

Anti-Cavitation Trim을 갖는 고차압 제어밸브의 유동특성에 관한 수치해석

안영준* · 김병진** · 신병록***

Numerical Analysis on Flow Characteristics of High Pressure Drop Control Valves with Anti-Cavitation Trim

Y. J. Ahn*, B. J. Kim**, B. R. Shin***

Key Words : Control Valve(제어밸브), Valve Trim(밸브트림), Cavitation(캐비테이션), Numerical Analysis(수치해석), Flow Coefficient (유량계수)

ABSTRACT

Numerical analysis of three dimensional incompressible turbulent flows in LNG marine high pressure drop control valves was carried out by using the CFD-ACE from ESI-Group. In this study, flow characteristics of control valves with complex flow fields including cavitation effect were investigated. Simulation was performed on five models of control valve that had different orifice diameters of anti-trim and the size of valve. Comparing newly designed control valves for controlling the occurrence of cavitation with the conventional valve, new valves showed a improved flow pattern with almost no cavitation.

1. 서론

최근 세계 천연가스 시장은 기후변화에 대한 세계적인 관심의 고조와 경제 성장으로 인한 삶의 질적 향상에 대한 욕구의 증가와 함께 첨단기술의 발달이 조화를 이루면서 빠른 속도로 확장되어 왔다. 천연가스를 파이프라인을 통해 소비지역까지 운반하기 어려운 경우에는 기체인 천연가스를 -162°C 에서 액화하여 LNG 형태로

전환시켜 선박을 이용하여 운반하게 된다. 이에 따라 LNG 선박에 이용되는 극저온 제어밸브(control valve of the extremely temperature) 뿐만 아니라 고온, 고압에서 유체를 제어하는 고차압 제어밸브의 시장 역시 급격히 커지고 있다.

현재 산업체에서는 유체의 유량, 압력, 방향 등을 제어하기 위하여 글로브 밸브, 게이트 밸브, 버티플라이 밸브, 볼 밸브 등 여러 종류의 밸브를 사용하고 있다. 그 중 LNG 선박용 고차압 제어밸브는 차압 조절용으로 널리 사용되는 글로브 밸브의 일종으로, 유체가 밸브를 통과하면서 상대적으로 큰 압력강하가 발생하며, 밸브의 설계 및 운전조건에 따라 압력강하와 더불어 유량변화

* 창원대학교 기계공학과 대학원

** BY Controls(주)

*** 창원대학교 기계공학과, 정회원

E-mail : brshin@changwon.ac.kr

가 크게 일어나기 때문에 고속 영역에서는 흔히 캐비테이션(cavitation)을 동반하게 된다. 캐비테이션은 작동 유체의 압력이 포화증기압(p_v) 보다 낮은 영역에서 상변화를 일으켜 액체 속에 증기 기포가 형성되는 것을 말하며, 생성된 캐비테이션 기포가 붕괴할 때는 지극히 짧은 시간에 엄청난 충격압이 발생한다. 이러한 캐비테이션을 동반하는 유동장에서는 다양한 크기의 무수히 많은 캐비테이션 기포가 높은 압력에 노출될 때 단시간에 연쇄적으로 붕괴되고, 이 때 발생하는 충격파와 마이크로 제트(micro jet)에 의한 충격 에너지가 주위 밸브 본체 및 배관에 전파되어, 변형, 침식(erosion) 등 표면재에 기계적인 손상을 일으킨다⁽¹⁾. 이와 같이 캐비테이션은 고속 유체기계, 기기에 대부분 나쁜 영향을 미치기 때문에 액체를 매체로 하는 밸브의 설계에 있어서는 운전에 따른 안정성 확보와 수명연장 및 적정 제어를 위하여 고려해야 하는 중요 요소 중의 하나이다⁽²⁾.

이상과 같은 캐비테이션의 발생 유무를 예측하고 방지 대책을 강구하기 위해서는 유체역학적으로 합당한 유동해석이 필요하다. 이런 유동은 유동 특성상 수치해석에 의한 연구가 적합한데, 글로브형 고차압 제어밸브는 형상이 매우 복잡하여 수치해석에 있어서도 많은 어려움이 있다. 최근 정민호⁽³⁾ 등은 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 글로브 밸브에 대해 밸브 개도율(valve opening)의 변화에 따른 3차원 유동장 해석을 수행하고 압력강하 및 유량계수에 대하여 실험 값과 비교 검토하였다. 한편, 윤준용⁽⁴⁾ 등은 CFD-ACEA 상용코드를 이용하여 트림이 장착된 글로브 밸브에 대한 3차원 유동장 및 캐비테이션 발생에 대한 수치해석을 수행한 바 있다. 정렬격자를 이용하여 개도율의 변화에 따른 밸브내의 압력분포를 상세히 조사한 반면 유동 형태에 대한 정보가 생략되었고 밸브 크기와 형상의 변화에 대해서는 고려되지 않았다.

