

구조연성해석을 통한 메인스타팅 에어밸브의 경량화설계

이권희^{1*}, 장병현²

¹동아대학교 기계공학과, ²(주)센트랄

Lightweight Design of a Main Starting Air Valve through FSI Analysis

Kwon-Hee Lee^{1*} and Byung-Hyun Jang²

¹Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

²Central Corporation

요 약 메인스타팅 에어밸브는 선박에서 최초 시동을 위해 장착되는 요소로서 운전 시에는 공기를 차단하는 역할을 한다. 본 연구에서는 기 개발된 50A 메인스타팅 에어밸브의 형상을 기초로 80A 메인스타팅 에어밸브의 기초설계를 제시하였고, 80A 메인스타팅 에어밸브의 개념설계는 CATIA를 이용하여 완성되었다. 그리고 압력분포 및 속도분포 등의 유동특성을 검토하기 위해서 유동해석을 수행하였고, 이어서 FSI를 이용한 구조해석을 수행하였다. 이상의 수치 해석을 위하여 ANSYS 및 ANSYS CFX 프로그램을 이용하였다. 밸브 몸체의 과도한 중량은 인접 구조요소의 강도를 저해시킬 수 있고 유동특성에도 좋지 못한 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 80A 밸브의 경량화 설계를 강도성능의 요구조건을 고려하여 제시하였다. 최종 제시한 밸브는 7kg의 경량화를 이루었고 최대응력도 설계기준을 만족시켰다.

Abstract The role of a main starting air valve is to supply compressed air to the diesel engine for starting the stopped diesel engine of a ship and cut off the air during normal operation. In this study, the main starting air valve with 80mm size was designed based on the developed valve with 50mm size. The concept design of the 80A main starting air valve was completed by using CATIA. Then, fluid analysis was performed to investigate the flow characteristics such as pressure and velocity distribution. Sequentially, structural analysis using FSI was performed. In this study, ANSYS CFX and ANSYS Workbench are utilized. The heavy weight of the body can deteriorate the strength performance of neighbor elements, leading to undesirable effect on flow characteristics. Thus, in this research, a lightweight design of the body was suggested satisfying strength requirement. The weight of the suggested design was reduced by 7kg, and the strength satisfied its requirement.

Key Words : FSI(Fluid Structure Interaction), Lightweight Design, Valve, Main Starting Air Valve, Structural Analysis

1. 서론

선박용 메인스타팅 에어밸브는 정지된 선박의 최초 시동을 위해 필요한 기계요소이다. 메인스타팅 에어밸브는 바디, 디스크 그리고 시트로 구성된다. 메인스타팅 에어밸브는 엔진의 최초 시동을 위하여 공기압축기에서 밸브로 공급된 고압의 압축공기를 직접 그 상태의 압력으로

공급하지 않고 구동조건을 만족하였을 때 엔진으로 압력을 송출하는 유량제어 밸브의 역할을 수행한다 [1].

메인스타팅 에어밸브의 작동원리는 다음과 같다. 최초 디스크의 외부와 내부가 디스크 시트를 통해 단절된 상태로 정지되어있다. 공기압축기로부터 압축공기 30bar를 받아 컨트롤 밸브를 통하여 디스크 내·외부로 송출되어 압력이 평형상태를 유지한다. 이 때 디스크 내부는 컨트롤

본 연구는 산업통상자원부 지정 지역혁신센터사업(RIC) 고기능성밸브기술지원센터 지원으로 수행되었음.

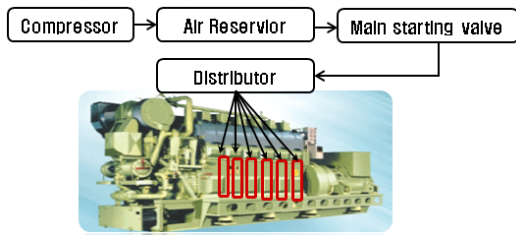
*Corresponding Author : Kwon-Hee Lee(Dong-A Univ.)

