를 beta2는 $\pm 5^\circ$ 로 정하였다. Table 1은 요인실험이 적용된 실험조건을 보여주고 있다.

3.4 임펠러의 성능에 영향을 주는 변수

2^k 요인실험에서 설계 변수에 따른 임펠러의 성능을 분석하기 위해서는 설계 목적값(response variable)을 정의해야 한다. 설계 목적값은 펌프 헤드곡선과 효율곡선을 기준으로 정의하였으며 Fig. 5에 나타내었다. 펌프 성능곡선에서 이상적인 설계점은 유량과 효율곡선 상에서 효율이 최고가 되는 유량점이 설계점과 일치할 때 이상적인 설계점으로 정의한다. 임펠러의 설계 변수에 대한 헤드와 효율의 영향을 살펴보기 위해 효율곡선에서 최고효율지점에서의 유량을 Q_0 로 정

의하였고, 최고효율지점에서의 헤드와 효율을 $H_t(Q_0)$, $Efficiency(Q_0)$ 로 정의하였다.

임펠러의 변수가 임펠러의 성능에 미치는 영향을 주효과도표(main effects plot)를 이용하여 8개의 인자의 주 영향력을 Fig. 6-8에 제시하였다.

Fig. 6에서는 최고효율지점에서의 유량인 Q_0 에 대한 설계 인자의 영향력을 나타내었고 Fig. 7과 Fig. 8에서는 Q_0 에서의 헤드와 효율인 $H_t(Q_0)$, $Efficiency(Q_0)$ 에 대한 인자의 영향력을 나타내었다.

목적값 Q_0 에 영향을 미치는 인자는 R_2 , $R1t/R_2$, $ibeta1_h$ 의 순으로 영향을 주고 있다. 예측할 수 있듯이 R_2 가 클수록 Q_0 는 증가하고 있다. 마찬가지로 $R1t/R_2$ 도 커짐에 따라 Q_0 는 증가하게 된다. 따라서 최고효율점 유량을 증가시키고자 할 때는 R_2 , $R1t/R_2$ 변수를 제어하는 것이 가장 효과적이다.

목적값 $H_t(Q_0)$ 에 영향을 미치는 인자는 R_2 , $beta2$, $B2/R_2$ 순으로 영향을 주고 있으나, R_2 에 대한 효과가 다른 변수에 비해 월등하게 영향을 줌을 알 수 있다. R_2 를 제외하면 $beta2$, $B2/R_2$ 가 설계점에서의 헤드에 영향을 줌을 알 수 있다. 동일 직경에서 헤드를 상승시키기 위해서는 출구 날개각과 출구날개폭을 조절하는 것이 효과적임을 보여주고 있다.

목적값 $Efficiency(Q_0)$ 에 영향을 미치는 인자는 $B2/R_2$, Z_{tip}/R_2 , R_2 순으로 영향을 주고 있다. Q_0 에 영향을 주는 인자가 R_2 , $R1t/R_2$ 로 확연히 다른 변수와 구별되는데 비하여 최대효율점에서의 효율 자체는 매우 다양한 변수에 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 특히 출구폭($B2$)과 축방향길이(Z_{tip}/R_2)가 효율에 미치는 영향이 크음을 알 수 있고, 입사각의 경우는 쉬라우드의 입사각($ibeta1_s$)에 비하여 허브의 입사각($ibeta1_h$)에 의한 영향이 더 크음을 알 수 있다. 대상 펌프의 경우 R_2 는 작을수록, 축방향길이(Z_{tip}/R_2)도 작을수록 효율이 커지는 경향이며, 출구날개폭($B2/R_2$)은 커질수록, 입구허브의 입사각도 커지는 것이 효율향상에 유리하다.

4. 결론

임펠러의 3차원 형상을 나타내는 자오면과 날개 전개도의 변수를 정의하여 임펠러 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 2^k 요인실험 활용하여 8개 설계변수의 경우 해상도 IV에서 16가지의 수치해석 실험만으로 설계변수에 대하여 변수변화에 따른 성능변화를 체계적으로 분석하여 설계변수의 중요도를 파악할 수 있었다.

(2) 설계변수인 $R1h/R_2$, $R1s/R_2$, $B2/R_2$, Z_{tip}/R_2 , R_2 , $ibeta1_h$, $ibeta1_s$, $beta2$ 중에서 최고효율지점의 유량을 나타내는 Q_0 에 미치는 인자는 R_2 , $R1t/R_2$, $ibeta1_h$ 순으로 영향을 주고 있다.

(3) 최고효율지점의 헤드인 $H_t(Q_0)$ 에 미치는 인자는 R_2 , $beta2$, $B2/R_2$ 순으로, 최고효율지점의 효율인 $Efficiency(Q_0)$ 에 미치는 인자는 $B2/R_2$, Z_{tip}/R_2 , R_2 순으로 영향을 주고 있다.

참고 문헌

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. Kim, S., Choi, Y. S., Lee, K. Y. and Yoon, J. Y., 2007, Effect of blade angle distribution on the performance of a centrifugal pump in a fixed meridional shape, Proceedings of the SAREK Annual meeting, pp.21-26
4. Kim, D. S., Choi, Y. S., Jeon, S. G., Yoon, J. Y., 2005, A Numerical Study on the effect of Volute Geometry on the Performance of Centrifugal Pump, Proceedings of the KFMA Annual meeting, pp.497-502
5. Myers, R. H. and Montgomery, D.C., 2001, Response Surface Methodology, Wiley Interscience Publication.