원전 방사능 누출 사고 대비 주민 방사선피폭 저감 및 주민 보호 훈련 시나리오 개발

Development of Training System for Radiation Exposure Reduction and Protection of Local Residents against Radioactivity Release Accidents at Nuclear Power Plants

김태영* · 이경호** · 채산*** · 하승현**** · 정세원***** · 이운장*****

Kim, TaeYoung*, Lee, KyungHo**, Chae, San***, Ha, SeungHyun****, Chung, SeWon*****,
and Lee, UnJang*****

Abstract

After the Fukushima accident in March 2011, radiological emergency preparedness became a source of concern for the local government and residents near nuclear power plants, and the level of preparedness was strengthened. To maximize the level of radiological emergency preparedness, efficient countermeasures for different virtual accidents are required. In particular, the training method to reduce radiation exposure and increase protection for local residents near nuclear power plants is extremely important. Since radiation exposure of local residents is related to the disperse of radiation sources and natural environmental conditions such as atmospheric stability and wind direction, an optimized virtual radiological emergency preparedness training system using virtual reality (VR) was developed taking the related factors into account. This paper reports the developed cases of the training system based on VR for local residents to reduce radiation exposure efficiently in cases of radioactivity release accidents.

Key words : Radioactivity Release Accident, Radiological Preparedness Training, Virtual Reality (VR), Radiation Exposure, Atmospheric Stability

요 지

2011년 3월 일본 후쿠시마 원전 사고 이후 방사능방재훈련에 대한 관심이 원자력발전소 주변 지자체 및 지역 주민을 위주로 크게 대두되었고 방사능방재훈련도 강화되었다. 방사능방재훈련의 효율을 극대화하기 위해서는 다양한 가상 사고를 고려한 대처가 효율적으로 수행되어야 하며, 특히 주민 방사선피폭 저감 및 주민보호를 조치 할 수 있는 훈련 방안이 중요하다. 주민에 대한 방사선 피폭은 방사선원의 확산과 밀접한 관계가 있고, 원전 주변 지역의 대기안정도, 풍향 등의 자연환경 조건과 관련이 다양하게 존재하여 이러한 요인을 고려하여 원전 주변 주민들에 대한 가상현실에 기반 한 최적화된 방사선피폭저감 및 주민보호 가상훈련 시나리오를 개발하였다. 본 논문에서는 원자력발전소 방사능 누출 사고 시 원전 지역 주민이 사고에 직면하여 방사선 피폭을 효율적으로 저감할 수 있도록 가상현실 기반의 훈련 시나리오 개발 사례를 기술하였다.

핵심용어 : 방사능 누출 사고, 방사능방재훈련, 가상현실, 방사선피폭, 대기안정도

*교신저자, 정회원, (주)오리온이엔씨 대리(Tel: +82-2-3414-2032, Fax: +82-2-314-2301, E-mail: tykim@orionenc.com)

Corresponding Author, Member, Assistant Manager, ORION EnC Co. Ltd.

** (주)오리온이엔씨 부사장(E-mail: khlee@orionenc.com)

Vice President, ORION EnC Co. Ltd.

*** (주)오리온이엔씨 대리(E-mail: schae@orionenc.com)

Assistant Manager, ORION EnC Co. Ltd.

**** (주)오리온이엔씨 대리(E-mail: shha@orionenc.com)

Assistant Manager, ORION EnC Co. Ltd.

***** (주)오리온이엔씨 전무(E-mail: sewon@orionenc.com)

Principal Researcher, Orion EnC Co. Ltd.

***** (주)오리온이엔씨 대표이사(E-mail: ujlee@orionenc.com)

President, ORION EnC Co. Ltd.

1. 서 론

원전사고에 대비한 정부 및 지자체의 현장조치는 재난 및 안전관리기본법, 원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재 대책법, 민방위기본법, 국가위기관리기본지침(대통령훈령 제342호)에 국민 안전을 위한 기본적인 사항이 언급되어 있으며 원전안전분야(방사능 누출) 위기관리 표준매뉴얼(원자력안전위원회), 원전안전분야(방사능누출) 위기대응 실무매뉴얼(식품의약품안전처)과 각 지자체 및 정부기관의 원전안전 현장조치 행동매뉴얼 및 방사능방재계획 등에 원전 사고 시 행동 요령에 대하여 자세히 언급되어 있다.