본 연구에서는 액체를 매체로 다루는 LNG 선박용 고차압 제어밸브에 대해 상용 전산 열유체 해석 프로그램인 CFD-ACE⁽⁵⁾를 이용하여 유동장을 해석하였다. 계산에 이용된 밸브 형상은 BY Control(주)에서 제공한 것으로, 캐비테이션을 보다 효율적으로 제어하기 위하여 캐비테이션 trim에 대하여 외국에서 개발된 기존 모델(trim hole이 썸기형)을 동일 조건하에서 원통형(오리피스)으로 변경하는 등 새롭게 설계 제작된 anti-cavitation trim 밸브이다. 본 연구에서는 서로 크기가 다른 5가지 종류의 밸브에 대하여 해석하고 유동특성, 압력강하 및 캐비테이션의 발생 상태 등에 대해 조사 하

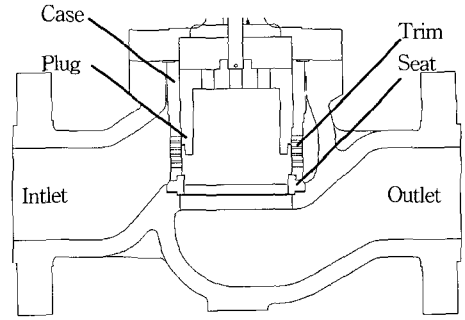


Fig. 1 Sketch of control valve

며 기존 모델의 것과 비교 검토하였다.

2. 수치 해석

본 연구에서는 제어밸브 내부의 캐비테이션 유동을 비압축성 난류유동으로 가정하여 유동해석을 수행하였으며, 밸브에서 일어나는 3차원 유동현상을 해석하기 위해 실제 밸브내부와 동일한 유로형상에 대해 비정렬 격자계를 이용하여 격자를 형성하였다. 또 trim부의 형상 변화와 더불어 밸브 크기 및 trim hole 개수 변화에 따른 계산을 실시하였다. Fig. 1에 본 연구에서 사용된 밸브의 개략도를 나타낸다.

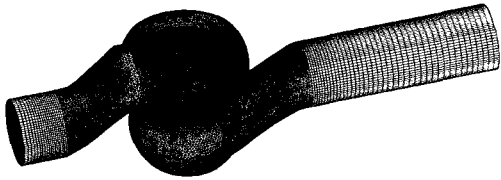
2.1 기초 방정식

밸브내의 난류유동에 대해서는 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 이용하여 해석하였다. 따라서 본 해석에 사용된 시간 평균 운동 방정식과 난류 운동에너지 k 및 난류 소산율 ϵ 에 관한 난류수송 방정식은 다음과 같다.

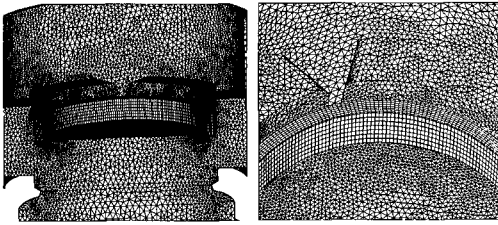
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho u_i' u_j' \right) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \rho P - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

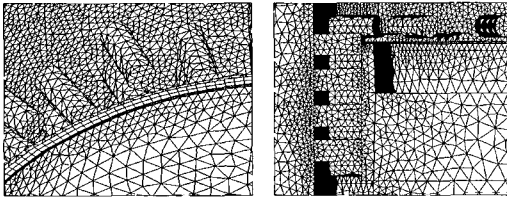
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = C_{\epsilon 1} \frac{\rho P \epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$



(a) Overall view

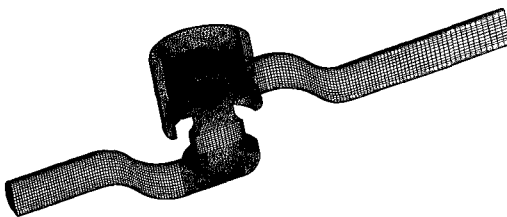


(b) Near trim (conventional type)



(c) Near trim (newly designed, 200A)

Fig. 2 Computational grid for 200 type valve



(a) Overall view



(b) Near trim

Fig. 3 Computational grid of newly designed valve (32A)

여기서 와류점성 (eddy viscosity) μ_t 및 난류량에 대한 생성항 P 는 다음과 같다. 단, Reynolds Stress $\overline{u_i' u_j'} = (2/3)k\delta_{ij} - \nu_t(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

$$P = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_\ell}{\partial x_\ell} \delta_{ij} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} k \frac{\partial u_\ell}{\partial x_\ell} \quad (5)$$

또한 캐비테이션 증기에 대한 질량보존식은 다음과 같다. 단, Γ 는 확산계수.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f) + \nabla \cdot (\rho u f) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla f) + R_e + R_c \quad (6)$$

위 식에서 혼합 밀도 (ρ)와 증기 질량 분율을 나타내는 함수 (f)와의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f}{\rho_v} + \frac{1-f}{\rho_\ell} \quad (7)$$

여기서 ρ_v 와 ρ_ℓ 은 증기와 액체 매체에 대한 밀도를 나타낸다. 증기 수송 방정식 (6)에서 소스항 R_e 및 R_c 는 각각 증발 및 응축의 상변화 현상을 고려하기 위한 것으로 다음과 같이 나타낸다.

$$R_e = C_e \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_\ell \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_\ell}} (1-f) \quad (8)$$

$$R_c = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_\ell \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_\ell}} f \quad (9)$$

여기서 C_e 와 C_c 는 상 변화율을 나타내는 계수이며 σ 는 기액계면에서의 표면 장력을 나타낸다. V_{ch} 는 특성 속도로 $V_{ch} = \sqrt{k}$ 의 관계를 가진다⁽⁵⁾.

