

APR1400 급수공급계통 엔지니어링 프로그램 개발

염동운[†] · 주태영 · 현진우

한국수력원자력(주)

(2017년 5월 16일 접수, 2017년 6월 19일 수정, 2017년 6월 21일 채택)

Development of Engineering Program for APR1400 Feedwater Supplying System

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

Korea Hydro & Nuclear Power Co.

(Received 16 May 2017, Revised 19 June 2017, Accepted 21 June 2017)

요 약

국내 가동원전은 안전성 및 설비 신뢰도 제고를 위해 엔지니어링 프로그램들을 이행하고 있다. 엔지니어링 프로그램에는 설비의 정비효과를 감시하는 정비규정(MR), 예방정비 프로그램 개발 및 설비관리 우선순위 결정을 위한 기능적중요도결정(FID), 발전설비 불시정지 최소화를 위한 발전정지유발기기(SPV) 및 효율적 작업관리를 위한 기능적설비그룹(FEG) 등이 있다. 최근에 건설 중인 APR1400형 원전도 운영초기 단계부터 엔지니어링 체계 정착을 위해 고유 설계특성을 반영하여 급수공급계통의 엔지니어링 프로그램들을 개발하였으며, 향후 운영단계에서 프로그램 이행을 통해 각 프로그램의 적합성을 검증할 예정이다.

결과적으로 신규원전 고유 설계특성을 반영하여 개발한 엔지니어링 프로그램 이행을 통해 APR1400 급수공급계통의 신뢰성이 향상될 것으로 기대된다.

주요어 : APR1400, 엔지니어링, 급수공급계통

Abstract - Korea Hydro & Nuclear Power Co. (KHNP) has implemented engineering programs for operating nuclear power plants. Engineering programs are maintenance rule (MR), functional importance determination (FID), single point vulnerability (SPV) and functional equipment group (FEG). Recently, KHNP has developed engineering programs for APR1400 feedwater supplying system to establish the advanced engineering system and will verify the suitability of engineering programs through implementing in new nuclear power plant.

Consequently, it is expected that the reliability of APR1400 feedwater supplying system will be improved by implementing engineering programs.

Key words : APR1400, Engineering, Feedwater Supplying System

1. 서론

한수원은 선진 엔지니어링 체계 구축을 통한 원전의 안전성 및 신뢰성 향상을 위해 정비규정(MR, Main-

tenance Rule), 기능적중요도결정(FID, Functional Importance Determination) 및 발전정지유발기기(SPV, Single Point Vulnerability) 프로그램을 개발하여 가동원전에서 이행하고 있다. 현재 가동원전에서는 엔지니어링 프로그램의 이행 효과를 높이기 위해 각 발전소별 고유 설계특성을 반영하여 최적화된 프로그램으로 개발하였으며, 최근 건설 중인 APR1400형 신규원전

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-42-870-2612 E-mail : 123456789@khnp.co.kr

의 경우에도 향후 운영초기 단계부터 엔지니어링 체계 적기 구축을 위하여 상기 3가지 프로그램 및 추가로 효율적 작업관리를 위한 기능적설비그룹(FEG, Functional Equipment Group) 프로그램을 개발하였다¹⁾.

따라서 본 논문에서는 APR1400형 신규원전의 고유 설계특성을 반영한 급수공급계통의 엔지니어링 프로그램 개발 프로세스와 주요 특성을 제시하고자 한다.

2. 엔지니어링 프로그램 개요

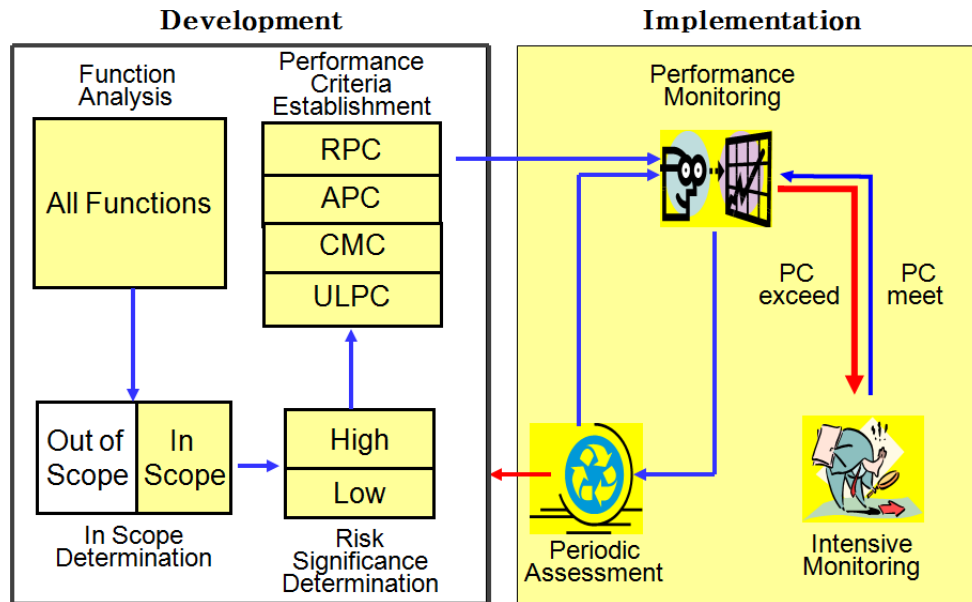
2-1 정비규정 (MR)

