

CFD를 이용한 회전 운동을 하는 이젝터의 최적화

강상훈*, 박영철

¹(주)엔케이, ²동아대학교 기계공학과

Optimization of ejector for swirl flow using CFD

Sang-Hoon Kang^{1*}, Young-Chul Park²

¹NK. CO., LTD.,

²Division of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 본 연구는 오존 방식 선박평형수 처리의 주요 장치인 기체-액체 이젝터에 대하여 구동 노즐의 유입부에 회전 운동 유도 장치에 의해 발생하는 구동 유체의 회전 운동이 이젝터 효율에 미치는 영향에 관한 연구이다. 먼저 배압에 따른 이젝터의 각 포트별 압력과 흡입 유량을 확인하기 위하여 실험 장치를 구성하고, 회전 운동이 없는 이젝터에 대한 실험 수행 및 데이터를 획득한다. 실험의 데이터를 바탕으로 격자 사이즈 비교를 통해 기체-액체 이젝터에 적합한 유한요소모델을 선정하였으며, 도출된 CFD 모델을 이용하여 구동 유체의 회전 운동이 이젝터의 흡입 효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 이젝터의 흡입 유량을 높이기 위하여, 메타 모델을 이용한 크리깅 기법을 사용하여 회전 유도 장치의 내부 형상 인자인 전체 길이 l , 내부 직경 d , 날개 개수 n 에 대한 구조 최적화를 수행한다. 최적화된 회전 유도 장치를 적용한 결과 구동 유체의 회전 운동이 없는 이젝터에 비해 이젝터 효율이 약 3% 가량 개선됨을 확인하였다.

Abstract This paper investigates the effect of the rotational motion of a driving fluid generated by a rotational motion device at the inlet of a driving nozzle for a gas-liquid ejector, which is the main device used for ozonated ship ballast water treatment. An experimental apparatus was constructed to study the pressure and suction flow rate of each port of the ejector according to the back pressure. Experimental data were acquired for the ejector without rotational motion. Based on the data, a finite element model was then developed. The rotational motion of the driving fluid could improve the suction efficiency of the ejector based on the CFD model. Based on the CFD results, structure optimization was performed for the internal shape of the rotation induction device to increase the suction flow rate of the ejector, which was performed using the kriging technique and a metamodel. The optimized rotation induction device improved the ejector efficiency by about 3% compared to an ejector without rotational motion of the driving fluid.

Keywords : CFD, Ejector, Kriging, Optimization, Swirl

1. 서론

선박평형수는 선박에 짐을 싣고 내리는 과정에서 선박의 균형을 잡기 위해 선박의 평형수 탱크에 채우거나 바다로 배출하는 바닷물을 말한다. 선박은 연간 약 500만톤 가량의 해양으로 배출되는 선박평형수를 처리하는

방법 중 본 논문의 연구 대상인 이젝터는 강력한 살균 가스인 오존을 선박평형수에 주입시키는 장치로서, 오존과 직접 접촉을 통해 선박평형수 내 해양 침입종이 일부 사멸되고, 이후 오존과 선박평형수 내 화합물과의 반응으로 생성되는 총잔류산화물에 의해 잔류 해양 침입종이 사멸하게 된다.

*Corresponding Author : Sang-Hoon Kang(NK. CO., LTD.)

Tel: +82-10-9195-2920 email: shinji2778@hotmail.com

Received January 12, 2017

Accepted February 3, 2017

Revised February 2, 2017

Published February 28, 2017

이젝터를 통해 오존이 주입되는 원리는 펌프에 의해 고압의 구동 유체인 선박팽형수가 구동 노즐을 통해 분사되면, 흡입관으로부터 저압의 흡입 유체인 오존이 이젝터 내부로 주입되게 된다. 이는 고압의 구동 유체와 저압의 흡입 유체 간의 운동량 교환에 의해, 별도의 기계적 장치 없이도 흡입관을 음압 상태를 발생시켜 이젝터 내부로 2차 유체의 유입이 이루어진다. 이렇듯 별도의 기계적 장치 없이도 구동 유체의 운동 에너지에 의해 흡입 유체의 흡입을 발생시키는 점이 이젝터가 가지는 장점이다.

