

2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

1 단계 내부사건 PSA를 이용한
영광 5/6호기 전동구동밸브 중요도 분류
**Motor-Operated Valve Importance Categorization of YG 5/6
Using Level 1 Internal Event PSA**

이용석, 정창현
서울대학교

성계용
한국원자력안전기술원

요 약

안전관련 전동구동밸브(Motor Operated Valve)의 설계기준 조건에서의 운전성을 보장하기 위해, 모든 원전에서 정적, 동적 성능시험을 수행하고 있으며, 설계기준 시험을 완료한 후에는 운전성 유지 확인을 위한 주기적 평가를 수행하여야 한다. 이러한 전동구동밸브의 시험은 현재 건설중인 원전에서 수행 될 경우 안전 중요도가 높은 밸브들에 대하여 우선적으로 고려할 수 있고, 특히 설계기준 시험이 이미 수행된 원전에서는 주기적 안전성 평가 시험에서 그 우선 순위가 고려되어 시험주기 및 방법이 결정된다. 본 논문에서는 영광 5/6 성능시험 대상 전동구동밸브들을 영광 5/6호기 1단계 내부 PSA를 이용하여 위험도 중요도에 따른 분류작업을 수행하였다. 또한 기기의 점검 또는 시험에 의한 전동구동밸브의 위험도 분류 변화를 몇 가지 경우에 대해서도 예비적으로 평가해 보았다.

ABSTRACT

Operability of safety-related MOVs(Motor-Operated Valves) at design basis condition (DBC) has to be verified through static or/and dynamic performance tests, and the verified operability of each MOV should be maintained and confirmed periodically. With YG-5/6 level 1 internal event PSAs, the risk importance for each safety-related MOV in YG 5/6 has been calculated and categorized to three groups- high, medium, and low safety significance- by its importance. The categorization result could be adopted as a means for test prioritization of MOVs and determination of test interval and methods.

1. 서 론

전동구동밸브(Motor-Operated Valve : MOV)는 가동중 시험 기술기준에 따라 행정시간 측정, 누설시험, 위치지시 확인시험이 수행되어 왔다. 그러나 이러한 종류의 시험으로는 설계기준 상황에서 MOV의 작동을 보장하기에는 부적절한 것으로 나타났기 때문에, USNRC에서는 MOV 운전성을 보장하기 위한 규제 요건으로 Generic Letter (GL) 89-10 요건1), "안전관련 MOV 시험 및 감시"를 발행하여 안전관련 MOV에 대해 행정시간을 측정하는 시험 뿐 아니라 MOV의 쓰러스트, 토크 등 성능을 감시하기 위한 시험을 수행하도록 요구하고 있다. 또한 설계기준 시험 후 그 운전성이 유지되는지를 GL 96-052)에 따라 주기적으로 확인하도록 하고 있다.

국내에서도 97년 과학기술부에서 2005년까지 전 원전을 대상으로 MOV 안전성을 확인하도록 규제 권고사항3)을 발행하였다. 이에 따라 국내 사업자는 현재 전 원전에 대하여 MOV의 안전성에 대한 평가 작업을 진행 중이다. 전 원전에 대한 MOV의 안전성 평가는 장기간 동안에 이루어질 것이므로 원전의 안전성에 중요한 영향을 미칠 수 있는 MOV들을 우선적으로 평가하여 운전여유도 미흡시 적절한 조치를 신속히 수행하여야 한다. 또한 주기적 확인시에도 안전 중요도에 따라 확인 주기 및 방법이 달라질 수 있다.

본 논문에서는 KIRAP을 이용하여 작성된 영광 5/6호기 1단계 내부사건 PSA 모델4)을 사용하여 MOV를 위험도 중요도에 따라 예비적으로 분류해 보았다. 일차적으로 GL 89-10 설계기준 시험을 위한 위험도 분류를 수행해 보았으며, 이를 위해 기본적인 중요도 결과와 함께 공통원인고장(Common Cause Failure; CCF), 정비이용 불능도, 회복조치 고려 유무 등에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 또한, 실제 출력운전 중 점검 및 정비로 인하여 변화할 수 있는 발전소 배열 상태에 따라 MOV의 위험도 중요도가 달라질 수 있으므로, 이를 고려하여 몇 가지 경우에 대해 MOV의 위험도 분류 영향을 평가하였다.

