https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.2.125



J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

유동해석을 통한 원심펌프 임펠러의 설계 인자 최적화

조원우^a, 강태원^{a*}

Optimizing Design Factors of Centrifugal Pump Impeller through CFD Analysis

Won Woo Cho^a, Taewon Kang^{a*}

^a Division of Advanced Mechanical Engineering Mechanical & Biomedical Engineering, Kangwon National University, 1, Gangwondaehak-gil, Chuncheon, Gangwon-do, 24341, Korea

ARTICLE INFO

Article history:					
Received	18	January	2018		
Revised	2	April	2018		
Accepted	6	April	2018		
Keywords:					
Centrifugal pump					
Impeller					
CFD Analysis					
RSM					
Performance curve					

ABSTRACT

In recent years, as environmental regulations related to energy have been strengthened, the demand for higher efficiency has increased worldwide. Therefore, for optimizing or improving pump systems, it is important to find various design parameters of impellers to predict performance according to the change in parameters and to improve performance by optimizing the parameters. CFD has been used in this study. The optimum values of design parameters, such as diameter, leading edge angle, inlet angle, outlet angle, and wrap angle of an impeller, were obtained for the centrifugal pump. Various cases were analyzed using response surface methodology, and optimized design parameters were obtained as a result. The final values of the parameters show that the predicted performance curve is in good agreement with the experimental curve.

1. 서 론

펌프는 인류 역사상 가장 오래된 기계 중 하나이며, 원심펌프 (Centrifugal Pump)의 등장으로 보다 많은 유량을 더욱 높은 곳으 로 이송할 수 있는 유익을 제공하게 되었다. 초기 펌프는 탄광 배수 용, 선박용으로 사용되기 시작하여 현재는 건물, 상하수도, 농업관 개, 공업용수, 발전소 등 광범위한 분야에 사용된다. 최근 에너지 및 온실가스 관련 환경규제 등 여러 규제가 강화됨에 따라 동등한 성능에서 보다 높은 효율을 요구하는 고효율 제품들의 수요가 점진 적으로 증가하고 있다. 원심펌프의 여러 가지 부품 중에서 효율에 가장 큰 영향을 미치는 부품은 모터와 임펠러라고 알려져 있다. 그 러나 모터는 현대에 들어와 눈부신 발전을 통해 90%가 넘는 모터 효율을 보이기 때문에 원심펌프의 효율 극대화를 위해서는 임펠러

* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-7939 Fax: +82-33-259-5548 최근에는 컴퓨터 성능의 비약적인 발전 덕분에 전산유체역학 (CFD) 또한 많은 연구가 이루어지고 있다. 전산유체역학을 이용한 연구는 시제품을 만들어보지 않고도 어느 정도 성능 예측이 가능하 기 때문에 여러 방면으로 사용되고 있다. 해외에서는 Miguel 등^[4] 이 여러 가지 난류모델(Turbulence model)을 비교하여 설계 인자 를 변경하였을 때 난류 모델 별 결과를 비교하였고, Cheah 등^[5]은

의 여러 가지 설계 인자들을 찾아 그 변화에 따른 성능을 파악하고, 그 인자들의 최적설계를 통한 성능 향상이 필수적이다. Kim 등^[1]

은 실험계획법을 사용한 원심펌프 임펠러 최적설계를 연구하였고, Pyun 등^[2]은 반응표면기법을 이용한 원심펌프 임펠러 최적설계 및

벌류트를 설계하였다. 또한 Kim 등^[3]은 자오면 형상을 고려한 원

심압축기 임펠러 최적설계 연구를 통하여 펌프의 효율 향상을 위한

임펠러 설계 인자 변화를 주어 성능 향상을 도모하였다.

E-mail address: jirehk@kangwon.ac.kr (Taewon Kang).

