

'98 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

신뢰도 기반 정비를 위한 기기 고장 데이터 분석

정현중, 최광희, 김영호, 홍승열
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

국내 원전에 신뢰도 기반 정비(RCM : Reliability Centered Maintenance) 기법을 도입하기 위해 수행하고 있는 영광 1,2호기 시범계통 RCM 분석에서 관련 기기의 고장데이터를 RCM 분석 방법론에 따라 분석하였다. 본 논문에서는 작업의뢰서와 작업보고서 기록내용을 토대로 지배적인 고장모드 및 다빈도 고장발생 기기를 파악하여 고장원인을 분석하였으며, 기기 유형으로 분류하여 고장율을 분석하였다. 분석결과 지배적인 고장모드는 EPRI에서 분류한 고장모드에 모두 포함되었으며, 고장빈도가 높은 기기의 고장원인은 운전환경, 사용유체, 운전형태, 기기 형식 등에 따라 고장메커니즘이 다르게 나타나는 것으로 분석되었다. 기기 유형으로 분류하여 고장모드별로 고장율을 분석한 결과 미국의 Generic Data(IEEE Std 500-1984)와 근소한 차이를 보이거나 약간 낮은 것으로 분석되었으며, 고장율이 높은 기기 유형을 단위 기기별로 세분화하여 분석한 결과 공기구동 조절밸브의 외부누설 고장율은 $1.10E-06$ 이지만 충전유량 조절밸브의 고장율은 $1.70E-05$ 로서 약 10배 정도로 고장율이 높은 것으로 분석되었다. 기기별로 세분화한 고장율 분석 결과는 시범계통 RCM 분석시 고장모드 영향분석(FMEA : Failure Mode and Effective Analysis) 단계에서 필수기기를 선정하는 하나의 인자로 활용하였으며, 고장율의 역수로 구한 고장간 평균시간(MTBF:Mean Time Between Failure)은 정비주기 선정시 기초데이터로 활용된다.

1. 서 론

RCM 기법은 원자력발전소의 안전성 및 이용율에 영향을 미치는 필수 기기를 선별하고 고장을 예방하기 위해 가장 효과적인 예방정비 업무를 선정하기 위한 체계적인 분석기법이다. RCM은 미국, 프랑스, 캐나다 등 외국 원전에 도입되어 널리 활용되고 있으며, RCM의 이행으로 불필요한 예방정비는 감소되고 필수 기기의 예방정비는 강화되면서 정비재원의 효율적인 운영뿐만 아니라 발전소 안전성 및 이용율이 향상됨이 입증되고 있다. 국내에서도 원전의 가동년수가 증가됨에 따라 체계적이고 효과적인 정비의 필요성이 확산되고 있으며, 국내 원전에 RCM 기법을 도입하기 위한 기반을 마련하기 위해 영광 1,2호기 시범계통을 대상으로 RCM 분석을 수행하고 있다. 현행 정비프로그램의 개선점을 파악하기 위해 시범계통 구성 기기들의 고장빈도, 고장의 특징, 고장율에 대해 시범계통을 대상으로 운전 및 정비데이터를 분석하였다.

2. 정비 및 운전데이터 수집

가. 정비데이터 수집

고장데이터는 발전소 작업의뢰서 관리프로그램에서 고장정비 항목을 컴퓨터 파일로 수집하고, 작업의뢰서와 작업보고서 검토 및 정비담당자와의 면담을 통해 상세한 고장 및 정비내용을 파악하였다. 영광 1,2호기 발전소 정비관리 프로그램(PUMAS/N-II)의 기기 목록을 기준으로 시범계통(화학 및 체적제어계통, 주증기계통, 압축공기계통)내의 전체 기기수는 8,185개로, 주증기 계통(AB)이 2,056개, 화학 및 체적제어 계통(BG)이 3,574개, 압축공기 계통(KA)이 2,555개개로 나타났으며, 7년('90~'96)간의 고장정비 데이터를 수집한 결과 고장건수는 1,447건으로 AB 계통이 387건, BG 계통이 684건, 그리고 KA 계통이 412건으로 나타났으며 데이터 수집 결과는 표 1.과 같다.

