

산업용 안전 릴리프밸브 유동특성에 관한 수치연구

강상모[†] · 이봉희^{*}

(원고접수일 : 2009년 6월 8일, 원고수정일 : 2009년 7월 14일, 심사완료일 : 2009년 7월 20일)

A Numerical Study on the Flow Characteristics through an Industrial Safety Relief Valve

Sangmo Kang[†] and Bong-Hee Lee^{*}

Abstract : In this paper, the flow characteristics through an industrial safety relief valve used to protect the crankcase room in a large-sized marine engine have been numerically investigated using the moving-mesh strategy. With the room pressure higher than the cracking one, the spring-loaded disc becomes open and then the air in the room blows off into the atmosphere, resulting in the reduction of the room pressure and then the shutoff of the disc. Numerical simulations are performed on the compressible air flow through the relief valve ($\phi 160\text{mm}$) with the initial room pressure (0.11bar or 0.12bar) higher than the cracking one (0.1bar). The numerical method has been validated by comparing the results with the empirical ones. Results show that the disc motion and flow characteristics can be successfully simulated using the moving-mesh strategy and depend strongly on the spring stiffness and the flow passage shape. With increasing spring stiffness, the maximum disc displacement decreases and thus the total disc-opening time also decreases. In addition, the flow passage shape makes a significant effect on the velocity and direction of the flow.

Key words : Computational fluid dynamics(전산유체역학), Moving mesh(이동격자), Safety relief valve(안전 릴리프밸브)

1. 서 론

안전 릴리프밸브(safety relief valves)는 발전소나 일반 플랜트 계통 내의 압력용기, 증기 발생장치, 배관 및 부속기기 등을 설계 압력 이상의 과잉 압력(excess pressure)으로부터 기계적 손상

또는 폭발에 따른 물리적 또는 인적 재해를 예방하기 위한 안전 관련 핵심 기기이다. 릴리프밸브는 장치에 허용되는 최대압력을 미리 설정하여 작동 중에 그 설정압력 이상이 되면 개방되어 급속히 압력을 떨어뜨리고 정상 압력으로 되돌아오면 다시 닫히는 밸브로, 단순 기능을 수행하는 일종의 기계

[†] 교신저자(동아대학교 기계공학과, E-mail:kangsm@dau.ac.kr, Tel:051-200-7636)

^{*} 동아대학교 대학원 기계공학과

장치이나 정확한 작동성과 강한 내구성이 요구되는 매우 세밀한 기기이기도 하다.^[1] 따라서 어떠한 상황에서든 확실하게 작동해야 하는 최후의 기계적 안전장치이기 때문에 이에 대한 작동 메커니즘을 정확히 파악하고 설계인자를 확보하는 것이 매우 중요하다.

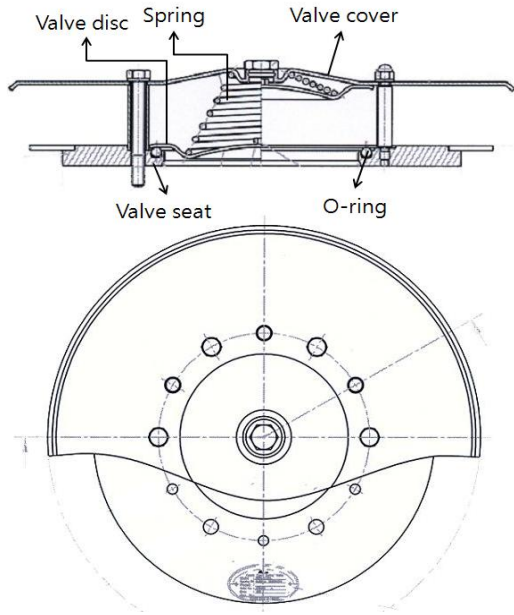


Fig. 1 A schematic diagram of the crankcase safety relief valve to be simulated in the present study (made in “A” company)

최근에 잦은 사고 때문에 선박의 크랭크케이스 폭발(crankcase explosion) 문제가 많은 연구 대상이 되고 있다.^[2] 보통의 경우에는 크랭크케이스 안에 산소가 존재하더라도 윤활유 스플래시(lubricating oil splashing)에 의해 발생하는 액적(oil droplets)의 크기가 크고 공기 중 윤활유 액적 농도가 낮기 때문에 연소가 쉽게 일어나지 않는다. 그러나 움직이는 부품끼리 상호마찰에 의해 기계적인 손상이 일어난다면 크랭크케이스 실(crankcase room) 안에 고온 부위(hot spot)가 국부적으로 나타날 수 있다. 이럴 경우 고온 부위에서는 윤활유 스플래시에 의한 액적이 충분히 기화될 수 있다. 기화된 증기는 크랭크케이스 실 안

