

VIPEX를 이용한 가상 원자력시설의 핵심구역 파악 분석

이윤환[†] · 정우식 · 이진홍^{*}

한국원자력연구원 · *충남대학교 환경공학과
(2010. 10. 25. 접수 / 2011. 8. 4. 채택)

Vital Area Identification Analysis of A Hypothetical Nuclear Facility Using VIPEX

Yoon Hwan Lee[†] · Woo Sik Jung · Jin-Hong Lee^{*}

Korea Atomic Energy Research Institute

^{*}Chungnam National University

(Received October 25, 2010 / Accepted August 4, 2011)

Abstract : The urgent VAI(Vital Area Identification) method development is required since ‘The Act of Physical Protection and Radiological Emergency’ that is established in 2003 requires an evaluation of physical threats in nuclear facilities and an establishment of physical protection in Korea. The KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute) has developed the VAI methodology and VAI software called as VIPEX(Vital area Identification Package EXpert) for identifying the vital areas. This study is to demonstrate the applicability of KAERI’s VAI methodology to a hypothetical facility, and to identify the importance of information of cable and piping runs when identifying the vital areas. It is necessarily needed to consider cable and piping runs to determine the accurate and realistic TEPS(Top Event Prevention Set). If the information of cable and piping runs of a nuclear power plant is not considered when determining the TEPSs, it is absolutely impossible to acquire the complete TEPSs, and the results could be distorted by missing it. The VIPEX and FTREX(Fault Tree Reliability Evaluation eXpert) properly calculate MCSs and TEPSs using the fault tree model, and provide the most cost-effective method to save the VAI and physical protection costs.

Key Words : vital area identification, sabotage, PSA, VIPEX, physical protection, TEPS, MCS, minimal cut set, hypothetical facility, target set

1. 서론

본 논문에서는 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment; PSA) 기법을 이용하여 외부의 침입 등으로 인해 가상 시설에서의 방사성 물질 누출과 같은 사건이 일어나지 않도록 하기 위해서 방호되어야 할 핵심구역을 결정하는 방법과 결과를 제시하고자 하며, 또한 핵심구역 파악 시, 케이블 포설 및 배관 위치 정보를 고려할 경우와 고려하지 않을 경우의 차이를 해석하고자 한다.

원자력발전소에는 상당한 양의 방사성 물질이 있으며, 만약 이러한 방사성 물질이 외부로 누출될 시, 작업자, 공공 및 환경에 방사선으로 인한 위험을 야기시킬 수 있다. 원자력발전소를 대상으로 한

사보타지와 같은 고의적인 행동으로 인해 직간접적으로 공중보건(public health) 및 공중안전(public safety)이 방사선으로 인한 위험에 노출될 수 있으며, 이러한 고의적인 행동은 방사능 사보타지(radiological sabotage)로서 10CFR73.2에 정의되어 있다¹⁾. 10CFR 73.55에서는 방사능 사보타지에 대비하여 원자력발전소를 보호해야 할 요건을 규정하고 있으며, 여기에는 핵심구역에 적용된 보호 방법(protection measure) 및 핵심구역 내 핵심기기(vital equipment)의 위치를 포함하고 있다²⁾. 따라서 각각의 원자력발전소 사업자 및 신규신청 사업자는 보호 방법을 적용해야 할 핵심구역을 확인하는 것이 필요하다.

핵심구역 파악을 위한 초창기 기준은 미국 원자력규제위원회의 USNRC Review Guideline 17이며, 이 문서에서는 기본적으로 모든 안전관련 기기들

[†] To whom correspondence should be addressed.
yhllee3@kaeri.re.kr

을 핵심기기로 정의하였다. USNRC Review Guideline 17은 NRC Regulatory Guide 1.29인 'Seismic Design Classification'을 참고하여 작성되었으며, 따라서 지진으로부터 보호해야 할 모든 기기들을 핵심기기로 규정하고 있으며, 또한 이 기기들은 핵심구역 내에 위치해 있어야 한다고 규정하고 있다. 그러나 USNRC Review Guideline 17 standard는 승인 및 검토자, 사업 신청자들에게 일관성 있게 적용되지 못하였다. 이러한 이유로 해서, 미국 원자력규제위원회는 원자력발전소의 핵심구역을 결정하기 위한 보다 체계적인 방법론을 개발하기 시작하였다^{3,4)}. 이러한 연구로부터 나온 주요 내용에는 발전소로부터 방사성 물질이 누출될 수 있는 사건들을 알아내기 위하여 고장수목(fault tree)과 같은 논리모델을 사용해야 하며, 고장수목의 사건을 해당 사건이 일어날 수 있는 구역(location)으로 바꿔줘야 하며, 마지막으로 고장수목을 정량화하여 (1) 공격자의 사보타지 시나리오가 성공하는 데 필요한 구역의 조합으로 이루어진 목표집합(target sets) 또는 노심손상 및 방사능 물질 누출을 유발하는 최소단절집합(Minimal Cut Sets; MCS)을 도출, (2) 공격자의 모든 사보타지 시나리오를 예방하기 위해 반드시 보호되어야 할 구역의 조합으로 이루어진 정점사건 저지집합(Top Event Prevention Sets; TEPS)을 도출해야 한다는 내용 등이 포함되어 있다.

