

선박용 체크밸브의 최적설계에 관한 연구

A Study on the Optimization Design of Check Valve for Marine Use

이춘태*†
Choon-Tae Lee*†

(Received 18 September 2017, Revision received 07 November 2017, Accepted 15 November 2017)

Abstract: The check valves are mechanical valves that permit fluids to flow in only one direction, preventing flow from reversing. It is classified as one way directional valves. There are various types of check valves that used in a marine application. A lift type check valve uses the disc to open and close the passage of fluid. The disc lift up from seat as pressure below the disc increases, while drop in pressure on the inlet side or a build up of pressure on the outlet side causes the valve to close. An important concept in check valves is the cracking pressure which is the minimum upstream pressure at which the valve will operate. On the other hand, optimization is a process of finding the best set of parameters to reach a goal while not violating certain constraints. The AMESim software provides NLPQL(Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian) and genetic algorithm(GA) for optimization. NLPQL is the implementation of a SQP(sequential quadratic programming) algorithm. SQP is a standard method, based on the use of a gradient of objective functions and constraints to solve a non-linear optimization problem. A characteristic of the NLPQL is that it stops as soon as it finds a local minimum. Thus, the simulation results may be highly dependent on the starting point which user give to the algorithm. In this paper, we carried out optimization design of the check valve with NLPQL algorithm.

Key Words : Lift type check valve, Nonlinear optimization, NLPQL, P-Q characteristic

1. 서 론

일반적으로 선박에서는 계선, 하역, 조타설비 등 각종 장치에 다양한 종류의 유압밸브가 사용되고 있고, 선박 한 척당 수백 개의 밸브가 사용되고 있다. 선박에서 사용되고 있는 밸브는 게이트밸브(gate valve), 버터플라이밸브(butterfly valve), 글로브밸브(globe valve), 볼밸브(ball valve), 앵글

밸브(angle valve), 안전밸브(safety valve), 감압 밸브(pressure reducing valve), 체크밸브(check valve) 등 다양한 밸브가 사용되고 있다. 선박용 체크밸브의 종류에는 스윙타입(swing type), 듀얼 플레이트 타입(dual plate type), 리프트타입(lift type) 등이 사용되고 있다. Fig. 1에 대표적인 리프트타입 체크밸브의 형상과 구조를 나타내었다. 리프트타입 체크밸브의 경우 밸브마다 약간의 차이는 있지만,

*† 이춘태(교신저자) : 신라대학교 지능형자동차공학부
E-mail : charity@silla.ac.kr Tel : 051-999-5468

*† Choon-Tae Lee(corresponding author) : Department of Intelligent Vehicle Engineering, Silla University.
E-mail : charity@silla.ac.kr Tel : 051-999-5468

c대부분 밸브의 유로를 개폐하는 디스크, 스프링 그리고 디스크를 받치고 있는 시트 등으로 구성되어 있다. 시트는 스프링에 의해 적당한 초기 압축력으로 눌러져 있고 입구압력에 의한 힘이 스프링 초기 압축력보다 크면 밸브가 열리기 시작한다. 밸브가 열리기 시작하는 압력을 크래킹(cracking) 압력이라고 한다.