각종 화학 분야에서 이용되고 있는 이젝터에 대해 Witte[1]는 액체-기체 이젝터의 이론적 설계 방법을 제시하였으며, Park[2]은 축대칭 환형분사식 이젝터를 제작하여 이젝터 제트 덕트 길이의 증가가 내부 혼합 성능 향상에 크게 작용하는 것을 확인하였다. Jeong[3]는 혼합관의 길이와 직경비가 4일 때, 기체-액체 유량비가 최대치에 도달하는 것을 실험과 CFD 해석을 통해 확인하였다.

이젝터는 메인 배관의 압력, 흡입부의 압력 및 펌프의 성능이 제한 조건이 되고, 별도의 기계적 동력원을 가지지 않으므로 성능을 향상시키기 위한 조건은 이젝터의 내부 형상으로 한정된다. 본 논문에서는 회전 운동하는 구동 유체를 사용하는 이젝터에 대하여 회전 운동 유도 장치의 내부 구조 형상의 최적화를 통해 이젝터 성능 향상에 대해 다루고자 한다.

2. 본론

2.1 이젝터 원리

이젝터는 구동 노즐로 유입되는 고압의 구동 유체를 동력원으로 하여 주유동으로 수축-확산을 가지는 구동 노즐을 통과하면서 압력에너지가 속도에너지로 변환된다. 이때 저압-고속의 제트 형태로 분사되는 구동 유체는 혼합실 내 압력까지 팽창함에 따라 구동 노즐 출구 주변의 기체와 운동량 교환을 통해 부압을 발생시킨다. 흡입관보다 상대적으로 낮게 형성되는 부압은 흡입 유체를 흡입함에 따라 부유동을 일으킨다. 주유동과 부유동은 이차목을 통과하면서 가속화 및 혼합이 이루어지고, 주유동 방향으로 흡입 유체는 압축하게 된다. 디퓨저 출구에서는 구동 유체와 흡입 유체가 혼합되어 베르누이의 원리에 따라 배출 압력상태로 외부에 배출된다[4].

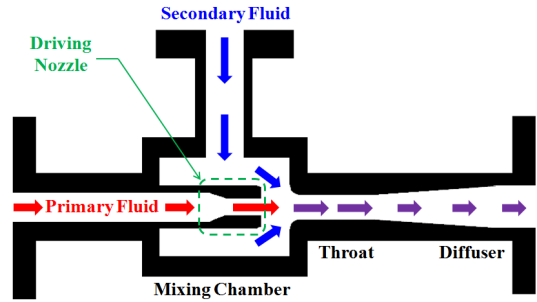


Fig. 1. Operating mechanism of Gas-Liquid Ejector

2.2 이젝터 실험

일정한 구동 유체의 압력과 유량 상태에서 배압의 변화에 따른 흡입 유체의 유량을 확인하기 위하여, Fig. 2와 같이 메인 배관, 유량계, 압력계, 펌프, 그리고 이젝터로 이루어진 실험 장치를 구성한다.

이젝터에 대한 실험은 구동 유체가 펌프를 통해 일정 유량(Q_1) 및 압력(P_2)으로 이젝터에 유입되는 환경에서 메인 배관의 압력(P_1)의 압력 변화에 따라 흡입되는 흡입 유체의 압력(P_4) 및 유량(Q_2)을 측정한다. 이는 베르누이 원리에 따라 유입부와 토출부의 압력 차가 흡입 성능에 미치는 영향을 파악하기 위한 것으로 유동 해석의 검증 시 해석 결과와의 비교 데이터로 사용된다. 본 실험에 사용되는 이젝터는 구동 유체의 회전 운동이 없는 이젝터이며, 배압의 범위는 0.5bar부터 4.0bar까지 0.5bar 간격으로 총 8번의 실험을 수행한다. 또한 안전한 실험의 진행을 위하여 흡입 유체는 인체에 유해한 오존 대신에 대기 중의 공기로 진행한다.