확률론적 안전성평가 기법을 이용한 핵심구역 파악은 노심손상을 근본적으로 방지할 수 있는 최적의 조합인 구역들을 선정하는 작업이다. 즉, 원자력 시설의 사보타지에 의한 노심손상이나 수용 불가능할 정도의 방사성 물질의 누출을 미연에 방지하기 위하여 안전하게 보호되어야 할 기기 및 설비가 위치한 구역의 조합인 정점사건 저지집합을 찾아내는 것이다^{5,6)}. 확률론적 안전성평가에서는 노심손상 및 방사능 물질 누출을 유발하는 최소단절집합을 계산하여 노심손상빈도 및 대규모 방사성 물질 누출빈도를 계산한다. 반면, 핵심구역 파악에서는 확률론적 안전성평가 결과를 이용하여 사보타지 및 테러 등으로부터 원자력 시설을 보호할 수 있는 정점사건 저지집합(TEPS) 개념이 사용된다.

핵심구역을 정확하게 파악하기 위해서는 분석 대상 시설에 대한 운전 정보, 설치된 기기의 역할, 각 기기별 위치 등의 정보가 필수적으로 필요하며, 이를 바탕으로 분석 대상 기기를 선정해야 한다. 분석 대상 기기가 선정되었을 경우, 이 기기의 구동 전원 및 제어전원 케이블의 관통 경로 등을 파악

해야 하며, 또한 유체 배관의 위치 정보 역시 파악해야 한다. 이는 해당 기기의 케이블이 화재나 테러 등으로 인해 기능 상실할 경우, 해당 기기 역시 운전이 불가능하며, 유체 전달을 목적으로 하는 배관이 파손될 경우, 그 구역에 위치한 기기는 침수되어 운전이 불가능하기 때문이다. 국내 원자력발전소는 1단계 확률론적 안전성평가 모델뿐만 아니라 화재 및 침수 등을 포함하는 외부사건 확률론적 안전성평가 모델을 보유하고 있다. 따라서 한국 원자력연구원에서는 각 발전소의 확률론적 안전성평가 모델을 이용하여 해당 발전소의 핵심구역을 파악하는 방법론을 개발하였다. 이와 같이 케이블 및 배관 정보가 반영된 외부사건 모델을 가지고 핵심구역을 파악하게 되면, 테러리스트 등의 사보타지로 인한 방사성물질의 누출을 차단하기 위해 보호해야 할 구역을 효과적으로 그리고 정확하게 찾아낼 수 있다.

본 논문에서는 한국원자력연구원에서 개발한 핵심구역 파악 방법론을 사용하여 가상 원자력시설의 핵심구역을 구하였으며, 이 분석에 필요한 분석과정 및 분석 결과를 소개하였다. 또한 핵심구역 파악 시, 케이블 및 배관 위치정보의 중요성을 파악하기 위해서 3.4 정량화 분석에서는 케이블 및 배관 정보를 이용하여 핵심구역을 계산하였으며, 3.5 민감도 분석에서는 케이블 및 배관 정보를 고려하지 않고 핵심구역을 도출하였다.

2. 핵심구역 파악 방법론

2.1. 핵심구역 파악 방법론 개요

확률론적 안전성 평가 기법을 이용하여 원자력 시설의 핵심구역 파악, 즉 정점사건 저지집합을 구하기 위해서는 1) 일차적으로 내부사건 1단계 확률론적 안전성 평가 모델의 확보, 2) 내부사건 1단계 확률론적 안전성 평가 모델인 기초모델로부터 화재, 침수 및 배관파손 확률론적 안전성 평가 등의 외부사건 모델을 구축, 3) 구축된 각각의 모델을 통합하여 사보타지 모델 개발, 그리고 4) 사보타지 모델로부터 최소단절집합 및 정점사건 저지집합을 구한다⁷⁾.

상기 4단계를 통해 개발된 사보타지 모델로부터 노심손상에 이르는 최소단절집합을 계산하며, 이로부터 정점사건 저지집합을 구하게 된다. 즉, 사보타지 모델의 정량화 결과는 확률론적 안전성 평가 결과와 마찬가지로 최소단절집합의 형태로 나타난

다. 이 의미는 테러리스트가 수많은 최소단절집합 중 하나의 조합, 즉 하나의 조합 내 구성된 구역을 공격하면 노심손상을 일으킬 수 있다는 의미이다. 따라서 이 결과는 공격자에게 매우 중요하고 필요한 정보가 되는 한편, 원자력 시설을 방호하는 입장에서는 절대로 유출되어서는 안 될 정보이다. 그러므로 시설의 방호자 입장에서는 노심손상을 방지할 수 있는 중요한 구역의 조합된 정보가 필요하므로 상기에서 설명된 노심손상에 이르는 최소단절집합으로부터 시설의 방호자 입장에서 꼭 필요한 정점사건 저지집합을 구한다.

2.2. 핵심구역 파악을 위한 예제 시설

Fig. 1에 나타난 간단한 예제 시설 분석을 통해서 본 논문의 분석 대상인 가상 원자력시설의 핵심구역 파악 절차와 결과에 대한 이해를 돕고자 한다.

이 예제 시설에는 원자로와 같이 열을 발생시키는 시설 T₁, T₁의 냉각을 위해 냉각수를 순환시키는 펌프 P₁/P₂/P₃, 그리고 냉각수의 열 교환을 목적으로 설치된 열교환기 H₁/H₂ 등으로 구성된다.

