

PPM을 이용한 원자력 발전소 모터구동밸브의 안전성 평가

박수기* · 김대웅 · 정희권 · 박성근

A Safety Evaluation of Motor-Operated Valves of Nuclear Power Plants By Using PPM

Su-Ki Park, Tae-Woong Kim, Hee-Kweon Jeong and Sung Keun Park

Key Words: Motor-Operated-Valve (모터구동밸브), NPP (원자력 발전소), Safety Evaluation (안전성 평가)

Abstract

PPM (Performance Prediction Methodology) developed by EPRI was introduced and applied to calculate the stem thrust of 3 and 4 inches flexible-wedge gate valves. The calculated stem thrusts of open and close strokes including cracking were compared with the results measured at in-situ differential pressure tests. The comparison has shown that PPM is an extremely conservative method to predict the minimum required stem thrust to operate motor-operated valves in a design basis accident condition of nuclear power plants.

1. 서 론

TMI(Three Mile Island) 원전사고 이후, 설계기준 조건에서 모터구동밸브(MOV; Motor-Operated Valve)의 성능에 대한 의문이 제기 되고, INEEL의 연구 결과는 밸브 동작에 필요한 기존의 스투스트 계산 방법이 충분히 보수적이지 않음을 보여주었다. 따라서 미국 원자력규제위원회(NRC)는 GL89-10을 발행하였고, 미국의 원전 사업자는 이 규제 요건에 따라 설계기준을 재검토하고, 설계기준 조건에서 밸브의 성능 평가를 수행하였다. 국내에서도 과학기술부 규제 권고 사항에 따라 안전 관련 밸브에 대한 성능 평가를 수행하고 있다.

PPM(Performance Prediction Methodology)은 동적시험을 대신하여 모터구동밸브의 성능을 평가하는 방법으로, EPRI (Electric Power Research Institute)에 의하여 개발되었다. 경제적인 이유 및 현장 시험의 불가능 등으로 미국에서는 PPM이 널리 이용되었다. 국내에서는 동적시험이 불가능

한 밸브에 대하여 적용하고 있다.

본 논문은 PPM 수행 방법과 국내에서 제작한 게이트 밸브에 대한 PPM 적용 경험, 동적시험 결과와의 상세한 비교를 다루고 있다. 비교 결과 PPM으로 예측한 밸브의 최소 요구스러스트가 동적시험으로 측정된 최소 요구스러스트 보다 충분히 보수적이며, 모터구동밸브의 안전성 평가를 위한 유용한 방법임을 확인하였다.

2. EPRI PPM 소개

2.1 PPM 개요

모터구동밸브의 성능 평가 방법론 및 성능 저하에 대한 종합적인 연구의 필요성에 따라 미국의 연구기관 및 산업체는 모터구동밸브 성능 평가 프로그램(MOV PPP; Performance Prediction Program)을 수행하였고, 그 결과 PPM이 개발되었다. EPRI 주도하에 수행된 연구의 주요 결과물은 설계기준 조건에서 밸브의 스투스트/토크 계산 방법, 구동기 출력 예측, 신호 측정 및 스위치 설정 등과 관련한 불확실성(Uncertainty) 고려 방법이다. 현재 PPM은 설계기준 조건에서 밸브의 스

* 한국전력공사 전력연구원

Table 1 Gate Valve Applicability Criteria for Use of PPM

구분	형태	재질
디스크	flexible wedge, solid wedge	C.S., S.S., Stellite 6 (disk base material)
스텝	원주형 스텝	S.S.
디스크/스텝의 연결부	스텝은 T-head이고, 디스크는 T-slot	---
디스크/시트링의 밀봉	디스크와 시트의 셸링면 전체가 면으로 접촉	Stellite 6
디스크/바다 가이드	가이드 레일 및 디스크 슬롯은 주조 또는 용접으로 제작되거나 기계적으로 고정. 가이드의 표면은 주조된 상태이거나 기계 가공.	C.S./C.S., Stellite/C.S., Stellite/S.S., Stellite/Stellite, 17-4PH S.S./C.S., 17-4PH S.S./S.S., S.S./S.S.
유체 상태	파냉수, 증기(3000 psia 이하, 700F 이하)	---

러스트 및 토크 예측에 널리 적용되고 있다.

