[Research Paper]

이산화탄소소화설비 진압실패확률에 대한 밸브 기여도의 정량적 분석

임현태[†] · 김주성^{*}

주식회사 피엔이 대표, *한국원자력안전기술원 책임연구원

Quantitative Analysis of Valve Contribution to the Failure Probability of Carbon Dioxide Suppression System

Hyun-Tae Yim[†] · Joo-Sung Kim^{*}

President, PNE Co., Ltd.,

*Principal Researcher, Korea Institute of Nuclear Safety

(Received October 30, 2020; Revised December 3, 2020; Accepted December 3, 2020)

요 약

원자력발전소에는 비상디젤발전기, 유류 및 전기설비 등이 설치된 지역의 신속한 화재진압을 위하여 이산화탄소 소화설비가 설치되어 있다. 본 연구에서는 이산화탄소소화설비에 설치된 밸브의 작동 시나리오가 진압실패확률에 미치는 기여도를 정량적으로 분석하고, 화재 확률론적 안전성 평가[이하 화재 Probabilistic safety assessment (PSA)]에서 적용한 진압실패확률이 적절한지를 평가하였다. 공기조기방출장치의 적용/미적용 이산화탄소소화설비에 대한 신뢰도분석모델은 고장수목형태로 개발하였으며, 설비를 구성하는 주요 구성품에 대한 신뢰도데이터를 분석하였다. 신뢰도분석 결과에 따르면 공기조기방출장치를 적용한 이산화탄소소화설비의 실패확률은 6.22×10^{-3} /회로 평가되었으며 공기조기방출장치를 미적용한 이산화탄소소화설비의 실패확률에 비해 2.67배 높은 값이다. 이 결과는 화재지역으로 이산화탄소가 공급되기 이전에 장비관내의 잔류 공기를 대기로 방출하기 위한 급속배기밸브 및 우회유로 격리 밸브의 추가로 인한 것으로 판단된다. 또한 공기조기방출장치를 적용한 이산화탄소소화설비의 실패확률은 화재 PSA에서 적용한 진압실패확률의 15.6% 수준으로, 화재 PSA에서 사용한 진압실패확률이 보수적임 값을 확인하였다. 이산화탄소 소화설비에 대한 국내·외의 신뢰성 분석 경험이 없으며, 모든 화재 PSA에서는 NSAC-179L에서 권고하는 진압실패확률을 사용하고 있다.

ABSTRACT

Carbon dioxide suppression systems are used in nuclear power plants to extinguish oil fires and ensure integrity of critical equipment. In this study, the contributions of the valves in the carbon dioxide suppression system to the failure probability of suppression were quantitatively analyzed, and the failure probability of the fire suppression system applied to the fire Probabilistic Safety Assessment (PSA) was evaluated for appropriateness. Then, a reliability evaluation model was developed in the form of a fault tree, and the reliability data were analyzed for the major component. The failure probability of the carbon dioxide suppression system with early air-release equipment was assessed as 6.22×10^{-3} /demand, which is 2.67 times that of the system without such equipment. The results were attributed to the addition of the diverted line isolation valves and quick exhaust valve to release residual air into the atmosphere before supplying carbon dioxide to the fire area. It was also confirmed that the failure probability of the carbon dioxide suppression system with the early air-release equipment was 15.6% that of the suppression provided by the fire PSA and that the failure probability of suppression by the fire PSA was conservative. There are no reported guidelines in literature for analyzing the reliabilities of carbon dioxide fire suppression systems, and the fire PSA currently use the failure probability of suppression recommended by the NSAC-179L.

Keywords : Carbon dioxide suppression system, Reliability, Early-air-release equipment, Fault tree[†] Corresponding Author, TEL: +82-2-3409-5310, FAX: +82-2-3409-5312, E-Mail: hyuntaey@pnecorp.co.kr

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

1. 서 론

원자력발전소에는 비상디젤발전기, 유류 및 전기설비 등이 설치된 지역에는 저압식 이산화탄소소화설비가 설치된다. 저압식 이산화탄소소화설비는 소방청 고시 제2017-1호에 따라 유효성이 확인된 설계프로그램을 사용하여 설계하도록 제도화되어 있다. 대부분의 저압식 이산화탄소소화설비는 화재감지기가 작동하고 운전원 대피를 위한 방출유예 시간(30 s) 후에 이산화탄소 저장용기 개폐밸브와 방호지역 선택밸브가 개방되어 이산화탄소가 방출되도록 설계되어 있다. 그러나 이산화탄소 저장용기로부터 장거리에 있는 일부 방호구역에는 공기조기방출장치를 적용하여 방출능력이 설계기준을 만족하도록 하였다. 공기조기방출장치가 적용된 이산화탄소소화설비(이하, 공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비)는 방출유예시간동안에 배관내의 공기를 외부로 방출하고 저장용기의 이산화탄소가 방호지역의 선택밸브까지 공급되도록 설계하였다⁽¹⁾. 이를 위해 공기조기방출을 수행하는 급속배기밸브와 우회유로를 차단하기 위한 격리밸브가 추가로 설치되었으며, 추가로 설치된 여러 밸브의 작동이 필요하므로 작동신뢰도는 공기조기방출장치를 적용하지 않은 이산화탄소소화설비(이하, 공기조기방출장치 미적용 이산화탄소소화설비)에 비해 낮아질 것으로 예상되나, 지금까지 국내·외에서 이산화탄소소화설비에 대한 신뢰성 연구를 수행한 경험이 없다. 본 연구에서는 공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비와 공기조기방출장치 미적용 이산화탄소소화설비의 작동 신뢰성을 정량적으로 분석하고, 화재 PSA에서 적용한 진압실패확률이 적절한지를 평가하였다.

2. 본 론

2.1 신뢰도분석방법론

신뢰도분석방법론은 원자력발전소에 대한 모든 PSA에서 사용하고 있는 계통분석기법을 이용하였다. 계통분석은 계통의 기능 상실을 초래하는 사건조합을 체계적으로 분석하고 그 발생 가능성을 평가하는 방법이며, 본 연구에서는 계통분석기법 중에서 가장 널리 이용되는 고장수목분석(Fault tree analysis)⁽²⁾ 기법을 적용하였다.

계통분석은 1) 계통 친숙화, 2) 시나리오분석, 3) 고장수목분석 4) 신뢰도데이터분석, 5) 정량화분석의 순서로 수행한다.

2.1.1 계통 친숙화

계통 친숙화에서는 대상계통과 관련된 아래와 같은 정보를 수집 및 검토한다.

- 계통운전
- 계통구성
- 계통기능
- 연계성 및 종속성

상기 정보는 다음과 같은 자료로부터 얻을 수 있다.

- 최종 안전성 분석보고서
- 설계문서 및 도면
- 발전소 매뉴얼
- 계통운전절차서

계통 친숙화를 통해 구성품의 운전 모드에 따른 상태, 기능 실패로 인해 대상계통에 미치는 영향 등을 판단한다.

2.1.2 시나리오분석

시나리오분석에서는 분석대상 방호구역에서 화재가 발생하고 진압되기까지의 분석대상계통의 운전을 시간대별로 구분하고, 각 시간대에 작동이 요구되는 주요 구성품과 성공기준을 정한다. 각 시간대의 주요 구성품의 고장시 영향을 평가하여, 분석대상계통의 운전에 미치는 영향이 없는 구성품은 선별해서 제거하고, 영향이 있는 구성품은 고장수목분석의 대상으로 선정한다.

2.1.3 고장수목분석

고장수목은 시나리오에서 필요한 계통의 기능을 수행하지 못하는 상태가 되는 모든 경우를 ‘AND’, ‘OR’ 혹은 ‘NOT’의 논리 게이트를 사용하여 연역적으로 도식화한 논리수목이다. 시나리오의 시간대별로 화재진압에 필요한 구성품의 고장모드를 고장수목에 모델링하며, 구성품의 고장모드를 기본사건이라 한다. 기본사건과 논리 게이트에 대한 이름과 설명문은 일관된 형식으로 작성한다.

