

모터구동밸브 설계기준 성능평가 적용 부하율의 타당성 연구

A Study on the Rate-of-Loading Applied in Design Basis Performance Evaluation for Motor Operated Valves

강신철, 정래혁, 이도환, 박성근, 홍승열

한전 전력연구원

대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

토크 스위치로 제어되는 밸브에서 스템에 작용하는 부하에 따라 토크 스위치 트립시 스템 쓰러스트가 변하는 특성을 부하율이라 한다. 이 현상으로 인하여 정적 진단시험에서 측정된 쓰러스트 값만으로 토크 스위치 설정치를 결정할 경우 설계기준 최대 차압 조건에서 밸브가 완전히 닫히지 않게 되어 밸브를 통한 누설이 발생될 수 있다. 부하율을 정량적으로 평가하기 위해서는 정적 및 동적 진단시험으로 토크 스위치 트립시 쓰러스트 값을 측정해야만 가능하다. 과학기술부 규제 권고사항에 따라 수행중인 현 모터구동밸브의 설계기준 성능 평가에서는 동적 진단시험이 수행되지 않는 저 차압 밸브 및 동적 진단 시험 불가능 밸브에 대하여 미국의 선행 설계기준 성능평가지 대부분의 원전이 공통으로 적용한 부하율의 규칙적 불확실성 10%를 적용하고 있다. 이 10% 값에 대한 적용 타당성을 확인하기 위하여 현 설계기준 성능평가에서 정적 및 동적 진단시험이 수행된 밸브의 부하율을 기준으로 부하율의 불확실성에 대한 통계 분석을 수행하였다. 분석 결과 현 설계기준 성능 평가에 적용중인 10%의 부하율 불확실성이 90%~95% 신뢰 수준에서 적용될 수 있음이 통계적으로 확인되었으므로 설계기준 성능 평가 대상밸브중 저 차압 밸브 및 동적진단 시험 불가능 밸브에 대한 현재의 부하율 불확실성에 대한 적용 값(10%)이 적절한 것으로 판단된다.

Abstract

Rate-of-Loading(ROL) is defined as the characteristics of change in stem thrust of motor operated valves (MOV's). ROL can cause leakage through disk because the valve is not closed fully under differential pressure conditions (design basis conditions) if the torque switch trip(TST) setpoint is conducted under static conditions. Dynamic and static test should be implemented to quantify ROL value. Design basis performance evaluation for MOV's is implemented in other to address the regulatory recommendation issued by the Ministry of Science and Technology. In the evaluation the uncertainty value of ROL, 10% is applied for the valves that their design basis differential pressure is less than 50 psid or can not be tested dynamically. The value had been used in the design basis performance evaluation of U.S. In order to confirm the applicability of 10% value statistic analysis was conducted based on the ROL values evaluated from the valves that both static and dynamic tests were conducted. The applicability of the values for current design basis performance evaluation was confirmed because confidence distribution of values was ranged from 90% to 95%.

1. 서 론

1997. 6. 13에 발행된 과학기술부 규제요건에 따라 원전 안전관련 모터구동밸브에 대해 설계 기준 분석 및 현장에서의 정·동적 진단시험 등 현재 모터구동밸브에 대한 설계기준 성능평가가 수행되고 있다. 차압이 없는 상태에서 밸브의 상태 확인 및 스위치 설정의 적절성을 평가하고 필요한 경우 스위치 설정값을 조절하는 것이 정적 진단시험(Static Test)의 목적이며 동적 진단시험(Dynamic Test)은 설계 기준 조건 또는 설계기준 조건과 유사한 차압 조건에서 유동에 의한 쓰러스트를 확인하기 위해 수행된다. 이 때 정적 진단시험과 동적 진단시험에서 취득된 토크스위치 트립시 쓰러스트간(즉, 설정 쓰러스트)에 차이가 발생하게