PPM은 전산코드와 계산표로 개발되었다. 일반적인 flexible 또는 sold wedge 게이트 밸브 및 글로브 밸브, 버티플라이 밸브에 대하여는 전산코드로 개발되었고, 특정한 형태의 일부 제작사 밸브(Westinghouse flexible wedge gate valve, Anchor/Darlin double disk gate valve, Aloyco split wedge gate valve)에 대하여는 스러스트 계산 절차를 표의 양식으로 개발하였다. PPM 전산코드는 밸브 차압 계산 모듈(SFM)과 밸브 유형별 스러스트 또는 토크를 계산하는 모듈(GATM, GLBM, BFM)로 구성되어 있다.

2.2 PPM 적용성 평가

PPM은 모든 종류의 밸브에 대하여 적용 가능한 것이 아니기 때문에 수행하기 전에 적용성 평가를 선행하여야 한다. Table 1은 PPM 적용이 가능한 게이트 밸브의 판단 기준이다. 밸브 각 부품의 형태 및 재질, 특정 치수가 주어진 기준을 만족하여야 한다. 또한 작동 유체의 온도 및 압력이 허용 범위 이내이어야 한다. 글로브 및 버티플라이 밸브도 게이트 밸브와 유사한 판단 기준으로 적용성을 평가한다.

밸브에 대한 PPM 적용성이 만족되면 차압 계

산 가능 여부를 판단하여야 한다. 글로브나 게이트 밸브는 밸브의 차압 및 전단 압력에 대한 사용자 입력이 가능하므로 관련이 없으나, 버티플라이 밸브는 사용자 입력이 허용되지 않기 때문에 PPM 전산코드의 SFM(System Flow Model) 모듈에서 차압을 계산할 수 있도록 계통을 모델링하여야 한다. 또한 글로브 밸브를 제외한 게이트 및 버티플라이 밸브는 행정에 따른 밸브 차압 및 전단 압력이 반드시 필요하다.

2.3 설계기준 차압 계산

설계기준 차압은 PPM 코드의 SFM 모듈을 이용하여 계산한다. SFM은 발전소의 복잡한 배관 계통을 4가지의 모델[Fig. 1~4]로 단순화하여 차압을 계산한다. Model 1, 2, 3은 펌프가 있고, 모델 4는 펌프가 없다. Model 2와 3은 병렬 배관에 있는 밸브의 동작 특성 차이이다. 즉, 평가 대상 밸브(Main Valve)가 작동할 때, 함께 작동하는 병렬 배관의 밸브는 능동 밸브이고, 일정한 개도에 고정되어 있으면 수동 밸브이다. 실제 배관의 피팅이나 분가지 배관은 배관의 등가 직경에 대한 등가 길이로 적용한다. 재순환 배관은 무시할 수 있다. 공급탱크 및 배출탱크의 수위는 일정한 것으로 가정하며 시간에 따른 압력 변화도 모사가 가능하다.

SFM은 설계 도면의 모든 배관 길이 및 피팅을 고려하여 등가 길이를 계산하는 Full SFM과 이미 알고 있는 설계기준 차압 및 유량을 이용하여 각 행정에서의 밸브 차압 및 전단 압력을 계산하는 ERM(Equivalent Resistance Model) 방법이 있다. ERM은 배관 및 피팅에 대한 자료가 필요 없지만 Model 1로 단순화가 가능한 경우에만 적용된다.

2.4 스러스트 토크 계산

게이트 밸브의 스텝 스러스트는 식 1과 같이 고려한다

$$F_R = F_{DP} + F_{PK} + F_P + F_W + F_T \quad \text{식 1}$$

여기서, F_{DP} 는 차압을 극복하기 위한 힘이고, F_{PK} 는 패킹에 의한 힘이며, F_P 는 배관 내부와 대기의 압력 차이에 의한 힘이다. F_W 는 스텝 및 디스크의 무게에 의한 힘이고, F_T 는 anti-rotation bar에 의한 힘이다.