2.2 계산 격자

본 연구에서는 외국에서 개발된 췌기형 trim의 hole 모양을 갖는 제어 밸브와 이와 동일한 형상과 크기를 갖되 캐비테이션의 효율적인 제어를 위해 hole 모양을 원통형 (오리피스)으로 하여 BY Controls(주)가 새로 설계 개발한 anti-cavitation trim형 밸브에 대해, 수치해석을 통하여 유동특성과 캐비테이션의 발생 상태를 비교, 검

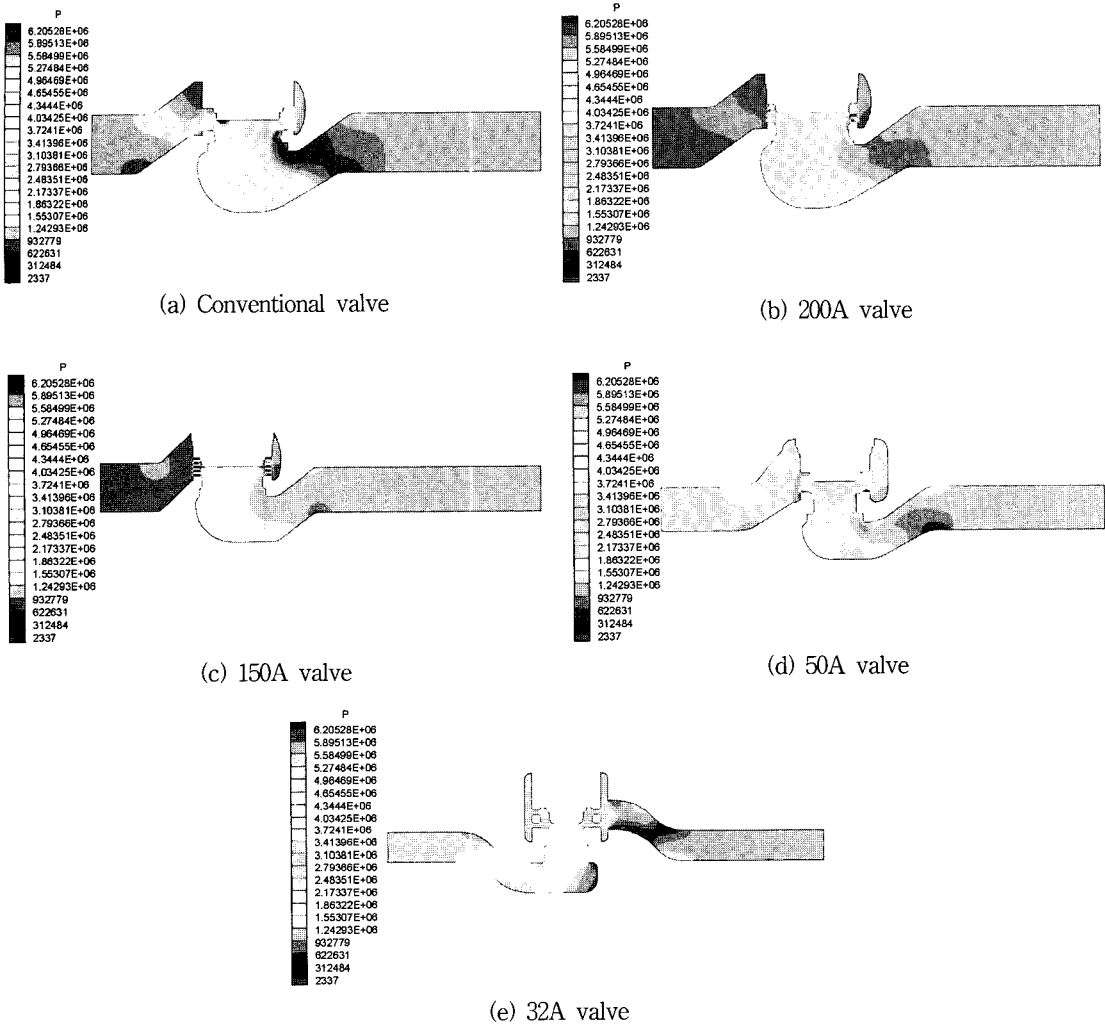


Fig. 4 Static pressure distributions for several valve models at 80% valve opening

토하기 위하여 밸브 개도율이 40%, 60%, 80%, 100% 인 밸브 내부 유동장에 대하여 프리즘과 사면체 및 육면체의 요소로 이루어진 비정렬(unstructured) 다중블럭 계산격자를 이용하여 생성하였다.

