

선박평형수 처리용 흡입 펌프 임펠러 형상 최적화 연구

A Study on Suction Pump Impeller Form Optimization for Ballast Water Treatment System

이상범^{1*}

Sang-Beom Lee^{1*}

〈Abstract〉

With the recent increase in international trade volume the trade volume through ships is also continuously increasing. The treatment of ballast water goes through the following five steps, samples are taken and analyzed at each step, and samples are obtained using a suction pump. These suction pumps have low efficiency and thus need to be improved. In this study, it is to optimize the form of the impeller which affects directly improvements of performance to determine the capacity of suction pump and to fulfill the purpose of this research. To do it, we have carried out parametric design as an input variable, geometric form for the impeller. By conducting the flow analysis for the optimum form, it has confirmed the value of improved results and achieved the purpose to study in this paper. It has selected the necessary parameter for optimizing the form of the pump impeller and analyzed the property using experiment design. And it can reduce the factor of parameter for local optimization from findings to analyze the property of form parameter. To perform MOGA(Multi-Objective Genetic Algorithm) it has generated response surface using parameters for local optimization and conducts the optimization using multi-objective genetic algorithm. with created experiment cases, it has performed the computational fluid dynamics with model applying the optimized impeller form and checked that the capacity of the pump was improved. It could verify the validity concerning the improvement of pump efficiency, via optimization of pump impeller form which is suggested in this study.

Keywords : Suction Pump, Pump Impeller, Form Optimization, MOGA, NSGA-II

^{1*} 정회원, 교신저자, 대우조선해양(주) 선박해양연구소, 책임연구원 ^{1*} Corresponding Author, Ship and Ocean R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd.
E-mail: lsb7766@gmail.com

1. 서론

최근 국제 무역량의 증가에 따라 선박을 통한 교역량 역시 지속해서 증가하고 있다. 선박은 최적의 운항 상태를 유지하기 위해 화물의 적하 상태에 따라 밸러스트 탱크의 평형수를 넣거나 빼내어 선박의 안정성 유지와 최적 운항 조건을 유지하게 되는데, 이 과정에서 선박평형수로 인해 외래 해양생물 종의 교란을 발생시킬 수 있는 문제점을 가지고 있다. 이러한 선박평형수로 이용되는 바닷물의 양은 전 세계적으로 100억 톤이 넘을 것으로 추정되며, 선박평형수 배출이 해양 환경에 미치는 영향은 상당할 것으로 예상된다[1].

선박평형수 관리협약에서 지정하는 선박평형수 관리방법으로는 크게 교환(exchange) 기준과 성능(performance) 기준 두 가지가 존재한다. 선박평형수 관리의 성능 기준은 선박평형수를 물리적·화학적 처리기술을 이용하여 정해진 기준치 이하로 미생물을 사멸시킨 뒤 배출하는 방법이며, 선박평형수 관리의 교환 기준은 선박평형수를 별다른 처리 없이 원양 지역에서 그 지역의 바닷물과 교환한 후 입항하여 배출하는 방법으로, 최대 2016년까지만 한시적으로 허용되었던 방법이다[2].

해양 환경에 상당한 영향을 미치는 선박평형수의 처리는 다음의 다섯 단계를 통해 이루어진다. 1) 바닷물의 적재, 2) 처리 장치로 이송, 3) 해수 처리, 4) 중화, 5) 해양으로 배출의 순서로 이루어지며, 단계별로 흡입 펌프를 이용해 표본을 취수하고 처리 상태를 확인하게 된다. 이러한 표본 취수용 흡입 펌프는 저출력 펌프를 주로 사용하기 때문에 펌프의 효율이 낮아 취수에 많은 시간이 소요되는 문제점을 가지고 있다.

흡입 펌프의 에너지 효율을 높이려는 방안으로 펌프 임펠러, 흡입구 형상, 토출 유로 형상 최적화 및 임펠러와 하우징의 간격 변화 등이 중요한

설계 요소로 알려져 있다[3].

