원자력발전소 주제어실 다중 경보 패턴에 의한 경보/비정상 대응 체계 개발

최선영* · 정원대

한국원자력연구원 종합안전평가부
(2014. 2 5 접수 / 2014. 6. 12 채택)

Development of Plant Abnormal Status Response System by Multi-Alarm Pattern in Main Control Room

Sun Yeong Choi* · Wondea Jung

Integrated Safety Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute
(Received February 5, 2014 / Accepted June 12, 2014)

Abstract : The number of abnormal operation procedures (AOPs) for mitigating a plant abnormal status amounts to about one hundreds for the most of 1000MWe optimized power plant (OPR1000) and it is expected that the number of AOPs would be increased to cope with an abnormal status occurred newly. However, it is not well organized for operators to select a proper AOP from alarms occurred in main control room (MCR) during a plant abnormal status. It may be a burden to operators since the selection of AOP to respond an abnormal status is authorized by operators. When multiple alarms occur in MCR, it would take more time to respond them than a single alarm. To reduce the efforts, various MCR operation support systems have been developed. The purpose of this study was to develop a multi-alarm pattern card to select an appropriate AOP effectively when multiple alarms occurs in a single upper layout (UL) of MCR. It can be applied for an operation support tool as well as an education tool.

Key Words : main control room alarm, abnormal operation procedure, multi-alarm pattern card

1. 서론

국내 원전에서 2002년부터 2006년 사이에 발생된 99건의 불시정지 사건에 대한 분석 결과에 따르면, 이 중 22건(22%)이 운전조치와 관련되어 발생한 것으로 조사되었다¹⁾. 또한 1986년부터 2006년까지의 불시정지 건수 가운데 비정상 상황 발생 후 2차측 계통 제어와 관련하여 운전조치 미흡으로 인해 불시정지가 발생된 36건 중 10건(28%)은 적절한 대응조치가 있었다면 불시정지 예방이 가능했던 것으로 분석되었다²⁾.

하지만 현재 원전의 비정상 상황 발생 시, 운전원이 해당 비정상절차서(AOP, Abnormal Operation Procedure)를 찾아서 대응하는 과정이 체계화되어 있지 못하고 운전원에게 일임되어 있다. 따라서 운전경험이 충분하지 않은 운전원의 경우, 다중경보 발생 시 관련 비정상절차서와 세부 원인을 찾아가는 작업이 부담이 될 수 있다.

이와 같은 부담을 줄이기 위한 노력의 일환으로 월성 원전의 경우, 발전소 출력감발 발생 시 폭주하는 경보를 논리적으로 분석하여 주 원인 정보 외 부수적인 정보의 표시를 일시적으로 억제/제거하여 출력감발 원인을 신속히 추적할 수 있도록 지원하는 ‘경보원인 추적 시스템’이 개발되었으나 관련 비정상절차서 선정을 지원하는 툴이라기보다는 다중 경보로부터 주요 경보를 선정해주는 도구이다³⁾.

한편, 원전의 운전원 수와 운전원의 경력은 지속적으로 감소하여, 비정상 상황에 대한 대응 능력이 충분하지 못하다는 우려가 있다. 또한 새로운 운전경험의 반영과 설비노후화에 따라 과도상태 발생 유형의 다양화로 인하여 비정상절차서가 증가하고 있다. 2011년 10월 기준, OPR1000(Optimized Power Plant) 원전의 경우, 각 발전소 별로 비정상절차서 수가 100여개로 증가하여 운전원의 부담이 증가되었을 것으로 예상된다. 따라서 과도상황으

* Corresponding Author : Sun Yeong Choi, Tel : +82-42-868-8372, E-mail : sychoi@kaeri.re.kr

Integrated Safety Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111, Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea

로 인한 불시정지를 예방하기 위해서는 운전원의 비정상 대응 능력의 제고가 필수적이며, 이를 위하여 체계적인 비정상 대응 절차의 개발이 필요하다.

이와 같은 필요성에 의해 OPR1000 원전에 대해 정보/비정상 유발인자 분석을 수행하고 이를 기반으로 플로차트를 이용한 정보/비정상 대응체계가 개발되었으며 또한 난이도, 중요도, 빈도를 이용한 비정상절차서 우선순위 분석을 수행하였다^{4,5)}.

본 논문의 목적은 다중경보 패턴이 단순한 경우, 플로차트 등의 지원시스템 툴을 사용하지 않고 보다 직관적으로 운전원이 적절한 비정상절차서를 선정할 수 있도록 발생한 경보의 패턴으로부터 비정상절차서를 찾아가는 정보/비정상 대응체계 개발 내용을 기술하기 위함이다.

2. MCR 경보창 배열 특성

주제어실(MCR, Main Control Room) 경보창(alarm window)은 공기조화설비 제어반, 보조냉각설비 제어반, 안전설비 제어반 등 대분류의 제어반 패널로 구성되어 있고, 각 제어반에서는 계통 혹은 기능별에 따라 UL(Upper Layout)로 구분하여 정보를 분류하고 있다.

