

원자력, 화력 발전소용 MTV & ETV의 시험기준 개발 Development of Test Code of MTV & ETV for TPP, NPP

이 용 범

Y. B. Lee

1. 서 론

원자력 및 화력 발전소의 대형터빈은 고속(1800, 3600 rpm) 회전체인 관계로, 터빈의 속도를 기계적 및 전기적으로 감시(monitoring)하며, 터빈의 과속 또는 스팀 계통의 이상이나 터빈에 이상이 발생할 때는 터빈으로 유입되는 스팀을 즉시 차단하여 터빈의 과속을 방지 시켜서 터빈을 보호 한다. 터빈 보호기구는 크게 두가지로 분류되며, 그중 기계식 차단밸브(MTV: mechanical trip valve)는 터빈 과속시 기계적인 링크로 동작되며, 전기식 차단밸브(ETV: electrical trip valve)는 터빈 이상신호 발생 시 작동한다. MTV 및 ETV 동작 시 터빈출력제어장치인 유압서보제어 Actuator를 급속 폐쇄하여 터빈유입 증기를 차단한다. MTV와 ETV는 정상상태에서는 작동을 하지 않고, 비정상 상태에서 안전장치로 작동해야 하는 부정기적인 작동특성을 갖고 있지만, 비상상태에서는 반드시 작동이 되어야만 하는 특수성과 사용 환경이 진동과 고열로 인하여 작동밸브가 고착되는 고장발생 될 수 있기

때문에 신뢰성확보가 요구된다.

본 연구에서는 전량 수입에 의존했던 원자력/화력 발전소용 MTV와 ETV의 국산화 개발품에 대한 신뢰성확보를 위해 개발한 Test Code에 대하여 논하였다.

2. MTV & ETV 구조 및 특성

2.1 MTV & ETV 구조

기계식 차단 밸브(MTV)는 원자력 및 화력발전소(이하 발전소)에서 비상시 사용되는 기계식 유로차단 밸브이며 구조 및 기호는 그림 1의 (a)와 같이 구성되어 있다.

전기식 차단 밸브(ETV)는 발전소에서 비상시 전기적 신호에 의해서 유로를 차단시키는 밸브이며 구조는 메인밸브에 Pilot 밸브, 릴리프밸브, 필터 및 LVDT 등이 내장되어있으며, 기호는 그림 1의 (b)와 같이 구성되어 있다.