Fig. 1에 나타난 예제를 고장수목 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$RMRS = BE(T_1) + [BE(P_1) \times BE(P_2) \times BE(P_3)] + [BE(H_1) \times BE(H_2)] \quad (1)$$

여기에서, RMRS(Radioactive Material Release Sequence)는 열 발생 시설 T₁의 냉각 실패에 기인한 방사성물질의 누출 시나리오, BE(T₁)은 T₁ 시설의 고장 기본사건, BE(P₁)은 펌프 P₁의 고장 기본사건,

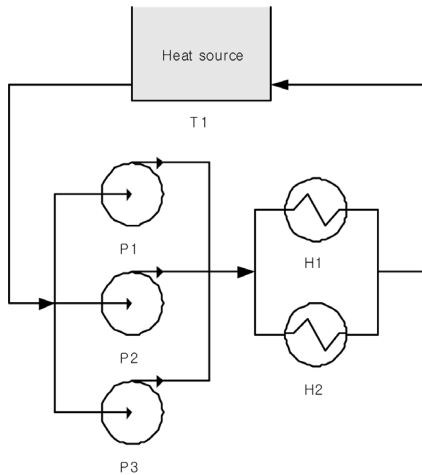


Fig. 1. Layout of a case facility.

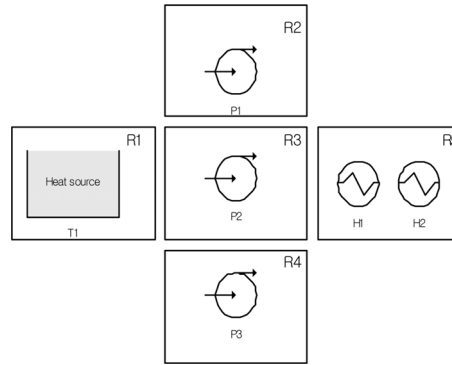


Fig. 2. Equipment placement in case facility.

Table 1. Mapping events to rooms

고장 기본사건	구역
BE(T ₁)	R1
BE(P ₁)	R2
BE(P ₂)	R3
BE(P ₃)	R4
BE(H ₁)	R5
BE(H ₂)	R5

BE(P₂)은 펌프 P₂의 고장 기본사건, BE(P₃)은 펌프 P₃의 고장 기본사건, BE(H₁)은 열교환기 H₁의 고장 기본사건 그리고 BE(H₂)은 열교환기 H₂의 고장 기본사건을 의미한다.

상기 Fig. 2는 각 구역별로 위치한 기기를 그림으로 나타내고 있다. 예를 들면 R2 구역에는 펌프 P₁, R5 구역에는 열교환기 H₁ 및 H₂가 위치하고 있다. Fig. 2는 단순히 기기별 위치를 방별로 표현한 것이며, 기기의 기능 수행 측면을 고려한 단순계통도는 Fig. 1에 나타난 바와 같다.

식 (1)의 BE(T₁), BE(P₁), BE(P₂), BE(P₃), BE(H₁), BE(H₂)과 같은 기본사건은 Fig. 2에 나타난 각 기기의 위치에 따라 Table 1과 같이 각 기기가 위치한 구역으로 대체된다.

상기 Table 1의 정보를 이용하여 각 기본사건을 각 기기가 위치한 구역으로 맵핑하면 다음 식으로 표현된다.

$$MCS = R_1 + R_2R_3R_4 + R_5 \quad (2)$$

상기 식 (2)으로부터 예제시설의 냉각실패를 일으키는 최소단절집합들은 {R₁}, {R₂R₃R₄}, {R₅}와 같이 세 가지가 존재한다. 각 최소단절집합으로부터 정점사건 저지집합을 구하는 방법은 1) 각 최소단절집합에서 AND 논리로 이루어진 조합을 OR 논

리로 연결하고, 2) OR 논리로 연결된 각각의 식을 AND 논리로 연결한다. 상기와 같은 두 가지 과정을 통해서 정점사건 저지집합을 구하면 다음 식 (3) 과 같이 표현된다.

$$TEPS = R_1(R_2+R_3+R_4)R_5 = R_1R_2R_5+R_1R_3R_5+ R_1R_4R_5 \quad (3)$$

최종적으로 파악된 핵심구역의 조합, 즉 정점사건 저지집합은 $\{R_1R_2R_5\}$, $\{R_1R_3R_5\}$ 및 $\{R_1R_4R_5\}$ 이다. 따라서 시설의 방호자 입장에서 상기 세 개의 정점사건 저지집합 중 비용-효과 측면에서 좋은 한 개의 정점사건 저지집합을 선택하여 해당 구역을 방호하면 된다. 즉, 해당 시설을 테러 또는 사보타지 등의 공격으로 인한 방사성 물질 누출의 위험으로부터 안전하게 보호할 수 있다는 의미이다.

3. 가상시설의 핵심구역 파악

3.1. 가상시설 개요

본 논문에서 가정된 가상시설은 David P. Blanchard의 논문인 “Risk-Informed Physical Security; Dynamic Allocation of Resources”⁸⁾에 기반하였으며, 가상시설의 배치도는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 가상시설은 핵물질 처리 공정 시설로서, Area-1에 위치한 Glove Box 내에서는 핵물질 처리가 수행된다. 핵물질 처리 공정 중 발생하는 열을 제거하기 위해 기기냉각수(Component Cooling Water; CCW) 계통의 계열(train) A/B가 Glove Box에 냉각수를 공급하며, 각 계열은 한 대씩의 모터구동펌프가 설치되어 있다. 또한 기기냉각수계통의 냉각을 위해 용수(Service Water; SW) 계통의 계열 A/B가 기기냉각수계통에 냉각수를 공급하며, 각 계열에

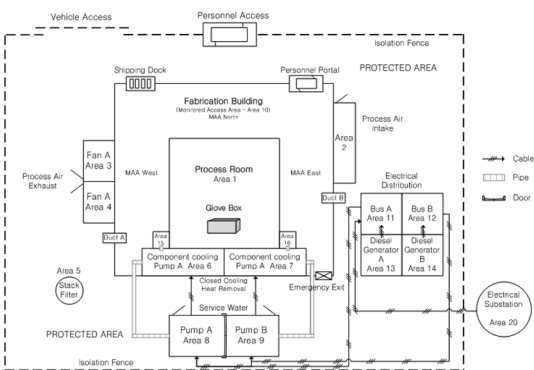


Fig. 3. Layout of a hypothetical facility.