2. MOV 위험도 중요도 분류

2.1 중요도 척도

PSA에서 기기들의 발전소 안전성에 대한 중요도를 나타내는데 사용되는 것은 FV(Fussel-Vesely) 중요도와 RAW(Risk Achievement Worth)이다. 이에 대한 정의는 다음과 같다.

$$FV = \frac{CDF_{base} - CDF_0}{CDF_{base}}, \quad RAW = \frac{CDF_1}{CDF_{base}}$$

CDF_1 = 기기 고장확률을 1로 놓았을 때의 노심손상빈도

CDF_{base} = 기본 노심손상빈도

CDF_0 = 기기 고장확률을 0으로 놓았을 때 노심손상빈도

또한 PSA가 기본사건에 대해서 모델링되어 있으므로, 기기의 고장모드에 대한 중요도 결과만 알 수 있으며 실제 기기의 중요도가 계산되지는 않는다. 이런 경우 다음 식을 이용하여 기기의 중요도가 계산될 수 있다.

$$FV_{comp} = \sum_i FV_i \quad , \quad RAW_{comp} - 1 \approx \frac{\sum_i q_i (RAW_i - 1)}{\sum_i q_i}$$

FV_{COMP} = 기기의 FV 중요도, FV_i = 기본사건 i의 FV 중요도
 RAW_{COMP} = 기기의 RAW 중요도, RAW_i = 기본사건 i의 RAW 중요도
 q_i = 기본사건 i의 이용불능도

그러나, GL 89-10에 따른 MOV의 성능 시험의 관심사는 “Fail to open” 또는 “Fail to close”에 대한 것이고 “Transfer Closed”와 같은 기본사건은 관심대상이 아니므로 MOV에 대해서는 여러 개의 기본사건을 고려할 필요가 없다. 따라서 위의 식을 사용하지 않고 “Fail to open” 또는 “Fail to close”만 고려하여 바로 기본사건의 중요도에 따라 해당되는 MOV의 중요도 분류를 수행하였다.

2.2 영광 5/6 MOV 중요도 분류

여기서는 우선 미국의 South Texas 발전소의 다음 표1과 같은 3단계 분류기준⁵⁾에 따라 MOV들을 HSS(High Safety Significant), MSS(Medium Safety Significant), LSS(Low Safety Significant)로 분류하였다. FV가 0.005를 초과하면 모두 HSS로 간주하고, FV가 0.005 이하 RAW가 2.0이상이면 MSS로 고려하며, 그외에는 LSS로 고려한다.

표 1. South Texas 발전소의 초기 위험도 중요도 분류기준

위험도 중요도 범주	중요도 척도 범위	
	F-V 중요도 범위	RAW 중요도 범위
HSS	FV{CDF} > 0.005	ALL
MSS	FV{CDF} < 0.005	RAW{CDF} > 2.0
LSS	FV{CDF} < 0.005	RAW{CDF} < 2.0

MOV 뿐 아니라 모든 IST 대상 밸브 및 펌프들에 대하여 뚜렷하게 정하여진 기준치는 없으며, 산업체 단체들에 따라 다른 기준을 적용하고 있다. 예를 들어, 산업체 단체인 WOG(Westinghouse Owners Group)에서도 분류기준을 HSS, ISS, LSS의 3단계 분류법과 HSS, LSS 2단계 분류법을 모두 허용하고 있어, 안전성을 입증할 수 있다면 중요도 분류 기준은 사업자 재량으로 정할 수 있도록 하고 있다⁶⁾.

현재 영광 5/6호기의 성능시험 관련 MOV 수는 각각 128개이다. 여기서는 1단계 PSA에 모델링되지 않은 MOV는 일단 LSS로 구분하였다. PSA를 이용한 MOV 중요도 분석을 하

기 위해 다음과 같은 절차를 따랐다. 이는 KAERI에서 기 수행된 MOV 순위화 연구⁷⁾에서 사용된 절차를 참조하였다.