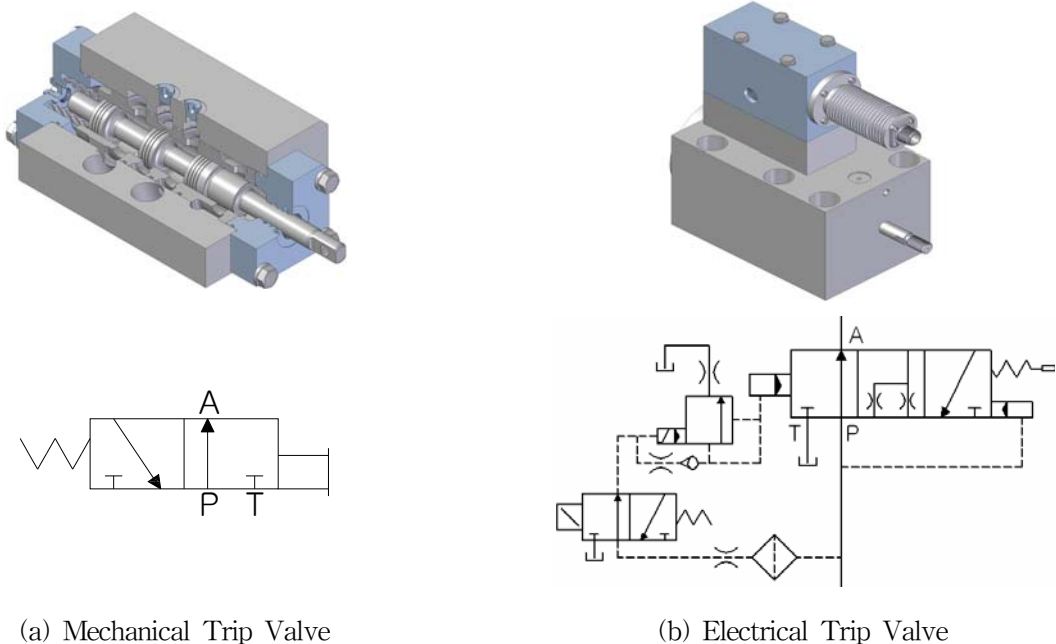


그림 1 MTV & ETV 구조 및 기호

2.2 MTV & ETV 특성

그림 2와 같이 발전소에서 사용되는 회로도에는 터빈을 보호하기 위하여 기계 및 전기식으로 이중안전장치가 구성되어 있지만, 매우 복잡한 장치들이 복합적으로 결합되어 있기 때문에 어느 한 부품들의 신뢰성이 떨어지면 바로 전체 시스템이 정지되는 고장으로 이어진다.

발전소의 핵심기기인 MTV & ETV가 전량 수입에 의존하여 전략적으로 국산화 개발을 하였지만, 이를 발전소에 적용하기 위해서는 제품에 대한 고 신뢰성 확보와 입증에 필수적사항 요구되는 특성을 가지고 있다.

3. 적용범위 및 인용규격

3.1 적용범위

발전소의 긴급 상황 발생 시에 터빈을 정지시키기 위한 터빈 비상정지용 기계식 유로차단 밸브 및 터빈 비상정지용 전기식 유로차단 밸브의 신뢰성 인증 시험 방법에 대하여 규정하였다. 본 규격에서 적용될 수 있는 제품의 범위는 표 1과 표 2에 따른다.

3.2 인용규격 및 샘플링 방법

종합 성능시험은 KS B ISO 1219-2, KS B ISO 4411, KS B ISO 10770-1, KS C 0704, KS C 4004,

KS M 3448, ISO 6403, ANSI/(NFPA) T3.5.28, SAE J 747, SAE J 1235, GEK 98929A 규격을 기준 인용하였으며, 내환경성 시험은 IEC 60068-2-6, IEC 60721-3-3, MIL STD 810F 규격 인용하였다. 수명시험은 실제 현장 작동조건(내구수명)을 참조하여 적용하였다.

가장 최근에 동일한 조건으로 생산된 양산품 중 3개를 랜덤 샘플링 하여, 1개는 내환경성 시험, 2개는 수명시험에 활용한다.

표 1 MTV 적용 범위

항 목	범 위
운용환경	실내 특수 조건 [20~70 ℃]
정격압력	14 MPa 이하
정격유량	150 L/min 이하
유압유	인산 에스테르계 작동유 (FRF 220)

표 2 ETV 적용 범위

항 목	범 위
제어방식	전기 신호식
운용환경	실내 특수 환경 [20~70 ℃]
정격압력	14 MPa 이하
정격유량	150 L/min 이하
정격전압	DC 24 V
정격전류	2 A 이하
정격저항	(20~22)Ω
유압유	인산 에스테르계 작동유 (FRF 220)