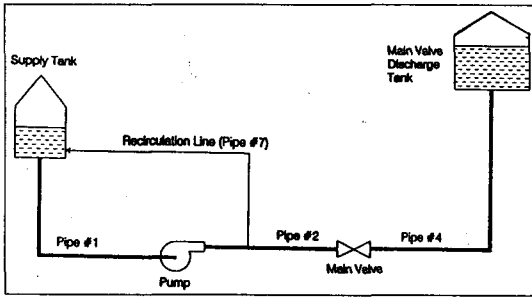


Fig. 1 Single Valve With Pumped Flow (Model 1)

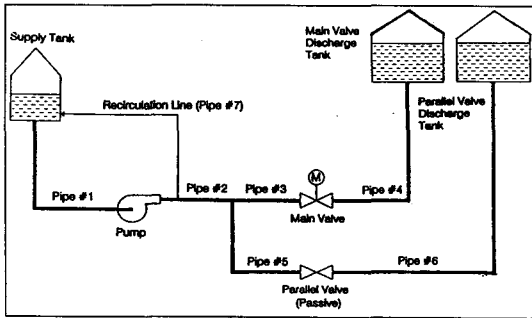


Fig. 2 Valve With Passive Parallel Valve And Pumped Flow (Model 2)

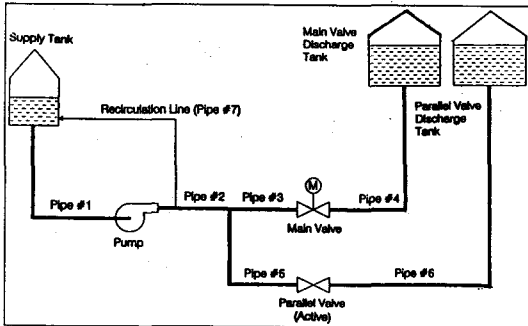


Fig. 3 Valve With Active Parallel Valve And Pumped Flow (Model 3)

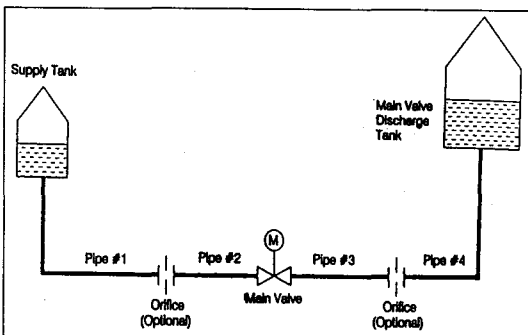


Fig. 4 Blowdown (Model 4)

정적 시험에서 측정된 런닝(running) 스러스트를 패킹 스러스트로 적용할 경우 F_w 는 고려하지 않는다. 이미 런닝 스러스트에 포함되어 있기 때문이다. F_p 는 스템 단면적과 밸브의 전단 압력(게이지 압)으로 계산된다. F_R 이 (+)이면 스템에 장력이 작용하는 것이고, (-)이면 압축력이 작용하는 것이다. F_T 계산을 위한 스템 계수는 스템과 스템 너트의 마찰 계수(μ)를 0.2로 적용한다.

전 행정에 따른 스템 스러스트 계산과 함께, 디스크 시트 모서리(edge) 등의 손상 가능성에 대한 평가도 수행한다. 그러나 열리는 순간의 크래킹 스러스트(cracking thrust)는 계산되지 않으며, 식 2와 3을 이용하여 별도로 계산한다.

$$F_R = F_C B + F_{PK} (1 - B) + \Delta P (A_0 D - A_S) \quad \text{식2}$$

$$F_R = F_{ST} + \Delta P (A_0 C - A_S) \quad \text{식3}$$

여기서, F_C 는 닫힘 행정의 최대 스러스트이고, F_{ST} 는 정적시험의 크래킹 스러스트이다. F_{ST} 는 측정에 따르는 계측 장비 및 센서의 불확실도를 반영한 값이다. ΔP 는 설계기준 차압이다. A_0 와 A_S 는 디스크 시트 및 스템 단면의 면적이다. B, C, D 는 디스크 웨지 각에 따른 상수이다. 식 2는 크래킹 스러스트를 정적시험의 닫힘 행정에서 측정된 스러스트로 예측하고, 식 3은 정적시험에서 측정된 크래킹 스러스트를 이용하여 밸브에 차압이 형성된 동적 운전에서의 크래킹 스러스트를 예측한다. 일반적으로 식 2가 지나치게 보수적이기 때문에 식 3의 방법이 개발되었다.