원전 사고 발생의 대표적인 예를 Table 1에 나타내었으며 Three Mile Island (TMI) 원전 사고, 체르노빌 원전사고 등 세계 곳곳에서 원전사고가 발생하였고, 특히 인접국인 일본에서 2011년 3월에 발생한 후쿠시마 원전사고 등이 있다. 이러한 사고들로 인해 방사선 및 원자력 사고에 대한 국민적 관심이 지속적으로 증가하고 있고 국내의 경우, 수년 전만 하더라도 지진 및 원전사고는 무관하다 생각하여 국민적 관심이 미미하였지만 최근 지진 발생빈도가 잦아지고, 지진 발생 규모가 커짐에 따라 국내에서도 지진 발생 시 원전들의 안전여부에 촉각을 기울이고 있는 상황이며, 이에 대한 국민적 관심 또한 고조되고 있는 추세이다(Kim et al., 2019)

국내에는 현재 고리1호기의 영구정지에 따라 총 24기가 가동 중에 있어 예기치 않은 원전 사고가 발생할 경우, 고리, 월성, 울진 및 영광 지역의 원전 주변에 거주하는 주민들에 대한 방사능 피폭 등의 피해를 최소화하고, 원전사고에 대한

Table 1. Response System During Chernobyl, TMI and Fukushima Accident

Division	Chernobyl	TMI	Fukushima
Response system	TELERAY (Environmental Radioactivity and Radiation Monitoring system)	RADNET (Environmental Radioactivity and Radiation Monitoring system)	SPEEDI (System for Prediction of Environmental Emergency & Dose Information)
Function	Radioactive material dispersion & diffusion monitoring	Radioactive material dispersion and diffusion monitoring	Radioactive material dispersion and diffusion monitoring
Response organization and main work	ASN (regulatory office)/Defense/Environment/Industry/Health Department operated PCD(Area Emergency Center)and 450 posts were monitored. (FRANCE case)	Initial stage DOE took care of the accident but Environment department finally managed the accident for a long time by operating FRAMAC (Federal Radiological Accident Monitoring and Assessment Center)	NRA(regulation office)/central governmental organization(Education & Science/Environment department) managed by operating ECC(Emergency Control Center) and ERSS(Emergency Response support System) were utilized as well as SPEEDI.

심리적 불안감 및 공포감을 해소하기 위한 훈련이 필수적으로 요구된다.

국내에서 원전 방사능 누출 사고 시 방사선 피폭과 관련된 선행연구의 경우, 주민보호조치를 위한 방사능 확산 및 피폭 모델 개발이 한국원자력연구원(Long-range Accident Dose Assessment System, LADAS), 한국원자력안전기술원(Accident Dose Assessment and Monitoring, ADAMO), 한국수력원자력(주)(KHNP's Radiological Emergency Dose Assessment Program, K-REDAP)에서 이루어졌고 일본의 경우 System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (SPEEDI)가 후쿠시마 사고 시 주민 피폭 영향 평가를 위해 사용된 바 있다(IAEA, 2015).

현행 방사능 방재 훈련은 직접 오감으로 느끼며 대응 훈련을 수행할 수 없기 때문에 현재 문서화된 자료 또는 비디오 등의 자료로만 대응 훈련을 수행하는데 한계가 있다. 따라서 가상현실의 시나리오에는 핸드폰 통지 후 사고 인지 여부(power on/off 및 통신장애), TV 및 라디오 수신 인지여부(power on/off 및 전기단전), 구호요원의 방문을 통한 사고 내용 전달, 싸이렌 소리를 들을 수 없는 장소에서의 작업수행 여부, 사고 인지에 대한 헤드캡(난청, 시력약화, 시력상실 등) 여부, 수면 여부 등에 대한 변수들을 반영되어 훈련의 질을 증가시켜야 한다. 특히 방사선 피폭 저감을 위한 현행 훈련은 방사선 피폭과 관련된 정보를 제공하지 않으므로 주민대피가 어디로 이루어져야 할지 최적의 결정을 하는 것이 어렵기 때문에 가장 적합한 소개소로의 대피 결정도 수월하지 않았다.