Figure 2는 썸기형 trim을 가지는 기존 밸브와 이에 대응하는 것으로 162개의 오리피스가 존재하는 새로 설계된 밸브 (200 A Valve)의 전체적인 격자 형태와, trim부 및 오리피스 주위의 유로 상세도를 나타낸다. Fig. 3은 Fig. 2와는 반대로 밸브 하부에서 유체가 유입되어 상부 배출관 (직경: 200 A의 1/6정도)으로 빠져나가는 것으로 72개의 오리피스가 존재하는 밸브 (32 A Valve)의 전체적인 격자 형태와 오리피스 주위의 상세

도를 나타낸다. 어느 경우도 유동변화가 가장 심하다고 판단되는 trim부와 변곡부 주위에 계산격자를 밀집시켰다.

2.3 경계조건 및 해석기법

본 연구에서는 Figs. 2와 3에서 살펴본 바와 같이 밸브 trim으로 인하여 밸브 내부의 형상이 복잡하게 된 3차원 유동장을 해석하기 위해 캐비테이션 유동해석 전문 프로그램인 ESI-Group사의 상용코드 CFD-ACE를 사용하였다⁵⁾. 유동은 20 °C의 Water를 작동유체로 비압축성 유동으로 가정하여 계산하였다. 입구부에서는 압

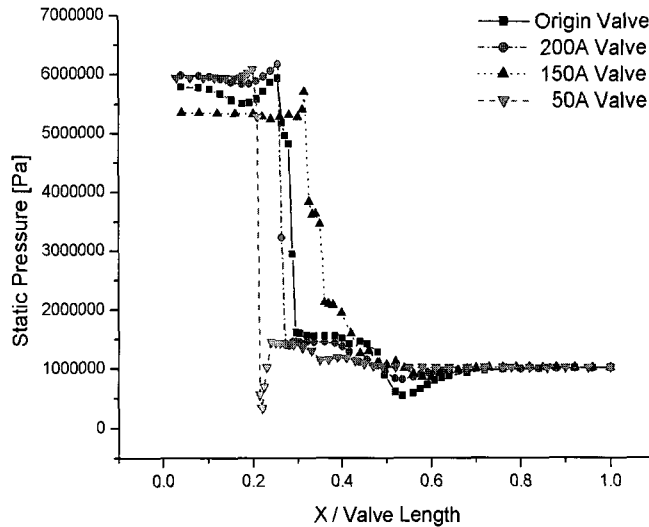


Fig. 5 Static pressure drop along the valve centerline at 80% valve opening

력이 일정한 것으로 간주하고 CFD-ACE의 캐비테이션 해석에 사용하는 total pressure조건을 이용하여 밸브 설계값인 900 psi (6.205MPa)의 압력을 주었으며, 출구 부에는 대기압의 10배의 압력으로 고정된 압력을 경계 조건으로 하고, 이 조건에 맞는 유동이 생성되도록 하였다. 액체의 공기함유도는 1.5×10^{-5} 이다.

CFD-ACE에서는 유동의 지배방정식들을 유한체적법으로 이산화 하며, 압력과 속도보정을 위해 SIMPLE 알고리즘을 적용하여 계산하고 있다⁽⁶⁾. 방정식의 해는 모든 변수에 대한 잔차가 1×10^{-5} 이하가 되었을 때 수렴한 것으로 하였다. 본 연구에서는 기존 모델과 이를 개량한 200 A모델, 32 A모델 외에 입구, 출구 직경이 각각 200 A의 3/4, 1/4배 되는 150 A와 50 A valve로 총 다섯 개의 모델에 대하여 계산하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 밸브의 유동특성

Figure 4는 밸브 trim의 hole 직경과 수, 그리고 밸브 크기에 따라 분류된 5종의 밸브모델에 대한 밸브 대칭면에서의 압력분포를 보여주고 있다. 밸브 개도율은 모두 80%이다. 밸브의 trim부에 쉐기형 hole이 존재하는 경우 (Fig. 4(a))에 비하여 원통형 hole이 존재하는 경우 (Fig. 4(b)), trim내부 압력이 다소 낮아지나 포화증기압 이하로 낮아지는 않는다. 한편 모든 밸브에서 출구의

급확대 부와 배관연결 부위에 다소 낮은 압력이 분포하는 것으로 유로 단면 형상에 따른 전형적인 확대 관내의 유동형태를 보이고 있다. Fig. 5는 각각의 제어밸브 내부에서 밸브의 중심선에 따른 압력변화를 나타낸 것으로 trim부의 바로 앞에서 급격한 유로 감소로 인한 충돌로 일시적으로 압력이 높아지며, 그 후 trim부를 지나 다시 급격한 유로의 변화로 비교적 큰 압력차가 존재하는 것을 알 수 있다. 200 A Valve의 경우 유로내의 최저 압력이 기존 모델의 압력 보다 높게 나타나 있으며, 이는 새로 개발한 anti-cavitation trim을 갖는 밸브가 캐비테이션의 발생가능성이 적음을 의미 한다.