나. 운전시간 산출

운전시간은 기기의 운전특성에 따라 시간(hourly) 기준과 동작요구(demand) 기준으로 분류하여 산출하였다. AB 계통의 연간 운전시간은 발전소 정상운전 중에만 운전되는 계통이므로 계획예방정비 기간을 제외하여 7200시간으로 계산하였고, BG 및 KA 계통의 연간 운전시간은 계획예방정지 기간중 약 15일을 제외하고는 항상 운전되는 계통이므로 8400시간으로 계산하였다. I&C기기의 연간운전시간은 계통이 정지되어도 전원이 공급되므로 8760시간으로, 봉산열재생계통(BTRS), 체적제어탱크 보충수제어유로, 봉산수 정화유로 등 간헐적으로 운전되는 기기는 실제 운전시간으로, 주기적으로 교체 운전되는 기기는 전체 운전시간을 계열수로 나눈 운전시간으로 산출하였다. 내부누설 및 외부누설 고장모드에 대한 운전시간은 가압된 상태를 유지하는 시간을 운전시간으로 산출하였고, 초과 유출수 유로 등과 같이 연간 운전횟수가 1회 이하인 경우는 총 운전시간에 영향을 주지 않으므로 운전시간을 산출하지 않았다. 평소에 운전되지 않고 대기상태에 있는 기기는 정상운전, 정기점검 및 교체운전으로 구분하여 기기 유형별 동작요구 횟수를 산출하였다. 정기점검시의 동작요구 횟수는 정기점검 절차서를 근거로 매 정기점검시 발생하는 동작요구 횟수와 정기점검 주기를 토대로 정기점검시 발생하는 연간 동작요구 횟수를 산출하였고, 정상운전시의 동작요구 횟수는 매회 운전시 발생하는 동작요구 횟수와 운전일지에 기록된 운전 횟수를 파악하여 산출하였다. 정기점검중 기기교체 운전을 수행하기 때문에 정기점검 동작요구 횟수에 포함되므로 기기 교체운전시 발생하는 동작요구 횟수는 고려하지 않았으며, 비상운전시 발생하는 동작요구 횟수는 그 횟수가 극히 적으므로 고려하지 않았으며, 발전소 기동 및 정지시 그리고 제어신호에 의해 발생하는 동작요구 횟수는 고려하지 않았다.

3. 데이터 분류

중요한 기능을 지원하는 기기에 초점을 두고 분석하기 위해 분석대상 기기를 선별하고, 고장 및 정비내용을 토대로 기능고장 여부를 평가하여 분류한 결과는 표 1.과 같다. 분류결과 시범계통 전체 8,185개 기기중 1/2" 이하의 루트밸브, 배수 및 배기밸브 등을 제외한 결과 분석대상 기기는 6,064개로 전체대비 74%를 차지하였으며, 계통별로는 AB 계통이 1,660개(80.6%), BG 계통이 2,864개(80.1%), KA 계통이 1,540개(60.3%)로 나타났다. 분석대상 기기로 분류된 기기의 고장을 기능고장 판단기준에 따라 기능고장 여부를 평가한 결과 총 1447건의 고장중 43.5%인 629건이 기능고장으로 평가되었으며, 계통별로는 AB 계통이 132건(34.1%), BG 계통이 266건(41.0%), KA 계통이 231건(56.1%)으로 KA 계통의 기능고장 비율이 높은 것으로 나타났다. 기능고장 데이터는 EPRI의 분류기준을 참고로 기기 유 고장모드별로 분류하였다

4. 데이터 분석

가. 지배적인 고장모드

시험계통의 기능고장을 고장 및 정비내용을 검토하여 경험된 고장모드를 평가한 결과 비교적 많은 고장을 경험한 기기들의 고장모드는 다음과 같다.

