원전 화재안전성 확보를 위한 결정론적 평가 Deterministic Evaluation for Insurance of Fire Safety in Nuclear Power Plant

조남진* · 윤기열** · 조경래***

Cho, Namjin*, Yun, Kiyul**, and Cho, Kyoungrae***

Abstract

Because nuclear power plant is special facilities might cause massive damage by inducing shut-down of nuclear reactor and impairing equipment for safe shut-down in case of fire incident in it, it should be required special design condition for fire safety different from general industrial facilities. In this study, we'd like to forecast fire behavior in main control room of nuclear power plant through fire modeling. CFAST, well-known for zone model is applied As fire analysis model method for fire safety evaluation in main control room and fire simulation is executed on basis of NUREG/CR-6850. Through analyzing height of hot gas layer, temperature, radiation heat, optical density, as a result, we evaluated egress time in case of fire incident. Also, we hope to offer information for evaluation and insurance of fire safety in nuclear power plant.

Key words : Main Control Room, CFAST, Hot Gas Layer, Radiant Heat

요 지

원자력발전소는 화재 사고시 원자로의 정지 유발과 동시에 안전정지 기기 등을 손상시켜 대규모 피해를 야기시킬 수 있는 특수한 시설 물로서 일반 산업설비와 차별화된 화재 안전 설계 조건을 요구한다. 본 연구에서는 원자력 발전소의 주제어실(이하 MCR)에 대해서 화재 해석 모델 방법을 통해 화재의 거동을 예측하고자 한다. MCR 내 화재 안전성 평가를 위해 화재 해석 모델방법은 Zone Model인 CFAST를 이용하였으며 NUREG/CR-6850(U.S. NRC 2005)등에 기초하여 화재시물레이션을 수행하였다. 그 결과, Hot Gas Layer 높이, 온도, 복사열, 광학밀도 등을 분석하여 화재발생시 대피해야 하는 시간을 평가하였고, 이를 통해 원자력 발전소의 안전성 평가 및 확보를 위한 정보를 제공하고자 한다.

핵심용어 : 주제어실, CFAST, Hot Gas Layer, 복사열

1. 서 론

원자력발전소에서의 화재 발생 시에는 화재 자체만으로도 피해 이외에도 방사능 유출과 같은 대규모 사고로 발전 할 우려가 있기 때문에 설계단계에서의 안전 확보가 중요하다. 현재 대부분 발전소는 가동수명이 10~30년 이상이며 다양한 시설이 설계변경으로 인해 추가 설치되었으며 또한 최근 후쿠시마 원전사고 후속조치로 국내 발전소들은 각종 사고에 대응할 수 있는 다양한 기기 및 설비들이 보완되어 화재하중의

증가로 인한 위험성은 더욱 증가되는 추세이다.

현재 화재 안전 분야에서는 화재시나리오를 중심으로 대상의 화재안전성능을 분석하는 성능기준 화재안전설계에 대한 연구와 도입이 이루어지고 있으며(Lee *et al.*, 2004) 분석방법으로 화재모델링을 사용하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 원자력 발전소의 화재안전성을 평가 및 확보를 위하여 원자력 발전소 내 안전정지의 핵심적인 공간으로 운전원이 상주하는 주제어실(이하 MCR)에 대해 화재해석 모델 방법을 통해 해석하고 평가하고자 한다.

*정회원. 한국발전엔지니어링(E-mail: cnj7924@hanmail.net)
Member. Ph.D, Korea Power Engineering

**원전화재모델링전문가, 한국발전엔지니어링
Nuclear Power Plants Fire-Modeling Specialist, Korea Power Engineering

***교신저자. 정회원. 경기대학교 대학원 도시방재학과 박사과정(Tel: +82-32-544-3019, Fax: +82-70-7318-3119, E-mail: jklexit@hanmail.net)
Corresponding Author: Member. Ph.D Candidate, Department of Urban Disaster Mitigation, Kyonggi University

2. 연구 내용

2.1 가정 사항

모델링에 앞서 화재해석 대상인 MCR에 대한 가정 사항을 설정하였다. MCR 내부에는 많은 캐비닛들이 있으며, 그 중 화재 발생 가능성 및 확산에 대한 영향을 고려하여 Network 캐비닛, Safety Console, Main Fire Control Panel에서 화재가 발생하는 것으로 가정하여 시뮬레이션을 하였고, 화원의 위치와 격실의 크기는 Table 1과 Table 2와 같다.

벽체와 바닥의 재료는 콘크리트로, 케이블은 네오프렌 케이블로 설정하였다. 각 재료들의 물성치는 NUREG-1805 (U.S. NRC. 2004)등을 Table 3과 같이 참고하여 설정하였다. 각 캐비닛 내부에는 NUREG-1934 (U.S. NRC. 2012)를 참고하여 케이블이 다발에서 발화하는 것으로 가정하였다.