Figs. 6과 7은 각각의 밸브에 대한 속도크기 분포와 속도 벡터 및 streamline을 나타낸 것으로 trim부 주변에서 유입된 유동이 밸브 아래 부분 챔버를 통하여 출구 쪽으로 이동되는 모습이 잘 묘사 되어 있다. 또한 기존 쉐기형 모델의 경우, trim부가 비교적 넓은 단면적을 가진 유로이기 때문에 밸브의 하부 챔버를 지나 출구로 이동하는 불균일하고 비교적 빠른 유동 영역이 존재하는 반면 좌 하방에 커다란 재 순환영역이 존재한다. 그러나 개선된 anti-cavitation trim의 경우에는 유동속도는 유로의 단면적이 좁아진 만큼 trim부를 통과하는 속도가 다소 빠르게 나타나며, 챔버로 이동하면서 회복해 감을 알 수 있고, 챔버내에서 속도가 균일하게 분포됨으로써 챔버 좌 하방에 기존 모델보다는 작은 순환영역이 존재한다. 하부에서 유입되어 상부로 흐르는 32 A Valve (Fig. 6, Fig. 7(c))의 경우에는 밸브 챔버에 순환영역이

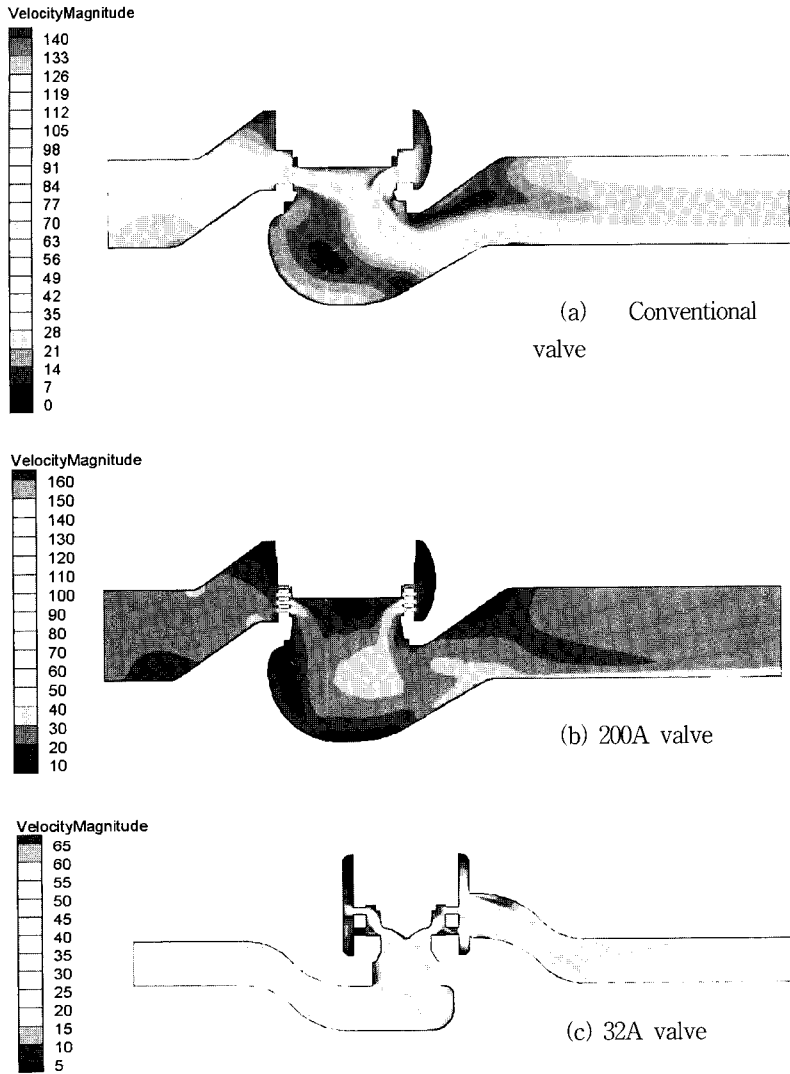


Fig. 6 Velocity magnitude contours at 80% valve opening

존재하지 않는다.

한편, Fig. 8은 기존 모델과 200 A모델의 밸브 trim 중앙부근 plug 하방 횡단면에서의 유동분포를 나타낸다. 밸브 입구에서 들어온 유체가 trim hole을 거쳐 밸브 챔버로 유입되는 모습이 잘 묘사되어 있다. 그러나, 기본 모델의 경우 200A에 비하여 trim부와 챔버 사이에 불균 일한 속도를 보인다. 특히 입구 쪽 trim에 비교적 낮은 압력과 높은 void가 분포하고 있으며, 캐비테이션의 존재를 확인 할 수 있다. 200 A 모델에서는 원주방향으로 유입된 유동이 18개의 trim hole에 고루 분포되어 챔버로 들어와 두 쌍의 와대 (vortex pair)를 형성하며 축 방

향으로 이동하는 유동을 나타내고, 압력분포 또한 양호하다.