Tel: +82-51-200-7638 email: leekh@dau.ac.kr

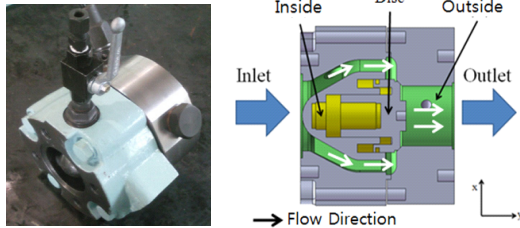
Received October 7, 2013

Revised November 5, 2013

Accepted November 7, 2013



[Fig. 1] A starting system of diesel engine



[Fig. 2] 50A main starting air valve and its operation

를 밸브[2, 3]를 통하여 밸브 외부로 압력이 점차 빠져나가게 되면서 디스크 외부와 내부 압력차가 발생한다. 디스크 내·외부 압력 평형으로 인해 정지되어있던 디스크가 내부 압력이 점차 감소하게 되면서 디스크 외부압력이 디스크시트를 밀어 디스크가 개방된다. 디스크를 빠져나온 압축공기가 엔진으로 송출되어 엔진이 원활히 작동될 수 있도록 압축공기를 공급한다. 압축공기 송출 후 디스크 내부의 스프링의 복원력에 의해서 디스크가 다시 하강하게 되고 압축공기의 공급을 중지하게 된다. 메인스타팅 에어밸브는 유량조절의 목적보다는 엔진에 압축공기를 공급 및 차단하는 역할에 사용된다.

현재까지의 밸브의 유동특성에 대해서 많은 연구가 있었다. 그러나 밸브의 유동특성과 구조적 안정성을 함께 고려하고 동시에 경량화를 수행한 연구[4, 5]는 많지 않다. 본 연구에서는 메인스타팅 에어밸브의 국산화 기술 확보를 위해 기 개발된 소형의 밸브를 기초로 하고, 이 밸브와 개발되는 밸브의 유동 및 구조 안정성 평가를 실시하였다. 이를 통해 메인스타팅 에어밸브의 경량화 설계를 제시하였다. 즉, 본 연구에서 개발하고자 하는 80A 메인스타팅 에어밸브의 형상을 CAD를 이용하여 생성하고, 이 모델을 기반으로 하여 유동해석 및 구조연성해석을 수행하였다. 이 결과를 통해 80A 메인스타팅 에어밸브의 유동특성 및 구조 안정성을 평가하고 중량감소를 실현하였다.

2. 메인스타팅 에어밸브의 유동·구조 연성해석

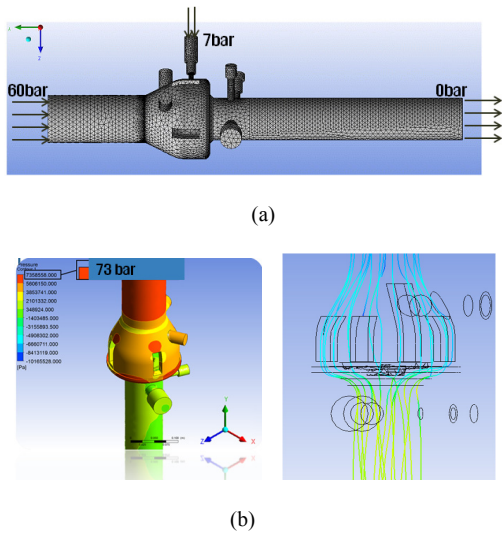
메인스타팅 에어밸브는 Fig. 1과 같이 정지된 선박의 최초 시동을 위하여 사용된다. 또한 기 개발된 50A 메인스타팅 에어밸브는 Fig. 2와 같다. 기존의 메인스타팅 에어밸브의 구조해석에서는 밸브내부의 유동특성을 고려하지 않고 밸브 디스크 내부에 수직으로 작용하는 최대하중을 구조해석의 하중조건으로 적용하여 밸브에 작용하는 응력을 계산하여 구조안정성을 평가하였다. 그러나 밸브 내부에 작용하는 실제 하중을 고려하지 않았기 때문에 실제 강도와는 오차를 가질 수 밖에 없다.

