

APR1400 안전관련계통 정비효과감시 프로그램 개발

염동운[†] · 현진우 · 송대영

한국수력원자력(주)

(2014년 5월 18일 접수, 2014년 6월 19일 수정, 2014년 6월 20일 채택)

Development of Maintenance Effectiveness Monitoring Program for APR1400 Safety Related Systems

Dong Un Yeom[†] · Jin Woo Hyun · Tae Young Song

Korea Hydro & Nuclear Power Co.

(Received 18 May 2014, Revised 19 June 2014, Accepted 20 June 2014)

요약

국내 가동중 원전은 발전소 안전성 및 신뢰성을 향상시킬 목적으로 정비효과감시 프로그램(정비규정)을 개발하여 2009년부터 이행 중에 있다. 정비효과감시 프로그램은 발전소 전 계통을 기능단위로 분류한 후 관리대상 선정, 안전중요도 결정 및 성능기준 수립을 통해 발전설비의 정비효과를 감시하는 프로그램이며, NUMARC 93-01 방법론을 기반으로 발전소별 고유 설계특성을 반영하여 개발하고 있다. 최근 건설 중인 APR1400형 원전도 운영초기 단계부터 정비체계 정착을 목적으로 안전관련계통 정비효과감시 프로그램을 개발하였으며, 향후 초기 성능평가를 통해 프로그램의 적합성을 검증할 예정이다. 결과적으로 고유 설계특성을 반영하여 개발한 정비효과감시 프로그램의 이행을 통해 APR1400형 원전의 안전성 및 신뢰성이 향상될 것으로 기대된다.

주요어 : 정비규정, 정비효과감시 프로그램

Abstract - Korea Hydro & Nuclear Power Co. (KHNP) has developed and implemented the maintenance effectiveness monitoring (MR) programs for the operating nuclear power plants. MR programs are developed by reflecting design characteristics of the operating nuclear power plants to monitor the plant performance for improving the safety and reliability. Recently, KHNP has developed the MR program for APR1400 safety related systems to establish the advanced maintenance system and will verify the suitability of the MR program through evaluating initial performance. Consequently, it is expected that the safety of the new plant will be improved by developing and implementing the MR program.

Key words : Maintenance Rule, Maintenance Effectiveness Monitoring Program

1. 서 론

한수원은 선진 정비체계 구축을 통해 원전의 안전성 및 신뢰성을 향상시킬 목적으로 정비효과감시 프

로그램을 개발하여 2009년부터 가동 중인 경수로형 원전에서 이행하고 있으며, 2012년부터는 중수로형 원전까지 확대 적용하고 있다.

정비효과감시 프로그램은 일반적으로 정비규정(MR, Maintenance Rule)이라 부르며, 발전소 전 계통을 기능단위로 분류하여 발전설비에 대한 정비효과를 감시한다. 현재 가동 중인 원전에서는 프로그램 이행 효과를 높이기 위해 각 발전소별 고유 설계

[†]To whom corresponding should be addressed.
Korea Hydro & Nuclear Power Company, Central Research
Institute 25-1, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon, Korea
Tel : 042-870-5633 E-mail : www@khnp.co.kr

특성을 반영하여 최적화된 프로그램을 개발하였으며, 최근 건설을 완료한 신규원전의 경우에도 발전소 운영 초기 단계부터 선진 정비체계 적기 구축을 위해 정비효과감시 프로그램 개발을 수행하였다¹⁾.

따라서 본 논문에서는 국내 최초로 개발된 APR1400형 원전의 고유 설계특성을 반영한 안전관련계통의 정비효과감시 프로그램 개발 프로세스와 주요 특성을 제시하고자 한다.

2. 정비효과감시 프로그램 개요

정비효과감시 프로그램은 Fig.1에서 보는 바와 같이 프로그램 개발 및 발전소 이행의 2단계로 구분할 수 있다. 프로그램 개발 단계에서는 발전소 전 계통에 대한 기능분류를 수행하고, 각 기능이 안전 또는 비안전 관련 기능에 해당되는지를 분석하여 프로그램에서 관리할 대상 범위를 선정한다. 관리대상 범위 선정 후에는 확률론적안전성평가(PSA, Probabilistic Safety Assessment) 및 발전소 전문가들의 델파이 평가 결과에 따라 프로그램에서 관리할 기능들에 대한 안전중요도를 결정(High 또는 Low)하고, 안전중요도, 기기 고장빈도 및 계통의 운전형태를 고려하여 신뢰도성능기준(RPC), 이용도성능기준(APC), 상태감시성능기준(CMC) 또는 호기수준성능기준(ULPC)을 수립한다.