Target은 총 5개로 설정하였다. 1개는 운전원, 3개는 Fire Damper, 나머지 1개는 DMA Panel이다. 운전원은 주제어실의 캐비닛 Safety Console에서 가장 가까운 의자에 위치한 것으로 가정하였고, Fire Damper의 위치는 Duct와 벽이 닿은 위치로 설정하였다. Fire Damper의 경우 Damper Fuse의 설정온도가 72°C이므로 시뮬레이션 후 Fire Damper Fuse의 온도를 확인하여 Damper의 닫힘 시간을 설정하였다.

Vent는 NUREG-1934 (U.S. NRC. 2012)를 참조하여 캐비닛의 상부 Vent에서 불꽃이 나는 것으로 가정하였으며, Vent가 없는 경우에는 캐비닛의 상부 틈(0.01ft로 가정)에서 Flame이 나는 것으로 설정하였다.

MCR의 모든 문 및 창문의 경우 항상 닫힌 상태를 유지하며, HVAC의 총 유입량은 15,200 CFM, 총 배출량은 15,000 CFM의 압력이 가해지는 상황으로 가정하고, 나머지 200

Table 1. Description for Location of fire origin in MCR

Location	Unit	Network Cabinet	Safety Console	Main Fire Control Panel
Compartment	-	MCR2	MCR1	MCR2
Position X	ft	17.2	8.55	9.44
Position Y	ft	6.52	26.58	6.29
Position Z	ft	8.17	8.35	8

Table 2. Compartment Informations converted into Equivalent Model

Parameter	Value (ft)
MCR1 height (H1)	38.5
MCR1 length (L)	48.5
MCR1 width (W)	61
MCR2 height (H2)	16.5
MCR2 effective length (Le)	38
MCR2 effective width (We)	12.92

Table 3. Material Properties

Material	Conductivity kW/(m°C)	Specific Heat kJ/(kg°C)	Density kg/m ³
STEEL (NUREG-1805)	0.054	0.465	7833
MCR Operator	0.00058	4.183	998.3
Concrete	0.0016	0.75	2400
XPE/Neoprene	0.000134	1.586	1380

Table 4. Effective Leakage Size of MCR's Openings (unit: ft)

MCR	vent8	vent9
W	3.5	6.38
H	7.5	7.35
L	22	34.81
l (m)	5.6	9.2
A _d (m ²)	0.02	0.03
l	18.37	30.18
A _d	0.215	0.323
A=L/l*A _d	0.258	0.372
h=A/W	0.074	0.058

CFM의 유량은 문틈 등을 통해 배출되는 것으로 구성하였다.

문틈에 대한 크기는 Table 4와 같다. 케이블 트레이의 경우 화원에서 가장 가까운 모서리로 설정하여 같은 케이블 트레이이라도 화원마다 위치가 다르게 설정하였다.

2.2. 분석방법

화재모델링 프로그램으로는 짧은 시간 내에 빠른 결과 값을 낼 수 있으며, 많은 양의 데이터를 해석해내는 것이 특징인 Zone Model 형식의 CFAST를 선정하였다. 화재는 NUREG-1805 (U.S. NRC. 2004)에서의 XPE/Neoprene 케이블 다발 화재성장곡선을 NUREG-CR6850 (U.S. NRC. 2005) 확률에 따라 15개의 BIN으로 나누어 적용하였다.

열방출율 (Heat Release Rate, 이하 HRR)곡선은 NUREG-6850 (U.S. NRC. 2005), Table G-2를 참조하였으며, Time to Peak는 평균값을 12분으로 하고, Steady Burning은 7.1분, Time to Decay는 19분을 사용하여 화재성장곡선을 만들었으며, CFAST의 입력값 Time to 1 MW (t)는 아래의 식을 사용하여 구하였다.

$$t = \sqrt{\frac{1000 \times (\text{Time to Peak})^2}{\text{Peak Value}}} \quad (a)$$

환기조건에서의 격실문의 틈새의 경우는 아래의 방정식에 따라 정의하였다.

$$A = \frac{L}{l} A_d \quad (b)$$

A =출입문의 틈새면적(m^2), L =출입문 틈새의 길이(m), l =표준출입문의 틈새 길이(m , 외여닫이문: 5.3, 쌍여닫이문: 9.2), A_d =표준출입문의 누설면적(m^2 , 외여닫이 내측 개방: 0.01, 외여닫이 외측개방: 0.02, 쌍여닫이: 0.03).