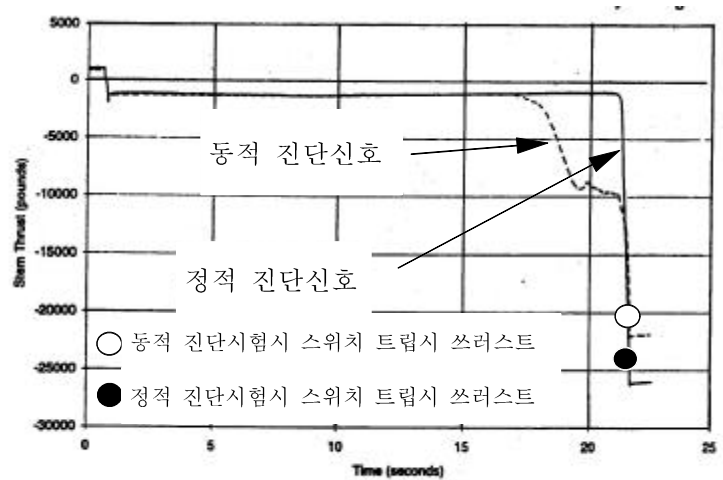


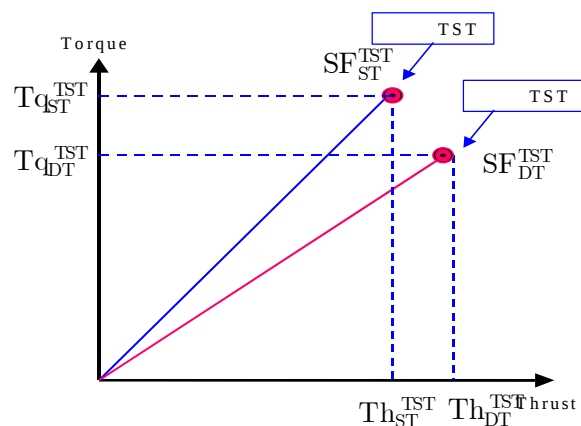
그림 1. 진단시험시 측정된 쓰러스트 신호

되는데 그 이유는 밸브 전·후단에 차압이 존재하는 동적 조건에서는 정적 조건에서보다 스템에 작용하는 부하가 천천히 증가하여 정적 조건에서보다 낮은 쓰러스트 값에서 토크 스위치 트립이 일어나기 때문이다. 이러한 현상으로 인하여 정적 진단시험에서 측정된 쓰러스트 값만으로 토크스위치 설정치를 결정할 경우 설계기준 최대 차압 조건에서 밸브가 완전히 닫히지 않게 되어 밸브를 통한 누설이 발생될 수 있다. 따라서, 이러한 현상을 제거하기 위하여 과학기술부 규제 권고사항에 따라 수행중인 현 모터구동밸브의 설계기준 성능 평가에서는 동적 진단시험이 수행되지 않는 저 차압 밸브 및 동적 진단 시험 불가능 밸브에 대하여 미국의 선행 설계기준 성능평가지 대부분의 원전이 공통으로 적용한 부하율의 규칙적 불확실성 10%를 적용하고 있다. 미국의 원전에서 사용중인 밸브의 설계 및 운전 이력 등이 국내 원전에서 사용중인 밸브와는 상이하므로 이 10% 값에 대한 적용 타당성을 확인하기 위하여 현 설계기준 성능평가에서 정적 및 동적 진단시험이 모두 수행된 밸브의 부하율을 기준으로 부하율의 불확실에 대한 통계 분석을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 부하율의 정의 및 평가 방법

서론에서 설명된 바와 같이 부하율 현상은 토크 스위치로 제어되는 게이트 또는 글로브 밸브의 구동기 출력이 스템에 작용되는 부하의 시간 변화율(Load Time History)에 따라 변하는 것으로 정의되며, 일반적으로 다음과 같은 두 가지 방법이 부하율을 평가하는데 사용되고 있다(그림 2 참조).



- ▶ TST : 토크스위치 트립 지점
- ▶ $T_{q_{ST}}^{TST}$: TST Torque (Static Test), Th_{ST}^{TST} : TST Thrust (Static Test)
- ▶ $T_{q_{DT}}^{TST}$: TST Torque (Dynamic Test), Th_{DT}^{TST} : TST Thrust (Dynamic Test)
- ▶ SF_{ST}^{TST} : Stem Factor (Static Test), SF_{DT}^{TST} : Stem Factor (Dynamic Test)

첫 번째 방법은 정적 진단시험과 동적 진단시험의 토크스위치 트립 지점에서 나타나는 스템

팩터(Stem factor)를 이용한 방법으로 계산식은 다음과 같다.

- 방법 1 : $R_{TST}^{SF} = SF_{DP}^{TST} / SF_S^{TST}$ (1)

스템 팩터는 스템에 작용되는 토크와 쓰러스트의 비를 의미하며 스템의 구조적 제원과 스템과 스템너트 사이의 마찰계수와 함수로 나타나게 된다. 즉, 스템 팩터가 낮으면 토크가 쓰러스트로 변환될 때 나타나는 스템의 효율이 그만큼 좋다는 것을 의미하게 된다. 따라서, 방법 1의 경우 동일 토크 스위치 설정값에 대해 동적 조건에서보다 정적 조건에서 스템 팩터가 낮게 나타나므로 부하율은 1보다 크게 나타난다.

$$SF = \frac{d \times (0.96815 \times \frac{1}{\pi \times d_{pitch}} + \mu)}{24 \times (0.96815 - \mu \times \frac{1}{\pi \times d_{pitch}})} \quad \text{for ACME thread}$$

여기서,

l = 스템 리드

$$d_{pitch} = D_s - \frac{p}{2}$$

D_s = 스템 직경

p = 스템 피치

μ = 스템 마찰 계수

두 번째 방법은 정적 진단시험과 동적 진단시험의 단힘시 토크 스위치 트립 지점에서의 쓰러스트 값을 이용한 방법으로 계산식은 다음과 같다.

- 방법 2 : $R_{TST}^{TH} = Th_S^{TST} / Th_{DP}^{TST}$ (2)

일반적으로 방법 2의 경우 동일 토크 스위치 설정값에 대해 정적 조건에서 차압 조건에서보다 높은 스트스트 값에서 토크스위치가 트립되기 때문에 동적 진단시험에서 측정된 쓰러스트 값이 정적 진단시험에서 측정된 쓰러스트 값보다 작아지게 되므로 R_{TST}^{TH} 은 1.0보다 크게 된다.

