

독립공리를 이용한 메인 스타팅 밸브의 분석 및 설계

배태성*, 박수철**, 박상일**, 이권희#

Analysis and Design of a Main Starting Valve Using Independence Axiom

Tae-Sung Bae*, Soo-Chul Park**, Sang-il Park**, Kwon-Hee Lee#

(Received 8 July 2010; received in revised form 28 September 2010; accepted 7 October 2010)

ABSTRACT

Main starting valve is one of the main parts in the control system of diesel engines, purposed for starting main engines. It is composed of ball valve, check valve, actuator, etc. The design axioms provide a general framework for design methodology. Two axioms are independence axiom and information axiom. These axioms can be applied to all design process in a general way. The first axiom is introduced to analyze and evaluate the design of a main starting valve. The design parameters(DPs) are determined sequentially by considering the independence axiom. For the structural design of a main starting valve, the strength is calculated by using finite element method. In addition, the strength of its actuator piston is evaluated.

Key Words : Main Starting Valve(메인 스타팅 밸브), Actuator(액추에이터), Fluid Analysis(유동해석), Structural Analysis(구조해석), Axiomatic Design(공리설계)

1. 서 론

밸브는 산업설비의 핵심요소부품으로 조선, 정유, 석유화학, 배관, 발전, 건설, 상하수도, 공정 산업 등에 널리 적용되고 있다. 밸브의 세계시장 규모가 연간 약 500억불 정도이고 국내 시장이 약 30억불을 차지한다. 국내시장의 절반이상이 수입에 의존하는 상태이고 중소기업 위주의 산업구조로

인해 기술 및 표준에 대한 인식과 보급이 낮은 상태이다. 즉, 국내 밸브산업은 기술경쟁력의 도약이 필요한 산업이다. 또한 밸브는 고부가가치의 창출이 가능한 산업의 하나로서, 밸브의 시험 및 검증을 통하여 산업경쟁력을 확보하여야 한다^[1].

밸브는 기본적으로 유체를 제어하는 부품과 이들 제어부품들을 구조적으로 안전하게 유지시키는 몸체로 구성되어 있다^[2]. 밸브의 사용목적은 유량, 압력, 유속 등의 제어와 유체 방향전환, 수송 및 차단으로 사용되는 일차적 목적이 있다. 또한 이를 여러 조건하에서도 원활하게 운전할 수 있도록 구조적으로 결함이 없도록 설계되어야 한다.

메인 스타팅 밸브란 정지된 선박에 최초 시동을

* 동아대학교 대학원

교신저자 : 동아대학교 기계공학과

E-mail : leekh@dau.ac.kr

** (주)금강

위해 압력용기의 압축공기를 엔진에 공급하고 평상 시는 이를 차단하는 역할을 한다. 메인 스타팅 밸브는 볼 밸브, 액추에이터, 체크밸브로 구성되어 있다. 여기서 액추에이터는 볼밸브의 개폐를 위해 설치되며 체크밸브는 역류를 방지하기 위해 설치된다. 현재 국내시장에서 메인 스타팅 밸브는 대부분 수입에 의존하는 상태이며 국산화를 통한 수입대체 효과가 기대되어진다.

현재까지 밸브 특성의 해석에 관한 대부분의 연구들^[3-5]은 강도 및 유동 성능 검토를 위해 수행되었다. 또한 구조성능을 고려한 밸브의 최적화 연구들^[6-8]은 과도한 유동해석 시간과 민감도 산출의 어려움으로 인해 주로 반응표면 및 크리깅 방법을 이용한 메타모델을 가지고 수행되었다. 본 연구에서는 두 종류의 밸브로 구성되어 있는 메인 스타팅 밸브의 구조를 공리설계 관점에서 분석하였고, 이를 기초로 강도 및 유동특성을 평가하였다.