OPR1000 원전의 경우, 모든 UL의 경보창은 5행(row)으로 구성되어 있으며 4열(column)부터 12열로 구성되어 있다. 따라서 UL별로 타일 형태의 경보창 수는 20개부터 60개까지 구성될 수 있으나 모든 타일에 경보가 설치되어 있는 것은 아니다. 각각의 UL은 계통 혹은 기기의 기능에 따라 세부그룹으로 나뉘어져 있다.

Fig. 1은 임의의 OPR1000 원전의 MCR내 제어반 패널과 패널별 UL 구성 현황을 보여주고 있다. Fig. 1에서 12개의 제어반 패널 상단에 숫자가 입력되어 있는 상자가 UL을 의미한다. Fig. 2는 Fig. 1의 화학 및 체적 제어설비(CVCS, Chemical & Volume Control System) 제어반 중 UL-10의 네 개로 나뉘어져 있는 세부그룹 구성 현황과 경보창 현황을 보여주고 있다.

Fig. 1. Upper Layout Configuration in MCR of an OPR1000

Fig. 2. Alarm Configuration of UL-10 in MCR of an OPR1000

3. 정보/비정상 유발인자 분석

OPR1000 원전의 정보절차서는 UL별로 절차서 번호를 구분하고 있으며 예를 들어, UL-01의 정보 관련 정보절차서 번호는 '정보-3001'이 된다. 정보절차서에는 각각의 UL에 배치된 정보에 대해서 정보위치, 발생원, 설정치, 정보의 원인, 자동동작, 후속조치사항 및 참조 등이 기술되어 있다. 따라서 MCR에서 단일경보가 발생하면 정보가 발생된 UL 번호와 일치하는 정보절차서 번호를 찾은 후 다시 정보창의 행과 열을 찾아 해당 정보절차서를 선택하고 필요한 조치를 수행하면 된다.

한편 비정상절차서는 절차서 목적과 정보 및 증상, 자동동작사항, 긴급조치사항, 후속조치사항 등으로 구성되어 있다. 특히 정보 및 증상 부분에서는 세부 원인별로 다시 관련 정보와 감시변수에 대한 설명이 제공되고 있어서 한 개의 비정상절차서에는 세부원인별로 다중 정보가 제공되는 경우가 존재한다. 이와 같은 경우에는 세부원인별로 발생하는 정보 및 조치사항 등이 달라질 수 있으며 비정상절차서에는 이에 대해 자세히 기술되어 있다.

본 장에서는 비정상 상황 유발인자 구분을 통해 정보와 비정상절차서간의 연관관계를 파악하려는 목적에 따라 OPR1000 원전 중 참조발전소를 정하여 MCR 내의 정보절차서와 비정상절차서에 기술된 정보를 정리하였다. 다음은 정보절차서 및 비정상절차서 정리와 관련한 항목에 대하여 기술하고 있다.

● 정보절차서 분석

- 호기: 분석대상 호기
- 절차서 번호: 정보절차서 번호
- 절차서 제목: 정보절차서 제목
- 정보명: 해당 정보타일에 기술된 정보 명칭
- 정보위치: 각 정보가 위치한 제어반 패널 번호 (PM01), UL 번호(UL-01) 및 정보타일의 행과 열의

조합(1A)으로 독립된 구분자(예. PM01-UL-01-1A)

– 원인: 경보 작동 원인

● 비정상절차서 분석

- 호기: 대상 호기
- 절차서 번호: 비정상절차서 번호
- 절차서 제목: 비정상절차서 제목
- 세부 원인: 비정상 상황별로 한 개 이상의 세부 원인이 기술되어 있으며 각 세부원인 입력
- 판넬 번호: 제어반 판넬 번호(예. PM05)
- 판넬명: 제어반 판넬 명칭
- 경보구분자: 세부원인별 관련 경보의 UL 번호 및 행과 열(예. UL-11-4C)
- UL 세부그룹: 관련 경보가 위치하고 있는 UL 세부그룹명
- 경보명: 해당 경보타일에 기술된 경보 명칭
- 감시변수명: 세부원인별 관련 감시변수명
- 감시변수 증상: 비정상시 발생하는 해당 감시 변수의 증상

Table 1과 2는 참조발전소의 비정상절차서 유발인자 분석 결과를 각각 MCR 경보와 비정상절차서 관점에서 상세 분류한 예를 보여준다. 먼저 Table 1은 공기조화설비제어반 UL-01, UL-02, UL-03에 있는 경보 중 비정상절차서에 기술되어 있는 경보에 대해 정리한 것이다. 참조발전소의 UL-01, UL-02, UL-03 관련 경보절차서(‘경보-3001’, ‘경보-3002’, ‘경보-3003’)에 기술되어 있는 경보는 각각 46, 44, 36개로 구성되어 있지만 실