정비규정 프로그램은 발전소 각 계통을 기능단위로 분류하여 정비효과를 감시하는 프로그램이며, Fig.1에서 보는 바와 같이 프로그램 개발 및 이행의 2단계로 구분한다. 정비규정 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 현장 전문가들의 델파이 평가 결과에 따라 프로그램에서 관리할 기능들에 대한 안전중요도를 결정(High 또는 Low)하고, 안전중요

도, 기기 고장빈도 및 계통의 운전형태를 고려하여 신뢰도성능기준(RPC), 이용도성능기준(APC), 상태감시 성능기준(CMC) 또는 호기수준성능기준(ULPC)을 수립한다. 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 정비규정 프로그램을 주기적으로 검토 및 평가하여 프로그램을 최적화 시킨다²⁾.

2-2 기능적중요도결정 (FID)

발전소 설비에 대한 기능적중요도결정은 예방정비 시행 및 설비관리 우선순위 결정을 위해 각 설비의 기능이 발전소의 안전 또는 운전 에 미치는 영향을 분석하여 설비중요도, 운전빈도 및 운전환경을 결정하는 것이다. Fig.2에서 보는 바와 같이 각 발전소의 설비 기준정보(Equipment Master)에 등록된 설비를 대상으로 기능별로 구분하고, 각 기능의 설비들에 대해 Critical A, Critical B, Minor 및 No-impact의 4가지 등급으로 일관성 있게 중요도를 분류한다. 중요도 분류 후에는



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

Fig. 1. Process diagram of maintenance rule program

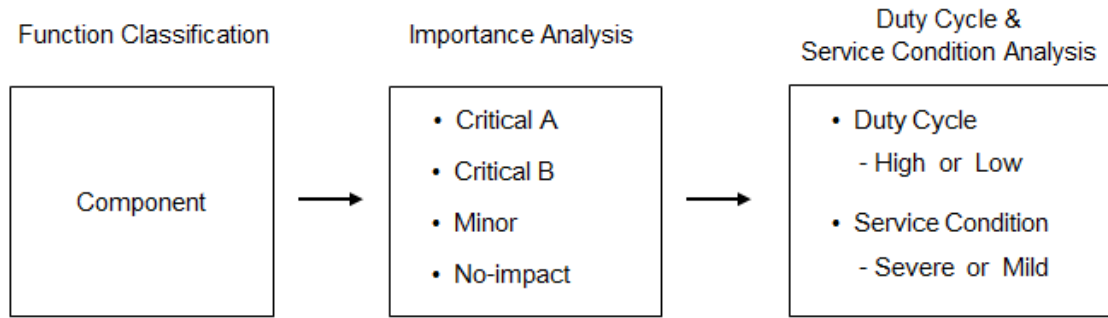


Fig. 2. Process diagram of functional importance determination

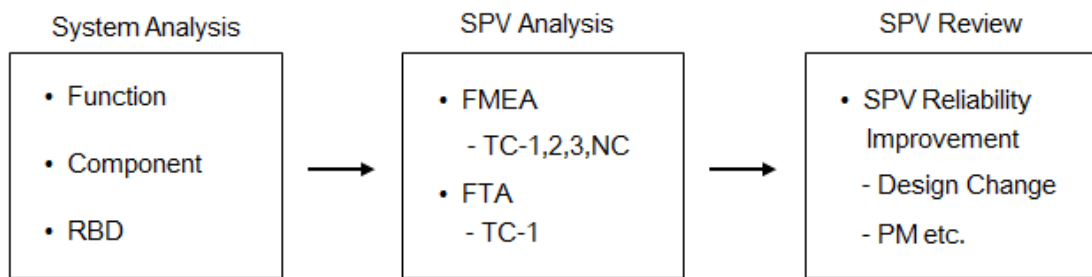


Fig. 3. Process diagram of single point vulnerability analysis

운전빈도 및 운전환경을 검토하며, 운전빈도는 High 또는 Low, 운전환경은 Severe 또는 Mild로 분류한다. 설비기준정보에 등록된 설비에 대한 기능적중요도결정 결과는 향후 예방정비 프로그램 개발 시 정비주기 선정 및 설비관리 우선순위 결정 시에 활용하게 된다.

2-3 발전정지유발기기 (SPV)

발전정지유발기기란 단일고장 발생 시 원자로 정지, 발전정지 또는 50% 이상 출력감발을 유발하는 설비이며, 원전에서는 안전운영 및 발전정지 최소화를 위해 발전정지유발기기를 선정하여 관리하고 있다. Fig.3에서 보는 바와 같이 계통분석 단계에서는 계통 기능 및 주요기기를 검토하여 신뢰도블럭선도(RBD, Reliability Block Diagram)를 작성한다. 고장모드영향분석(FMEA, Failure Mode and Effect Analysis) 단계에서는 각 설비별 고장모드를 식별하고, 해당 고장 발생 시 그 결과를 분석하여 발전정지 중요도(Trip Criticality)를 TC-1,2,3 및 NC 등으로 분류한다. 여기서 TC-1은 발전정지유발기기, TC-2는 잠재적 발전정지유발기기이다. 고장수목분석(FTA, Fault Tree Analysis) 단계에서는 계통간 연계를 통해 발전정지 관련 설비들을 추가로 도출하는 것이다. 발전정지유발기기 선정 후에는

해당 설비들에 대해 설계변경, 설비개선 및 예방정비 개선 등과 같은 신뢰도 개선방안을 수립하여 이행함으로써 발전정지 유발 가능성을 최소화 시키게 된다.