- 조절형 공기구동밸브 : 내부누설(42건), 외부누설(4건), 동작실패(2건), 열림실패(2건)
- 지시계 : Fail to Operation(21건), Fail Low(10건), Fail High(8건)
- 전동기 및 펌프 : Fail to Run(11건), 기동실패(3건)
- 공기 압축기 : Fail to run

시험계통에서 경험된 고장모드를 평가한 결과 특이한 고장모드는 발견되지 않았고, 데이터 분류과정에서 분류한 고장모드에 모두 포함되는 것으로 나타났다. 고장정비 이력을 통해 분석된 지배적인 고장모드는 그 원인을 파악하여 예측하거나 방지하기 위한 효과적인 예방정비 업무를 선정하기 위해 RCM 분석 과정에 활용된다.

나. 고장빈도 분석

시험계통의 기기 유형별 고장빈도(고장횟수/기기수)를 분석한 결과 [그림 1]과 같이 공기압축기, 유압구동밸브, 필터/스트레이너, 트랩, 조절형 공기구동밸브, 원심펌프, 비조절형 공기구동밸브 등이 비교적 고장빈도가 높은 것으로 분석되었다. 고장빈도가 비교적 높은 것으로 분석된 기기 유형을 계통별로 세분화하여 분석한 결과 공기압축기와 트랩은 KA계통이, 유압구동밸브와 조절형 공기구동밸브는 AB 계통이, 필터/스트레이너와 원심펌프는 BG 계통이 고장빈도가 높은 것으로 분석되었다. 이는 계통의 특성에 따라 고장의 특징이 다르게 나타남을 의미하며, 분석된 결과는 계통별로 필수기기 선정 및 정비분석 단계에서 보다 세밀한 분석을 위한 중요한 정보로 사용된다.

다. 다빈도 고장발생 기기의 고장원인 분석

고장빈도가 높은 기기 유형을 계통별로 분류하여 고장원인을 분석하고, 비교적 고장경험이 많은 조절형 공기구동밸브를 특정 기기별로 세분화하여 고장원인을 분석하였다. 계통별로 분석한 결과 조절형 공기구동밸브는 AB 계통에서 침식에 의한 내부누설 고장빈도가 높은 것으로 분석되었으며, 비조절형 공기구동밸브는 계통별 고장빈도는 유사하게 나타났지만, 밸브 형식에 따라 고장원인이 다르게 분석되었다. Glove 형식의 AB계통 밸브는 Gland packing 손상에 의한 외부누설, Diaphragm 형식의 BG 계통 밸브는 Diaphragm 불량으로 인한 작동실패, Gate 밸브 형식의 KA 계통 밸브는 고착으로 인한 닫힘실패 고장 빈도가 높은 것으로 분석되었다. 조절형 공기구동밸브를 기기별로 세분화하여 분석한 결과 증기덤프밸브의 침식으로 인한 내부누설 고장 빈도가 높은 것으로 분석되었다. 또한 증기덤프밸브 중 대기 덤프밸브의 고장빈도가 높게 나타났으며, 이는 고장발견이 용이하고 복수기 덤프밸브보다 예방정비 주기가 짧기 때문인 것으로 분석되었다. 다빈도 고장발생 기기의 고장원인을 분석한 결과 운전환경, 사용유체, 운전형태, 기기형식 등에 따라 고장 메커니즘이 다르게 나타나는 것으로 분석되었다. 또한 시험계통에 속한 54개의 조절형 공기구동밸브중 16개 기기에서만 고장이 발생된 것으로 나타났다. 이런 데이터 분석 결과는 RCM 분석시 정비업무 선정 단계에서 어떤 고장원인에 초점을 두고 정비업무를 선정해야 하는가를 판단하고 현행 정비업무를 재평가 하기 위한 판단근거를 제공한다.