본 연구에서는 설계공리를 이용하여 메인 스타팅 밸브의 기능적 요구사항을 정리하고 각각의 기능적 요구사항에 상응하는 설계 파라미터를 선정하였다. 그 다음, 구성된 설계 행렬에 의해 메인 스타팅 밸브의 설계가 각각의 기능 요구사항과 설계파라미터간의 관계를 통해 독립공리를 만족하는 설계인지 판단하였다. 이에 따라 메인 스타팅 밸브의 유동 및 구조의 연성해석을 수행하였다. 이때 유동해석의 압력결과를 구조해석의 하중조건으로 적용하였다. 액추에이터의 구조적 안전성을 판단하기 위해 액추에이터 피스톤의 구조해석을 실시하였다.

본 연구에서는 메인 스타팅 밸브의 유동 및 구조의 연성해석은 ANSYS CFX와 ANSYS Workbench^[9]를 이용하였다. 액추에이터 피스톤의 구조해석은 Abaqus를 통하여 수행하였다.

2. 메인 스타팅 밸브

2.1 메인 스타팅 밸브의 구성 및 작동원리

메인 스타팅 밸브는 정지된 상태의 선박에서 최초 엔진을 시동시키기 위한 기계요소이다. 메인 스타팅 밸브는 볼 밸브와 체크밸브, 액추에이터로 구

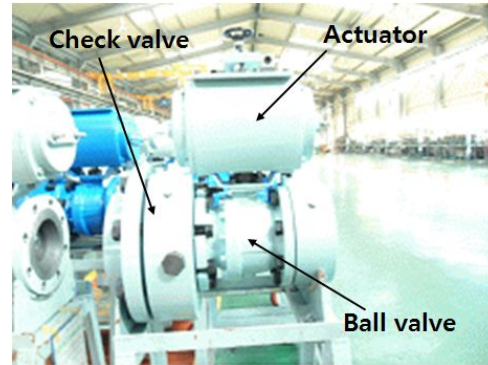


Fig. 1 Main starting valve

성된다. Fig. 1과 같이, 액추에이터는 볼 밸브의 상단에 설치되어 볼 밸브의 디스크를 구동시킨다. 볼 밸브는 기존 산업용 볼 밸브와 동일한 구조를 가지고 있다. 체크 밸브는 볼 밸브의 출구부분에 결합되어 역류차단의 역할을 한다.

메인 스타팅 밸브의 작동원리는 다음과 같다. 먼저 선박 내에 설치된 압력용기의 압축공기를 메인 스타팅 밸브를 통해 엔진에 공급한다. 유입된 압축공기는 내연기관의 피스톤을 밀어내어 첫 번째 엔진의 사이클이 이루어지도록 한다. 첫 사이클 후 메인 스타팅 밸브는 차단되어 압축공기의 공급을 중지하게 된다. 메인 스타팅 밸브는 유량조절의 역할보다는 공급 및 차단의 역할에 이용되고 있다.

2.2 액추에이터의 구조 및 작동원리

액추에이터는 공압식 피스톤장치로서, 메인 스타팅 밸브의 상부에 결합되어 볼 밸브 디스크의 개폐를 구동시킨다. Fig. 2에 액추에이터의 구조 및 작동원리를 나타내었다.

액추에이터는 피니언 기어, 스펀들, 피스톤, 서포트 로드 등으로 구성되어 있다. 액추에이터의 작동원리는 다음과 같다. 먼저, 내부로 유입된 압축공기가 피스톤을 밀어 피스톤의 래크가 피니언 기어를 회전시키게 된다. 그 다음, 회전되는 피니언 기어에 연결된 스펀들이 밸브의 디스크를 구동시키게 된다. 이때 0.88MPa의 압축공기에 견디는 피스톤의 구조가 요구된다. 따라서 액추에이터 피스톤부의 강도 및 성능이 검토되어야 한다.