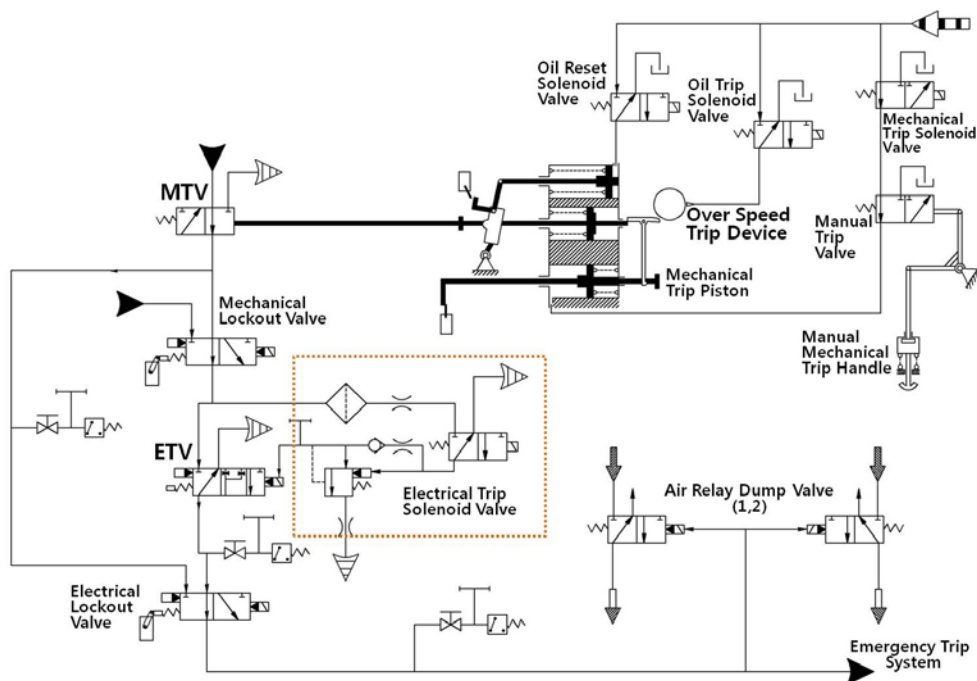


그림 2 원자력 및 화력발전소의 Front Standard System 유압 회로도

4. Test Code 개발

터빈 비상정지용 기계식/전기식 유로차단밸브의 Test code를 개발하기 위하여, 국내 원자력 및 화력 발전소의 고장사례를 통한 고장모드영향분석(FMEA: failure mode & effects analysis), 치명도 매트릭스분석(CMA: criticality matrix analysis)을 실시하고, 결합나무분석(FTA: fault tree analysis)과 2단계 품질기능전개(2-stage quality function deployment) 통하여 정성적 고장사례를 정량적으로 중요도와 실험항목의 우선순위를 결정 하였다.

4.1 Failure Mode and Effects Analysis

고장모드 영향 분석은 시스템에서 제품의 사용중 발생하는 고장모드와 원인 및 영향도출 및 전개하여 정성적 고장내용을 정량적으로 분석하기 위한 방법이다.

A	B	C	D	E	F	G			
						H	I	J	
기계식 유로차단 밸브 조립체	기계식 레버에 의해서 작동되는 유로차단 밸브	작동 고장	포켓의 동작 불능	이물질	a, b	상	상	9	
		누유	포켓 중립 위치 불량, 씰 열화	마모	효율 저하, c	중	상	7	
		파손, 변형	재료, 구조 강도 부족	파손	a, c 누유	중	중	5	
..	
슬레노이드부	코일	자기력 발생	절연파괴, 단선, 단락	과전류에 의한 열화	과전류	절환동불능	중	중	5
	케이스	슬레노이드 보호	크랙, 파손, 마모, 부식	진동 또는 충격	진동, 충격	오동작	중	상	7
..	

A: Primary Components, B: Function,
 C: Failure Modes, D: Failure Mechanisms,
 E: Failure Causes, F: Failure Effects, G: Criticality
 H: 고장발생빈도, I: 고장심각도, J: 치명도
 a: 개폐 기능 상실, b: 응답 특성 저하
 c: 시트 기밀 유지 불가

위와 같은 방법으로 MTV의 주요 구성 품으로 유로차단 밸브 하우징, 포켓, 커버 스프링부 등으로 분리해서 고장모드 영향 분석을 실시하였으며, ETV의 경우 슬레노이드부와 밸브부로 나누어, 밸브부의 주요 구성 품으로 하우징, 스톱, 로드, 가이드, 스프링, 슬레노이드 등으로 나누어 FMEA를 하였다.