일반적으로 밸브의 신호 거동을 살펴보면 동적 조건에서 밸브가 시팅(Seating) 직전에 시팅 시작점보다 큰 부하가 작용하게 되어 스템 토크가 증가하게 되는데 이로 인해 토크 스위치 트립시 스템 토크가 보다 크게 나타난다고 알려져 있다. 이의 원인이 정확하게 밝혀진 바는 없으나 토크 스위치 제어 방식의 밸브가 닫힐 때 워와 워축이 분리된 상태에서 워가 토크 스위치와 맞물려 있는 스프링팩을 압축하게 되는데 이 워가 이동하는 부위의 마찰이 증가하기 때문으로 추정되고 있다. 따라서, 방법 1에서는 스템 팩터로만 부하율을 평가하기 때문에 스템의 효율은 반영되어 있으나 스템 토크의 변화율이 반영되지 않는다. 방법 2의 경우 토크 스위치 트립시 쓰러스트로 부하율을 평가하기 때문에 스템 효율의 변화와 스템 토크의 변화가 동시에 반영되어 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 부하율에 대한 보다 정확한 평가를 위하여 방법 2를 적용하여 부하율을 평가하였다.

2.2 현 설계기준 성능평가에서의 부하율 적용 방법 및 분석 범위

서론에서 설명한 바와 같이 현 모터구동밸브 설계기준 성능평가에는 정적 진단시험과 동적 진단시험이 수행되고 있는데 모든 밸브들에 대하여 동적 진단시험을 수행함으로써 밸브의 안전성을 확인하는 것이 이상적이나 설계기준 차압 또는 유사한 정도의 차압 형성이 어렵고 발전소 계획예방정비기간이 한정되어 있기 때문에 현실적으로 수행이 불가능한 상태이다. 또한, 특정 밸브

에 대해서는 가상 사고를 고려하여 설계가 수행되었기 때문에 설계기준 차압 형성 자체가 불가능(이하 동적 진단시험 불가능 밸브)한 경우도 발생된다. 따라서, 현 설계기준 성능평가에서는 설계기준 분석을 통하여 동적 진단시험의 가능 여부를 판단하고 동적 진단시험이 불가능한 밸브와 동적 진단시험이 가능하더라도 설계기준 차압이 50psid 이하(이하 저 차압 밸브)인 밸브의 경우 차압이 작아 신호로부터 부하율에 대한 정량적 평가에 많은 불확실성이 수반되기 때문에 동적 진단시험을 수행치 않고 정적 진단시험만으로 설계기준 성능평가를 수행하고 있다. 이때 부하율로 인한 토크 설정치의 오류를 방지하기 위하여 부하율에 대한 불확실성을 반영하여 운전 여유도를 평가하고 있으며, 이 운전 여유도를 근거로 토크 스위치의 설정 범위가 결정된다. 운전 여유도 평가시 부하율에 대한 불확실성 뿐만 아니라 진단장비, 밸브 디스크 부위의 성능 저하(밸브 팩터), 스템 윤활 성능 저하 등에 대한 불확실성이 동시에 고려되고 있는데 적용되는 부하율 불확실성만 살펴보면 저 차압 밸브 및 동적 진단시험 불가능 밸브에는 규칙적인 부하율 불확실성 10%가 모든 밸브에 적용되고 있으며 불규칙적 부하율 불확실성은 적용되지 않고 있다. 정적 및 동적 진단시험이 모두 수행된 밸브에서 대해서는 방법 2를 적용하여 평가된 정량화된 부하율 값을 적용하고 있다. 저 차압 밸브 및 동적 진단시험 불가능 밸브에 적용되고 있는 부하율의 규칙적 불확실성 10%는 미국의 선행 설계기준 성능평가에서 적용된 값으로서 미국 원전에서 사용 중인 밸브의 설계특성과 운전 조건, 운전 이력 등이 반영된 값이다. 그러나 국내 원전에서 사용 중인 밸브의 설계특성과 운전 특성이 미국과는 상당한 차이가 있으므로 현 설계기준 성능평가에 적용되고 있는 부하율 불확실성 10%에 대한 타당성을 분석할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 국내 설계기준 성능평가 이후 정적 및 동적 진단시험이 모두 수행된 밸브로부터 부하율을 정량화하고 이 값을 기준으로 저 차압 밸브 및 동적 진단시험 불가능 밸브에 적용되고 있는 부하율의 규칙적 불확실성 10%에 대한 타당성을 분석하였다. 또한, 정량화된 부하율에 대하여 통계 분석을 수행함으로써 부하율과 성능 저하와의 관계를 분석하였다.