2.3 분석내용

화재시나리오를 앞서 가정한 사항을 입력하고, 시뮬레이션 시간을 3,600초(1시간)으로 적용하여 분석하였다. Target으로 선정한 3개의 Fire Damper의 각 온도를 측정하고, 이를 이용하여 HVAC가 차단되는 온도와 시간 확인 및 Fire Damper의

개폐시간을 설정하였다. 결과분석은 Table 6, Table 7, Table 8에 따라 Operator가 HGL의 영향을 받아 대피해야 하는 시

Table 5. Criteria of Evaluation in Simulation

Decription	Crisis Value
Fusible Temperature for Fire Damper	72°C
Effective Temperature on Operator	95°C
Effective radiation on Operator	1kW/m ²
Optical Density	0.3m ⁻¹
Damage Temperature on DMA	330°C

Table 6. Network Cabinet

NX07	HGL Temp.		Operator Flux		HGL Height		Optical Density		DMA Damage	
	Time	Temp.	Time	kW	Time	m	Time	m ⁻¹	Time	°C
Bin01	1060	21.11	1430	0.0044	1330	2.4152	1070	0.0966	1590	20.287
Bin02	1170	23.906	1250	0.0286	1000	2.3785	900	0.2924	1720	22.1215
Bin03	1180	26.804	1200	0.0554	890	2.3973	650	0.3036	1670	24.1187
Bin04	1190	29.63	1190	0.084	830	2.3616	570	0.3084	1630	26.122
Bin05	1180	32.518	1190	0.1145	780	2.4239	510	0.3022	1600	28.1858
Bin06	1180	35.415	1180	0.1465	750	2.4291	470	0.3015	1580	30.2775
Bin07	1170	38.268	1180	0.1792	730	2.4039	440	0.3009	1560	32.3753
Bin08	1170	41.143	1170	0.2134	710	2.4208	420	0.3087	1550	34.5253
Bin09	1170	43.999	1170	0.2485	700	2.3585	400	0.3093	1540	36.6942
Bin10	1160	46.805	1170	0.2839	680	2.4344	380	0.3033	1520	38.8538
Bin11	1160	49.633	1160	0.3206	670	2.4173	370	0.3119	1530	41.8024
Bin12	1160	52.439	1160	0.3578	660	2.4056	360	0.3191	1520	44.4078
Bin13	1160	55.223	1160	0.3957	650	2.4037	340	0.3013	1500	46.9147
Bin14	1160	57.992	1160	0.4341	640	2.4188	330	0.3009	1490	49.3738
Bin15	1150	65.699	1150	0.5451	620	2.3891	310	0.3103	1470	56.1344

Table 7. Safety Console

PM05	HGL Temp.		Operator Flux		HGL Height		Optical Density		DMA Damage	
	Time	Temp.	Time	kW	Time	m	Time	m ⁻¹	Time	°C
Bin01	1140	21.93	1630	0.0048	1630	2.4239	1150	0.1029	1370	21.2257
Bin02	1130	26.551	1200	0.0298	1200	2.4182	830	0.3016	1390	24.7818
Bin03	1130	30.432	1180	0.0587	1050	2.4241	640	0.3089	1500	28.517
Bin04	1130	33.983	1170	0.0894	960	2.4114	560	0.3111	1480	32.3409
Bin05	1130	37.495	1170	0.1227	900	2.4271	500	0.303	1460	36.083
Bin06	1140	41.035	1170	0.1585	870	2.3861	460	0.3019	1450	39.6744
Bin07	1140	44.55	1160	0.1958	840	2.3921	430	0.301	1450	43.1382
Bin08	1150	48.109	1160	0.2355	810	2.4257	410	0.3086	1440	46.5738
Bin09	1150	51.668	1160	0.2771	790	2.427	390	0.3091	1430	49.9377
Bin10	1150	55.189	1160	0.3202	780	2.3898	370	0.3034	1430	53.2
Bin11	1150	58.755	1160	0.3658	760	2.4217	360	0.3116	1420	56.444
Bin12	1150	62.319	1160	0.4131	750	2.4041	350	0.3185	1420	59.6246
Bin13	1150	65.881	1160	0.4623	740	2.3939	330	0.3012	1410	62.74
Bin14	1150	69.456	1160	0.5135	730	2.3934	320	0.3007	1410	65.8376
Bin15	1140	79.54	1150	0.6677	700	2.4216	300	0.3092	1400	74.3237

