

화재 PSA 기술현황

강대일



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

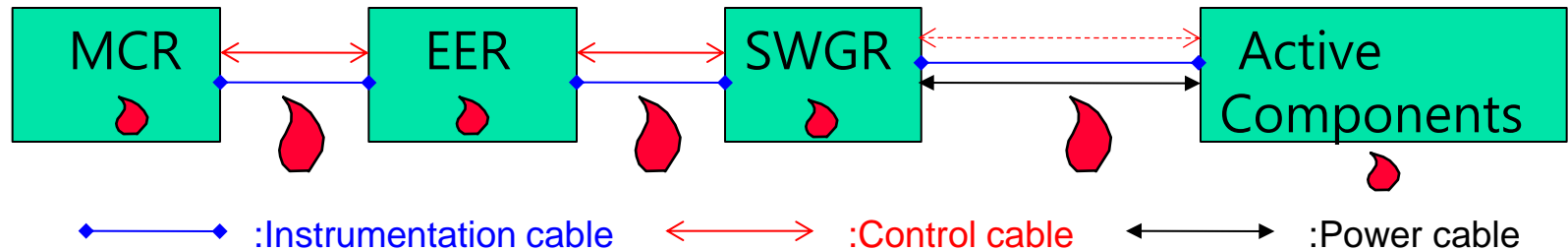
- 서론
- 화재 PSA 신기술(NUREG/CR-6850) 방법
- 국내.외 화재 PSA 기술 현황
- 결어

■ 기기 영향

- 능동(active)기기 기능/제어 상실 또는 오동작
 - 능동기기: 펌프, 동력구동밸브(MOV, SOV, PORV등), 팬, EDG, 압축기, 냉각기, 제어/계측 기기 등
 - 디지털 케이블은 기능정지만 고려
- 수동(passive)기기 일반적으로 영향 없음
 - 폭발이나 구조 붕괴 등의 대형 화재사고는 예외, 배관이음물질, IA line 등

■ 운전원 영향

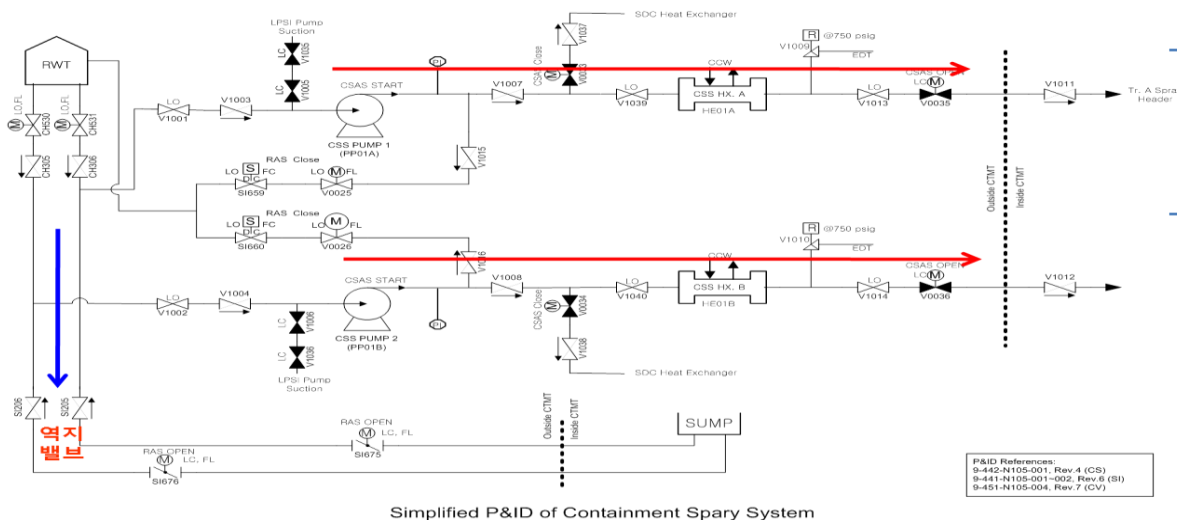
- 계측기 정보 잘못 또는 알 수 없음
- 화재현장의 회복행위 불가능



EER: electrical equipment room, SWGR: switchgear room

- 미국 결정론적 화재방호 현안
 - 운전원 수동조치 (operator manual action: OMA): 화재후 안전정지 확보 위한 현장의 운전원 행위
 - NRC는 화재시나리오에 따른 분석 및 demonstration 요구
 - 다중 오동작(multiple spurious operation: MSO): 화재로 인한 다중 회로의 오동작으로 단일 또는 다중 기기 오동작
 - RG 1.189 2009년 4사분기 발간후 3년이후 해결
- 2014년 미 46여개 원전 성능기반 화재방호(NFPA 805) 전환신청
- 미국내 원전의 NFPA 805 전환 장점과 단점
 - 화재 PSA 사용으로 MSO 고려 기기 수 감소
 - 필수안전기기 OMA/화재모델링 가능
 - 리스크 정보활용/성능기반 화재방호로 발전소 현안(허용정지시간 연장) 해결과 자율적 화재방호 관리
 - 높은 CDF 결과와 예상보다 많은 비용
 - 전환후 관리 문제

