

Flowmaster와 SFM 코드를 이용한 모터구동밸브 차압계산

A Calculation of The Differential Pressure of MOV(Moter Operated Valve) Using Flowmaster and SFM Code

류호근, 박성근, 김대웅, 강신철, 정희권, 박수기

한국전력 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 논문에서는 1차원 유체 Piping 시스템 해석 전문 프로그램인 Flowmaster 코드와 SFM 모델을 이용한 밸브의 차압계산 결과를 비교 분석하여 두 프로그램의 적정성을 검증하였다. SFM과 Flowmaster 코드 차압계산의 기본 모델은 동일한 정상상태방정식이나 Transient 해석시 Flowmaster 코드는 유체속도변화와 압력파의 영향을 고려한 Joukowsky 계산식을 사용하고 SFM 모델은 파이프 관성에 따라 유체의 관성 효과를 고려하는 준정상상태 해석을 수행한다. 밸브가 열리는 경우 두 코드의 최대차압 계산 값이 거의 일치하는데 이는 열림시에는 물리적으로 유체의 관성효과가 발생하지 않는 정상상태 계산식을 사용하기 때문이다. 밸브가 닫히는 경우에는 두 코드의 Transient 해석 방법의 차이로 계산 값이 조금 다르며, SFM 보다 압력파와 유체의 속도 변화를 고려하여 계산하는 Flowmaster 코드가 최대차압을 크게 예측함을 보여주고 있다.

Abstract

Comparisons of the calculation of the differential pressure through four MOVs between Flowmaster code and SFM model has been presented. The Flowmaster and SFM model basically use 1-D steady-state equation, but for the transient analysis, the Flowmaster uses Joukowsky equation considering the effect of fluid velocity variation and wave speed, while, the SFM model uses quasi-steady equation including fluid inertia effect due to pipe inertia. The maximum differential pressures in opening stroke are almost the same between Flowmaster and SFM model, because the two code have the same steady-state equation. For closing stroke, however, the maximum differential pressure is somewhat different, the Flowmaster code shows higher large estimation than SFM code.

1. 서론

원자력 발전소에 설치된 안전관련 동력구동밸브(Power Operated Valve)의 잦은 고장으로 발전소의 안전성 및 신뢰성에 의문이 제기되자 미국 원자력규제위원회(NRC)가 GL89-10의 규제 요건을 발행하여 안전성 확인 및 입증을 요구함에 따라 국내에서는 과학기술부가 규제 권고사항을 발행하여 국내 원전의 안전관련 동력구동밸브에 대한 안전성 평가 이행을 요구하였다. 이 규제요건에 응답하기 위한 프로그램에는 정상운전 및 비정상 운전뿐만 아니라 기존의 설계기준에 포함되는 모터구동밸브의 운전 및 사고에 대하여 모터구동밸브의 열림과 닫힘 모두에 예상되는 최대차압을 구하는 것이 포함되어 있다.

밸브의 운전시 발생하는 부하는 차압을 비롯하여 밸브 스템 및 디스크의 자체 무게와 디스크의 삽입/인출시 발생하는 밸브 시트와의 마찰력, 스템과 패킹과의 마찰력등이 있는데, 특히 차압은 다른 힘들에 비해 밸브의 운전성에 미치는 영향이 가장 큰 부하로 알려져 있다. 즉 차압이 가장 크게 발생하는 운전모드를 그 밸브의 설계기준 운전모드로 볼 수 있으며, 밸브는 계산된 최대차압이 발생하는 운전 환경에서도 고유기능 수행이 보장되어야 한다. 계산된 최대차압은 밸브의 요구 쓰러스트/토크 계산 및 동적시험에 활용된다.

산업계에서 설계시 혹은 성능 평가시 적용하는 밸브의 차압계산 방법은 다양하며 모터구동밸브의 안전성평가와 관련하여 미국에서도 각 발전소마다 다양한 방법을 적용하고 있고, 현재 국내 모터구동밸브의 안전성과 관련한 차압계산 방법은 밸브의 운전모드와 계통구성등을 고려하여 베르누이 방정식을 이용하여 계산하는 표준차압방법론과 EPRI에서 개발한 밸브의 행정시간에 대한 밸브의 차압과 전단압력 계산 모델인 SFM(System Flow Model)을 사용한 차압계산 방법을 적용하고 있다.