Table 8. Main Fire Control Panel

PM08	HGL Temp.		Operator Flux		HGL Height		Optical Density		DMA Damage	
	Time	Temp.	Time	kW	Time	m	Time	m ⁻¹	Time	°C
Bin01	1030	21.098	1410	0.0046	1290	2.4346	1040	0.094	1850	20.2885
Bin02	1180	23.905	1240	0.0289	980	2.3774	1150	0.2851	1720	22.1572
Bin03	1180	26.805	1200	0.0556	870	2.4214	650	0.3016	1660	24.156
Bin04	1190	29.636	1190	0.0841	810	2.4085	570	0.3063	1630	26.1605
Bin05	1180	32.519	1180	0.1145	770	2.3907	510	0.3002	1600	28.2244
Bin06	1180	35.408	1180	0.1464	740	2.4015	480	0.3157	1580	30.3161
Bin07	1170	38.254	1170	0.179	720	2.381	450	0.3164	1560	32.4148
Bin08	1170	41.118	1170	0.2131	700	2.403	420	0.3069	1550	34.5616
Bin09	1170	43.967	1170	0.2481	690	2.3432	400	0.3073	1530	36.73
Bin10	1160	46.768	1160	0.2834	670	2.423	380	0.3015	1520	38.8896
Bin11	1200	49.756	1210	0.3224	660	2.4095	370	0.31	1530	41.7017
Bin12	1180	53.704	1180	0.3749	650	2.4021	360	0.317	1520	44.3146
Bin13	1170	56.979	1170	0.4199	640	2.4052	350	0.3216	1500	46.8297
Bin14	1160	60.04	1160	0.4629	630	2.4234	340	0.3219	1490	49.3143
Bin15	1150	68.164	1160	0.5818	610	2.4019	310	0.3081	1470	56.09

간을 기록한다. 판정기준은 HGL의 온도에 의해 Operator의 영향이 95°C 이상이거나, HGL에 의한 복사열에 의한 Operator의 영향이 1kW 이상이거나, HGL 광학밀도가 0.3m⁻¹ 이상이고 바닥으로부터 6ft 이하로 내려오면 대피하여야한다. DMA 제어반의 손상온도는 케이블의 손상온도와 같다. 이것을 정리하면 Table 5와 같다.

3. 결 론

MCR 내부 화원별로 Target의 온도와 상주가능시간을 확인 후, 도출 된 값을 재입력하여 최종적인 결과 값을 확인할 수 있었다. 각 화원별로 Hot Gas Layer 높이, 온도(95°C), 복사열(1 kW/m²), 광학밀도(0.3 m⁻¹)등을 만족하지 못하여 대피해

Fig. 1. Network Cabinet.

Fig. 2. Safety Console.

Fig. 3. Main Fire Control Panel.

야 하는 시간을 기록하였다. 각 판정기준 값을 초과되는 경우는 기준 값을 초과되는 시간과 그 초과 값을 입력하였으며 기준 값을 초과하지 못하는 경우는 최대값에 해당하는 시간과 값을 입력하였다. Fig. 1과 Table 6은 NETWORK CABINET의 결과 값이고, Fig. 2와 Table 7은 Safety Console 화재로 인한 HGL Temperature, Heat Flux, Visibility 결과 값을 나타낸다. Main Fire Control Panel의 결과는 Fig. 3과 Table 8과 같다. 이는 최종 피난 시간은 온도 및 복사열에는 무관하며, 고온층의 가시거리가 0.3 m^{-1} 이 되고 높이가 2.438 m 이하로 내려오는 시간이 됨을 확인할 수 있다.

References

- Lee, Y.H., Yang, J.E., Kim, J.H., and Noh, S.K. (2004) CCDP Evaluation of the Fire Area of NPPs Using Fire Model CFAST, T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 18, No. 4.
- NFPA (2001) 805 Performance-Based Standards for Fire Protection for LWR Electric Generating Plants.
- NIST (2010) SP 1018-5, Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide.
- NIST (2010) SP 1019-5, Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide.
- NIST (2011) SP 1026 r1. CFAST: Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6). Technical Reference Guide.
- NIST (2012) SP 1041 r1. CFAST: Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6). User's Guide.
- SFPE (2008) Handbook of Fire Protection Engineering, 3th edition.
- U.S. NRC. (1979) Fire Protection Program for NPPs Operating Prior to January 1, 1979, 10CFR50 Appendix R..
- U.S. NRC. (1986) Implementation of Fire Protection Requirements, Generic Letter 86-10.
- U.S. NRC. (2000) Generic Aging Lessons Learned(GALL) Report, NUREG-1801.
- U.S. NRC. (2001) Fire Protection for Operating Nuclear Power Plants, G 1.189.
- U.S. NRC. (2004) Fire Dynamics Tools (FDTs) Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program., NUREG-1805.
- U.S. NRC. (2005) EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities, NUREG/CR-6850 (EPRI 1011989).
- U.S. NRC. (2007) Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, NUREG-1824 (EPRI 1011999).
- U.S. NRC. (2007) 10 CFR 50.48 Fire Protection.
- U.S. NRC. (2010) Fire Probabilistic Risk Assessment Methods Enhancements, NUREG/CR-6850 Supplement1, (EPRI 1019259).
- U.S. NRC. (2012) Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines (NPP FIRE MAG), NUREG-1934.

Received ■ June 19, 2014

Revised ■ June 26, 2014

Accepted ■ July 4, 2014