에서 보다 낮은 온도 부위로 순환하게 되고, 그 위치에서 응축되어 크기가 매우 작은 하얀 윤활유 분무(oil mist)로 바뀐다. 만약에 이 분무가 충분히 높은 농도 상태에서 고온 부위와 만나게 되면 연소가 일어날 수 있고 경우에 따라 폭발도 일어나게 된다. 폭발이 일어나게 되면 크랭크케이스 실 안의 압력이 급격하게 올라가게 되고 이는 자칫 큰 사고로 이어질 수 있다. 따라서 보통 선박의 경우 엔진의 크랭크케이스 실을 보호하기 위하여 안전 릴리프밸브를 설치한다. 뿐만 아니라 폭발이 일어나면 높은 압력 때문에 많은 양의 윤활유 분무가 엔진실(engine room)로 밀려나가게 되는데, 이때 화염 선단(flame front)에 의한 추가 연소를 막기 위하여 보통은 릴리프밸브와 함께 화염 방지장치(flame arresters)를 설치한다.

본 연구에서는 선박 엔진의 크랭크케이스 실용 안전 릴리프밸브에 대하여 밸브가 작동할 때 유동 해석을 수행하고, 이를 통해서 밸브 작동 메커니즘을 파악하고자 한다. 이를 위하여 “A” 회사에서 생산하고 있는 디스크(disc) 직경 $\phi = 160\text{mm}$ 인 대형 선박용 릴리프밸브를 선택하였다(Fig. 1 참조). 릴리프밸브는 밸브 디스크(valve disc)의 운동과 밸브 내부의 유동 상태에 따라 밸브의 특성이 매우 달라지기 때문에 디스크의 운동특성과 밸브 내부의 유동현상을 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 릴리프밸브는 작동 특성상 짧은 시간동안 작동하고 비정상(unsteadiness) 특성이 매우 강하기 때문에 시간에 따른 밸브 디스크의 거동과 이때의 내부 유동 현상을 관찰하는 것이 극히 어렵다. 따라서 지금까지 전산유체역학(computational fluid dynamics: CFD)을 통하여 릴리프밸브에 대한 유동특성을 알아보기 위한 시도가 드물었다. 지금까지의 릴리프밸브에 대한 유동해석은 디스크를 어느 임의의 위치에 고정시킨 상태에서만 유동현상을 관찰해왔으며,^{[3],[4]} 따라서 밸브 디스크의 거동특성과 개폐시간을 정확히 예측하기가 매우 힘들었다. 본 연구에서는 상용 프로그램인 ANSYS CFX11.0의 이동격자(moving mesh) 기법^[5]을 도입하여 밸브 작동 시 시간에 따른 밸브 디스크의 거동과 이에 따른 유동현상을 파악하였다. 이어 디

스크 끝단의 경사각(disc-edge angle)을 통한 밸브 유로 형상과 스프링 상수(spring coefficient)를 변화시키면서 밸브 내부의 유동특성이 어떻게 변화하는지를 살펴보았다.

2. 수치해석 방법

2.1 유동 모델

Fig. 1은 본 연구에서 채택한 대형 엔진 크랭크 케이스 실에 부착되는 릴리프밸브의 단면과 외관을 나타낸 것이며, 이 밸브는 밸브 커버(valve cover), 스프링(spring), 밸브 디스크, 오링(O-ring), 밸브 시트(valve seat) 등으로 구성되어 있다. 특히 디스크의 끝단은 경사각을 가지고 있으며(Fig. 3 참조), 이 각도의 변경을 통해서 유로의 형상을 바꿀 수 있다. 사용 유체는 공기(air)이며, 크랭크케이스 실 내부와 밸브 주변의 온도는 $T=1250\text{K}$ 로 균일하다고 가정하였다. 계산 편의상 공기는 압력에 따라 밀도가 달라지는 압축성 이상 기체로 가정하였으며, 따라서 국부 밀도(ρ)와 국부 압력(P)과의 관계는 상태방정식($\rho = P/RT$, 여기서 R 은 기체상수임)으로부터 구할 수 있다. 그리고 이 밸브는 특별한 언급이 없는 한 스프링 상수가 $k=637\text{N/m}$ 인 스프링이 사용되었으며, 밸브 디스크 개방 압력(cracking pressure)은 $P_c=0.1\text{bar}$ (계기압력)로 맞추어져 있다. 게다가 밸브 디스크의 끝단 경사각은 $\alpha=15^\circ$ 로 유지되었다.

유동은 스프링의 형상에 의해 크게 영향을 받지 않는다는 가정 하에 계산의 편의상 계산영역으로부터 스프링을 제외하였다. 또한 릴리프밸브의 형상이 중심축을 기준으로 축대칭 형태를 보이므로 축방향과 반경 방향으로 구성된 2차원 유동으로 단순화시켰다. 유동해석을 위하여 실제 압력이 작용하는 크랭크케이스 실을 모사하기 위하여 동일한 용적을 가지는 원통 모양의 탱크로 모델링하여 릴리프밸브 하단에 별도로 부착하였다.