- 국내 원전 화재 PSA 관련 화재방호 규정
 - 화재방호계획의 수립 및 이행에 관한 규정
 - 15조: 화재비정상 운전 절차서에서 운전원의 현장조치(OMA) 분석 요구
 - 8조: 초동 소방대의 훈련에서 화재위험성과 **화재 PSA 결과** 근거한 훈련대상지역 선정 명시
 - 화재위험도분석에 관한 기술기준
 - 제32조: 화재안전정지분석에서 **다중오동작 분석**과 **화재비정상운전절차** 작성 명시
- 다중 오동작 (multiple spurious operation) 예



- 기존 화재 PSA에서는 펌프나 밸브 하나 하나 기기의 오동작만 고려
- 화재 PSA 신기술에서는 동시 오동작(펌프&밸브 고장)도 고려



$$CDF = \sum CDF_j, \quad CDF_j = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CCDP_i(P_{iH}, P_{icf})$$

CDF_j : CDF of fire compartment j or scenario j,

λ : fire frequency, SF: severity factor,

P_{iNS} : non-suppression probability,

CCDP: conditional core damage probability(internal+ fire)

P_{iH} : human error probability(fire), P_{icf} : equipment failure probability(fire)

$\sum CDF_j$		
CDF_1	CDF_2	CDF_3
.....
CDF_{98}	CDF_{99}	CDF_{100}
.....

- 정성적 분석
 - 기기/케이블 선정: 정지 유발 또는 사고완화 관련
 - 화재구역 선정 및 전파분석
- 정량적 분석: 내부사건 PSA 모델이용 화재 특성 반영하여 정량화
 - 점화빈도 계산/ 인간신뢰도분석/ 화재모델링/ 회로분석
 - 선별분석: 보수적 가정, 방화지역(fire area) 또는 화재구역(fire compartment) 단위
 - 상세분석: 현실적 가정
- 리스크 관리

$$CDF = \sum CDF_j, \quad CDF_j = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CCDF_i(P_{iH}, P_{icf})$$

- 화재 PSA 방법
 - 기존 화재 PSA 방법: Fire PRA Implementation Guide(FPIG, 1995)
 - 지금까지 국내 가동원전 화재 PSA 방법
 - 화재모델링이 필수 아님/ 오동작 확률 0.1
 - 화재 PSA 신기술(NUREG/CR-6850, 2005) 방법
 - NFPA 805 채택시 사용
 - NRC DC 원전/ 수출원전 사용
 - 대부분 경우 화재모델링 필수 /오동작 확률 0.2~0.8
 - 화재 PSA 수행비용과 높은 CDF 문제

화재 PSA 신기술 방법

$$CDF = \sum CDF_j, \quad CDF_j = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CCDF_i(P_{iH}, P_{icf})$$

기존 국내 사용 화재 PSA(FPIG)와 화재 PSA 신기술(NUREG/CR-6850) 차이

항목	기존 화재 PSA(FPIG)	화재 PSA 신기술(6850)	비고 (6850 + 알파)
기기/케이블 선정	유사	유사, MSO 등의 고려로 수가 증가	NEI 00-01(MSO list)
화재빈도(λ_i)	유사	유사, HEAF 등 추가로 점화원 종류 증가	NUREG-2169(빈도/진압실패확률), 빈도 값 2/3 정도
심각도 인자 (SF_i)	점화원별(변압기 0.1, 캐비닛 0.12, 펌프 0.2, DG 0.4) 주어짐	Generic SF가 주어지지 않음. 화재모델링으로 평가	NUREG-1934(fire modeling guide), NUREG-2178(cabinet HRR, draft)*
진압실패확률 (NS_i)	유사	유사, 개정됨	NUREG-2169, 줄어듦
오동작 분석 (P_{icf})	단일 기기 오동작만 고려, 오동작 확률 0.1	MSO 반영 오동작 확률 0.2~0.8	NEI 00-01(MSO list), NUREG/CR-7150(circuit failure probability)
인간 신뢰도 분석(P_{iH})	상세 언급 없음	체계적, 계측기 오동작 분석 고려	NUREG-1921(fire HRA), NUREG-XXX(MCR HRA)
정량화 선별 기준	1.0E-7/yr 미만 고려 안함	선별총합 CDF <10% of total fire CDF(Cat.II)	ASME PRA standard

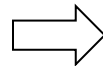
MSO: multiple spurious operation,
HRR: heat release rate,

HEAF: high energy arching fault,
HRA: human reliability analysis

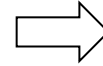
화재 PSA 신기술 방법

$$CDF = \sum CDF_j, \quad CDF_j = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CCDF_i(P_{iH}, P_{icf})$$

Qualitative Analysis



Quantitative Analysis



Other Analysis

화재 PSA 신기술
(NUREG/CR-6850) 방법

Screening Analysis

Detailed Analysis

- Task 1: Plant Boundary & Partitioning
- Task 2: Component Selection
- Task 3: Cable Selection
- Task 4: Qualitative screening

- Task 5: Risk model
- Task 6: Fire ignition frequency
- Task 7: Quantitative screening
- Task 8: Scoping fire modeling

- Task 9/10: Circuit failure analysis and failure likelihood analysis
- Task 11: Detailed fire modeling
- Task 12: Fire HRA
- Task 14: Risk Quantification

