'00 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

모터구동밸브 동작시 디스크 양단에 발생되는 유체유동 및 차압 해석

A Study of Fluid Flow and Differential Pressure on Disk during the Motor Operated Valve Operation

김 대웅, 박 성근, 강 신철, 김 인환

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

모터구동밸브의 동작시 디스크 전·후단에 발생되는 차압은 밸브의 운전성 평가에 중요한 변수 중 하나이다. 특히 빠르게 닫히는 밸브의 경우에는 유체 관성효과에 의해 차압이 상승되는 효과가 있는데 이 경우 차압은 실제 펌프에서 발생되는 압력보다 더 높게 나타난다. 본 연구에서는 FLUENT 코드를 사용하여 유체 관성효과가 발생되는 모터구동밸브의 동작시 디스크 전·후단에서 발생되는 유체유동 현상 및 속도 변화를 해석하였으며, 또한 Flowmaster 코드를 사용하여 차압해석을 수행하고 현장 시험값과 비교하였다.

Abstract

A differential pressure during the operation of MOV (motor operated valve) is one of the most important parameters for the evaluation of required stem thrust.

Most MOV applications can be approximated as being steady state since the valve stroke times are long and the ensuing flow acceleration /deceleration effects are small. However, for the some rapid closing valve, flow acceleration/deceleration effects may have to be accounted for. Under such condition, the pressure is higher than steady state pressure build up during a closing stroke.

In this study, we performed the analysis for the one valve, which is a rapid closing MOV in nuclear power plant. The velocity distribution and fluid flow pattern were analyzed by using FLUENT code. and differential pressure profile were analyzed by using Flowmaster code. The calculation result by Flowmaster code was very similar to the differential pressure of the field test.

1.서론

모터구동밸브 (MOV : Motor Operated Valve)는 원자력발전소의 주요 안전계통에 설치되어 방사성 물질의 외부 누출 차단 및 유체의 흐름을 차단 또는 제어하는데 필수적인 발전소 기기이다. 만약 안전관련 기능을 수행하는 MOV가 작동에 실패한다면 발전소의 심각한 장애를 초래할 수

있기 때문에 MOV의 운전성 보장은 중요한 문제이다. MOV의 운전성에 영향을 미치는 인자는 MOV 자체의 기계적 건전성과 구동기를 운전하기 위한 모터의 용량 등과 같은 MOV 부품의 건전성 측면외에도 MOV 운전시 발생되는 차압이나 유체의 온도 등과 같은 외부적 운전 요인에도 큰 영향이 있다. MOV가 열림 혹은 닫힘 동작을 성공적으로 수행하기 위해서는 MOV 및 구동기에 가해지는 각종 부하들을 극복할 수 있는 충분한 힘이 제공되어져야 한다. MOV 운전시 발생되는 부하들은 MOV 전·후단에 발생되는 차압을 비롯하여 MOV 스템 및 디스크의 자체 무게와 디스크의 삽입/인출시 발생되는 MOV 시트와의 마찰력, 스템과 패킹과의 마찰력 등이 있으며, 특히 MOV의 전·후단에서 발생되는 차압은 다른 힘들에 비해 MOV의 운전성에 가장 큰 영향을 미치는 힘으로 평가되고 있다. 본 연구에서는 MOV의 동작시 디스크 개도에 따른 디스크 전·후단의 유체 유동형태와 차압변화을 해석하였다. 유체 유동은 상용 유체 유동 해석 코드인 FLUENT를 사용하였으며, 차압변화는 상용 1차원 piping system 해석 전문코드인 Flowmaster를 사용하여 해석을 수행하였다.

2. 디스크 개도에 따른 유체 유동 해석

MOV의 동작시 디스크의 개도에 따라 디스크 전·후단의 유체 유동 및 속도와 압력분포가 다르게 나타난다. 또한 이들 유체에 의한 변수들은 MOV의 동작속도에 많은 영향을 받는데, 일반적으로 빠른 동작을 하는 MOV일수록 유체 유동이 복잡하고, 속도가 증가하며, 압력 상승효과가 큰 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 사용 전산해석 코드인 FLUENT를 사용하여 MOV의 동작시 디스크 전·후단에 발생되는 유체 유동 및 속도분포를 해석해 보았다.