Flow rate	300 m ³ /h
Head	32 m
RPM	1750
The Number of Vane	4
Shaft Power	37 KW
Specific Speed	314 RPM
Efficiency	> 70

Table 1 Desired specifications of the pump

설계 유량보다 0.43배, 1.45배의 유량을 주었을 때 성능 변화에 대해 예측하였다. 국내에서 Lee 등¹⁶¹은 임펠러 입구각도 변화에 따 른 유동해석을 통하여 효율이 더 우수한 임펠러 형상의 원심펌프를 찾는 연구를 하였고, Baek 등¹⁷¹은 직교배열표, 분산분석과 직교다 항식을 이용한 대리모델기반 최적설계기법을 이용하여 펌프의 성 능 개선을 위해 상용 CFD 소프트웨어를 통해 설계 인자를 확인하 고 최적설계를 진행하였다.

본 연구에서도 목표 성능을 만족하는 원심 펌프의 임펠러를 설계 하고 성능을 최적화하기 위해 펌프 모델링 소프트웨어 CFTurbo, 유동해석 소프트웨어 Simerics를 사용하여 해석을 수행하였다. 즉, 원심펌프의 효율 향상을 위해 임펠러의 설계 인자들을 찾아 실험계 획법을 통한 최적의 인자를 도출하고 그 인자들로 설계하여 유동해 석을 진행하였다. 최종적인 설계안은 펌프 수요처에서 요구하는 성 능사양을 만족하는 것이며, 이는 Table 1에서 보여주고 있다.

2. 유동 해석

2.1 격자생성

CFTurbo를 사용하여 모델링을 수행하였고, 유동해석은 SimericsMP를 사용하였다. 이를 통해 CAB (conformal adaptive binary-tree)기능을 사용하여 격자를 생성하는데, CAB는 중요 한 기하학적 특징을 살리기 위해 격자를 반씩 나누는(binary gird) 점진적인 분할에 의해 크기를 조절하는 기능을 한다¹⁸¹. 격 자의 개수는 128,000여 개이고, 육면체(Hexahedron)와 다면체 (Polyhedron)격자가 섞여있는 형태를 취하였다.

2.2 경계조건

전산해석의 경계조건은 실제 펌프 시험과 최대한 비슷한 조건 을 맞춰야한다. 펌프 시험은 30분~1시간정도 펌프를 구동하여 시간에 따른 변화가 없도록 정상상태(Steady state)에 가깝게 환 경을 구축하였고, 20°C의 청수를 사용하였다. 유동해석도 마찬 가지로 정상상태에서 20°C의 청수를 사용하여 해석을 수행하였 다. 유체가 여러 바운더리로 흐르는 현상을 모사하기 위해



Fig. 1 Boundary conditions of volute with impeller

SimericsMP에서 지원하는 MGI 조건을 부여하였다. 모터의 회전 속도는 60 Hz, 4극에 맞춰진 1,800 rpm이지만 기계적인 슬립 (slip)을 제외하고 1,750 rpm 값을 부여하였다. 이상의 경계조건은 Fig. 1과 같다.

3. 임펠러 설계인자 선정 및 최적화

3.1 임펠러 설계인자 선정

임펠러를 설계하기 위해서 직경 변화를 나타낸 그림은 Fig. 2와 같다. 먼저 임펠러의 직경은 성능을 개선하기 전의 모델의 치수 300 mm에서 ∓10% 한 범위 즉 270-330 mm에서 최적화하였다. 따라서 직경 별 3가지 Case를 유동해석 하였으며, 그 Case는 Table 2와 같다. 각 Case에 따른 성능 곡선은 Fig. 3에 도시하였 다. 임펠러 직경이 커질수록 효율보다는 양정의 차이가 크게 나타 났으며, 이는 양정에 영향을 주는 설계 인자임을 알 수 있다.