Table 1. AOPs Related with Alarms of PM01 in a Reference Plant

UL	UL Group	Alarm ID	Alarm Title	# of Related AOP	AOP
UL-01	Auxiliary BLDG HVAC/ Plant Chilled Water	UL-01-5E	WI SYSTEM TRBL/DIS	2	AOP-3632 AOP-3841A
		UL-01-5F	WI SYSTEM LCP TROUBLE	1	AOP-3632
UL-02	ECCS EQUIP. Room HVAC	UL-02-1A	WO SYSTEM TRBL/DIS	1	AOP-3626
		UL-02-2A	WO SYSTEM CHLR 01A/02A TROUBLE	1	AOP-3626
		UL-02-3A	WO SYSTEM CHLR 01B/02B TROUBLE	1	AOP-3626
		UL-02-4B	FP SYSTEM COMMON TROUBLE	3	AOP-3691A AOP-3691B AOP-3691C
	MISC	UL-02-4J	VT SYSTEM CUB RM TEMP HI-HI	1	AOP-3632

Table 2. Alarms for PZR Safety VLV Leak of AOP-3431A

Sub-reason	PM	PM Title	UL Sub-group	Alarm	Alarm Title
PZR Safety VLV Leakage	PM 04	CVCS	CVCS - DRAIN TANK	UL-09-1B	RDT PRESS HI
				UL-09-3B	RDT LEVEL HI
				UL-09-4B	RDT TEMP HI
	PM05	RCS	RCS - PZR	UL-11-1D	SAFETY VLV 200 LEAK HI
				UL-11-2B	PRESS LOS
				UL-11-2D	SAFETY VLV 201 LEAK HI
				UL-11-3D	SAFETY VLV 202 LEAK HI
				UL-11-4D	SAFETY VLV OTLT TEMP HI

제 비정상절차서에 기술되어있는 경보는 UL-01에 2개 (01-5E, 5F)와 UL-02에 5개 (02-1A, 2A, 3A, 4B, 4J)임을 알 수 있다. 참조발전소의 경우, UL-03은 비정상절차서에 언급된 경보가 없다. 한편 앞에서 열거한 7개의 경보는 각각 서로 다른 개수의 비정상절차서와 관련되어 있음을 알 수 있으며 주로 제어반 명칭 및 UL 세부 그룹의 명칭과 관련되어 있는 냉방수 상실이나 화재와 관련된 비정상 상황에 대응하기 위한 절차서이다.

Table 2는 비정상절차서별 경보 현황을 분석한 예로, 참조발전소의 격납건물(CV, Containment Vessel) 내부 원자로 냉각재 계통(RCS, Reactor Coolant System) 누설과 관련된 비정상-3431A에서 가압기(PZR, Pressurizer) 안전밸브 누설 원인으로 RCS 누설이 발생한 경우에 해당되는 경보들이다. 이와 같은 비정상 상황에서는 주로 UL-09의 ‘CVCS-DRAIN TANK’ 그룹에서 Reactor Drain Tank(RDT) 압력, 수위, 온도 등의 경보와 UL-11의 ‘RCS-PZR’ 그룹의 안전밸브 누수 등의 경보들이 관련되어 있음을 알 수 있다.

4. 다중경보 패턴에 의한 경보/비정상 대응체계 개발

본 장에서는 앞에서 기술한 경보 및 비정상절차서 연관관계 분석 결과를 이용하여 다중경보가 단일 UL에서만 발생하는 비정상 사건에 대해 경보 배열 특성으로부터 바로 비정상절차서를 선정하는 경보/비정상 대응체계 개발 방안에 대해 기술하고 있다.

4.1. 다중경보 패턴 분석

앞장에서는 비정상절차서별 유발인자 분석을 통해 비정상절차서별로 어떤 경보가 관련되어 있는지에 대한 현황과 각 경보별로 어떤 비정상절차서가 관련되어

있는지를 분석하였다. 이를 통하여 경고와 비정상절차서는 Fig. 3과 같이 서로 다양한 망조직을 형성하며 연결되어 있음을 알았다. 예를 들어 참조발전소 원자로 냉각설비제어반(PM05)의 UL-12-II 경보는 노심운전제한치 감시계통 관련 정보인 ‘COLSS(Core Operating Limit Supervisory System) ALARM’으로, 9개의 비정상절차서와 연결되어 있고, 각각의 비정상절차서는 다시 다양한 정보와 연결되어 있다. Fig. 3에서 직사각형과

타원은 각각 경고와 비정상절차서를 의미한다. 테두리가 실선으로 표현된 정보 (혹은 비정상절차서)는 관련 비정상절차서 (혹은 경고)가 모두 Fig. 3에서 기술되어 있음을 의미한다. 예를 들어 Fig. 3 우측 하단의 AOP-3731C 절차서는 4개의 정보(‘INADVERTANT BORON DILUTION’, ‘START UP NEUTRON FLUX HI’, ‘START UP CONTROL CH TROUBLE’, ‘LPMS DETECT’)가 관련되어 있고 Fig. 3에 관련 정보가 모두