2.1 경계조건 및 그리드 생성

해석을 위한 형상은 원형 배관을 2차원 채널로 묘사하고 MOV의 디스크 단면은 사각단면으로 단순화 하였다. 채널의 직경은 10inch, 길이는 16ft이며, 디스크는 채널의 중앙에 위치하여 닫힘운전을 수행하는 것으로 가정하고 해석을 수행하였다. 유체의 온도는 102°F, 유입속도는 발전소 잔열제거펌프의 정격유량인 11.85ft/s이며, 배관은 단열되어 있는 것으로 가정하였다. 격자구성은 40 × 320으로 구성하였으며, 채널의 형상 및 그리드와 경계조건은 각각 Fig 2-1과 Table 2-1에 나타나있다.

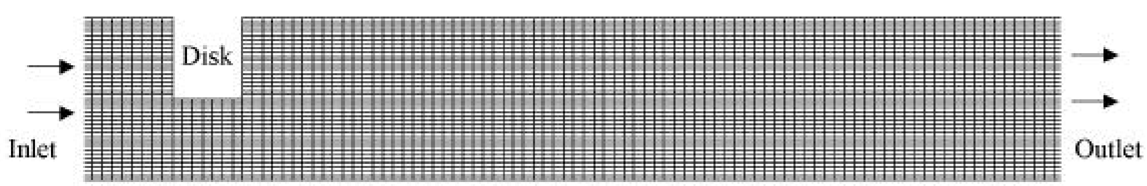

Fig. 2-1 Grid generation of horizontal channel

Table 2-1 Boundary conditions for analysis of horizontal channel

Inlet velocity (ft/s)	11.85	Fluid temperature(°F)	102
Characteristic length (ft)	0.833	Channel wall	heat flux = 0
Turbulent intensity (%)	5	Disk wall	heat flux = 0

2-2 지배방정식과 전산해석 기법

지배방정식과 난류방정식을 일반형으로 표시하면 식 (2-1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i\phi) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial x_i}) + S_\phi \tag{2-1}$$

여기서 좌변 첫 번째항은 검사체적내의 시간에 따른 물리량의 변화를 나타내고, 두 번째항은 대류항(Convection term), 우변 첫 번째항은 확산항(Diffusion term), 두 번째항은 생성항(Source term)을 나타낸다. 변수 ϕ에 따라서 지배방정식이 달라지며 ϕ=1인 경우 연속방정식, ϕ가 속도성분인 경우에는 운동량방정식, ϕ가 엔탈피인 경우에는 에너지 방정식을 각각 나타내며, ϕ가 k와 ε인 경우는 난류전달 방정식이 된다. 각각의 지배방정식에 대한 확산계수 Γ_ϕ와 생성항 S_ϕ는 다른 형태로 표시된다. 유한체적법 (FVM : Finite Volume Method)을 사용한 검사체적에 대한 지배방정식(2-2)의 차분방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\phi_p\sum_i(A_i - S_p) = \sum_i(A_i\phi_i) + S_c \tag{2-2}$$

FLUENT는 완전 암시도해 (fully implicit scheme)을 사용한 유한체적법 코드로서 속도와 같은 벡터량과 압력, 온도 등과 같은 스칼라양을 같은 위치에 저장하는 엇갈림 격자계를 사용한다. 본 해석에서는 대류항을 계산하기 위한 격자점 보간으로 Power-law법 그리고 수치해법은 SIMPLE알고리즘을 사용하였다. 난류유동 해석에 있어서는 k-ε모델을 사용하였으며, 수렴판정은 압력, 속도(U, V) 난류에너지 그리고 소산율(Dissipation)의 Normalized residual이 동시에 10^{-5} 이하로 떨어질 때 해가 수렴한 것으로 판정하였다.

2-3 유체유동 해석

유동해석은 디스크의 위치변화에 따른 유동분포 및 유체 속도분포를 해석하였다. 해석 모델은 MOV 전체 개도에 대해 디스크의 위치가 각각 50%, 90%, 98%에 있을 경우에 대해 해석을 수행하였다. 50% 디스크 위치는 디스크의 위치가 채널의 중앙에 위치했을 때 유체 유동을 파악하기 위해 선정되었으며, 90% 디스크 위치는 일반적으로 게이트 MOV의 경우 디스크의 위치가 90%에 근접하여 유체의 속도 및 압력이 크게 발생되므로 이때의 유체 유동을 파악하기 위해 선정되었다. 98% 디스크 위치는 MOV가 닫히기 직전의 위치로 속도와 압력이 가장 크게 나타날것으로 예상되는 위치이다.