본 논문에서는 영국의 Flowmaster international Ltd.에서 개발한 1차원 유체 Piping 시스템 해석 전문 프로그램인 Flowmaster 코드와 SFM 모델을 이용한 밸브의 차압계산 결과를 비교 분석하여 두 프로그램의 적정성을 검증하고자 한다.

2. 해석 모델

2.1 SFM(System Flow Model) 모델

표준차압방법론은 계통을 단순화하고 배관 및 구성기기들의 마찰 손실을 무시한 차압계산 방법론임에 비해 SFM 모델은 실제 발전소 운전과 유사하게 계통을 모사하여 배관 및 구성기기들의 마찰 손실을 고려하여 밸브의 Stroke time에 대한 밸브 차압과 전단압력을 계산하기 위한 모델이다. SFM은 기본적으로 1차원 정상상태 방정식을 사용하며, Pumped Flow System에서는 Transient 효과를 고려하기 위해 rigid column theory에 기초한 water column acceleration model을 포함하고 있다.[1]

2.1.1 파이프 유동

파이프 유동은 1차원 유동 방정식을 사용하며, 이 방정식은 subcooled water 및 steam에 적용되고, two-phase 유동에는 Martin-Nelson model을 이용한다.

유동 방정식(Incompressible Flow)

$$w = \frac{A}{\sqrt{f \frac{L}{D}}} \sqrt{288 g_c [(p_1 - p_2) + \frac{1}{144} (Z_1 - Z_2) \rho \frac{g}{g_c} \rho]} \quad \text{식(1)}$$

2.1.2 밸브 유동

밸브를 흐르는 유동은 ISA(Instrument Society of America) 방법을 사용하여 계산하며, 밸브의 유량계수가 주요 변수이다.

$$w = 0.0176 F_p C_v \sqrt{(p_1 - p_2) \gamma} \quad \text{식(2)}$$

2.1.3 유체 관성

대부분의 모터구동밸브들은 행정시간이 비교적 길고 유체의 감속과 가속에 의한 영향이 작기 때문에 정상상태로 가정하여 해석한다. 그러나 어떤 경우에는 유체의 감속과 가속에 의한 영향으로 밸브 닫힘시 정상상태보다 큰 압력 변화가 발생한다. 이러한 유체의 감속과 가속에 의한 추가적인 압력변화를 유체관성이라 부른다. 면적 A, 길이 L을 가지는 파이프속을 흐르는 유체가 dV/dt 의 비율로 감속할 경우 발생하는 압력 강하는 SFM 코드에서는 다음식으로 표현된다.

$$\Delta p = - \frac{1}{144 g_c} [I_c \frac{dw}{dt} + (I_u + I_d) \frac{dw}{dt}] \quad \text{식(3)}$$

식(3)에서 보듯이 SFM에서의 유체관성 효과는 파이프관성(I_c , I_u , I_d)과 행정시간의 함수이다.

2.2 Flowmaster 코드

기존 차압계산 방법론(표준차압방법론 또는 SFM 모델)은 계산 방법의 단순성 및 해석모델의 제한성으로 인해 실제 밸브 운전 상황시의 차압계산에 영향을 미치는 중요한 변수가 고려되지 못하여 차압값이 실제 상황에 비해 지나치게 보수적으로 계산되는 경우가 있다. SFM의 경우 코드 자체가 Quasi-steady analysis(준 정상상태 해석)코드로 완전 비정상상태 해석이 필요한 유체관성 효과 해석시 정밀성이 떨어진다.

Flowmaster는 발전소의 복잡한 배관계 전체를 해석 대상으로 고려할 수 있어 차압계산시 실제 운전상황에 대한 모델링이 가능하며, 단상 비압축성 및 압축성 유체에 대해 기본적으로 계통의 모든 위치에서 유량과 압력, 온도등을 계산할 수 있으며, 유체 관성효과 해석시 과도상태 해석을 위해 Joukowsky 방정식을 추가 적용하여 정밀계산을 수행할 수 있는 장점이 있다.[2]

2.2.1 파이프 유동 및 밸브에서의 압력강하

SFM에서 사용하고 있는 식(1), 식(2)와 동일한 계산식을 사용한다.

$$\Delta P = K \frac{\rho U^2}{2} \quad \text{식(4)}$$

2.2.2 Transient 모델

Pipe를 흐르는 유체는 유체의 관성에 의한 pressure surge 현상이 일어날 수 있는데 모터구동밸브에서 발생할 수 있는 Pressure Surge의 주요 원인은 급격한 밸브 위치의 변화, 펌프의 기동과 정지, 시스템 내에서의 열적 변화등을 들 수 있다.[3]