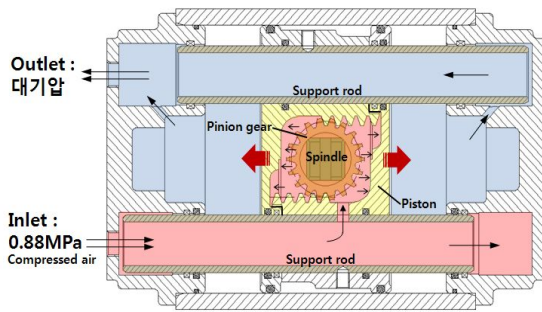


Fig. 2 Actuator

3. 공리적 설계(Axiomatic Design)

메인 스타팅 밸브 설계분석 시, 최초의 기능적 요구사항은 3개로 구성하였으며 이때 대응하는 설계파라미터도 3개로 대응시켰다. 다음의 하층구조에서는 강도 및 설계파라미터에 대하여 설계방정식을 구성하였다. 자세한 과정은 4장에서 설명하였다. 다음은 공리적 설계에 관한 간단한 설명이다.^[10]

설계과정은 얻고자 하는 것 (What to achieve)과 그것을 어떻게 얻을 것이냐(How to achieve it) 하는 것의 끊임없는 상호작용의 과정이다. 설계자는 소비자의 요구 (CAs : Customer Attributes)로부터 설계목적을 파악하여 얻고자 하는 것을 결정한다. 이를 기능적 요구사항 (FRs : Functional Requirements)이라 한다. 이러한 기능적 요구사항을 어떻게 얻을 것이냐 하는 것은 설계 파라미터 (DPs : Design Parameters)를 정의함으로 가능하다. 공리적 설계에서 설계란 FRs와 DPs 사이의 사상 과정 (mapping)을 통해 FRs를 만족시키는 DPs를 적절히 선정함으로 요구되는 설계목적을 달성하는 해를 창조하는 것이다. 또한 분석과정에서 FRs와 DPs 사이의 관계를 설계행렬을 통해 표면에 드러나게 함으로써 설계자의 판단오류를 줄이고 창의적인 설계를 돕는 설계원리이다. 이는 1980년대 MIT의 Suh에 의해서 제시되었다^[11]. 공리적 설계의 독립 공리를 설명하기 위해 다음과 같은 세 종류의 설계방정식을 고려해 보자.

연성 설계 (Coupled design)

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

비연성화 설계 (Decoupled design)

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ X & X & X \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

비연성 설계 (Uncoupled design)

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ O & O & X \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

위의 식들은 기능적 요구사항 (FRs)과 설계 파라미터 (DPs) 사이의 관계의 유형에 따라 설계 상태를 세 가지 범주로 나눈 것이다. 여기서 X는 해당 FR과 DP가 관련이 있음을 의미하고 O는 관련이 없음을 의미한다.

식 (1)의 연성설계는 FR₁을 만족시키기 위해 DP₁, DP₂, DP₃를 모두 결정해야 하는 경우를 보여준다. 그러나 FR₁을 만족시키기 위해 DP₁, DP₂, DP₃를 결정하더라도, 이 전체 DPs가 FR₂ 및 FR₃를 동시에 만족시킨다는 보장은 없다. 따라서 주어진 FRs를 모두 만족시키기 위해서는 시행착오를 반복하여 DPs를 결정해야 한다.

식 (2)의 비연성화 설계는 만족시켜야 할 FRs의 순서를 잘 결정하면, 식 (1)의 연성 설계에서와 같은 반복적인 시행착오는 피할 수 있음을 보여준다. 이 경우, FR₁을 만족하기 위해서는 DP₁만을 결정하고, FR₂를 만족하기 위해서는 이미 결정된 DP₁에 추가적으로 DP₂만을 결정하면 된다. 마찬가지로 FR₃를 만족하기 위해서는 DP₁, DP₂가 이미 결정되었으므로 DP₃만을 결정하면 전체 FRs를 일괄되게 만족시킬 수 있다.

식 (3)은 각각의 FR을 만족시키기 위해 해당하는 하나의 DP만을 결정하여 설계를 완성하는 비연성 설계를 보여준다. 이때에는 각각의 FR을 독립적으로 다룰 수 있다. 따라서 차후 어떤 FR에 변화가

생기더라도 관계되는 DP만을 다시 결정하면 되므로, 설계결과에 유지 보수가 매우 용이하다.