그러나 가상현실(VR)기술의 경우 시공간적 한계에 제한이 없고, 실제 사고 상황과 유사한 방사선피폭 정보 제공 환경을 사용자에게 제공할 수 있는 장점이 있다(Lee et al., 2016).

따라서 본 연구는 한국수력원자력(주)에서 활용중인 K-REDAP 프로그램을 이용하여 방사능 누출 사고 시 주민의 방사선피폭을 최소화하기 위하여 실제 원전사고를 모사한 가상현실(VR)을 활용하여 주민 피폭저감 훈련시나리오를 개발하였다.

본 시나리오를 통한 훈련 수행 시, 주민이 방사선피폭 저감에 대한 실제적 방재 훈련이 실시될 수 있어 원전 사고 시, 방사선피폭 저감은 물론이고 사고 대처도 원활하게 할 수 있다. 또한 본 방사선피폭 저감 방재훈련 시나리오의 습득을 통하여 주민들은 가상방재훈련에 대한 효율성을 체감할 수 있고 원전 사고에 대한 이해와 대처를 최적화할 수 있다.

2. 가상현실(VR) 피폭저감 및 주민 보호 훈련시나리오의 필요성

2.1 현행 방재훈련 시스템

현행 방재훈련의 경우, 교재 및 학습자료를 통한 교육과 실제 사고 상황을 모사한 대피 훈련을 실시하는 것이 대부분

이다. 일반적으로 원전에서 수행되는 방재훈련은 재해 상황을 묘사하는데 한계가 있어 교육효과가 기대치에 못 미치고 있고 원전 주변지역 현장의 방사능 방재훈련도 교량붕괴, 도로파손, 통신망 마비 등의 상황을 단순히 가정한 상태에서 훈련이 진행되고 있어 실제 방사선피폭의 상황(방사선 준위 및 방사능 확산 상황 등)을 묘사하는데 한계가 있기 때문에 훈련의 효과가 만족스럽지 못하고 실제 사고 시 적정 소개로 의 결정 등 적절한 대처가 어려운 실정이다.

2.2 피폭저감 및 주민보호 가상현실(VR) 훈련 시나리오

현행 방재훈련시스템의 한계점은 방사선피폭 정보를 모의적으로 연출하여 훈련하기가 사실상 불가능 하며 시간적, 공간적 등 물리적 제약이 크다. 그러나 피폭저감 가상현실 훈련시스템의 경우에는 여러 물리적 제약이 따르지 않기 때문에 훈련장에 동원되지 않아도 효율적인 훈련 효과를 도출해낼 수 있고, 방사선피폭 사고 상황을 연출하여 경험할 수 있다는 장점이 있으며, 반복적인 학습이 가능하다. 방사능 확산 및 방사선피폭 상황에 따른 대처요령을 확실히 숙지할 수 있기 때문에 시간적, 금전적 비용이 절감되는 효과까지 기대할 수 있다. 더불어 주민의 피폭에 대한 이해 및 피폭으로부터의 주민 방호를 위한 보호조치(피폭이 가장 적은 지역으로의 대피)에 대한 내용을 추가함으로써 새로운 가상현실 훈련의 파급효과가 있다. 피폭저감 가상현실 훈련 시나리오를 개발한 본 연구에서는 기존 방사능 확산 체내 피폭 모델 조사 및 훈련 시나리오를 위한 요건을 도출하여 원전의 특성, 사고의 종류, 기상상태, 천문, 지리, 수리/수문 등 변수를 모델에 반영하였고, 확산 모델에 K-REDAP의 입력자료로 제공되는 해당 지역의 현재 기상 상태, 주변 6개 지역 대기 상태 및 K-REDAP의 결과로 도출되는 주민 체내·외 피폭 결과에 따른 주민보호조치에 대한 대응(옥내대피, 갑상선 약 복용, 소개 일시이주 등)을 VR 화면에 표시 반영하여 가상훈련의 효과를 제고하였다. 또한 원전 지역 주민들의 방사능에 대한 이해를 통해 주민 수용성이 개선될 수 있고, 상호신뢰를 확대하여 사회 안정성 및 갈등 완화로 간접비용을 절감할 수 있는 효과가 있으며, 원자력 기술행정(방재 교육 및 훈련)체제의 효율성을 제고하고 사고 시, 실질적인 방사선피폭 대응역량을 강화할 수 있는 여러 장점을 갖고 있다.