Fig. 2-2에서는 50% 디스크 위치에 대한 유체유동 해석결과로서 일정속도(11.85ft/s)로 유입된 유체는 디스크 근처에 와서 일부 유체는 디스크벽면에 부딪치고, 일부 유체는 디스크와 채널의 빈 공간사이로 빠져나가게 된다. 이때 채널 단면적의 감소로 인해 유체의 유속은 증가하며, 디스크를 통과한 유체는 디스크 후단 벽면을 따라 일정거리동안 와류를 형성하게 되는 것을 알 수 있다. 디스크를 통과한 직후 유체의 유속이 가장 빠르게 증가한 것을 알 수 있으며, 채널 후단으로 유동이 진행될수록 유체의 속도가 점차적으로 감소되며, 와류 발생지역은 유체의 유속이 상당히 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 2-3은 90% 디스크 위치에 대한 유체유동 해석결과로 채널단면적의 급속한 감소로 인해 유체의 유속이 상당히 증가한 것을 알 수 있으며, 디스크 후단의 와류발생 지역도 상당히 커지는 것으로 나타났다. 이때 디스크를 통과하는 유체는 고속흐름에 의한 제트류(jet)의 성격을 가지며, 그

영향으로 디스크 후단은 상당한 압력 감소가 나타나고 경우에 따라서 Cavitation 현상이 발생된다.

Fig 2-4는 98% 디스크 위치에 대한 유체유동 해석결과로 유속이 급상승하여, 디스크 후단의 상당한 거리까지 제트류가 진행되고, 와류지역 또한 상당히 커지는 것을 알 수 있다. 이 경우 MOV의 완전닫힘후 디스크 후단에 Cavitation 발생에 의한 Water hammering이 우려되며, 디스크 전·후단의 압력차가 커짐으로 인해 MOV의 닫힘시 상당한 힘이 필요하게됨을 알 수 있다.

2-4 유체 관성효과(Fluid Inertia Effect)에 의한 압력상승

유체 관성효과는 MOV의 동작시 발생되는 유체 속도의 가속 또는 감속 효과로 주로 빠르게 닫힘 동작을 하는 MOV에서 주로 발생된다. 즉 일정속도로 진행되는 유체는 MOV가 닫힘동작으로 인해 유체 통과 면적이 감소하게 되어 유체의 속도가 증가하게 되며, 특히 닫힘 직전에는 유체의 유속이 최대가 된다. 유체 통과면적이 급감함에도 불구하고 유체는 관성을 가지고 계속 디스크로 빠른 속도로 유입되므로 디스크 전단에는 압력이 축적되게 되고 디스크 후단에는 와류발생에 의한 압력감소가 심해지게 된다.

일반적으로 MOV의 동작시간이 긴 경우는 관성효과에 의한 압력상승 효과가 무시되나, MOV의 동작이 빠른 MOV일수록 압력상승은 커지는 것으로 알려져 있다.

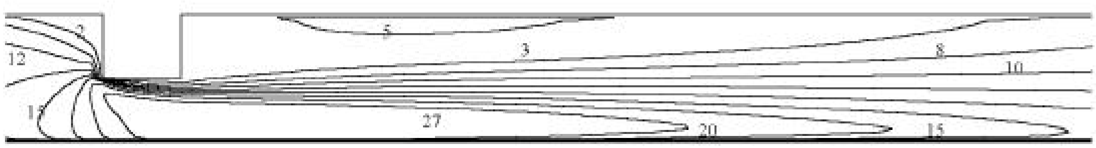

Fig. 2-2 Velocity distribution contour of channel at 50% disk position

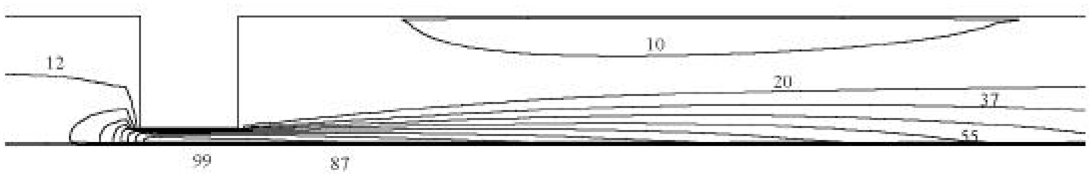

Fig. 2-3 Velocity distribution contour of channel at 90% disk position

Fig 2-4 Velocity distribution contour of channel at 98% disk position

3. MOV 동작시 차압변화 해석

MOV의 동작시 디스크 양단에 발생되는 압력차(차압)을 해석하는 방법은 매우 다양한 방법이

있다. 차압 해석에는 유체 유동의 기본 방정식인 베르누이 방정식(Bernoulli equation)이 적용되고 있으며[식 3-1], 각 배관시스템의 구성기기의 특성에 따라 적당한 마찰손실 방정식(Friction losses equation)이 적용된다. 차압은 위의 방정식을 사용하여 수계산으로 하는 단순한 차압 방법으로도 해석이 가능하며, 보다 상세하고 정확한 해석을 위해서 전산 코드를 사용하기도 한다.