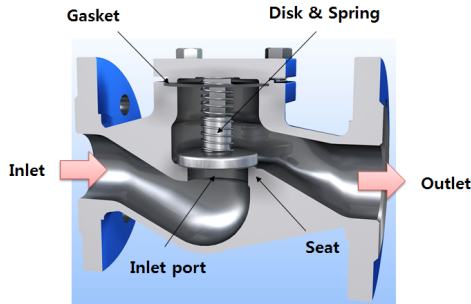


Fig. 1 Schematic of lift type check valve

밸브 최적화에 대한 기존의 연구는 김남희¹⁾ 등에 의해 플랜트 장치산업에 사용되는 볼밸브 시트부의 구조적 안정성을 확보하기 위하여 크리깅(kriging) 내삽법을 이용한 메타모델 최적화 방법이 연구되었고, 박창현²⁾ 등에 의해 자동차용 벤트 밸브의 연료누출 방지 성능을 높이기 위해 근사 모델인 크리깅 모델과 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 최적화 연구가 진행되었다. 그리고 송재수³⁾ 등은 자동변속기 내 체크밸브를 모델링하고 SQP(sequential quadratic programming) 방법을 이용하여 성능 최적화에 대한 연구를 진행하였고, 김상희⁴⁾는 위성용 안테나의 크기와 무게를 줄여 위성발사 비용을 감소시키기 위해 안테나의 기계적, 전기적 특성을 동시에 고려할 수 있는 최적설계를 SQP 기법을 이용하여 수행하였다. 해외의 경우는 J. Prins⁶⁾ 등에 의해 압축기의 시뮬레이션 모델과 유전알고리즘을 결합하여 대형 왕복형 압축기의 흡입밸브 최적화에 대한 연구를 수행하였다. 또한 X. G. Song⁷⁾ 등은 버터플라이밸브의 디스크의 무게를 최소화하기 위하여 크리깅 내삽법을 FEM 및 CFD 해석 소프트웨어와 결합하여 최적화를 수행하였다. 또한 허정규⁸⁾

등은 스톨 및 포핏 형태의 밸브에서, 운동부의 구조에 따른 압력과 유량 특성에 관한 연구를 진행하였다. 이상과 같이 다양한 밸브 최적화 연구에도 불구하고 선박용 밸브의 최적화 연구는 아직 미비한 실정이고, 유럽, 일본 등 해외 주요업체에 의해 독점되어 있어, 국내에서도 선박용 밸브의 최적설계에 대한 다양한 연구가 시급한 시점이다. 본 연구에서는 선박용 체크밸브를 대상으로 최적화 기법을 적용하여 설계자가 원하는 밸브 사양에 가장 최적화된 형상을 설계하는 방법에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 체크밸브의 시뮬레이션 및 최적설계를 위하여 최근 유압시스템 설계 및 해석에 널리 사용되고 있는 LMS AMESim 소프트웨어를 사용하였고, 최적화 기법은 NLPQL을 사용하였다.

2. 체크밸브 최적화 설계

2.1 최적화 전 체크밸브의 성능 검증

Fig. 2에 최적화 설계 전의 체크밸브 성능을 확인하기 위한 시뮬레이션 모델을 나타내었다.

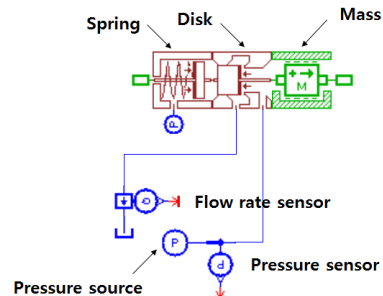


Fig. 2 Simulation model of lift type check valve

Table 1 initial design parameters

Parameters	Values
Diameter of inlet port (D_{inlet})	20 mm
Diameter of disk (D_{disk})	25 mm
Initial spring force (F_0)	50 N
Spring constant (k)	15 N/mm
Mass of disk (m)	0.05 kg
Displacement limit of disk	20 mm

시물레이션은 압력 소스(pressure source)로 부터 디스크 타입 체크밸브의 입구에 압력이 가해지고, 이 압력에 의해 디스크의 열림이 발생하고, 이로 인해 체크밸브를 통해 흐르는 유량을 시물레이션 하였다. 또한 Table 1에 최적화 설계 전의 체크밸브의 주요 사양을 나타내었다.

그리고 Fig. 3에 최적화 설계 전 체크밸브의 시물레이션 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 스프링의 힘을 이기고 밸브가 열리기 시작하는 크래킹압력은 1.3 bar, 체크밸브가 완전히 열려서 이후로는 고정 오리피스와 같이 작동하는 최대개도점(fully open point)은 3.3 bar에서 365 lpm로 나타났다.