는 한 대씩의 모터구동펌프가 설치되어 있다. 기기 냉각수계통 및 용수계통의 모터구동펌프는 정상 운전 시 각각 Area-11 및 12의 전기 모선(bus) A 및 B에서 전원을 공급 받으며, 모선 A 및 B의 전원 차단 시, Area-13 및 14에 설치된 디젤발전기에서 각각 전원을 받는다. 정상 전원 및 디젤발전기 전원 공급 실패 시, 독립된 건물(Area-20)에 설치된 변전소(substation)로부터 Area-11의 모선 A에 전원이 공급되도록 가정하였다. Area-15 및 16에는 Area-8 및 9로부터 각각 용수계통 배관이 관통하여 각기 Area-6 및 7로 연결되며, Area-8과 9 간에는 방화문이 존재하는 것으로 가정하였다.

3.2. 가상시설의 고장수목 구성

가상시설의 핵심구역을 파악하기 위해서 2.1에 설명한 4 단계 중 첫 번째 단계로서, 분석 대상 시설에 대한 고장수목을 구성한다. Fig. 4는 본 논문의 분석 대상 시설인 가상시설의 고장수목으로서, 정점사건은 Glove Box의 냉각실패에 기인한 과열 발생으로 인해 방사성 물질이 누출되는 사고이다. 그림에 나타난 바와 같이 핵물질 처리 공정 중 발생하는 열을 제거하기 위해 Glove Box에 기기냉각수계통 계열 A 및 B 모두가 냉각수 공급에 실패하면 정점사건이 발생하게 된다.

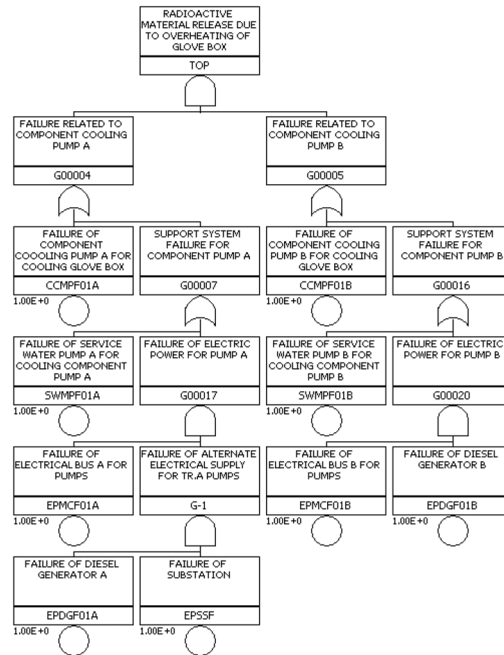


Fig. 4. Fault tree of hypothetical facility.

3.3. 사보타지 모델로의 변환

2.1에 설명한 핵심구역 파악 방법론의 2단계에서는 내부사건 1단계 확률론적 안전성평가 모델인 기초모델로부터 화재, 침수 및 배관파손 확률론적 안전성평가 모델 등의 외부사건 모델을 구축하도록 되어 있다. 핵심구역 방법론의 2 단계에서 화재 및 침수 확률론적 안전성평가 모델을 구축하여 사보타지 모델로의 변환에 사용하는 이유는 화재 및 침수모델에는 전기케이블 및 배관 위치 정보에 따라 영향 받는 기기가 모델링 되어 있기 때문이다. 그러나 본 논문의 가상 원자력시설의 확률론적 안전성평가 모델은 상기 Fig. 4와 같이 매우 간단하여, Table 3 및 4와 같이 맵핑 테이블을 이용하면 별도의 화재 및 침수 확률론적 안전성평가 모델을 필요로 하지 않는다. 따라서 이번 단계에서는 핵심구역 파악 방법론 중 3단계로서, Fig. 4의 고장수목 모델을 Table 3 및 4의 맵핑 테이블을 이용하여 사보타지 모델로 변환하도록 한다.

3.3.1. 구역별 기기, 케이블 및 배관 정보

가상시설의 각 구역에 위치한 기기, 케이블 및 배관 정보는 Table 2에 나타난 바와 같다. 총 9개의 기기 중 용수계통 모터구동펌프인 ‘SWMPF01A’를 예로 들자면, 모터구동펌프는 Area-8에 위치하며, 관련 케이블은 Area-8 및 11, 그리고 관련 배관은

Table 2. Component, cable and piping information

Component	Component Description	Component Location	Cable Run Location	Pipe Run Location
CMPF01A	Cooling pump A	AREA-6	AREA-6 AREA-8 AREA-11	AREA-6
CCMPF01B	Cooling pump B	AREA-7	AREA-7 AREA-9 AREA-12	AREA-7
SWMPF01A	Service water pump A	AREA-8	AREA-8 AREA-11	AREA-6 AREA-8 AREA-15
SWMPF01B	Service water pump B	AREA-9	AREA-9 AREA-12	AREA-7 AREA-9 AREA-16
EPMCF01A	Electrical bus A	AREA-11	AREA-11	-
EPMCF01B	Electrical bus B	AREA-12	AREA-12	-
EPDGF01A	Diesel generator A	AREA-13	AREA-11 AREA-13	-
EPDGF01B	Diesel generator B	AREA-14	AREA-12 AREA-14	-
EPSSF	Electrical substation	AREA-20	AREA-11 AREA-20	-

Area-6, 8 및 15에 위치하고 있다. 이와 같은 정보를 토대로 핵심구역 파악용 소프트웨어인 VIPEX^{9,10}의 입력용 데이터베이스를 구축한다.