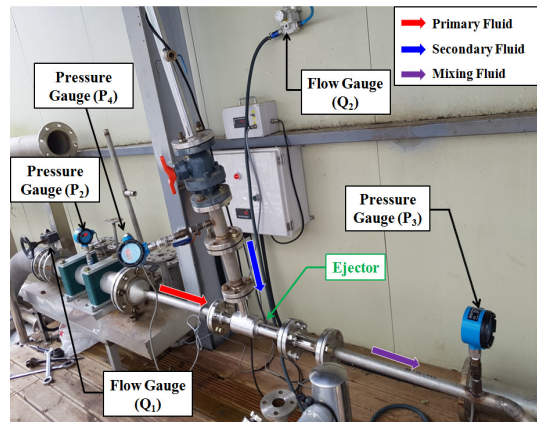


Fig. 2. Test bench of Ejector System

2.3 이젝터 실험 결과

구동 유체의 회전 운동이 없는 이젝터에 대한 실험 결과, 배압이 증가함에 따라 흡입 유체의 흡입 유량은 줄어든다. 이는 구동 노즐로 유입되는 구동 유체의 압력과 메인 배관의 배압과의 압력 차가 클수록 구동 유체와 흡입 유체 간의 에너지의 교환량이 커짐을 알 수 있다. 따라서 구동 노즐로 유입되는 구동 유체의 압력과 유량이 일정할 경우 메인 배관의 배압이 가장 낮은 0.5bar에서 가장 큰 흡입 유체의 유량인 약 28.8m³/hr로 나타났다.

Table 1. Test results of non-swirling primary fluid of ejector

P1 [bar]	P2 [bar]	P3 [bar]	P4 [bar]	Q1 [m ³ /hr]	Q2 [m ³ /hr]
0.5	9.3	0.3	0.0	14.6	28.8
1.0	9.3	1.7	0.0	14.6	24.5
1.5	9.3	2.0	0.0	14.5	20.8
2.0	9.3	2.5	0.0	14.5	16.5
2.5	9.3	2.8	0.0	14.5	12.3
3.0	9.3	3.3	0.0	14.6	8.5
3.5	9.3	3.9	0.0	14.5	6.6
4.0	9.3	4.3	0.0	14.6	3.3

3. CFD를 이용한 검증

3.1 이젝터의 유동 해석

회전 운동 없는 이젝터에 대한 수치 해석은 상이 다른 두 가지 유체인 기체와 액체가 혼합된 다상의 유체에 대한 유동 해석이 필요하다. 본 연구에서는 기체-액체 이젝터의 배압에 따른 흡입 유량을 예측하기 위하여, 상용 유동 해석 소프트웨어인 ANSYS-CFX 16.2를 사용한다. 다상의 유동 현상을 지배하는 연속 방정식과 운동 방정식은 다음과 같다[6].

연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (3)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k) \quad (4)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k \vec{v}_k)}{\rho_m} \quad (5)$$

여기서, ρ_m 은 mixture density, \vec{v}_m 은 mass average velocity를 의미하며, α_k 는 다상의 체적분율, $\rho_k \vec{v}_k$ 는 다상의 상에 따라 변화하는 밀도와 속도 값이다.

운동 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = & \quad (6) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^t)] & \\ + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) & \end{aligned}$$

여기서, n 은 유체 상의 개수, \vec{F} 는 body force, μ_m 은 viscosity of mixture 이다. μ_m 는 상의 개수와 각 상의 점성계수와 체적분율의 합으로 다음 식과 같다.

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n (\alpha_k \mu_k) \quad (7)$$

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (8)$$

$\vec{v}_{dr,k}$ 는 다상 유동의 유동장에서 상의 접합부 속도로 각 상의 속도 차이를 의미하며, \vec{v}_k 는 추가되는 상의 속도이다.

3.2 유동 해석 경계 조건

이젝터는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 크게 구동 노즐의 유입구, 흡입구, 메인 배관 유입/출구, 이젝터로 구성된다. 메인 배관 입구(Inlet 01)와 메인 배관 출구(Outlet)는 배압 상태 유지를 위해 일정 압력 조건을 사용하고, 구동 노즐 유입구(Inlet 02)는 일정 유량 조건으로 실험에서 사용된 유량 값과 동일한 값을 적용한다. 흡입구는 실험과 동일하게 대기 압력 상태가 되도록 압력 조건을 한다. Table 2와 같다.