본 연구에서는 흡입 펌프의 성능에 가장 크게 영향을 미치는 임펠러 형상 최적화를 통해 흡입 펌프의 성능 개선을 하고자 한다. 임펠러 형상 최적화를 위해 먼저 형상 파라미터를 선정하고, 그 특성을 분석하기 위한 실험계획을 설정하였다. 실험계획에 따라 임펠러 형상을 생성하였고, 생성된 형상을 이용하여 수치해석을 통한 유동해석을 수행하였다. 수행된 유동해석 결과를 이용하여 형상 파라미터의 특성을 분석하였고, 그 결과로부터 국부 최적화를 위한 파라미터를 선정하였다. 이후 선정된 파라미터로부터 반응표면을 생성하고, 생성된 반응표면과 다목적유전자알고리즘을 이용한 국부 최적화를 통한 형상 최적화를 수행하였다.

2. 최적화

2.1 최적화 기법

직교배열표를 이용한 실험계획법은 실험 비용의 절감을 위해 요인들의 전체 조합 중 일부만 실시하여 실험 결과를 분석하는 방법인 부분요인실험(Fractional Factorial Test)의 한 종류이다[4]. 실험 인자의 수가 많아서 완전요인실험(Full Factorial Test)으로는 실험 횟수가 너무 많은 경우에 각 실험 인자가 성능 특성에 독립적으로 영향을 주는 주 인자(Main Effect)와 비교적 영향이 클 것으로 예상하는 주 효과 인자 간의 교호 작용을 검출하고, 기술적으로 의미 없는 2차 이상의 고차 교호 작용에 대한 정보를 희생시켜 실험 횟수를 줄일 수 있게 한 실험 배치표이다.

직교배열표는 행렬로 나타나는 표로서 그에 대한 표기법이 다양하게 정의되고 있다. 그 중 Taguchi[5]가 정의한 표기 방법을 일반적으로 많

이 사용하고 있으며, 식 (1)과 같이 표기한다.

$$L_N = \left(\prod_{i=1}^n s_i^{k_i} \right) \quad (1)$$

여기서, L_N 은 실험 회수, s_i 는 인자의 수준(level), k_i 는 주 효과 인자(parameter) 수를 각각 나타낸다.

실험을 통해서 얻은 데이터를 분석하여 객관적인 정보를 추출하고 그에 따른 결론을 얻어내기 위해서 다양한 데이터 분석방법을 사용하고 있다. 이러한 데이터 분석방법에는 분산분석, 통계적 검정과 추정, 상관분석, 회귀 분석 등이 있으며, 이러한 분석 과정을 통해 실험 인자의 요인 효과의 크기, 정도의 상세와 효과를 추정할 수 있다. 직교배열표를 이용할 경우, 유동해석을 통해 얻은 결과는 평균분석(ANOM)과 분산분석(ANOVA)을 이용하면 분석이 쉬워진다[6].

최근 설계 문제가 점점 복잡해지고 이에 따라 해석 시간이 기하급수적으로 증가함에 따라 근사 최적 설계 방법이 주목을 받기 시작하였다. 근사 최적 설계는 원래 문제를 근사 함수 문제로 치환하고 이 변환된 근사 함수 문제를 이용하여 최적 설계를 수행하는 방법으로, 이를 통해 해석에 드는 비용을 감소시킬 수 있다.

근사 함수는 크게 국소 근사화와 전역 근사화로 분류할 수 있다. 국소 근사화는 민감도 정보를 이용하여 현재 설계점 근처에서 근사 함수를 생성하는 것으로 현재 설계점 부근에서는 근사 함수가 매우 정확하지만, 현재 설계점에서 멀어질수록 그 정확도가 급속히 떨어지는 단점이 있다. 하지만 국소 근사화를 적절히 이용하더라도 근사 함수를 사용하지 않은 최적 설계보다 해석 계산 횟수를 상당히 감소시킬 수 있어 많은 연구에서 사용되고 있다. 이에 반해 전역 근사화는 어느 설계 영역에 대하여 근사 함수를 생성하는 것으로 어느 한 설

계점에 대해서는 그 정확도가 부정확할 수도 있지만, 설계 영역 전체에 대하여 근사화하고자 하는 해석치의 일반적인 경향을 보여 줄 수 있는 장점이 있다고 하였다[7].