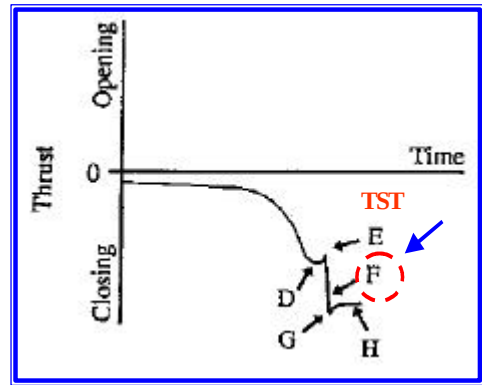


그림 4. 동적 진단시험시 TST 지점
쓰러스트 취득 위치

2.3 대상밸브

평가 방법 2(식2)를 적용하여 부하율을 평가하기 위하여 설계기준 성능평가에서 정적 및 동적 진단시험이 수행된 45대 밸브를 대상으로 진단시험시 스트레인 게이지형 힘 센서에서 취득된 진단신호로부터 토크 스위치 트립시 쓰러스트 값을 취득하였다. 정적 진단시험의 경우에는 그림 3의 J 지점에서, 동적 진단시험의 경우에는 그림 4의 F 지점에서 토크 스위치 트립시 쓰러스트 값을 취득하였다. 쓰러스트 값을 취득할 때 신호 분석자의 쓰러스트 취득 위치에 따라 취득 값이 조금씩 다를 수 있기 때문에 취득 쓰러스트 값의 일관성을 유지하기 위하여 현 설계기준 성능평가에서 취득된 쓰러스트 값과 관계없이 토크 스위치 트립시 쓰러스트 값을 재취득하였다.

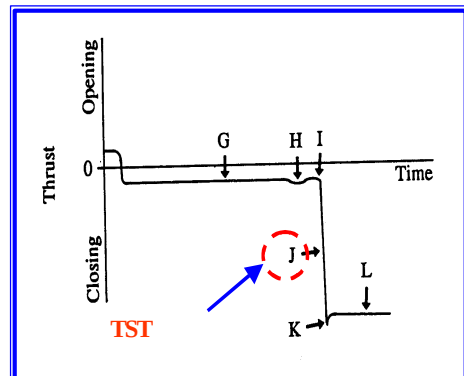


그림 4. 정적 진단시험시 TST 쓰러스트
치 트립시 쓰러스트 값을 재취득하였다.

취득된 쓰러스트 값에는 부하율 뿐만 아니라 스템 윤활유의 성능 저하, 밸브 팩터 및 기타 부하율과 관계없는 기계적 성능 저하 등으로 인한 부하가 측정된 스템 힘 또는 토크에 반영되어 나

타나기 때문에 부하율 정량화에 적합하지 않는 쓰러스트 값이 포함될 수 있다. 이를 방지하고 본 평가의 목적에 부합되는 밸브의 부하율만을 도출하기 위하여 아래와 같은 4가지 신호를 상세 검토하여 그림 5,6,7,8의 정상 거동 신호와 달라 분석의 불활성성이 큰 것으로 판단되어 분석 대상에서 제외하였다.

- ① 행정 시간에 따른 토크 거동
- ② 행정 시간에 따른 쓰러스트 거동
- ③ 스프링 팩 변위 거동(DMT(Displacement Measuring Transducer) 센서에서 취득된 신호)
- ④ 행정 시간에 따른 마찰 계수 변화