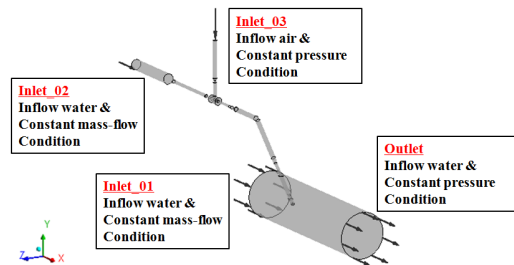


Fig. 3. Boundary conditions of gas-liquid ejector

Table 2. Detail of Boundary Condition

Remark	Description
Inlet 1	Inlet only water & uniform pressure condition
Inlet 2	Inlet only water & uniform massflow condition
Inlet 3	Inlet only air and pressure condition
Outlet	Outlet and uniform pressure condition

3.2 격자 의존도

3차원 유동 해석은 상당한 양의 컴퓨터 자원 및 계산 시간이 필요하며, 현실적인 문제들로 인해 불필요한 소요를 줄이고 해석의 정확도를 높이기 위한 적절한 격자 수의 선정이 필수적이다. 따라서 적절한 격자 구성을 찾기 위하여 격자 의존도해석을 수행한다. 격자 의존도에 대한 비교는 이젝터의 유동 모델을 구성하는 격자의 크기에 따라 Table 3과 Fig. 4와 같이 총 4가지 유한요소 모델들을 비교한다.

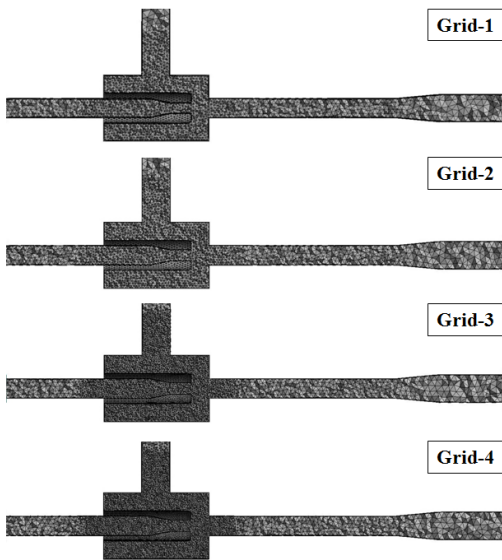


Fig. 4. Each grids around ejector

Table 3. Size of grids for different discretizations of flow volume

	Min. size of grid	Max. size of grid	Nodes	Elements
Mesh 1	1.50 mm	100 mm	100,268	358,939
Mesh 2	1.00 mm	30 mm	144,622	471,500
Mesh 3	0.50 mm	40 mm	248,994	855,988
Mesh 4	0.45 mm	36 mm	333,126	1,136,054

3.4 유동 해석 결과

Fig. 5는 유동 해석을 통해 배압에 따라 각 격자 크기 별로 흡입부의 흡입 유량을 나타낸 것으로 격자 크기가 가장 큰 Grid-1의 경우 배압 3.5bar 이상에서는 실험 결과와는 달리 흡입부로부터 흡입 유량이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 격자 크기가 작아질수록 실험 결과 값과 유사한 경향을 보이며, 실험값과의 오차는 Grid-3은 5.2%, Grid-4는 5.0%으로 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다.

해석 소요 시간에 대해서는 Grid-3에 비해 Grid-4의 경우 약 1.7배가 소요됨으로 본 연구에서는 해석 소요 시간을 줄이기 위해 Grid-3으로 구성된 CFD 모델을 사용하도록 한다.

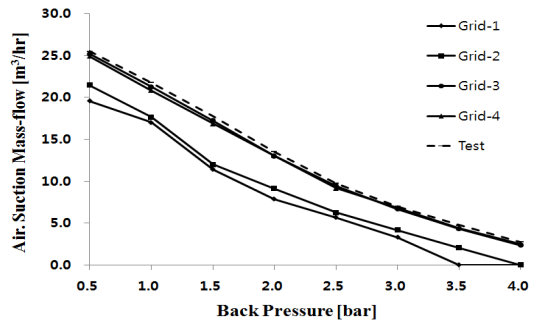


Fig. 5. Each grids around ejector

4. 회전 운동하는 이젝터의 최적화

4.1 회전 운동하는 이젝터

구동 유체가 회전 운동하는 이젝터는 Fig. 6과 같이 구동 노즐의 유입부에 회전 운동 유도 장치가 구성된다. 내부 형상이 나선형으로 이루어져 유입되는 구동 유체가 통과하면서 회전 운동을 유도시킨다.