3.2 캐비테이션 해석

캐비테이션 생성정도에 대한 예측은 압력분포 및 기체의 함유도를 나타내는 void volume fraction 분포를 조사함으로써 가능하다. Fig. 9는 본 수치시뮬레이션을 통하여 구한 void율 분포를 나타낸다. 200 A Valve와 150 A Valve (그림 생략)의 경우 유동장 전역에 캐비테이션은 존재하지 않고 다만, 압력이 낮고 상대적으로 동

Anti-Cavitation Trim을 갖는 고차압 제어밸브의 유동특성에 관한 수치해석

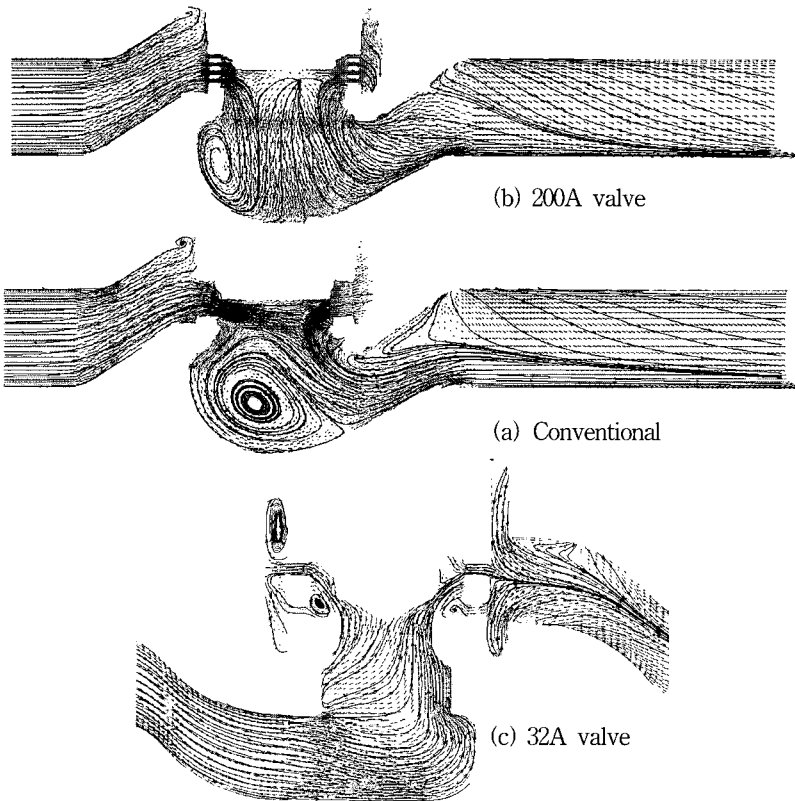


Fig. 7 Velocity vector and streamlines at 80% valve opening

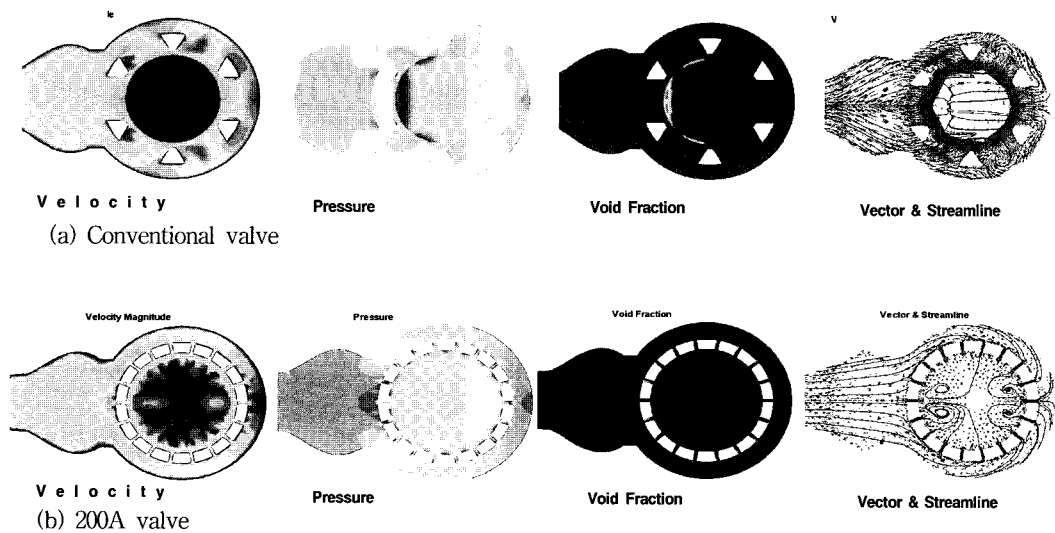


Fig. 8 Computational flow patterns of velocity magnitude, pressure, void fraction contours and streamlines with velocity vectors on cross-sectional plane at 80% valve opening