정비효과감시 프로그램 발전소 이행 단계에서는 수립된 성능기준을 기반으로 기기의 기능고장 또는

이용불능이 발생하는지 성능감시를 수행한다. 기능고장 또는 이용불능시간의 누적 값이 성능기준에서 허용하는 값을 초과하게 되면 발전소 전문가위원회에서 집중감시를 결정하여 시정조치를 수행한다. 또한, 매 2년마다 정비효과감시 프로그램을 주기적으로 검토 및 평가하여 프로그램을 최적화 시킨다.

3. 정비효과감시 프로그램 개발 방향

한수원은 미국 내 원전에서 적용한 NUMARC 93-01의 방법론²⁾을 기반으로 각 발전소별 고유 설계특성을 반영하여 가동 중인 웨스팅하우스형 원전, OPR1000형 원전 및 중수로형 원전의 정비효과감시 프로그램 개발하였다^{3~5)}. 따라서 국내 최초로 건설된 APR1400 안전관련계통 정비효과감시 프로그램은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 NUMARC 93-01의 방법론 및 가동 중인 원전의 프로그램 개발 시 축적된 경험을 기반으로 고유 설계특성 검토, 각 계통별 기능분석, 관리대상 범위 선정, 안전중요도 결정 및 성능기준 수립 등을 수행하였다. 아울러 발전소 전문가위원회에서 각 단계별 프로그램 개발 결과물을 상세 검토 후 최종 승인함으로써 프로그램의 품질수준을 향상시켰다.

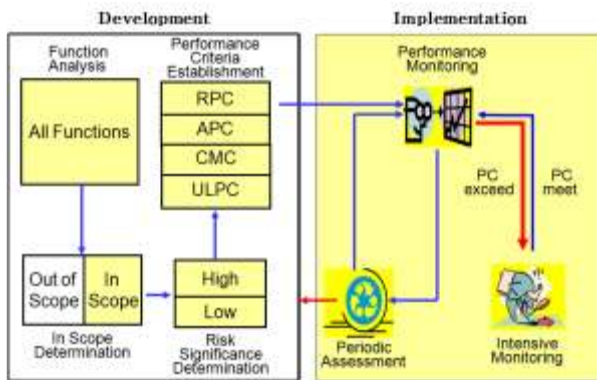
4. 정비효과감시 프로그램 개발

4.1 관리대상 범위 선정

4.1.1 관리대상 범위 선정 방법

정비효과감시 프로그램은 10CFR50.65⁶⁾ 및 Reg. Guide 1.160⁷⁾에 따라 발전소를 기능단위로 감시하는 프로그램이며, 관리대상 범위 선정은 정비효과감시 프로그램에서 감시할 대상 기능을 결정하는 단계이다. 즉, 발전소에서 기기수준의 성능감시를 수행하는 것은 감시자로 하여금 고장발생 시 바라보는 시각을 협소하게 해당 기기뿐만 아니라 국한되도록 하는 반면 기능수준의 감시를 수행하면 해당 기능고장 시 전체 발전소에 미치는 영향을 포괄적으로 평가하도록 감시 시야를 넓혀줄 수 있다는 장점이 있다.

Fig.3은 APR1400 안전관련계통 정비효과감시 프로그램의 기능분석 및 관리대상 범위 선정에 대한 흐름도이다. 기능분석 단계에서는 APR1400형 원전의 안전성분석보고서, 운영기술지침서, 계통설명서, 설계문서 및 계통도를 참조하여 안전관련계통들에 대한



주) RPC (Reliability Performance Criteria), APC (Availability Performance Criteria), CMC (Condition Monitoring Criteria), ULPC (Unit Level Performance Criteria)