3. 시나리오 구성 방법

원전 방사능 누출 사고 시, 주민의 대응 역량 강화를 위한 가상현실 방재훈련에 적용할 수 있는 피폭저감 가상훈련 시나리오를 개발하였고, 일반적 개요, 방사능확산 및 피폭모델, 피폭모델의 가상훈련시스템 적용을 고려하였으며, 또한 가상현실의 시나리오에는 핸드폰 통지 후 사고 인지여부(Power ON/OFF 및 통신장애), TV 및 라디오 수신 인지여부(Power

ON/OFF 및 전기단전), 구호요원의 방문을 통한 사고 내용 전달, 싸이렌 소리를 들을 수 없는(사고 인지)를 할 수 없는 장소에서의 작업수행 여부, 사고 인지에 대한 핸드캡(난청, 시력약화, 시력상실 등)여부, 수면 여부 등에 대한 변수들을 반영한 가상훈련방법 등을 고려하였다. 피폭저감 가상현실 모델의 기본 구성방법을 Fig. 1에 나타내었다. 방사능 누출 사고 발생 이후 기상정보를 확인하여 환경방사능 감시를 위한 조치를 수행하고 이후 이들 정보를 바탕으로 피폭저감 가상현실 방재훈련 주제를 결정하여 그 중 주요 이슈와 주요 상황을 고려한 가상현실 모델 구현 대상을 결정한다.

Fig. 1. Radiation Exposure Reduction VR Model in consideration of Weather Information

3.1 주민 피폭저감을 위한 활동

일반적으로 원전사고 발생 시 정부(국가 원자력 재난관리 시스템; AtomCare)에서 제공되는 방사선 피폭 등 방재 정보를 Fig. 2에 나타내었다. 원전에서의 사고로 인해 방사능이 발전소를 벗어나 영향을 주어 주변지역에 적색비상이 발령 되면 원전에서 3~5 km 지역에 위치한 예방적보호조치구역(Precautionary Action Zone, PAZ)의 주민은 구호소로 소개하게 된다. 또한 Fig. 3에 나타난 것처럼 기상정보 등의 수집을 통하여 방사능의 대기 확산 및 주민 피폭 정도 등에 대한 정보가 정부의 합동방사선감시센터를 통하여 지역에 제공된다(NSSC, 2014).

Fig. 2. National Preparedness Action at White/Blue/Red Alarm Accident Response Stage

Fig. 3. KINS (Korea Institute of Nuclear Safety) ADAMO System for Atmospheric Dispersion and Dose Estimation

3.2 원전 사고 시 주민 피폭저감 방안 수립

방사능 누출 사고에 대한 비상등급(원전안전분야 위기관리 표준매뉴얼 및 지자체 현장조치 행동매뉴얼 정의에 따른 백색, 청색, 적색 경보)에 따른 방사능방재훈련은 주민보호 조치 관점에서 방사선피폭을 최소화하는 방향으로 수행되어야 한다.