3.3.2. VIPEX 입력용 DB 구축

VIPEX 입력용 DB는 Microsoft Office Access 프로그램을 이용하며, 상기 Table 2의 자료에 기반한다. 입력용 DB의 테이블 중 최소단절집합 및 정점사건 저지집합의 정량화에 필요한 케이블 및 배관 정보는 Table 3 및 4에 나타내었다.

3.3.3. 사보타지 모델로의 변환

핵심구역 파악을 위한 소프트웨어인 VIPEX^{9,10}를 이용하여 Fig. 2의 가상시설 고장수목을 Fig. 3과 같은 사보타지 모델로 변환한다. 사보타지 모델로의 변환 시, JSTAR¹¹ 방법의 전환규칙을 사용하여 변환하며⁷⁾, 케이블 및 배관 위치 정보를 모델에 반영하기 위하여 상기 Table 3 및 4의 맵핑 테이블을 사용한다.

Table 3. Information of cable run

Name	Events
FAREA-11	EPMCF01A, CCMPF01A, SWMPF01A, EPDGF01A, EPSSF
FAREA-12	EPMCF01B, CCMPF01B, SWMPF01B, EPDGF01B
FAREA-13	EPDGF01A
FAREA-14	EPDGF01B
FAREA-20	EPSSF
FAREA-6	CCMPF01A
FAREA-7	CCMPF01B
FAREA-8	SWMPF01A, CCMPF01A
FAREA-8_FAREA-9	CCMPF01A, CCMPF01B, SWMPF01A, SWMPF01B
FAREA-9	SWMPF01B, CCMPF01B
FAREA-9_FAREA-8	CCMPF01A, CCMPF01B, SWMPF01A, SWMPF01B

Table 4. Information of piping run

Name	Events
WAREA-7	CCMPF01B, SWMPF01B
WAREA-8	SWMPF01A
WAREA-9	SWMPF01B
WAREA-15	SWMPF01A
WAREA-16	SWMPF01B
WAREA-6	CCMPF01A, SWMPF01A

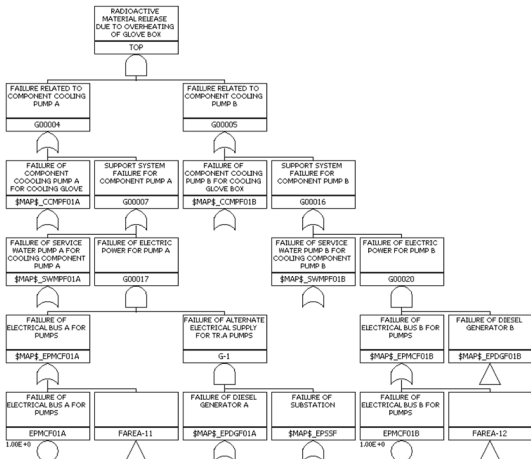


Fig. 5. Sabotage model of a hypothetical facility.

3.4. 정량화

3.4.1. 최소단절집합 도출

Fig. 3에 나타난 가상시설의 사보타지 모델을 VIPEX^{9,10)}를 이용하여 정량화하였다. 정량화 결과는 아래 Table 5와 같이 방사성 물질의 누출을 일으키는 구역으로 조합된 총 16개의 최소단절집합으로 나타난다.

최소단절집합, 즉 방사성 물질 누출을 유발하는 구역의 조합 중 첫 번째 최소단절집합을 살펴보면, {Area-6, Area 7}로 표현된다. 이 의미는 Area-6과 Area-7이 동시에 테러 또는 사보타지 등에 의해 공격을 받아 격실 내 Glove Box의 냉각을 위해 설치

Table 5. MCSs results of sabotage model

	Event 1	Event 2
1	AREA-6	AREA-7
2	AREA-6	AREA-9
3	AREA-6	AREA-12
4	AREA-6	AREA-16
5	AREA-7	AREA-8
6	AREA-7	AREA-11
7	AREA-7	AREA-15
8	AREA-8	AREA-9
9	AREA-8	AREA-12
10	AREA-8	AREA-16
11	AREA-9	AREA-11
12	AREA-9	AREA-15
13	AREA-11	AREA-12
14	AREA-11	AREA-16
15	AREA-12	AREA-15
16	AREA-15	AREA-16

된 A 및 B 계열의 냉각수펌프가 모두 기능 상실하게 되어, 결국 Fig. 4의 정점사건과 같이 Glove Box의 냉각실패에 기인한 과열 발생으로 인해 방사성 물질이 누출되는 사고가 발생한다는 의미이다. 따라서 이 결과는 공격자에게 매우 중요하고 필요한 정보가 되는 한편, 원자력 시설을 방호하는 입장에서는 절대로 누출되어서는 안 될 정보이다. 또한 시설의 방호자 입장에서는 방사성 물질의 누출을 방지할 수 있는 격실의 조합된 정보가 필요하므로 상기 결과를 바탕으로 시설의 방호자 입장에서 꼭 필요한 정점사건 저지집합을 구하였다.