공리적 설계에서의 독립공리는 FR-DP가 일대일로 대응되는, 식 (3)과 같은 비 연성설계를 추천하고 있다. 이것이 어렵다면 차선책으로 식 (2)의 비연성화 설계를 추천하고 있다. 만약 설계결과가 식 (1)과 같은 연성 설계라면, 이것은 공리적 설계의 관점에서 좋은 설계라 할 수 없다. 이 경우 설계자는 FR이나 DP를 다시 결정하여 비 연성설계나 비연성화 설계가 되도록 해야 한다⁵⁾.

즉, 공리설계 이론은 두 가지 관점으로 적용될 수 있다. 첫 번째는 초기설계 시 공리설계를 이용하여 설계요구조건을 정의하고 이에 대응하는 설계파라미터를 결정하여 상세설계까지 진행하는 것이다. 두 번째는 공리설계 이론을 이용하여 이미 설계된 제품이나 시스템의 설계 질(quality)을 평가하는 것이다. 본 연구에서는 주로 후자의 목적으로 공리설계가 이용되었다.

4. 메인 스타팅 밸브의 공리설계

4.1 문제 정의 및 설계방정식

본 연구에서는 공리설계를 적용하여 메인 스타팅 밸브의 설계에 대한 분석을 실시하였다. 메인 스타팅 밸브는 그 사용목적에 따라 2가지 기능적 요구 사항(FRs)을 선정할 수 있다. 또한 그에 상응하는 2가지 설계파라미터(DPs)를 선정하였다. 식 (4)는 메인 스타팅 밸브의 설계방정식을 표시한 것이다. FR₁과 FR₂는 각각의 DP와 상응하여 독립성을 유지하였다.

$$\left\{ \begin{array}{l} FR_1 : \text{압축공기의 공급 및 차단} \\ FR_2 : \text{압축공기의 역류차단} \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} X & O \\ O & X \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} DP_1 : \text{볼 밸브의 설치} \\ DP_2 : \text{체크밸브의 설치} \end{array} \right\} \quad (4)$$

메인 스타팅 밸브의 설계문제는 비연성설계로 구분된다. 식 (4)의 FR₁은 상세설계를 위하여 하위레벨로 분해될 필요가 있다. FR₁을 FR₁₁과 FR₁₂로 분

해하였고 식 (5)에 표시하였다.

$$\left\{ \begin{array}{l} FR_{11} : \text{디스크의 신속하고 정확한 개폐} \\ FR_{12} : \text{볼 밸브의 구조 강도} \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} X & O \\ O & X \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} DP_{11} : \text{볼 밸브의 구동시스템} \\ DP_{12} : \text{볼 밸브의 사이즈} \end{array} \right\} \quad (5)$$

식 (4), (5)에 따라 DP₁, DP₁₁, DP₁₂, DP₂의 순서대로 결정이 가능하다는 것을 알 수 있다.

4.2 설계파라미터의 분석

메인 스타팅 밸브는 유량조절의 기능보다는 33bar의 고압의 압축공기를 공급 및 차단하는 역할(FR₁)을 한다. 이에 따라 고압에 강하고 기밀성이 우수한 볼 밸브(DP₁)가 설치된다.

메인 스타팅 밸브는 압축공기를 엔진에 공급 및 차단 시, 신속하고 정확한 밸브디스크의 개폐(FR₁₁)가 필요하다. 메인 스타팅 밸브의 구동시스템(DP₁₁)으로는 공압식 액추에이터가 적합하다. 이때 볼 밸브의 스템 윗부분에 액추에이터가 설치되어진다. 이때 액추에이터의 구조적 안전성을 평가하기 위해 5장에서 액추에이터의 강도해석을 수행하였다.