본 연구에서는 실제 밸브 내부에 작용하는 유동 특성 및 경향성을 파악하고 유동해석 결과를 구조해석의 하중조건으로 적용하였다. 즉 FSI(fluid-structure interface) [6, 7]를 이용하여 유동해석의 결과를 구조해석의 하중조건으로 이용하였다. 유동구조 연성 현상은 해석적으로 풀기가 불가능하여 일반적으로 실험 또는 수치적 방법으로 해결한다. 여기서 수치적 방법이란 전산유체역학과 유한요소법에 의한 구조해석 방법을 의미한다. ANSYS의 FIS 해석[7]을 위해 입구조건으로서 설계압력을 부여하였고, 유동해석의 결과 압력분포를 얻을 수 있었다. ANSYS에서는 이 값이 구조해석을 위한 하중조건으로서 자동적으로 입력이 되어 응력 등의 구조적인 반응치를 얻을 수가 있게 된다. ANSYS를 이용할 경우, 유동해석을 위한 초기조건을 부여하고 FSI 옵션을 선택하면 압력 및 속도분포 등의 유동 특성과 변위 및 응력 등의 구조적 특성을 동시에 예측할 수 있다.

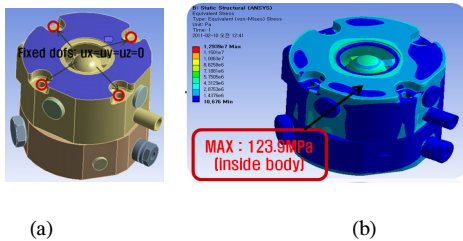
본 연구에서 설계하고자하는 80A 메인스타팅 에어밸브의 구조설계를 위하여 먼저 현재 생산되고 있는 50A 메인스타팅 에어밸브 모델의 구조·연성해석을 수행하였고. 이 결과를 80A 메인스타팅 에어밸브의 설계기준으로 설정하였다.

2.1 50A 메인스타팅 에어밸브의 모델의 구조·연성해석

실제 작용시의 유체의 흐름을 파악하기 위하여 디스크가 열린 상태에서 메인스타팅 에어밸브의 구조·연성해석을 수행하였다. 즉, 유동해석 수행을 위하여 ANSYS CFX에 의한 정상상태의 유동해석을 수행하였다. 해석모델은 밸브 입구의 길이를 직경의 5배, 출구 직경의 10배로 설정하여 유동영역을 모델링하였다. 출구영역을 입구보다 길게 설정한 이유는 유체가 입구에서 디스크를 지나 출구로 흐를 때 교축현상에 의해 비정상적인 유동특



[Fig. 3] Fluid analysis of 50A main starting air valve
 (a) Numerical model for CFD analysis
 (b) Fluid analysis results (pressure and velocity)



[Fig. 4] Boundary condition and stress result in 50A valve
 (a) Boundary condition (b) Maximum stress

성을 가지기 때문이다[6, 7]. 수치해석 시 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유체가 충분히 안정되어 정상유동을 하기까지의 유동영역의 확보를 위해 위와 같이 유동영역을 모델링하는 것이 일반적이다.

작동유체는 에어의 이상기체를 사용하였고 비압축성 유동 및 정상상태로 가정하였다. 그리고 ANSYS CFX의 k-ε 난류모델을 사용하였다. 사용된 난류모델의 이론식은 참고문헌 [8]에 전개되어 있다. 주 밸브의 입구압력은 최대 30bar로 알려져 있으나 설계 시에는 내부적으로 두 배가 높은 60bar를 이용한다. 또한 작은 밸브에 7bar의 설계압력이 작용시켰다. 이는 설계기준을 따른 하중조건이다. 또한 출구조건은 대기압으로 설정하였다. 이를 Fig. 3(a)에 표시하였다. 본 밸브의 수치모델에서는 4절점 사면체요소를 사용하였으며 절점 12,615개 요소 37,295개로 구성되었다.

