3/2 WAY 공압밸브의 유동-구조적 특성을 고려한 최적설계

양 설 민[1], 백 석 흠[3], 김 태 우[2], 정 일 선[1], 강 상 모[4*]

DESIGN OPTIMIZATION OF AN INDUSTRIAL 3/2 WAY PNEUMATIC VALVE CONSIDERING FLOW-STRUCTURE CHARACTERISTICS

S.M. Yang, S.H. Baek, T.W. Kim, I.S. JUNG, and S. Kang

A Study on the flow-structure characteristics of a 3/2 way pneumatic valve is essential for optimizing the performance of ship engines. It is important for the valve to have desirable safety factor and reduced weight from the safety and economic point of view. In this study, we capture flow-structure characteristics of 3/2 way pneumatic valve. This is optimized based on the proper design criteria. The air at a pressure of 30 bar is the working fluid, which is made to fill in the tack in short time. This time is defined as the filling time. The flow and structure analysis is performed for three cases under maximum stress and safety factor. In optimum design, considering the flow-structure characteristics, we model twenty seven cases by using DOE(design of experiments) method. Here, analysis for each cases is performed and then metamodels are created. We obtain optimized parameters and then analysis is repeated to compare with the initial model. Finally, the feasibility of the optimum design is verified.

Keywords: 공압밸브(pneumatic valve), 실험계획법(design of experiments), 안전율(safety factor), 최적설계(design optimization), 근사모델(metamedels)

1. 서 론

선박에서 중요한 부품으로 사용되는 엔진시동용 공압밸브(pneumatic valve)는 엔진의 성능과 유지보수의 관점에서 높은 품질을 요구한다[1]. 3/2 WAY 공압밸브는 2개의 밸브가 일렬로 조합되어 설치되며, 엔진이 시동될 때 공압 파일럿 압력(30 bar)을 생성하는 시동 밸브(starting valve)와 운전 중 이상이 생겼을 때 엔진의 비상정지를 위하여 연료를 차단하는 압력을 생성하는 밸브로 구성된다.

본 연구에서는 최적설계를 위해서 형상에 대한 매개변수를 선정하고, 치수 변화를 통해 중량을 조절하였다. 그 중에서 대표적인 3가지 Case에 대해서는 작동압력 30bar의 공압이 탱크에 생성되는 시간을 충전시간으로 정의하고 유동해석을 통해 확인하였다. 구조해석에서는 30bar의 정압 하에서 최대응력 발생지점 및 안전율을 고려하였다. 마지막으로 최적설계에서는 구조해석의 최대응력과 유동해석에서의 충전시간을 각각 목적함수로 설정하였다. 초기모델의 형상에서 앞서의 매개변수를 통해 중량을 줄일 수 있는 부분을 변수로 선정하여 도출된 27가지 모델에 대해서 유동해석 및 구조해석을 재수행하고 최종적으로 가장 적합한 변수를 가진 모델을 결정지을 수 있었다.

1 동아대학교 기계공학과 석사과정
2 대한항공 정비본부 인턴 정비사과정
3 동아대학교 기계공학과 BK21 박사후과정
4 동아대학교 기계공학과 교수
* Corresponding author E-mail: kangsm@dau.ac.kr

2. 본 론

2.1 근사모델기반 최적설계 방법

공학설계에서 일반적으로 최적설계 문제는 목적함수 f(x,z)와 제한조건 gj(x,z)로 구성되며, 분산분석을 이용한 Chebyshev 직교다항식 $P_n(x)$을 이용한다.

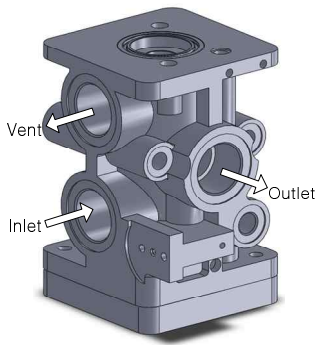

Fig. 1 3/2 WAY pneumatic valve

2.2 공압밸브의 유동해석 및 구조최적설계 방법

Fig. 1는 3/2 WAY 공압밸브를 나타내며, 고압의 공기가 실린더를 향해 이송되는 효율성 및 밸브 내부의 압력분포를 평가하고자 한다[2]. 공기압축탱크로부터 밸브 입구까지의 연결부는 25mm의 직관으로, 출구와 연결된 직경 32mm, 길이 50mm의 직관과 50×50×50 mm^3의 체적을 가진 탱크로 유동장을 가정하였다.