- Task 13: Seismic-fire interactions
- Task 15: Uncertainty & sensitivity analysis
- Task 16: Documentation
- Support task A/B: Walk down and database

- 변경항목: frequency, quantitative screening
- 확장항목: component & cable selection, risk model
- 추가 항목: Fire modeling/Fire HRA/Circuit analysis/DB

기존 대비 화재 PSA
신기술 방법/데이터 차이

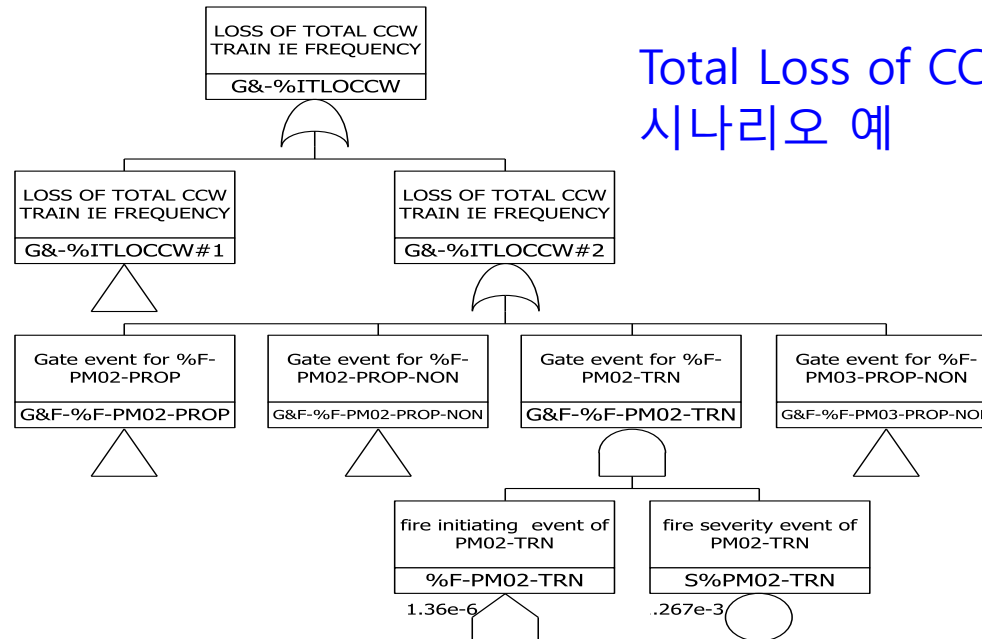
$$CDF = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CCDP_i(P_{iH}, P_{icf})$$

- Module-1/4 : fire PRA/HRA $\Rightarrow P_{iH}, CCDP_i$
 - 업무 2: 기기선정
 - 업무 4: 정성적 선별분석
 - 업무 5: 화재 리스크 모델 개발
 - 업무 7: 정량적 선별분석
 - 업무 12: 사고후 인적오류 분석 및 회복조치
 - 업무 14: 화재 리스크 정량화
 - 업무 15: 불확실성 분석과 민감도분석
 - 업무 16: 문서화

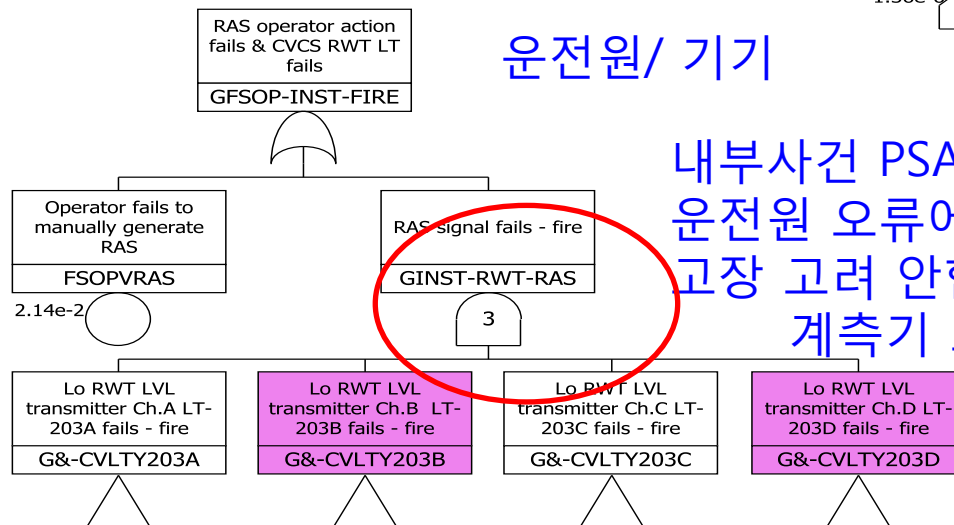
- Module-3/5 : fire analysis/modeling $\Rightarrow \lambda_i * SF_i * P_{iNS}$
 - 업무 1: 발전소 구역 구분
 - 업무 6: 화재 점화 빈도
 - 업무 8: 화재 모델링 범위 설정
 - 업무 11: 상세 화재 모델링
 - 업무 13: 지진유발 화재
 - 업무 A: 현장답사
- Module-2 : circuit analysis $\Rightarrow P_{icf}$
 - 업무 3: 케이블 선정
 - 업무 9: 회로 고장 분석
 - 업무 10: 회로 고장모드/확률 분석
 - 업무 B: 화재 PRA DB