2.1.4 신뢰도데이터분석

계통 고장수목의 신뢰도 평가를 위해서는 고장수목에 모델링된 모든 기본사건에 대해 신뢰도데이터를 제공해야 한다.

국내 원자력발전소에서의 이산화탄소소화설비의 운전 경험이 반영된 신뢰도데이터가 가용하지 않으므로 본 연구에서는 국내 원전에 대한 PSA에서 일반 데이터베이스로 사용하고 있는 NUREG/CR-6928⁽³⁾의 2015년 개정된 신뢰도 데이터베이스를 사용한다. 이 자료는 미국 원자력규제위원회(NRC)가 미국 상용원전에서의 초기사건과 기기에 대한 산업체 평균 성능데이터를 분석하여 제공한 신뢰도 데이터베이스이며, 미국 규제기관과 원전사업자의 PSA 모델에서 사용하고 있다.

2.1.5 정량화분석

정량화분석은 시나리오에 대한 고장수목과 신뢰도데이터를 입력으로 계통의 신뢰도를 평가한다. 정량화는 PSA용 전산코드인 AIMS-PSA Release 2⁽⁴⁾를 이용하였다.

Figure 1. Simplified P & ID of carbon dioxide suppression system (with early-air-release equipment).

Figure 2. Simplified P & ID of carbon dioxide suppression system (without early-air-release equipment).

2.2 이산화탄소소화설비 신뢰도모델 개발

2.2.1 이산화탄소소화설비 계통구성

1) 공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비

공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비는 ① 지역 선택밸브(V001), ② 지역 급속배기밸브(V002), ③ 계열 공급모관 격리밸브(V003A/B), ④ 공동공급모관 격리밸브(V005), ⑤ 이산화탄소 저장용기 개폐밸브(V004), ⑥ 우회유로 격리밸브(V006, V008), ⑦ 이산화탄소 저장용기(TK01) 등으로 구성되어 있으며, Figure 1은 단순계통도이다.

2) 공기조기방출장치 미적용 이산화탄소소화설비

공기조기방출장치 미적용 이산화탄소소화설비는 ① 지역 선택밸브(V001), ② 이산화탄소 저장용기 개폐밸브(V004), ③ 이산화탄소 저장용기(TK01) 등으로 구성되어 있으며, Figure 2는 단순계통도이다.

2.2.2 이산화탄소소화설비 작동시나리오

1) 공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비

공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비의 작동 시나리오는 화재 발생부터 진압완료까지 아래와 같이 3단계로 구분되며, Table 1은 단계별 구성품의 작동상태를 나타내었다.

- 1단계(0 s : 화재 발생 및 감지기 작동)
 - 지역 화재감지기 작동
 - 주제어실/화재지역에 30 s간 화재경보
 - 이산화탄소 저장용기 개폐밸브 V004 개방
 - 공급모관 격리밸브 V005 개방
 - 지역 급속배기밸브 V002 개방
 - 타 계열 공급모관 격리밸브 V003A 닫힘
 - 격리밸브 V006 닫힘
- 2단계(30 s : 이산화탄소 방출 개시)
 - 지역 선택밸브 V001 개방
 - 지역 급속배기밸브 V002 재닫힘

Table 1. Component Status of Carbon Dioxide Suppression System (with Early-Air-Release Equipment)

Time	Component	Normal	Accident
Step1 (0 s)	V004	Close	Open
	V005	Close	Open
	V002	Close	Open
	V003A	Open	Close
	V003B	Open	Open
	V006	Open	Close
	V007	Open	Open
Step2 (30 s)	V002	Open	Close
	V001	Close	Open
Step3 (90 s)	V001	Open	Close
	V002	Close	Open

○ 3단계(90 s 이후 : 이산화탄소 방출 완료)

- 지역 선택밸브 V001 재닫힘
- 지역 급속배기밸브 V002 재개방

2) 공기조기방출장치 미적용 이산화탄소소화설비

공기조기방출장치 미적용 이산화탄소소화설비의 작동 시나리오는 화재 발생부터 진압완료까지 아래와 같이 3단계로 구분되며, Table 2는 단계별 구성품의 작동상태를 나타내었다.