Fig. 3. Example of Relation between Alarms and AOPs (COLSS ALARM)

TBN BLDG CLG WTR (WH/WT)		HEATER DRAIN (HD)							EXT STM (ES)	TBN LUBE OIL(TO)	
		MSR		HP FW HEATER		LP FW HEATER					
1	TBCCW PUMP DSCH PRESS LO	MSR A LEVEL HI	MSR B LEVEL HI	▲7A LEVEL HI-HI	▲7B LEVEL HI-HI	◆3A LEVEL LO/HI/HI-HI	◆3B LEVEL LO/HI/HI-HI	◆3C LEVEL LO/HI/HI-HI	*HP FW HTR 7A/B DRN POT LVL HI-HI	TBN BRG OIL HDR PRESS LO	LIFT PUMP DSCH PRESS LO
2	TBOCW PUMP DSCH PRESS LO	MSR DRN TK A LEVEL HI	MSR DRN TK B LEVEL HI	▲7A LEVEL HI/LO	▲7B LEVEL HI/LO	◆2A LEVEL LO/HI/HI-HI	◆2B LEVEL LO/HI/HI-HI	◆2C LEVEL LO/HI/HI-HI	HP FW HTR 6A/B DRN POT LVL HI-HI	EBOP MOTOR OVER LOAD/ TEMP HI	LIFT PUMP MOTOR CIRCUIT NOT ARMED
3	TBOCW PUMP VIBRATION HI	MSR DRN TK A LEVEL LO	MSR DRN TK B LEVEL LO	▲6A LEVEL LO/HI/HI-HI	▲6B LEVEL LO/HI/HI-HI	◆1A LEVEL LO/HI/HI-HI	◆1B LEVEL LO/HI/HI-HI	◆1C LEVEL LO/HI/HI-HI	HP FW HTR 5A/B DRN POT LVL HI-HI	LIFT PUMP MOTOR TEMP HI	VAPOUR EXTRR STOP/TRBL
4	TBOCW PUMP STRN/CLR DP HI	1ST STG RH DRN TK A LVL HI/LO	1ST STG RH DRN TK B LVL HI/LO	▲5A LEVEL LO/HI/HI-HI	▲5B LEVEL LO/HI/HI-HI				LP TBN TO DEAER DRN POT LVL HI-HI	EBOP RUNNING	*TBN GEAR OIL PUMP MOTOR TROUBLE
5	WH SYSTEM TRBL/DIS	2ND STG RH DRN TK A LVL HI/LO	2ND STG RH DRN TK B LVL HI/LO	EMGR DRN VALVE OPEN	SYSTEM TRBL/DIS		ES SYSTEM DRN VLV NOT IN AUTO	ES SYSTEM TRBL/DIS	LP TBN TO LP FW DRN POT LVL HI-HI	EBOP DC POWER FAIL/LO	*SYSTEM TRBL/DIS
A B		C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
AOP-3562 (Loss of TBCCW)		AOP-3552A (MSR Drain Tank Level High)		AOP-3552B (HP HTR Level High)		AOP-3552C (LP HTR Level High)		AOP-3514 (Abnormal Turbine Lube Oil System)			

Fig. 4. Alarm Configuration of UL-21 and Related AOPs

기술되어 있음을 의미한다. 한편 점선으로 표시된 비정상절차서 (혹은 경보)는 관련 경보 (혹은 비정상절차서)가 일부만 Fig. 3에 보이고 있음을 의미한다.

발생한 비정상 사건에 대해서 관련 다중 경보가 다수의 제어반 판넬과 UL에 분포되어 발생한다면 MCR 운전원은 적절한 비정상절차서를 선정하기 위해 상대적으로 많은 인지적 노력이 요구되겠지만 만약 관련 경보가 모두 단일 UL에서 발생하면 운전원은 경보패턴 및 해당 UL의 세부그룹 제목으로부터 보다 용이하게 관련 비정상절차서를 선정할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

예를 들어 Fig. 4와 같이 참조발전소 MCR내 터빈설비 제어반(PM09)의 UL-21은 6개의 세부그룹에 총 55개의 경보가 있으며 하단에 기술한 5개의 비정상절차서에서 언급된 총 26개의 경보가 모두 UL-21에 존재함을 알 수 있다. 각 절차서와 관련된 경보는 비정상절차서 제목과 관련한 UL의 세부그룹에 편중되어 있어서 운전원은 다중경보 패턴과 관련 UL 세부 그룹 명칭으로부터 어렵지 않게 관련 비정상절차서를 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2. 경보/비정상 대응체계 개발을 위한 다중경보패턴카드 제안

앞 절에서는 비정상절차서의 다중경보가 단일 UL에서만 발생하는 경우에는 직관적으로 비정상절차서 선정이 가능하다는 관점을 서술하였다. 앞 절의 Fig. 4에서 기술된 비정상절차서는 모두 원인이 한 개인 절차서만 기술되어 있으나 서론에서 언급한 바와 같이, 일부 비정상절차서는 관련 경보가 세부원인별로 분류되어 있으며 세부원인별로 경보패턴이 변한다. 참조발전소의 경우, 101개의 비정상절차서 중에서 36개 절차서가 세부 원인별로 경보가 기술되어 있다. Table. 3은 비정상절차서 3431A(RCS 누설-CV 내부)의 세부원인별 관련 경보 발생 현황을 보여주고 있다.