2-4 기능적설비그룹 (FEG)

기능적설비그룹은 정비로 인한 이용불능시간 최소화를 위해 주요설비를 중심으로 관련 설비들을 그룹핑 하는 것이다. Fig.4의 사례에서 보는 바와 같이 기능단위로 구성된 설비의 그룹이며, 예방정비, 고장정비 또는 가동중정비(OLM, On Line Maintenance) 수행 시 해당 그룹 내 설비들을 동시에 작업할 수 있으므로 정비작업 주기 및 항목을 검토하여 정비계획을 수립하는 데 활용한다.

3. 급수공급계통 개요

원전에서 급수공급계통은 증기발생기로 급수를 공급하는 역할을 수행하며, 정상 시 운전되는 주급수계통과 주급수계통이 급수를 공급하지 못할 때 운전하게 되는 보조급수계통으로 구분된다. 정상운전 시 주급수계통은 급수승압펌프 및 주급수펌프를 운전하여 고압 급수가열기를 거쳐 요구되는 압력, 온도 및 유량으로

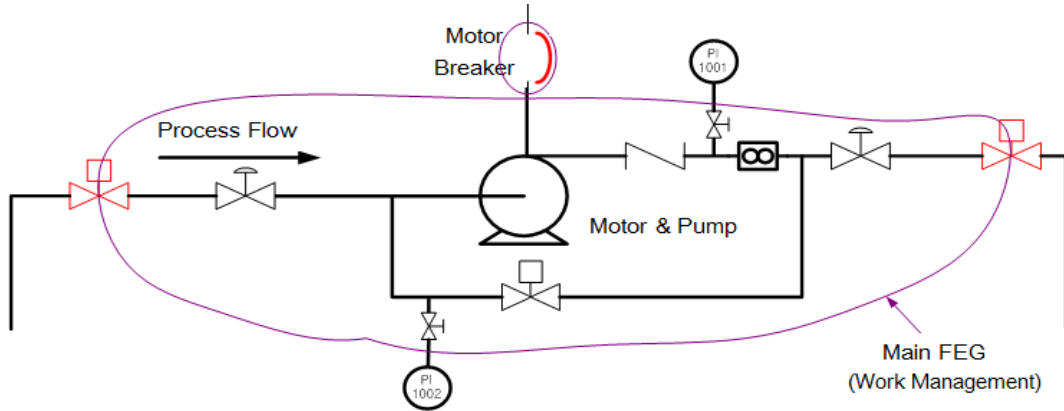


Fig. 4. Examples of functional equipment group

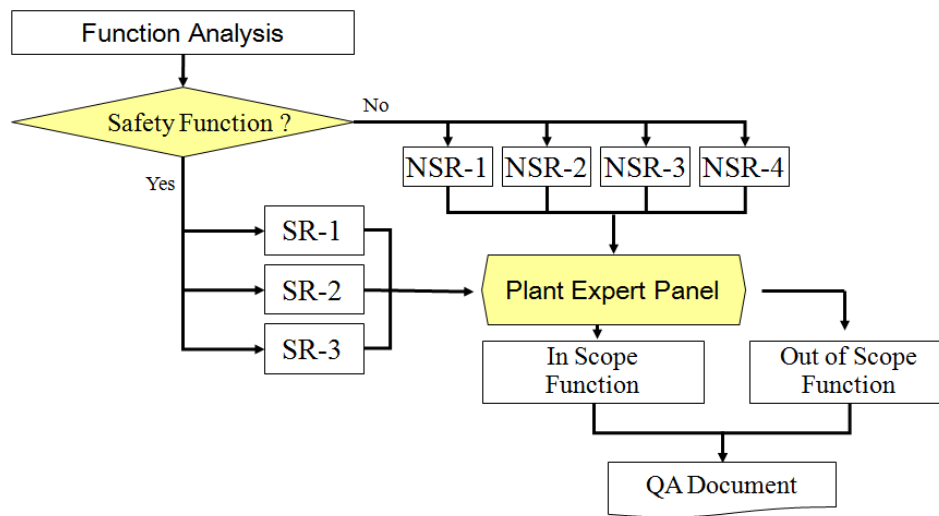


Fig. 5. Scope determination flow chart of the program

급수를 탈기기에서 증기발생기로 공급한다. 보조급수 계통은 주급수 상실사고 시 증기발생기에 적절한 냉각수를 공급하는 기능을 갖고 있으며, 다양하고 다중적인 유로로 구성되어 있어 정지냉각계통이 운전되는 온도 및 압력까지 발전소를 안전하게 냉각시킬 수 있도록 충분한 보조급수를 공급한다.