4.2 Criticality Matrix Analysis

CMA는 고장이 제품에 미치는 치명도와 고장발생빈도수를 표로 분석하는 기법으로서 심각도를 세로축으로 발생빈도를 가로축으로 하여 치명도 분석한 CMA

결과는 다음과 같다

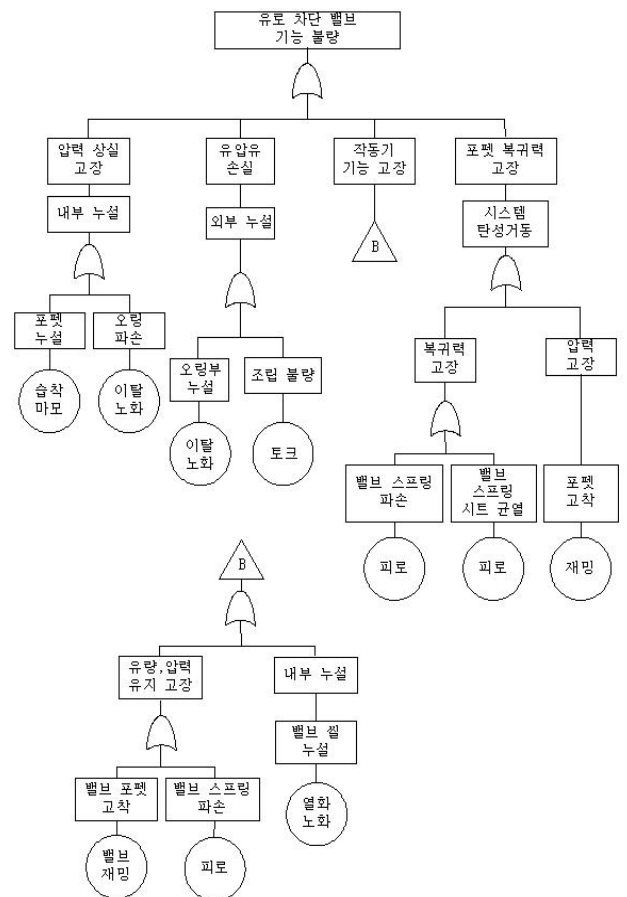
Failure Severity	상	III	4-1	II	1-2 3-3 4-2 5-1	I	1-1 3-1 3-2
	중	IV	2-2 2-3	III	1-3 2-1 4-3	II	
	하	V		IV	2-4	III	
			하		중		상

Failure Frequency

* 치명도(점수) : I (9)→II(7)→III(5)→IV(3)→V(1)

4.3 Fault Tree Analysis

FTA는 시스템의 고장을 발생시키는 사상과 그 원 인과의 인과관계를 논리기호(AND 또는 OR)를 사용하여 나뭇가지 모양의 그림으로 나타내는 기법으로 유로차단밸브의 FTA 결과는 다음과 같다.



4.4 Quality Function Deployment Level 1

QFD-1단계는 고장모드, 메커니즘과 스트레스의 관계를 사용자 요구사항관점에서 기호로 표기하여 분석하고 중요도 점수화하여 정량적으로 변환하는 기법으로

로서 유로차단밸브의 QFD-1 결과는 다음과 같다.

요구 사항	탄성체 패킹				금속 부재					결합 부재			
	고장 모드	과열	마모	열적노화/영구변형	재밍	피로파손	고착/마모	포켓가공치불량	거친표면조도	미세틈새부식	폴립	파손	피로
유량 압력 손실	●	▲			●	●	●	●		▲	●	●	▲
정격 유량	▲	▲	●	○	○	●	●				▲	●	▲
정격 압력	▲	●	●	●	○	●		●	▲	●	●	●	▲
외부 누유	●		●		▲			●	●	○	○	○	
초과 고압	○	○	●		●					●	○	○	○
습동성	▲	○			○	●	○	○	○	▲	●	▲	
사용 환경 (진동,내습,고온,)	●		●	●	●	●		●	●	●	●	●	●
고수명	●	●	●	●	●	●		●	●	●	○	●	●
중요도 점수	20	18	18	22	26	20	9	17	19	24	30	20	

* 중요도 : ○가장중요(5점), ●중요(3점), ▲보통(1점)

4.5 Quality Function Deployment Level 2

QFD-2단계는 주요구성품별로 고장형태와 이를 재현할 수 있는 시험항목을 결정한 후 기호를 사용하여 정량화 한 후 시험의 우선순위를 결정하기위한 기법으로서 유로차단밸브의 QFD-2 결과는 다음과 같이 수명시험이 가장 높은 순위였다.