- PRA/HRA

Total Loss of CCWS 초기사건
시나리오 예



운전원/ 기기



내부사건 PSA에서는
운전원 오류에 대해 계측기
고장 고려 안함 -

계측기 고장확률에 비해

HEP가 매우 큼
운전원 면담으로 성공기준 선정

• PRA/HRA

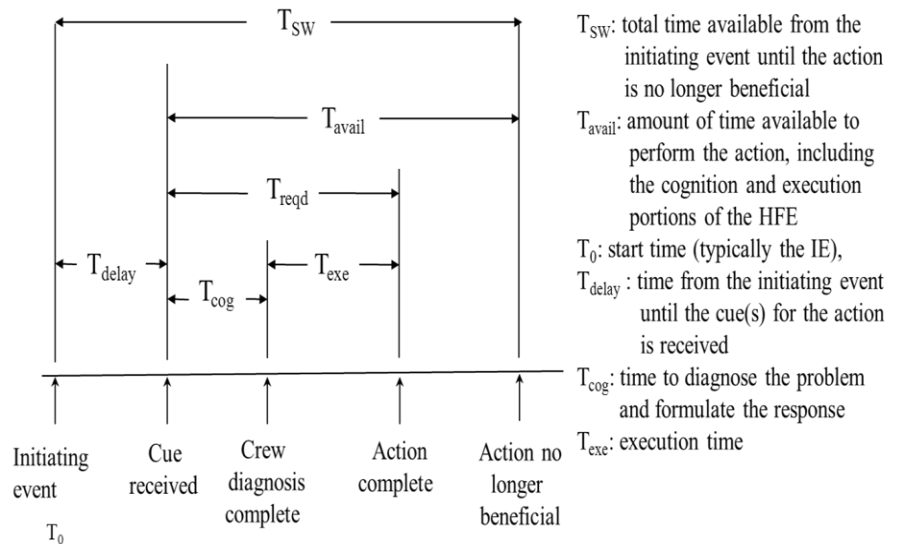
$$CDF = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CC DP_i (P_{iH}, P_{icf})$$

- NUREG-1921(Fire Human Reliability Analysis Guidelines,)의 3가지 정량화 방법

- Screening /Scoping /Detailed
- progressive approach

- Four categories of HFEs:

- Type 1. MCR내서 수행되는 기존 내부 사건 HFE(human failure event)나 새로이 파악된 HFE
- Type 2. MCR밖에서 수행되는 기존 내부사건 HFE나 새로이 파악되는 HFE
- Type 3. MCR를 피난하는 HFE
- Type 4. Error of commission 등과 관련된 HFE -> undesired human action



T_{SW} : total time available from the initiating event until the action is no longer beneficial
 T_{avail} : amount of time available to perform the action, including the cognition and execution portions of the HFE
 T_0 : start time (typically the IE),
 T_{delay} : time from the initiating event until the cue(s) for the action is received
 T_{cog} : time to diagnose the problem and formulate the response
 T_{exe} : execution time

from NUREG-1921

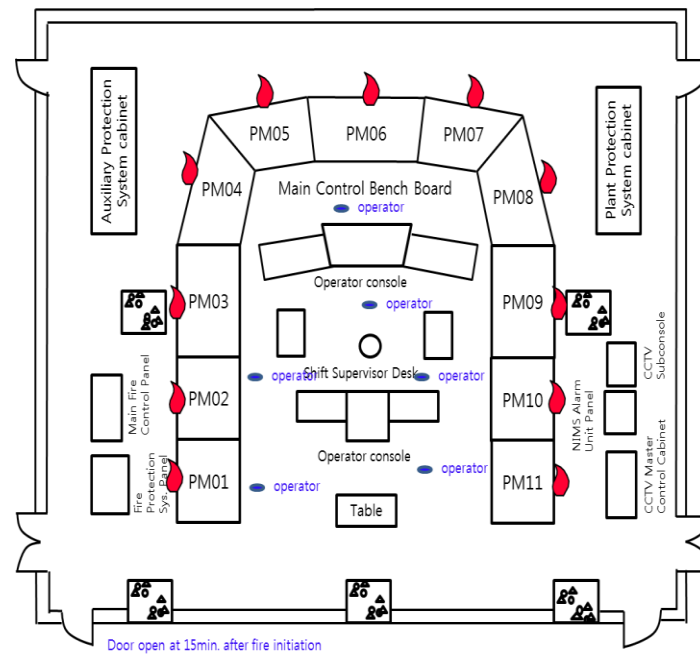
$$\text{Time Margin(TM)} = \frac{T_{avail} - T_{reqd}}{T_{reqd}} \times 100\%$$

$$\text{Time Margin(TM)} = \frac{[(T_{SW} - T_{delay}) - (T_{cog} + T_{exe})]}{(T_{cog} + T_{exe})} \times 100\%$$

$$CDF = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CCDP_i(P_{iH} , P_{icf})$$