유동에 대한 수치계산에서는 기하학적으로 복잡한 형상 주위의 유동을 효율적으로 해석할 수 있는 압축성 Navier-Stokes 방정식[3]을 적용하였으며, 안정적이면서도 수치적으로 견고하다고 증명되어 일반적인 시뮬레이션에서 정확성과 견고함을 절충하여 제공하는 표준 k-ε 모델을 사용하였다[4].

본 연구에서는 지배방정식을 이용한 수치 해석을 위하여 상용 수치해석 프로그램인 ANSYS CFX Ver.12을 사용하였다. 비정상상태 해석으로 작동유체는 이상기체이며 유동장 입구의 압력을 30 bar로 고정한 상태에서 개방조건을 적용하였다. 초기 경계조건은 대기압으로 설정하고 작동유체는 25℃의 이상기체를 사용하여 압축성 유동을 고려하였다.

유한요소해석은 ANSYS Workbnch Ver.12을 이용하여 수행하였다. 바디 내부에 작용하는 압력은 30bar를 적용하였고, 고무 오링(o-ring)이 들어가는 부위에는 마찰 조건을 통해 마찰계수를 0.3으로 고려하였다.

2.3 유동 및 구조최적설계 해석 결과

유동해석의 결과는 Fig. 2와 Table 1과 같고, 구조최적설계의 결과는 Fig. 3과 같다.

2.4 유동-구조 특성을 고려한 최적설계

직교배열표[5]를 이용하여 27가지 모델을 만들어 해석결과를 얻었다. 설계변수 x_3,x_4,x_5가 바디의 중량에 미치는 영향은 62.31% 이고, 설계변수 x_2,x_4,x_8가 응력에 미치는 영향은 75.29%이고, 설계변수 x_1,x_7,x_9가 충전시간에 미치는 영향은 85.14%였다. 이를 바탕으로 근사모델을 만들고 해석을 수행한 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 5와 Fig. 4에 초기모델과 최적화 모델, 그리고 최적화 변수에 따라 재해석하여 나타난 결과를 비교하였다.

Table 1 Filling time for three cases at 30 bar

Model	Volume (mm3)	Filling time at 30 bar (s)
Case 1	950100	0.00307
Case 2	1035600	0.00394
Case 3	1079700	0.00562

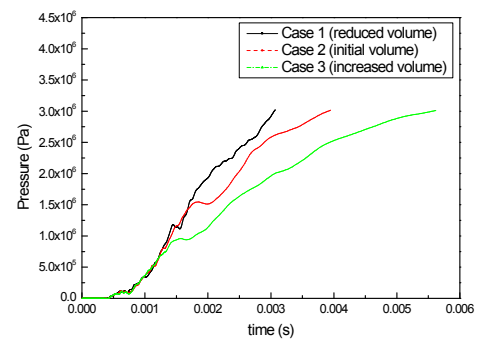

Fig. 2 Filling time for high pressure air into the tank

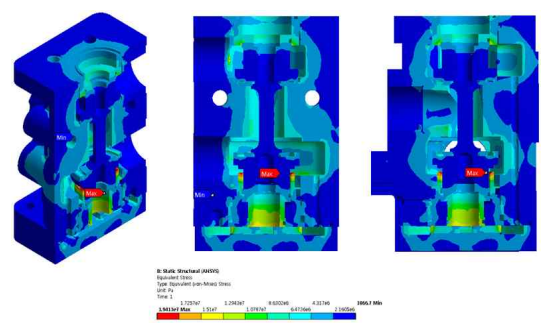

Fig. 3 Stress distribution in the pneumatic valve

Table 2 Optimum design variables

Design variable	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	x_4 (mm)	x_5 (mm)	x_6 (mm)	x_7 (mm)	x_8 (mm)	x_9 (mm)
Initial	23.5	22.5	15	12	11	7.9	9.5	9.5	25
Optimum	24.7	24.5	9	8.6	6	4.5	8.1	8.6	30

Table 3 Reanalysis solution

Step	Volume (10^5 mm^3)	Stress (MPa)	Filling time (10^{-3} s)
Initial	10.366	19.114	3.940
Optimum	9.525	19.827	3.182
Reanalysis	9.615	19.637	3.265