									Dpitch	
1	GATE	4	Limitorque	SMB-01	General ACME	0.866	0.2	0.4	0.766	ALVANIA
2	GATE	10	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.417	0.25	0.25	1.292	ALVANIA
3	GATE	10	Limitorque	SMB-1	General ACME	2	0.25	0.5	1.875	MOBILUX EP0
4	GATE	12	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.375	0.25	0.25	1.25	MOBILUX EP0
5	GATE	10	Limitorque	SB-2	General ACME	2	0.25	0.5	1.875	MOBILUX EP0
6	GATE	10	Limitorque	SB-2	General ACME	2.5	0.33	0.66	2.335	MOBILUX EP0
7	GATE	10	Limitorque	SB-2	General ACME	2.5	0.333	0.666	2.3335	MOBILUX EP0
8	GATE	3	Limitorque	SMB-000	General ACME	1.125	0.25	0.5	1	MOBILUX EP0
9	GATE	3	Limitorque	SMB-000	General ACME	1.125	0.25	0.5	1	MOBILUX EP0
10	GATE	10	Limitorque	SB-2	General ACME	2.5	0.33	0.66	2.335	MOBILUX EP0
11	GATE	10	Limitorque	SMB-1	General ACME	2	0.25	0.5	1.875	MOBILUX EP0
12	GATE	3	JOUCOMATIC	DR 10.35/0.9KW	General ACME	1.125	0.25	0.25	1	UNIREX-2
13	GATE	3	JOUCOMATIC	DR 10.35/0.9KW	General ACME	1.125	0.25	0.25	1	UNIREX-2
14	GATE	3	JOUCOMATIC	DR40.72/3.6KW	General ACME	1.125	0.25	0.25	1	UNIREX-2
15	GATE	3	JOUCOMATIC	DR 10.35/0.9KW	General ACME	1.125	0.25	0.25	1	UNIREX-2
16	GATE	3	JOUCOMATIC	DR 10.35/0.9KW	General ACME	1.125	0.25	0.25	1	UNIREX-2
17	GATE	3	JOUCOMATIC	DR 40.72/3.6KW	General ACME	1.125	0.25	0.25	1	UNIREX-2
18	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.18	0.25	0.25	1.055	ALVANIA
19	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.18	0.25	0.25	1.055	ALVANIA
20	GLOBE	10	Limitorque	SB-3	General ACME	3.35	0.5	1	3.1	ALVANIA
21	GLOBE	3	Limitorque	SMB-000	General ACME	1.1	0.2	0.2	1	ALVANIA
22	GLOBE	4	Limitorque	SB-2	General ACME	1.733	0.286	0.286	1.59	ALVANIA
23	GLOBE	4	Limitorque	SMB-0	General ACME	1.57	0.286	0.286	1.427	ALVANIA
24	GLOBE	4	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.1	0.2	0.2	1	ALVANIA
25	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.1	0.2	0.2	1	ALVANIA
26	GLOBE	3	Limitorque	SMB-0	General ACME	1.5	0.286	0.286	1.357	ALVANIA
27	GLOBE	10	Limitorque	SMB-2	General ACME	2.56	0.4	0.4	2.36	ALVANIA
28	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.125	0.2	0.2	1.025	EXXON NEBULA EP0
29	GLOBE	10	Limitorque	SMB-1	General ACME	2.5	0.333	0.333	2.3335	EXXON NEBULA EP0
30	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.125	0.2	0.2	1.025	EXXON NEBULA EP0
31	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.125	0.2	0.2	1.025	EXXON NEBULA EP0
32	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.125	0.2	0.2	1.025	EXXON NEBULA EP0
33	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.125	0.2	0.2	1.025	EXXON NEBULA EP0
34	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.125	0.2	0.2	1.025	EXXON NEBULA EP0
35	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.125	0.2	0.2	1.025	EXXON NEBULA EP0
36	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.125	0.2	0.2	1.025	EXXON NEBULA EP0
37	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.125	0.2	0.2	1.025	EXXON NEBULA EP0
38	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.125	0.2	0.2	1.025	EXXON NEBULA EP0
39	GLOBE	10	Limitorque	SMB-1	General ACME	2.5	0.333	0.333	2.3335	EXXON NEBULA EP0
40	GLOBE	2	Limitorque	SMB-000	General ACME	1.125	0.333	0.666	0.9585	MOBILUX EP0
41	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.18	0.25	0.25	1.055	MULTIFAK EP0
42	GLOBE	10	Limitorque	SB-3	General ACME	3.35	0.5	1	3.1	MULTIFAK EP0
43	GLOBE	2	Limitorque	SMB-00	General ACME	1.18	0.25	0.25	1.055	MULTIFAK EP0
44	GLOBE	10	Limitorque	SMB-2	General ACME	2.56	0.4	0.4	2.36	MULTIFAK EP0
45	GLOBE	10	Limitorque	SMB-1	General ACME	2.28	0.333	0.333	2.1135	MULTIFAK EP0

표 1. 분석 대상밸브 자료

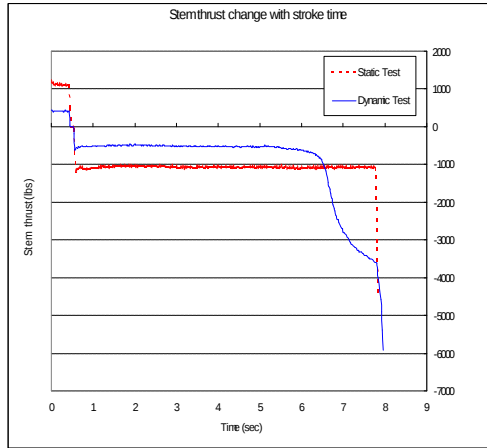


그림 5. 행정시간에 따른 쓰러스트
(정상신호)

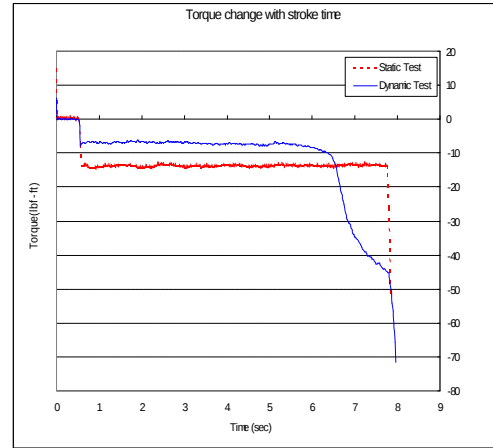


그림 6. 행정시간에 따른 토크
(정상신호)

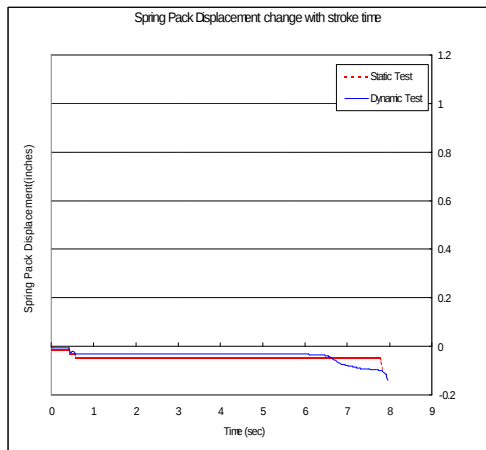


그림 8. 행정시간에 따른 스프링 팩
변위(정상신호)

