

원자력발전소 화재 위험 평가 항목 검토 및 적용 화재 모델의 예시

Review on the Fire Risk Evaluation Items and Sample Fire Models for its Assessment

지 문 학, 성 창 경, 김 인 환

한국전력 전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

요약문

규범적 화재방호 기준인 NFPA-803¹⁾이 확률론적 또는 정량적 접근 방식인 NFPA-805²⁾로 대체³⁾됨에 따라 원자력발전소의 화재방호분야에 대한 설계 및 운영기준이 변화될 것으로 예상된다. 이에 따라 본 논문에서는 원자력발전소에서 새로운 화재방호 기준을 적용할 경우 기본적으로 평가하여야 할 화재 위험 평가 항목을 정리하였으며 항목별 적용 가능한 화재 모델을 예로 들었다. 또한 화재 모델링이 보다 포괄적으로 사용되기 위해서는 일부 분야에 대한 보완과 개선이 필요함을 제시하였다.

Abstract

NFPA-803, the prescriptive regulation for Fire Protection Standard for Nuclear Power Plant (NPP), has to be replaced with NFPA-805, whose main tenet is based on probabilistic analysis or quantitative approach.

With this insight, this paper introduces the evaluation items that must be reviewed and selected for the fire risk evaluation and the sample Fire Model for their assessment when the new Standard is applied in NPP. In addition, it is suggested that there has to be some modification as well as complementary renewal in some parts of the fire modeling programs if these kind of tools are comprehensibly used with validity.

1) National Fire Protection Association-803 : Standard for Fire Protection for Light Water Nuclear Power Plants

2) Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants

3) NFPA-805(Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants)는 미국 표준위원회(the Standards Council)에 의하여 '01.1.13일 공포, '01.2.9일 공식적 승인을 받음

1. 서론

경수로 원자력발전소에 대한 규범적 규제 요건으로 구성된 화재방호 기준, NFPA-803이 성능위주의 방호기준인 NFPA-805로 변경됨에 따라 결정론적이며 정성적인 화재 위험 평가 방법이 확률론적 또는 정량적인 접근으로 병행 추진되고 있다. 새로운 성능위주의 화재방호 기준은 미국의 일부 행정기관과 관할기관에서 이미 실무에 활용되고 있으며 앞으로 NRC⁴⁾의 실행지침 발표와 상용 모델의 승인으로 원자력발전소의 공식적 기준으로 사용될 전망이다.

1980년대 이후 산업계와 건축분야에서도 많은 나라들에서 이 분야에 적용되어 온 기존의 화재방호지침에 대한 대폭적인 개선의 분위기가 형성되었으며, 이들 정부에서 주체적으로 성능기준 설계방법을 사용할 것을 권장하여 왔다. 이러한 움직임의 효시로서, 영국과 뉴질랜드의 경우 새로운 성능기준 건축코드의 개발에 이어 실무에 적용하기 위한 기술분야 설계지침과 행정적 승인제도를 개발중이며 호주, 일본 및 북구의 대다수 국가에서도 규범적 규제와 함께 성능위주의 설계 및 이의 적용을 위한 정책적 지원이 정부주도로 활발히 추진되고 있다.

이러한 측면에서 본 논문에서는 성능위주 화재사건 분석 방법으로 대별할 수 있는 FIVE⁵⁾, PSA⁶⁾ 및 컴퓨터를 이용한 화재 모델링 방법 중, 화재방호설비의 적정성 평가 및 소화설비의 설계에 활용할 수 있는 컴퓨터 화재 모델링을 원자력발전소에 적용할 경우 기본적으로 평가되어야 할 항목을 선정하여 검토하였으며 항목별 모델의 사용 예를 제시하였다.