Flowmaster에서는 Transient 모델에서의 압력 변화 방정식으로 아래의 Joukowsky Equation을 사용하고 있다.

$$\Delta P = \rho a \Delta V, \quad \Delta H = \frac{a}{g} \Delta V \quad \text{식(5)}$$

여기서, ρ : liquid density, a : wave speed, ΔV : 유체 속도 변화

시스템내의 압력변화의 크기는 wave speed에 비례하며 wave combination과 wave reflection이 transient 해석에 중요한 인자가 된다. 따라서 실제 시스템의 fluid transient 해석에서는 wave reflection, pipe friction loss, cavitation을 고려하여야만 한다.[4]

3. 결과 및 고찰

Flowmaster를 이용한 차압계산은 앞에서 기술한 바와 같이 기본적으로 SFM과 동일한 계산식을 사용하나, Transient 해석시에는 SFM의 경우 파이프 관성을 이용하여 관성효과를 계산하는 준 정상상태 계산방식으로 압력과 유체의 속도 변화를 고려하여 계산하는 Flowmaster 코드와는 다소 다른 접근방법을 사용한다. 따라서 기존 차압 계산 코드인 SFM의 결과와 Flowmaster 코드의 계산 결과를 비교 분석함으로써 두 코드의 특성을 파악하고, 또한 실제 현장 시험값과의 비교를 통해 두 코드의 적정성을 검증하고자 한다.

Flowmaster를 이용한 차압계산 결과와 SFM을 사용한 차압계산 결과를 비교하고자, EPRI verification TEST Case 1의 경우와 한전에서 수행중인 안전성평가 대상 밸브중 SFM을 수행한 3대의 밸브에 대해 SFM과 Flowmaster를 이용한 계산 결과를 비교 분석하였다. Test case는 정상상태(열림시) 및 transient 해석시(닫힘시)의 계산 결과와 시험값과의 비교를 위해 다음과 같이 선정하였다. 아래의 4가지 경우에 대하여 계산을 수행하였으며 이중 유체관성 효과가 없는 경우와 유체관성의 효과가 큰 두가지 경우에 대하여 비교 분석해보았다.

표1. Test Case

Test Case	계통특성	유체관성 고려 여부		비교 대상
		SFM	Flowmaster	
Case 1	병렬배관 (파이프관성이 적은 경우)	고려	고려	SFM
Case 2	병렬배관 (파이프관성이 없는 경우)	고려 불필요	고려	SFM, 동적시험
Case 3	단일배관 (파이프관성이 큰 경우)	고려	고려	SFM, 동적시험
Case 4	단일배관 (파이프관성이 큰 경우)	고려	고려	SFM, 동적시험

3.1 유체관성이 없는 경우에 대한 차압계산 결과

두 프로그램의 계산식의 근본적인 차이인 transient 해석시 압력파의 영향에 대한 비교를 위해 SFM 해석시 유체관성을 고려하지 않고 해석하는 경우와 동일한 조건에서의 flowmaster 해석결과를 비교해 보았다. 해석 대상 계통은 펌프가 있는 병렬배관으로 계통을 구성요소들의 입력자료(수두, 압력, 밸브자료)등은 동일하며 transient 해석시 필요한 wave speed의 경우 1000 m/s(산업용 steel pipe에 흐르는 물의 wave speed)를 적용하였다.

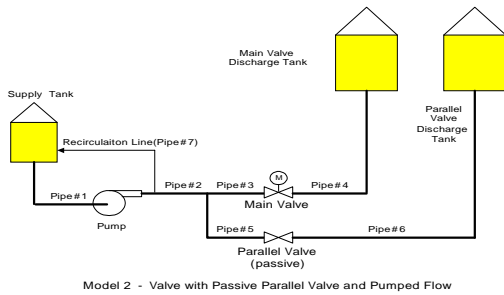


그림1. SFM 계통 구성도

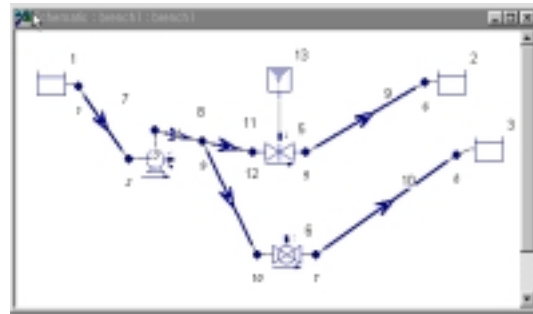


그림2. Flowmaster Network

열림시 두 코드의 최대차압 계산값은 거의 동일하며, 열림시 두 코드는 동일한 정상상태 방정식을 사용하므로 실제적으로 계산 결과는 동일 하여야 한다.