4. 급수공급계통 엔지니어링 프로그램 개발

4-1 정비규정 (MR)

4-1-1 기능분석 및 관리대상 선정

정비규정 프로그램은 10CFR50.65³⁾ 및 Reg. Guide 1.160⁴⁾에 따라 발전소를 기능단위로 감시하는 프로그램이며, 기능분석 및 관리대상 선정은 정비규정에서

감시할 대상 기능을 결정하는 것이다. 즉, 발전소에서 기기수준의 성능감시를 수행하는 것은 감시자로 하여금 고장발생 시 바라보는 시각을 협소하게 해당 기기뿐만 아니라 국한되도록 하는 반면 기능수준의 감시를 수행하게 되면 기능고장 시 해당 발전소에 미치는 영향을 포괄적으로 평가하도록 감시 시야를 넓혀줄 수 있다는 장점이 있다. Fig.5는 APR1400 급수공급계통 정비규정 프로그램의 기능분석 및 관리대상 범위 선정에 대한 흐름도이다. 계통 기능분석 단계에서는 APR1400형 원전의 안전성분석보고서, 운영기술지침서, 계통설명서, 설계문서 및 계통도를 참조하여 주급수계통 및 보조급수계통에 대한 기능을 분류하고, 각 기능별 고유 설계특성을 분석하였다.

기능분석 수행 후에는 NUMARC 93-01⁵⁾의 방법

Table 1. Examples of function analysis

Function ID	Function Description	SR			NSR			
		1	2	3	1	2	3	4
FW-01	Supplying main feedwater to steam generator	N	N	N	N	Y	N	Y
FW-03	Isolation of main feedwater (main feedwater isolation valve)	N	N	Y	N	N	N	N
FW-09	Water treatment by chemical injection	N	N	N	N	N	N	N
AF-01	Supplying auxiliary feedwater to steam generator	N	Y	Y	N	Y	N	N
AF-02	Isolation of steam generator	N	N	Y	N	Y	N	N

론을 이용하여 각 기능이 안전관련 기능, 안전관련 기능과 연관된 비안전관련 기능 또는 정비규정 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 최종안전분석보고서에 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. 정비규정 프로그램에서는 상기 안전관련 기능 및 비안전관련 기능을 관리대상 범위에 포함시키며, 발전소 전문가위원회에서 검토 후 APR1400 급수공급계통의 관리대상 범위를 최종 결정하였다.

Table 1은 APR1400 급수공급계통의 기능분석 사례를 보여주고 있다. 계통담당자들이 검토 및 보완 후 발전소 전문가위원회에서 최종 결정한 급수공급계통 정비규정 프로그램의 관리대상 선정 결과, 총 14개 기능 중에서 9개 기능이 정비규정 프로그램에서 관리할 대상으로 선정되었으며, 나머지 5개 기능은 비관리대상으로 결정되었다. 일반적으로 비관리대상 기능들은 원전의 안전성 및 신뢰성에 영향을 미치지 않는다.

4-1-2 안전중요도 결정

안전중요도 결정은 대상범위 선정 단계에서 정비규정 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 현장 분야별 전문가의 정성적인 델파이(Delphi) 평가 결과를 종합하여 발전소 전문가위원회에서 결정하였다. Fig.6은 정비규정 프로그램의 안전중요도 결정에 대한 흐름도이다. APR1400 급수공급계통 프로그램의 안전중요도 결정시는 OPR1000형 원전과 동일하거나 유사한 기능들에 대해서는 OPR1000형 모델 개발 경험⁶⁾을 참조하여 일관성이 유지될 수 있도록 하였다.

Table 2는 APR1400 급수공급계통의 안전중요도 결정 사례를 보여주고 있다. APR1400 급수공급계통 정비규정 프로그램의 관리대상 기능으로 선정된 9개의 기능들 중 PSA에 모델링된 기능은 8개, 모델링되지 않은 기능은 1개이며, PSA 모델링된 기능을 대상으로 PSA 중요도를 평가한 결과, 중요도 High는 1개, 중요도 Low는 7개로 나타났다. 델파이 평가는 급수공급계통 9개 기능 전체를 대상으로 수행하였으며, 중요도 High는 4개, 중요도 Low는 5개로 나타났다. 발전소 전문가위원회에서 PSA 및 델파이 평가 결과를 검토한 후 최종적으로 승인한 APR1400 급수공급계

Table 2. Examples of risk significance determination

Function ID	Function Description	Risk Significance		
		PSA	Delphi	Final
FW-01	Supplying main feedwater to steam generator	Low	Low	Low
FW-03	Isolation of main feedwater (main feedwater isolation valve)	Low	High	High
AF-01	Supplying auxiliary feedwater to steam generator	High	High	High
AF-02	Isolation of steam generator	Low	Low	Low

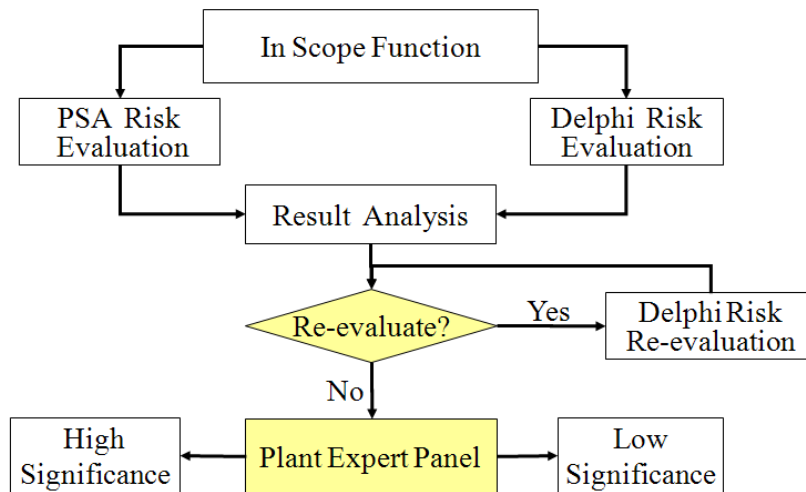


Fig. 6. Risk significance determination flow chart of the program

통의 안전중요도 결정 결과는 총 9개의 기능 중 중요도 High는 4개, 중요도 Low는 5개 기능이다.