리딩엣지각은 일반적인 원심펌프의 임펠러와는 다르게 Hub와 Shroud의 처음이 같도록 하여 처음부터 임펠러와 물의 접촉 면적 을 크게 하여 회전에 의한 관성을 최대한 유지할 수 있지만 그 만큼 큰 출력이 필요하기 때문에 리딩엣지의 각도를 45도에서 90도까지 최적화 범위를 두었다. 그 형상은 Fig. 4와 같다. 따라서 리딩엣지 각 3가지의 Case를 유동해석 하였다. 그 Case는 Table 3과 같다. 리딩엣지각의 변화에 따라 해석한 결과를 바탕으로 도시한 성능 곡선은 Fig. 5와 같다. 리딩엣지각의 변화는 펌프 효율에 변화를 주는 인자라고 판단된다.

임펠러 깃을 Hub와 Middle, Shroud까지 다르게 입구각과 출구 각을 설정할 수 있는데, 본 연구에서는 선형증가, 선형감소 또는 상수 이렇게 3가지 경우로 나눠서 유동 해석을 통하여 효율과 양정 에 미치는 영향을 파악하였다.

입구각의 변화를 나타낸 그림은 Fig. 6과 같다. 펌프 수요처에서 요구사항을 바탕으로 CFTurbo에서 계산한 입구각에 따라 선형증 가 혹은 선형감소 혹은 상수로 총 4가지 Case를 유동해석 하였으 며, 이를 정리한 것을 Table 4에 표현하였다. Case 1은 입구각이



Fig. 2 Impeller diameter

Table 2 Diameters on each case (mm)



Fig. 3 Performance curves of each diameter



Fig. 4 Leading edge angle of meridional contour

14-14도로 11개로 나눈 Span이 모두 같은 각도를 의미한다. Case 2는 입구각이 14-64도, Case 3은 64-14도, Case 4는 64-64도를 의미한다. 각 Case에 따른 성능 곡선을 도시한 Fig. 7을 살펴보면, 입구각의 차이에 따라 성능차이가 굉장히 미미하다는 것을 알 수



Fig. 5 Performance curves of each leading edge angle



Fig. 6 Shape of inlet angle

Table 4 Inlet angle on each case (°)

Case 1	14-14
Case 2	14-64
Case 3	64-14
Case 4	64-64

있다. 따라서 입구각은 펌프의 성능 향상에 미치는 영향이 굉장히 적기 때문에 임펠러 설계 인자에서 제외하였다.

출구각의 변화를 나타낸 그림은 Fig. 8과 같다. 펌프 수요처에서 요구사항을 바탕으로 CFTurbo에서 계산한 입구각에 따라 선형증 가 혹은 선형감소 혹은 상수로 총 4가지 Case를 유동해석 하여 이



Fig. 7 Performance curves of each inlet angle

Table 5 Cases of outlet angle (Span1-11, °)

Case 1	8-8
Case 2	8-45
Case 3	45-8
Case 4	45-45

를 Table 5에 정리하였으며, 해석 결과에 따른 성능 곡선은 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9를 보면 파라미터 하나의 변화로 효율이 최 대 7%의 차이가 나는 것은 펌프의 효율 향상에 의미가 있는 파라 미터라고 볼 수 있다. 그러나, 실제로 출구각의 구배를 주면 임펠러 를 가공하는데 많은 시간과 비용이 지출되기 때문에 본 연구에서는 수요자의 요구에 의한 한 가지의 각으로 설정하였다.

랩각을 나타내는 그림은 Fig. 10과 같다. 앞에서 언급했듯이 랩 각은 깃이 임펠러를 감싸고 있는 정도를 나타낸 설계 인자이다. 랩 각 또한 커질수록 깃과 물의 접촉 면적을 크게 하여 회전에 의한 큰 동력 전달이 가능하지만 큰 출력이 필요하다. 본 연구의 경우 정해진 출력에서 원하는 양정을 얻고 효율을 최대한 끌어올리기 위해 설계 마진을 고려하여 랩각을 비교적 넓은 범위인 150도에서 190도까지 최적화 범위로 두었다. 유동해석을 진행한 Case는 Table 6, 해석 결과를 토대로 도시한 성능 곡선은 Fig. 11과 같다. 랩각이 커질수록 효율차이는 거의 없지만 양정은 크게 높아진다. 따라서 효율 보다는 양정의 크기에 영향을 줄 것으로 사료된다. 이상 설계인자를 정리하면 Table 7과 같다.