다. 고장을 분석

운전중 발생하는 고장과 동작요구시 발생하는 고장으로 분류하여 다음과 같이 고장을 계산하였다.

$$\text{Demand Failure Rate}(\lambda_d) = \frac{\text{Failure Numbers}}{\text{Demand Nmbers}}$$

$$\text{Operating failure rate}(\lambda_o) = \frac{\text{Failure Nmbers}}{\text{Operating Time}(hr)}$$

기능고장으로 분류된 38종의 기기 유형에 대하여 고장모드별로 고장율을 산출한 결과 76가지 고장율을 얻었다. 이를 미국의 Generic Data(IEEE Std 500-1984)와 비교한 결과 공기구동 밸브작동기 및 솔레노이드구동 밸브작동기의 작동실패 고장은 Generic Data보다 약 100배 정도 높은 것으로 분석되었고, 공기구동 글로브밸브, 공기구동 게이트밸브 그리고 공기구동 밸브작동기의 외부누설 고장은 약 100배 정도 낮은 것으로 분석되었으며, 나머지는 10배 이내로 고장율이 서로 유사한 것으로 분석되었다. 분석결과를 통해 국내 원자력발전소 구성 기기들과 미국 원자력발전소 구성 기기의 고장 메커니즘이 유사함을 확인하였다. 고장율을 기기 유형별로 분석한 결과는 Generic Data와의 고장을 편차로서 미국과 국내 원전의 정비체계를 간접적으로 비교한 것으로 고장율 편차가 크게 분석된 기기 유형은 RCM 분석과정에서 원인을 분석해 봄으로써 국내 원전 정비프로그램의 개선책을 도출하는데 활용된다. 고장빈도 분석 결과에서 나타난 것과 같이 기기의 사용환경에 따라 고장빈도가 다르게 나타나므로 고장율을 FMEA 및 정비주기 선정 단계에서 활용하기 위한 데이터를 얻기 위하여 비교적 고장율이 높은 기기 유형을 단위 기기로 세분화하여 고장율을 분석한 결과는 표 3.과 같다. 공기구동 조절밸브의 내부누설 고장율은 1.47E-05 이지만 증기덤프 밸브는 2.42E-05, 증기발생기 PORV는 1.65E-06로 분석되었으며, 외부누설, 작동실패, 열림/단힘실패 고장은 기기 단위로 세분화하여 분석한 결과가 약 10배정도로 고장율이 높은 것으로 분석되었다. 이렇게 세분화하여 분석된 고장율은 FMEA 과정에서 필수 기기를 선정하는 하나의 인자로 활용되었으며, 고장율의 역수로 구해진 MTBF(Mean Time Between Failure)는 정비주기를 선정할 때 기초데이터로서 활용된다.