- 1단계(0 s : 화재 발생 및 감지기 작동)
 - 지역 화재감지기 작동
 - 주제어실/화재지역에 30 s간 화재경보
- 2단계(30 s : 이산화탄소 방출 개시)
 - 이산화탄소 저장용기 개폐밸브 V004 개방
 - 지역 선택밸브 V001 개방
- 3단계(90 s 이후 : 이산화탄소 방출 완료)
 - 지역 선택밸브 V001 재닫힘

Table 2. Component Status of Carbon Dioxide Suppression System (without Early-Air-Release Equipment)

Time	Component	Normal	Accident
Step1 (0 s)	-	-	-
Step2 (30 s)	V004	Close	Open
	V001	Close	Open
Step3 (90 s)	V001	Open	Close

Table 3. Component Reliability Data

Component	Failure Mode	Failure Rate	Data Source
Air Operated Valve (AOV)	FTO	$7.78 \times 10^{-4}/d$	NUREG/C R-6928 2015
	FTC	$7.78 \times 10^{-4}/d$

Figure 3. Fault tree of carbon dioxide suppression system (with early-air-release equipment). **Figure 4.** Fault tree of carbon dioxide suppression system (without early air release equipment).

2.2.3 고장수목 개발

이산화탄소소화설비의 작동시나리오에 대하여 단계별로 고장수목을 개발하였다. 고장수목은 한국원자력연구원에서 개발한 PSA용 전산코드인 AIMS-PSA Release 2를 이용하여 작성하였다.

시나리오의 각 단계에서 작동하는 구성품의 고장모드를 기본사건으로 작성하였으며, 작동신호를 제공하는 화재감지기와 계기용압축공기, 전원공급 등의 지원계통은 공기조기방출장치의 적용과 상관없이 공통적인 영향을 미치므로 고장수목에 모델하지 않았다.

Figure 3과 Figure 4는 각각 공기조기방출장치 적용/미적용 이산화탄소소화설비의 작동 시나리오에 대한 단계별 고장수목이다.

2.2.4 신뢰도데이터분석

이산화탄소소화설비에 대한 고장수목에 모델링된 구성품은 공기구동밸브(Air-Operated Valve)이며, 공기구동밸브의 고장모드는 다음과 같다.

- 공기구동밸브 열림실패(Fails to open)
- 공기구동밸브 닫힘실패(Fails to close)

Table 3은 공기구동밸브에 대한 고장모드별 신뢰도데이터이며, 공기구동밸브의 경계는 밸브 자체, 밸브구동체(관련 솔레노이드 구동밸브 포함), 회로차단기, 계측 및 제어 회로이다.

2.3 설비 신뢰도 정량화

2.3.1 이산화탄소소화설비 신뢰도 분석 결과

1) 공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비 신뢰도
공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비의 진압실패 확률은 6.22×10^{-3} 으로 평가되었으며, 시나리오의 단계별 신뢰도는 아래와 같다.

- 화재발생(1단계) : 예비방출경보가 발생하며, 다음과 같은 5개의 밸브중에서 1개의 작동 실패로 이산화탄소 공급이 상실되는 시나리오이다.
 - 이산화탄소 저장용기 개폐밸브(V004) 개방
 - 공통공급모관 격리밸브(V005) 개방
 - 지역 급속배기밸브(V002) 개방
 - 타 계열 공급모관 격리밸브(V003A) 닫힘
 - 우회유로 격리밸브(V006) 닫힘

1단계의 진압실패확률은 3.89×10^{-3} 으로 전체 시나리오의 62.5%에 해당한다.