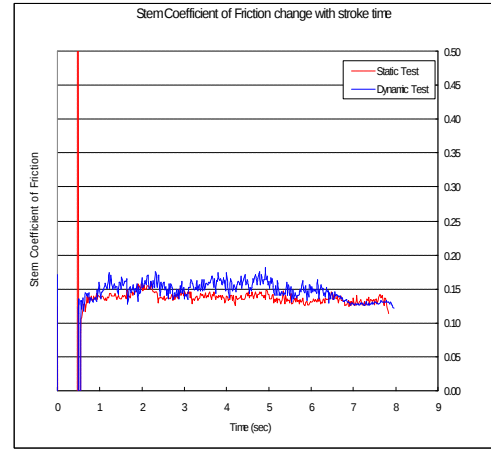


그림 9. 행정시간에 따른 마찰계수
(정상신호)

상세 진단신호 분석 결과 이상 거동 유형별로 나타난 결과를 요약하면 행정 시간에 따른 쓰러스트 및 토크 거동 신호가 이상한 밸브는 2대(표1의 4번 및 42번 밸브), 스프링 팩 변위의 거동 신호가 이상한 밸브는 3대(표 1의 36, 38, 39번 밸브), 행정 시간에 따른 마찰계수가 이상한 밸브는 1대(표 1의 17, 27, 38번 밸브)로 나타났다. 따라서 표1의 45대 밸브중 최종 부하율 평가 대상 밸브는 이상 거동을 나타낸 밸브 8대를 제외한 37대이다.

2.4 부하율 계산 결과

현 설계기준 성능평가에서 수행되는 정적 진단시험의 경우 밸브에 조치를 취하기 전에 현 상태의 운전 성능을 평가하기 위하여 첫 번째 시험(As-found Test)과 스템 윤활유 주입 등의 조치를 취한 후 수행되는 두 번째 시험(As-left Test)으로 구성된다. 동적 진단시험이 가능한 밸브의 경우도 이와 유사하게 2번이상 수행되도록 되어 있다. 부하율의 가장 주요 원인으로는 스템과 스템 너트사이의 마찰 계수가 동적 조건에서 증가하기 때문인 것으로 알려져 있으므로 스템 윤활유의 윤활 성능이 무엇보다 부하율 평가에 중요한 요소이다. 일반적으로 윤활 성능의 경우 처음 윤활유 주입 후 밸브의 행정 빈도가 어느 정도 증가된 후 성능이 좋아진다고 알려져 있다. 따라서, 보다 정확한 부하율 평가를 위하여 정적 및 동적 진단시험 모두 As-left 진단시험에서 취득된 토

크 스위치 트립시 쓰러스트 값으로 부하율을 평가하였다. 총 37대에 대하여 부하율 평가 방법 2 (식2)를 적용하여 평가된 결과는 표2와 같다.

							DT 2	DT 2	
1	GATE	4	Limitorque	5155.0	86.5	5254.4	0.0079	0.08	0.98
2	GATE	10	Limitorque	5821.0	54.8	5452.9	0.0102	0.12	1.07
3	GATE	10	Limitorque	16784.0	173.8	17718.6	0.0138	0.09	0.95
4	가								
5	GATE	10	Limitorque	16900.0	177.7	15577.0	0.0156	0.11	1.08
6	GATE	10	Limitorque	45154.0	169.8	43917.0	0.0177	0.09	1.03
7	GATE	10	Limitorque	48209.5	161.0	47145.0	0.0147	0.06	1.02
8	GATE	3	Limitorque	6488.0	919.2	6169.7	0.0121	0.12	1.05
9	GATE	3	Limitorque	6606.8	828.4	6144.5	0.0132	0.15	1.08
10	GATE	10	Limitorque	49052.0	179.4	48229.7	0.0160	0.07	1.02
11	GATE	10	Limitorque	16505.0	152.8	14067.5	0.0198	0.16	1.17
12	GATE	3	JOUCOMATIC	6859.0	182.5	7059.8	0.0064	0.07	0.97
13	GATE	3	JOUCOMATIC	5103.5	163.4	5313.7	0.0095	0.14	0.96
14	GATE	3	JOUCOMATIC	21775.0	1584.3	22609.6	0.0054	0.05	0.96
15	GATE	3	JOUCOMATIC	6136.1	179.0	5993.7	0.0071	0.09	1.02
16	GATE	3	JOUCOMATIC	6466.2	178.5	6585.7	0.0061	0.06	0.98
17	가								
18	GLOBE	2	Limitorque	9766.7	1873.6	11018.2	0.0069	0.08	0.89
19	GLOBE	2	Limitorque	9555.5	1876.8	10868.7	0.0081	0.10	0.88
20	GLOBE	10	Limitorque	73480.0	272.4	82670.9	0.0234	0.07	0.89
21	GLOBE	3	Limitorque	3560.9	180.1	3366.6	0.0083	0.13	1.06
22	GLOBE	4	Limitorque	31361.0	299.7	31960.0	0.0116	0.11	0.98
23	GLOBE	4	Limitorque	10122.0	205.1	9713.2	0.0125	0.14	1.04
24	GLOBE	4	Limitorque	8415.0	108.8	7779.9	0.0058	0.07	1.08
25	GLOBE	2	Limitorque	10142.0	1754.0	9397.5	0.0087	0.14	1.08
26	GLOBE	3	Limitorque	22087.0	1802.0	20345.2	0.0107	0.12	1.09
27	가								
28	GLOBE	2	Limitorque	14316.0	193.4	14731.1	0.0056	0.066	0.97
29	GLOBE	10	Limitorque	15587.0	109.2	15829.8	0.0184	0.14	0.98
30	GLOBE	2	Limitorque	15392.0	1810.3	15242.9	0.0066	0.09	1.01
31	GLOBE	2	Limitorque	12981.0	1950.1	11934.6	0.0074	0.11	1.09
32	GLOBE	2	Limitorque	11288.0	196.8	10752.8	0.0077	0.11	1.05
33	GLOBE	2	Limitorque	12816.0	1953.9	12217.2	0.0086	0.13	1.05
34	GLOBE	2	Limitorque	13742.0	1792.6	12146.2	0.0069	0.09	1.13
35	GLOBE	2	Limitorque	12907.0	1935.6	11899.0	0.0069	0.10	1.08
36	가								
37	가								
38	가								
39	가								
40	GLOBE	2	Limitorque	12907.7	97.7	13081.2	0.0121	0.07	0.99
41	GLOBE	2	Limitorque	5244.0	1817.4	5646.6	0.0142	0.23	0.93
42	가								
43	GLOBE	2	Limitorque	7635.0	1820.6	7365.9	0.0080	0.10	1.04
44	GLOBE	10	Limitorque	37410.0	154.3	34591.4	0.0187	0.13	1.08
45	GLOBE	10	Limitorque	19198.0	116.5	15968.7	0.0180	0.15	1.20