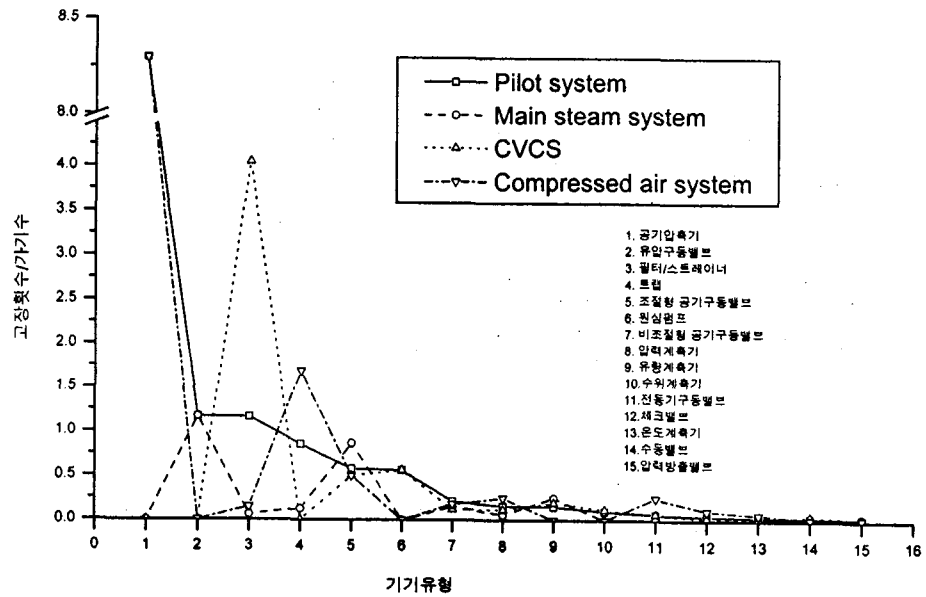
5. 결론

전체 시범계통을 기기 유형별로 고장율을 산출하여 Generic data와의 비교를 통해 국내와 미국 원전의 기기별 신뢰성이 서로 유사한 수준임을 알 수 있었다. 이러한 결과는 RCM 분석과정에서 발전소 고유데이터가 빈약한 경우 Generic data를 참고하여도 결과에 큰 영향을 미치지 않음을 의미한다. 특정 기기별로 세분화하여 고장율을 분석한 결과 동일 기기 유형이라도 기기별로 고장율 편차가 큰 것으로 나타났으며, 이를 필수기기 판정을 위한 하나의 인자로서 활용하였다. 그리고 다빈도 고장발생 기기의 고장원인을 분석한 결과 기기의 운전환경에 따라 고장 형태와 고장 원인이 다르게 나타났으며, 특정 기기에 고장이 집중되는 것으로 나타났다. 이는 다빈도 고장 기기에 집중적으로 정비를 수행하도록 하고 기기의 운전환경에 따라 정비업무 및 주기를 개선하면 효율적인 정비를 할 수 있다는 것을 의미한다.

6. 참고문헌

- 1) IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, Sensing Component, and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear-Power Generation Station, IEEE Std 500-1984
- 2) R. Niall Hunt, Plant Reliability Data Collection & Analysis, 1997. 7. 21
- 3) Reliability Centered Maintenance Workstation User,s Guide, EPRI TR-101967 Volume 2, April 1993

- 4) 원전설비 정비관리시스템(PUMAS/N-II) 사용자안내서, 한전 96-NP-VI 270-026, 1996. 11
 5) 영광 1, 2호기 운영절차서



[그림 1] 기기유형별 고장빈도 분석

표 1. 시범계통 데이터 편집결과

계통 \ 호기	총 기기수		분석대상 기기		고장이력		기능고장	
	기기수	점유율	기기수	점유율	고장횟수	점유율	고장횟수	점유율
주증기 계통(AB)	2,059	25.1	1,660	27.4	387	26.7	132	21.
화학 및 체적제어 계통(BG)	3,574	43.7	2,864	47.2	648	44.8	266	42.3
압축공기 계통(KA)	2,555	31.2	1,540	25.4	412	28.5	231	36.7
합계	8,185	100	6,064	100	1,447	100	629	100

표 2. 다빈도 고장기기의 고장원인 분석

기기유형	기기명	고장데이터			현행 예방장비			
		고장모드	고장원인		내용	주기		
			내용	횟수				
조절형 공기구동밸브	대기덤프밸브(AB-TV418,419,420, 421,422,424), 복수기덤프밸브 (ABTV414,415,437,438,439)	IL	침식	26	대기덤프밸브 분해점검 & STEM SEAL 교체	3F		
	침식		12					
	증기발생기 PORV(AB-PV201)	EL	침식	1	복수기덤프밸브 분해점검(STEM SEAL 교체)	2F(3F)		
	대기덤프밸브(AB-TV424), 증기발생기 PORV(AB-PV201)		패킹손상	1				
	L/D 압력조절밸브(BG-PV145)		가스켓 손상	1			증기발생기 PORV 분해점검 & 패킹교체	2F
	충전유량 조절밸브(BG-FV122)		패킹손상	1			충전유량 조절밸브 분해점검 & Stem Seal 교체(Diaphragm 교체)	4F(3F)
	충전유량 조절밸브(BG-FV122)	Diaphragm 손상	2					
	RCP 밀봉수 조절밸브(BG-HV186)	FOP	침식	1	L/D 압력 조절밸브 분해점검	4F		
	FTC	밸브교정 불량	1	RCP 밀봉수 조절밸브 분해점검	4F			