2.2 수치 기법

릴리프밸브는 탱크(크랭크케이스 실 해당) 내 압

력이 설정압력 이상으로 상승하는 것을 방지하는 기계적인 기기이다. 탱크 내 압력이 미리 설정된 압력 이하에서는 밸브는 폐쇄된 상태가 된다. 반면에 탱크 내 압력이 설정된 압력 이상으로 상승하면 밸브는 개방되어 탱크 내 유체를 대기(atmosphere)로 방출하고, 이어 탱크 내 압력이 설정압력 이하로 떨어질 때까지는 개방된 상태를 유지한다. 따라서 밸브 디스크의 운동은 밸브 내 유동상태(압력 및 속도 등)와 스프링에 의한 힘의 균형에 의해 결정되며 밸브 디스크의 수직 변위(vertical displacement)는 다음과 같이 구할 수 있다(Fig. 2 참조).

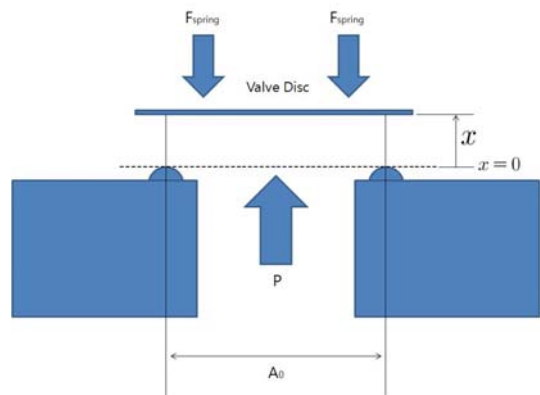


Fig. 2 A schematic diagram for deriving the motion equation of the valve disc in the relief valve

$$m\ddot{x} + kx = \Delta F = F_{flow} - F_{flow,0} \quad (1)$$

여기서 x 는 오링 상단을 원점으로 하는 디스크 변위이며, m 과 k 는 각각 디스크 질량 및 스프링 상수이다. 그리고 F_{flow} 와 $F_{flow,0}$ 는 각각 임의의 시간(t)과 초기($t=0$)에 유체가 디스크에 작용하는 힘(유체력, flow force)을 나타내며, 이는 유동해석(CFD)을 통해서 얻어진다.

본 연구에서는 유동해석을 위하여 열·유체공학 분야에서 우수한 해석능력을 보이는 상용 프로그램인 ANSYS CFX11.0^[5]을 사용하였다. 유동장을 해석하기 위한 난류 모델로서는 SST(shear-stress transport) 모델^[5]을 적용하였다. 디스크 이동에

따른 유동영역의 변화를 반영하기 위하여 이동격자 (moving mesh) 기법을 적용하여 릴리프밸브 내 유동현상을 시간에 따라 해석하였다.

2.3 격자 생성

Fig. 3은 유동해석을 수행하기 위한 밸브 디스크 주변의 격자를 보여준다. 작용하는 유체력에 따라 디스크가 수직 이동을 하게 되는데, 이동격자 기법을 적용하게 되면 디스크 상단부와 하단부의 격자들은 수직방향으로 격자 크기가 시간에 따라 변하게 된다. 밸브 디스크가 최대의 변위 위치에 이르게 되면 디스크 하단부의 격자 크기가 최대가 되어 유동현상을 정확하게 파악하기 어려울 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 가능한 많은 격자를

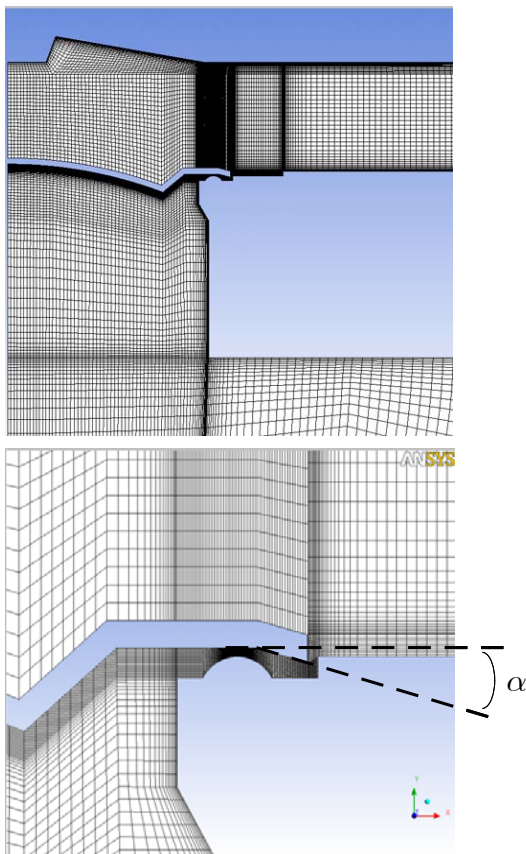


Fig. 3 Grids generated around the valve disc for the simulation. Here, α is the angle of the disc edge

하단부에 집중해야 한다. 또한 상단부의 경우 격자를 고르게 생성하지 않으면 밸브 디스크가 수직방향으로 이동하면서 음의 격자(negative mesh) 현상이 발생하여 해석이 정확하게 수행되지 않을 수도 있다.