반응표면분석을 위하여 많이 사용되는 실험계획법에는 반응표면 추정식이 반응변수의 모평균(η)이 1차 회귀모형(1st Order Regression Model)에 근사하는 경우에는 2^k 요인 배치법, 2 수준계 일부실시법, 심플렉스 계획법이 흔히 사용된다. 반응표면이 곡면으로 표현될 것으로 예상이 된다면 반응변수의 모평균(η)이 2차 회귀모형(2nd Order Regression Model)이 적절하다고 판단되는 경우에는 3^k 요인 배치법, 3수준계 일부실시법, 중심합성계획(Central Composite Design), 회전계획(Rotatable Design), 회전중심합성계획(Rotatable Central Composite Design), Box-Behnken 계획법의 6가지 실험계획법이 자주 사용된다.

유전 알고리즘은 자연 세계의 진화과정에 기초한 계산 모델로서 John Holland에 의해서 1975년에 개발된 전역 최적화 알고리즘이다. 유전 알고리즘은 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 정해진 형태의 자료구조로 표현한 다음 이들을 점차 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 만들어 낸다. 유전 알고리즘은 선택, 교차, 대치, 변이의 주요 연산을 이용하여 목적 함수의 적합도가 원하는 수준을 만족할 때까지 또는 미리 지정한 최대 반복 횟수에 도달할 때까지 생성된 값의 적합도(Fitness)와 주요 연산 과정을 반복적으로 수행하게 된다.

특히, NSGA-II는 다목적 최적 설계를 위해 Deb[8]에 의해서 제안된 기법으로, NSGA-II는 파레토 프론티어(Pareto Frontier)가 실제 최적해의 특성을 잘 나타내는 효율적인 알고리즘으로 널리 사용되고 있다. 특히 지배성 개념(Concept of Dominance)을 바탕으로 비지배 분류법(Non-Dominated Sorting) 방법을 이용하여 유전 알고리즘의 개체(Individual)를 분류함으로써 파레토 프론티어의 정확성을 확보하

도록 하였다는 특징이 있다.

2.2 펌프 형상 최적화

본 연구에서 제안하는 임펠러의 형상 최적화를 위한 파라메트릭 디자인에 따른 최적화의 흐름도를 Fig. 1에 도시하였다. 파라미터를 선정하고 파라미터 조정을 위한 전역 최적화 과정과 조정된 파라미터에 대한 국부 최적화 과정의 두 부분으로 구성되어 있으며 단계별 주요 내용은 다음과 같다.

1단계: 펌프 성능 개선을 위한 임펠러 형상 파라미터를 정의하고, 파라미터별 수준을 정의한다.

2단계: 파라미터 분석을 위한 실험설계의 선택 단계로 직교배열표를 작성한다.

3단계: 직교배열표에 따라 유동해석(CFD)을 수행하며, 해석 결과를 토대로 통계분석을 하여 파라미터 범위를 조정한다.

4단계: 범위가 조정된 형상 파라미터를 이용하여 파라미터 최적화를 실시하며, 파라미터 최적화를 위한 목적 함수를 결정한다.

5단계: 범위가 조정된 파라미터를 이용하여 반응표면모델 생성을 위한 반응표면 실험계획을 선정하고, 유동해석을 한다. 해석 결과를 바탕으로 반응표면 모델을 생성한다.

6단계: 결정된 반응표면모델과 목적 함수를 이용하여 다목적유전자알고리즘을 이용해 최적 형상을 선정한다.

7단계: 얻어진 최적 형상에 대해 유동해석을 수행하여 개선된 결과를 확인한다.