SFM의 경우 유체관성 효과는 파이프관성으로 표현되며 이 경우 파이프관성이 없으므로 닫힘시와 열림시의 결과가 동일한 값을 가지나, Flowmaster 코드는 기본적으로 Transient 해석시(닫힘시) 항상 관성의 효과가 포함되므로 열림시보다 다소 높게 나온다. 동적시험 값과 비교시 코드 계산값이 약간 높게 나타났으며, 그 원인은 동적시험시 펌프의 실제 운전 성능과 펌프 설계값과의 차이, 계산시 사용한 배관 구성기기의 수두손실이 실제 현장값과는 정확하게 일치하지는 않기 때문이다.

표2. 최대차압 계산결과

행정	SFM	Flow master	동적시험
열림(psid)	954	954	930
닫힘(psid)	954	959	930

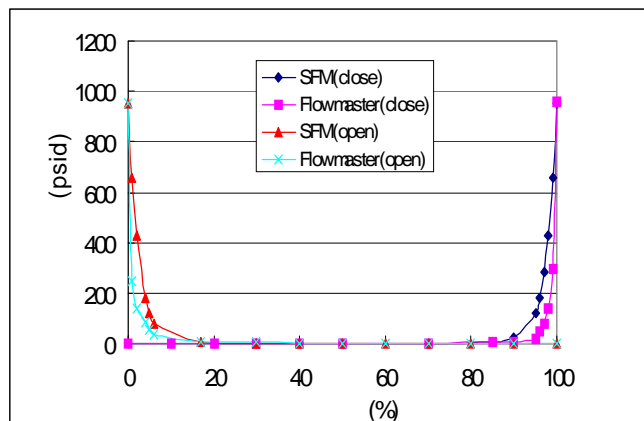


그림3. 밸브 행정에 따른 차압계산결과 비교
[0% : 완전 닫힘, 100% : 완전 열림]

3.2 유체관성이 큰 경우에 대한 차압계산 결과

SFM 해석시 유체관성의 효과는 파이프 관성으로 표현되며 파이프 관성은 식(6)으로 표현된다. 파이프 관성은 파이프 길이에 비례하고 파이프 내경에 반비례하며, 밸브 상류측 파이프관성(I_{up})과 하류측 파이프관성(I_{down})의 합이 임계 파이프관성(I_{crit})보다 크면 파이프관성에 의한 유체의 관성효과를 고려해주어야 한다.

$$I = \sum_{i=1} \frac{L_i}{A_i}, \quad I_{up} + I_{down} > I_{crit} \quad \text{식(6)}$$

여기서, L_i : Length of pipe i connected in series, A_i : Flow area of pipe i

해석 대상 계통은 펌프가 있는 단일배관으로 flowmaster의 transient 해석시 필요한 wave speed의 경우 1000 m/s(산업용 steel pipe에 흐르는 물의 wave speed)를 적용하였다.