$$\triangle P = \left(p_1 + \rho\frac{U_1^2}{2}\right) - \left(p_2 + \rho\frac{U_1^2}{2}\right) + \rho g\,(z_1 - z_2) \qquad (3\text{-}1)$$

수계산에 의한 단순 차압해석은 정확도가 다소 떨어지고, 차압 해석에 필요한 다양한 변수들을 고려하지 못하는 단점이 있지만, 사용이 간편하고, 시간이 절약되는 장점이 있다. 단순 차압해석은 MOV가 속해있는 계통을 모두 묘사할 수 없으므로 많은 부분이 단순화 또는 생략된다. 즉 차압해석을 위한 계통은 차압해석 대상MOV를 중심으로 하여 MOV 전단의 수원(탱크, 수조등) 및 압력원(펌프, 압력탱크등)과 MOV 후단의 압력배출원(탱크, 용기, 수조등)으로 단순화되며, 계통을 구성하는 배관 및 구성기기들의 마찰손실은 고려하지 않는다. 단순차압 해석은 정상상태 해석만 가능하므로 유체 관성효과에 의한 압력상승은 해석할 수 없다.

코드를 사용한 해석을 수계산에 비해 보다 많은 변수들을 고려할 수 있어 상세하고 정확한 결과를 얻을 수 있는 장점이 있지만 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 차압계산을 위한 코드로는 미국의 미국 전력연구소인 Electric Power Research Institute (EPRI)에서 개발한 SFM(System Flow Model), Westinghouse에서 개발한 NEWFAC코드와 Fauske & Associates, Inc.에서 개발한 TREMOLO등이 있으며, 상용코드로는 Flowmaster가있다. 본 연구에서는 상용코드인 Flowmaster를 이용하여 유체 관성효과에 의한 차압상승효과가 있는 MOV에 대해 차압계산을 수행하였다.

3.1 Flowmaster 코드의 특성

Flowmaster 코드는 영국 Flowmaster International Ltd.에서 개발한 일차원 유체 Piping 시스템 해석을 위한 전문 프로그램으로서 각종 Piping System에 관한 해석시 1차원 모델링을 통하여 빠르게 해석할 수 있는 장점을 가지고 있으며, Piping System Design의 초기단계, 검증단계, 설계과정등에서 설계최적화와 그 성능 향상을 위한 해석에 주로 활용되고 있다. 코드의 주요 특성은 다음과 같다.

- ○ Flowmaster는 유체역학의 기본 이론인 베르누이 방적식을 기본하여 정상상태 및 비정상상태해석을 수행할 수 있으며, 유체 상태(비압축성, 압축성, 이상유동) 및 기기(배관, 밸브, 유량제한기)의 종류에 따라 적당한 방정식을 사용할 수 있다.
- ○ 밸브의 스트로크 위치 (stroke position)에 따른 차압해석이 가능하다.
- ○ 펌프 유동시스템은 물론이고 탱크 유동시스템(blowdown)에도 적용할 수 있으며, 배관 및 구성기기의 수두손실 및 높이, 펌프의 성능곡선, 탱크의 수두 및 압력변화등 실제 밸브가 설치되어 있는 계통 조건을 상세히 고려할 수 있다.
- ○ subcooled water, flashing water, steam, two-phase steam water mixture등 다양한 유체에 적용이 가능하며, 제한적으로 two-phase flow에 적용이 가능하다.
- ○ 유체 관성효과(Fluid Inertia)를 고려할 수 있다.
- ○ 기본적으로 계통 및 구성기기 전체에 대해 유량과 압력, 온도 등을 계산하고, 그에 따른 각각의 물성변화와 각 구성기기의 동작에 의한 변환량의 해석이 가능하다.