3. 임펠러 형상 파라미터 분석

3.1 파라미터 선정

펌프 임펠러의 주요 형상 파라미터는 Kim[9] 등이 설명한 요소 중 아래의 Fig. 2 및 Table 1 과 같이 임펠러 날개의 받음각(A), 꼬리각(B), 꼬리반경(R1), 머리반경(R2)를 4개의 인자로 설정하였다. 또한, Phadke[10]에 따르면 설계 파라미터

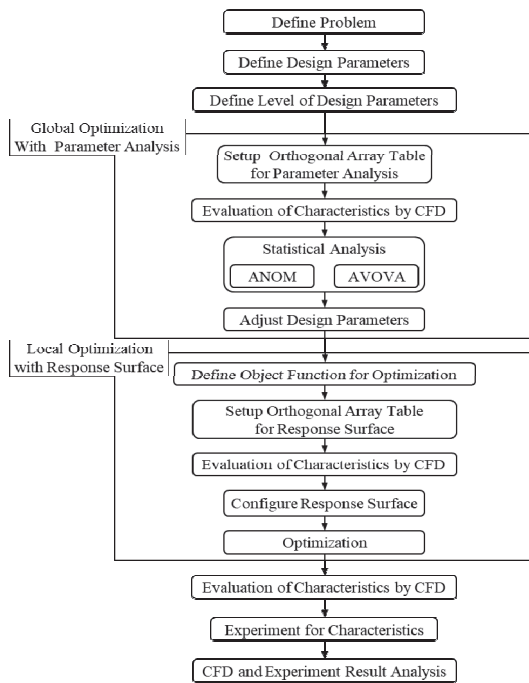


Fig. 1 Flow chart of optimization

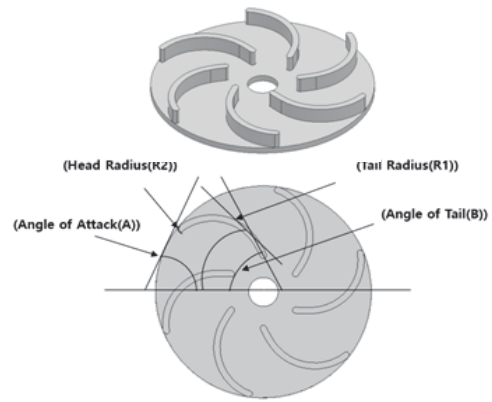


Fig. 2 Design parameters

Table 1. Definition of design parameters

Symbol	Description	Unit	Values
A	Angle of Attack	deg	65 ~ 75
B	Angle of Tail	deg	65 ~ 75
R1	Tail Radius	mm	65 ~ 75
R2	Head Radius	mm	2 ~ 4

Table 2. Matrix of design parameters

Level	Parameters			
	A [°]	B [°]	R1 [mm]	R2 [mm]
1	65	65	65	2
2	70	70	70	3
3	75	75	75	4

Table 3. Orthogonal Array

No.	A [°]	B [°]	R1 [mm]	R2 [mm]
1	65	65	65	2
2	65	65	70	3
3	65	65	75	4
4	65	70	65	3
5	65	70	70	4
6	65	70	75	2
7	65	75	65	4
8	65	75	70	2
9	65	75	75	3
10	70	75	65	2
11	70	75	70	3
12	70	75	75	4
13	70	65	65	3
14	70	65	70	4
15	70	65	75	2
16	70	70	65	4
17	70	70	70	2
18	70	70	75	3
19	75	70	65	2
20	75	70	70	3
21	75	70	75	4
22	75	75	65	3
23	75	75	70	4
24	75	75	75	2
25	75	65	65	4
26	75	65	70	2
27	75	65	75	3

를 2수준으로 설정하는 경우는 보통 선형 효과를 파악하는 경우에 주로 사용하며, 3수준은 비선형성, 즉 곡률 효과와 큰 값과 작은 값으로 이루어진 구간을 탐색하는데 용이하다. 따라서 본 논문에서는 4개의 인자에 대해 아래의 Table 1과 같이 정의하고, 각 형상 파라미터의 비선형성을 고려하기 위해 형상 파라미터의 수준은 아래의 Table 2와 같이 3수준으로 설정하여 파라미터 분석을 위한 실험계획법에 따른 Matrix를 구성하였다. 본 연구에서는 앞서 정의한 4개의 인자와 3 수준 파라미터를 이용하여 임펠러 형상 파라미터 분석을 위해 이론적으로는 L_9 을 사용해도 충분하지만, 좀 더 많은 경우를 직접적으로 계산해보고자 하는 연구 목적으로 L_{27} 을 사용하여 직교배열표를 작성하였다. 선택된 직교배열은 형상 파라미터 사이의 교호작용 및 주 효과를 동시에 고려하여 직교배열을 구성하였다. Table 3은 Minitab 소프트웨어를 활용하여 구성된 직교배열표이다.