3.2 실험계획법

실험계획법이란 실험자로 하여금 더 나은 실험을 수행하고, 얻 어진 자료를 효율적으로 분석하여 정확한 결론을 도출할 수 있게 하는 통계적 방법 중의 하나이다. 시행착오 실험계획법(Trial and Error), 반응표면 실험계획법(Response Surface Method, RSM), 혼합물 실험계획법(Mixture Design), 다구찌 실험계획법



Fig. 9 Performance curves of outlet angle

(Taguchi Design) 등이 있는데^[9], 본 연구에서는 원심펌프 임펠러 의 최적 설계를 위하여 통계 소프트웨어인 Minitab 17^[10]을 사용 하여 실험계획법 중 반응표면법(RSM)을 활용하였다.

반응표면법은 관심 영역에 속한 임의의 변수의 수준에서 반응값 을 예측하고 원하는 반응값을 얻을 수 있도록 최적화를 수행하기 위해 사용된다. 반응표면법에서 중요한 것은 최소의 실험으로 최적 의 실험결과를 얻기 위한 실험점과 실험점의 수이다.

본 연구에서는 반응표면법 중 가장 많이 쓰이는 중심합성계획법 을 활용하였다. 중심합성계획법의 실험점은 다음과 같이 2^k개의 2^k 요인실험의 실험점과 2k개의 축점 그리고 n(≥1)개의 중심점으로

(m)T



Fig. 10 Comparisons of wrap angle

Table 6 Cases of wrap angle (°)



이루어져 총 실험점의 수는 2^k + 2k + n개인데, 반응표면이 곡면일 때 중심점의 영향이 크므로 중심점에서의 실험을 다른 실험점보다

Table	7	Design	factors
-------	---	--------	---------

Design Variable	Contents
Diameter	270~330 (mm)
Leading edge angle	45~90 (°)
Outlet angle	8~45 (°)
Wrap angle	150~190 (°)



Fig. 12 Optimization result

많이 하는 것이 좋다고 알려져 있다.

앞서 선정한 임펠러의 설계 인자들을 중심합성계획법을 이용하 여 최적화를 수행하였다. 그 결과는 Fig. 12와 같으며, 양정과 출력 은 모두 직경의 영향을 제일 많이 받고, 그 다음 출구각, 리딩엣지 각, 랩각 순이다. 하지만 출력은 정해져 있기 때문에 그에 맞는 최 선의 임펠러 직경을 선정하였고, 출구각이 커지면 효율이 급격하게 떨어지고 출력은 올라가지만 양정이 모자란 상황에서는 요긴하게 사용 가능한 설계 인자라고 할 수 있다. 리딩엣지각과 랩각은 모두 값이 커지면 미미하게 양정과 출력이 커지므로 직경과 출구각에 비해 적은 영향을 미친다.

3.3 최적화된 설계인자 반영

앞서 최적화된 설계인자들을 도출하였다. 도출된 설계인자들을 이용하여 다시 CFTurbo에서 모델링을 실시하였고 동일한 방법으 로 유동 해석을 진행하였다. 최적화된 설계인자를 반영하여 유동 해석을 진행했을 때는 300 m³/hr에서 약간의 차이는 있지만 양정, 효율 출력은 각각 33.42 m, 73.86%, 36.87 KW를 나타내었다. 하지만 실제 임펠러를 제작할 때는 제조환경의 한계로 인하여, 본 설계에서 재안한 인자 중 출구각을 제외하고 직경과 리딩엣지 각, 랩각만을 반영하였다.