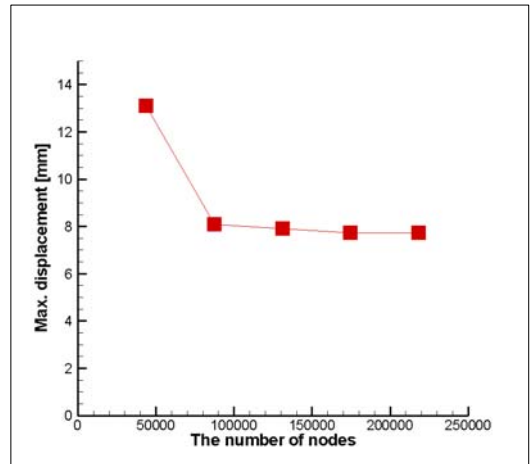


Fig. 4 Spatial-resolution test: effect of the node number on the maximum displacement at $P_0 = 0.11$ bar

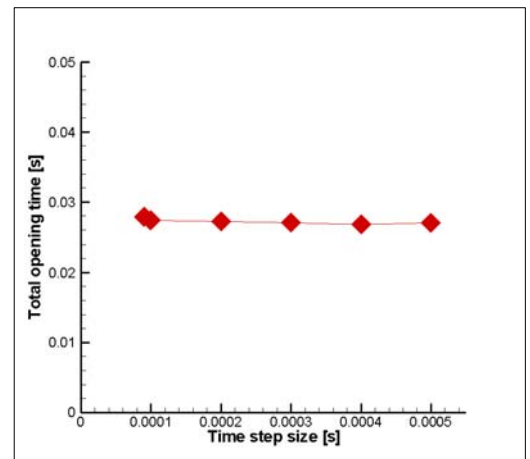


Fig. 5 Temporal-resolution test: effect of the time-step size on the total opening time at $P_0 = 0.11$ bar

본 연구에서 유동해석에 필요한 적절한 격자 개수(node number)와 시간 간격(time-step size)을 찾기 위하여 탱크의 초기 압력

$P_0 = 0.11 \text{ bar}$ 에 대하여 격자 개수와 시간 간격을 변화시키면서 유동해석을 수행하였다. Fig. 4는 격자의 개수에 대한 밸브 디스크의 최대 변위 (maximum displacement)를 보여준다. 이어 Fig. 5는 시간 간격에 대한 총 개폐시간(total opening time)을 보여준다. 결과에 따라 본 연구에서는 최종적으로 격자 개수와 시간 간격을 각각 131,100개와 0.0003sec을 선정하여 유동해석을 수행하였다.

3. 수치 결과

3.1 밸브의 작동 메카니즘

먼저 밸브가 닫혔을 때 탱크(또는 디스크의 하단)의 초기 압력을 $P_0 = 0.11 \text{ bar}$ 로 적용하여 유동해석을 수행하였다. 해석 결과, 시간에 따른 밸브 디스크의 변위를 Fig. 6에 나타내었다. 초기 탱크 압력이 밸브의 설정 압력보다 크기 때문에 밸브 디스크는 열리게 되고, 이어 밸브 개방 후 $t = 0.017 \text{ sec}$ 에 밸브 디스크가 받는 스프링 힘과 유입부에서 디스크를 밀어 올리는 유체력이 같아지는 위치인 약 $x_{\max} = 7.91 \text{ mm}$ 까지 디스크는 도달하게 된다. 디스크가 상승하면서 디스크와 시트 사이의

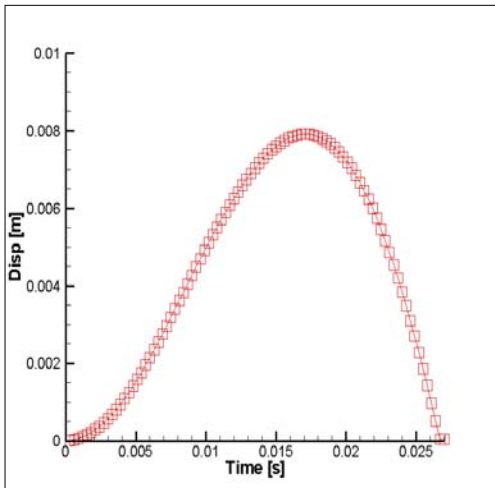


Fig. 6 Temporal evolution of the valve-disc displacement at $P_0 = 0.11 \text{ bar}$