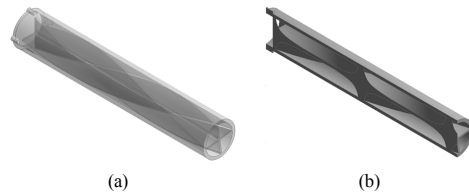


Fig. 6. Swirling induction device
(a) General view (b) Section view

4.2 최적화 이론

형상설계변수나 비선형해석을 포함하고 있는 최적설계 문제의 경우 최적화 알고리즘을 직접 연계하여 최적해를 산출하는 것은 어렵다. 따라서 최적설계정식화에 포함되는 반응치를 근사적인 메타모델로 변경한 후 최적화하는 크리깅 기법을 사용한다. 크리깅 기법은 실험점을 정확히 통과 할 수 있는 대표적인 근사모델이며, 다상 유동 해석과 같이 비선형성이 큰 함수의 예측에 적합하다. 예측하고자 하는 함수를 $f(x)$ 라고 하면 설계변수벡터 x 에 대하여 다음 식으로 표현이 가능하다[7].

$$f(x) = b + z(x) \quad (9)$$

여기서, b 는 상수, $z(x)$ 는 평균이 0이고 분산이 s_2 인 정규분포를 따른다고 가정하며, $\hat{f}(x)$ 와 $f(x)$ 의 평균 제곱오차를 최소화하면서 불편추정량 조건을 만족시키기 위해 $\hat{f}(x)$ 는 다음 식과 같다.

$$\hat{f}(x) = \hat{\beta} + \gamma^T(x)R^{-1}(y - \hat{\beta}i) \quad (10)$$

여기서, R 은 상관행렬, r 은 상관벡터, y 는 데이터벡터이며, 상관행렬 및 상관벡터에 대한 정의는 다음과 같다.

$$R(X^j, X^k) = \text{Exp} \left[- \sum_{i=1}^n \theta_i |x_i^j - x_i^k|^2 \right] \quad (11)$$

$$r(x) = [R(x, x^{(1)}), R(x, x^{(2)}), \dots, R(x, x^{(ns)})]^T \quad (12)$$

4.3 메타모델을 이용한 유동 해석

최적화를 위한 회전 운동 유도 장치의 형상 변수로서 Fig. 7과 같이 전체 길이 l , 내부 직경 d , 날개 개수 n 를 선정한다. 각 변수들에 대한 범위는 실제 제작 가능성을 고려하여, $35\text{mm} \leq l \leq 135\text{mm}$, $19\text{mm} \leq d \leq 25\text{mm}$, $3 \leq n \leq 5$ 로 설정한다.

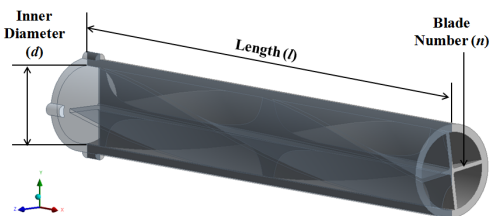


Fig. 7. Optimal parameters for ejector

메타모델을 기반으로 한 최적화 기법에 대해 표본점을 생성하는 방법으로 라틴 하이퍼 큐브 방법[7]을 사용하여 총 35개의 표본점을 추출하고 이를 이용하여 최적해를 구한다.

4.4 최적화 모델 도출

오존 방식 선박평형수 처리장치용 이젝터의 운전 조건인 배압 3.0bar 조건 하에서 총 35개의 표본점에 대하여 유동 해석을 수행한다. 유동 해석 결과는 구동 유체가 이젝터로 유입되는 유량 Q_3' 와 흡입 유체가 흡입되는 유량 Q_4' 에 대하여 Table 4와 같이 나타내었다.