4-1-3 성능기준 수립

정비규정 프로그램의 관리대상 기능들에 대한 안전중요도가 결정되면 해당 기능들에 대한 성능감시를 위하여 성능기준을 수립하여야 한다. 성능기준은 NUMARC 93-01에서 제시한 방법론에 따라 안전중요도와 운전형태를 고려하여 신뢰도성능기준(RPC), 이용도성능기준(APC), 상태감시성능기준(CMC) 또는 호기수준성능기준(ULPC)을 수립하였다. 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.7의 흐름도에서 보는 바와 같이 안전중요도가 High인 경우에는 신뢰도성능기준(RPC) 및 이용도성능기준(APC), 중요도가 Low이면서 대기상태를 유지하는 경우는 신뢰도성능기준(RPC)을 수립하였다. 안전중요도가 Low이면서 상시운전되는 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.

Table 3은 APR1400 급수공급계통의 성능기준 수립 사례를 보여주고 있다. 급수공급계통 관리대상 기능으로 선정된 9개 기능들의 상호 연계성 분석 후 RPC와 APC를 함께 적용하는 총 5개의 성능기준을

Table 3. Examples of performance criteria establishment

PCID	Performance Criteria Description	Risk Significance	Level	Performance Criteria
FW02	Supplying main feedwater to steam generator during startup	High	System	RPC : 1 APC : 7 days
FW03	Isolation of main feedwater (main feedwater isolation valve)	High	System	RPC : 1 APC : 3 days
AF01	Supplying auxiliary feedwater to steam generator by pump	High	Train	RPC : 1 APC : 3 days

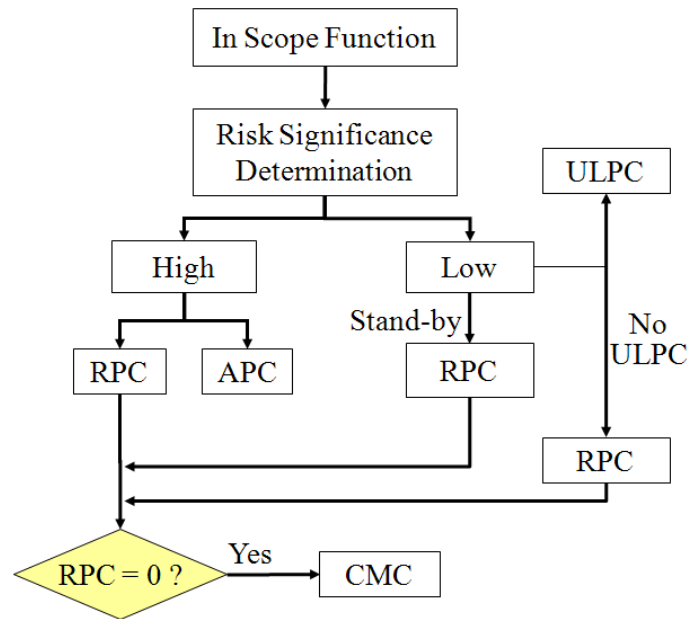


Fig. 7. Performance criteria establishment flow chart of the program

수립하였으며, 최종적으로 발전소 전문가위원회에서 검토 후 승인하였다. 아울러 향후 APR1400형 신규원전에서 정비규정 프로그램 이행 시 고장통지 및 오더를 이용하여 초기 성능평가를 수행함으로써 APR1400 급수공급계통 프로그램의 적합성을 입증할 것이다.

4-1-4 정비효과감시 수행

정비규정 프로그램을 이행 중인 기존 가동중 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 수행함

로써 안전/비안전관련 설비의 신뢰도를 높이고 있다. APR1400 급수공급계통의 경우에도 개발된 프로그램에 따라 향후 상업운전 초기 성능평가를 거쳐 정비규정 성능기준의 적합성이 입증되면 발전소에 적용하여 대상 설비들에 대한 성능감시를 수행함으로써 관련 설비들의 신뢰도를 제고시킬 수 있을 것이다.

4-2 기능적중요도결정 (FID)

4-2-1 FID 수행 방법

원전에서 설비관리에 대한 우선순위 결정 및 효율적인 예방정비 시행을 위해서는 각 설비들에 대한 기능적중요도결정을 수행하여야 하며, 각 설비에 대한 기능적중요도결정은 설비신뢰도 프로세스 이행의 가장

Table 4. Examples of functional importance determination criteria

CODE	Criteria Description	Criteria
C-3a	Reactor trip	Critical A
C-3b	Reactor or turbine partial trip	Critical B
M-1	Redundant equipment of main or important system	Minor
M-2	Effecting functional failure of critical equipment	Minor

Table 5. FID results of APR1400 feedwater supplying system

System	Importance				Duty cycle		Service condition	
	Critical A	Critical B	Minor	No Impact	High	Low	Severe	Mild
Main feedwater	48	90	327	928	370	95	95	370
Auxiliary feedwater	42	20	138	312	140	60	38	162
Total	90	110	465	1,240	510	155	133	532

기본적인 출발점이다. 국내 원전에서는 정비규정 프로그램을 도입한 이후부터 기능적중요도결정 시 정비규정 기능분석 및 안전중요도 결정 결과를 활용하여 중요도 분류의 일관성 및 신뢰성을 높이고 있다.