압력분포 및 속도분포의 유동해석결과를 Fig. 3(b)에 표시하였다. 압축공기가 입구를 통해 밸브내부로 유입되어 디스크를 통과하여 출구로 유출된다. 밸브의 내부 형상에 의해 국부적인 압력집중이 발생한다. 하지만 이로 인한 와류 현상이나 공동현상은 발생하지 않는다. 따라서 유동적으로 안정적이라고 평가할 수 있다. 이 유동해석 결과를 이용하여 밸브 내 작용하는 압력 분포를 구조연성해석의 하중 조건으로 적용한다.

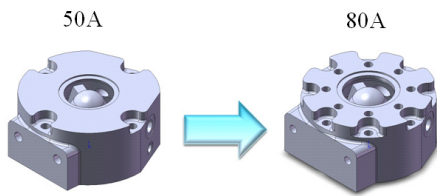
구조해석에 사용된 유한요소모델은 4절점 사면체요소를 사용하여 절점 965,178개 요소 670,800개로 구성되었다. 경계조건으로서 Fig. 4(a)와 같이 접촉면 및 볼팅부의 자유도를 모두 고정하였으며 하중은 FSI 해석을 통해 자동적으로 유동 해석결과로 저장되는 압력분포이다. 또한 재료의 물성치는 탄성계수 200GPa, 프와송 비 0.24의 값을 가지는 재질이다. 구조연성해석 결과 밸브에 작용하는 응력분포를 Fig. 4(b)에 나타내었다.

최대응력은 밸브몸체 내부에서 발생하고 있다. 밸브 내부의 국부적인 부분에서 최대응력이 발생하고 전반적인 부분에서는 응력의 분포가 고르게 분포된 것을 확인할 수 있다. 50A 메인스타팅 에어밸브의 최대응력은 최대비틀림변형에너지설에 의하면 허용응력 이내에 있다. 본 연구에서는 50A 밸브의 형상을 기초로 80A 메인스타팅 에어밸브의 구조설계를 수행하였다.

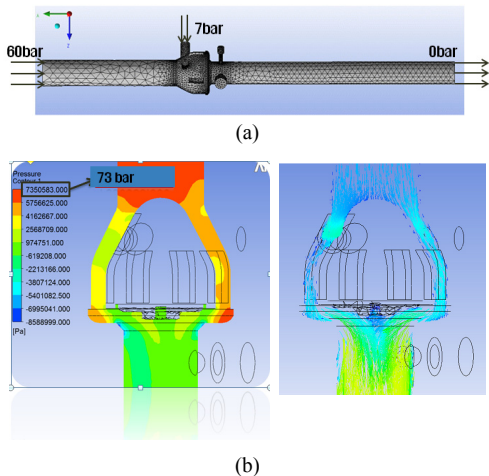
2.2 80A 메인스타팅 에어밸브의 형상설계 및 구조·연성해석

기존의 50A 밸브를 기초로 초기설계한 80A 메인스타팅 에어밸브를 Fig. 5에 나타내었다. 80A 모델도 50A 모델과 동일한 원리로 작동하나 장착되는 엔진의 출력이 증가하여 공기 압축기의 출력도 향상되었다. 공기 압축기와 연결된 관의 크기가 50A에서 80A로 증가하면서 밸브 형상의 변화가 필요하였다. 공기압축기와 연결된 관의 크기가 50A에서 80A로 늘어나 공기 압축기로부터 밸브로 송출되는 공기의 유량도 증가되어 밸브의 내부와 닿는 면적도 증가되었다. 동시에 밸브의 직경이 증가함에 따라 밸브의 중량도 증가하게 되었다. 밸브 입-출구 직경을 증대시키고 디스크와 내부형상도 증대시켰다. 또한 증가한 밸브의 중량을 지지해줄 수 있는 밸브의 볼트 홈의 개수를 8개에서 16개로 증가시켰다. 볼트 홈의 개수를 증가시킴으로써 엔진과 밸브의 결합력의 증대시켜 중량이 증가한 밸브를 지지할 수 있도록 설계하였다.