Table 3. Alarm Configuration Grouped by Sub-reasons of AOP-3431A

Sub-reason	Description	Number of Alarm	Number of PM	Number of UL
1	RCS Leak in Containment	2	1	1
2	PZR Safety VLV Leak	9	2	2
3	PZR SDS VLV Leak	4	2	2
4	RV Flange Leak	1	1	1
5	SI Tank Outlet VLV Leak	4	1	1
6	SG Tube Leak	3	3	3

8										
SAFETY INJECTION(SI)										
	A	B	C	D	E	F	SIT 1A	SIT 1B	SIT 1C	SIT 1D
1		LPSI PUMP 01A DSCH F LOW LO-LO	LPSI PUMP 01B DSCH F LOW LO-LO	HPSI HEAD R 1 PRESS HI	HPSI HEAD R 2 PRESS HI	PZR PRESS HI TOP	PRESS HI/HI -HI	PRESS HI/HI -HI	PRESS HI/HI -HI	PRESS HI/HI -HI
2		LPSI PUMP 01A DSCH F LOW LO	LPSI PUMP 01B DSCH F LOW LO	HPSI PUMP 2A SUCT FL OW LO	HPSI PUMP 2B SUCT FL OW LO	RCS LOOP 1 TEMP LO LT OP	PRESS LO/L O-LO	PRESS LO/L O-LO	PRESS LO/L O-LO	PRESS LO/L O-LO
3		SIT 1A/1B NOT PRESSURIZED	SIT 1C/1D NOT PRESSURIZED	SYSTEM TR N A/C TRBU DIS	SYSTEM TR N B/D TRBU DIS	RCS LOOP 2 TEMP LO LT OP	LEVEL HI/HE -HI	LEVEL HI/HE -HI	LEVEL HI/HE -HI	LEVEL HI/HE -HI
4		SCS ISOL/SDS ISOL VLV I NVERTER TR BL	LPSI PUMP PP01A DSCH PR HI	LPSI PUMP PP01B DSCH PR HI		SIT ISOL VLV CLOSE	LEVEL LO/L O-LO	LEVEL LO/L O-LO	LEVEL LO/L O-LO	LEVEL LO/L O-LO
5						SCS SUCT LI NE ISOL VLV OPEN	OTLT PRESS HI	OTLT PRESS HI	OTLT PRESS HI	OTLT PRESS HI

Fig. 5. Alarm Configuration Related with 'Safety Injection Tank Outlet Valve Leak' of AOP-3431A

이와 같이 세부원인별 경보발생 현황을 살펴본 결과, 단일 UL에서 경보가 발생하는 3개의 세부원인(1, 4, 5번)에 대해서는 관련 경보가 발생하면 비정상-3431A 절차서 선정이 신속하게 이루어질 수 있을 것으로 예측된다. Fig. 5는 Table 3에서 세부원인 번호가 5인 '안전주입탱크(SIT, Safety Injection Tank) 후단 역지밸브 누설'과 관련한 경보의 발생 현황을 보여주는 그림이다. Fig. 4에서 발생한 4개의 경보에 해당하는 UL 세부그룹 제목을 보면 모두 SIT와 관련되어 있음을 알 수 있으며 이로부터 세부원인 도출이 가능하며 비정상-3431A 절차서 선정이 용이해짐을 알 수 있다.

이상 기술한 내용을 바탕으로 경보/비정상 대응체계의 방안으로 비정상절차서 세부원인별로 관련 다중경보 패턴이 단일 UL에 발생하는 것에 대해서 다중경보 패턴카드를 제안하였으며 Fig. 6 및 7과 같이 운전지원용과 교육용의 두 가지 형태(draft version)로 제안하였다. 운전지원용은 MCR 내 비치하여 운전 중 필요시 참조할 수 있도록 하는 것이고 교육용은 학습을 위한 목적으로 MCR 외부에서도 사용가능한 자료이다. 먼저 운전용의 경우, 각각 한 장의 카드에 한 개의 UL 그림이 삽입되고 UL별 각 경보창에 관련 비정상절차서 번호가 표시되고 UL 그림 아래에 관련 절차서 제목을 기술하였다. 경보패턴이 세부원인별로 나뉜 경우에는 비정상절차서 번호 다음에 '-' 기호와 세부원인 식별번호를 삽입하고 카드 하단에 절차서 제목과 세부원인을 기술하였다. 이와 같이 세부원인을 기술함으로써 세부원인 종류가 많은 비정상절차서의 경우 발생한 경보 패턴으로부터 해당 비정상절차서를 선정한 다음 관련 세부원인으로 효율적으로 진입하여 대응운전을 할 수 있도록 하였다. 한편 교육용의 경우에는 카드 앞면의 UL 경보창 그림에는 비정상절차서 번호를 기입하지 않고 식별기호로만 표시한 다음 카드 뒷면에 절