본 연구에서는 주민 피폭을 최소화하는 방안을 가상현실 훈련에 포함하기 위하여 후쿠시마 원전사고의 사례 등을 고려하여 한빛원전 인근의 영광군, 장성군, 무안군 및 함평군을 중심으로 주민 피폭저감 및 주민 보호 방안을 수립하였다. Fig. 4는 후쿠시마 사고 시 주민 대피를 보여주는 지도이며, Fig. 5는 후쿠시마 원전 주변지역에 대한 방사능 누출 현황을 보여주는 방사선 지도이다. 후쿠시마 원전사고의 경우, 사고 초기 주민의 즉시 대피는 이루어지지 않았으나 원전 주변 주민 거주지역의 방사선 준위가 상승하여 대피 기준 초과가 우려되자 Fig. 4에 나타내었듯이 총 27만명이 순차적으로 50 km 지역까지 대피가 이루어졌으며 Fig. 6에서와 같이 사고로 인해 후쿠시마 원전 주변 지역에서의 주민 피폭방사선량값이 20 mSv 이하인 경우 집으로 복귀를 허용하였고, 50 mSv 이상인 경우 거주 제한을 통해 구호소 등으로 소재를 결정한 것을 확인할 수 있다. Fig. 5를 통하여 후쿠시마 사고 시 경계구역으로 설정 된 반경 20 km를

Fig. 4. Radiological Map for Escape after Fukushima Accident

벗어나 상당히 먼 지역까지 방사능 확산으로 인한 영향이 확인되었다. 국내 원전 사고 시 주민 이동 및 긴급 구호에 대한 정부의 보호조치 계획은 구역별로 구분되어 Table 2와 같이 운영되어진다.

Fig. 5. Radiological Map near Fukushima nuclear power plants after the accident (Prohibit the living; over 50 mSv/ Allow the visit; 20 ~ 50 mSv/Allow the return to home:below 20 mSv)

Table 2. Protection and Response System Against Radiological Accident by Area

Area	Main protection and response activities
PAZ	<ul style="list-style-type: none"> - Designation of evacuation road and estimation of evacuation time in advance - Previous evacuation before release of radioactive materials, preparation of evacuation vehicle by village, etc.
PAZ ~ 10km	<ul style="list-style-type: none"> - Designation of evacuation road and estimation of evacuation time in advance - Preparation of evacuation vehicle at resident collection place, etc. - Separation of evacuation road with near area by radio direction as well as near area by distance
10km ~ EPZ	<ul style="list-style-type: none"> - Previous investigation of adequate traffic load by road, etc. (travel speed at control state, etc.) - Structure the System to check real time state information by road - Designation of evacuation road to outsides of EPZ by detailed area in advance - Focusing on evacuation road separation with near area by distance rather than near area by road direction - Establishment of control plan by road - Perform traffic control towards evacuation road based on actual road situation information in emergency

3.2.1 주민 피폭평가

한국수력원자력(주)의 K-REDAP 전산모드에서는 주민 피폭 경로를 공기 중 방사능 및 지표면 방사능으로 구분하여 공기 중 방사능의 영향으로 주민 외부 피폭과 호흡에 의한 내부피폭을 고려하고 있다. 지표면 방사능의 경우는 외부 피폭, 재부유 방사능에 의한 외부피폭 및 재부유 방사능에 의한 호흡기를 통한 내부피폭을 고려하고 있다. 원전 사고 시 노심손상 정도를 고려하여, 계통 내 방사선원 평가, 원전 상태 평가 및 방사능 방출량 평가를 하고 이후 부지 기상 자료 및 부지 주변 기상자료와 지형 자료를 반영한 대기확산 평가 및 실측 자료를 같이 반영하여 최종적으로 방사선량을 평가하여 주민 피폭 정도를 산출한 후 주민보호조치를 수행하고 있다. K-REDAP 전산코드는 방사선원 방출기간, 대기 확산 모델, 기상자료, 평가범위 및 격자수(Lattice Number; 예 직각좌표 및 극좌표의 경우 각각 1 km 단위 및 반경 1 km 단위로 계산), 좌표계를 주요 변수로 하여 정확한 방사능 확산 및 피폭 모델로 개발되었다. K-REDAP에서 보여주는 대기확산 평가, 방사선량 평가는 Figs. 6~7에 나타내었다.