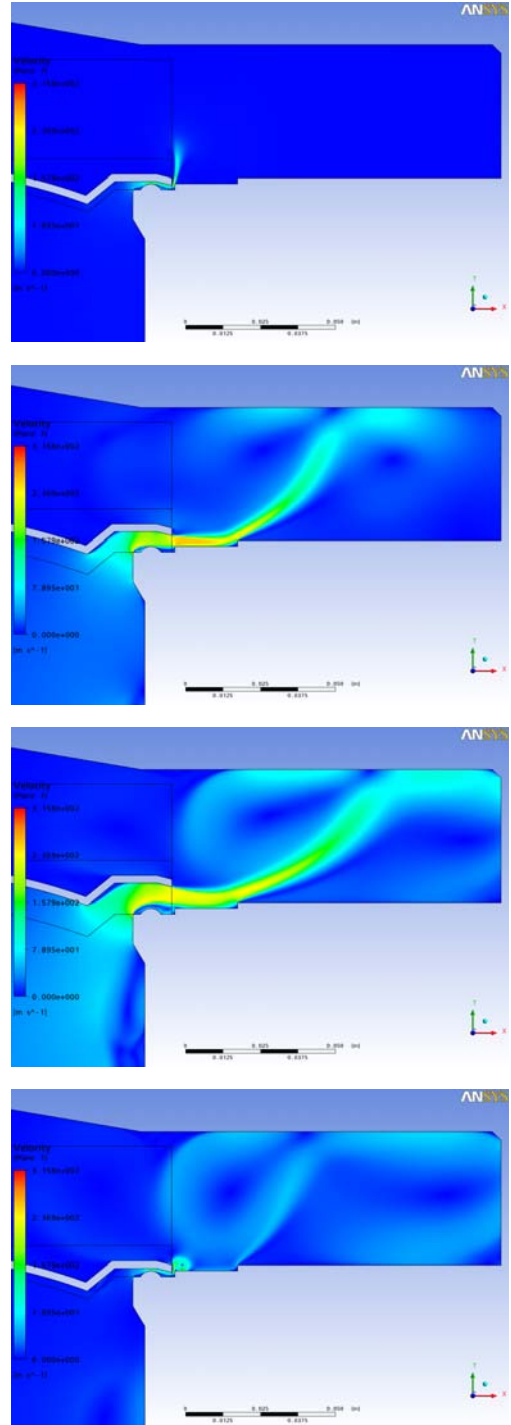


Fig. 7 Instantaneous velocity field at $t = 0.0003, 0.009, 0.017, 0.0267 \text{ sec}$ (in sequence from top) around the valve disc at $P_0 = 0.11 \text{ bar}$

개구 면적(또는 오리피스)이 점점 증가되어 유체가 대기로 빠르게 방출된다. 유체가 대기로 방출되게 되면 탱크의 압력은 낮아지게 되며, 따라서 디스크를 밀어 올리는 유체력이 스프링 힘보다 낮아지게 되면서 디스크는 다시 하강하게 된다. 이어 탱크 압력이 설정 압력 이하가 되면서 개방 후 약 $t=0.027\text{sec}$ 일 때 디스크는 시트에 안착이 되고 결국 밸브는 닫히게 된다.

Fig. 7은 디스크 개방 후 $t=0.0003, 0.009, 0.017, 0.0267\text{sec}$ 에서의 속도장을 나타낸다. 여기서 선택한 시간은 디스크가 열린 직후, 디스크가 상승 중일 때, 디스크가 최대 변위에 있을 때, 그리고 디스크가 닫히기 직전을 각각 나타낸다. $t=0.0003$ 에서와 같이 디스크가 열린 직후에는 디스크에 작용하는 유체력이 스프링 힘보다 크기 때문에 디스크가 열리기 시작하고, 동시에 디스크와 밸브 시트 사이의 개구면적을 통해 유체가 빠져 나가면서 크랭크케이스 실 내부의 압력도 점차 감소한다. 그리고 밸브 디스크와 시트에 의한 유로 형상 때문에 공기 제트는 위쪽으로 분출한다. $t=0.009$ 에서 보듯이 더욱 넓어진 개구면적을 통하여 탱크 내의 많은 유량이 대기로 빠져 나가고, 유속도 점점 빨라진다. 개구면적을 통하여 급속히 빠져나간 공기는 밸브 출구 부에 있는 계단(step)에 의해 유동흐름의 방향이 밸브 커버 쪽으로 바뀌게 된다. 이어 밸브 커버에 충돌한 제트는 큰 와를 형성하며 대기로 흐른다. 동시에 탱크 압력은 더욱 감소한다. 디스크가 최대로 개방된 $t=0.017$ 에서는 개구면적을 통해 빠져나가는 유량은 최대로 증가하며, 탱크의 압력은 더욱 떨어지게 되어 밸브의 설정압력과 거의 유사하게 된다. 따라서 이후에 밸브 디스크는 하강하기 시작한다. $t=0.0267$ 에서와 같이 밸브가 닫히기 직전에 탱크의 압력은 밸브이 설정압력보다 낮아지게 된다. 이때 개구면적이 급속히 감소되면서 밸브 디스크의 끝단부에 강한 와가 형성되는 것을 관찰할 수 있다.