Table 4. Generated Latin Hypercube Sample Points and Analysis result

Ca ses	Shape			Results	
	n [ea]	l [mm]	d [mm]	Q_3' [m ³ /hr]	Q_4' [m ³ /hr]
1	5	39.29	22.86	15.191	5.382
2	4	133.57	21.49	15.109	5.183
3	4	65.00	21.14	15.157	6.062
4	5	70.71	19.26	14.878	4.225
5	4	59.29	23.89	15.208	4.603
6	4	87.86	20.97	15.527	5.050
7	4	53.57	22.17	15.213	4.866
8	5	130.71	23.54	15.111	4.676
9	5	96.43	19.77	14.926	4.179
10	3	85.00	20.29	15.180	4.830
11	3	47.86	21.66	15.261	5.291
12	4	76.43	21.31	15.112	4.582
13	3	36.43	24.74	15.227	5.388
14	4	73.57	24.23	15.180	5.694
15	4	113.57	23.03	15.160	4.856
16	3	127.86	19.09	14.959	5.309
17	3	62.14	19.43	15.060	5.892
18	5	56.43	19.60	14.899	4.695
19	5	110.71	24.06	15.017	4.404
20	4	119.29	24.57	15.156	5.360
21	5	90.71	22.34	15.135	4.799
22	3	67.86	20.63	15.143	5.391
23	5	122.14	22.69	15.102	4.586
24	4	99.29	19.94	15.036	4.222
25	4	79.29	20.11	15.065	4.522
26	4	116.43	22.00	15.149	4.455
27	4	45.00	20.80	15.125	5.724
28	4	42.14	22.51	15.232	4.507
29	3	93.57	23.71	15.225	5.792
30	4	105.00	21.83	15.175	4.291
31	5	82.14	23.37	15.134	5.302
32	3	125.00	20.46	15.103	3.906
33	4	102.14	23.20	15.181	4.907
34	3	107.86	24.91	15.215	4.648
35	4	50.71	24.40	15.193	5.307

표본점들에 대한 유동 해석 결과 값을 바탕으로 크리깅 모델을 구성하는 파라미터 β 와 $\theta_i(i=1, 2, 3)$ 을 FORTRAN을 사용하여 계산하며, 임의의 초기 θ 값을 설정하여 프로그램 코딩에 따라 최적화된 β 와 θ_i 를 산출한다. Table 5는 산출된 β 와 θ_i 를 나타낸 것으로 이를 이용한 크리깅 모델은 다음 식으로 최적화 문제를 해결한다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } Q_4' & (13) \\ & \text{Subject to } 35\text{mm} \leq l \leq 135\text{mm} \\ & \quad 19\text{mm} \leq d \leq 25\text{mm} \\ & \quad n = 1, 2, 3 \end{aligned}$$

Table 5. Optimum Parameters of Kriging Method

	θ_1	θ_2	θ_3	β
Q_3' [m ³ /hr]	9.748	0.524	8.896	4.950
Q_4' [m ³ /hr]	12.225	20.670	0.000	4.201

그 결과 최적의 설계 변수 l 은 62.39mm, d 는 19.48mm, n 은 3으로 선정되었으며, 예측된 최적해에 대한 구동 유체의 유입 유량 Q_3' 은 15.093m³/hr와 흡입 유체의 흡입 유량 Q_4' 는 7.896m³/hr 로 도출되었다.

크리깅 모델로 도출된 최적의 설계 변수를 적용하여 유동 해석을 수행한 결과, 흡입 유체의 흡입 유량 Q_4 이 7.890m³/hr으로 산출되었다. 공기 흡입 유량에 대하여 크리깅 모델로 예측된 결과 값(Q_4')과 유동 해석 결과 값(Q_4)를 비교하면 약 0.64%의 오차를 보여 크리깅 모델이 최적화에 대한 신뢰성이 높다고 평가되었다.