Fig. 1. Process diagram of maintenance effectiveness monitoring program

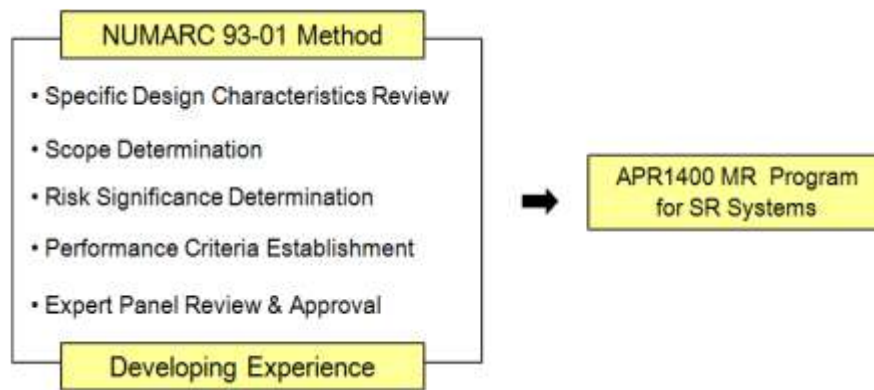


Fig. 2. Development diagram of program for APR1400 safety related systems

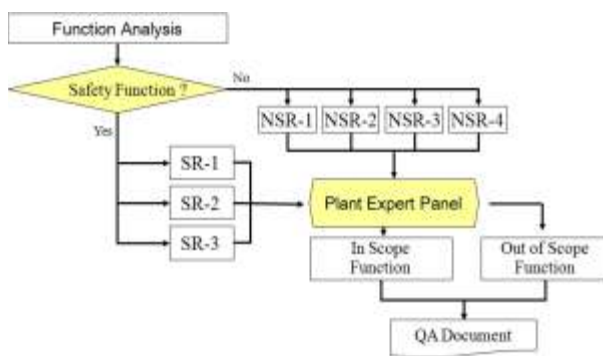


Fig. 3. Scope determination flow chart of the program

기능을 분류하고, 각 기능별로 고유 설계특성을 분석하였다. 기능분석 수행 후에는 NUMARC 93-01의 방법론을 이용하여 각 기능이 안전관련 기능, 안전관련 기능과 연관된 비안전관련 기능 또는 정비효과감시 프로그램에서 관리할 필요가 없는 기능인지를 분석하였다.

NUMARC 93-01에서 제시한 안전관련 기능의 범주는 설계기준사고 시 원자로냉각재 압력경계의 건전성 유지(SR-1), 원자로의 안전정지 및 안전정지 조건 유지(SR-2), 10CFR100 지침에 상응하는 잠재적 소외 방사능 누출을 유발할 수 있는 사고결과를 방지 또는 완화(SR-3)하는 것이다. 비안전관련 기능은 안전성분석보고서에 기술된 사고 또는 과도상태 완화(NSR-1), 비상운전절차서에서 사용(NSR-2), 고장이 발생할 경우 안전관련 설비의 기능수행을 저해(NSR-3), 고장이 발생할 경우 원자로 정지 또는 안전관련 계통의 작동을 유발(NSR-4)하는 것이다. 정비효과감시 프로그램에서는 안전관련 기능 및 비안전관련 기능을 대상 범위에 포함시키며, 발전소 전문가위

원회에서 검토 후 APR1400 안전관련계통들의 관리대상 범위를 최종 결정하였다. Table 1은 APR1400 안전관련계통의 기능분석 사례를 보여주고 있다.

4.1.2 관리대상 범위 선정 특성

APR1400 안전관련계통 정비효과감시 프로그램 개발 단계에서는 기존 OPR1000형 원전 대비 고유 설계특성 및 후쿠시마원전 사고 이후의 대응 설비들에 대한 기능들이 추가되었으며, 기능분석 및 관리대상 범위 선정 단계에서 OPR1000형 모델과 비교되는 프로그램의 주요 특성을 요약하면 다음과 같다.

첫째, OPR1000형에서는 3대의 가압기안전밸브와 2계열의 안전감압밸브가 원자로냉각재계통 과압보호 및 급속감압 기능을 수행하나, APR1400형에서는 가압기 파이롯트구동 안전방출밸브(POSRV) 4대가 해당 기능을 수행한다. 또한, OPR1000형에서는 가압기 보조살수 제공 밸브들이 다중으로 설계되었으나 APR1400형에서는 단일기기로 설치되었다.

둘째, 원자로건물 살수계통과 정지냉각계통이 열교환기를 공유하는 OPR1000형과 달리 APR1400형에서는 2개의 계통 각각 열교환기를 독립적으로 설치하였다.

셋째, 안전주입펌프 및 원자로건물 살수펌프에 봉산수를 공급할 원자로건물내재장전수탱크(IRWST)를 설치하여 독립된 계통으로 분류하였으며, IRWST 설치에 따라 사고후 급수/취출 운전 시 IRWST 냉각, 정지냉각펌프 운전 불가능시 IRWST 냉각 및 정화 기능이 추가되었다. 또한, 재순환작동신호 발생 기능은 IRWST 설치에 따라 삭제하였다.