3.2 수치결과 검증

본 연구를 통해서 얻어진 수치결과를 검증하기 위하여 경험 해(empirical solution)와 비교하였

다. 이를 위하여 (1)의 우변 항에 있는 유체력은 단지 밸브 디스크의 양단에 형성된 압력 차이에 의해서만 생긴다고 가정한다. 그리고 디스크 상단의 압력은 탱크의 압력과 동일하고 상단의 압력은 대기압이라고 가정한다. 이럴 경우 (1)은 다음과 같이 다시 정리된다.

$$m\ddot{x}+kx=\Delta F=(P_t-P_{t,0})A_0 \quad (2)$$

여기서 P_t 와 $P_{t,0}$ 는 각각 어느 임의의 시간과 초기에서의 탱크 압력을 가리키며, A_0 는 밸브 디스크 면적이다. 탱크 내부의 공기는 탱크 내 압력에 의해서 밸브의 개구면적을 통해 대기로 배출된다고 가정하면, 탱크 내 압력 P_t 는 간단한 산술계산에 의해 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\frac{dP_t}{dt}=-\dot{m}\frac{RT}{V_t} \quad (3)$$

여기서 V_t 는 탱크 체적이고, \dot{m} 은 밸브의 개구면적을 통하여 흘러나가는 질량유량(mass flow rate)을 가리킨다. 질량유량은 아임계 조건(subcritical condition)에서 탱크 내 절대압력이 1.89bar이하인 경우에 경험적으로 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹⁾

$$\dot{m}=C_{out}AP_t\sqrt{\frac{7}{RT}\left[\left(\frac{P_a}{P_t}\right)^{1.4286}-\left(\frac{P_a}{P_t}\right)^{1.714}\right]} \quad (4)$$

여기서 C_{out} 은 유량계수(discharge coefficient)이고, A 는 디스크 변위에 따른 개구면적이며, P_a 는 대기압($\approx 1\text{bar}$)을 가리킨다. (2)-(4)를 연립하여 수치해석을 수행하면 밸브 디스크의 변위, 탱크 내 압력 등을 쉽게 구할 수 있다. 이는 질량유량이 경험식 (4)를 통하여 직접 구할 수 있기 때문에 별도의 유동해석을 필요로 하지 않는다.

유량계수(C_{out})를 변화시키면서 시간에 따른 밸브 디스크의 변위를 구하였으며, 이를 수치적인 방법으로 의해 얻은 해와 직접 비교하였다. Fig. 8은 $C_{out}=1.2, 1.4, 1.6$ 에 대한 비교 결과를 보여준다.

결과에 따르면 $C_{out} = 1.4$ 인 경우에 수치 해와 경험 해가 거의 일치하였다. 유량계수는 유로 형상에 따라 매우 달라지기 때문에 이론적으로나 경험적으로나 구하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 수치 해와 직접 비교하여 $C_{out} = 1.4$ 가 가장 적합하다는 결론을 얻었다. 그럼에도 불구하고 수치 해와 경험 해 사이에 시간에 따른 변위의 양상이 거의 일치한다는 사실은 본 연구에 사용된 이동격자 기법이 충분히 정확하다는 것을 말해준다.

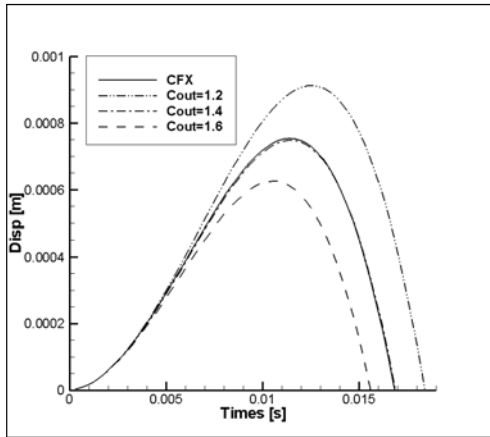


Fig. 8 Validation of the numerical method: comparison between the numerical and empirical results at $P_0 = 0.11$ bar

3.3 매개변수 연구

본 연구에서는 밸브시트 주변의 유로형상과 스프링의 변화에 따른 유동장의 변화를 살펴보기 위하여 밸브 디스크 끝단의 경사각도와 스프링 상수를 차례로 변화시키면서 동일한 수치해석을 수행하였다. 여기서 탱크의 초기 압력은 $P_0 = 0.12$ bar로 주어졌던 것으로 가정하였다.