3.2 유동해석

펌프 생성된 실험계획에 따라 임펠러 형상에 따른 효율을 계산하기 위해 유동해석을 실시하였으며, 이때의 경계 조건은 아래의 Fig. 3과 같다. 펌프의 하단에서 유체가 흡입되고, 토출구에 배압이 걸리는 것으로 가정하였다. 토출구에 걸리는

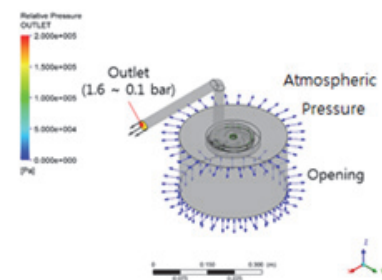


Fig. 3 Boundary condition

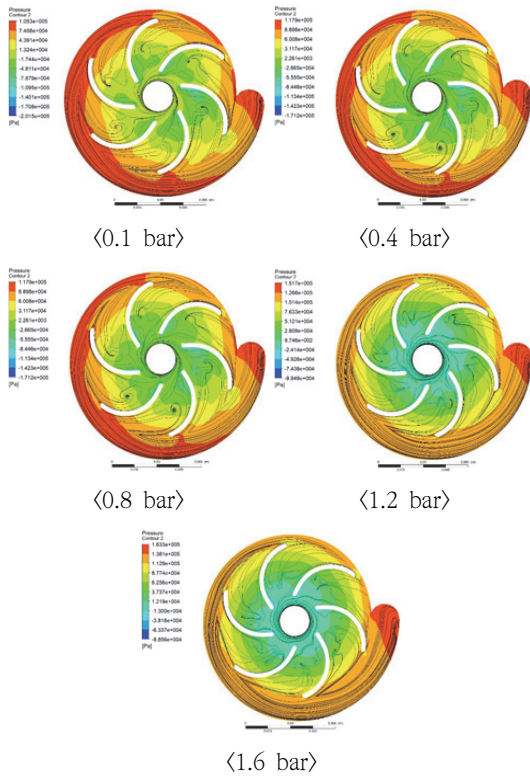


Fig. 4 Pressure distribution around the impeller

Table 4. Pump efficiency calculation results(%)

No.	1.6 bar	1.2 bar	0.8 bar	0.4 bar	0.1 bar
1	49.91	46.51	34.93	18.99	5.03
2	51.34	47.41	35.38	19.2	5.07
3	51.69	47.33	35.02	19.11	5.07
4	51.09	47.17	35.16	19.14	5.08
5	51.56	47.31	35.09	19.13	5.07
6	50.19	46.71	35.1	19.19	5.09
7	51.38	47.34	35.2	19.22	5.09
8	49.24	46.13	34.74	18.93	5.02
9	50.42	46.74	34.92	19.07	5.07
10	50.54	47.5	35.94	19.77	5.27
11	50.67	48.22	36.69	20.26	5.39
12	50.66	48.21	36.74	20.22	5.37
13	51.18	47.74	35.89	19.64	5.23
14	52	48.14	35.92	19.63	5.23
15	50.09	47.04	35.55	19.49	5.19

Table 4. Continued

No.	1.6 bar	1.2 bar	0.8 bar	0.4 bar	0.1 bar
16	50.26	47.79	36.39	20	5.34
17	50.41	47.43	35.85	19.81	5.27
18	50.33	47.72	36.3	19.93	5.29
19	50.64	48.28	36.69	20.26	5.42
20	50.13	48.53	37.31	20.74	5.56
21	50.52	49.15	38	21.09	5.63
22	49.99	48.28	37.12	20.51	5.48
23	50.43	48.81	37.49	20.82	5.58
24	49.95	48.05	36.86	20.46	5.47
25	51.68	48.41	36.41	20.03	5.37
26	50.72	48.43	36.78	20.24	5.41
27	49.05	46.65	35.6	19.78	5.31