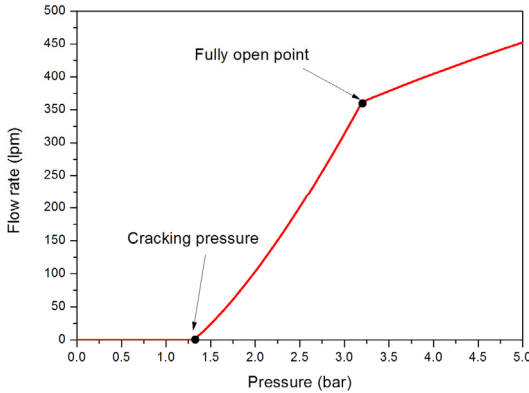


Fig. 3 Simulation result of P-Q characteristic with initial design parameters

2.2 최적설계 기법

최적화는 주어진 제한조건 내에서 목적함수를 최소화 또는 최대화하는 최적의 파라미터를 구하는 과정이다. 본 논문에서 사용한 NLPQL (NonLinear Programming Quadratic Line search)은 SQP(Sequential Quadratic Programming) 알고리즘을 Fortran 프로그램으로 구현한 비선형 최적설계 알고리즘이다. SQP는 목적함수를 2차식으로 모델링하여 해의 정확성 및 수렴속도를 향상시킨 비선형 최적설계 기법^{4,5)}으로 ANSYS, iSIGHT 등의 상용소프트웨어에서도 비선형 최적설계 알고리즘으로 널리 이용되고 있다. 비선형 최적설계 문제는 일반적으로

다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(x) \\ & \text{Subject to } h_i(x) = 0 \quad (i=1, \dots, N) \\ & \quad \quad \quad g_j(x) \leq 0 \quad (j=1, \dots, M) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, N 과 M 은 등식 제한조건(equality constraint)과 부등식 제한조건(inequality constraint)의 개수를 나타낸다. 최적 알고리즘을 적용하기 위해서는 각각의 식을 테일러 전개를 이용하여 식을 근사화 한 후 변수를 $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ 로 바꾸어 2차식으로 변경한다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } F(\Delta x) = f(x_i) + \nabla f(x_i)^T \Delta x + \\ & \quad \quad \quad \frac{1}{2} \Delta x^T \nabla^2 f(x_i) \Delta x \\ & \text{Subject to } H(\Delta x) = h(x_i) + \nabla h(x_i)^T \Delta x \\ & \quad \quad \quad G(\Delta x) \leq g(x_i) + \nabla g(x_i)^T \Delta x \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 선형화로 인한 오차를 보완하기 위해 라그랑지 승수(Lagrange multiplier)를 이용한다. 라그랑지 승수는 제한조건이 있는 최적화 문제에 사용되는 보조변수로서 라그랑지 승수를 적용한 최적화는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \phi(x, \lambda_1, \dots, \lambda_N, \beta_1, \dots, \beta_M) = \\ & \quad \quad \quad f(x) + \sum_{i=1}^N \lambda_i h_i(x) + \sum_{j=1}^M \beta_j g_j(x) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, λ 와 β 는 보조변수로서 라그랑지 승수라 하고, 적용된 식은 다음과 같은 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} + \lambda_1 \frac{\partial \phi}{\partial x} + \dots + \lambda_N \frac{\partial \phi}{\partial x} + \beta_1 \frac{\partial \phi}{\partial x} + \dots + \beta_M \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

SQP 알고리즘에서 라그랑지 승수를 이용하기 위해서 스텝의 크기(step size) α 를 계산해 제한조건을 만족시키도록 한다. 최적화 문제는 탐색 방향 S 에 대한 식으로 변형된다.

$$\Delta x = \alpha S$$

$$\text{Minimize } F(S) = f(x_i) + \nabla f(x_i)^T S + \frac{1}{2} S^T [H] S$$

$$\text{Subject to } H(S) = h(x_i) + \nabla h(x_i)^T S \quad (5)$$

$$G(S) \leq g(x_i) + \nabla g(x_i)^T S$$

$$S^T S \leq 1$$

위의 식에서 [H]는 헤시안(hessian) 행렬이다.