80A 메인스타팅밸브도 50A 밸브와 작동원리와 동일한 조건에서 작동하기 때문에 밸브 내부의 형상은 유지하나 밸브 내부의 치수를 변화하여 설계하였다. 공기압축



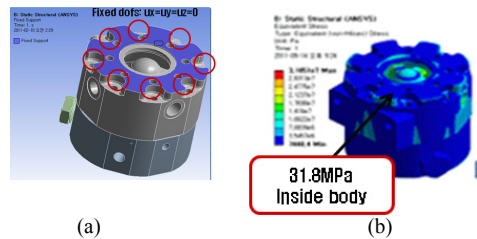
[Fig. 5] 50A and 80A main starting air valves



[Fig. 6] Fluid analysis of initial 80A valve
(a) Numerical model for CFD analysis
(b) Fluid analysis results (pressure and velocity)

기와 연결되는 볼트 홈의 경우 KS규격을 기준으로 하여 볼트 홈을 구성하였다. 80A 메인스타팅밸브의 경우 케이스에 공기압축기와 연결되는 볼트 홈의 개수가 4개에서 8개로 변경 되었다. 단순히 볼트 홈의 개수를 증가 시키면 컨트롤 밸브의 연결부위와 간섭이 발생할 수 있으므로 볼트 홈의 개수와 컨트롤 밸브 연결부위의 간섭이 일어나지 않는 영역에서 홈의 위치를 변경하여 처음 볼트 홈의 위치에서 각각 45°를 유지하며 홈을 대칭되도록 설계하여 볼트 홈을 하였다. 또한 볼트 홈의 간섭이 발생하지 않도록 하여 홈을 설계하였다. 밸브의 직경은 증가하였지만 밸브의 길이는 동일하다.

80A 메인스타팅밸브의 기능을 수행하기 위해서는 내부의 유량 흐름이 50A 메인스타팅밸브와 동일한 유동특성을 가져야 한다. 앞에서 제기된 문제점들을 해결하기 위해서 수치해석을 통하여 유체의 유동특성을 파악하여 50A 메인스타팅밸브 모델과 동일한 유동특성을 가질 수 있는지 비교해 보았다. 밸브의 형상은 CAD를 이용하여 모델링하였으며 유체의 유동특성을 파악하기 위해 ANSYS CFX를 이용하여 해석을 수행하였다. 유동영역



[Fig. 7] Boundary condition and stress result in initial 80A valve
(a) Boundary condition (b) Maximum stress

의 크기는 50A 밸브의 유동영역과 동일하게 밸브의 입구 측과 출구측의 길이를 입구 직경의 5배, 출구 직경의 10 배로 설정하여 유동영역을 모델링하였다.

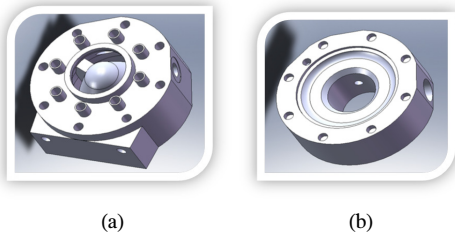
80A 메인스타팅밸브의 유동해석 조건으로 작동유체는 이상기체를 사용하였고 ANSYS CFX의 k-ε 난류모델을 50A 메인스타팅 에어밸브와 동일한 조건에서 작동하기 때문에 Fig. 3과 같이 입구에서는 실제 작동압력보다 2배 높은 60bar를 적용시키고 출구에서는 대기압을 사용하였다. 유동장은 4절점 사면체 요소를 사용하여 모델링하였으며 절점 36,585개 요소 176,176개로 구성되었다. 유동장 모델을 Fig. 6(a)에, 유동해석 결과인 압력분포 및 속도분포를 Fig. 6(b)에 각각 표시하였다.