주요 구성품	고장 형태	중요도 점수	시험 항목							
			성능 시험	압력 손실 시험	작동 특성 시험	내부 누유 시험	외부 누유 시험	내압 시험	내환성 시험	수명 시험
탄성체 패킹	과열	20	●	●	●	○	○	○	●	○
	마모	18		▲		○		▲		○
	열적노화/영구변형	18				●	●	●	○	○
	재밍	22	●	●	○	○		●	●	●
금속 부재	피로파손	26		●	●	●	▲	▲	●	●
	고착/마모	20	●	●	○	●		▲	●	●
	포켓 가공치수불량	9	●	●				▲		●
결합 부재	거친 표면 조도	17			○	●	●	●		●
	미세 틈새 부식	19		▲	○	●	●	▲	●	●
	폴립	24	●	●	▲	○	○	●	●	●
	파손	30	●	▲	▲	●	○	○	●	●
시험 유효성 점수 및 순위 (test effectiveness score and rank)			375	490	642	870	658	685	633	881
			8	7	5	2	4	3	6	1

* 1. 중요도 : ○가장중요(5점), ●중요(3점), ▲보통(1점)
 2. 시험 항목별 유효성 점수 = ∑(중요도 점수 × 평가 척도)

5. 평가 기준

MTV & ETV의 고장형태와 고장영향을 분석한 결과, 성능저하와 외관고장으로 분류되며, 누유발생, 스프링 파손, 포켓 마모 및 응답특성 저하 등의 고장 형태 이었다.

5.1 종합성능평가

모든 시료가 표 3의 시험조건에 따라 성능평가를 실시하여 각각 표 3 (a)와 (b)의 평가기준을 만족하여야 한다. 종합 성능시험 중 대표 성능시험은 압력손실시험 및 내부누유시험으로 한다.

표 3 종합 성능 시험의 평가 기준

(a) MTV 종합 성능 평가

시험 항목	시험조건	평가 기준
작동 특성 시험	- 유량 : 최소 → 최대 유량 - 작동 : P포트→A포트, A포트→T포트로의 전환을 1사이클로 하여 30사이클 반복 작동	- 30사이클 동안 이상 소음 및 외부 누유 없이 정상 작동 하여야 한다.
압력 손실 시험	- 유량 : 최소 유량 → 정격 유량 - 유온 : (50±5) °C	- 압력 손실은 0.02 MPa 이내 이어야 한다.
내부 누유 시험	- 유량 : 정격 유량 - 압력 : 최고 사용 압력 - 유온 : (50±5) °C	- 내부 누유량은 0.2 mL/min 이내이어야 한다.
외부 누유 시험	- 압력 : 최고 사용 압력 - 유량 : 최소 유량 - 유온 : (50±5) °C - 시험 시간 : 5분	- 외부 누유가 없어야 한다.

(b) ETV 종합 성능 평가

시험 항목	시험조건	평가 기준
시운전 시험	- 유량 : 정격 유량 - 압력 : 정격 압력 - 전압 : 정격 전압 인가 - 작동 : P포트→C포트, C포트→T 포트로의 전환을 1사이클로 하여 10사이클 연속 작동	- 솔레노이드 전압 인가시 C 포트 압력이 정격 압력일 것 - 10사이클 동안 이상 소음 및 외부 누유 없이 정상 작동 하여야 함
압력 손실 시험	- 유량 : 최소 유량→정격 유량 - 시험 회로 : P→A 또는 B	- 정격 유량 24 L/min에서 0.9 MPa 이내
솔레노이드 전환 특성 시험	- 정격 유량 및 정격 압력 - 인가 전압 : 정격 전압 (통전 또는 비통전)	- 통전시 : 작업 포트 압력이 공급 압력의 80 %에 도달하는 시간은 80 ms 이내 - 비 통전시 : 작업 포트의 압력이 공급 압력의 20 %에 도달하는 시간은 50 ms 이내
솔레노이드 연속 부하 시험	- 정격 유량 및 정격 전압 - 정격 전압 6시간 연속 인가	- 솔레노이드 과열 및 소착, 이상 작동이 없어야 하며, 대표 성능 시험을 실시하여 평가 기준을 만족해야 함
내부 누유 시험	- 유량 : 최소 유량 - 압력 : 12 MPa - 유온 : (50±2) °C	- 내부 누유량 70 mL/min 이내
외부 누유 시험	- 압력 : 최대 압력 - 유량 : 최소 유량 - 시험 온도 : (50±2) °C	- 5분간 경과 후 외부 누유가 없어야 함
내압력 시험	- 압력 : 사용 압력의 150 % - 유량 : 정격 유량 - 시험 시간 : 3분	- 외부 누유, 영구 변형, 파손이 없어야 한다. - 작동 특성 시험 및 내부 누유 시험의 평가 기준을 만족 하여야 한다.