22												
INST AIR (IA)	MAIN TURBINE (TA)						TURBINE EHC (TH)		MSC			
1 RECEIVER DSCH HDR PRESS 596A LO 596C	DIFF EXPANSION HI		LP EXH HOOD VACUUM LO	BRG VIBRATION HI TRIP 511B-3	MASTER TRIP BUS TRIPPED 511A	TURBINE TRIPPED 511A	HFP 01/02 DSCH FLTR DP HI	HYD FLUID PMP DSCH PRESS LO 515A-1 515A-2	GC SYSTEM CLG WTR CDTY HI	GEN PROTECTION CIRCUIT ENERGIZED 517	TC SYSTEM SEAL OIL PRESS LO 513-2 518A-2	1
2 COMPRESSOR 01 /DRYER 01A/01B TROUBLE 596A 596C	STEAM SEAL HDR PRESS LO	TURNING GEAR TROUBLE	LP EXH HOOD TEMP HI TRIP 511B-2	BRG VIBRATION HI 511B-3	MARK V POWER LOSS	TBN OVERSPEED TRIP	HFP 01/02 MTR OVERLOAD /TEMP HI 515A-1 515A-2	HYD FLUID AIR COOLER TROUBLE 517	GC SYSTEM CLG WTR TEMP HI 517	GEN STATOR CLG WTR TROUBLE 517	TC SEAL OIL SYSTEM TROUBLE 513-2 518A-1	2
3 COMPRESSOR 02 /DRYER 02A/02B TROUBLE 596A 596C	SPE FAN MOTOR STOP/TEMP HI	TURNING GEAR NOT ENGAGED	LP EXH HOOD SPRAY VLV OPEN	THRUST BRG WEAR HI TRIP	STEAM PKG EXH VACUUM LO	ELECTRICAL LOCKOUT VLV LOCKED	HYD FLUID TANK LEVEL HI-HI	HYD FLUID PUMP 01/02 NOT IN AUTO	GC SYSTEM PUMP 01/02 AUTO START 517	GEN GAS SYSTEM TROUBLE 513-1 513-3	TC SYSTEM ESOP PWR LOSS/MTR 513-2 518A-2	3
4 CLCS COMMON TRBL	SYSTEM TRBL/DIS	VLV POSITION LIMIT LIMITING	POWER LOAD UNBALANCE ACTUATED	BRG METAL TEMP HI 511B-1 513-1	GLOBAL ALARM 511B-2	MECHANICAL LOCKOUT VLV LOCKED	HYD FLUID TANK LEVEL HI/LO 515A-2	HYD FLUID PUMP 01/02 AUTO START 515A-1	GC SYSTEM PUMP 01/02 TRBL/DIS 517	GEN LIQUID DETECTOR FULL 518B	TC SYSTEM TRBL/DIS 513-2 518A-1	4
5 SYSTEM TRBL/DIS	I/A CNMT ISOL VLV NOT FULLY OPEN	THROTTLE PRESS LIMIT LIMITING	MW LOAD LIMIT LIMITING	SHAFT ECC HI 511B-1	TBN LOAD HOLD	CV #1 NO LOAD INTERLOCK	HYD FLUID TANK TEMP HI/LO 515A-1 515A-2	SYSTEM TRBL/DIS 515A-1	GC SYSTEM LP01 CONTROL POWER LOSS	SA SYSTEM TRBL/DIS	GEN SEAL OIL DP LO 513-2	5
A B C D E F G H I J K L												