Fig. 13 Schematic of Pump test



4. 펌프 시험 및 비교

4.1 시험장치 및 시험 방법

본 펌프 시험에 사용한 원심펌프와 모터의 사양은 Table 8과 같다. 펌프 시험의 개념도를 Fig. 13에 나타내었다. 시험 장치는 개방형 수조, 흡입배관 및 토출배관, 시험용 펌프와 모터, 출력의 측정을 위한 전력계, 회전수 측정용 디지털 타코미터, 유량을 측정

	Contents	Specification		
	Operating range	$270 \sim 330 \text{ m}^3/\text{hr}$		
	Head	$34 \sim 30 \text{ m}$		
Pump	Suction diameter	166 mm		
	Discharge diameter	150 mm		
	ContentsSpeciOperating range270 ~Head34 ~Suction diameter160Discharge diameter150Impeller diameter284Power37Voltage38Pole-Frequency60Revolution per min.1,75	284 mm		
	Power	37 KW		
	Voltage	380 V		
Motor	Pole	4P		
	Frequency	60 Hz		
	Revolution per min.	1,750 rpm		

Table	8	Specifications	of	centrifugal	pump	and	motor
-------	---	----------------	----	-------------	------	-----	-------

하기 위한 위어, 양정을 구하기 위한 압력계, 유량을 조절하기 위한 밸브로 구성되어 있다.

시험은 규격 KS B 6301^[11]과 KS B 6302^[12]에 의해 상온에서 청수를 사용하여 시험을 수행하였다. 토출배관에 설치된 밸브를 차 단상태에서부터 단계적으로 개방하는 방법으로 147.85 m³/hr에서 391.15 m³/hr까지 5개의 지점을 선정하여 각각의 토출압력에 대 해 출력, 토출유량, 양정을 측정하였다.

4.2 시험결과

본 펌프 시험은 공인인증기관인 KTC에 의뢰하여 수행하였다. 펌 프 시험의 결과를 통해 도시한 성능 곡선은 Fig. 14이다. 본 펌프의 요구되는 BEP는 Table 1에 언급되었으며, 시험 결과 BEP에서 양 정은 32.2 m, 효율은 73.2%, 출력은 35.9 KW의 성능을 얻었다. 이러한 결과는 회사의 요구 사항을 만족하는 결과라고 볼 수 있다.

4.3 유동해석과 비교

수행한 유동해석과 펌프 시험의 결과를 비교하였다. 비교한 결과 를 바탕으로 도시한 성능 곡선은 Fig. 15와 같다. Fig. 15를 보면 BEP에서 해석 결과와 시험의 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 최적화된 설계 인자를 반영한 해석모델의 경우 BEP에서 양정은 33.4 m, 효율은 73.9%, 출력은 36.9 KW를 보인다. 시험결 과와 비교하면 양정은 1.22 m, 효율은 0.66%, 출력은 1 KW 차이 가 난다. 따라서 실험과 해석의 양정, 효율, 출력 차이가 5% 안에 속하기 때문에 해석이 비교적 잘 수행되었다고 판단된다. 그리고 해석과 시험 모두 목표 성능인 양정 32 m, 출력 37 KW를 만족하 였다. 선형 보간을 하면 시험의 경우 작동범위에서 양정은 33.6~30.3 m이고, 효율은 71.11~71.46%, 출력은 34.4~38.1 KW의 성능을 보인다. 유동해석의 경우 양정은 34.5~31 m이고, 효율은 72.62~70.69%, 출력은 34.6~39.1 KW의 성능을 보인다.



Fig. 15 Comparison of performance curves of test and analysis

5. 결 론

본 연구를 통하여 목표 성능을 만족시키는 수중 원심 펌프의 임 펠러 설계안을 제시하였다. 이를 위해 각 설계 인자들의 변화를 통 해 얼마나 펌프 성능에 영향을 미치는지 유동해석을 실시하였으며, 각 인자의 영향 정도를 판단하여 설계 인자들을 선정하였다. 그 후 반응표면법과 유동해석을 통해 설계인자의 최적화를 수행하였고, 이를 설계에 반영하여 유동해석을 수행하였다. 또한 공인 인증기관 과 협업을 통하여 펌프 시험을 수행하고 그 결과와 유동해석의 결 과를 비교하여 평가하였다.