표 2. 부하율 계산 결과

계산된 부하율의 분포를 살펴보면 최소값은 0.88이고 최대 값은 1.20으로 나타났다. 부하율의 정의로 판단할 때는 1이하의 값이 나타날 수가 없다. 그러나 2.3항에서 설명된 바와 같이 정·동적 진단시험에서 취득된 토크 스위치 트립시 쓰러스트 값에는 센서의 측정 불확실성, 밸브 팩터, 스프링 팩 폴립, 기타 기계적 성능 저하 등으로 인한 불확실성이 동시에 포함되어 나타나며, 특히 동적 진단시험시에는 밸브 팩터가 이 불확실성에 기여하는 바가 매우 크다. 따라서, 표2에서 나타난 부하율이 1이하 값이라도 본 평가에서 제외하지 않았다.

2.4 현 설계기준 성능평가에 적용중인 규칙적 부하율 불확실성 10%의 적용성 분석

상기 결과를 바탕으로 국내 설계기준 성능평가지 저 차압(차압이 50psid 미만인 밸브) 밸브 및 동적 진단시험 불가능 밸브에 적용중인 부하율의 규칙적 불확실성 10%(실제 적용 부하율 값은 1.1임)의 타당성을 분석하였다. 분석 결과를 살펴보면 부하율 값이 1.1이상으로 나타난 밸브가 총 부하율 평가 대상밸브 37대중 3대로 나타났다. 즉, 규칙적 부하율 불확실성 10%가 적용될 수 있는 밸브가 약92%로 나타났다.

통계학적으로 해당 변수(본 논문에서는 부하율)의 불확실성은 크게 규칙적 불확실성(Biased Term)과 불규칙적 불확실성(Random Uncertainty)로 나누어진다. 규칙적 불확실성은 물리적으로 해당 변수의 성능 저하로 인하여 시간에 따라 그 값이 달라진다는 것을 의미하며 불규칙적 불확실성은 표준 불확실성(Standard Uncertainty)를 의미한다. 따라서, 부하율이 시간에 따라 성능 저하가 발생되는지를 분석하기 위하여 표 2에 계산된 부하율 값을 대상으로 통계적 분석을 수행하였다.