- o 1단계 내부사건 PSA를 이용한 기본 중요도 분석
- o CCF 고려 유무에 따른 중요도 분석
- o 정비이용불능 고려 유무에 따른 중요도 분석
- o 회복조치 고려 유무에 따른 중요도 분석
- o LSS 기본사건 이용불능도 민감도 분석

1) 1단계 내부사건 PSA를 이용한 기본 중요도 분석

우선, 기본적으로 PSA에서 계산된 위험도 중요도를 바탕으로 MOV들을 분류하였다. 분류 결과 HSS 17개, MSS 24개, LSS 87개로 나타났다. 특징으로는 주로 CCF에 의해 HSS MOV가 나타나는 경우가 많았고, 주로 안전주입계통과 정지냉각계통에 있는 MOV들이 위험도 중요로 나타났다.

2) CCF 고려 유무에 따른 중요도 분석

이전 단계에서 주로 CCF 기본사건이 위험도 중요로 나타났다. 그러나, 실제로 PSA에 모델링된 CCF에는 GL 89-10에서 고려하는 “Fail to open” 또는 “Fail to close” 뿐만 고려된 것이 아니라 “Transfer closed” 등 다른 사건에 대한 확률도 고려되어있으므로, CCF을 고려하지 않을 때 상대적으로 중요하게 나타날 수 있는 MOV들이 있을 수 있다. 따라서 MOV의 CCF 확률을 0으로 놓고 중요도 분석을 수행하여 새로이 HSS 또는 MSS로 나타나는 MOV들이 있는지 확인하였다. 여기서 추가된 HSS, MSS MOV는 모두 0개로 나타났다.

3) 정비이용불능 고려 유무에 따른 중요도 분석

상대적으로 다른 기기들의 정비이용불능에 의해 MOV들의 위험도 중요도가 저평가될 가능성도 있으므로, 모든 정비이용불능 기본사건들의 값을 0으로 놓고 계산을 수행하였다. 여기서 추가된 HSS, MSS MOV는 모두 0개로 나타났다.

4) 회복조치 고려 유무에 따른 중요도 분석

회복조치를 고려하지 않았을 때 상대적으로 중요하게 나타날 수 있는 MOV들을 확인하였다. 여기서는 MSS로 분류되었던 MOV들 중 10개가 HSS로 재분류되었고, LSS로 분류되었던 MOV 3개가 MSS로 재분류되었다.

5) LSS 기본사건 이용불능도 민감도 분석

LSS로 구분된 MOV들에 대한 기본사건의 이용불능도를 증가시키면서 위험도 분류에 미치는 영향을 고려하였다. 실제로 MOV들이 LSS로 구분되기 위해서는 개별적인 위험도 영향이 작아야 할 뿐 아니라, 전체적으로 LSS MOV들의 이용불능도가 동시에 증가되어도 위험

도 영향이 크지 않아야 한다. 또한 LSS들의 이용불능도의 증가로 인해 처음에 계산되었던 위험도 순위가 바뀔 수도 있다.

여기서는 우선 LSS MOV 기본사건들의 이용불능도를 보수적으로 동시에 100배 증가시켰을 때의 위험도 분류 영향을 알아보았다. LSS MOV들의 이용불능도를 동시에 100배 증가시켰음에도 추가되는 HSS MOV들은 없었으며, MSS MOV들만 5개 추가되었다.

표 2. MOV 위험도 분류 결과

	Basecase	N/A CCF	N/A T&M	N/A Recovery	LSS 100배 증가	최종
HSS MOV수	17	+0	+0	+10	+0	27
MSS MOV수	24	+0	+0	-10+3	+5	22
LSS MOV수	87	+0	+0	-3	-5	79

최종 결과, HSS로 구분된 MOV의 기본사건들 수는 총 14개이고 이에 해당되는 MOV의 수는 27개로 나타났다. 본 위험도 분류에서 나타난 특징으로는 많은 수의 MOV들이 주로 CCF 기본사건의 FV값이 높게 나타남으로써 HSS로 고려되는 경우가 많았다는 것이다. HSS로 구분된 MOV의 기본사건들 수는 총 14개인데, 그 중 2개만이 개별 MOV의 “Fail to Open”에 의한 것이었으며 나머지 12개는 모두 CCF에 의한 것이었다. PSA에 모델링된 CCF 보수 β 는 일반 고장 자료에 근거한 것으로써 과다하게 보수적으로 설정된 측면이 있으며, 앞으로 고유 고장 자료들을 사용하여 β 값을 낮출 수 있다면 HSS의 MOV 수를 상당 부분 낮출 수 있을 것으로 기대된다. 또한 PSA에 모델링된 CCF 확률이 “Fail to Open”, “Fail to Close”에만 해당되는 것이 아니므로, CCF 자료에서 이러한 것들을 분류할 수 있다면 HSS의 MOV 수를 또한 낮출 수 있을 것이다