일반적으로 기능적중요도결정은 발전소 설비기준정보(Equipment Master)에 등록된 모든 설비들에 대해 중요도, 운전빈도 및 운전환경을 결정하는 것이며, 중요도 등급은 Critical A, Critical B, Minor 및 No Impact 등 4가지 등급으로 구분된다⁷⁾. 여기서 Critical A 및 Critical B 등급은 설비의 고장이 원자로 안전 및 발전소 운전과 밀접한 관련이 있는 경우이며, Minor 등급은 설비가 Critical에 포함되지 않고, 중대한 계통 기능의 손실로 이어지는 않으나, 발전소 안전성, 신뢰성 및 산업안전 등에 간접적인 영향을 주거나, 비용·효과적인 측면에서 예방정비를 수행하여 관리할 가치가 있는 설비를 말한다. No Impact 등급은 Critical A/B 또는 Minor로 분류되지 않은 설비로서 발전소

안전성, 출력운전 및 경제성에 영향을 미치지 않는 설비들을 말하며, No Impact로 분류된 설비는 통상 RTF(Run-to-Failure) 설비로 분류되어 발전소 운영 시 별도의 예방정비를 수행하지 않고 고장발생 시 고장정비 작업만을 수행하게 된다. 운전빈도(Duty Cycle)는 각 설비가 운전되는 횟수를 말하며, 허용된 기준치를 초과한 경우에는 High, 기준치에 비해 낮은 경우에는 Low로 분류한다. 운전환경(Service Condition)은 각 설비가 설치되어 운전되고 있는 조건 또는 주변환경을 말하며, 설비 주위의 온도, 습도, 부식영향, 방사능 및 진동 등에 따라 Severe 또는 Mild로 분류하게 된다. Table 4는 현재 국내 원전에서 활용하고 있는 Critical(14개) 및 Minor(10개) 분류기준의 일부 사례를 보여주고 있다.

4-2-2 FID 수행 결과

APR1400 급수공급계통의 14개 정비규정 기능에

대한 기능분석 결과를 기반으로 각 기능별 대상 설비를 분류한 후 정비규정 안전중요도 결정 결과, Critical 및 Minor 분류기준을 활용하여 각 설비에 대한 기능적중요도를 결정하고, 운전빈도 및 운전환경을 정하였다. 참조로 Table 2의 FW-03(주급수 격리) 기능에 해당되는 설비는 주급수격리밸브 및 주급수격리밸브 후단 역지밸브이며, 정비규정 고안전중요도, Critical 설비 분류기준(고장 시 발전정지 또는 필수안전기능 제어 불능)에 따라 두개의 설비 모두 Critical A로 분류하였다. 중요도 분류 후에는 두 밸브의 운전횟수가 적고, 지속적으로 유체가 유동되어 부식우려가 있다는 점을 고려하여 운전빈도 High 및 운전환경 Severe로 정하였다. Table 5는 APR1400형 원전 A호기 급수공급계통의 기능적중요도결정 현황을 보여주고 있다. 급수공급계통 설비들에 대한 기능적중요도결정 결과는 향후 신규원전의 예방정비 프로그램 개발 시 예방정비 직무별 정비주기를 결정하는데 이용되며, 발전소 운전 및 정비 시에 중요 의사결정 및 우선순위 고려 시에 활용하게 될 것이다.

4-3 발전정지유발기기 (SPV)

4-3-1 SPV 선정 방법

국내 원전에서는 설비고장 등이 원인이 되어 발생하는 발전정지 횟수를 최소화하기 위하여 각 발전소 별로 발전정지유발기기를 선정하여 관리하고 있다. 발전정지유발기기 선정을 위해서는 우선적으로 대상계통에 대해 친숙하기 위하여 기능 및 주요기기를 검토하고, 그 결과를 기반으로 신뢰도블럭선도(RBD)를 작성한다. 신뢰도블럭선도 작성 후에는 해당 계통의 구성요소에 대한 고장모드를 식별하고 이러한 고장모드 발생 시 그 결과를 평가하는 고장모드영향분석(FMEA)을 수행하며, 분석결과에 따라 설비들을 TC-1,2,3 및 NC 등으로 분류한다. TC-1이란 단일설비 기능상실 시 원자로/발전정지 또는 50% 이상 출력감발이 발생하는 설비로써 발전정지유발기기를 의미한다. TC-2는

잠재적 발전정지유발기기로서 단일설비 기능상실 시 50% 미만 출력감발, 2개설비 기능상실 시 원자로/발전정지 또는 50% 이상 출력감발을 유발하는 설비이며, TC-3는 2개설비 기능상실 시 50% 미만 출력감발, 3개 이상의 설비 기능상실 시 원자로/발전정지 또는 50% 이상 출력감발을 유발하는 설비를 말한다. NC (Non Criticality)는 대상 설비의 기능실패가 발전정지 또는 출력감발과 관련이 없는 설비이다. 고장모드영향 분석 완료 후에는 고장수목분석(FTA)을 수행하여 발전정지에 미치는 영향을 정량화하며, 대상 계통의 기능이 상실되는 상태를 기술하고, 계통의 운전 조건을 고려하여 이용불능상태를 발생 시킬 수 있는 모든 가능한 고장을 논리적으로 밝혀내게 된다. 여기에서 고장이란 기계적 고장, 인적 오류, 오동작 등과 같이 계통 이용불능을 초래하는 모든 사건을 의미한다. 고장모드영향분석 및 고장수목분석에 따라 발전정지유발기기 결정되면 발전정지 유발 가능성 최소화를 위해 해당 기기들에 대한 신뢰도 제고 방안을 수립, 이행하여야 한다.