입구를 통해 유입된 압축공기가 디스크를 통과하여 출구로 유출되는 것을 압력분포를 통하여 관찰할 수 있다. FSI를 이용하여 유동해석의 결과인 압력분포를 구조해석의 하중조건으로 설정하여 80A 메인스타팅밸브의 구조연성해석을 수행하였다. 80A 밸브의 구조연성해석에 사용된 유한요소모델은 4절점 사면체 2차요소를 사용하여 절점 780,806개와 요소 539,441개로 구성되었다. 경계조건은 50A 밸브와 동일하게 설정하였고 재료의 물성치도 50A와 동일하다.

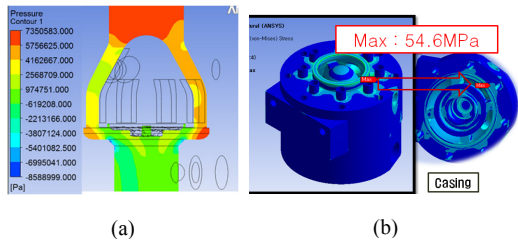
경계조건 및 구조연성해석 결과 밸브에 작용하는 응력 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 밸브내부에 작용하는 최대 응력은 31.8MPa이므로 밸브의 안전율은 7.5로 계산되었다. 이 결과는 허용응력보다 작은 값이기 때문에 80A 메인 스타팅 밸브는 구조강도상 안전하다고 할 수 있다.

3. 80A 메인스타팅밸브의 경량화 설계

80A 메인스타팅밸브의 경량화 설계를 위해 80A 메인 스타팅밸브의 형상변화를 시도하였다. 공기 압축기의 직경이 고정되어 있어 밸브의 직경변화는 불가능했다. 또한 내부 형상이 변화하면 밸브의 유동특성이 변화하여 디스



[Fig. 8] Suggested lightweight design of 80A valve
(a) Top view (b) Bottom view



[Fig. 9] Analysis results of lightweight 80A valve
(a) Pressure distribution (b) Maximum stress

[Table 1] FSI Analysis results

	50A	80A	Light 80A
Max Stress	123.9MPa	31.8MPa	54.6MPa
Safety Factor	1.9	7.5	4.4

크에서 와류 및 공동현상을 야기하여 밸브의 성능을 저하시킬 위험이 있다. 밸브의 직경과 내부 형상을 유지하고 중량을 감소시키기 위해 밸브의 바디와 시트부의 형상을 변화시켰다. 구조 경량화를 위해선 구조최적설계(structural optimization)를 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 본 모델은 볼팅부가 많이 있고 형상이 균일하지 않기 때문에 형상최적설계 기법을 적용시키기 불가능하였다.

바디와 시트부분의 볼트 홈 부분의 머리파기와 컨트롤 밸브 연결부위를 제외하고 중량감소가 가능한 부분을 제거하여 형상을 변화시켰다. 밸브의 중량감소도 중요하지만 변화한 밸브의 형상이 기존의 80A 메인스타팅밸브와 유동특성이 동일해야하며 밸브의 강도 또한 동일한 성능을 유지해야 한다. 시행착오법에 의해 제시된 경량화 설계를 Fig. 8에 표시하였다.

밸브의 성능 및 강도를 평가하기 위하여 유동해석과 구조연성해석을 수행하였다. 80A 메인스타팅 에어밸브와 동일한 조건하에서 유동해석을 수행하였다. 이를 Fig. 9(a)에 표시하였다. 내부 형상의 변화가 크게 없었기 때문에 유사한 결과가 나왔다. 이를 하중조건으로 적용하여 구조연성해석을 수행하였다. 연성해석 결과는 Fig. 9(b)

와 같다. 밸브 내부에 발생하는 최대응력은 54.6MPa로 계산되었으며, 안전율은 4.4이다. 밸브의 중량은 58.16kg에서 50.39kg으로 약 7kg정도 경량화 할 수 있었다.