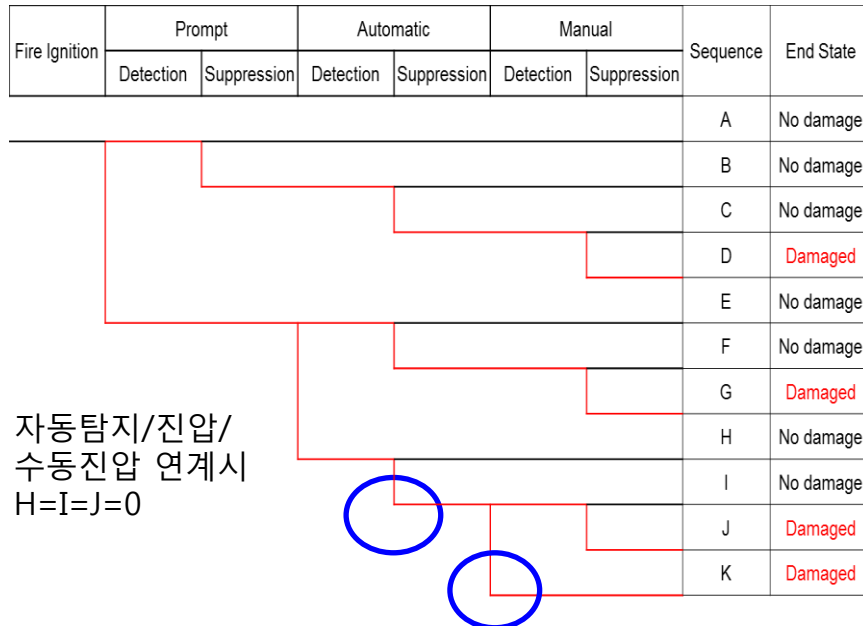
- fire analysis/modeling
 - CFAST나 FDS 등을 이용한 상세 화재모델링
 - 아래 표는 6850, 화재모델링 결과에 중요한 열방출율 (heat release rate: HRR) 데이터 => 보수적, 적용성 문제

Case	Ignition Source	HRR kW (Btu/s)		Gamma Distribution	
		75th	98th	α	β
1	Vertical cabinets with qualified cable, fire limited to one cable bundle	69 (65)	211 (200)	0.84 (0.83)	59.3 (59.6)
2	Vertical cabinets with qualified cable, fire in more than one cable bundle	211 (200)	702 (665)	0.7 (0.7)	216 (204)
3	Vertical cabinets with unqualified cable, fire limited to one cable bundle	90 (85)	211 (200)	1.6 (1.6)	41.5 (39.5)
4	Vertical cabinets with unqualified cable, fire in more than one cable bundle closed doors	232 (220)	464 (440)	2.6 (2.6)	67.8 (64.3)
5	Vertical cabinets with unqualified cable, fire in more than one cable bundle open doors	232 (220)	1002 (950)	0.46 (0.45)	386 (366)
6	Pumps (electrical fires)	69 (65)	211 (200)	0.84 (0.83)	59.3 (56.6)
7	Motors	32 (30)	69 (65)	2.0 (2.0)	11.7 (11.1)
8	Transient Combustibles	142 (135)	317 (300)	1.8 (1.9)	57.4 (53.7)



불이 어디에 발생해서 어떤 기기가 언제 손상/오동작 될까 ?

● fire analysis/modeling



$$P_{NS} = D + G + J + K$$

주제어실: D, 다른 방화구역: G+K

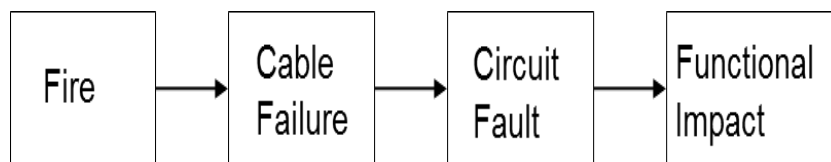
- 자동 감지계통 실패확률을 0.05
- 자동 진압계통
 - ✓ 할로원 0.05,
 - ✓ CO2 0.04,
 - ✓ 습식배관 스프링클러 0.02,
 - ✓ 대용량 스프링클러 0.05
- 고정화재 진압계통 수동진압 0.2

$$CDF = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CCDP_i(P_{iH}, P_{icf})$$