넷째, 공학적안전설비 펌프실 침수 방지 및 경보 제공 기능은 OPR1000형에서는 비관리대상으로 분석

Table 1. Examples of function analysis

Function ID	Function Description	SR			NSR			
		1	2	3	1	2	3	4
RC-01	Integrity of the reactor coolant system pressure boundary	Y	N	N	N	N	N	N
RC-04	Reactor core cooling by natural circulation	N	Y	N	N	N	N	N
SI-03	Supplying safety injection water by SIT	N	Y	N	N	N	N	N
CS-06	Isolation of reactor building	N	N	Y	N	N	N	N
CV-01	Control of the reactor coolant system inventory	N	N	N	N	Y	N	N

Table 2. Results of in-scope determination

System		Function	
Total	In Scope	Total	In Scope
21	17 (80.9%)	116	64 (55.2%)

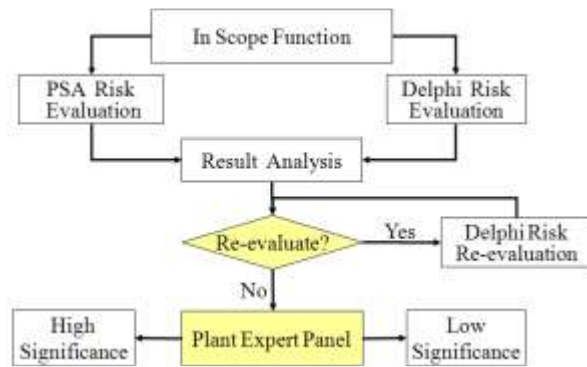


Fig. 4. Risk significance determination flow chart of the program

하였으나, APR1400형에서는 해당 기능상실 시 안전 관련펌프의 건전성에 영향을 미치므로 관리대상 기능으로 선정하였다.

다섯째, 후쿠시마 원전 사고 이후 원자로용기 외벽 냉각, 비상 원자로건물 살수, 원자로공동 침수 기능 등이 추가되었으나, 설계기준사고보다는 중대사고 대응 설비인 점을 고려하여 정비효과감시 프로그램에서는 비관리 대상으로 분석하였다.

4.1.3 관리대상 범위 선정 결과

발전소 계통담당자들이 검토 및 보완 후 전문가위원회에서 최종 결정한 안전관련계통 정비효과감시 프로그램의 관리대상 기능 선정결과는 Table 2와 같다. 총 21개의 원자로 및 보조계통 중에서 17개(80.9%)의 안전관련계통이 관리대상이며, 나머지 계통은 비관리대상으로 결정되었다. 또한, 총 116개 기능 중에

서 64개(55.2%) 기능이 정비효과감시 프로그램에서 관리할 대상으로 선정되었으며, 나머지 52개 기능은 비관리대상으로 결정되었다. 일반적으로 비관리대상 기능들은 원전의 안전성 및 신뢰성에 크게 영향을 미치지 않는다.

4.2 안전중요도 결정

4.2.1 안전중요도 결정 방법

안전중요도 결정은 대상범위 선정 단계에서 정비 효과감시 프로그램의 관리대상으로 포함된 기능들에 대해 성능기준 및 성능감시 수준을 설정하기 위해 중요도 High 또는 Low를 결정하는 것이다. 안전중요도 수준은 확률론적안전성평가(PSA)에 모델링된 경우, 노심손상빈도(CDF, Core Damage Frequency), 위험도감소가치(RRW, Risk Reduction Worth) 및 위험도증가가치(RAW, Risk Achievement Worth)의 중요도 정보를 활용한 정량적인 방법과 발전소 분야별 전문가의 정성적인 델파이(Delphi) 평가 결과를 종합하여 전문가위원회에서 결정한다. 즉, 정량적인 평가와 정성적인 평가간의 상호 보완을 통해 안전중요도 결정의 객관성을 확보하기 위함이다.

Fig.4는 정비효과감시 프로그램의 안전중요도 결정에 대한 흐름도이다. APR1400 안전관련계통 프로그램의 안전중요도 결정 시는 OPR1000형 원전과 동일하거나 유사한 기능들에 대해서는 OPR1000형 모델 개발 경험을 참조하여 일관성이 유지될 수 있도록 하였다.