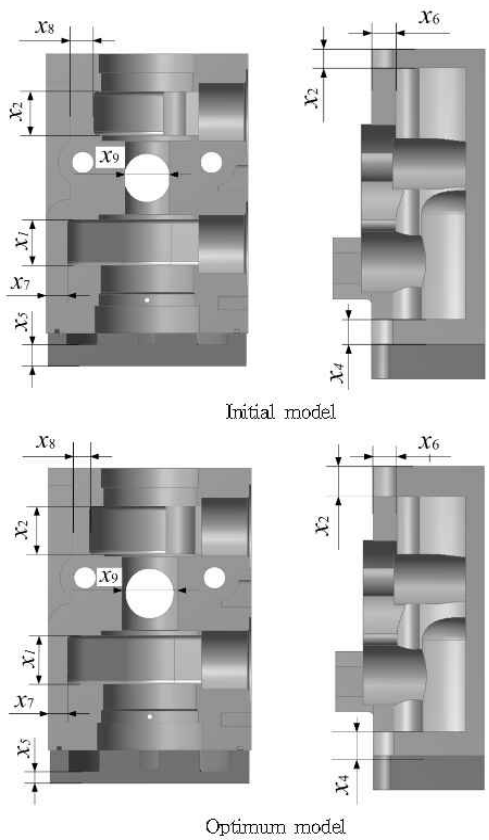

Fig. 4 Comparison between initial and optimum models

3. 결 론

본 연구에서는 유동-구조 특성을 고려하여 선박용 엔진의 3/2 WAY 공압밸브에 대한 근사모델기반 최적설계를 수행하였다. FEA 및 CFD 해석을 통해 유동 및 구조특성을 파악하였으며 그에 따른 설계기준을 제시하고 최적설계를 통해 최적모델을 도출함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다양한 엔진 용량의 공압밸브에 대해서도 최적화 방법을 응용해서 정확하면서도 효율적인 밸브응답속도를 개선하는데 적용가능하다고 판단된다.

2. 3/2 WAY 공압밸브의 중량은 감소하면서 형상최적설계를 통해 중량 및 최대응력, 그리고 filling time에 대한 각각의 신뢰도 있는 근사모델을 산출할 수 있었다.

3. 제시된 설계과정을 적용하여 설계기준 중 최대응력은 비슷한 수준을 유지하는 반면 고압용 공압밸브의 중량 및 충전시간을 초기설계에 대비하여 각각 7.2%, 17.2% 가량 경량화 시킬 수 있었다.

4. 직교배열표를 이용한 전산실험해석의 결과 실험계획법에서 얻은 27가지 경우의 설계모델에 대한 구조해석을 수행하고 이를 통해 2가지 경우를 제외한 나머지 모델들에 대해서는 바디의 아래쪽에 설치되는 하부 바디 영역에서 가장 큰 응력을 받는 것을 확인하였고 응력집중이 완화되도록 설계하는 것이 필요하다고 판단된다.

후 기

본 논문은 지식경제부 지역혁신 센터사업(RIC)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

[1] 2004, Kenji Kawashima, Yukio Ishii, Tatsuya Funaki, Toshiharu Kagawa, "Determination ofFlow Rate Characteristics of Pneumatic Solenoid Valves Using an Isothermal Chamber", J. Fluids Eng., Vol. 126, pp.273~279.

[2] 2002, Kuroshita kiyoshi, Suzuki akitoshi, "Study on Measurement Method of Flow-rate Characeristics of Pneumatic Solenoid Valve", Transacions of the Japan Fluid Power System Society, Vol. 33, pp.42~47

[3] 정희택, 김주섭, 신필용, 최범석, “2차원 압추정 Navier-Stokes 방정식에 의한 터빈 익렬 유동장의 수치 시뮬레이션”, 한국동력기계공학회, Vol. 3, pp.6~21

[4] 2005, 서용권, 강상모, 서이수, “전산유체역학”, 동아대학교 출판부

[5] 2008., 백석흠, 홍순혁, 주원식, 김창기, 정유엽, 신상운, “다구찌 방법을 이용한 밀스케일 재활용에 대한 공정변수의 최적화”, 한국정밀공학회지, Vol. 25, pp.88～95