2. 화재 모델링 적용을 위한 기본 평가 항목 및 특성

2.1 가연물의 종류 및 열 발생률

가. 가연물의 종류

- 케이블(Qualified, Unqualified) 및 전선류
- 변압기용 오일, 윤활유, 액체 연료 및 제4류/6류 위험물
- 가연성 가스류(발전기, 배터리실, 저장고의 수소 등)
- 활성탄 및 필터류
- 모터의 권선 및 오일, 그리스
- 전력용 캐비닛, 제어용 판넬 및 MCC
- 배관, 기기 등의 보온재 및 덮개류
- 일반 가연물, 연소성 구조물 등

나. 가연물의 열 발생률

화재 모델링에 있어서 연소물의 열 발생률은 매우 중요한 입력요소이지만 실제 화재에서 발열량은 경과 시간 및 화재 조건에 따라 크게 변동한다. 또한 실제 가연물에 대하여 적용할 수 있는 신뢰성 있는 자료도 많지 않은 실정이다. 따라서 신뢰도가 높은 관련자료의 확보와 실제 조건에 적절한 값을 선정하는 것이 모델링의 불확실성을 줄이기 위한 기본 요건이다. 예로서, 가연물의 발열량 특성을 미 상무성의 국립표준기술기관(NIST)에 의하여 개발된 화재 모델, FPEtool로 살펴보면 연소조건(slow, medium 등)과 열 발생률은 고정변수로 입력하여 프로그램에 내장된 알고리즘에 의하는 방법이 있으며, 다른 화재모델인 FAST의 경우 사용자가 시간대별로 직접 열 발생률을 입력할 수도 있으므로 그 결과를 비교, 분석할 수 있다.

4) Nuclear Regulatory Commission

5) Fire-Induced Vulnerability Evaluation

6) Probabilistic Safety Analysis

한편, 열 발생률에 관한 추천 자료로서는 미국 원전의 화재 사례와 경험을 바탕으로 폭넓게 조사, 분석되었으며 가연물의 특성과 화재실의 조건을 고려하여 현장 조건에 가장 적절한 값을 선택할 수 있는 EPRI 자료⁷⁾가 가장 충실한 자료로 파악된다.



그림 1. 유형별 또는 사용자에 의한 초기 열 발생률 입력화면 : FAST 및 FPEtool

2.2 점화원의 종류 및 위치

가. 점화원의 종류

- 1) 전기 스파크(hot short), 누전, 발열(전기 캐비닛, 패널, 도체)
- 2) 고온체(터빈/발전기, 대형 펌프/모터, 압축기, 디젤발전기, 변압기, 고에너지 배관 등)
- 3) 각종 전기 회로용 Breaker(switchgear room, power cabling room, control room 등)
- 4) 용접 및 보수 작업에 의한 불꽃, 나화(open flame), 담뱃불 등
- 5) 고온의 연소 가스(디젤발전기, 보일러, 원동기 등)
- 6) 기계적, 전기적 과열
- 7) 비고정식 난방기 및 기타 점화원

나. 점화원의 위치

위에서 나열된 것처럼 원전의 점화원 종류는 다양하지만 화재가 발생한 장소의 특성과 화재발생빈도 자료를 분석하여 보면 화재를 일으킨 점화원은 대부분 전기적인 원인에 의한 것이며 발생지역도 케이블과 전기설비가 많이 분포된 Control Room Area, Cable Spreading Room, Emergency Switchgear Room 등으로 나타난다. 한편, 화재위험도 평가 분석결과를 보면 화재로 인한 노심의 손상 빈도는 터빈건물, 디젤발전기실, 보조건물, 대형펌프실 등에서도 여전히 높은 값을 가지므로 발전소 전역에 점화원이 존재한다는 기준하에 화재평가를 수행하여야 하며 점화원별 특성 차이는 초기 발열량 및 출화 형태에 의하여 평가되어야 한다.