볼 밸브는 압력용기와 직접적으로 연결되어 33bar의 압축공기를 유입하고 차단하게 된다. 이 압력에 견디기 위한 볼 밸브의 사이즈(DP₁₂)의 결정이 요구된다. 메인 스타팅 밸브에 장착되는 볼

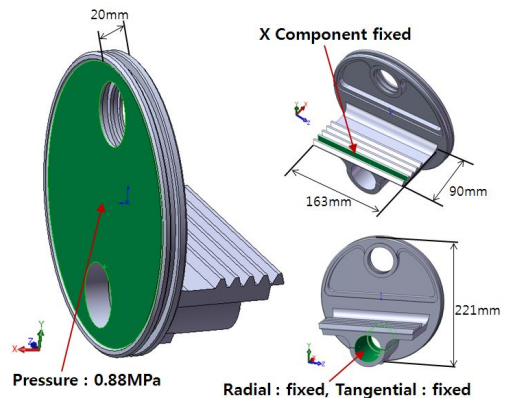


Fig. 3 Boundary conditions for the stress analysis of the piston

밸브는 지름이 150mm인 유로에 설치된다. 여기서, 볼 밸브의 수치해석을 통하여 밸브의 구조적 안전성을 판단하였다. 자세한 과정은 6장에 설명하였다.

메인 스타팅 밸브는 압축공기의 급작스런 배출 및 압력용기의 압력저하에 따라 밸브 내부로의 역류 가능성(FP₂)이 존재한다. 이를 방지하기 위하여 체크밸브(DP₂)가 설치된다. 체크밸브는 고압의 공기압과 직접적인 접촉을 피하기위해 볼 밸브의 출구 부분에 설치된다.

5. 액추에이터의 수치해석

본 연구에서는 메인 스타팅 밸브의 주요부품이자 최대응력의 발생이 예상되는 피스톤에 대한 구조해석을 수행하였다. 피스톤의 구조해석모델 및 경계조건을 Fig. 3에 나타내었다. 압축공기와 접하는 면에 압력 0.88MPa를 작용시켰고, 피니언 기어와 물리는 래크의 변위를 X축에 대해 고정시켰다. 또

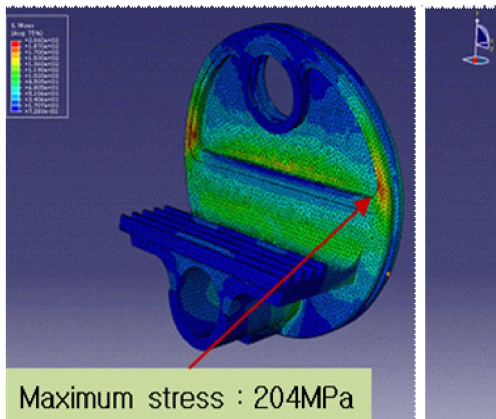


Fig. 4 Structural analysis of the piston

Table 1 Material properties of the piston

Material	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)
Piston AC4CT6	280	310	71

한 서포트 로드가 삽입되는 부분에 회전 및 원주 방향의 이동을 고정시켰다. 해석모델의 격자는 사면체요소를 이용하였고 절점이 5,218개, 요소가 10,138개가 구성되었다.

피스톤의 유한요소해석결과를 Fig. 4에 나타내었다. 피스톤 내부 홈의 양쪽 모서리부분에서 최대응력 204MPa이 발생하였다. 피스톤의 구조해석을 위해 사용된 재료는 Table 1과 같다. 강도해석 결과, 최대응력이 항복응력이하로 산출되었으며, 1.37의 안전율을 갖고 있다.

6. 볼 밸브의 수치해석

6.1 볼 밸브의 유동해석

볼 밸브의 사이즈 (DP₁₂)의 결정을 위해 볼 밸브의 수치해석을 실시하였다. 볼 밸브의 유동장 및 경계조건을 Fig. 5에 나타내었다. 유체는 Air 25℃를 사용하였다. 난류 모델은 k-ε 모델을 이용하였고 정적해석을 수행하였다. 밸브입구에 작동압력 3.3MPa를 입력하였고 밸브 출구를 대기압상태로 설정하였다. 유동장 모델의 격자는 사면체 격자를 사용하였다. 절점이 214,742개, 요소가 785,438개로 구성되었다. 해석시간은 워크스테이션급 사양으로 약 32시간이 소요되었다.

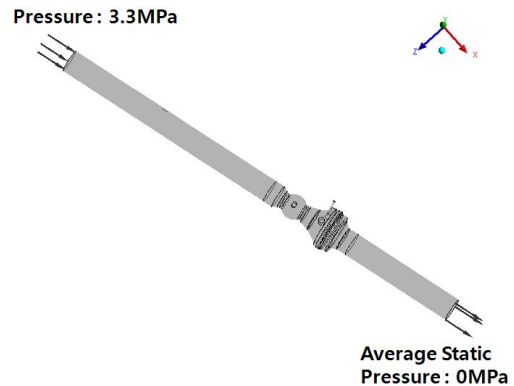


Fig. 5 Fluid analysis model of the ball valve

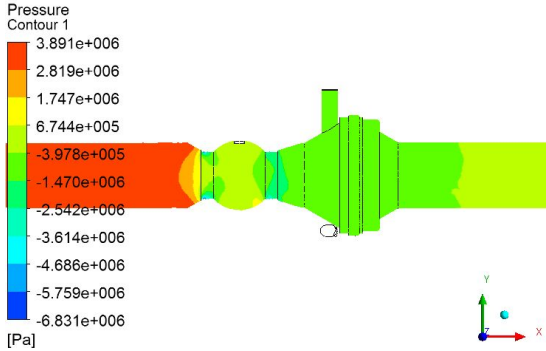


Fig. 6 Fluid analysis result

유동해석결과 중 Fig. 6에 압력결과를 표시하였다. 압축공기가 파이프를 통과하여 밸브내부로 유입되고 출구로 빠져나가는 동안 순차적인 압력 감소를 보였다. 특정영역에서 압력의 급상승 및 급하강, 와류 등의 현상은 발생하지 않았기에 유동적으로 안전하다고 판단된다. 이 압력결과 데이터는 연성해석의 하중 조건으로 이용되게 된다.

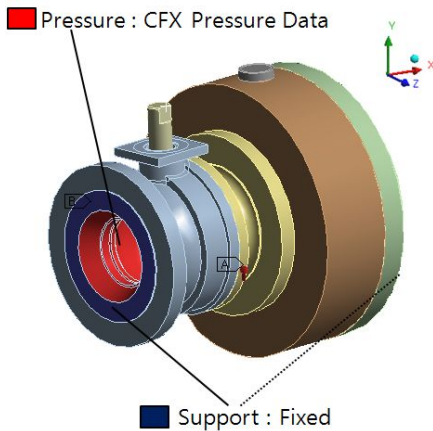


Fig. 7 Structural analysis model and boundary conditions

Table 2 Material properties of the ball valve

Material	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	
Ball valve	SCS14	185	440	0.31

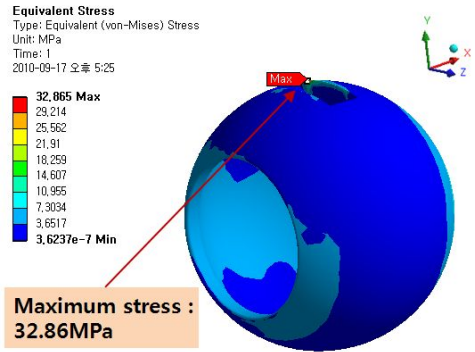


Fig. 8 Structural analysis of a ball valve

6.2 볼 밸브의 연성해석

구조해석모델 및 경계조건을 Fig. 7에 나타내었다. 볼 밸브 재질의 특성은 Table 2에 표시하였다. 볼 밸브의 양쪽 파이프와 연결되는 부분의 모든 자유도를 고정시켰다. 앞에서 수행하였던 유동해석의 압력결과 데이터를 하중조건으로 입력하였다. 유한요소해석모델은 사면체 요소로 구성되어 있다. 224,794개의 절점, 122,508개의 요소로 구성되었다.