50A 메인스타팅밸브와 80A 메인스타팅밸브의 구조연성해석 및 안전율 값을 Table 1에 정리하였다. 50A 밸브와 80A 밸브 내부에서 작용하는 최대응력이 123.9MPa, 31.8MPa, 54.6MPa이라는 것을 확인 할 수 있다. 밸브 내부의 경우 밸브 내부에 작용하는 압력의 분포가 형상이 급격히 변하는 부분에서 응력집중이 발생한다. 50A와 80A 모두 동일한 압력이 작용하지만 내부에 작용하는 응력의 차이가 나는 이유는 밸브 내부에 벽면에 작용하는 압력의 크기는 동일하나 밸브 내부 형상의 증대와 디스크 크기가 증대되어 유체와 접촉된 면적이 증가하여 압력이 증가하였지만, 밸브의 형상이 증대됨으로써 밸브의 치수가 증대되어 증가한 압력을 상쇄시킬 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 50A 메인스타팅 에어밸브의 형상을 기초로 80A 메인스타팅 에어밸브의 경량화 설계를 제시하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 80A 메인스타팅 에어밸브의 경량화를 시도하여 해석한 결과 최대응력은 54.6MPa, 안전율 1.58이 산출되었다. 또한 제시한 설계는 약 7kg의 경량화를 이룰 수 있었다. 이는 재료비 절감뿐만 아니라 볼팅부의 내구성을 향상시켰다.
- (2) 구조연성해석결과 80A 메인스타팅밸브에 작용하는 최대응력은 54.6MPa로서 제시한 밸브는 구조강도상 안전하다고 판단 할 수 있다.

References

- [1] Jang, B.H., Heo, J.I. and Lee, K.H. "Structural Design of a Main Starting Air Valve," *Proc. 10th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics*, Milan, Italy, pp. 89-93. 2013.
- [2] Ko, G. C. *Control Valve Handbook*, Hong Rung, Seoul, Korea. 2007.
- [3] Smith, P. *Valve Selection Handbook*, Elsevier, USA, pp. 1~45. 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-075067717-2/50001-8>
- [4] Lee, J.H. and Lee, K.H. "Prediction of the Resistance

Coefficient in a Segment Ball Valve," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 2, pp. 185-188. 2010.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-009-1138-1>

- [5] Lee, J.H. and Lee, K.H. "Shape Optimization of a Segment Ball Valve Using Metamodels," *Journal of Korean Navigation and Port Research*, Vol. 34, No. 7, pp. 553-558.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5394/KINPR.2010.34.7.553>

- [6] Kang, S. M. and Lee, B. H., 2009, "A Numerical study on Flow Characteristics through an Industrial Safety Relief Valve," *Journal of Marine Engineering*, Vol. 33, No. 5, pp.696~704. 2010.

- [7] ANSYS, Inc.(2007), *ANSYS CFX 11.0 User's Manual*.

- [8] Lee. J.H., Jung, J.W., Kim, Y.K. and Ko S.J. "Representation of Wind Characteristics of Neutral Atmosphere Boundary Layer Using $k-\epsilon$ Turbulent Model," *Transactions of Wind Engineering Institute of Korea*, Vol. 14, No. 2, pp. 71-78. 2010.

이 권 희(Kwon-Hee Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한양대학교 공과대학 기계설계학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 한양대학교 공과대학 기계설계학과 (공학박사)
- 1994년 6월 ~ 1999년 6월 : 대우자동차 선임연구원
- 2002년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

기계설계, 최적설계

장 병 현(Byung-Hyun Jang)

[정회원]



- 2012년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : (주)센트럴 연구원

<관심분야>

구조해석, 차량부품해석