5.2 안정성 평가 기준

안전성 시험은 수명 시험 완료 후에 실시하며, 안전성 시험의 항목별 평가 기준은 표 4와 같다.

표 4 안전성 시험의 평가 기준

시험 항목	시험 조건	평가 기준
내압력 시험	- 압력 : 사용 압력의 150 % - 유량 : 정격 유량 - 시험 시간 : 3분	- 외부 누유, 영구 변형, 파손이 없어야 한다. - 작동 특성 시험 및 내부 누유 시험의 평가 기준을 만족하여야 한다.

5.3 내환경성 평가 기준

내환경성 평가 기준은 내환경성 시험에서 앞선 시험 종료 후 72시간 이내에 다음 시험이 실시되는 경우는 앞선 시험 항목의 사후 시험을 다음 시험의 사전 시험으로 대체하며, 내환경성 시험의 항목별 평가 기준은 표 5와 같다.

표 5 내환경성 시험의 평가 기준

시험 항목	시험 조건	평가 기준
운용 가진 시험	- 사전 시험으로서 육안 검사 및 대표 성능 시험 실시 - 주파수 범위 : (1~150) Hz - 가진 형태 : 정현파 스위프 - 진동 가속도 : 2 m/s ² 이하 - 진폭 : 0.75 mm 이하 - 정현파 스위프 속도 : 1 octave/min - 3축(±X, ±Y, ±Z) 방향에 대해 각각 5회 시험을 실시한 후, 사후 시험으로서 육안 검사 및 대표 성능 시험을 실시한다.	- 조립부의 풀림, 변형, 파손 등이 없어야 한다. - 대표 성능 시험의 평가 기준을 만족하여야 한다.
고온 시험	- 사전 시험으로서 육안 검사 및 대표 성능 시험을 실시한다. - (55±2) °C 4시간 고온 저장한다. - (45±2) °C 4시간 유지 후, 중간 시험으로서 육안 검사 및 대표 성능 시험을 실시한다. - (25±2) °C 2시간 안정화 후, 사후 시험으로서 육안 검사 및 대표 성능 시험을 실시한다.	- 외관 손상(파손, 균열, 변형 등)이 없어야 한다. - 대표 성능 시험의 평가 기준을 만족하여야 한다.
습도 시험	- 사전 시험으로서 육안 검사 및 대표 성능 시험을 실시한다. - 온도 (50±2) °C, 습도 (95±5) % 조건에서 6시간, 온도 (30±2) °C, 습도 (85±5) % 조건에서 16시간을 1주기로 10주기 수행한다. - 표준 대기 조건에서 시험 대상물을 충분히 건조시킨 후 육안 검사 및 대표 성능 시험을 실시한다.	- 외관 손상(부식, 들뜸, 기포 발생, 변형 등)이 없어야 한다. - 대표 성능 시험의 평가 기준을 만족하여야 한다.

5.4 수명 평가 기준

발전소에서 1일 최대 2회, 작동 기준으로 1년에 365일, 30년 가동 되므로 2.2×10⁴사이클을 B₁ 수명으로 보증, 유로차단 밸브의 수명 분포는 주 고장 모드가 유사한 유압밸브의 수명시험 분석 결과(2008년 KIMM 신뢰성평가센터에서 실시한 수명 시험)를 인용하여 형

상모수(β)가 2.4인 와이블 분포로 정한다.

1) 무 고장 시험 시간 산출

신뢰성 평가 기준에서 규정된 유로차단 밸브의 수명 2.2×10⁴사이클(B₁ 수명)을 보장하기 위한, 무고장 합격 기준을 만족하는 시험 시간의 계산은 다음에 따른다.