2.3 최적설계 모델 구성

Fig. 4에 체크밸브 최적설계를 위한 시뮬레이션 모델을 나타내었다. 그림에서와 같이, 입구압력(a)의 변화에 따른 최적화 전의 유량(d)과 설계하고자 하는 이상적인 유량(c)의 오차를 구하고, 그 오차를 제곱(e)하고, 적분(f)한 목적함수(g)가 최소가 되도록 최적설계를 수행하였다. 여기에서 설계자가 설계하고자 하는 밸브의 이상적인 압력-유량 특성곡선(P-Q curve)은 데이터 파일(b)로 저장되어 있으며, 입구압력(a)에 대하여 이상적인 유량(c)을 보간법으로 계산하여 출력으로 내보낸다.

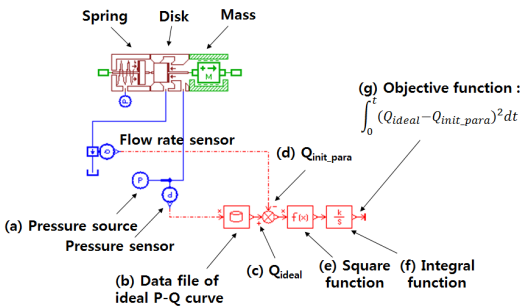


Fig. 4 Simulation model of lift type check valve optimization design

Fig. 5에 Fig. 3의 시뮬레이션 결과(initial design)와 최적으로 설계하고자 하는 P-Q 특성(ideal)을 비교하여 나타내었다. 그림에서와 같이 본 연구에서는 최적화 전 모델보다 낮은 압력에서 작동하고, 최대개도점에서의 유량은 줄인 컴팩트한 크기의 밸브를 설계하기 위하여 크래킹압력을 1.3 bar에서 1 bar로, 최대개도점을 3.3 bar, 365 lpm에서 2.5 bar, 260 lpm으로 변경하여 설계하였다. 따라

서 본 연구에서는 이상과 같은 최적설계를 위하여 체크밸브의 입구포트의 직경, 디스크의 직경, 스프링 초기 압축력 및 스프링 상수를 설계변수로 설정하고 각각 x_1, x_2, x_3, x_4 로 표시하였다. 또한, 설계자가 원하는 이상적인 유량 특성과 차이가 최소가 되도록 유량 차이를 제공하고, 적분한 값을 목적함수로 설정하고, 최적설계를 위한 수식을 다음과 같이 표현하였다. 여기서, 각 설계변수의 탐색범위는 설계 사양 및 밸브 구조에 의해 변경 가능한 범위를 선정하였으며, $x_2 - x_1$ 은 디스크의 직경과 입구포트의 직경 차로써 적정한 시트부를 형성해 주기 위하여 선정하였다.