3.4.2. 정점사건 저지집합 도출

가상 시설의 핵심구역 파악을 위해서 최소단절집합으로부터 정점사건 저지집합을 계산하였다. 각 최소단절집합으로부터 정점사건 저지집합을 구하는 방법은 1) 각 최소단절집합에서 AND 논리로 이루어진 조합을 OR 논리로 연결하고, 2) OR 논리로 연결된 각각의 식을 AND 논리로 연결한다. 상기와 같은 두 가지 과정을 통해서 Fig. 4와 같이 정점사건 저지집합을 구하였다.

최종적으로 파악된 핵심구역의 조합, 즉 정점사건 저지집합은 {Area-6, Area-8, Area-11, Area-15} 및 {Area-7, Area-9, Area-12, Area-16}이다. 따라서 시설의 방호자 입장에서 상기 두 개의 정점사건 저지집합 중 비용-효과 측면에서 좋은 한 개의 정점사건 저지집합을 선택하여 해당 구역을 방호하면 된다. 즉, 해당 시설을 테러 또는 사보타지 등의 공격으로 인한 방사성 물질 누출의 위협으로부터 안전하게 보호할 수 있다는 의미이다.

3.5. 민감도 분석

상기 분석 결과는 가상 시설에 설치된 기기의 전기 케이블 및 관련 배관 정보를 분석에 활용하여, 해당 기기가 위치한 구역뿐만 아니라 케이블 및 배관이 위치한 구역이 테러 등에 의해 파괴되었을 경우에도 그 영향을 고려한 결과이다. 만약 시설에 설치된 기기의 전기 케이블 및 관련 배관 정보를 분석에 고려하지 않고, 각 구역에 위치한 기기만을 고려하여 핵심구역, 즉 정점사건 저지집합을 구할 경우

Table 6. TEPs results of sabotage model

	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4
1	AREA-6	AREA-8	AREA-11	AREA-15
2	AREA-7	AREA-9	AREA-12	AREA-16

에는 테러나 사보타지로부터 해당 시설을 안전하게 보호하지 못할 수 있다. 따라서 본 민감도 분석에서는 상기 분석과는 달리 기기의 전기 케이블 및 배관 정보를 분석에 고려하지 않고, 각 구역에 위치한 기기만을 고려하여 최소단절집합 및 정점사건 저지집합을 구하였다.

3.5.1. 최소단절집합 도출

전기 케이블 및 배관 정보를 분석에 고려하지 않은 경우의 최소단절집합을 Table 7에 나타내었다. 총 9개의 최소단절집합을 얻었으며, 케이블 및 배관 정보를 고려한 Table 5의 경우와 비교해 볼 때, 4개의 최소단절집합만이 같음을 알 수 있다. 최소단절집합, 즉 방사성 물질 누출을 유발하는 구역의 조합 중 첫 번째 최소단절집합을 살펴보면, {Area-6, Area 7}로 표현된다. 이 의미는 Area-6과 Area-7이 동시에 테러 또는 사보타지 등에 의해 공격을 받아 격실 내 Glove Box의 냉각을 위해 설치된 A 및 B 계열의 냉각수펌프가 모두 기능 상실하게 되어, 결국 Fig. 4의 정점사건과 같이 Glove Box의 냉각실패에 기인한 과열 발생으로 인해 방사성 물질이 누출되는 사고가 발생한다는 의미이다.

3.5.2. 정점사건 저지집합 도출

전기 케이블 및 배관 정보를 분석에 고려하지

않은 경우의 정점사건 저지집합을 Table 5에 나타내었다. 총 5개의 정점사건 저지집합을 얻었으며, 케이블 및 배관 정보를 고려한 Table 6의 2개의 정점사건 저지집합과 비교해 보면 모두 다른 구역의 조합임을 알 수 있다.

3.6. 전기케이블 및 배관 위치 정보 고려 유무에 따른 결과 비교

3.4 정량화의 분석에서는 가상 시설에 설치된 기기의 전기 케이블 및 관련 배관 정보를 분석에 활용하여, 해당 기기가 위치한 구역뿐만 아니라 케이블 및 배관이 위치한 구역이 테러 등에 의해 파괴되었을 경우에도 그 영향을 고려하였다. 반면, 3.5 민감도 분석에서는 기기의 전기 케이블 및 배관 정보를 분석에 고려하지 않고, 각 구역에 위치한 기기만을 고려하여 최소단절집합 및 정점사건 저지집합을 구하였다.

상기 두 경우의 분석에서 도출된 최소단절집합을 비교하면 Table 9에 나타난 바와 같다.