수명분포는 형상모수(β)가 2.4인 와이블 분포에 따르고 신뢰 수준 95 %에서 작동 횟수 2.2×10⁴사이클(B₁ 수명)을 보증하기 위해 시료수를 2개로하여 무 고장 시험 시간을 산출하면 다음과 같다.

무 고장 시험 시간(t_n) :

$$\begin{aligned}
 t_n &= B_{100p} \cdot \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \\
 &= 2.2 \times 10^4 \cdot \left[\frac{\ln(1-0.95)}{2 \cdot \ln(1-0.01)} \right]^{\frac{1}{2.4}} \\
 &= 176\,995.08 \approx 1.8 \times 10^5 \text{ 사이클}
 \end{aligned}$$

여기에서 t_n : 무 고장 시험 시간

B_{100p} : 보증 수명

CL : 신뢰 수준(confidence level)

n : 시료수

p : 불 신뢰도(B₁ 수명이면 p=0.01)

β : 형상 모수

2) 합격 기준

발체 시료 2개를 1.8×10⁵사이클 까지 수명 시험한 후, 2개 모두 고장이 없고 종합 성능의 평가 기준을 만족하면, 신뢰 수준 95 %에서 작동 횟수 2.2×10⁴사이클(B₁ 수명)을 보장한다.

수명 시험 중 성능 열화를 확인하기 위해서 수명 시험 전과 완료 후에는 종합 성능 시험을 실시하여 표 6의 평가 기준을 모두 만족하여야 하고, 총 수명 시험 사이클의 50 % 구간에서는 대표 성능 시험을 실시하여 평가 기준을 만족하여야 한다.

표 6 수명 시험의 시험항목별 평가기준

시험 항목	시험 조건	평가 기준
수명 시험	- 공급되는 작동유의 압력을 최고 사용 압력으로 하고, 유량은 최대 유량으로 한다. - 스프링 방향을 왕복 전환할 때를 1 사이클로 하여 1.0×10 ⁵ 사이클을 반복 실행한다. - 수명 시험 전과 완료 후에 종합 성능 시험을 실시한다. - 총 수명 시험 시간의 50 % 구간에서 대표 성능 시험을 실시한다.	- 종합 성능 시험 및 대표 성능 시험의 평가 기준을 모두 만족하여야 한다. - 시료 2개를 1.0×10 ⁵ 사이클 까지, 무고장 수명 시험한 후, 2개 모두 고장 없고 종합 성능 시험의 평가 기준을 만족하여야 한다.

6. 결 론

발전소의 핵심기기인 MTV와 ETV가 전량 수입에 의존하여 전략적으로 국산화 개발을 하였지만, 이를 원자력발전소와 화력발전소에 적용하기 위해서는 밸브에 대한 신뢰성입증이 필수적으로 요구되어서, 국내에서는 처음으로 관련 Test code를 개발하였다.

본 연구에서 개발된 MTV와 ETV의 신뢰성평가기준(test code)은 기술표준원 RS B 0280과 RS B 0281 규격으로 등록되었다.

참고 문헌

- 1) 한국표준형원전터빈 출력구동장치 및 시험장치국산화개발 최종보고서, 지식경제부, 2008.
- 2) 발전소 계획예방 정비 지침, 서부발전, 2005.
- 3) 보수지침서, "태안화력 3, 4호기", 한국전력기술주식회사, 1997

- 4) 산업자원부 기술표준원, "신뢰성용어 해설서", 2005
- 5) Y. B. Lee, "A study on procedures of the accelerated life testing for hose assemblies", Key Engineering Materials, Part 3, pp. 297- 300, 2005.

[저자 소개]

이 용 범

E-mail : lyb662@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7151

1959년 4월 3일생.

2006년 충남대학교 대학원 열유체 전공 박사. 2008년 충남대학교 대학원 겸임교수 재직 중. 1987년 한국기계연구원 입사, 현재 유압기기 및 시스템설계, 신뢰성분야연구. 대한기계학회, 유공압시스템학회, 한국정밀공학회, 한국동력기계공학회 정회원