4-3-2 SPV 선정 결과

APR1400 급수공급계통 정비규정 기능분석 결과에 대한 검토 결과, 보조급수계통에서는 발전정지와 관련된 NSR-4에 해당되는 기능이 없었으며, 주급수계통에서 NSR-4에 해당되는 기능들이 도출되었다. 따라서 정비규정 기능분석 결과를 이용하여 주급수계통의 기능 및 주요설비를 파악하고 Fig.8과 같이 신뢰도블럭선도(RBD)를 작성하였다.

Table 6은 APR1400형 원전 A호기 급수공급계통 설비들에 대한 고장모드영향분석 사례를 보여주고 있고, Table 7은 고장수목분석 사례이다. 최종적으로 급수공급계통에서는 발전정지유발기기(TC-1) 14개, 잠재적 발전정지유발기기(TC-2) 154개 및 TC-3 241개 설비가 도출⁸⁾되었으며, 향후 APR1400 신규원전에서는 발전정지유발기기 14개 설비에 대해 설계변경, 설

Table 6. Examples of failure mode effect analysis

Functional Location	Failure Mode	Effects & Results
2***-541-V1112	Fail close	Reactor trip (SG level control failure)
2***-541-V0105	Fail close	Reactor trip (feedwater supplying failure)

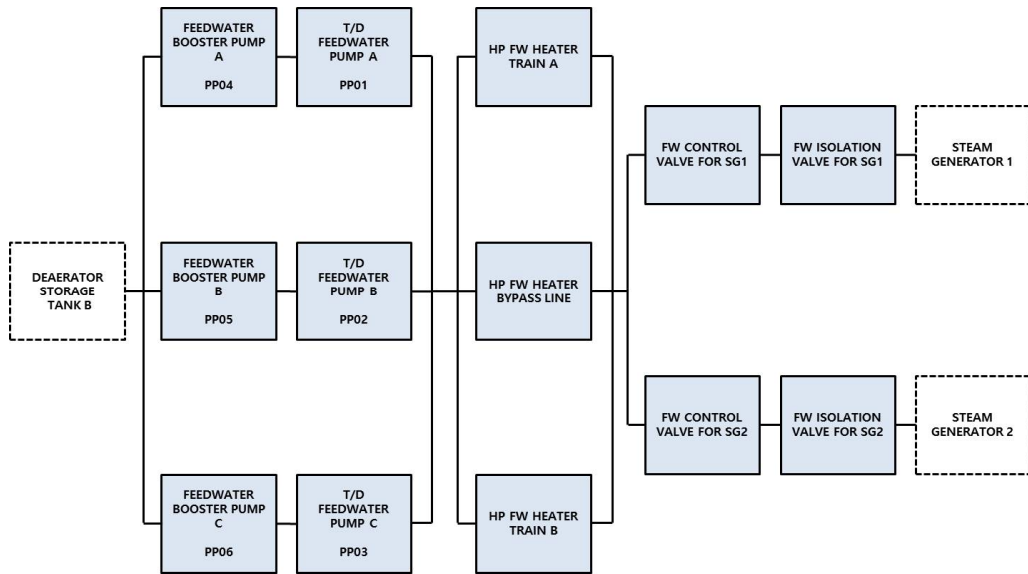


Fig. 8. Reliability block diagram of main feedwater system

Table 7. Examples of fault tree analysis

Functional Location	Basic Event	Basic Event Description
2***-541-V1112	FWEVIA-1112	SG1 Economizer FW control valve (POV) 1112 spurious closure
2***-541-V0105	FWMVIA-0105	SG1 Economizer isolation MTR valve 0105 spurious closure

비개선, 예방정비 및 성능감시 측면에서 개선을 수행함으로써 발전정지 유발 가능성을 줄일 것이다.

4-4 기능적설비그룹 (FEG)

4-4-1 FEG 수행 방법

기능적설비그룹은 발전소 운영 시 정비활동 및 자원 최적화의 효율성을 높이기 위하여 같은 기능을 수행하는 설비들을 논리적으로 그룹화 한 것이며, 운전 중에 격리할 수 있는 최대의 범위에 속한 설비들을 대상 그룹의 범주로 정한다. 국내 원전에서는 시범수행이 가능한 안전관련 계통을 대상으로 기능적설비그룹 개발 대상을 정하였다. 기능적설비그룹 개발을 위해서는 우선적으로 정비규정 기능분석 결과를 이용하여 해당 계통의 기능들을 정의하고, 각 기능별 대표설비들을 확인하여야 하며, 대표설비를 중심으로 기능경계도를 작성하였다. 기능경계도 작성 후에는 해당 그룹 범위 내의 설비들을 목록화한 후 해당 그룹 운전불능시 나타날 리스크를 평가하여 기능적설비그룹 활용 가능여부를 검토하였다.