배압은 0.1, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 bar가 걸리는 것으로 설정하여 유동해석을 진행하였다. 임펠러는 3,600 RPM으로 회전하는 것으로 가정하였으며, 작동 유체는 상온의 물을 적용하였다. 평균 Mesh Size는 3.0 mm로 설정하였으며, 사용된 난류 모델은 SST(Shear Stress Transport)모델을 사용하였다. 토출구 압력의 변화에 따른 유동해석에 대한 성능 특성 계산 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 또한, 유동해석 결과를 바탕으로 Park[11]이 저술한 펌프의 효율 계산식을 이용하여 펌프의 효율을 계산하였으며, 결과는 Table 4와 같이 정리하였다.

3.3 평균 분석을 통한 파라미터 분석

유동해석을 통한 결과로부터 토출 유량, 임펠러 토크 및 효율에 대한 평균 분석을 수행하였다. 본 논문에서는 도출된 실험 특성치인 토출 유량, 임펠러 토크, 효율을 실험 요인 변동으로 분해하여 오차 요인 변동에 비해 큰 영향을 주는 실험 요인을 찾아내었다.

토출 유량 평균 분석을 한 결과를 보면 받음각(A)과 꼬리각(B)이 작을수록 토출 유량이 많음을

알 수 있었으며, 임펠러 토크 평균 분석을 한 결과를 보면 받음각(A)과 꼬리각(B)이 클수록 임펠러 토크가 작게 나오는 것을 알 수 있었다. 또한, 위의 두 결과로부터 효율 평균 분석을 한 결과를 보면 받음각(A)과 꼬리각(B)이 클수록 효율이 높아지는 것을 알 수 있었다.

평균 분석을 통해서 토출 유량과 임펠러 토크에 영향을 미치는데 미치는 머리반경(R2)을 고정하고, 영향을 미치는 다른 3가지 요소들의 범위를 아래의 Table 5와 같이 재조정하여 파라미터 분석 과정을 다시 반복하여 수행하였다.

Table 5. Design parameters adjustment

Symbol	Description	Unit	Values
A	Angle of Attack	deg	65 ~ 75
B	Angle of Tail	deg	65 ~ 75
R1	Tail Radius	mm	65 ~ 75
R2	Head Radius	mm	4

4. 임펠러 형상 최적화

4.1 목적 함수 및 실험계획 설정

국부 최적화를 위한 목적 함수는 쿨러트 성능 개선을 위한 요소인 토출 유량, 임펠러 토크, 효율 3가지를 선정하였다. 토출 유량은 최대가 되는 것이 좋으나, 임펠러 토크는 적게 걸리는 것이 펌프의 특성 개선에 유리하다. 그리고 효율을 최대화하는 것을 목적 함수로 설정하였다. 또한, 아래의 Table 6과 같이 인자의 수가 k개인 경우에 3^k 요인배치법 보다는 실험점의 수가 많지 않으면서 직교블록을 만들기 용이한 Box-Behnken 계획법을 사용하여 반응표면 생성을 위한 실험계획표를 생성하였다.

Table 6. Experimental design for response surface

No.	A [°]	B [°]	R1 [mm]	R2 [mm]
1	70	70	70	4
2	65	65	70	4
3	75	65	70	4
4	65	75	70	4
5	75	75	70	4
6	65	70	65	4
7	75	70	65	4
8	65	70	75	4
9	75	70	75	4
10	70	65	65	4
11	70	75	65	4
12	70	65	75	4
13	70	75	75	4

4.2 특성 분석 및 형상 최적화

생성된 실험계획에 따라 앞서 설정된 경계 조건으로 유동해석을 수행하여 Table 7에 각각의 경우에 대한 펌프 효율 계산 결과를 나타내었다.