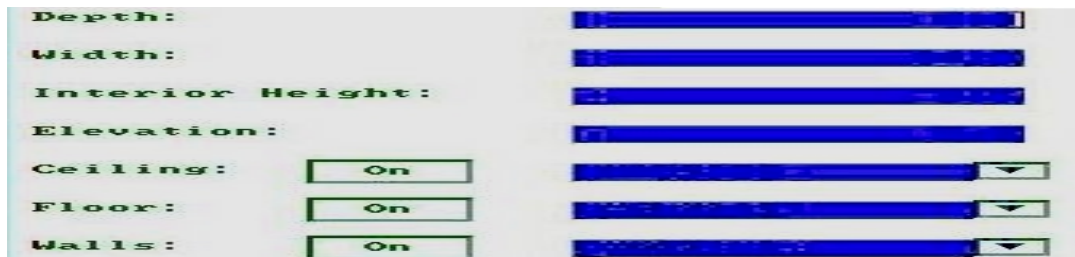
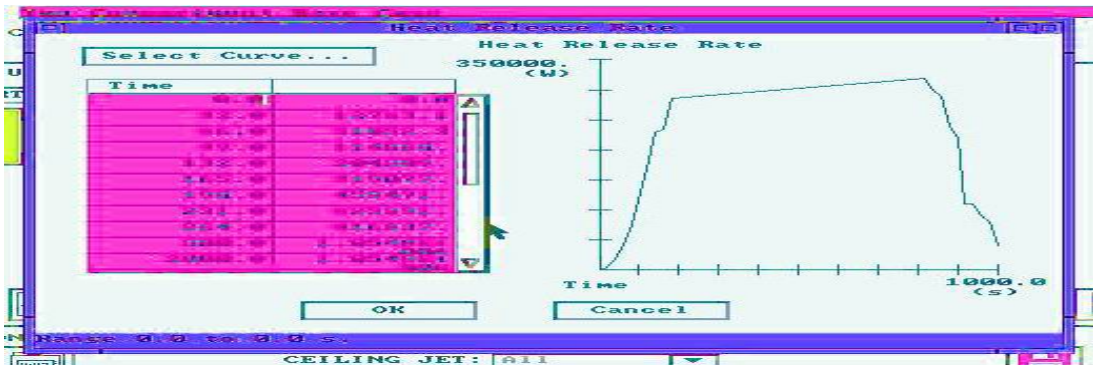


그림 2. 화재실의 Geometry와 점화원 위치 입력 화면 : FAST

7) EPRI TR-105928, Fire PRA Implementation Guide의 E. Guidance for Selection of Heat Release Rates

2.3 케이블 물량 및 구획된 공간의 화재 하중

원전의 케이블은 크게 Qualified Cable과 Unqualified Cable로 구분되며 발열량, 화염전파, 임계복사열량, 고온에서의 통전량 저하 등 화재 특성은 큰 차이를 보인다. 케이블들은 통상 케이블 트레이에 수용되며 일부는 전기 캐비닛이나 패널에 수용된다. 케이블의 화재 성상은 케이블 트레이의 재질과 상부 덮개 유무, 설치 방법(수직, 수평), 이격 거리 및 캐비닛의 개구부 유무, 설치 방법, 내부 배열 등에 따라 크게 차이가 나므로 물량과 공간상의 위치(좌표)에 대한 상세 평가가 사전에 수행되어야 한다. 케이블은 일부 공간에 집중 배치되므로 화재 하중이 매우 높으며 케이블실의 구획 공간은 규범적 규제요건을 만족할 수 있도록 별도의 화재 방호대책과 소화설비를 갖추어야 하며 특히 구획실의 관통부에 대하여는 규정에 따른 설계와 시험요건을 만족시켜야 한다.



2차 화재에 대한 성능위주 평가를 Zone Model에 의할 경우 일부 모델을 제외한 대부분의 프로그램은 화재 전개에 따른 시점별 불연속적인 평가를 수행하여야 하는 어려움이 있으므로 이를 위한 모델의 개선과 보완이 과제로 남아있다. 현재 사용할 수 있는 모델이나 방법론은 FIVE, COMPBRN III, CFAST 등을 들 수 있으며 정량적인 평가는 NUREG-1521 보고서⁸⁾를 참조할 경우 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

2.5 높은 에너지를 보유한 전기 기기 및 설비

높은 에너지를 보유한 전기 기기에 대한 해석은 명확하지 않지만 화재 위험성 평가 측면에서 점화원과 가연물이 함께 존재하며 화재 취약성이 큰 전기 기기나 설비로 간주된다. 이들은 주로 Cable Spreading Room, Switchgear Room 등 전력을 공급하고 배분하는 격실에 많이 설치되어 있으며 연소 조건이 모두 갖추어져 있는 상태이므로 위의 2.4항에서 제시한 결정론적인 규범 요건이 준수되어야 한다. 한편 이에 대한 상세 평가는 성능위주의 화재 모델링을 이용할 수 있으나 보다 신뢰성 있는 평가와 안전성 확보를 위하여 화재 PRA 기법과 전기기기 및 설비에 대하여 상세한 분석 자료를 담고 있는 EPRI 보고서⁹⁾의 활용이 함께 추천된다.