표 3. 고장율 분석

기기유형	고장 모드	계통	기기번호	고장 횟수	기기별 데이터			기기유형별 데이터					
					운전시간	고장율 (/hr)	MTBF(hr)	운전시간	고장율 (/hr)	MTBF(hr)			
조절형 공기구동 밸브	IL	AB	AB-TV414	2	1,612,800	2.36E-05	4.24E+04	2,956,800	1.45E-05	6.88E+04			
			AB-TV415	3									
			AB-TV418	7									
			AB-TV419	3									
			AB-TV420	5									
			AB-TV421	3									
			AB-TV422	4									
			AB-TV424	4									
			AB-TV437	1									
			AB-TV438	4									
	AB-TV439	2											
	EL	BG	AB-PV201	1	604,800	1.65E-06	6.05E+05	2,839,200	1.41E-06	7.10E+05			
			BG-LV115A	2	117,600	117,600	8.50E-06						
			BG-TV381B	1	117,600	117,600	8.50E-06						
			AB-AB-PV201	1	604,800	1.65E-06	6.05E+05						
BG-BG-FV122			2	117,600	1.70E-05	5.88E+04							
FTO	BG	BG-TV381B	1	117,600	8.50E-06	1.18E+05	2,721,600	7.35E-07	1.36E+06				
		BG-BG-FV122	2	117,600	1.70E-05	5.88E+04							
		BG-BG-FV186	1	117,600	8.50E-06	1.18E+05							
		KA-KA-PV062	1	235,200	8.50E-06	1.18E+05							
		KA-KA-PV082	1	235,200	8.50E-06	1.18E+05							
비조절형 공기구동 밸브	EL	AB	AB-HV210	2	201,600	1.49E-05	6.72E+04	7,190,400	1.39E-06	7.19E+05			
			AB-HV310	1									
			AB-LV407	1							705,600	1.42E-06	7.06E+05
			BG-BG-HV800	1							235,200	4.25E-06	2.35E+05
			BG-BG-HV93	2							117,600	1.70E-05	5.88E+04
			BG-BG-HV57	1							470,400	2.13E-06	4.70E+05
			BG-BG-LV179	1							352,800	2.83E-06	3.53E+05
			KA-KA-FV413	1							235,200	4.25E-06	2.35E+05
			AB-AB-HV210	1							201,600	4.96E-06	2.02E+05
			AB-AB-LV115	1							705,600	1.42E-06	7.06E+05
	FTO	BG	BG-BG-HV93	1	117,600	8.50E-06	1.18E+05	5,896,800	5.09E-07	1.97E+06			
			FTC-FTC-CA-FV405	2	201,600	9.92E-06	1.01E+05						
			BG-BG-HV53	1	705,600	1.42E-06	7.06E+05						
			BG-BG-HV55	1	470,400	2.13E-06	4.70E+05						
			BG-BG-LV181	1	352,800	2.83E-06	3.53E+05						
원심펌프	EL	BG	BG-BG-P092	2	117,600	8.50E-06	117,600	235,632	8.49E-06	1.18E+05			
			BG-BG-P006	1									
			BG-BG-P091	1									
			BG-BG-P092	1									
			BG-BG-P093	1									
			BG-BG-P094	2									
			BG-BG-P095	1									
				864							3.47E-03	288	