여기서 계산된 자료는 GL 96-05에 따른 MOV의 주기적 성능평가를 하기 전에 GL 89-10에 따른 설계기준 시험을 하기 위한 MOV의 중요도 분류 자료로 볼 수 있다. 그러나 영광 5/6호기에서는 GL 89-10에 따른 성능시험이 이미 수행되고 있기 때문에 실제로 필요한 것은 GL 96-05에 따른 주기적 성능평가에 대한 MOV 순위화 목록이다. 현재 분류된 중요도 분류 목록이 주기적 평가에 바로 반영될 수도 있으나, 실제로는 GL 89-10 설계기준 시험을 함으로써 전동밸브 제어스위치 (토크 스위치, 바이패스 스위치) 등에 대해서 설정치를 올바르게 재조정하고 기계적인 고장 문제를 해결할 수 있으므로, CCF 고장 원인들이 어느 정도 제거되는 경우가 있다. 따라서 차후에 이를 고려하여 CCF 확률을 재조정하면, 더 정확한 분류결과가 얻어질 것이며 HSS로 구분되는 MOV의 수를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문에서는 GL 89-10 설계기준 시험에 의한 CCF 확률 재조정 작업은 이루어지지 않았다.

2.3 시험주기 변경에 따른 노심손상빈도 평가

시험주기 변경에 따른 기기의 이용불능도는 보수적으로 다음 식에 따라 증가한다고 볼 수

있다.

$$q_{Revised} \approx q_{Base} * \frac{T_{new}}{T_{old}}$$

$q_{Revised}$: 증가된 이용불능도, q_{Base} : 이전의 이용불능도

T_{new} : 증가된 시험주기, T_{old} : 이전의 시험주기

최종적으로 분류된 LSS MOV들의 이용불능도를 동시에 증가시켜보았을 때, 영광 5,6호기 노심손상빈도는 다음과 같이 나타났다.

표 3. LSS MOV들의 이용불능도 증가에 따른 CDF 증가

	Basecase	6배 증가	20배 증가	100배 증가
CDF	7.43E-06	7.46E-06	7.61E-06	9.89E-06

표 3에서 MOV의 시험주기를 3개월에서 18개월로 6배 연장했을 때 보수적으로 평가되는 노심손상빈도는 7.46E-06으로 원래 노심손상빈도 7.43E-06에 비해 약 0.4% 증가하여 위험도 증가는 미미한 것으로 나타났다.

3. MOV 동적 위험도 중요도 예비 평가

앞에서의 MOV 위험도 분류는 기기들의 고장 또는 정비가 random event 로 일어난다고 가정하여 정적인 상태에서의 위험도를 적용한 것이다. 그러나 실제로는 계통들의 점검 또는 정비에 의한 특정 배열 발생 시 MOV들의 상대적인 위험도 중요도가 변화할 수 있으므로 실제로는 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서 이에 대해서 우선 몇가지 경우에 대해서만 예비적으로 분석을 수행하였다.

표 4와 같이 트레인 A에 포함된 각 기기들이 각각 Out Of Service 되는 경우를 고려해보았다. 여기서는 기기의 Out Of Service에 의한 초기사건 빈도 변화 등은 고려되지 않았다. 그러나, 참고문헌⁸⁾에 따르면 특히 비상디젤발전기의 경우 초기사건 빈도 변화를 고려하지 않는 경우 노심손상빈도 결과가 상당히 다르게 나올 수 있으므로 실제로는 이러한 영향이 고려되어야 할 것이다.

표 4. 기기 Out Of Service에 의한 위험도 분류 결과

Out Of Service 기기 (Train A)	HSS MOV 추가항목
고압안전주입펌프	N/A
저압안전주입펌프	N/A
비상디젤발전기	N/A
격납용기 살수 펌프	MV-142, MV-0036
필수 냉각수 펌프	N/A

고압, 저압안전주입 펌프, 디젤발전기, 필수 냉각수 펌프를 Out Of Service 시킨 경우에 MOV의 위험도 순위화가 달라지기는 하였으나 HSS로 새로이 나타나는 MOV들은 없었다. 그러나, A 트레인의 격납용기 살수 펌프를 Out Of Service 시킨 경우, MSS MOV이던 기냉각수계통 트레인 B의 MV-142와 격납용기 살수 계통 트레인 B의 MV-0036의 FV값이 증가하여 HSS로 나타났다.

이미 정적 위험도 중요도 분류에서 CCF 등 민감도 분석을 통하여 HSS MOV 위험도 분류를 수행하였기 때문에, 대부분의 경우 추가적으로 위험도에 중요한 것으로 고려되는 MOV는 많지는 않을 것으로 보인다. 그러나 위의 예와 같이 발전소 배열상태에 따라 상대적인 위험도 중요도가 크게 증가하는 경우도 가끔 발생할 수 있기 때문에, 이러한 동적위험도는 고려되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 영광 5/6 안전관련 MOV에 대하여 주기적 확인 평가를 하기 전에 설계기준 조건시험을 하기 위한 MOV 중요도 분류를 수행하였다. 분석 결과, HSS, MSS, LSS MOV는 각각 27개, 22개, 79개로 나타났다. HSS로 분류된 MOV들은 대부분 CCF에 기인한 것이 많았다. CCF 확률로는 주로 일반자료가 사용되는데, 이에 대한 상세한 분석을 통하여 CCF 확률을 줄인다면 HSS MOV의 수를 많이 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 영광 5/6호기에 대해서 실제로 필요한 분류 목록은 주기적 평가 우선 순위 목록이므로, 차후에 설계기준 시험을 통해 재조정된 CCF 확률 등을 반영하여 위험도 분류를 수행할 필요가 있다. 그리고 MOV를 안전성에 따라 분류하기 위해서 1단계 내부사건 PSA 뿐 아니라 외부사건, 정지 및 저출력, 2단계 PSA 등 이용 가능한 정보를 모두 이용하는 것이 좋으며, 확률론적인 위험도 분류의 취약점을 보상하기 위해 결정론적인 분석이 뒷받침되어야만 하고, 최종적으로 전문가 위원회의 판단이 필요하다. 본 논문에서는 우선 영광 5/6호기 1단계 내부사건 PSA만을 이용한 분류만이 수행되었으며, 외부사건 PSA, 결정론적 분석 등은 수행되지 않았다.

아울러 출력운전 중에도 기기의 Out Of Service로 인한 상대적 중요도가 달라질 수 있으므로, 이를 고려한 몇 가지 경우에 대한 예비적인 중요도 분석을 수행해보았다. 예비 계산에서 단일 기기의 Out Of Service의 경우 HSS로 추가되는 MOV들이 많지는 않았지만 MSS에서 HSS로 재분류되는 경우도 나타났다. 따라서, 발전소의 정기 또는 주기 점검 및 시험에 의한 실제 발전소 배열 상태들을 고려하였을 때, 상대적 중요도가 크게 증가할 수 있는 MOV들을 확인하는 작업이 필요할 것으로 보인다.

본 연구결과는 영광 5/6호기 MOV 안전성 중요도계산에서 CCF확률을 보완한다면 MOV 시험 우선 순위결정, 주기적 확인 시험주기 및 시험방법 등을 결정할 수 있는 수단으로 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) USNRC, Generic Letter 89-10, "Safety-related motor-operated valve testing and surveillance.", 1989
- 2) USNRC, Generic Letter 96-05, "Periodic Verification of the Design-Basis Capability of Safety-Related Motor-Operated Valves", September 1996
- 3) 과학기술부, "모터구동밸브 및 동력구동 게이트밸브에 관한 규제권고사항", 1997
- 4) 전력연구원, "영광 5,6호기 1단계 내부사건 PSA Notebook"
- 5) David A. Bidwell, "A PSA Application at South-Texas Project Electric Generating Station : GL 89-10 MOV Prioritization"
- 6) Westinghouse Owner's Group, "Risk Ranking Approach for Motor-Operated Valves in Response to GL 96-05", WOG Engineering Report, V-EC-1658, July 1998
- 7) 강대일, "울진 3,4호기 MOV 시험기기 예비 중요도 분석", 세미나 자료
- 8) 강대일 외, KAERI/TR-1772/2001, "위험도 정보를 이용한 울진 3,4호기의 허용정지시간 변경", 2001