2.6 환기 및 공조설비의 배치 및 운전 모드¹⁰⁾

원전의 환기 및 공조설비는 발전소마다 다소 차이가 있지만 지역별로 그리고 계통별로 요구되는 기능에 따라 분리되어 있다. 일반적인 공조설비의 배치 상태와 구분은 다음과 같다.

가. 환기 및 공조설비의 종류 및 구분

- 1) 주제어실 공기조화계통
- 2) 보조건물 및 방사선 폐기물 건물 공기조화계통
- 3) 격납건물 공기조화계통
- 4) 공학적 안전설비 공기조화계통
- 5) 공학적 안전설비 고압 배전반실 공기조화계통
- 6) 비상노심 냉각계통 기기실 공기조화계통
- 7) 핵연료건물 공기조화계통
- 8) 터빈건물 공기조화계통
- 9) 원격정지실 공기조화계통
- 10) 취수 구조물 및 펌프실 공기조화계통 등

나. 환기 및 공조설비의 운전 특성

터빈 건물 공기조화계통, 격납건물 공기조화계통 및 기타 일부 계통을 제외한 대부분의 공조설비는 안전성 관련 계통이며 정상운전시 공조 공간의 용도에 따라 정압 또는 부압을 유지하면서 환기와 조화된 공기를 순환시킨다. 발전소 이상 상태가 발생한 경우 각각의 공조계통은 설계된 바에 따라 안전정지 기능을 수행하기 위한 보조 역할과 방사성 물질의 외부 확산이나 유출을 차단하기 위한 고유 모드로 운전하게 된다. 화재시 공조설비는 배연설비의 기능을 수행할 수 있도록 운전모드 및 닥트의 유로가 변경되어 연기와 고온가스를 배출하고 인접공간으로의 확산을 차단하며, 소방대의 진입을 위한 대피로 확보와 설계기준의 실내조건을

8) NUREG-1521, Technical Review of Risk-Informed, Performance-Based Methods for Nuclear Power Plant Fire Protection Analysis의 6.2.1.3, Fire Models and Computer Codes Based on Zone Models

9) EPRI TR-105928, Fire PRA Implementation Guide의 D. Guidance for Estimating Fire Severity, E. Guidance for Selection of Heat Release Rates, H. Electrical Cabinet Fires - Effect on Adjacent Cabinets 참조

10) 표준 경수로 계통설비(I), 제5장. 공기조화계통 참조(한국전력공사, 울진 원자력 본부)

유지하기 위한 역할을 한다. 화재 모델인 COMPBRN III 및 FAST의 경우 강제환기(제3종 환기)에 의한 영향을 반영할 수 있고 FPEtool의 경우 복도에서의 연기거동을 확인할 수 있으나 시간에 따른 배연 설비의 기능과 변수에 대한 프로그램 내부의 알고리즘은 보다 상세하게 검토하여 보완되어야 할 것으로 보인다. 이와 함께 정량화를 위한 각종 자료와 상세 분석 기준¹¹⁾을 이용하여 원전의 계통별 운전특성에 맞는 방연 및 배연설비용 공조 프로그램이 개발되어 실용화를 위한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.