PSA 중요도 평가는 OPR1000형 모델과 APR1400형의 PSA 결과가 동일하지 않은 점을 고려하여 정비 효과감시 프로그램의 관리대상 범위로 선정된 64개 기능 중 PSA에 모델링된 50개의 기능들에 대해 CDF, RRW 및 RAW 정보를 도출하여 Table 3에 따라 중요도를 평가하였다. PSA 중요도 평가결과, 중요도 High는 21개 기능, 중요도 Low는 29개 기능으로

Table 3. Criteria of PSA risk significance evaluation

PSA Significance	Criteria
High	<ul style="list-style-type: none"> ○ $RRW \geq 1.005$ or ○ $RAW \geq 2$ or ○ Including minimal cut set that account for about 90% of the CDF
Low	<ul style="list-style-type: none"> ○ $RRW < 1.005$ and ○ $RAW < 2$ and ○ Not including minimal cut set that account for about 90% of the CDF

Table 4. Criteria of PSA risk significance evaluation

Delphi Significance	Criteria
High	Total Score ≥ 404
Low	Total Score < 404

나타났다.

델파이(Delphi) 평가는 관리대상 범위로 선정된 64개의 기능들을 대상으로 발전소 전문가들이 수행하였으며, 정확한 평가 결과가 도출될 수 있도록 사전에 델파이 평가 기법 및 각 기능들의 주요특성에 대한 교육을 수행하였다. 델파이 평가 방법은 사고대응기능 4개 항목과 정상운전기능 6개 항목에 대해 전문가들이 평가를 수행한 후 결과를 취합하여 평균값을 계산하고, 항목별 가중치를 곱하였으며, 경계치에 근접한 값들에 대해서는 재평가를 수행한 후 Table 4에 따라 델파이 중요도를 평가하였다. 안전관련계통 총 64개의 기능들 중 중요도 High는 19개 기능, 중요도 Low는 45개 기능으로 평가되었다.

발전소 전문가위원회에서는 PSA 및 델파이 중요도 평가 결과를 검토한 후 안전중요도를 최종 결정하였다. Table 5는 APR1400 안전관련계통의 안전중요도 결정 사례를 보여주고 있다.

4.2.2 안전중요도 결정 특성

APR1400 안전관련계통 안전중요도 평가 단계에

서 이용한 PSA 정보는 OPR1000형 모델과 비교하여 상세분석을 수행하였고, APR1400형 원전의 운전경험이 반영되지 않은 일반데이터를 사용하여 얻어진 결과라는 특징이 있다⁸⁾. 그 결과 및 관리대상 범위 선정 단계에서 나타난 고유 설계특성에 따라 안전중요도 결정 단계에서 OPR1000형 모델과 비교되는 프로그램의 주요 특성을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 안전주입펌프 및 원자로건물 살수펌프에 봉산수를 공급할 원자로건물내재장전수탱크(IRWST)와 관련된 기능은 PSA 및 델파이 중요도 모두 High로 평가되어 안전중요도를 최종 High로 결정하였다.

둘째, 발전소 정상 및 비정상 조건하에서 원자로의 반응도를 제어하는 기능은 OPR1000형에서는 중요도가 Low였으나, APR1400에서는 PSA 정보를 고려하여 High로 정하였다.

셋째, 원자로냉각재계의 저온 과압을 방지하는 기능의 경우 PSA에는 해당 기능이 모델링되어 있지 않아 델파이 중요도 평가 결과에 따라 Low가 되었다.

넷째, 원자로건물내재장전수탱크(IRWST)에 보충수를 공급하고 반응도를 조절하는 기능은 PSA 중요도 High, 델파이 중요도 Low로 평가되었으나 탱크 충수 유로가 다양하여 실제적으로 수위 상실 가능성이 희박한 점을 고려 전문가위원회에서 Low로 결정하였다.

다섯째, 원자로냉각재펌프에 냉각수를 공급하는 기능의 경우 OPR1000형에서는 중요도가 High였으나, PSA 및 델파이 평가 결과를 고려 Low로 정하였다.

여섯째, 안전관련기기의 냉각을 위해 공급되는 기기냉각수계통 열교환기와 관련된 기능은 PSA 중요도 Low, 델파이 중요도 High로 평가되었으나 해당 기능이 중간방벽 역할을 수행하므로 전문가위원회 검토 후 최종 Low로 결정하였다.