3.2 해석 MOV 개요 및 입력자료

차압해석 대상 MOV는 원자력발전소에 설치된 Westinghouse gate중 10inch MOV로 선정하였다. 대상 MOV는 비교적 빠른 동작으로(stroke time = 10sec) 운전이 되며, 현장 시험결과 유체관

성 효과에 의한 압력상승이 발생되는 MOV로 확인되었다. 차압해석을 위한 입력자료는 Table 3-1과 같다.

Table 3-1 차압해석 주요 입력자료

MOV 형태	Westinghouse gate	pump shutoff head(ft)	345
크기(inch)	10	pump runout head(ft)	210
stroke time(sec)	10	suction pressure(psia)	23
MOV 높이(ft)	42	suction tank 높이(ft)	23
유량(gpm)	2900gpm	discharge tank 높이(ft)	46

3.3 비정상상태(Trasient state) 해석

MOV의 동작에 따른 유체의 차압해석은 비정상상태 해석이 요구되며, 특히 본 해석 대상 MOV는 유체 관성효과에 의한 차압상승 해석이 중요하다. MOV의 닫힘 직전·후에는 배관의 탄성력에 의해 wave speed가 발생되며, Flowmaster에서는 이러한 현상이 발생되는 배관을 elastic pipe로 분류하고, wave propagation의 해석을 위해 Joukowsky equation을 적용한다[식 3-2]. Elastic pipe의 구분은 MOV의 동작시간과 wave speed 및 MOV 전단 배관의 길이에 의해 결정되며, 관계식은 식 (3-3)와 같이 표현된다.

Joukowsky equation : $\Delta p = \rho a \Delta v$ (3-2)

Δp = change in flow pressure
a = wave speed (m/s)
Δv = change in flow velocity (m/s)

Elastic pipe criteria : $t \le 10\left(\frac{2L}{a}\right)$ (3-3)

t : valve stroke time
L : pipe length
a : wave speed

3.4 차압해석 결과

Fig. 3-1은 닫힘시의 해석결과를 나타내고 있다. MOV의 동작이 1초에서 11초(10초동안)사이에 수행되었음을 알 수 있으며, MOV의 동작에 따라 유량이 초기 완전 열림상태의 2900gpm에서 완전 닫힘시 0gpm까지 떨어지는 것을 알 수 있다. 차압은 서서히 증가하다가 완전닫힘 1초전부터 급격히 증가하기 시작하여 닫힘 직전에 최대값을(207psid) 나타내고 닫힘 완료후 과도상태를 보이면서 서서히 상쇄되는 것을 알 수 있다. 순수하게 유체 관성효과에 의해 상승된 압력은 최대 차압값에서 펌프의 최대압력(shutoff)과 높이 수두에 의해 발생될 수 있는 차압(140psid)을 고려하면 알 수 있는데, 해석결과 약 67psid의 차압이 유체관성에 의해 상승된 차압으로 추정할 수 있다.

Fig. 3-2는 열림시의 해석결과를 나타내고 있는데, MOV의 열림과 동시에 유체의 유량이 0gpm에서 완전열림시 2900gpm까지 증가하는 것을 알 수 있다. 차압은 열림 직전에 최대값(140psid)까지 상승하였다가, 급격히 떨어지는 것을 알 수 있으며, 열림시에는 유체 관성효과에 의한 차압상승이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 차압해석 결과와 시험결과의 비교는 Table 3-2에 나타나있다.