그림 5. 공조설비에 대한 입력화면(Figure 부분은 제외) : FAST

2.7 벽체 및 구조물을 통한 열손실

구획된 공간의 화재시 벽체, 바닥, 천장 및 구조물을 통한 열손실계수(α_{loss})는 0.8 내외의 큰 값을 갖는다. 특히 복사, 대류 및 전도를 통한 열전달율은 화재 구역의 위치, 공간상의 좌표 및 시간에 따라 크게 달라지며 실내 공기와 연소가스의 팽창, 기계환기의 영향, 바람의 영향과 개구부 또는 틈새의 상태에 따라 열손실량도 변동한다. 이에 대한 평가는 통상 정성적으로 대상 물량을 선별한 후 정량적 분석에 의하여 상세 평가를 하게된다. 즉, 상세 분석 이전의 정성적 평가과정에서는 다소 보수적인 값을 사용하여 선정대상과 제외부분을 결정하며 정량적 분석에서는 보수적인 값보다 실질적인 값을 적용하여 감지설비 또는 소화설비의 작동 시간과 범위를 예측하고 화재실의 열적 환경을 정확하게 평가하여야 한다. FPEtool의 경우 이에 대한 고려가 미흡하며 FAST, COMPBRN III, FIVE 등에서는 벽체의 구성 및 재질 등을 반영하여 열전달계수 또는 관련변수를 조정할 수 있으나 적용범위와 방법에 한계가 있으므로 이에 대한 프로그램 알고리즘의 보완과 입력 요소의 검토가 있어야 할 것으로 판단된다.

2.8 발전소 유지, 보수 및 운전 조치에 수반되는 유동적 가연물량과 종류

원자력발전소의 정상적 운전상태에서는 점화원 또는 가연물의 유동은 거의 없지만 계획 예방정비기간 또는 불시정지 등에 따른 긴급정비기간에는 발전소 전체 지역에 걸쳐 다수의 점화원과 가연물이 유동하게 되고 기기와 설비의 운전모드가 변경되며 설비의 배치상태가 달라진다. 규제 조항에서는 발전소의 상태가 변동되거나 운전모드가 변경될 경우 필요에 따라 심층방호능력과 안전성에 대한 여유도를 입증토록 요구하며, 성능위주의 방호기준에서도 규제 기관의 실행지침이 발표될 경우 과도상태에 대한 안전성 분석 요구가 있을 것으로 예상된다.

가. 유동성 점화원의 종류

- 1) 용접 및 보수 작업에 의한 불꽃, 나화, 담뱃불 등
- 2) 투입, 차단되는 Breaker류 및 기능시험 대상 전기기기에서의 전기스파크, 누전, 과열

11) 참고 : 1. SFPE Section 3/Chapter 9. Smoke and Heat Venting(P. L. Hinkley) 2. Methods of Quantitative Fire Hazard Analysis 3. STD. ASHRAE Chapter 51. Fire and Smoke Management 4. NFPA 94A, Recommended Practice for Smoke-Control System('96 edition)

- 3) 기계적 작업을 위한 고온체(열박음, 가열 작업)
- 4) 고온의 연소가스(디젤발전기, 보일러, 원동기)
- 5) 산화반응에 의한 발열(기름 형질, 보온재 누유) 등

나. 유동성 가연물의 종류

- 1) 기기 및 설비용 오일, 그리스, 폐유, 폐가스
- 2) 세척용 액체류(신나, 솔벤트 등) 및 사용된 냉매류
- 3) 기기 분해시 누설되는 가연성 가스류 및 인화성 액체류
- 4) 종이, 형질, 기기 보호용 덮개, 기타 A급 가연물
- 5) 임시 케이블 및 전선류
- 6) 덮개가 제거된 케이블 트레이, 전기 캐비넷 및 탈착된 활성탄. 필터류 등
- 7) 관통부, 출입문의 개방에 따른 가연물의 노출 등

3. 결론

위와 같이 원자력발전소에 화재 모델을 적용할 경우 기본적인 평가 대상인 세부 항목과 응용 가능한 Submodel을 간단히 살펴보았다. 이와 함께 대부분의 화재 모델은 연소 구역의 전반적인 화재거동과 열적 특성을 정성적이며 정량적으로 제공하므로 성능위주의 화재분석이 더욱 용이할 것으로 판단된다. 더 나아가, 컴퓨터 화재 모델링의 장점은 초기 결과뿐만 아니라 입력요소와 변수의 수정이나 개선으로 반복 수행한 결과를 이용하여 방호설비의 설계나 소화계통의 실용성을 평가할 수 있다는 점이다. 아래에는 FAST를 이용한 화재 모델링 최종 결과를 예시로 들었다.