4.2.3 안전중요도 결정 결과

발전소 전문가위원회 검토 후 최종 승인한 정비효

Table 5. Examples of risk significance determination

Function ID	Function Description	Risk Significance		
		PSA	Delphi	Final
RC-01	Integrity of the RCS pressure boundary	High	High	High
RC-04	Reactor core cooling by natural circulation	Low	High	High*
SI-03	Supplying safety injection water by SIT	High	High	High
CS-06	Isolation of reactor building	Low	Low	Low
CV-01	Control of the RCS inventory	Low	Low	Low

Table 6. Results of risk significance determination

In-Scope Function	PSA Significance			Delphi Significance		Final Risk Significance	
	High	Low	None	High	Low	High	Low
64	21	29	14	19	45	24	40
100(%)	33	45	22	30	70	38	62

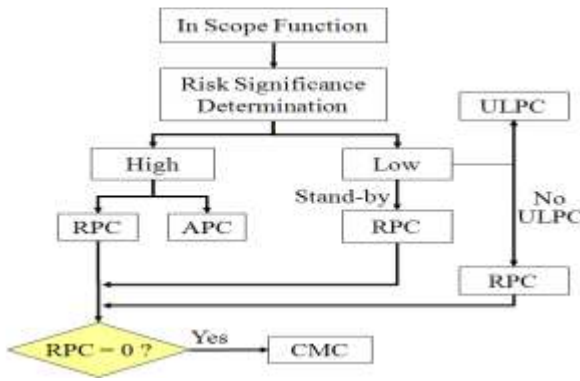


Fig. 5. Performance criteria establishment flow chart of the program

과감시 프로그램의 안전중요도 결정 결과는 Table 6 과 같다. APR1400 안전관련계통 정비효과감시 프로그램의 관리대상 기능으로 선정된 64개의 기능들 중 PSA에 모델링된 기능은 50개(78%), 모델링되지 않은 기능은 14개(22%)이다. PSA 모델링된 기능을 대상으로 PSA 중요도를 평가한 결과, 중요도 High는 21개(33%), 중요도 Low는 29개(45%)로 나타났다. 델파이 평가는 안전관련계통 64개 기능 전체를 대상으로 수행한 결과, 중요도 High는 19개(30%), 중요도 Low는 45개(70%)로 나타났다. 발전소 전문가위원회에서는 PSA 및 델파이 평가 결과를 검토한 후 최종적으로 64개의 기능 중 안전중요도 High는 24개(38%), Low는 40개(62%)로 결정하였다.

4.3 성능기준 수립

4.3.1 성능기준 수립 방법

정비효과감시 프로그램의 관리대상 기능들에 대한 안전중요도가 결정되면 해당 기능들에 대한 성능감시를 위해 성능기준을 수립하여야 한다. 성능기준은 안전관련계통 관리대상 기능의 성능이 적절하게 발휘되는지 확인하고 성능감시 목표를 설정하는데 필요하다. 성능기준 설정수준 및 감시수준은 NUMARC

93-01에서 제시한 방법론에 따라 안전중요도와 운전 형태를 고려하여 신뢰도성능기준(RPC), 이용도성능기준(APC), 상태감시성능기준(CMC) 또는 호기수준성능기준(ULPC)을 수립하였다. APR1400 안전관련계통 정비효과감시 프로그램 개발 시 성능기준 수립 단계에서는 OPR1000형 모델 개발 경험을 기반으로 관리대상 범위 선정 및 안전중요도 결정 시 나타난 APR1400형 원전의 고유 특성과 PSA 정보를 고려하여 성능기준을 수립하였다. 총 64개 관리대상 기능들 간의 상호 연계성 분석 후 도출된 성능기준은 45개이며, 각 성능기준의 핵심기 파악, 기능고장 정의 및 성능기준간의 경계를 설정하였다. 핵심기란 해당 성능기준에서 기능고장을 유발하는데 큰 영향을 미치는 기기로써 기능고장 정의 및 성능기준 수립을 위한 데이터 분석용 기초자료로 활용된다.

성능기준 설정수준은 NUMARC 93-01의 방법론에 따라 안전중요도 High는 계열수준, 중요도 Low는 계통수준으로 정하였으며, 단일 계열로 구성된 기능에 대해서는 안전중요도에 상관없이 계통수준으로 정하였다. 또한, Fig. 5의 흐름도에서 보는 바와 같이 안전중요도가 High인 경우에는 신뢰도성능기준(RPC) 및 이용도성능기준(APC), 중요도가 Low이면서 대기상태를 유지하는 경우는 신뢰도성능기준(RPC)을 수립하였다. 안전중요도가 Low이면서 상시 운전되는 기능 중 NSR-4에 해당되는 기능은 호기수준성능기준(ULPC), ULPC에 해당되지 않는 경우에는 RPC를 수립하였다. 그리고 RPC가 “0”이거나 탱크 등과 같이 상태감시가 적합한 경우에는 상태감시성능기준(CMC)을 수립하였다.