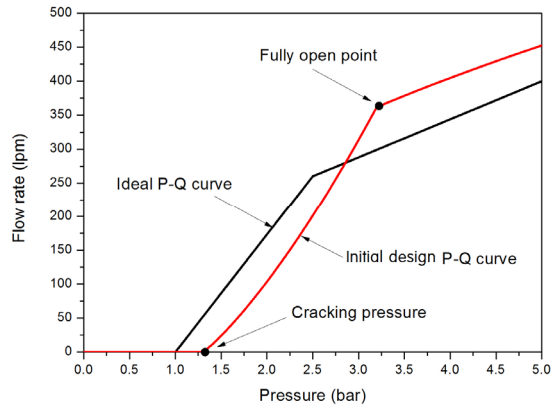


Fig. 5 Comparison between initial design and ideal P-Q curve

Find x_1, x_2, x_3, x_4

to Minimize $\int \{Q_{ideal} - Q_{real}(x_1, x_2, x_3, x_4)\}^2 dt$

$$\text{Subject to } 5 \leq x_1 \leq 40mm \quad (6)$$

$$5 \leq x_2 \leq 40mm$$

$$5 \leq x_3 \leq 200N$$

$$1 \leq x_4 \leq 50N/mm$$

$$x_2 - x_1 \leq 5mm$$

3. 최적설계 결과

Fig. 6은 최적화 과정 중 목적함수가 최소화 되는 과정을 보여준다. 시뮬레이션은 총 8회 반복

(iteration) 수행되었으며, 초기 3회는 목적함수가 매우 높은 값을 보이지만 4회 이후로는 안정적으로 최소값으로 수렴함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 7은 설계변수들의 최적화 과정을 보여주고 있다. 목표함수에서와 같이 3회 이후로는 안정적인 수렴상태를 보여주고 있지만, 스프링 초기 압축력은 6회 이후 안정적으로 수렴함을 알 수 있고, 값 또한 가장 큰 폭으로 변동하여 가장 중요한 설계변수 중의 하나임을 알 수 있다.

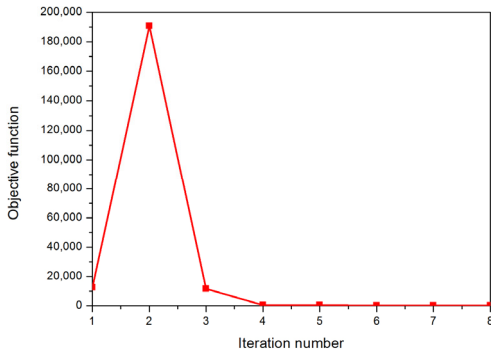


Fig. 6 History plot of objective function

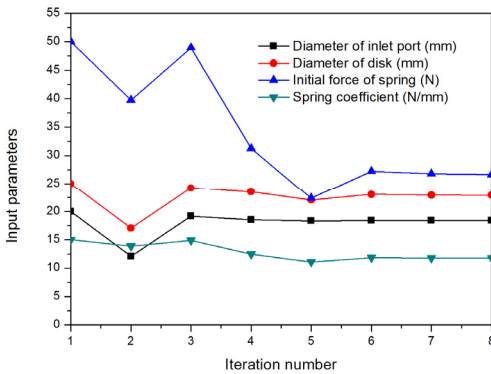


Fig. 7 History plot of design parameters

또한 Fig. 8에는 설계변수 중의 하나인 스프링 초기 압축력의 최적값이 발생한 영역과 빈도를 표준편차 등의 통계적 특성치로 나타내었다. 그림에서 스프링 초기 압축력의 최적값은 25(N) 부근에서 가장 많이 나타났음을 알 수 있다. Fig. 8에 나타난 평균, 표준편차, 왜도(skewness) 및 첨도(kurtosis)는 다음 식과 같이 정의한다.

$$\text{Mean Value} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i = \mu$$

$$\text{Standard deviation} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}}{N} = \sigma \quad (7)$$

$$\text{Skewness} = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^3$$

$$\text{Kurtosis} = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^4 - 3$$

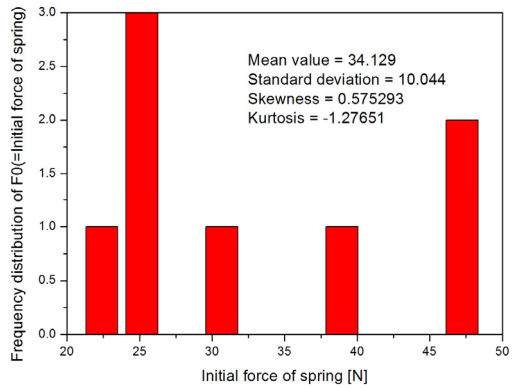


Fig. 8 Histogram of initial force of spring

최종적으로 계산된 최적의 설계변수는 Table 2에 나타난 표와 같다. 표에서 각각의 설계변수는 식 (6)에서 설정한 제한조건을 만족한다.