시간에 따른 수동 진압실패확률

Time (min)	T/G fires	High energy arcing faults	Outdoor transformers	Flammable gas	Oil fires	Electrical fires	Transient fires	PV/R containment	Welding	Control room	Cable fires	All fires
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	0.87	0.94	0.83	0.88	0.64	0.55	0.55	0.52	0.38	0.19	0.30	0.68
10	0.76	0.88	0.69	0.77	0.41	0.30	0.30	0.27	0.15	0.04	0.09	0.46
15	0.66	0.83	0.57	0.68	0.26	0.16	0.16	0.14	0.06	0.01	0.03	0.32
20	0.57	0.78	0.47	0.60	0.17	0.09	0.09	0.07	0.02	0.00	0.01	0.22
25	0.50	0.73	0.39	0.53	0.11	0.05	0.05	0.04	0.01	*	0.00	0.15
30	0.43	0.69	0.32	0.46	0.07	0.03	0.03	0.02	0.00	*	*	0.10
35	0.37	0.64	0.27	0.41	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	*	*	0.07
40	0.33	0.61	0.22	0.36	0.03	0.01	0.01	0.01	*	*	*	0.05
45	0.28	0.57	0.18	0.32	0.02	0.00	0.00	0.00	*	*	*	0.03
50	0.25	0.53	0.15	0.28	0.01	0.00	0.00	0.00	*	*	*	0.02
55	0.21	0.50	0.13	0.24	0.00	0.00	0.00	*	*	*	*	0.01
60	0.19	0.47	0.11	0.21	0.00	*	*	*	*	*	*	0.01
65	0.16	0.44	0.09	0.19	0.00	*	*	*	*	*	*	0.01
70	0.14	0.42	0.07	0.17	0.00	*	*	*	*	*	*	0.00
75	0.12	0.39	0.06	0.15	*	*	*	*	*	*	*	0.00
80	0.11	0.37	0.05	0.13	*	*	*	*	*	*	*	0.00
85	0.09	0.34	0.04	0.11	*	*	*	*	*	*	*	0.00
90	0.08	0.32	0.03	0.10	*	*	*	*	*	*	*	0.00
95	0.07	0.30	0.03	0.09	*	*	*	*	*	*	*	*
100	0.06	0.29	0.02	0.08	*	*	*	*	*	*	*	*

* A value of 1E-3 should be used



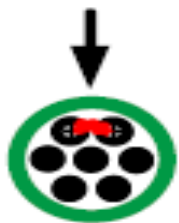
$$CDF = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CC DP_i(P_{iH} , P_{icf})$$

• Circuit analysis

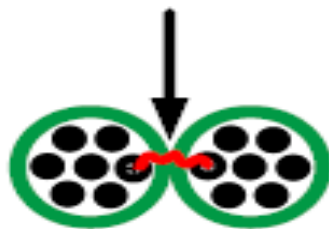
- 핫 프로브 (hot probe) 방법 이용해 회로 상세 분석
 - 가상 도체를 분석대상 도체에 접촉
 - 기기 고장모드
 - 오동작(SO) - pump(start, stop 등), valve(close, open 등)
 - 동력상실(LOP), 제어상실(LOC), 이상지시(EI) 등

케이블 고장유형

Intra - Cable
Hot Short

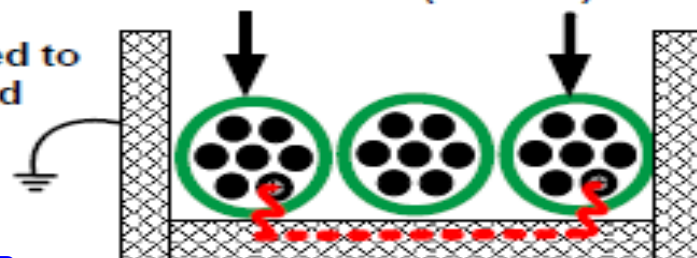


Inter - Cable
Hot Short



Bonded to
Ground

Ground Fault Equivalent
Hot Short (GFEHS)










From NUREG/CR-
7150

화재 PSA 신기술 방법

- Circuit analysis Failure probability estimates given cable damage – single break

Power Supply =>			Grounded AC			Ungrounded AC (w/ individual CPTs)			Ungrounded DC (or Ungrounded distributed AC)			
Target Cable Configuration		Device Type	Conductor Hot Short Failure Mode									
			Intra-cable	Inter-cable	Aggregate	Intra-cable	Inter-cable	Aggregate	Intra-cable	Inter-cable	Ground Fault Equivalent	Aggregate
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Thermoset Cable	1	SOV	0.42	0.01	0.43	0.64	9.70E-04	0.64	0.46	6.30E-03	0.17	0.56
		MOV	0.27	8.80E-03	0.28	0.38	8.50E-04	0.39	0.31	5.60E-03	0.11	0.4
		C/B							0.4	6.30E-03	0.17	0.4
Thermoplastic Cable	2	SOV	0.42	0.025	0.44	0.64	1.50E-02	0.64	0.46	2.00E-02	0.15	0.55
		MOV	0.27	2.20E-02	0.29	0.38	1.30E-02	0.39	0.31	1.80E-02	0.1	0.4
		C/B							0.4	2.00E-02	0.15	0.4
Metal Foil Shield Wrap Cable	3	SOV	0.24	incredible	0.24	0.54	incredible	0.54	0.48	incredible	0.3	0.63
		MOV	0.16		0.16	0.37		0.37	0.31		0.22	0.46
Armored Cable	4	SOV	0.047	incredible	0.047	0.45	incredible	0.45	0.73	incredible	0.48	0.86
		MOV	0.034		0.034	0.27		0.27	0.45		0.29	0.61

Table 6-3. Tabulated Spurious Operation Duration Conditional Probability Values for AC and DC Control Circuits