신뢰도성능기준(RPC)은 성능감시 기간 동안 허용되는 기능고장(MRFF, Maintenance Rule Functional Failure) 수로 정의된다. 성능기준 설정값은 PSA에 모델링된 경우와 PSA 유추(Surrogate) 및 확장(Extension) 등 확대적용이 가능한 경우에는 EPRI 방법론을 사용하였고, PSA 정보를 활용하여 성능기준을 수립할 수 없는 경우에는 안전중요도가 High이면 95% 성공률, 중요도가 Low이면 90% 성공률을 적용하였다.

Table 7. Examples of performance criteria establishment

PCID	Performance Criteria Description	Risk Significance	Level	Performance Criteria
RC01	Integrity of the RCS pressure boundary	High	System	CMC : 0
RC02	Reactor core cooling by natural circulation	High	System	RPC : 1 APC : 3 days
SI03	Supplying safety injection water by SIT	High	System	CMC1 : 0 CMC2 : 1
PC02	Isolation of reactor building	High	System	RPC : 0
CV01	Control of the RCS inventory	Low	System	RPC : 1

이용도성능기준(APC)은 관리대상 기능의 이용불능시간(OOST, Out of Service Time)을 효율적으로 관리하기 위하여 수립하며, 성능기준 설정값은 운영기술지침서의 허용정지시간(AOT, Allowed Outage Time), PSA 모델의 시험 및 정비사건에 대한 이용불능도 데이터 및 운전경험을 반영하여 설정하였다.

상태감시성능기준(CMC)은 기능고장(MRFF)이나 예방가능기능고장(MPFF, Maintenance Preventable Functional Failure)을 허용할 수 없는 경우 및 피동형 기기와 같이 상태감시가 효율적인 성능기준을 대상으로 관련 절차서 및 관리 프로그램을 활용하여 성능감시 방법을 수립하였다.

호기수준성능기준(ULPC)은 해당 기능이 비계획 발전정지, 30% 이상의 출력감발 및 공학적안전계통 작동에 해당되는 기능들에 대해 감시기간 3년 동안의 허용횟수를 부여하였다.

Table 7은 APR1400 안전관련계통 프로그램의 성능기준 수립 사례를 보여주고 있다.

4.3.2 성능기준 수립 특성

APR1400 안전관련계통 정비효과감시 프로그램의 성능기준 수립 단계에서 고유 설계특성 및 PSA 상세 분석에 따라 OPR1000형 모델과 비교되는 주요특성을 요약하면 다음과 같다.

첫째, APR1400형 원전의 고유 설계특성 및 PSA 상세 분석에 따라 주요설비 고장률 데이터가 전반적으로 낮은 수준이어서 RPC 및 APC 성능기준의 허용값이 OPR1000형 모델과 비교하여 감소하였다.

둘째, 안전중요도 변경에 따라 중요도 Low로 관리해야 하는 상시운전 기능들의 경우 APC 성능기준을 수립하지 않고, RPC 기준만을 수립하였다. 단, 해당 기능이 대기기능을 수행하면 PSA의 시험 및 정비데

Table 8. Results of risk significance determination

Plant	SR System Performance Criteria			Total
	RPC / APC	RPC	CMC	
APR1400 Model	15	21	9	45
OPR1000 Model	17	20	10	47

이터가 존재할 때 APC 기준을 수립하였다.

셋째, 공학적안전설비 펌프에 봉산수를 공급할 원자로건물내재장전수탱크(IRWST)와 관련된 성능기준은 중요도 High이지만 정상운전 중 기능상실 시 정비가 불가하므로 APC 기준을 수립하지 않았으며, RPC 허용값이 0회로 계산되어 CMC 기준을 수립하였다.

넷째, 원자로냉각재 재고량 제어를 감시하는 성능기준은 OPR1000형 모델과 비교하여 펌프 운전 중 고장율이 크게 줄어들어 RPC 허용횟수가 감소하였다.