Table 2 Optimization results

The best solutions	
Diameter of inlet port (D_{inlet})	18.4 mm
Diameter of disk (D_{disk})	22.9 mm
Initial spring force (F_0)	26.7 N
Spring coefficient (k)	11.8 N/mm
$D_{disk} - D_{inlet}$	4.5 mm

Fig. 9에 최적설계에 의해 결정된 설계변수를 이용하여 최종적으로 시뮬레이션 한 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 최적화에 의한 체크밸브의 P-Q 특성(optimized)은 설계자가 원하는 이상적인 특성(ideal)과 거의 일치함을 알 수 있다. 여기서, 설계자가 설정한 이상적인 P-Q곡선은 선형곡

선으로 설정하였고, 실제 체크밸브의 특성은 선형이 아니므로 이상적인 곡선과는 약간의 차이가 발생한다. 하지만 최적화 알고리즘을 이용함으로써 이 오차가 최소가 되는, 즉 최적화된 설계변수들이 선정되었음을 알 수 있다.

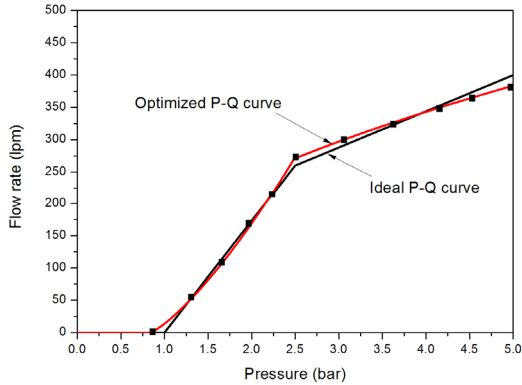


Fig. 9 Comparison between ideal and optimized P-Q curve of check valve

4. 결 론

이상과 같이 NLPQL 알고리즘을 이용하여 체크밸브의 유량-압력 특성을 설계자가 원하는 특성으로 변경하기 위한 최적 설계를 수행하였고, 최적의 설계변수를 이용하여 계산 결과의 신뢰성을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 NLPQL 알고리즘과 밸브 시뮬레이션 모델을 결합하여 효율적인 최적화 시뮬레이션을 수행할 수 있었고, 이 방법은 설계변수들이 많이 포함된 비선형 유압시스템의 최적화 문제에 매우 효율적인 방법임을 확인하였다. 또한 체크밸브의 크래킹압력과 최대개도점을 원하는 값으로 최적 설계하는 문제에서 스프링의 초기 압축력이 가장 중요한 설계변수임을 확인할 수 있었다.

References

1. N. H. Kim, J. H. Byeon and K. H. Lee, 2017, "Shape Optimization of Ball Valve for High Temperature", Journal of the Korea Academia - Industrial Cooperation Society, Vol. 18, No. 1 pp. 15-20.
2. C. H. Park, Y. M. Lee and D. H. Choi, 2011, "Design Optimization of an Automotive Vent Valve using Kriging Models", Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 6, pp. 1-9.
3. J. S. Song, W. C. Chung and S. W. Kim, 1997, "A Study on the Modeling and Optimization of Check Valve in Automatic Transmission", International Journal of Automotive Technology, Vol. 5, No. 2, pp. 111-119.
4. S. H. Kim, 2015, "Optimal Analysis of Composite Reflector Panels using SQP Method", A Master's Thesis of Korea Aerospace University
5. K. Schittkowski, 1985, "NLPQL : a Fortran Subroutine for Solving Constrained Nonlinear Programming Problems", Annals of Operations Research 5, pp. 485-500.
6. J. Prins, C. A. Infante Ferreira and C. M. Kalker-Kalkman, 1996, "Optimization of a Valve Using a Genetic Algorithm", International Compressor Engineering Conference, pp. 517-522.
7. X. G. Song, L. Wang and Y. C. Park, 2009, "Analysis and Optimization of a Butterfly Valve Disc", Proceedings of IMechE, Part E : Journal of Process Mechanical Engineering, Vol. 223, pp. 81-89.
8. J. G. Hur, I. H. Oh and K. U. Yang, 2010, "A Study on Pressure Characteristic in Various Inner Structure of Valves", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 77-82.