AC Pr{T>t} CCDF			Time (minutes)	DC Pr{T>t} CCDF			
5 th	Mean	95 th		5 th	Mean	95 th	
1.0	1.0	1.0	0	1.0	1.0	1.0	
3.91E-01	5.12E-01	6.31E-01	1	3.91E-01	5.12E-01	6.31E-01	
1.82E-01	2.74E-01	3.90E-01	2	1.82E-01	2.74E-01	3.90E-01	
8.31E-02	1.49E-01	2.52E-01	3	8.31E-02	1.49E-01	2.52E-01	
3.68E-02	8.17E-02	1.71E-01	4	3.68E-02	8.17E-02	1.71E-01	
1.59E-02	4.51E-02	1.21E-01	5	1.59E-02	4.51E-02	1.21E-01	
6.76E-03	2.51E-02	8.86E-02	6	6.76E-03	2.51E-02	8.86E-02	
2.82E-03	1.40E-02	6.65E-02	7	2.82E-03	2.20E-02	6.80E-02	
1.16E-03	7.85E-03	5.10E-02	8	1.16E-03			
4.74E-04	7.10E-03	3.98E-02	9	8.20E-04			
1.91E-04		3.40E-02	10				
7.64E-05			11				
3.03E-05			12				
1.19E-05			13				
4.67E-06			14				
1.82E-06			15				
7.03E-07			16				
2.71E-07			17				
2.40E-07			18				
	7.10E-03	3.40E-02	19	8.20E-04			2.20E-02
2.40E-07			20				
2.40E-07			>20				

From NUREG/CR-7150

국내.외 화재 PSA 기술 현황

- 화재 점화빈도

$$CDF = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CC DP_i(P_{iH} , P_{icf})$$

- 미국

- 기본가정사항

- 전체 화재발생빈도는 모든 발전소에 대해 동일
 - 동일 유형의 모든 기기에 대해 동일

- 관련 문서

- 2005: NUREG/CR-6850, 0.3/yr
 - 2010: NUREG/CR-6850 supplement 1, 0.151/yr
 - 2014: NUREG/CR-2169, 0.206/yr

- 연구 중 항목

- 기기기준 점화빈도 개발

- 국내

- 국내 원전 화재 PSA 수행시 미국 데이터 사용
 - OECD Fire Project 참여

국내.외 화재 PSA 기술 현황

- 회로분석 관련

$$CDF = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CCDF_i(P_{iH}, P_{icf})$$

- 미국

- 관련 문서

- 2005: NUREG/CR-6850, CPT(control power transformer) 등 케이블 배열 고려해 확률평가

- 2011: NEI 00-01, Rev.3, 다중오동작 목록과 고장모드 등

- 2012: NUREG/CR-7150, vol. 1, 케이블 고장모드

- » 대표적인 고장모드: 케이블내, 케이블 사이, 접지통한 hot short

- 2014: NUREG/CR-7150, vol. 2, 케이블 고장확률과 hot short 지속확률, 케이블 고장확률 추정은 6850보다 단순

- 연구 중 항목

- NUREG/CR-7150, vol. 3, 주로 결정론적 다중오동작 관련 사항

- NEI 00-01 rev. 4 개정중

- 국내

- 수출원전 등의 화재 PSA 수행시 회로분석 적용연구

- 결정론적 다중오동작 분석 본격적 시작(2015)

국내.외 화재 PSA 기술 현황

- 화재 인간신뢰도분석(HRA) $CDF = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CC DP_i(P_{iH} , P_{icf})$
 - 미국
 - 관련 문서
 - 2005: NUREG/CR-6850
 - » 선별분석 값과 절차만 제시
 - 2012: NUREG-1921, Fire HRA 보고서
 - » 3가지 방법(screening, scoping, detailed) 제시
 - » 4가지 인적오류 (MCR 내/밖, MCR 피난, commission error 관련)유형 제시
 - 연구 중 항목
 - MCR 화재시 HRA를 포함한 리스크 평가
 - 국내
 - 수출원전 등의 화재 PSA 수행시 적용

국내.외 화재 PSA 기술 현황

- 화재모델링/실험 관련

- 미국

- 관련 문서

- 2005: NUREG/CR-6850, 5개의 캐비닛 열방출율
 - 2012: NUREG-1934, 화재모델링 지침
 - 2015: NUREG-2178, vol.1, 31개의 캐비닛 열방출율
 - » Draft, 시범적용결과 3개의 방화지역 CDF 87% 감소(2015 fire protection forum)
 - 2015: NUREG-1824 supp. 1, 이전 화재모델링 V&V 보고서 확장
 - 2015: NUREG-2164, MCR 캐비닛 화재 실험 추가 보고서
 - 2015: NUREG-2180, 화재 조기 탐지기 PSA 모델 반영관련 보고서
 - » 조기 탐지기는 CDF 저감에 상당히 기여
 - 2015: NUREG/CR-7197, NUREG-2178 supporting document

$$CDF = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CCDP_i(P_{iH}, P_{icf})$$

국내.외 화재 PSA 기술 현황

Recommended HRR Values for Electrical Fires

Ignition Source	HRR kW (Btu/s)		Gamma Distribution	
	75th	98th	α	β
Vertical cabinets with qualified cable, fire limited to one cable bundle	69 ¹ (65)	211 ² (200)	0.84 (0.83)	59.3 (56.6)
Vertical cabinets with qualified cable, fire in more than one cable bundle	211 ² (200)	702 ³ (665)	0.7 (0.7)	216 (204)
Vertical cabinets with unqualified cable, fire limited to one cable bundle	90 ⁴ (85)	211 ² (200)	1.6 (1.6)	41.5 (39.5)
Vertical cabinets with unqualified cable, fire in more than one cable bundle closed doors	232 ⁵ (220)	464 ⁶ (440)	2.6 (2.6)	67.8 (64.3)
Vertical cabinets with unqualified cable, fire in more than one cable bundle open doors	232 ⁵ (220)	1002 ⁷ (950)	0.46 (0.45)	386 (366)
Pumps (electrical fires) ⁸	69 (65)	211 ² (200)	0.84 (0.83)	59.3 (56.6)
Motors ⁸	32 (30)	69 (65)	2.0 (2.0)	11.7 (11.1)
Transient Combustibles ⁹	142 (135)	317 (300)	1.8 (1.9)	57.4 (53.7)