Fig. 6. K-REDAP's Atmospheric Dispersion Evaluation Concept (Plume model: Gaussian Dispersion model, Puff model: Dispersion model derived from volcanic ash tracking model)

Fig. 7. K-REDAP's Dose Evaluation Concept

3.2.2 주민보호조치 평가 인자

주민 피폭에 대한 보호조치는 원자력발전소 사고 상태, 주민보호조치 결정 기준 및 적용 방법, 예상피폭선량 예측, 기상상태의 변화, 건강 및 환경에 미치는 영향 평가, 복구, 재가동 및 청소(제염) 문제의 해결방안, 주민의 행동 및 반발에 대한 권리보장과 각 주민의 권리는 동등하다는 원칙, 주민의 안위, 사회심리적인 영향 및 정치적 측면 등을 고려하여 평가 결과가 이루어지고 오염물질의 유입 차단과 내부에서 외부로의 확산 방지가 평가 결과에 영향을 미치는 중요한 요인이다. Fig. 8은 주민보호조치의 평가방법을 보여준다. 일반적으로 사고인지 이후 방사능 재난의 기준에 준거하여 대피, 소개, 요오드 복용(갑상선 장애 예방), 일시이주, 영구이주 등의 주민보호 방안이 결정된다.

Fig. 8. K-REDAP's Resident Protection Action Evaluation Concept

3.3 주민 피폭 저감 방안 적용

3.3.1 주민 피폭저감 대상 원전 및 조건 결정

주민 피폭저감 및 주민 보호를 위한 가상현실의 대상은 한빛원전 사고 시를 고려하였고, 한빛원전을 관리하고 있는 지자체인 전라남도의 비상 사고 대책 책임부서인 도민안전실 산하 사회재난과의 주민 보호 관련 업무를 분석하였다. 전라남도 도청은 평시에는 전라남도 행정협의회의 운영을 주도하나 비상시에는 도지역대책본부를 발족 운영하게 된다. 비상시에는 주무부처를 중심으로 건설교통국, 농축산식품국, 소방본부, 경찰청, 기상청, 교육청, 환경정책관을 중심으로 비상 사고 시 주어진 역무에 대한 임무를 수행하게 된다. 가상현실과 관련된 방재훈련 업무는 현장 대응팀의 현지 파견, 보호조치 및 구호, 구호소 활동, 방사능 통제구역 출입 제한 및 치안 유지, 비상진료 지원, 건강위험평가 지원,

음식물 섭취제한 및 농축산수산물 생산금지 및 유통 통제, 보호조치 완화 결정 및 지역 복구 지원 등의 업무이다(Cha et al., 2017). 사고 시 국가 방사능 방재는 중앙방사능방재대책본부, 현장방사능지휘센터 및 지역방사능방재대책본부로 구분되어 각 기능이 이루어지며 중앙방사능 방재대책본부는 중앙행정기관으로서의 역할이 주요 업무이고 종합조정반, 행정지원반, 홍보협력반 및 유관기관연락반으로 구성된다. 현장방사능방재지휘센터는 시, 군, 구 방사능방재대책본부 지휘 및 방재요원의 임무를 부여하게 되며 주민보호반, 종합조정반, 사고분석반, 방사선평가반, 의료지원반 및 운영지원반으로 구성된다. 지역방사능방재대책본부는 주민보호조치를 실제적으로 이행하며 긴급구호활동 지원 및 통제 업무를 수행하게 된다.

원전 주변에 위치한 지자체들은 원전 주변의 환경과 상황을 고려하여 지자체 방재 대책운동을 달리하고 있으며 본 연구는 한빛원전 인근의 영광군, 무안군, 함평군, 장성군 등을 대상으로 하였다.

한빛원전의 경우 전라남도 현장 대응팀(방재요원/현장유도요원/의료파견요원)이 현지 파견되어 보호조치 및 구조, 구조소 활동, 방사능 통제구역 출입 제한 및 치안 유지, 비상진료 지원, 건강위험평가 지원, 음식물 섭취제한 및 농축산수산물 생산금지 및 유통 통제, 보호조치 완화 결정 및 지역 복구 지원 등의 업무를 수행하게 된다. 고리원자력발전소 주변 지자체인 가장 군청의 경우엔 방재요원, 코디네이터, 현장유도요원, 현장응급의료소 파견요원으로 구분되어 사고 시 지원업무를 수행하게 되며 코디네이터는 차량안내, 교신 응소 관련 업무를 수행하게 된다. 울진 및 월성 원자력발전소 주변의 지자체도 교통 통제요원, 수송요원, 경보안내요원, 대피유도요원, 구조소운영요원 등으로 구분되어 지자체 요원들이 맡은바 업무를 수행하게 된다.