4.5 이젝터 효율

이젝터의 성능을 유량비(M)와 압력비(N)의 곱으로 이젝터 효율을 나타낼 수 있다[8].

$$M = \frac{Q_s}{Q_d} \quad (14)$$

$$N = \frac{P_{dis} - P_s}{P_d - P_{dis}} \quad (15)$$

$$\eta = M \cdot N \quad (16)$$

이젝터 효율은 식 (15)를 통해 산출한 결과, 구동 유체의 회전 운동이 없는 기존 이젝터의 경우 20.56%의 효율을 보였으며, 회전 운동 유도 장치의 내부 구조가 최적화된 이젝터의 경우 23.82%로 기존 대비 약 3%의 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 논문은 오존 방식 선박평형수 처리 장치용 이젝터에 구동 유체의 회전 운동이 이젝터의 효율에 미치는 영향에 관한 연구이다. 유동 모델은 이젝터 실험 데이터를 바탕으로 구성하였으며, 회전 유도 장치의 형상 최적화 과정을 통해 최적의 효율을 가지는 이젝터를 도출하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 이젝터 실험 장치를 이용하여 배압에 따른 흡입 유체의 유량과 압력 데이터를 바탕으로 격자 의존도 비교를 통해 실험값과 5.2%의 오차를 가지는 유동 모델을 개발하였다.

둘째, 회전 유도 장치에 대한 형상 최적화는 크리깅 기법을 이용하여 선정된 형상 변수인 전체 길이(l), 내부 직경(d), 날개 개수(n)를 메타모델을 기반으로 총 35개의 표본점을 추출하였다. 표본점을 이용하여 최적의 설계 변수 l 은 62.39mm, d 는 19.48mm, n 은 3으로 산출되었다.

셋째, 크리깅 기법을 통해 흡입 유체의 유량(Q_4')이 7.896m³/hr으로 예측되었으며, 유동 해석을 통해 산출된 흡입 유체의 유량(Q_4)인 7.890m³/hr과 0.64%의 오차를 보여 크리깅 모델의 신뢰성이 높은 것으로 평가되었다.

넷째, 최적화된 회전 유도 장치를 적용한 이젝터는 유동 해석 결과를 바탕으로 계산된 효율은 23.82%로 산출되었다. 이는 구동 유체의 회전 운동이 없는 이젝터에 비해 약 3%의 효율이 개선이 이루어졌다.

References

- [1] Witte, J.H., "Efficiency and design of liquid-gas ejector", *British-chemical Engineering*, Vol. 10, No. 9 pp. 602-607, 1965.
- [2] G. H. Park, S. J. Kwon, "INTERNAL FLOW PROPERTIES AND THRUST CHARACTERISTICS OF AXI-SYMMETRIC ANNULAR BELL TYPE

EJECTOR-JET”, *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 46-50, 2007.

- [3] H. M. Jeong, T. Utomo, Z. H. Jin, H. S. Chung, “A CFD Analysis on the Gas-Liquid Ejector”, *Journal of The Korea Society for Power System Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 28-34, 2008.
- [4] S. B. Mun, H. K. Choi, J. H. Choi, H. J. Kwon, K. K. Kim, S. H. Choi, "Experimental Study for the Development of New Type Water Ejector", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 30, No. 6, pp. 677-684, 2006.
- [6] S. Y. Jeong, K. B. Lee, S. H. Rhi, "Secondary Flow Characteristics of Liquid Ejector According to the Nozzle Diameter Change", *Journal of Industrial Science and Technology Institute*, Vol. 29, No. 2, pp. 7-11, 2015.
- [7] Y. J. Kim, S. H. Park, K. H. Lee, Y. C. Park, "Lightweight Design of an Outer Tie Rod Using Meta-Model Based Optimization Technique", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, No. 11, pp. 7754-7760, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7754>
- [8] Y. H. Lee, M. O. Kim, C. G. Kim, Y. T. Kim, "The evaluation of performance and flow characteristics due to the length of throat and diffuser for ship's ejector", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 38, No. 1, pp. 31-38, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.1.31>

강 상 훈(Sang-Hoon Kang)

[정회원]



- 2013년 2월 : 동아대학교 일반대학원 기계공학과 (석사)
- 2012년 10월 ~ 현재 : (주)엔케이 선임연구원

<관심분야>
구조설계, 조선해양

박 영 철(Young-Chul Park)

[정회원]



- 1982년 2월 : 부산대학교 금속공학과 대학원 (석사)
- 2002년 2월 : 일본 동북대학교 기계공학과 대학원 (박사)
- 2009년 3월 ~ 2013년 7월 : 동아대학교 산학협력단 단장
- 1998년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
금속재료, 구조설계