먼저 밸브 유로형상이 밸브 작동에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여 디스크 끝단의 경사각도를 변화시키면서 밸브 디스크의 운동과 디스크 주변의 유동특성을 관찰하였으며, 그 결과를 Figs. 9와 10에 나타내었다. Fig. 9는 디스크의 끝단 각도를 $0^\circ - 50^\circ$ 사이에서 변화시키면서 시간에 대한 디스크의 변위와 최대 디스크 변위를 나타내었

다. 경사 각도가 증가하면 증가할수록 디스크의 최대 변위와 디스크의 개방시간이 점점 증가함을 알 수 있다. 이는 각도가 작아지면 같은 변위라 할지라도 개구면적이 증가하게 되며, 따라서 더 많은 유량이 대기로 방출되기 때문이다. 특히 $\alpha = 15^\circ$ 보다 작은 경우와 큰 경우가 서로 다른 특성을 보여준다. 다시 말하면 $\alpha = 15^\circ$ 보다 작은 경우가 큰 경우보다 디스크 끝단 각도의 영향을 더 민감하게 받는다. 이러한 특성은 Fig. 10에서 보다 뚜렷하

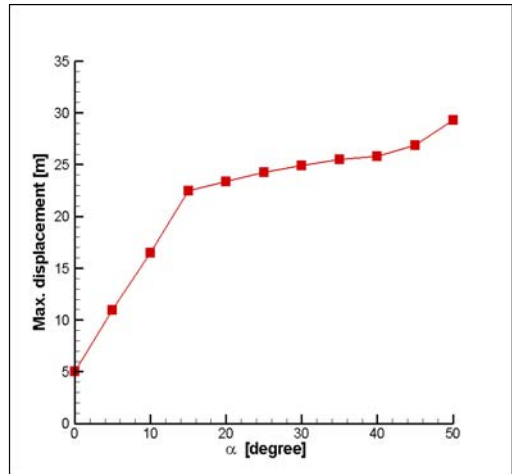
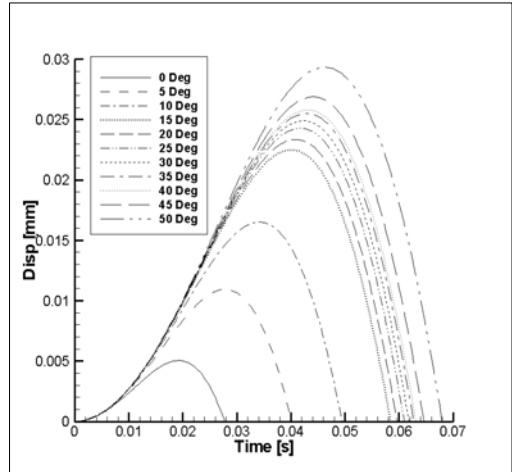


Fig. 9 Effect of the valve-disc edge angle on the disc motion: time trace of the valve-disc displacement (upper plot) and variation of the maximum valve-disc displacement with the angle (lower one) at $P_0 = 0.12$ bar

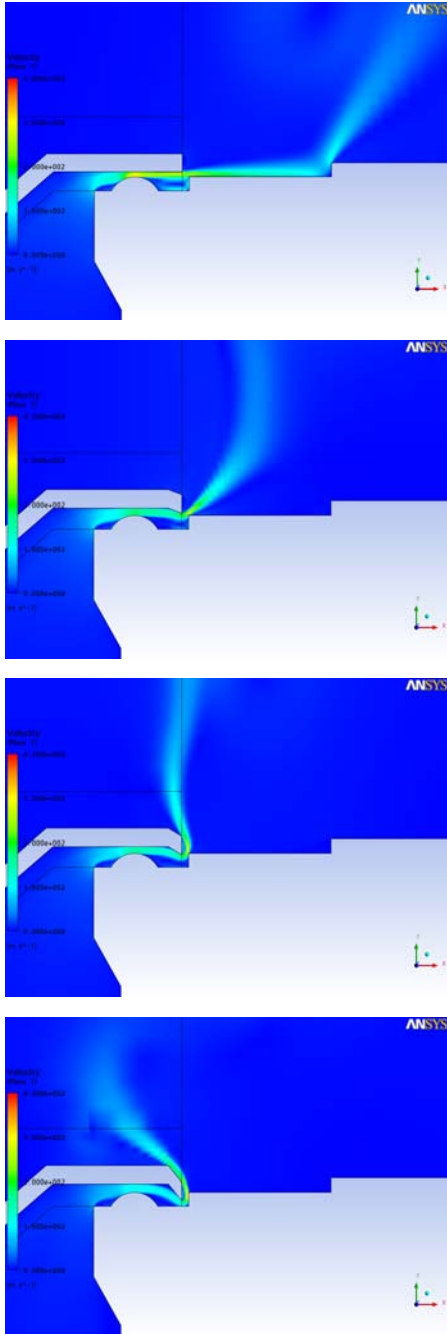


Fig. 10 Effect of the valve-disc edge angle on the flow field: Instantaneous velocity field around the valve disc at $t=0.0003$ according to the disc-edge angle, $\alpha=0^\circ$, 15° , 30° and 45° (in sequence from top) at $P_0=0.12$ bar

게 알 수 있다. Fig. 10은 디스크 끝단의 경사각도 별로 디스크가 열린 직후인 $t=0.003$ sec에서의 속도장을 보여준다. 디스크 끝단 경사 각도가 커질수록 밸브 개방 초기에 개구면적이 작아져 탱크에서 빠져 나가는 유량에 영향을 주며, 이로 인해 밸브의 작동 시간과 디스크의 변위가 증가하는 것으로 판단된다. 비록 이 결과는 특정 제품에 대한 결과이지만 디스크 주변의 유로 형상이 밸브 특성을 결정하는 데에 매우 중요하다는 사실을 명백히 보여주고 있다.