Table 7. Pump efficiency calculation results for response surface(%)

No.	1.6 bar	1.2 bar	0.8 bar	0.4 bar	0.1 bar
1	49.91	46.51	34.93	18.99	5.03
2	51.34	47.41	35.38	19.2	5.07
3	51.69	47.33	35.02	19.11	5.07
4	51.09	47.17	35.16	19.14	5.08
5	51.56	47.31	35.09	19.13	5.07
6	50.19	46.71	35.1	19.19	5.09
7	51.38	47.34	35.2	19.22	5.09
8	49.24	46.13	34.74	18.93	5.02
9	50.42	46.74	34.92	19.07	5.07
10	50.54	47.5	35.94	19.77	5.27
11	50.67	48.22	36.69	20.26	5.39
12	50.66	48.21	36.74	20.22	5.37
13	51.18	47.74	35.89	19.64	5.23

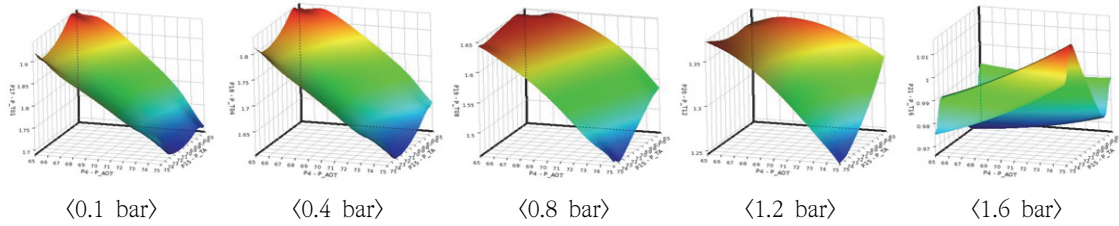


Fig. 5 Response surface of [Angle of attack & angle of tail] for efficiency

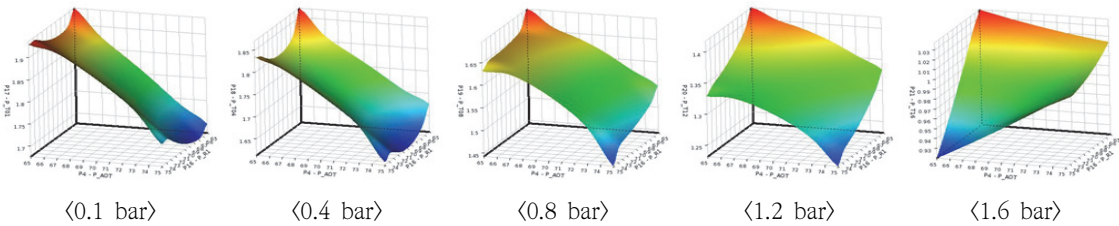


Fig. 6 Response surface of [Angle of attack & tail radius] for efficiency

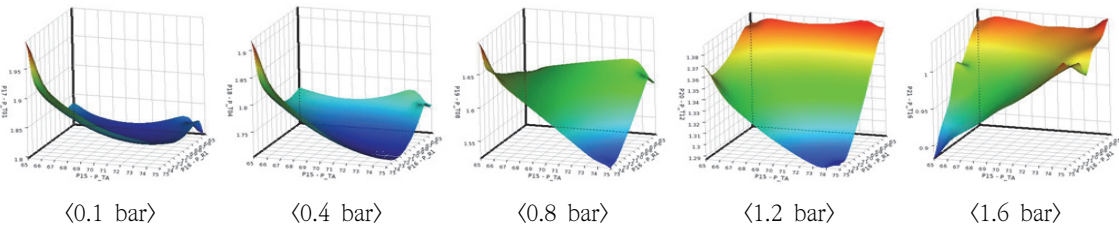


Fig. 7 Response surface of [Angle of tail & tail radius] for efficiency

Table 8. Optimization parameters

Parameters	Value
Number of Initial Samples	500
Number of Samples Per Iteration	100
Maximum Allowable Pareto Percentage	80
Convergence Stability Percentage	2
Maximum Number of Iterations	50