4-4-2 FEG 수행 결과

APR1400 급수공급계통 중에서는 주급수계통보다는 안전성 관련 보조급수계통이 발전소 운영기술지침서 운전제한조건의 영향을 받으므로 기능적설비그룹 개발 대상으로 결정되었다. 우선적으로 정비규정 기능분석 결과를 활용하여 보조급수계통의 AF-01(주급수 상실 시 증기발생기에 보조급수 공급), AF-02(손상된 증기발생기 격리), AF-03(발전소 기동 시 증기발생기에 보조급수 공급) 및 AF-04(증기발생기 수질 유지를 위한 화학약품 주입) 등 4개의 기능과 각 기능별 주요 설비를 검토하였다. 보조급수계통에 대한 기능검토 후에는 Fig.9의 사례에서 보는 바와 같이 기능적설비그룹(FEG) A의 경계도 및 세부 구성설비 목록을 작성하였다. 보조급수계통에 대한 기능적설비그룹은 총 8개이며, 확률론적안전성평가(PSA)에 모델링 되어 있는 그룹을 대상으로 실질적인 정비의 가능여부를 검토하기 위한 리스크 평가를 수행하였다. 그 결과 총 3개의 그룹에서 리스크가 크게 증가하여 향후 기능적설비그룹 활용 시 리스크평가 결과를 고려하여야 정비계획 반영여부를 결정하여야 한다.

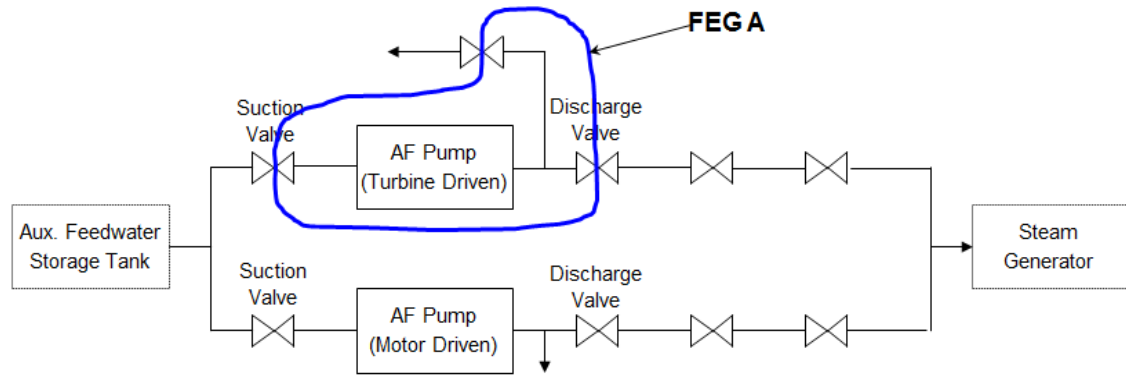


Fig. 9. Examples of functional equipment group

5. 결론

본 논문에서는 APR1400형 신규원전의 선진 엔지니어링 체계 정착을 위하여 수행한 급수공급계통의 엔지니어링 프로그램 개발 관련 프로세스를 제시하였으며, 주요 특성은 아래와 같다.

첫째, APR1400 급수공급계통의 고유 설계특성을 반영하여 관리대상 선정, 안전중요도 결정 및 성능기준 수립 등 정비규정 프로그램을 개발하였다.

둘째, 정비규정 프로그램의 기능분석 및 안전중요도 결정 결과를 활용하여 각 설비의 중요도, 운전빈도 및 운전환경 분류 시 기능특성에 따라 설비 중요도를 일관성 있게 결정하였다.

셋째, 발전정지 횟수 최소화를 위한 발전정지유발기 선정 시 신뢰도블럭선도(RBD) 작성, 고장모드영향분석(FMEA) 및 고장수목분석(FTA) 등 체계적인 접근을 통해 신뢰도를 제고시켰으며, 향후 대상 설비들에 대한 신뢰도개선방안을 수립, 이행할 것이다.

넷째, 정비활동의 효율성 제고를 위해 주요 안전관련계통들에 대한 기능적설비그룹을 개발하였고, 리스크평가를 통해 활용 가능성을 검토하였다.

결과적으로 APR1400형 신규원전은 향후 상기와 같은 엔지니어링 프로그램들의 조기 정착 및 최적화된 이행을 통해 급수공급계통의 안전성 및 신뢰성이 향상될 것으로 기대된다.

References

1. KHNP, December 2016, "Development of Maintenance Process for APR1400", Final Report
2. Yeom, D. U, Hyun, J. W, Song, T. Y, June 2014, "Development of Maintenance Effectiveness Monitoring Program for APR1400 Safety Related Systems, pp 191~198
3. Nuclear Regulatory Commission, July 1991, "Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants", 10CFR50.65, pp 1~2
4. Nuclear Regulatory Commission, June 1993, "Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants", Regulatory Guide 1.160, pp 1~11
5. 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
6. KHNP, July 2009, "Development of the Maintenance Rule Implementation Programs for OPR1000 Nuclear Power Plants", Final Report
7. KHNP, May 2016, "Functional Importance Determination", Procedure
8. KHNP, December 2016, "Development of SPV & SPV Monitor for APR1400", Final Report