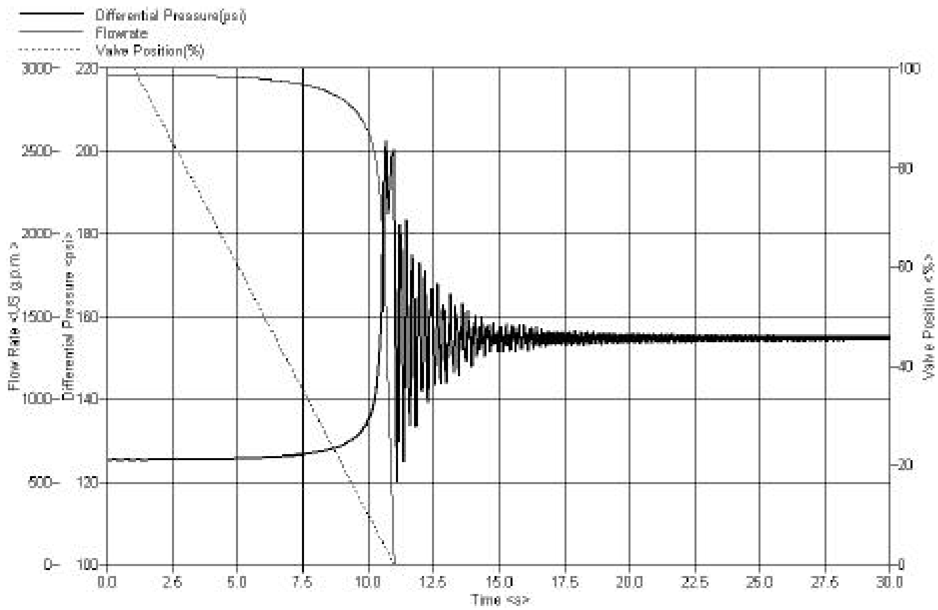

Fig. 3-1 Differential pressure profile for valve closing stroke time

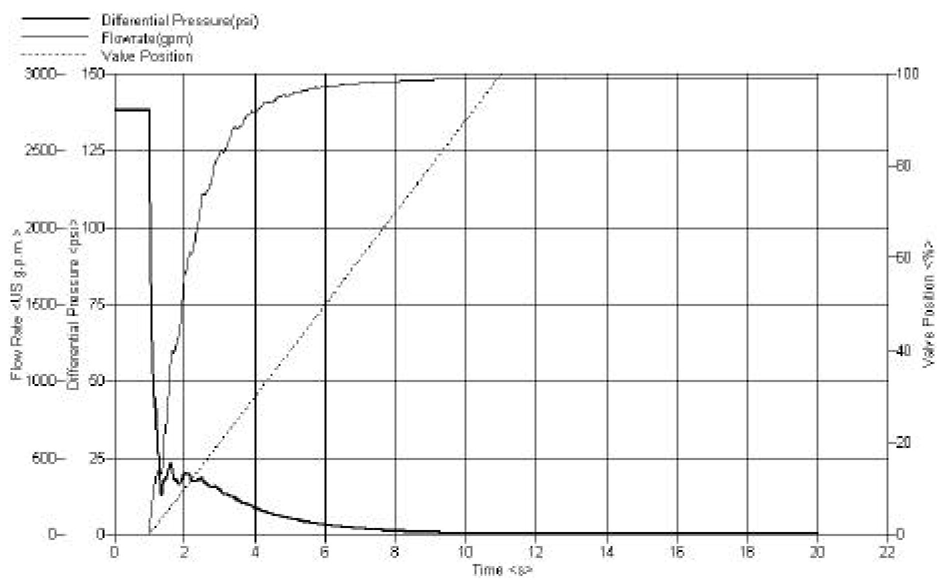

Fig. 3-2 Differential pressure profile for valve opening stroke time

Table 3-2 차압해석 결과 비교

	시험결과	Flowmaster 결과	오차율(%)
열림시 차압(psid)	150	140	9.3
닫힘시 차압(psid)	185	207	8.9

4. 결론 및 향후 과제

유체 관성효과가 발생되는 MOV에 대해 Flowmaster 코드를 사용한 차압해석 결과 열림시에는 차압 상승효과가 없는 것을 알 수 있으며, 닫힘시에는 시험값보다 다소 높게 예측하는 것을 알 수 있었다. 오차율의 원인은 현장 시험의 제한성에 의해 시험조건이 코드 계산에 적용된 조건과 완전

히 일치하지 않았다는 점과 현장 펌프의 운전성과 계기의 오차한계에도 기인한다고 볼 수 있다. 추후 보다 많은 MOV**에 대한 해석을 통하여 코드의 성능을 폭 넓게 검증하고, 유체 관성효과에 대해서는 전산해석과 실험을 통해 그 현상이 상세히 규명된다면 이 분야의 연구에 보다 진전이 있으리라고 기대된다.**

5. 참조 문헌

1) EPRI, 1990, “Application guide for Motor Operated Valves in Nuclear Power Plant, Final Report", NP-6660-D
2) EPRI, 1994, "MOV Performance Prediction Program, System Flow Model Description Report", TR-103225
3) D.S Miller, 1986, "Internal Flow System"
4) E.B.Wylie, 1993, "Fluid Trasients in Systems"
5) John Parmakian, 1955, "Waterhammer Analysis"
6) Flowmaster UK Ltd., 1997, "Flowmaster2 New User Training Course for Single Phase and Fluid Power users"
7) FLUENT Inc., 1996, "FLUENT Tutorial Guide/User's Guide manual"