3. PPM 및 동적시험 결과

3.1 대상 밸브 및 PPM 적용성 평가

본 연구에서 수행한 비교 대상 밸브의 크기, 설계기준 차압 및 유량 등은 Table 2와 같다. 두 밸브 모두 "flexible-wedge gate"이며 밸브 A, B의 계통 압력 및 운전 온도는 7000 psi, 700°F 이하다. 각 밸브의 열림 및 닫힘 행정의 설계기준 차압 및 밸브 전단 압력은 동일하게 적용하였다.

밸브 A, B는 국내에서 설계 및 제작하였으며 각 부품의 형태 및 재질을 Table 3과 같다. 각 부품의 형태 및 재질을 Table 1의 게이트 밸브 적용성 평가 기준과 비교하여 보면, PPM 적용이

가능함을 알 수 있다.

Table 2 Valve and Fluid System Data

	크기 (inch)	설계기준 밸브 전단압력	설계기준 밸브 차압	설계기준 유량
밸브 A	3	1996.3	1977.2	582
밸브 B	4	1300.7	1141.7	925

Table 3 Valve Data to Determine PPM Applicability

구분	형태	재질
디스크	flexible wedge,	S.S.
스텝	원주형 스텝	S.S.
디스크/스텝의 연결부	T-head, T-slot	---
디스크/시트링의 밀봉	ring type	Stellite 6
디스크/바디 가이드	주조 제작, 기계 가공 표면	S.S./S.S.

Table 4 Packing Thrust

	닫힘 행정 (lbs) 1차/2차	열림 행정 (lbs) 1차/2차
밸브 A	1105 / 1052	1029 / 1013
밸브 B	844 / 835	784 / 784

3.2 PPM 결과

밸브 A는 고압안전주입 계통에 있고, Model 1로 단순화가 가능하다. 따라서 행정에 따른 차압은 ERM 방법으로 계산하였다. 설계기준 차압은 밸브가 완전히 닫힌 상태에서 공급탱크 및 배출탱크의 압력, 수위, 펌프의 수두, 밸브의 위치 등을 고려하여 계산하였다. 설계기준 유량은 밸브 설계 사양의 자료를 이용하였다. ERM에서 배관의 등가 길이(L_E)는 다음과 같이 계산된다.

$$L_E = \frac{74d^5 \Delta P}{fQ^2} \cdot \frac{62.4}{\rho} \quad \text{식4}$$

여기서, d는 밸브 입구 직경이며 ΔP는 설계기준 압력이다. f와 Q는 배관 마찰 손실 계수와 설계기준 유량이다. ρ는 작동 유체의 밀도이다. 밸브 A의 등가 길이는 배관 직경을 2.9inch로 하였을 때 4922ft이다.

밸브 B는 PPM에 의한 차압 계산이 불가능하다. 그 이유는 밸브 B의 전단에서 분기되고, 후단에 연결되는 병렬 배관이 있기 때문이다. 따라

서 밸브 B의 행정에 따른 차압 및 밸브 전단 압력은 FLOMASTER 코드를 이용하여 계산하고, 스러스트 계산을 위해 PPM 코드에 입력하였다. FLOWMASTER 코드는 복잡한 배관 계통의 압력 손실 및 유량을 계산하는 상용 코드이며 산업계에서 널리 사용되고 있다.