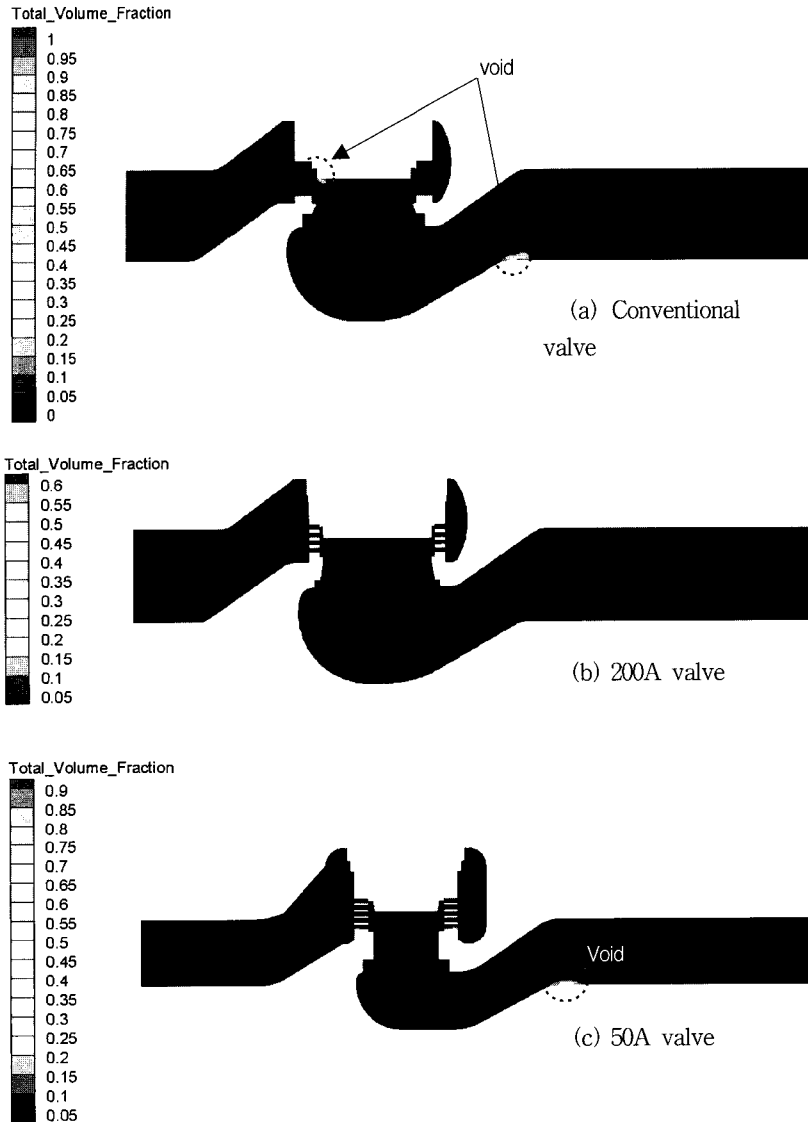


Fig. 9 Void fraction distribution at 80% valve opening

압이 큰 trim hole 부분 (예를 들면 Fig. 8(b)의 void fraction 분포)에 국소적으로 작은 량의 void 분포를 보였다. 50 A Valve의 경우 또한 hole 부분에 국소적으로 작은 량의 void 분포를 보이고 있으나, 챔버 아래 부분과 출구배관이 연결되는 부분에서는 캐비테이션의 발생 가능성이 다소 높은 것으로 판단된다. 32 A Valve의 경우는 밸브 구조상 유동장내 캐비테이션의 발생 가능성은 매우 낮으나, 유동이 trim hole을 통과한 후 출구로 빠져나가는 순간 아주 작은 량의 void율 분포를 보였다

(그림 생략). 기존 밸브의 경우에는 trim부를 통과함과 동시에 빠른 속도로 하류로 흘러가기 때문에 trim을 통과한 후 plug 하부 면과 밸브의 출구부와 연결되는 부분에서 다소 높은 void율을 보이고 있다.

이와 같이 고 차압 제어 밸브의 경우, 밸브 입구주위에 있는 trim부와 출구배관과의 연결부위에서 void의 존재 가능성이 높으나, 그림에서 보는 바와 같이 기존 썸기형 trim 대신 원통형 오리피스가 존재하는 anti-cavitation trim 설계를 함으로써 유동이 비교적 고르게

분포되고 캐비테이션의 발생 가능성을 낮출 수 있다.

3.3 밸브 유량 계수 (C_v)

밸브의 특성중 하나인 유량계수 (C_v)는 압력손실과 유량의 상관관계를 나타내며, 밸브 전후에서의 차압이 1 bar 일 때 밸브를 통과하는 유량을 m^3/h 로 나타낸 값을 말한다. 이러한 유량계수는 밸브의 구경을 선정하는데 사용할 수 있으며 아래의 식 (10)을 이용하여 구할 수 있다.

$$C_v = 1.17Q\sqrt{\frac{G}{\Delta p}} \quad (10)$$

여기서, Q 는 밸브를 통과하는 유량으로 단위는 m^3/h 이며 G 는 비중 (specific gravity)을 Δp 는 밸브의 입구와 출구의 차압을 의미한다.