- 3511A: Turbine Generator Trip (터빈 발전기 트립)
- 3511B-1: Turbine High Vibration (터빈 고진동) - Alarm before Turbine Generator Start
- 3511B-2: Turbine High Vibration (터빈 고진동) - Turbine High Vibration Alarm
- 3511B-3: Turbine High Vibration (터빈 고진동) - Turbine High Vibration Trip
- 3513-1: Turbine Generator H2 Leak (발전기 수소 누설) - H2 Leak by Turbine Generator Frame and Gas Piping
- 3513-2: Turbine Generator H2 Leak (발전기 수소 누설) - H2 Leak by Abnormal Turbine Generator Seal Oil System
- 3513-3: Turbine Generator H2 Leak (발전기 수소 누설) - H2 Leak through Stator Cooling System
- 3515A-1: Turbine Control Hydraulic Fluid Pressure Low/Leak (터빈제어유 압력 저하/누설) - Control Hydraulic Fluid Pump Trip during Operation
- 3515A-2: Turbine Control Hydraulic Fluid Pressure Low/Leak (터빈제어유 압력 저하/누설) - Control Hydraulic Fluid Supply Piping Rupture
- 3517: Loss of Stator Cooling (고정자 냉각기능 상실)
- 3518A-1: Loss of Generator Seal Oil (발전기 밀봉유 공급기능 상실) - Main Seal Oil Pump Trip during Operation (MSOP : PP02)
- 3518A-2: Loss of Generator Seal Oil (발전기 밀봉유 공급기능 상실) - Main/Emergency Seal Oil Pump Trip (MSOP : PP02/ESOP : PP01)
- 3518B: Loss of Seal Oil Float Trap Control (밀봉유 Float Trap 제어기능 상실)
- 3596A: Total Loss of Instrument Air (IA 비정상(완전상실))
- 3596C: Air Compressor Trip/ Surge (IA 비정상(동기압축기 트립/서지))

Fig. 6. Example of Multi-Alarm Pattern Card for MCR Operation

22												
INST AIR (IA)	MAIN TURBINE (TA)						TURBINE EHC (TH)		MSC			
1 RECEIVER DSCH HDR PRESS LO	DIFF EXPANSION HI		LP EXH HOOD VACUUM LO	▲ BRG VIBRATION HI TRIP	★ MASTER TRIP BUS TRIPPED	▲ TURBINE TRIPPED	HFP 01/02 DSCH FLTR DP HI	▷ / ▣ HYD FLUID PMP DSCH PRESS LO	□ GC SYSTEM CLG WTR CDTY HI	◐ GEN PROTECTION CIRCUIT ENERGIZED	● / ▽ TC SYSTEM SEAL OIL PRESS LO	1
2 COMPRESSOR 01 /DRYER 01A/01B TROUBLE	STEAM SEAL HDR PRESS LO	TURNING GEAR TROUBLE	LP EXH HOOD TEMP HI TRIP	☆ BRG VIBRATION HI	★ MARK V POWER LOSS	▲ TBN OVERSPEED TRIP	▷ HFP 01/02 MTR OVERLOAD /TEMP HI	▷ HYD FLUID AIR COOLER TROUBLE	□ GC SYSTEM CLG WTR TEMP HI	◐ GEN STATOR CLG WTR TROUBLE	● / ▽ TC SEAL OIL SYSTEM TROUBLE	2
3 COMPRESSOR 02 /DRYER 02A/02B TROUBLE	SPE FAN MOTOR STOP/TEMP HI	TURNING GEAR NOT ENGAGED	LP EXH HOOD SPRAY VLV OPEN	▲ THRUST BRG WEAR HI TRIP	★ STEAM PKG EXH VACUUM LO	▲ ELECTRICAL LOCKOUT VLV LOCKED	▷ HYD FLUID TANK LEVEL HI-HI	▷ HYD FLUID PUMP 01/02 NOT IN AUTO	□ GC SYSTEM PUMP 01/02 AUTO START	◐ GEN GAS SYSTEM TROUBLE	● / ▽ TC SYSTEM ESOP PWR LOSS/MTR OVERLOAD	3
4 CLCS COMMON TRBL	SYSTEM TRBL/DIS	VLV POSITION LIMIT LIMITING	POWER LOAD UNBALANCE ACTUATED	★ BRG METAL TEMP HI	★ GLOBAL ALARM	▲ MECHANICAL LOCKOUT VLV LOCKED	▷ HYD FLUID TANK LEVEL HI/LO	▷ HYD FLUID PUMP 01/02 AUTO START	□ GC SYSTEM PUMP 01/02 TRBL/DIS	◐ GEN LIQUID DETECTOR FULL	● / ▽ TC SYSTEM TRBL/DIS	4
5 SYSTEM TRBL/DIS	I/A CNMT ISOL VLV NOT FULLY OPEN	THROTTLE PRESS LIMIT LIMITING	MW LOAD LIMIT LIMITING	★ SHAFT ECC HI	★ TBN LOAD HOLD	▲ CV #1 NO LOAD INTERLOCK	▷ HYD FLUID TANK TEMP HI/LO	▷ SYSTEM TRBL/DIS	□ GC SYSTEM LP01 CONTROL POWER LOSS	◐ SA SYSTEM TRBL/DIS	● GEN SEAL OIL DP LO	5
A B C D E F G H I J K L												