- 이산화탄소 방출 개시(2단계) : 30 s에 지역 선택밸브(V001)의 열림 또는 지역 급속배기밸브(V002)의 닫힘 실패로 인해 이산화탄소 공급이 실패한다. 2단계의 진압실패확률은 1.56×10^{-3} 으로 전체 시나리오의 25.0%에 해당한다.
- 이산화탄소 방출 완료(3단계) : 90 s에 지역 선택밸브(V001)의 재닫힘이 실패하여 이산화탄소가 지속적인

로 공급되어 격실 가압을 유발하는 시나리오이다. 3단계의 진압실패확률은 7.78×10^{-4} 로 전체 시나리오의 12.5%에 해당한다.

2) 공기조기방출장치 미적용 이산화탄소소화설비 신뢰도
공기조기방출장치 미적용 이산화탄소소화설비의 진압실패확률은 2.33×10^{-3} 으로 평가되었으며, 단계별 신뢰도분석결과는 아래와 같다.

- 화재발생(1단계) : 예비방출경보만 발생하며, 작동하는 구성품(밸브)은 없다.
- 이산화탄소 방출 개시(2단계) : 30 s에 지역 선택밸브(V001), 또는 이산화탄소 저장용기 개폐밸브(V004)의 개방 실패로 인해 이산화탄소 공급이 실패한다. 2단계의 진압실패확률은 1.56×10^{-3} 으로 전체 시나리오의 66.7%에 해당한다.
- 이산화탄소 방출 완료(3단계) : 90 s에 지역 선택밸브(V001)의 재단힘이 실패하여 이산화탄소가 지속적으로 공급되어 격실 가압을 유발하는 시나리오이다. 3단계의 진압실패확률은 7.78×10^{-4} 로 전체 시나리오의 33.3%에 해당한다.

3) 공기조기방출장치 적용에 따른 신뢰도 비교

공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비의 진압실패확률은 적용하지 않은 경우보다 2.67배 높은 것으로 평가되었다. 공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비의 실패조합은 모두 8개이며, 미적용 이산화탄소소화설비의 실패조합은 3개로 평가되었다. 공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비에서 추가된 5개의 실패조합은 지역 급속배기밸브의 열림실패와 재단힘실패, 2개의 우회유로 격리밸브의 닫힘실패, 그리고 공통공급모관 격리밸브의 열림실패인 것으로 평가되었다.

2.3.2 화재 PSA 진압실패확률 비교

화재 PSA에서는 화재진압설비인 이산화탄소소화설비의 진압실패확률을 작동방식과 무관하게 미국의 운전경험에 기반한 데이터를 사용하고 있다. 국내 원전에 대한 화재 PSA의 진압실패확률은 NSAC-179L⁽⁵⁾에서 제시한 값을 적용하였으며, 각 설비의 진압실패확률은 아래와 같다.

- 할론설비 : 0.05
- 이산화탄소소화설비 : 0.04
- 습식 스프링클러설비 : 0.02
- 준비작동식/델루지설비 : 0.05

신뢰도분석 결과에 따르면, 공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비의 진압실패확률이 6.33×10^{-3} 으로 화재 PSA에서 적용한 진압실패확률인 4.0×10^{-2} 의 15.6%이다. 공기조기방출장치 미적용 이산화탄소소화설비의 진압실패확률은 2.33×10^{-3} 으로 화재 PSA에서 적용한 확률의 5.8%에 해당한다.

화재 PSA에서 사용한 진압실패확률은 보수성을 고려한 권고 값이며, 본 연구에서 평가한 진압실패확률은 화재감지기(교차회로), 타이머 및 제어반과 지원계통(계기용압축공기계통, 전력공급계통)으로 인한 실패확률이 포함되지 않은 결과이므로, 화재 PSA에서 사용한 진압실패확률과의 단순 비교는 적합하지 않다. 신뢰도분석모델에 고려되지 않은 화재감지기와 전력공급모선의 신뢰도데이터는 NUREG/CR-6928에서 다음과 같이 제시하고 있다.