본 연구에서는 밸브의 유량계수를 구하기 위해 새롭게 설계 개발한 200 A Valve에 대해 수치계산에 있어서 캐비테이션을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 밸브 개도율의 변화에 따른 수치해석을 수행하였으며, Fig. 10은 200 A Valve에 대해 실험을 통해 얻은 유량계수의 데이터⁽⁶⁾와 본 연구에서 예측한 값의 비교를 나타낸다. 그림의 가로축은 밸브 개도율을 나타내며, 세로축은 밸브 개도율이 100%일 때의 유량계수를 100%로 하여 밸브 개도율의 변화에 따른 유량계수를 %로 나타낸 값이다. 200 A Valve는 밸브 개도율에 선형 비례형 유량특

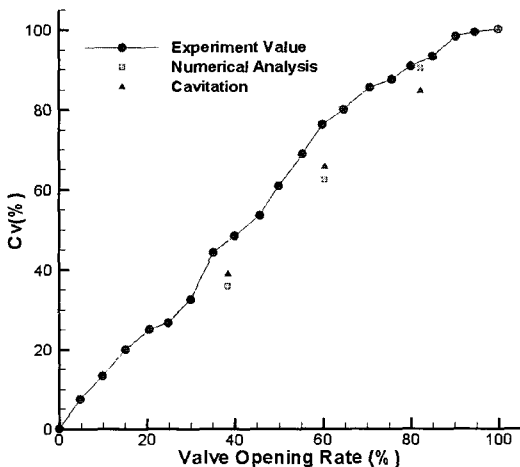


Fig. 10 Valve flow coefficient

성을 나타내며, 대체적으로 실험값과 좋은 비교를 보이거나 캐비테이션을 고려하여 계산한 경우 (그림에서 ▲ 기호로 표시)가 캐비테이션을 고려하지 않은 경우 (그림에서 ■ 기호로 표시) 보다 실험값에 가깝다. 그러나 설계점에 가까운 개도율 80%인 경우에는 40%, 60%와는 다른 거동을 나타낸다. 이는 개도율의 증가와 함께 증가한 유량으로 순환영역이 감소되고 그 만큼 압력손실이 낮아졌기 때문으로 해석된다. 그러나 캐비테이션을 고려한 경우에는 유동의 순환 외에도 액체에 포함된 공기 함유도와 void가 고려된 유량평가이기 때문에 전 영역에 걸쳐 다소 과소 평가하고 있으나 실험값과의 비교는 거의 같은 경향을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구는 anti-cavitation trim의 설치로 복잡한 유로형상을 갖는 LNG 선박용 고차압 제어밸브에 대해, 내부의 유동특성을 조사하기 위하여 CFD-ACE 상용코드를 이용하여 3차원 비압축성 캐비테이션 유동해석을 하였다. 해석결과, 전체적으로 밸브 챔버 및 입출구 관내 유동이 잘 묘사되었으며, 밸브내부의 유동현상을 쉽게 이해할 수 있다. 새로 설계, 제작된 200 A valve의 경우 기존 모델에 비하여 출구 유로 중앙의 정압분포가 챔버 내 유동 속도의 균등한 분배로 말미암아 다소 높았으며, 캐비테이션으로 발전하지 않는다. 또한, trim부가 가느다란 원통형 hole을 다수 배치한 복잡한 유로형상으로 인해 유동저항이 증가하였음에도 불구하고 밸브 내부의 캐비테이션 발생 가능성은 매우 낮았다. 수치해석을 통해 평가된 밸브 유량계수는 개도율 40%-100%의 범위에서 실험값과 정량적으로 좋은 비교를 나타내며, 새롭게 설계된 200 A Valve가 기존 모델에 비해 anti-cavitation trim의 역할이 보다 우수함을 확인 하였다.

후 기

이 논문은 2005년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음. 또한 이 연구의 일부는 중소기업청 중소기업 기술혁신개발사업 과제의 지원으로 수행되었음을 밝히고 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Brennen, C.E., 1995, Cavitation and Bubble

- Dynamics, Oxford Univ. Press, Oxford.
- (2) Dickenson, T.C., 1999, Valves Piping and Pipelines Handbook, Elsevier. Amsterdam.
 - (3) 정민호, 양상민, 이호영, 2005, “공기구동형 글로브 밸브의 3차원 유동해석,” 유체기계저널 제8권, 제4호, pp. 7~13.
 - (4) 윤준용, 변성준, 양재모, 이도형, 2001, “고차압 제어용 글로브 밸브 트림 내부의 3차원 유동장 해석,” 유체기계저널 제4권, 제3호, pp. 14~20.
 - (5) CFD-ACE User Manual, Version 2006, 2006, ESI- Group.
 - (6) 중소기업기술혁신개발사업과제 [LNG 선박용 고차압 Control Valve 개발] 보고서, 2006, BY Controls (주).