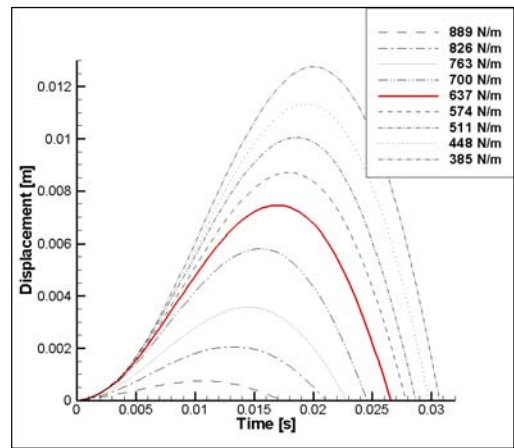


Fig. 11 Effect of the spring coefficient on the disc motion: time trace of the valve-disc displacement at $P_0=0.11$ bar

또한 스프링 상수는 디스크 운동 특성을 결정하는 중요한 매개변수이므로 스프링 상수가 밸브의 거동에 어떠한 영향을 주는지 관찰하였다. 이를 위하여 탱크 초기 압력 $P_0=0.11$ bar에 대하여 스프링 상수를 $637\text{N/m} \pm 40\%$ 내에서 변화시키면서 유동해석을 수행하였다. 그리고 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 보여주듯이 스프링 상수가 낮을수록 디스크의 최대 변위는 거의 선형적으로 증가하고, 따라서 디스크 개방시간이 함께 증가함을 알 수 있다.

4. 결 론

산업용 밸브 중 대표적인 릴리프밸브의 유동특성

을 파악하기 위하여 대형 엔진 크랭크케이스 실에 부착되는 안전 릴리프밸브를 해석모델로 선정하고 이동격자 기법을 적용하여 밸브 디스크의 운동과 디스크 주변의 유동을 해석하였다. 이어 디스크 끝단의 경사 각도를 통한 유로형상과 스프링 상수를 변화시키면서 밸브의 거동 특성을 역시 고찰하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 릴리프밸브에서 디스크 거동특성과 디스크 주변의 유동특성은 이동격자 기법을 통하여 성공적으로 해석될 수 있었다. 또한 그 결과를 경험 해와 비교하여 이동격자 기법의 신뢰성을 확보하였다.

2. 디스크 거동특성과 디스크 주변 유동특성은 유로형상과 스프링 상수의 변화에 따라 매우 달라짐을 알 수 있었다. 유로형상의 경우 디스크 변위에 따라 개구면적이 유로형상에 따라 달라지기 때문이다. 뿐만 아니라 스프링 상수는 디스크에 작용하는 힘에 영향을 주기 때문에 디스크 거동특성에 직접적인 영향을 미친다.

3. 본 논문에서의 결과는 비록 특정 제품에 대한 결과라 할지라도 이동격자 기법을 이용한 릴리프밸브의 성공적인 해석은 릴리프밸브를 설계하는 데에 좋은 참고자료가 되리라고 판단된다.

후 기

본 연구는 동아대학교 고기능성밸브 기술지원센터(지역혁신센터)의 지원으로 진행하였고 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] P. L. Skousen, Valve Handbook, McGraw-Hill, 2007.
- [2] "Guidance note for crankcase explosion relief valves & oil mist detection/monitoring and alarm arrangements", Korean Register of Shipping Materials and Equipment Team (METGN-0004-05), 2005.
- [3] H. Y. Song, K. A. Park and S. Ko,

"Performance analysis of emergency shut-off safety valve", Proc. of KFMA 2001 Conference, pp. 413-418, 2001.

- [4] J.-H. Lee, H.-D. Kim and K.-A. Park, "A Study of the Gas flow through a safety valve for LNG ship engine", Proc. of KFMA 2005 Conference, pp. 98-99, 2005.
- [5] ANSYS Inc., ANSYS CFX-Solver, Release 11.0: Theory, 2005.

저 자 소 개

강 상 모

1985년 서울대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1987년 서울대학교 공과대학원 졸업(공학석사), 1996년 Michigan 대학교(Ann Arbor) 공과대학원 졸업(공학박사), 현재 동아대학교 기계공학과 부교수



이 봉 희

2007년 동아대학교 기계공학과 졸업(공학사), 2009년 동아대학교 공과대학원 졸업(공학석사), 현재 정우테크 대표