NUREG/CR-6850 제시 HRR

예) SWGR 4.16KV 안전
모선 캐비닛 화재모델
링시 HRR 값 변화

702kW => 170kW

NUREG-2178 제시 HRR

Classification Group	Fuel Type* (TS or TP)	Alpha	Beta	75 th Percentile (kW)	98 th Percentile (kW)
1 – Switchgear and Load Centers	TS	0.32	79	30	170
	TP	0.99	44	60	170
2 – MCCs and Battery Chargers	TS	0.36	57	25	130
	TP	1.21	30	50	130
3 – Power Inverters	TS	0.23	111	25	200
	TP	0.52	73	50	200

Enclosure Class/Function Group	Enclosure Ventilation (Open/ Closed Doors)	Fuel Type* (TS/TP Cables)	Gamma Distribution Characteristics											
			(a) Default				(b) Low Fuel Loading				(c) Very Low Fuel Loading			
			Alpha	Beta	75 th Percentile (kW)	98 th Percentile (kW)	Alpha	Beta	75 th Percentile (kW)	98 th Percentile (kW)	Alpha	Beta	75 th Percentile (kW)	98 th Percentile (kW)
4a – Large Enclosures >1.42 m ³ (>50 ft ³)	Closed	TS	0.23	223	50	400	0.23	111	25	200	0.38	32	15	75
	Closed	TP	0.52	145	100	400	0.52	73	50	200	0.88	21	25	75
	Open	TS	0.26	365	100	700	0.26	182	50	350	0.38	32	15	75
	Open	TP	0.38	428	200	1000	0.38	214	100	500	0.88	21	25	75
4b – Medium Enclosures ≤1.42 m ³ (50 ft ³) and > 0.34 m ³ (12 ft ³)	Closed	TS	0.23	111	25	200	0.27	51	15	100	0.88	12	15	45
	Closed	TP	0.52	73	50	200	0.52	36	25	100	0.88	12	15	45
	Open	TS	0.23	182	40	325	0.19	92	15	150	0.88	12	15	45
	Open	TP	0.51	119	80	325	0.30	72	25	150	0.88	12	15	45
4c – Small Enclosures ≤ 0.34 m ³ (12 ft ³)	Not Applicable	TS/TP	0.88	12	15	45	The fuel load characterization approach is not applicable to small enclosures.							

국내.외 화재 PSA 기술 현황

- 화재모델링/실험 관련

$$CDF = \sum \lambda_i * SF_i * P_{iNS} * CCDP_i(P_{iH} , P_{icf})$$

- 미국 (계속)

- 연구 중 항목

- OECD HEAF(high energy arching fault) 실험=> NUREG/CR-6850 M 수정
 - NUREG/CR-7010, vol.3, 트레이내 케이블 점화 초점
 - NUREG-XXXX, 케이블 코팅, => NUREG/CR-6850 Q 수정, 예비실험 결과 열경화성 케이블은 케이블 코팅 이득 없음
 - 오일화재 모델링 개선=> 6850의 열방출율 보수적, 짧은 연소시간은 비보수적, SFPE HDBK이 비교적 정확

- 국내

- 국내 원전 화재 PSA 수행시 화재모델링 수행
 - 원전 케이블 손상온도 실험/ 화염 확산 등의 실험 수행

- 화재 PSA 일반적 현안
 - 화재 PSA 신기술 방법 안정화 - 보수성 해결 방향으로 계속 연구 중
 - 지진 유발(설계기준 미만/초과) 화재 리스크 정량화
 - 연기로 인한 전기 기기 들의 영향
 - 화재 HRA(실제 데이터) - MCR 행위, commission error 등
 - 정량화 문제: 0.1보다 큰 화재유발 기기 손상 확률로 실제보다 높은 CDF
- 국내 고유 화재 PSA 현안
 - 미국 화재 PSA 신기술 적용결과 공개하지 않음 => 기술 자립문제/비용
 - 화재 모델링 적용성과 화재 PSA 모델 반영
 - 다중 오동작을 포함한 다중 초기사건 화재 PSA 모델 반영
 - K-HRA의 화재 PSA 적용성 등
 - 화재 리스크 정량화 도구 - 케이블 데이터 연계/ 화재 리스크 모니터
 - 국내 원전 화재방호 현안 (MSO, OMA, 절차서) 해결시 NFPA 805 적용
 - 국내 고유 화재 물성치 확보 (케이블/디지털 캐비닛 등)와 OECD 화재 실험(PRISM) 참가
 - 국내 원전 화재빈도 및 탐지/진압설비 신뢰도
 - 화재 PSA 연구/수행 인프라(기술/인력) 구축

감사합니다



국가 미래 에너지를 책임지는 연구원



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute