

MOV(Motor-Operated Valve)의 안전 중요도 결정 방법
Safety-significance Determination of MOV

강신철*, 김인환, 김대웅
(한국 전력 전력연구원)
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

전 원전(18개호기)에 대한 모터구동밸브의 안전성 평가는 장 기간에 이루어지므로 원전의 안전에 중요한 영향을 미칠 수 있는, 즉 안전중요도가 높은 밸브를 우선적으로 평가할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는, 확률론적 안전성 평가와 결정론적 기준에 의한 모터구동밸브의 상대적 순위 결정 방법론을 소개하고, 결정론적 기준에 의한 모터구동밸브의 상대적 순위를 확률론적 평가 결과로 나타나는 순위와 비교해 보았다.

ABSTRACT

This study documents a part of the project that is performing by Korea Electric Power Company(KEPCO) for the Power Operated Valve safety evaluation(Reference (1)). The purpose is to develop a strategy and to set priorities for testing of Motor Operated Valves(MOVs) in response to the Regulatory Recommendation of Ministry of Science & Technology (Won Gum 71233-205). The primary result of this paper is the ranking method to develop the relative safety significance of MOVs for 18 NPPs using the probabilistic and deterministic basis in order to reduce costs of its future implementation while maintaining risks of a severe accident at acceptably low values.

1. 서론

'97.6.13에 과학기술부는 2005년까지 전 원전(18개 호기)를 대상으로 모터구동밸브 및 동력구동계이트밸브의 안전성 확인 【문서번호 : 원경 71233-205】에 대한 규제 권고사항(1)을 발행하였다. 이에 따라 한전은 평가대상 밸브의 안전성 확인 사업을 진행중이다. 미국의 경우 '89.6에 NRC가 발행한 GL 89-10(2)에 따라 동력구동밸브의 안전성 확인을 완료하였으나 수행초기 단계에서의 체계적인 수행절차 및 방법론 수립이 미흡하여 사업자들이 수많은 시행착오를 겪었으며 이에 따른 평가경비 또한 과도하게 소요되었다. 이러한 시행착오와 평가경비를 줄이기 위해서 한전은 영광 1호기를 대상으로 대표적인 밸브 12대를 선정하여 시범사업을 추진 중에 있으며 이 사업결과를 바탕으로 전 원전에 대한 체계적인 계획을 수립 중에 있다. 전 원전 이행계획 수립에 이 시범 사업결과를 적용할 수 없는 부분이 전 원전 평가 대상밸브의 선정과 평가 순위를 결정하는 것이다. 대상밸브 선정은 과학기술부 규제 권고사항과 고시(1),(3)에 따라 결정할 수 있으나 MOV의 안전중요도는 국외의 경험사례 및 밸브 관련 자료를 참조로 새로이 개발되어야 한다. 안전중요도를 결정하는 이유는 모터구동밸브의 안전성 평가가 장 기간에 걸쳐 수행되므로 원자로의 안전성에 중요한 영향을 미칠 수 있는 밸브를 우선적으로 평가하여 원자력발전소의 안전성을 제

고하고, 또한 안전성 평가 후 관련 규제요건(4)에 따라 각 밸브의 실제 여유도와 각 밸브의 안전 중요도를 고려한 밸브의 시험주기를 결정하기 위해서이다. 미국의 경우 각 사업자들의 실정에 적합한 방법론을 자체 개발하여 안전중요도를 결정하였으나 정형화된 방법론이 없으며 주로 확률론적 안전성 평가 결과를 이용하여 안전중요도(5)를 결정하였다. 그러나 국내의 경우 설계기준이 서로 상이한 18개 호기에 대한 확률론적 안전성 평가(이하 PSA)가 모두 완료된 것이 아니며 PSA가 완료되었더라도 모터구동밸브의 상대적 안전중요도 순위를 결정할 수 있는 것은 아니다. 왜냐하면 PSA 평가는 광범위한 발전소 구성기기에 대한 고장이력 및 관련 자료를 입력하여 노심 손상빈도를 기준으로 안전성을 평가하는 것이므로 발전소 구성기기중 일부인 모터구동밸브의 상대적 순위를 결정하기 위해서는 각종 평가 알고리즘 재평가 및 평가요도를 재실행하여야 하며 상당한 평가시간과 인력이 소요된다. 이러한 평가비용을 절감하고 원자력 발전소의 안전성 확보를 위한 효율적인 평가계획 수립을 위해서는 모터구동밸브의 안전중요도를 쉽게 결정할 수 있는 방법론이 필요하다. 따라서 기 수행된 PSA 평가 결과자료, 밸브 및 계통 실제 자료를 참조로 모터구동밸브의 안전중요도를 결정할 수 있는 결정기준과 전 원전에 대한 이 기준의 적용방법론을 개발하였다. 또한 본 논문에서 기술한 확률론적 기준과 결정론적 기준을 혼용한 안전중요도 평가 방법론에 대한 타당성 검증을 위하여 확률론적 기준에 의한 순위를 바탕으로 결정론적 기준에 의한 순위를 비교, 검토하였다.

2. 안전중요도 결정 기준

안전중요도 결정기준은 크게 2가지로 요약되며 첫 번째는 PSA 결과를 이용한 확률론적 기준과 밸브 및 밸브가 설치된 계통의 특성을 이용한 결정론적 기준으로 분류하였다. 이 두가지 결정 기준을 정리하면 다음과 같다.

2.1 확률론적 기준(기준 I)

일반적으로 안전중요도를 결정할 때 확률론적 안전성 평가 결과를 이용하면 정량적인 순위를 결정할 수 있다. 따라서 확률론적 기준은 PSA 평가결과중 노심손상빈도에 영향을 미치는 정도를 나타내는, 즉 원자로의 안전성에 영향을 미치는 정도를 의미하는 F-V¹⁾(Fussler-Vesely) 중요도 값에 따라 모터구동밸브의 상대적 순위를 결정하였다.

2.2 결정론적 기준(기준 II)

PSA는 평가방법, 발전소 설계개념, 발전소의 운전 및 운영 상황 등 여러 가지 변수에 따라 상위에 나타나는 구성기기 및 그 수량이 다르므로 기준 I에 의한 평가를 실시한다 하더라도 단지 일부의 밸브에 대한 순위결정만이 가능하다. 따라서 PSA 평가 결과 자료를 참조하되 PSA를 재수행 하지 않고서도 안전 중요도가 높은 모터구동밸브군을 평가할 수 있는 기준으로서 기준 II를 개발하였다. 이 기준에는 다음과 같은 7가지 요소가 고려되었다.

- ① 계통(P1)
- ② 운전모드(P2)
- ③ 안전등급(P3)

1) F-V 중요도 값의 정의 : 관심있는 사건(또는 계통)이 노심 손상빈도(CDF)에 어느 정도 기여하는가?

- ④ 밸브유형 (P4)
- ⑤ 밸브크기 (P5)
- ⑥ 계통 설계압력 (P6)
- ⑦ 계통 설계온도 (P7)

위 7개 요소에 대한 중요도 값은 다음과 같다.

2.2.1 계통별 중요도 값 (P1)

각 호기별 계통 중요도 값은 PSA 결과를 참조하여 위험도가 높은 계통의 밸브에 우선적으로 순위를 부여하였다. PSA가 수행되지 않은 발전소의 경우 설계기준이 유사한 발전소의 계통 중요도 값을 적용하였으며 호기별 중요순위는 다음과 같다.

- 월성 1,2,3,4호기 (월성 2,3,4호기 PSA 계통 분석 결과 참조)

중요순위	계통약어	계통명	중요도 값 (P1)
1	3461	비상급수공급 계통*	1
2	3432	정지 냉각 계통	2
2	4323	주 급수 계통	3
3	3432	비상 노심 냉각 및 회수 계통	4
4	7131 7134	저압 용수 계통 재순환 냉각수 계통	5
5	3331 3332 3335 3461 3611 3631	중수 중수 및 배출 계통 냉각재 압력 및 재고량 제어 계통 냉각재 정화 계통 비상급수 공급계통 주증기 공급 계통 증기발생기 취출 계통	6
6	-	기타	10

- 고리 1,2호기 (영광 1,2호기 및 울진 5,6호기 모터구동밸브 PSA 순위 분석 참조)

중요순위	계통약어	계통명	중요도 값 (P1)
1	AF	보조급수계통	1
2	SI	안전주입계통	2
3	RH	잔열제거계통	3
4	CC	1차기기 냉각수	4
5	CS	화학 및 체적제어계통	5
6	-	기타	10

- 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기 (영광 1,2호기 모터구동밸브 PSA 순위 분석 참조)

중요순위	계통 약어	계통명	중요도 값 (P1)
1	AL	보조 급수 계통*	1
2	BH	안전주입계통	2
3	BC	간열제거계통	3
4	EG	1차기기냉각수	4
5	BG	화학 및 체적제어계통	5
6	-	기타	10

- 영광 3,4,5,6 호기 및 울진 3,4호기 (울진 5,6호기 모터구동밸브 PSA 순위 분석 참조)

중요순위	계통 약어	계통명	중요도 값 (P1)
1	AF	보조 급수 계통	1
2	SI	안전주입계통 및 정지 냉각 계통	2
3	CC	1차기기냉각수	3
4	CV	화학 및 체적제어계통	4
5	-	기타	10

2.2.2. 운전모드별 중요도 값 (P2)

원자력 발전소의 운전모드는 크게 세가지 모드로 나눌 수 있으며, 사고방지 및 완화를 위하여 비상운전 조건에 사용되는 밸브에 중요순위를 일차로 부여하고 비정상시화 기타 순으로 중요순위를 부여하였다.

중요 순위	운전모드	중요도 값 (P2)
1	비상시 사용	1
2	비정상시 사용	2
3	기타	3

2.2.3 안전등급별 중요도 값 (P3)

안전등급이 높은 설비가 안전에 중요하므로 안전등급 순으로 중요순위를 부여하였다.

중요순위	안전등급	중요도 값 (P3)
1	1 등급	1
2	2 등급	2
3	3 등급	3

2.2.4 밸브유형별 중요도 값 (P4)

안전 관련 밸브중 게이트밸브의 수량이 많고 고 차압조건에서 내부 누설을 방지 조건에 사용되는 밸브는 대부분 게이트 밸브이므로 이 밸브에 우선적으로 중요순위를 부여하였다. 또한 밸브 유형별로 안전관련 밸브중 수량이 많은 밸브에 중요순위를 부여하였다.

중요순위	밸브형태	중요도 값 (P4)
1	게이트	1
2	글로브*	2
3	버터플라이	3
4	기타	4

* Angle 밸브는 글로브 밸브로 취급

2.2.5 밸브크기별 중요도 값 (P5)

큰 밸브일수록 지관(Branch)보다 주 배관에 사용되며, 주 배관 파단시 원자로의 안전성에 크게 영향을 미칠 수 있으므로 밸브 크기 순으로 중요순위를 부여하였다.

중요순위	밸브크기	중요도 값 (P5)
1	8" 이상	1
2	3" 이상 8" 미만	2
3	3" 미만	3

2.2.6 실제압력별 중요도 값 (P6)

고 에너지 배관 파단시 사용되는 밸브의 압력등급이 타 밸브보다 높으며, 실제과정에서 압력등급이 높은 밸브를 주요계통에 사용하므로 밸브의 실제압력 순으로 중요순위를 부여하였다.

중요순위	실제압력	중요도 값 (P6)
1	2000 psig 이상	1
2	500 psig 이상 2000 psig 미만	2
3	150 psig 이상 500 psig 미만	3
4	150 psig 미만	4

2.2.7 실제온도별 중요도 값 (P7)

증기 및 고온조건에 사용되는 밸브의 시트와 디스크 마찰력이 저온조건에서 사용되는 밸브보다 크므로 밸브의 실제온도 순으로 중요순위를 부여하였다.

중요순위	실제온도	중요도 값 (P7)
1	500°F 이상	1
2	300°F 이상 500°F psig 미만	2
3	300°F 미만	3

2.3 총 중요도 값 계산

상기 7개의 고려사항들에 대한 요소별 가중치를 부여하여 각 고려사항들을 차별화 하였으며, 가중치는 밸브가 설치된 계통에 1을 부여하고 나머지 순으로 1.1~1.6까지의 가중치를 부여하였다. 부여된 가중치를 적용한 총 중요도 값의 계산식은 다음과 같다.

$$P_T = P_1 + (.1.1 \times P_2) + (1.2 \times P_3) + (1.3 \times P_4) + (1.4 \times P_5) + (1.5 \times P_6) + (1.6 \times P_7)$$

위의 계산식에 따라 총 중요도 값을 계산하며, 중요도 값에 따라 오름차순으로 정렬하므로서 모터 구동밸브의 상대적 순위를 결정하였다.

3. 안전중요도 순위 적용 방법

2항에서 개발된 안전중요도 순위를 전 원전에 적용하기 위해서는 먼저 확률론적 기준(기준 I)에 을 적용할 수 있는 발전소와 그렇지 않은 경우를 고려하여야 한다. 기준 I을 적용할 수 있는 발전소의 경우, F-V 중요도에 따라 모터구동밸브의 상대적 순위를 결정한다. 그렇지 않은 발전소의 경우는 기준 II를 적용하여 순위를 결정하였으며 전체적인 안전중요도에 따른 순위 결정절차는 그림 1과 같다.

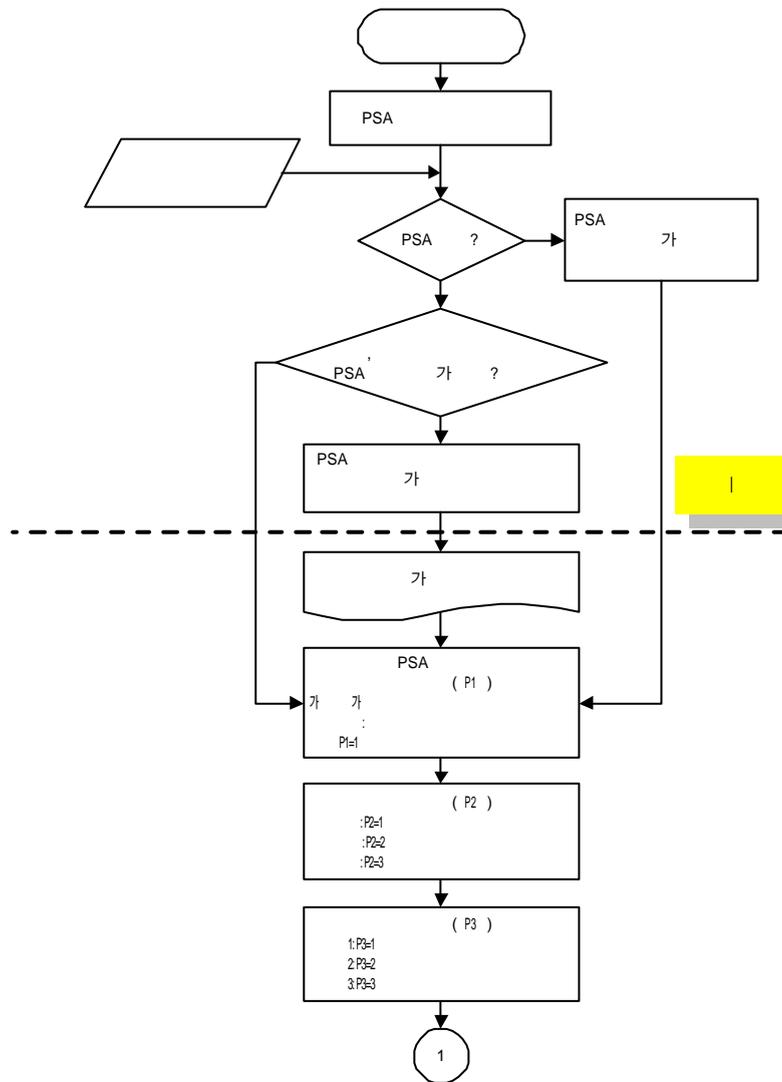


그림 1 순위 결정 절차

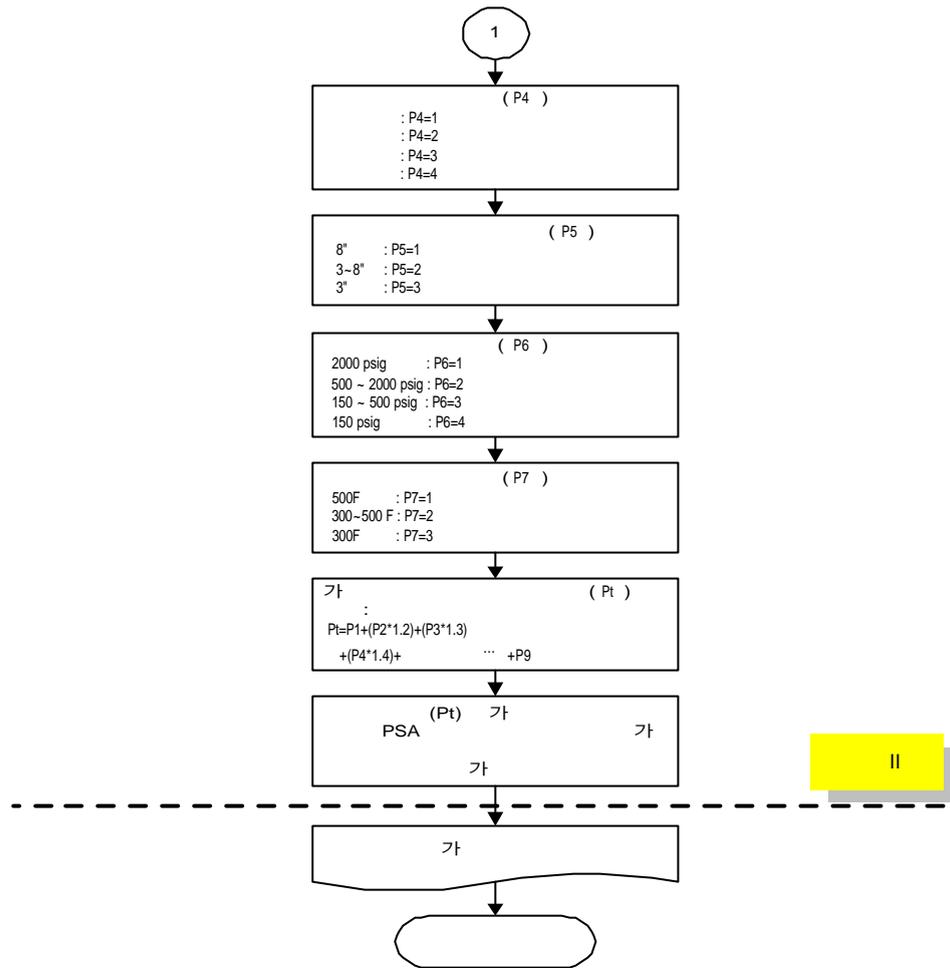


그림 1. 순위 결정 절차 (계속)

4. 발전소별 적용기준

국내 18개호기에 확률론적 기준과 결정론적 기준을 적용하여 안전중요도 순위를 부여하기 위해서는 먼저 PSA가 수행된 발전소의 자료가 필요하므로 전 원전의 PSA현황을 알 필요가 있다. 그 현황에 따라 안전중요도 결정기준 I과 II를 혼용하거나 기준 II만을 적용하여 안전중요도 순위를 결정할 수 있다. 따라서 18개 호기에 대한 PSA 수행현황과 그에 따른 안전중요도 순위 결정 기준을 정리하면 표 1과 같다.

표 1에서 알 수 있듯이 결정 기준 II에서 필요로 하는 계통 중요도 값을 적용할 수 있는 발전소는 영광 1,2호기를 포함하여 7개 호기이며 이들 발전소의 원자로형, 열출력, 주 설계자 등을 고려하여 설계기준이 유사하거나 동일한 발전소의 경우 PSA가 수행된 발전소의 자료를 활용하였다. 또한 이들 7개 호기에 대해서는 모터구동펌프의 상대적 순위를 결정하기 위하여 최소단절 집합(Minimum Cutset)을 10^{-12} 이하로 준 상태에서 평가코드를 재실행하여 안전중요도 순위를 평가하였다.

표 1. 발전소별 적용기준

PSA 수행 여부		대상 호기	안전중요도 순위결정 대상밸브	순위 결정기준
수행		<ul style="list-style-type: none"> ○영광1,2 ○월성2,3,4 ○울진5,6 	○PSA 수행 자료를 사용할 수 있는 밸브	기준 I
			○PSA 수행 자료를 사용할 수 없는 밸브	기준 II
미수행	참조가능 PSA 수행 발전소가 있는 경우	<ul style="list-style-type: none"> ○고리3,4 ○울진5,6 ○월성1 	○PSA 결과 참조 -영광 1,2호기 -영광 5,6호기, 울진 3,4호기 -월성2,3,4호기	기준 I'
			○PSA 순위를 참조할 수 없는 밸브	기준 II
	참조가능 PSA 수행 발전소가 없는 경우	<ul style="list-style-type: none"> ○고리1,2 ○울진1,2 ○영광3,4 	○PSA 순위를 참조할 수 없는 밸브	기준 II

* 평가대상 발전소와 노형, 주설계자, 증기발생기의 수가 동일한 발전소의 PSA 수행자료 참조

5. 결과 및 검토

안전중요도 순위 결정기준 I은 PSA 평가결과로부터 정량적인 순위를 부여한다. 따라서, 이 순위를 기준으로 결정기준 II의 계산 결과로부터 나온 순위를 비교 검토하여 기준 II가 원자로의 안전성에 중요한 밸브군을 평가할 수 있는가를 검토하였다. 본 검토를 위하여 가압경수로형인 영광 1호기와 중수로형(CANDU)인 월성 2,3,4호기에 대한 PSA 평가 코드를 재실행하여 기준 I에 의한 순위를 결정하였다. 비교검토를 효과적으로 수행하기 위하여 경수로형인 경우에는 기준 I의 결과 20위권 내의 밸브중 10대를 추출하여 기준 II에 의한 순위와 비교하였으며, 중수로형인 경우 기준 II에 의한 평가 결과 10위까지의 밸브에 대하여 기준 I의 순위와 비교하였다.

5.1 경수로형 밸브의 안전중요도 순위 검토

그림 2는 영광 1호기를 대상으로 한 기준 I의 평가결과 20위권 내에 있는 밸브 중에서 10대를 선정하여 기준 II에 의한 평가 순위와 비교한 결과이다. 그 결과 기준 I과 기준 II로 평가한 순위가 정확하게 일치하지는 않으나 기준 II로 평가된 10대의 밸브 모두 20위권 내의 순위를 보이고 있다. 따라서 본 평가방법론 개발 취지에 적합한 안전성에 중요한 밸브군을 평가하는데 결정론적 기준이 타당한 것으로 판단하였다.

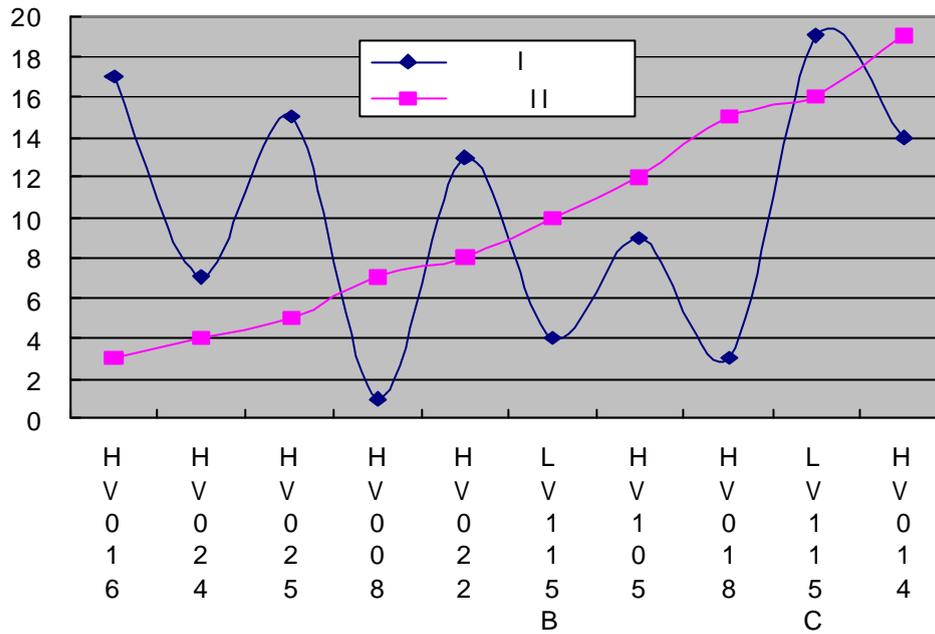


그림 2. 기준 I과 II의 순위비교(영광1호기)

5.2 중수로형 밸브의 안전중요도 순위 검토

중수로형과는 실제개념이 상이한 중수로형에 대한 적용성을 평가하기 위하여 월성 2,3,4호기를 대상으로 PSA 평가코드를 재실행하여 모터구동 밸브의 상대적 순위를 결정하였다. 그 결과를 기준 II를 적용한 순위와 비교하였으며 그림 3과 같다. 그림 3은 결정기준 II에 의한 순위 10위까지의 밸브를 기준으로 기준 I에 의한 순위와 비교한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 단 2대만이 10위권 이상으로 나타났으며 8대가 10위권 내에 분포하고 있다. 따라서 안전성에 중요한 밸브군 평가에 기준 II의 적용이 타당하다는 것으로 판단하였다.

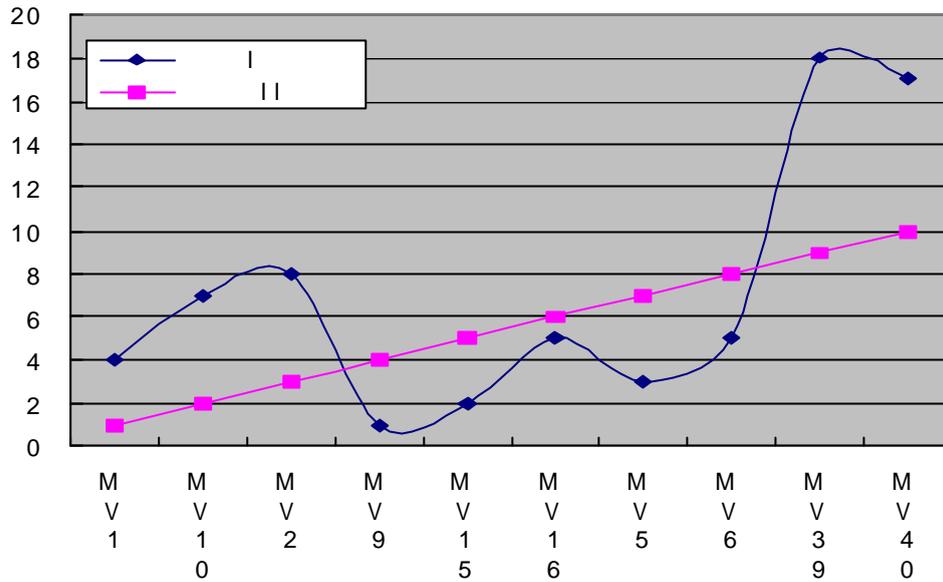


그림 3. 기준 I과 II 비교(월성 2,3,4호기)

6. 결론

어떠한 설계기준사고 조건에서 안전계통에 포함된 모터구동밸브들은 제 설계기능을 충분히 발휘해야 한다. 본 논문은 안전관련 모터구동밸브의 안전성 평가순위 결정 방법론을 제시하고 있는데, 이는 유사한 밸브에 대한 파다한 중복시험에서 오는 손실을 최소화하고 짧은 기간내 효과적으로 안전성평가를 수행하는 것이 중요하기 때문이다. 본 논문에서 제시한 평가 기준은 F-V 중요도 값에 따라 순위를 결정하는 기준인 확률론적 기준과 밸브 및 계통 설계자료를 참조로 쉽게 안전 중요도 순위를 평가할 수 있는 결정론적 기준이다. 결정론적 기준의 타당성을 검토하기 위하여 영광 1호기와 월성 2,3,4호기를 대상으로 확률론적 기준에 의한 모터구동밸브의 안전중요도 순위를 재평가하여 결정론적 기준에 의한 순위와 비교, 검토하였다. 검토 결과 결정론적 기준에 의한 순위 결정 방법론이 확률론적 기준에 의한 순위와 유사한 결과를 보였으며, 본 평가 방법론 개발의 취지에 적합한 안전 중요도가 높은 밸브군 평가에 적합한 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) 과학기술부, 1997, "모터구동밸브 및 동력구동 제이트밸브에 관한 규제 권고사항" 과학기술부 규제 권고사항.
- (2) NRC Generic Letter 89-10, 1989, " Safety-related Motor-operated Valve Testing and Surveillance."
- (3) 과학기술부, 제 98-15호, "원자로 시설의 가동중 점검 및 가동중시험에 관한 규정".
- (4) NRC Generic Letter 96-05, 1996, " Periodic Verification of Design-basis

Capability of Safety-related MOVs."

- (5) R. Clive Callaway, 1994, "Optimizing Safety Benefits in Assuring the Performance of MOVs," Joint Special Meeting on MOV Issues.