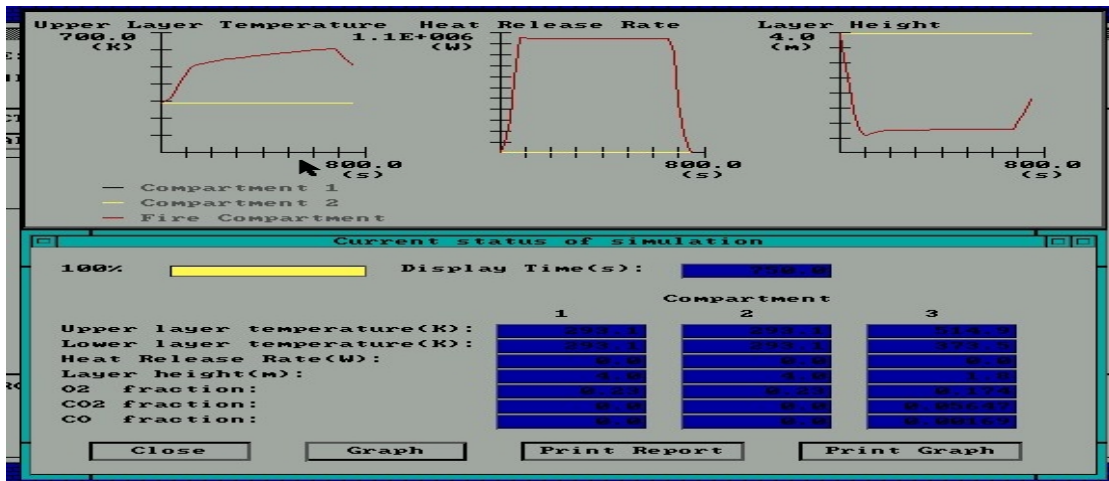


그림 6. 온도, 열발생율 및 연기층 높이를 그래프 및 수치로 보이는 최종 화면 : FAST

반면, 원자력발전소의 화재방호 기준이 성능위주의 규제 방식으로 변경될 경우에도 원전 고유의 안전성과 신뢰성 및 심층방호와 관련한 기존의 규범적 요건은 만족되어야 하며, 화재 모델에 의한 평가가 최종적인 해결 방안은 아니라는 관점에서 화재 모델링 방법의 개선과 미비점 보완 등을 통하여 기존 규정과의 상호 보완적 관계를 강화하여야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. NFPA 805, Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants. (2001 Edition)
2. NFPA 803, Standard for Fire Protection for Light Water Nuclear Power Plants. ('93 edition)
3. NISTIR 5486-1, "Technical Reference Guide for FPEtool Version 3.2", U.S. Department of Commerce, Technology Administration, NIST
4. "A User's Guide for FAST : Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport('20 edition)", U.S. Department of Commerce, Technology Administration, NIST
5. NUREG-1521, "Technical Review of Risk-Informed, Performance-Based Methods for Nuclear Power Plant Fire Protection Analysis(Draft for Comment)
6. Regulatory Guide 1.174, "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decision on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis"
7. Regulatory Guide 1.189, "Fire Protection for Operating Nuclear Power Plants", April, 2001
8. GDC -3 ; General Design Criteria for Nuclear Power Plants(Appendix A to Part 50)
9. Appendix R to 10 CFR 50 ; Fire Protection Program for Nuclear Power Facilities Operating Prior to Jan. 1, 1979
10. 10 CFR 50.48 ; Fire Protection
11. EPRI TR-108799, "Planning for Risk-Informed and Performance-Based Fire Protection at Nuclear Power Plant", Final Report, December, 1997
12. EPRI TR-105928, "Fire PRA Implementation Guide", Final Report, December, 1995
13. EPRI TR-100443, "Methods of Quantitative Fire Hazard Analysis", Final Report, May, 1992
14. "성능위주 소방설계를 위한 건축물 화재 모델링", 김 원국 저(서울대 화학공정학과 교수 및 WPI 방화공학과 겸임교수)
15. 해설 : 원자력 발전소 화재예방 기술기준 (KEPIC)
16. "원전 화재안전의 법적 규제 동향", 이 우호 박사(한국 원자력 안전기술원, PM)
17. "원전의 화재위험성 평가", 김태운((주)액트 대표 이사)
18. "원전 화재사건의 확률론적 안전성 평가", 정 범희(한국전력기술(주), 전력기술개발연구소 책임연구원)
19. Fire Protection Handbook(18 edition), NFPA
20. SFPE Fire Protection Engineering(2nd Edition), SFPE