밸브의 차압 및 전단 압력과 밸브의 상세 도면 자료를 이용하여 스러스트를 계산한 결과, 밸브 A, B의 디스크 및 시트의 모서리 손상은 예측되지 않았다. Table 4는 밸브 A, B의 PPM 입력에 사용된 패킹 스러스트로 정적시험에서 측정된 런닝 스러스트이다. 정적시험에서 측정된 런닝 스러스트에는 패킹에 의한 스러스트 및 디스크와 스텝의 무게에 의한 영향도 포함되어 있다. 각 행정별로 1, 2차 시험중 큰 값을 적용하였다.

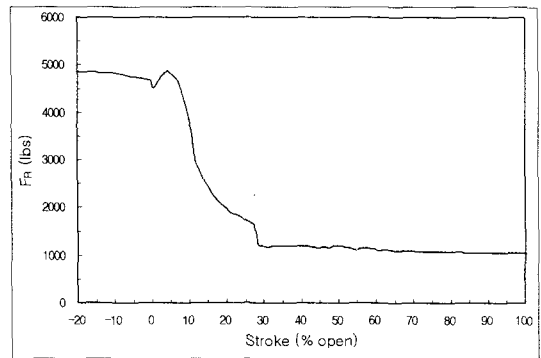


Fig. 5 Stem Thrust of Valve A in Opening Stroke

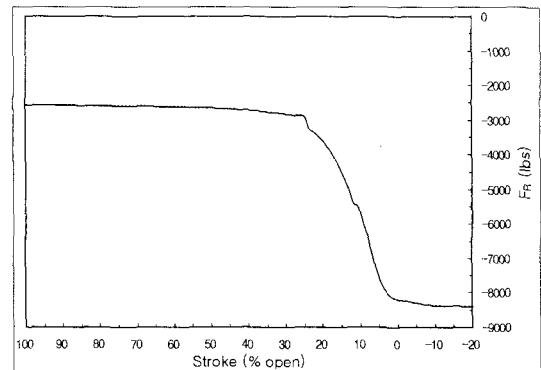


Fig. 6 Stem Thrust of Valve A in Closing Stroke

Fig. 5와 6은 밸브 A의 열림 및 닫힘 행정의 스텝 스러스트이다. 열림은 스텝이 장력을 받으므로 (+)로 표시되고, 닫힘은 압축력을 받으므로

(-)로 표시된다. 가로축은 디스크의 열림을 백분율로 나타낸 것이다. PPM에서 0% 열림은 디스크 시팅면의 외경과 바디 시팅면의 내경이 만나는 지점으로 정의된다. 따라서 가로축의 음의 값은 디스크 시팅면 외경이 바디 시팅면 내경 아래까지 내려가는 것을 의미한다. Fig. 5의 열림 행정에서 크래킹 스트레스는 제외되어 있다. 앞서 언급한 바와 같이 식 2나 3으로 계산되어야 한다. 밸브 B의 행정에 따른 스트레스도 밸브 A의 결과와 유사한 경향을 나타낸다.

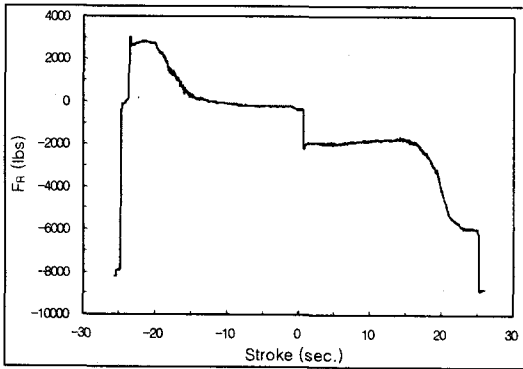


Fig. 7 Thrust Signature of Valve A in Dynamic Test

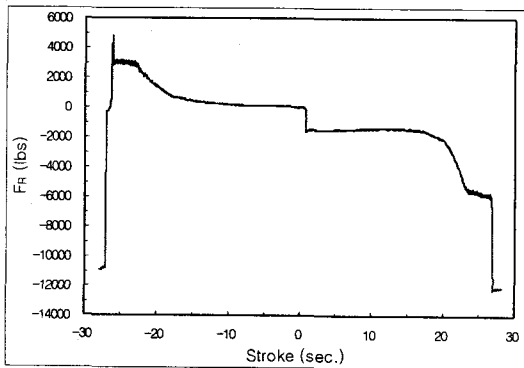


Fig. 8 Thrust Signature of Valve B in Dynamic Test

3.3 시험 방법

모터구동밸브 안전성 평가를 위한 시험은 정적 시험과 동적 시험으로 구분된다. 정적 시험은 차압이 작용하지 않는 상태에서 행정에 따른 런닝 스트레스, 시팅 스트레스, 언시팅 스트레스를 측정한다. 한편 차압에 의한 스트레스는 가정한 밸브 계수를 이용하여 계산한다. 측정된 스트레스와 계산한 차압에 의한 스트레스를 이용하여 토크

스위치가 적절하지 평가하고 적절하지 못하면 조정한다. 정적 시험에서 측정된 런닝 스트레스 및 크래킹 스트레스, 단함시 최대 스트레스는 앞 절에서와 같이 PPM 수행에 이용된다.

동적 시험은 설계기준 차압을 형성하여 수행한다. 그러나 계획예방정비 기간일지라도 운전중인 원자력 발전소의 특성상 설계기준 차압 조건을 정확하게 형성하여 시험하기는 용이하지 않다. 따라서 시험 차압 조건에서 측정된 동적 시험 신호를 분석하여 설계기준 차압에서의 성능을 평가한다.

정적 및 동적 시험에서 토크, 스트레스, 밸브 전후단 압력, 모터 전압 및 전류 등은 MOVATS 3500으로 측정하였다. 토크 및 스트레스 센서는 스트레인 게이지를 이용하였다. 동적 시험은 동일 차압 조건에서 2회 수행하였다.

3.4 시험 결과

Fig. 7, 8은 밸브 A, B의 1차 시험 결과이다. 행정 시간이 음의 값인 부분은 열림 행정이고 양의 값인 부분은 닫힘 행정이다. 밸브 A의 경우 열림 행정에서 런닝 스트레스는 음의 값을 갖는다. 이 부분에서 음의 값을 갖는 이유는 피스톤 효과가 패킹 스트레스보다 크기 때문이다. 대략 디스크가 40~50% 이상 개방된 상태에서는 차압에 의한 영향이 무시할 수 있을 정도로 작음을 알 수 있다.

밸브 A의 시험 차압은 약 1849 psid이고 밸브 B의 시험 차압은 약 1200 psid이다. 동적 시험 및 PPM 계산의 밸브 차압이 다르기 때문에 Fig. 5 및 6의 결과와 Fig. 7의 결과를 직접 비교하기는 곤란하다. 그러나 열림 행정의 크래킹 스트레스 및 닫힘 행정의 시팅 지점 이후의 구간을 제외하면 경향이 유사함을 알 수 있다.

PPM과 동적 시험 결과를 정확히 비교하기 위해서는 동적 시험 결과를 이용한 설계기준 차압에서의 스템 스트레스 계산이 필요하다. 설계기준 차압에서의 스트레스는 다음 식으로 계산한다.

$$F_R = V_F \Delta P A_0 + F_{PK} \pm F_P \quad \text{식 5}$$

여기서, A_0 는 시팅 면적이다. 식 5에서 (+)는 닫힘 행정이며 (-)는 열림 행정이다. F_{PK} 는 정적 시험에서 측정된 패킹 스트레스 가운데 최대 값을 적용하고, F_P 는 설계기준 밸브 전단 압력을 이용

하여 계산한다. 밸브 계수(V_F)는 동적시험에서 측정된 신호로 다음과 같이 계산한다.

$$V_{F,t} = \frac{F_t - F_{RN} \pm (P_{UP,t} - P_{UP,RN})A_S}{A_o \Delta P} \quad \text{식 6}$$

여기서, $V_{F,t}$ 및 F_t , $P_{UP,t}$ 는 임의 지점에서의 밸브 계수 및 스템 스트레스, 밸브 전단 압력이다. F_{RN} 및 $P_{UP,RN}$ 은 런닝 구간에서의 스템 스트레스 및 밸브 전단 압력이다. 식 6에서 (+)는 열림 행정이고, (-)는 닫힘 행정이다.

Table 5 Maximum Stem Thrusts in DT and PPM

행정	밸브 A		밸브 B	
	닫힘	열림	닫힘	열림
밸브계수	0.38	0.34	0.39	0.36
동적시험 (lbs)	6853	3509	6211	3412
PPM (lbs)	8392	4863	9336	5881
PPM/동적시험	1.225	1.386	1.503	1.724

Table 6 Cracking Thrusts in DT and PPM

시험 차수	밸브 A		밸브 B	
	1차	2차	1차	2차
시험 차압 (psid)	1849	1847	1200	1172
동적시험 (lbs)	3063	4009	4864	5759
F_c (lbs)	8309		10721	
F_{ST} (lbs)	3964		5799	
식 2 (lbs)	6584	6583	8465	8446
식 3 (lbs)	5238	5236	7510	7479

3.5 결과 비교

Table 5는 설계기준 차압 조건에서 계산된 PPM과 동적시험 결과이다. 크래킹 스트레스를 제외한 행정에 따른 스트레스 가운데 최대 스템 스트레스를 비교한 것이다. 동적시험에서 측정된 결과 보다 PPM으로 계산한 스템 스트레스가 대단히 큰 것을 알 수 있다. 닫힘 행정의 경우 약 23~50%정도 크고, 열림 행정의 경우 약 39~72% 정도 크다. Table 5에서 밸브 계수는 1, 2차 시험에서 구한 값 가운데 큰 것을 적용하였다.

Table 6은 동적시험에서 측정된 크래킹 스트레스와 PPM으로 예측한 값의 비교이다. 1, 2차의 시험 차압은 유사한 조건에서 수행되었으나, 동

적시험의 크래킹 스트레스는 2차 시험이 큰 것을 알 수 있다. 일반적으로 연속한 시험에서 두 번째 결과가 크다는 보고가 있지만 크래킹 스트레스의 특성상 변화량이 크기 때문에 특별한 물리적 의미를 갖는다고 볼 수 없다. 식 2와 3의 F_c 와 F_{ST} 는 Table 6의 값을 적용하였으며 패킹 스트레스는 Table 4의 1029 lbs, 784 lbs를 적용하였다.

식 2와 3 모두 동적시험에서 측정된 값보다 상당히 크게 예측하는 것을 알 수 있으며, 특히 식 2의 결과가 훨씬 보수적임을 알 수 있다. 따라서 EPRI는 식 2의 지나친 보수성을 감안하여 식 3의 사용을 제안하고 있다. 2차 동적시험 결과와 식 3의 결과를 비교하여 보면, PPM 방법이 약 30% 정도 큰 것을 알 수 있다.

4. 결론

설계기준 조건에서 모터구동밸브의 운전성능 평가를 위한 최소요구 스트레스 예측 방법인 EPRI PPM을 국내 밸브에 적용하고, 동적시험 결과와 비교하였다. 그 결과 닫힘 및 열림 행정 모두 PPM 전산코드 계산결과가 동적시험 결과보다 충분히 큰 것을 확인하였다. 또한 크래킹 스트레스에서도 PPM이 동적시험보다 충분히 크게 예측함을 확인하였다. 비교 대상 밸브의 수가 많지는 않지만 PPM은 설계기준 조건에서 밸브의 작동에 필요한 최소요구 스트레스 예측에 사용할 수 있는 보수적인 방법임을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) D. Harrison and T. Walker, 1994, "Performance Prediction Methodology Software User Manual", EPRI TR-103243
- (2) J. Moroney and T. Walker, 1999, "An Improved and Validated Gate Valve Unwedging Methodology", EPRI TR-103237-R2
- (3) T. Walker, P.S. Damerell, D. Harrison, and R. Paul, 1998, "Performance Prediction Methodology Implementation Guide - Revision 2", EPRI TR-103244-R2
- (4) 박성근, 박수기, 정희권, 2001, "2000년도 전원전 안전성 평가 대상 모터구동 밸브 최종평가 결과", '01전력연-단096 TM.99NE14.R2001.093, 2001