Table 9. Final optimized design parameter values

Symbol	Description	Unit	Values
A	Angle of Attack	deg	75
B	Angle of Tail	deg	67
R1	Tail Radius	mm	67
R2	Head Radius	mm	4

본 연구에서는 보간 기법에 기반을 둔 근사 모델링 기법으로써 비선형성에 강한 특징을 가지고 있는 크리깅 반응표면 법을 이용하여 최적화를 수행하였으며, Fig. 5에서 7까지 크리깅 응답 반응 표면을 생성하였다. 마지막으로 다목적유전자알고리즘을 이용하여 아래의 Table 8과 같은 파라미터를 적용하여 최적화를 수행하였다.

최적화를 수행한 최종 최적 형상 파라미터를 아래의 Table 9와 같이 도출하였다. 최적화된 임펠러의 형상을 적용하여 유동해석을 수행하였으며, 기존 임펠러 형상을 적용할 때와의 비교 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 해석 결과, 토출구의 압력이 높을수록 효율이 개선되었음을 알 수 있었다.

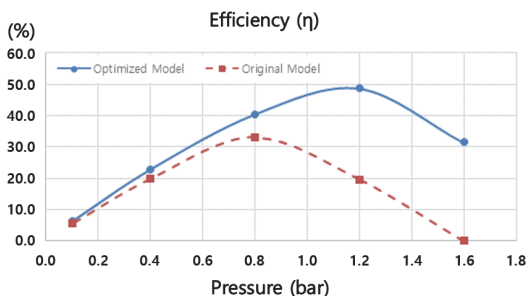


Fig. 8 Comparison of efficiency curves

5. 결론

본 연구에서는 선박평형수 표본 채취용 펌프의 성능을 개선하기 위해 임펠러의 형상을 최적화하여 대하여 다음과 같은 연구 결론을 얻을 수 있었다.

펌프 임펠러 형상 최적화에 필요한 파라미터를 선정하고, 실험계획법을 이용하여 그 특성을 분석하였고, 형상 파라미터 특성 분석을 통해 국부 최적화를 위한 파라미터의 인자를 줄일 수 있었다. 국부 최적화된 파라미터를 이용하여 반응표면을 생성하고 다목적유전자 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하였으며, 최적화된 임펠러 형상을 적용한 모델로 유동해석을 통해 흡입 펌프의 성능이 개선되었음을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제시한 최적화 방법을 통하여 성능 개선된 흡입 펌프의 최적 형상을 도출할 수 있었고, 유동해석을 통하여 펌프 성능 개선에 대한 타당성을 입증하였다.

참고문헌

- [1] IMO, "The International Convention for the Control and Management of Ship's Ballast Water and Sediments", United Nations, (2004).
- [2] E. C. Kim, "Consideration on the Ballast Water Treatment System Technology and its Development Strategies", Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, vol. 15, no. 4, pp. 349-356, (2012).
- [3] K. Y. Kim, and H. Y. Park, "Pump Handbook", Dong Myeong Publishers, vol. 1, pp. 65-82, (2003).
- [4] S. H. Park, and J. W. Kim, "Modern design planning using MINITAB", Minyoungsa, vol. 2, pp. 385-418, (2013).
- [5] G. Taguchi, "System of Experimental Design", Kraus International Publications, vol. 1, (1987).
- [6] K. D. Kim, and H. T. Kim, "Theory and Application of Optimization Experiment Design", Hanyang University Press, pp. 32-43, (2007).
- [7] K. J. Park, and B. S. Kang, "Analytical Design Methodology", Dong Myeong Publishers, (2010).
- [8] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, (2002).
- [9] Y. D. Kim, and S. D. Kim, "Fluid Machine", Cheongmoongak, pp. 71-77, (2017).
- [10] M. S. Phadke, "Quality Engineering Using Robust Design", Prentice Hall,, (1992).
- [11] H. Y. Park, Y. Y. Kim, M. K. Woo, J. P. Gil, T. S. Kim, and Y. M. Oh, "Pumping Station Design", Hongreung Science Publishing Co., pp. 338-342, (2007).