상기 Table 9에 나타난 바와 같이 전기케이블 및 배관 위치 정보를 분석에 고려한 경우와 고려하지 않은 경우, {Area-6, Area-7}, {Area-6, Area-9}, {Area-7, Area-8}, {Area-8, Area-9} 총 4개의 최소단절집합만이 같음을 알 수 있다. 왜 서로 다른 결과

Table 7. MCSs analyzed without cable and piping run information

No.	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5
1	AREA-6	AREA-7			
2	AREA-6	AREA-9			
3	AREA-7	AREA-8			
4	AREA-8	AREA-9			
5	AREA-12	AREA-14	AREA-8		
6	AREA-12	AREA-14	AREA-6		
7	AREA-11	AREA-13	AREA-20	AREA-9	
8	AREA-11	AREA-13	AREA-20	AREA-7	
9	AREA-11	AREA-12	AREA-13	AREA-14	AREA-20

Table 8. TEPs analyzed without cable and piping run information

No.	Event 1	Event 2	Event 3
1	AREA-7	AREA-9	AREA-12
2	AREA-7	AREA-9	AREA-14
3	AREA-6	AREA-8	AREA-11
4	AREA-6	AREA-8	AREA-13
5	AREA-6	AREA-8	AREA-20

Table 9. MCSs analyzed with and without information of cable and piping runs

	With cable and piping runs		Without cable and piping runs				
	Event 1	Event 2	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5
1	AREA-6	AREA-7	AREA-6	AREA-7			
2	AREA-6	AREA-9	AREA-6	AREA-9			
3	AREA-6	AREA-12	AREA-6	AREA-12	AREA-14		
4	AREA-6	AREA-16	AREA-7	AREA-8			
5	AREA-7	AREA-8	AREA-7	AREA-11	AREA-13	AREA-20	
6	AREA-7	AREA-11	AREA-8	AREA-9			
7	AREA-7	AREA-15	AREA-8	AREA-12	AREA-14		
8	AREA-8	AREA-9	AREA-9	AREA-11	AREA-13	AREA-20	
9	AREA-8	AREA-12	AREA-11	AREA-12	AREA-13	AREA-14	AREA-20
10	AREA-8	AREA-16					
11	AREA-9	AREA-11					
12	AREA-9	AREA-15					
13	AREA-11	AREA-12					
14	AREA-11	AREA-16					
15	AREA-12	AREA-15					
16	AREA-15	AREA-16					

가 나왔는가를 설명하기 위한 예로서 Table 9에서 케이블과 배관 정보가 고려된 경우의 13 번째 최소단절집합 {Area-11, Area-12}와 Table 9의 케이블과 배관 정보가 고려되지 않은 경우의 9 번째 최소단절집합 {Area-11, Area-12, Area-13, Area-14, Area-20}을 비교해 보았다. 우선 케이블 및 배관 정보를 고려하여 도출된 최소단절집합 {Area-11, Area-12}의 경우, Area-11에는 냉각펌프 및 용수펌프의 전력 케이블, 펌프의 전원 공급용 모선, Area-13에 위치한 디젤발전기의 케이블 및 Area-20에 위치한 변압기의 케이블이 위치하고 있으므로, 만약 Area-11이 어떤 이유로 인해 이용불가능한 상태가 된다면, Area-13 및 Area-20에 위치한 기기 역시 이용 불가능한 상태를 초래하게 한다. 마찬가지로 Area-12가 이용불가능한 상태가 된다면, Area-14 역시 이용 불가능한 상태가 초래된다. 그러나 기기의 전기 케이블과 배관 관련 정보를 고려하지 않으면 {Area-11, Area-12, Area-13, Area-14, Area-20}과 같은 최소단절집합을 얻게 된다. {Area-11, Area-12, Area-13, Area-14, Area-20}과 같은 단절집합 결과는 정상적으로 케이블과 배관 정보를 고려하였을 경우, {Area-11, Area-12}라는 최소단절집합에 흡수되는 단절집합 중 하나일 뿐이다.

또한 Table 9에서 케이블 및 배관 정보를 고려한 분석 결과에서는 {Area-15, Area-16}과 같은 최소단절집합이 계산되는 반면, Table 9의 케이블 및 배관정보를 고려하지 않은 분석 결과에는 {Area-15, Area-16}과 같은 최소단절집합을 발견할 수 없다. Area-15 및 16에는 Area-8 및 9로부터 각각 용수계통 배관이 관통하여 각각 Area-6 및 7로 연결된다. 사보타지 등의 이유로 인해 Area-15 및 16에 위치한 배관에서 파손이 일어날 경우, Area-6 및 7에 설치된 기기냉각수펌프에 냉각수 공급이 실패하여 Fig. 2의 정점사건이 발생하게 된다. 그러나 배관 위치 정보를 고려하지 않은 분석에서는 이러한 최소단절집합이 부족한 입력 정보 때문에 나타나지

않는다. 이와 같은 결과는 결국 최소단절집합으로부터 계산되어지는 정점사건 저지집합의 결과에 영향을 미치게 된다. 따라서 Fig. 2와 같은 정점사건이 일어나게 만드는 최소단절집합을 정확하게 계산하기 위해서는 반드시 전기케이블 및 배관 위치 정보가 분석에 사용되어야 한다.

3.4 정량화의 분석에서는 가상 시설에 설치된 기기의 전기 케이블 및 관련 배관 정보를 분석에 활용하여, 해당 기기가 위치한 구역뿐만 아니라 케이블 및 배관이 위치한 구역이 테러 등에 의해 파괴되었을 경우에도 그 영향을 고려하였다. 반면, 3.5 민감도 분석에서는 기기의 전기 케이블 및 배관 정보를 분석에 고려하지 않고, 각 구역에 위치한 기기만을 고려하여 최소단절집합 및 정점사건 저지집합을 구하였다.