Fig. 9는 K-REDAP의 본 연구에서 고려된 시나리오에 대한 입력창 정보의 예를 나타내었다. 사고의 가정은 후쿠시마 사고, 체르노빌 사고 및 TMI 사고를 고려하여 원자로건물을 통한 누설(노심용융 35~40% 및 100%) 및 보조건물 냉각재 누설만을 고려하였고(K-REDAP에는 원자로건물을 통한 누설, 증기발생기 튜브파단으로 인한 누설 및 보조건물 냉각재 누설로 구분), 방출시간은 TMI 및 후쿠시마 사고의 조건을 반영하여 24시간(후쿠시마 원자로건물 방출의 경우), 2시간 20분(TMI 사고시의 원자로건물 방출의 경우) 및 4시간(TMI 사고 시 보조건물 방출의 경우) 등을 각각 고려하였다. 각각의 Input data는 사고 시나리오의 조건에 따라 다르므로 본 연구에 적용한 각 시나리오에서는 각 시나리오의 사고 가정에 대한 Input data를 각각 적용시켰다. 후쿠시마 사고는 국내 원전인 가압형 경수로와는 달리 비등형 경수로여서 증기의 방출이 직접 원자로에서 발생하여 사고 피해의 정도가 더 높았고 일부에서는 핵연료의 멜트다운(3개 호기 노심용융)이 발생되었다(Park and Ha,

2003). 기상조건은 영광지역의 10년간의 최대 및 평균 풍속을 고려하였고, 풍향은 가장 빈도가 높은 북풍을 고려하였다. 북풍 외에도 빈도가 큰 북북서풍, 북서북풍 및 서북서풍을 고려하였고 빈도는 적지만 한빛원전 주변의 섬에 영향을 주는 남풍도 고려하였다. 최대풍속 평균은 9.72 m/sec 이고, 평균 풍속은 2.35 m/sec 이다. 풍속이 센 경우에는 방사능이 빨리 이동되기는 하지만 주민 피폭에는 단시간동안만 영향을 주므로 풍속이 적을 때 보다 더 낮은 피폭 영향을 준다고 할 수 있다. 대기안정도는 영광의 경우 약간 불안(E 조건)의 조건을 반영하였고, 최악의 조건인 경우와 최상의 조건의 경우인 A(매우 불안정) 및 G(매우 안정) 조건도 고려하였다. 노심 용융은 후쿠시마 사고의 사례인 35~40%를 반영하였다. 주민의 피폭 정도를 최악으로 가정하기 위하여 100% 노심 용융 가정도 연구에 반영하였다.

Input test
→ Hanvit 1&2 nuclear power plant
→ Source term
1) Release start and end(release time) : 1day (2/6 13:26~2/7 13:26)
2) Release from reactor building(reactor damage : 100%)
3) Water spray system : No act
4) RCB(Reactor Control Building) release : 100%/hr.
→ Atmospheric dispersion
1) Dispersion model : Puff
2) Axis : x-y
3) Lattice option : Radius 30km
→ Site characterization
1) Present weather : set number : 3 / wind direction : 45(SW) / wind speed : 5m/sec
2) Site nearby weather : DB number : 6 / Youngkwang site (within 80km) / average atmospheric data for 10 years

Fig. 9. Hanvit Nuclear Power Plant K-REDAP Input

Fig. 10은 원자로 용융을 고려한 K-REDAP의 모형도를 보여준다. 누설률의 경우 설계기준사고에서 제시된 0.1%와 후쿠시마 사고 시 3개 호기에서 방사능 누출이 발생한 사례를 고려하여 누설률 0.3%도 고려하였고 최악의 사례를 가정하여 이론적이기는 하지만 1%의 누설도 연구에 반영하였다.