구조해석결과 중 응력분포를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에 표시된 응력은 본 미세스(von-Mises) 등가응력이다. 최대응력은 볼 밸브의 디스크인 볼에서 32.8MPa로 발생하였다. 볼 밸브는 안전율 5.6으로 볼 밸브의 초기설계는 강도상 큰 문제가 없다. 이는 DP₁₂의 설계 파라미터를 만족함을 나타낸다.

7. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 독립공리를 이용하여 메인 스타팅 밸브의 기능적 요구사항을 파악하고 이를 구현할 수 있는 설계파라미터를 설정하였다. 공리설계 이론에 의한 메인 스타팅 밸브 설계의 분석결과, 메인 스타팅 밸브 설계는 독립성 공리를 만족시키고 있음을 알 수 있었다. 이는 공리설계의 관점에서 각각의 기능적 요구사항과 설계파라미터간의 독립

성을 유지하는 비연성설계로서 좋은 설계임을 검증하였다.

본 연구에서 수행한 강도해석 결과 볼 밸브는 안전하다고 판단했다. 반면에 액추에이터는 기존 피스톤의 경우보다 안전율을 높이는 것이 좋다고 판단되며, 이를 위한 형상최적화는 향후과제로 수행될 예정이다. 이는 현재까지의 추상적인 밸브의 설계과정과 달리 통합적이고 체계적인 밸브의 설계 기법 확립의 가능성을 보여주고 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지정 지역혁신센터사업(RIC) 고기능성밸브기술 지원센터 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- Kim, Y. C. "Industrial valve and global standard," Korean Fluid Machinery Association, Vol. 11, pp. 63-68, 2008.
- Skousen, L. P., Valve handbook, Elsevier, 2006.
- Kang, S. K., Choi, K. S., Yoon, J. Y., 2009, "Experiment and Simulation of Diffusion of Gas Released from the Relief Valve of a Gas Cylinder for a Potable Gas Range," Journal of fluid machinery, Vol. 12, No. 1. pp. 16~21.
- Yoon, J. Y., Kwon, W. C., 2007, "Development of Y Strainer Type Automatic Flow Rate Regulating Valve," Journal of fluid machinery, Vol. 10, No. 1. pp. 49~55.
- Shin, M. S., Yi, S. I., Park, G. J., Yoon, J. Y., 2009, "Determination of Eccentric Axis for Pump Control Valve Using the Characteristic Function," Journal of fluid machinery, Vol. 11, No. 3. pp. 43~49.
- Choi, J. S., Park, Y. C., 2005, "A Study on the Optimization of a Devided Ball Valve using Characteristic Function," Journal of the KSPE, Vol. 22, No. 8. pp. 108~117.
- Park, Y. C., Kang, J. H., Lee, J. M., Kang, J., 2006, "Optimization of Butterfly Valve's Disc Using the DACE Model Based on CAE," Journal of ocean engineering and technology, Vol. 20, No. 3. pp. 96~102.
- Kang, J., Lee, J. M., Kang, J. H., Park, Y. C., Park, H. C., 2006, "Optimization of a Gate Valve using Orthogonal Array and Kriging Model," Journal of the KSPE, Vol. 23, No. 8. pp. 119~126.
- ANSYS, Inc., 2007, Release 11.0 Documentation for ANSYS Workbench.
- Choi, W. S., Lee, G. M., Kim, T.W., Kim, J. I., 2007, "Design of Reactor Head Structure Assembly Using Axiomatic Design," Proceedings of KSME2002 Spring Annual Meeting, pp.52~56.
- Suh, N. P., Axiomatic Design, Oxford University Press, New York, 2001.
- Lee, K. H., Bae, T. S., 2009, "Structural Optimization of a Manifold Valve for Pressure Vessel," Journal of the KSPE, Vol. 26, No. 12. pp. 102~109.