The Front

The Back

- ◆ 3511A: Turbine Generator Trip
- ★ 3511B-1: Turbine High Vibration - Alarm before Turbine Generator Start
- ☆ 3511B-2: Turbine High Vibration - Turbine High Vibration Alarm
- ▲ 3511B-3: Turbine High Vibration - Turbine High Vibration Trip
- △ 3513-1: Turbine Generator H2 Leak - H2 Leak by Turbine Generator Frame and Gas Piping
- 3513-2: Turbine Generator H2 Leak - H2 Leak by Abnormal Turbine Generator Seal Oil System
- ▲ 3513-3: Turbine Generator H2 Leak - H2 Leak through Stator Cooling System
- ▷ 3515A-1: Turbine Control Hydraulic Fluid Pressure Low/Leak - Control Hydraulic Fluid Pump Trip during Operation
- ▣ 3515A-2: Turbine Control Hydraulic Fluid Pressure Low/Leak - Control Hydraulic Fluid Supply Piping Rupture
- 3517: Loss of Stator Cooling
- ▼ 3518A-1: Loss of Generator Seal Oil - Main Seal Oil Pump Trip during Operation (MSOP : PP02)
- ▽ 3518A-2: Loss of Generator Seal Oil - Main/Emergency Seal Oil Pump Trip (MSOP : PP02/ESOP : PP01)
- ◐ 3518B: Loss of Seal Oil Float Trap Control
- ◁ 3596A: Total Loss of Instrument Air IA
- ◆ 3596C: Air Compressor Trip/ Surge

Fig. 7. Example of Multi-Alarm Card for Education

차서 및 세부 원인에 대한 설명을 기입하여 다중경보 패턴에 대한 암기를 도와줄 수 있도록 하였다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 경보/비정상 대응체계 개발의 일환으로, 실제 MCR에서 운전 시 참조 가능한 운전지원용과 학습을 위한 교육용의 다중경보 패턴카드를 제안하였다. MCR내 경보창에 발생한 다중경보 패턴이 단순한 경우, 즉 단일 UL에서 다중경보가 발생한 경우, 직관적으로 운전원이 적절한 비정상절차서를 선정할 수 있도록 발생한 경보의 패턴으로부터 비정상절차서를 찾아가는 경보/비정상 대응체계를 기술하기 위함이다.

3절과 4.2절의 Table 3에서 언급한 바와 같이 비정상절차서는 해당비정상 상황이 발생하는 원인이 둘 이상 존재하는 경우에는 ‘경보 및 증상’ 부문에서 세부원인별로 경보와 증상이 기술되어 있다. 참조발전소의 경우, 2011년 10월 기준, 101개의 비정상절차서를 분석한 결과, 36개의 비정상절차서가 세부원인별로 경보 및 증상이 기술되어 있어서 이로부터 170개의 세부원인으로 분류가 가능하다. 이 중 91개 세부원인에 대해 관련 경보가 각각 한 개의 UL에서 발생하여 다중경보 패턴카드로 91개의 세부원인이 커버된다. 동일한 방식

으로 OPR1000 계열의 원전별로 총 비정상절차서의 세부원인 수와 그 중 관련 경보가 단일 UL에만 발생하는 경우를 조사하였다. Table 4는 이에 대한 분석결과로, OPR1000 원전의 경우 발전소별로 차이를 보이긴 하지만 평균 57%의 커버력을 보여주고 있다.

결론적으로 OPR1000 원전의 경우, 비정상절차서에서 다루는 세부원인별 비정상 상황 중 41%~67%에 해당하는 비정상 상황은 관련 다중경보가 단일 UL에서 발생하며 (참조발전소의 경우 53%) 본 논문에서 제안한 다중경보 패턴카드가 언급된 비정상 상황에 대해 직관적으로 운전원이 적절한 비정상절차서 선정을 위한 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글: 본 연구는 미래창조과학부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.
(2012M2A8A4025991)

References

- 1) OPIS, <http://opis.kins.re.kr>, 2012. K
- 2) J. Park, W. Jung, S. Kim, S. Y. Choi, J. Kim, and Y. Kim, “The Development of an Evaluation System to Identify High Risk Inducible Tasks Being Carried out a Daily Task of Nuclear Power Plants”, KAERI/TR-4656/2012, KAERI, 2012.
- 3) Y. Lee et al., “LogACTs : Logic Alarm Cause Tracking System”, E07NJ43, KHNP, 2008.
- 4) Y. Kim and W. Jung, “A Diagnosis Support System for Abnormal Situations of Hanbit Units 3 & 4”, Transactions of the Korean Society of Safety Autumn Meeting, 2013.
- 5) S. Y. Choi and W. Jung, “A Study on Rating of Abnormal Operation Procedure) Based on Difficulty, Importance, and Frequency”, Transactions of the Korean Society of Safety Autumn Meeting, 2013.

Table 4. Coverage of Multi-Alarm Pattern Card against Abnormal Situations for OPR1000 Plants

Site	Total Number of AOPs	Total Number of Sub-reasons of AOPs	Number of Sub-reasons Covered by Multi-Alarm Pattern Card	Coverage (%)
A	101	170	91	53
B	104	152	62	41
C	99	209	139	67
D	101	186	118	63
E	100	174	106	61