상기 두 경우의 분석에서 도출된 정점사건 저지집합을 비교하면 Table 10에 나타난 바와 같다. 전기케이블 및 배관 위치 정보를 분석에 고려한 경우와 고려하지 않은 경우, 모두 다른 정점사건 저지집합이 계산됨을 알 수 있다. 왜 서로 다른 결과가 나왔는가를 설명하기 위한 예로서 Table 10에서 케이블 및 배관 정보를 고려하지 않은 경우의 네 번째 정점사건 저지집합 {Area-7, Area-9, Area-12}와 Table 10에서 케이블 및 배관 정보를 고려한 경우의 두 번째 정점사건 저지집합 {Area-7, Area-9, Area-12, Area-16}을 비교해 보았다. 두 결과 값 중 서로 다른 구역 Area-16에는 Area-7에 위치한 기기 냉각수 계통의 냉각에 필요한 용수계통의 배관이 위치하고 있다. Table 10과 같이 {Area-7, Area-9, Area-12}의 3개 구역만을 보호할 경우, Area-16 구역의 테러 등으로 인해 배관 파손이 발생하면, Glove Box의 냉각실패로 인해 방사성 물질의 누출이 발생하게 된다. 따라서 Fig. 2의 정점사건인 Glove Box의 과열로 인한 방사성 물질의 누출 관점에서 시설을 테러나 사보타지로부터 안전하게 보호하자면 {Area-7, Area-9, Area-12, Area-16}을 핵심구역으로 선정하고 보호해야 한다. 이와 같이 기기의 전기 케이블과 배관 관련 정보를 고려하지 않으면, 테러나 사보타지 등으로부터 시설을 안전하게 보호하기 위하여 선정되어야 할 핵심구역이 불완전하게 설정되는 결과를 초래한다.

4. 결론

본 논문에서는 확률론적 안전성 평가 기법을 이

Table 10. TEPs analyzed with and without information of cable and piping runs

	With cable and piping runs				Without cable and piping runs		
	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 1	Event 2	Event 3
1	AREA-6	AREA-8	AREA-11	AREA-15	AREA-6	AREA-8	AREA-11
2	AREA-7	AREA-9	AREA-12	AREA-16	AREA-6	AREA-8	AREA-13
3					AREA-6	AREA-8	AREA-20
4					AREA-7	AREA-9	AREA-12
5					AREA-7	AREA-9	AREA-14

용하여 외부의 침입 등으로 인해 가상 시설에서의 방사성 물질 누출과 같은 사건이 일어나지 않도록 하기 위해서 방호되어야 할 핵심구역을 결정하는 방법과 결과를 제시하였으며, 또한 핵심구역 파악 시, 케이블 포설 및 배관 위치 정보를 고려할 경우와 고려하지 않을 경우의 차이를 해석하였다. 방사성 물질 누출을 방지하기 위하여 설치된 기기의 전기 케이블 및 배관 정보가 반영된 모델을 가지고 핵심구역을 파악하게 되면, 테러리스트 등의 사보타지로 인한 방사성 물질의 누출을 차단하기 위해 보호해야 할 구역을 효과적으로 그리고 정확하게 찾아낼 수 있었다. 이에 반하여 기기의 전기 케이블과 배관 관련 정보를 고려하지 않으면, 테러나 사보타지 등으로부터 시설을 안전하게 보호하기 위하여 선정되어야 할 핵심구역이 불안정하게 설정되는 결과를 초래하였다. 따라서 분석 대상 시설의 핵심구역을 파악하기 위해서는 시설 내 기기의 위치뿐만 아니라, 관련 기기의 케이블 및 배관 정보 등을 모두 고려하여 분석하는 것이 필요하다. 본 논문에서 가상시설을 대상으로 제안한 핵심구역 파악 방법은 세계적으로 요구되고 있는 원자력 시설에 대한 외부 침입 방지 및 저지 등의 방호 분야에 매우 효과적으로 활용 가능하며, 원자력발전소와 같이 매우 복잡하고 다수의 구역을 가진 시설의 핵심구역을 파악하는 데 매우 효과적이라고 판단된다.

감사의 글 : 이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

참고문헌

- 1) 10Code of Federal Regulations, Part 73.2, USA.
- 2) 10Code of Federal Regulation, Part 73.55, USA.
- 3) D. D. Boozer, et al., Safeguards System Effectiveness Modeling, SAND76-0428, Albuquerque, NM, 1976.
- 4) G. B. Varnado and N. R. Ortiz, Fault Tree Analysis for Vital Area Identification, NUREG/CR-0809, SAND79-0946, Albuquerque, NM, USNRC, Washington DC, June 1979.
- 5) 황미정, 정우식, 이윤환, 핵심구역 선정 방법 개발, KAERI/TR-3692/2008, 2008.
- 6) C. K. Park, W. S. Jung, J. E. Yang, H. G. Kang, "Development of a PSA-based Vital Area Identification Methodology for the Physical Security of Nuclear Power Plants", PSAM7, Berlin, June 12-19, 2004.
- 7) 이윤환, 정우식, "PSA 기법을 이용한 원자력시설의 핵심구역 파악", 한국안전학회지, 제24권, 제5호, pp. 63~68, 2009.
- 8) D. P. Blanchard, G. B. Varnado, "Risk-Informed Physical Security; Dynamic Allocation of Resources", International Topical Meeting on Probabilistic Safety Analysis PSA 05, San Francisco, September, 2005.
- 9) W. S. Jung, "Vital Area Identification Method Development using External Event PSAs", Proceeding of the ANS 2009 Annual Meeting, 2009.
- 10) W. S. Jung, "VIPEX Manual" KAERI/UM-13/ 2006, 2006.
- 11) W. S. Jung, Y. H. Lee, "Development of a New Quantification Method for a Fire PSA", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 94, pp. 1650~1657, 2009.