임펠러의 설계 인자로서 임펠러 직경, 리딩엣지각, 출구각, 랩각 을 선정하였으며, 실험계획법 중 반응표면법을 통해 각각의 인자 들이 출력, 양정, 효율에 미치는 영향을 확인하고 각 Case의 유동 해석 결과를 통하여 각각의 설계인자들을 최적화하였다. 유동해 석을 검증하기 위하여 KS규격의 시험 방법으로 시험을 수행하였 으며, 시험은 청수를 사용하여 수행하였고, 시험 결과와 해석의 성능 곡선을 도시하여 비교하였다. 기존 모델은 유동 해석 결과 BEP (best efficiency point)에서 양정은 33.4 m, 효율은 68.1% 를 보이지만 최적 설계 인자를 반영한 모델의 경우 BEP에서 양정 은 33.4 m, 효율은 73.9%를 보인다. 비교 결과 양정은 0.04 m 증가하며 변화가 미미했지만, 효율은 5.8% 증가하였다. 따라서 목표 성능인 양정 32 m, 출력 37 KW, 70% 이상의 효율 달성을 만족하였다.

다만, 본 임펠러는 제조 환경의 한계로 인해 모든 유동해석에서 검증된 설계 인자들을 반영하지 않았다. 특히 출구각이 배제되었기 때문에, 제안된 설계 인자들이 모두 반영된 임펠러를 제작했을 때 는 효율과 양정의 증가 등의 변화가 예상된다. 이는 추후 연계되는 과제를 통해 좀 더 최적화된 설계를 도출할 수 있는 연구로 이어질 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 중소벤처기업부에서 지원하는 2017년도 산학연협력 기술개발사업(No. C0442034)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- [1] Kim, S., Choi. Y. S., Yoon. J. Y., Kim. D. S., 2008, Design Optimization of Centrifugal Pump Impeller Using DOE, Fluid Machinery Journal, 11:3 36-42.
- [2] Pyun, K. B., Kim. J. H., Choi, Y. S., Yoon, J. Y., 2011, Design Optimization of a Centrifugal Pump Impeller Using RSM and Design of Volute, Korean Fluid Machinery Journal, 15:3 39-42.
- [3] Kim, J. H., Choi. J. H., Kim, K. Y., 2009, Design Optimization of Centrifugal Compressor Impeller Considering the Meridional Plane, Fluid Machinery Journal, 12:3 7-12.
- [4] Asuaje. M., Bakir. F., Kouidri. S., Kenyery. F., Rey. R., 2005, Numerical Modelization of the Flow in Centrifugal Pump, International Journal of Rotating Machinery, 3 244-255.
- [5] Cheah, K. W., Lee, T. S., Winoto. S. H., Zhao. Z. M., 2007, Numerical Flow Simulation in a Centrifugal Pump at Design and Off-Design Conditions, International Journal of Rotating Machinery, Article ID 83641.
- [6] Lee, S. H., Lee, D. R., 2016, Flow Analysis of the Impeller With Different Inlet Angles in the Centrifugal Pump, J. Comput. Fluids Eng., 21:1 58-63.
- [7] Baek, S. H., Jung, W. H., Kang, S. M.,2012, Shape Optimization of Impeller Blades for Bidirectional Axial Flow Pump, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, 36:12 1141-1150.
- [8] Yang, S. Y., 2017, CFD Theory Education, KWTech, Korea.
- [9] Park, S. H., Choi. B. C., 2008, Understanding the Design of Experiments Through SPSS and SAS Analysis, Minyoungsa, Korea.
- [10] Minitab, 2016, Minitab 17 Manual, Minitab Inc.
- [11] KS, 2015, Pump Testing Methods for Centrifugal Pumps, Mixed Flow Pumps and Axial Flow Pumps, KS B 6301, Korean Standards Association.
- [12] KS, 2016, Pump Measurement Methods of Pump Discharge, KS B 6302, Korean Standards Association.