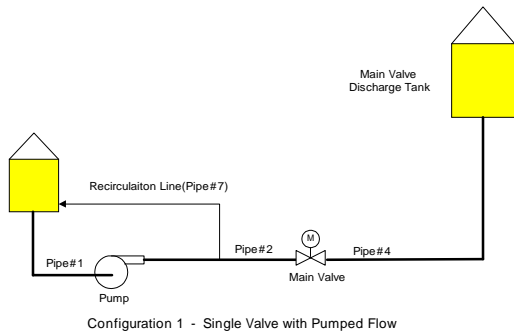


그림4. SFM 계통 구성도

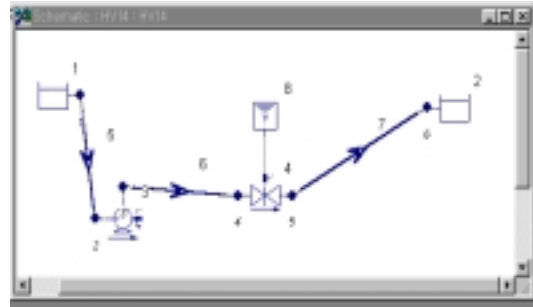


그림5. Flowmaster Network

열림시 두 코드의 최대차압 계산값은 동일하며, 유체관성 효과가 파이프관성으로 표현되는 SFM의 경우 파이프관성이 작용하여 닫힘시에 밸브에 작용하는 최대차압이 열림시 보다 큰 값을 가진다. 이러한 최대차압의 상승은 파이프관성의 크기에 비례하므로 계통 해석시 정확한 파이프관성의 계산이 최대 차압의 예측에 중요한 요소가 된다. Flowmaster 코드의 경우에도 닫힘시 유체관성의 효과가 크게 나타나 열림시보다 높은 결과 값을 보여주고 있다. 동적시험 값과 비교시 코드 계산값이 약간 높게 나타났다.

표3. 최대차압 계산결과

행정	SFM	Flow master	동적시험
열림(psid)	147	147	150
닫힘(psid)	202	207	185

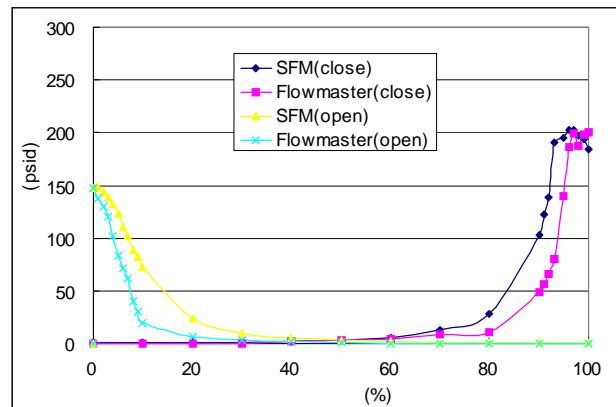


그림6. 밸브 행정에 따른 차압계산결과 비교

4. 결론

SFM과 Flowmaster 코드 차압계산의 기본 모델은 동일한 정상상태방정식으로, 파이프 유동 및 밸브에서의 압력강하 계산식은 산업계에서 사용되는 일반적인 계산식이며 Flowmaster 코드는 Transient 해석시 유체속도변화와 압력파의 영향을 고려한 계산식을 사용하나 SFM 코드의 경우에는 파이프 관성에 따라 유체의 관성 효과를 고려하는 준 정상상태 해석을 수행한다.

밸브가 열리는 경우 두 코드의 최대차압 계산 값이 거의 일치하는데 이는 열림시에는 물리적으로 유체의 관성효과가 발생하지 않는 정상상태 계산식을 사용하기 때문으로 실제적으로 두 코드의 계산 결과는 동일하여야 한다. 밸브가 닫히는 경우에는 두 코드의 Transient 해석 방법의 차이로 계산 값이 조금 다르며, 준 정상상태로 해석하는 SFM 보다 압력파와 유체의 속도 변화를 고려하여 계산하는 Flowmaster 코드가 최대차압을 크게 예측함을 보여주고 있다.

Flowmaster코드 및 SFM코드에 사용되는 차압계산의 기본 공식과 수두손실 계산식은 이미 산업계에 널리 알려지고 보수성과 정확성이 검증된 관련 핸드북의 자료를 사용함으로, 이론적으로 어떠한 코드를 사용하여도 문제가 없을 것으로 판단되며 이는 SFM과의 차압계산결과의 비교에서도 알수있다.

Flowmaster 코드는 발전소 전체 계통에 대한 해석이 가능함으로 기존 차압계산 방법(표준차압방법, SFM을 사용한 방법)에서 계통을 지나치게 단순화한 제한성을 극복하고 실제 MOV 동작시의 주변 계통 상황을 적절히 묘사가 가능하므로 SFM 모델로는 묘사가 불가능한 밸브의 차압계산에 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] MPR Associates, INC., "Performance Prediction Methodology Implemented Guide", Topical Report, October 1996
- [2] Flowmaster International Ltd., "Single Phase Transient Heat Transfer"
- [3] Sharp. B. B, "Water Hammer practical solutions", London, 1996
- [4] Merilo, Mati, "Water Hammer prevention, mitigation and accomodation : Review of analytical models and computer code", EPRI, 1992