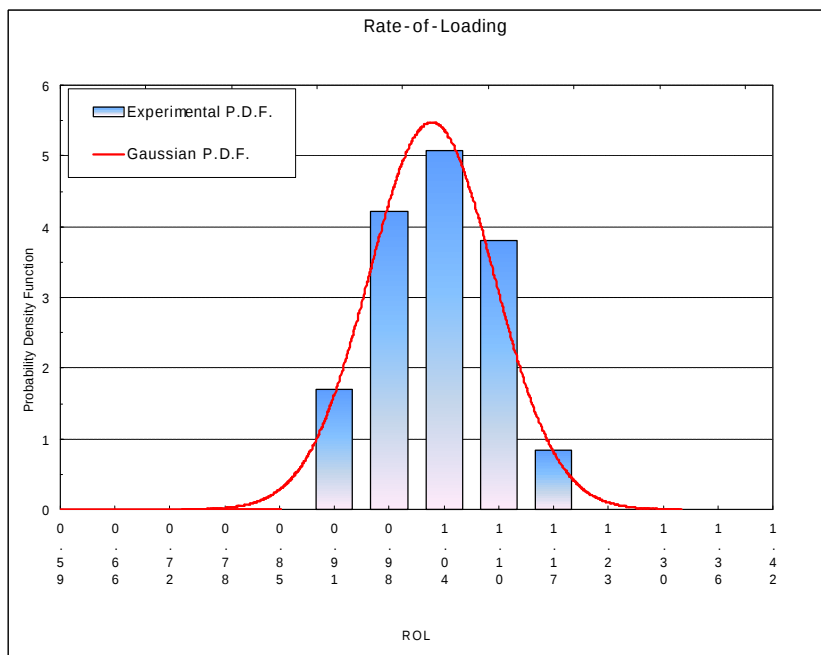


그림 11. 부하율에 대한 확률밀도함수(PDF)

통계 분석을 수행하기 위하여는 먼저 분석 대상 변수의 값이 정규 분포 형태로 나타나는지를 파악해야 한다. 이를 위하여 부하율 값에 대한 확률 밀도 분포를 분석한 결과 표준화된 정규 분포 (또는 가우스 분포)와 매우 유사하게 나타났다(그림9 참조).

따라서, 실제 부하율 값이 정규 분포를 나타낸다는 전제하에 부하율에 대한 통계 분석을 95% 신뢰도 구간에서 다음 식(3)에 따라 수행하였다.

$$\text{Uncertainty} = \mu \pm 2\sigma \quad (3)$$

여기서,

Uncertainty : 부하율 총 불확실성

μ : 규칙적 불확실성

2σ : 불규칙적 불확실성(95% 신뢰도)

통계 분석 결과를 요약하면 부하율에 대한 규칙적 불확실성(μ)는 0.025로 나타났으며 불규칙적 불확실성은 0.172로 나타났다.

상기 분석 결과로부터 현 설계기준 성능 평가에 적용중인 10%의 부하율 불확실성은 92~95%

신뢰도를 가지고 있음이 통계적으로 확인되었기 때문에 안전관련 모터구동밸브중 저 차압밸브 및 동적진단 시험 불가능 밸브에 이 값을 적용해도 될 것으로 판단된다.

3. 결론

시스템에 작용하는 부하에 따라 토크 스위치 트립시 스템 쓰러스트가 변하는 특성을 부하율이라고 정의하는데 이에 대한 효과를 고려하지 않고 정적 진단시험시 측정된 쓰러스트 값만으로 토크 스위치 설정치를 결정할 경우 설계기준 최대 차압 조건에서 밸브가 완전히 닫히지 않게 되어 밸브를 통한 누설이 발생될 수 있다. 부하율을 정량적으로 평가하기 위해서는 정적 및 동적 진단시험으로 토크 스위치 트립시 쓰러스트 값을 측정해야만 가능하다.

과학기술부 규제 권고사항에 따라 수행중인 현 안전관련 모터구동밸브의 설계기준 성능 평가에서는 정적 및 동적 진단시험이 모두 수행되는 밸브에 대하여는 해당 밸브의 부하율을 정량화하여 토크 스위치 설정 범위를 결정할 때 이를 반영하고 있다. 그러나, 동적 진단시험이 수행되지 않는 저 차압 밸브 및 동적 진단 시험 불가능 밸브의 경우에는 미국의 선행 설계기준 성능평가지 대부분의 원전이 공통으로 적용한 부하율의 규칙적 불확실성 10%를 적용하고 있다. 이 10% 값에 대한 적용 타당성을 확인하기 위하여 현 설계기준 성능평가에서 정적 및 동적 진단시험이 수행된 밸브 37대의 부하율을 계산하고 이 결과 값을 이용하여 통계 분석을 수행하였다.

분석 결과 현 설계기준 성능 평가에 적용중인 10%의 부하율 불확실성이 90%~95% 신뢰 수준에서 적용될 수 있음이 통계적으로 확인되었으므로 설계기준 성능 평가 대상밸브중 저 차압 밸브 및 동적진단 시험 불가능 밸브에 대한 현재의 부하율 불확실에 대한 가정(10%)이 적절한 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

- (1) EPRI, "EPRI MOV Performance Prediction Program-Methods to Address Rate-of-Loading in Torque Switch Controlled MOVs", 1994. 11, EPRI TR-103226
- (2) EPRI, "Addendum 4 to TR-103237-R2 : Use of Static Closure Data for Determining the Stem-to-Stem Nut Coefficient of Friction at Unwedging, 1999. 12, EPRI TR-113989
- (3) Crane, "Review of Dynamic Testing of AF-046", 2001. 7
- (4) 한진호 등, 1999, "부하율이 모터구동밸브의 토크 스위치 설정시에 미치는 영향", 한국원자력학회 '99 추계학술발표회 논문집.
- (5) Crane, "NRC GL 89-10 Pilot Implementation Program-Motor Operated Valve Program Documents and Related MOV Information", 1994
- (6) EPRI, "Application Guide for Motor-Operated Valves in Nuclear Power Plants" 1999. 9, EPRI TR-106563