다섯째, 기존 비상노심냉각계통 기기실 부압유지 및 배기 성능기준은 APR1400형에서는 설계특성을 고려 안전성 관련 기계기기실 냉각 기준으로 변경하였다.

4.3.3 성능기준 수립 결과

APR1400 안전관련계통 정비효과감시 프로그램의 성능기준 수립 결과는 Table 8과 같다. 안전관련계통 관리대상 기능으로 선정된 64개 기능들의 상호 연계성 분석 후 총 45개의 성능기준을 수립하였으며, 최종적으로 전문가위원회에서 RPC/APC를 함께 적용하는 성능기준 15개, RPC만 적용하는 성능기준 21개, CMC를 적용하는 성능기준 9개를 승인하였다.

Table 8에서 APR1400 안전관련계통 성능기준과 OPR1000형 모델을 비교하여 본 결과, 고유 특성에 따라 상호간에 차이가 나타났으며, 향후 고장통지 및 오더를 이용하여 초기 성능평가를 수행함으로써 APR1400 안전관련계통 프로그램의 적합성을 입증할 것이다.

4.3.4 정비효과감시 수행

정비효과감시 프로그램을 이행 중인 기존 가동 중 원전의 경우, 감시 수행 중 기능고장이 발생하게 되면, 발전소 엔지니어가 예방정비, 설비개선 및 정비방법 등에 대한 타당성 검토를 수행하고, 기능고장 누적으로 성능기준 초과 시에는 기능고장이 재발되지 않도록 집중감시 조치계획을 수립하여 시정조치를 수행함으로써 안전/비안전관련 설비의 안전성 및 신뢰성을 향상시키고 있다. APR1400 안전관련계통의 경우에도 개발된 프로그램에 따라 초기 성능평가를 거쳐 정비효과감시 프로그램 성능기준의 적합성이 입증되면 발전소에 적용하여 성능감시를 수행함으로써 APR1400형 원전에 대한 대내외 신뢰도를 제고시킬 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 APR1400형 원전의 선진 정비체계 구축을 위해 수행한 안전관련계통 정비효과감시 프로그램 개발 프로세스 및 내용을 제시하였다.

첫째, 정비효과감시 프로그램을 이행 중인 가동중 원전과 비교하여 프로그램 개발 및 이행의 일관성을 확보하기 위해 동일한 방법론 및 OPR1000형 모델 개발 시 축적된 경험을 기반으로 개발하였다.

둘째, APR1400 안전관련계통의 고유 설계특성을 반영하여 정비효과감시 프로그램의 관리대상 범위선정, 안전중요도 결정 및 성능기준을 수립하였다.

셋째, 성능기준 수립 후 OPR1000형 모델과 비교하여 본 결과, 발전소 고유 특성에 따라 상호간에 차이가 있었으며, 향후 누적된 고장통지 및 오더를 이용하여 초기 성능평가를 수행함으로써 APR1400 안전관련계통 정비효과감시 프로그램의 적합성을 입증할 것이다.

결과적으로 정비효과감시 프로그램의 개발 및 이행을 통해 발전소의 설계기능과 성능이 유지되고 있는지 정비효과성을 감시함으로써 APR1400형 원전의

안전성 및 신뢰성이 향상될 것으로 기대되며, 향후, UAE 원전 등 수출형 원전 정비효과감시 프로그램 개발 시 표준모델로 활용될 것이다.

References

1. Yeom, D. U, Hyun, J. W, Song, T. Y, March 2012, "Development of Maintenance Effectiveness Monitoring Program Based Design Characteristics for New Nuclear Power Plant, pp 25~32
2. Nuclear Energy Institute, July 2000, "Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants", NUMARC 93-01, Revision 3, pp 4~33
3. KHNP, July 2009, "Development of the Maintenance Rule Implementation Programs for Kori Units 1&2", Final Report, pp 3~84
4. KHNP, July 2009, "Development of the Maintenance Rule Implementation Programs for OPR1000 Nuclear Power Plants", Final Report
5. Jerng, D. W., Chang, H. S., Ju, T. Y., April 2011, "Development of a Maintenance Effectiveness Monitoring Program for CANDU Reactors", Annals of Nuclear Energy, pp 1512~1518
6. Nuclear Regulatory Commission, July 1991, "Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants", 10CFR50.65, pp 1~2
7. Nuclear Regulatory Commission, June 1993, "Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants", Regulatory Guide 1.160, pp 1~11
8. KHNP, "Probabilistic Safety Assessment for Shin-kori Units 3&4", Final Report