- 화재감지기 고장률: 8.15×10^{-4} /회(계측기 데이터)
- 제어전원 모선(BUS) 고장률 : 9.55×10^{-7} /시간
- 구동전원 모선(BUS) 고장률 : 2.17×10^{-7} /시간

화재 PSA에서 적용한 진압실패확률과의 비교를 위해 상기의 화재감지기와 전력공급모선의 신뢰도데이터를 참고로 해서 이산화탄소소화설비의 진압실패확률을 신뢰도분석결과의 2배로 가정하였다.

공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비의 진압실패확률은 1.27×10^{-2} 로 평가되었으며, 화재 PSA의 이산화탄소소화설비를 이용한 진압실패확률인 4.0×10^{-2} 의 31.2%이다. 결과적으로 화재 PSA에서 적용한 진압실패확률이 본 연구에서 평가한 값보다 크기 때문에 화재 PSA의 값을 변경할 필요가 없음을 확인하였다. 만약 공기조기방출장치의 적용으로 인해 이산화탄소소화설비의 신뢰도가 화재 PSA에서 적용한 진압실패확률을 초과하는 경우에는 화재 PSA의 결과인 노심손상빈도가 저평가되므로 진압실패확률은 더 높은값으로 적용해야 한다.

3. 결 론

본 연구에서는 이산화탄소소화설비에 설치되는 밸브의 작동 논리에 따라 동 설비의 진압실패확률에 미치는 기여도를 정량적으로 분석하였으며, 화재 PSA에서 적용한 진압실패확률이 적절한지를 평가하였다. 공기조기방출장치의 적용전과 적용후의 이산화탄소소화설비에 대한 신뢰도분석모델을 고장수목형태로 개발하였으며, 설비를 구성하는 구성품에 대한 신뢰도데이터를 구하였다.

공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비의 실패확률이 미적용 이산화탄소소화설비의 실패확률에 비해 2.67배 높으며, 화재 PSA에서 적용한 진압실패확률의 15.6%에 해당한다.

화재 PSA에서 적용한 진압실패확률의 비교를 위해 이산화탄소소화설비의 진압실패확률을 2배로 가정하였으며, 이 경우 공기조기방출장치 적용 이산화탄소소화설비의 진압실패확률은 1.27×10^{-2} 로 화재 PSA의 진압실패확률의 31.2% 수준인 것으로 나타났다. 결과적으로 화재 PSA에서 적용한 진압실패확률이 보수적임을 확인하였다.

국내 원전에 설치된 이산화탄소소화설비에 대해 개발된 신뢰도분석모델과 결과는 화재 PSA의 화재진압실패확률

의 적절성 평가를 위한 활용이 가능하다. 화재 PSA를 위한 이산화탄소소화설비 진압실패확률은 미국의 원자력시설 및 산업시설의 경험자료를 기반으로 산정한 것이며, 국내 원자력시설 및 일반 산업시설의 이산화탄소소화설비 진압실패확률을 산정하기 위한 국내 경험자료의 데이터베이스화 연구가 필요함을 제안한다.

후 기

본 연구는 한국원자력안전재단(No. 1805002)의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

References

1. J. S. Ma, "A Performance Evaluation of Low Pressure Carbon Dioxide System based on Early-Air-Release Method for Emergency Diesel Generator Room in Nuclear Power Plants", Doctoral Thesis, Jeonju University (2013).
2. NUREG-0492, "Fault Tree Handbook", U.S. Nuclear Regulatory Commission (1981).
3. NUREG/CR-6928, "Industry - Average Performance for Components and Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants", U.S. Nuclear Regulatory Commission (2015).
4. Korea Atomic Energy Research Institute, "AIMS- PSA Release 2" (2019).
5. U.S. NRC and EPRI, "Module III - Fire Analysis", Joint EPRI/NRC-RES Fire PRA Workshop, p. 407 (2019).