Fig. 10. K-REDAP's Reactor Meltdown Scheme

3.3.2 가상현실 훈련 주변환경 및 지역 결정

주민을 대상으로 훈련자의 주변 환경과 훈련자의 행동을 결정하는 변수(풍향, 대기안정도, 누출률 등)들을 고려하였고 이에 따라 한빛원전을 기준으로 한 Precautionary Action Zone (PAZ, 반경 5km)와 Urgent Protective Action Planning Zone (UPZ, 반경 30km)를 고려하여 예방적보호조치구역(PAZ) 및 긴급보호조치계획구역(UPZ)의 주민들의 피폭 저감(BEES, Inc., 2017a) 및 주민보호 조치가 수행될 수 있도록 하였다. 방사선 비상 발생 시 해당 비상(백색, 청색 및 적색)에 따라 주민 피폭의 영향 정도를 고려하여 옥내 대피, 소개 등을 결정하도록 하였다.

3.4 시나리오 피폭 평가 결과

본 연구는 원전 주변 주민들이 원전 사고에 대하여 최적의 피폭 저감 및 주민 보호 성공 사례를 도출하기 위해 K-REDAP 전산코드를 사용하고, 풍향 및 방사선량 준위에 따른 각 사고 조건을 적용하였다. Figs. 11~16은 각 사고 조건에서의 방사능 누출에 따른 피폭 상황 및 대처 행동을 보여준다. Table 3은 주민보호조치 기준을 보여준다(KHNP, 2014; BEES, Inc., 2017b).

Table 3. Resident Protection Action Type and Effective Dose Criteria

Type of resident protection	Effective Dose
Escape to indoors	10 mSv/2 days
Evacuation	50 mSv/7 days
Iodine protection	100 mGy
Temporary movement	30 mSv/first month 10 mSv/second month
Permanent movement	1 Sv/70 years

주민 보호의 경우, 옥내 대피, 소개, 갑상선 방호(KI 복용), 일시 이주 및 영구 이주의 행동이 주민에게 필요하며 예를 들어 Fig. 11의 경우 5 km 지역의 2일간 누적 선량값은 9.2 mSv로 계산되므로 옥내 대피를 위한 근접치에 접근한다고 할 수 있다. 따라서 5 km 이내 지역에서는 옥내 대피를 하도록 조치한다(2 km 지역의 선량은 17.9 mSv/2 days로 계산됨). 또한 본 지도에 나타난 것처럼 VR을 착용하여 현 위치에서의 피폭의 영향을 알고자 하는 훈련자는 현재의 피폭 정도와 피폭의 확산에 대한 정보를 확인하여 가장 피폭이 적은 지역으로의 구호소를 선정하여 대피가 가능하도록 하였다. 본 연구를 통하여 사고의 특성과 주변 환경 조건을 고려하여(각 해당 시나리오를 선정하여 훈련 가능) 사고 시 주민이 취해야 할 주요 행동을 구현하고자 하였고 주민에 대한 행동의 경우, 사건의 발생으로 부터 옥내 대피,

주민집결지 이동, 구호소 이동, KI 복용 등 일련의 행동을 수행하게 되는데 이러한 행동의 전제조건인 피폭 저감을 위한 훈련 시나리오를 경험할 수 있도록 조치하였다. 또한 다양한 사건의 조건에 따라 어떻게 일어날지 모를 실제 사고에 대처할 수 있는 최적의 훈련 시나리오를 구성하였고 훈련 이후에는 훈련 평가를 통하여 훈련의 효율성을 극대화 하도록 하였다.

Fig. 11. Radioactivity Release at Core Meltdown (35~40%), Leakage From Reactor Containment Building, E Stability, Wind Speed 2.35 m/sec, Leakage Rate: 0.1% and Wind Direction N (SSE or NE direction escape to Kunnam Myeon, Kunseo Myeon and YeongKwang Gun Escape Office)

Fig. 12. Radioactivity Release at Core Meltdown (35~40%), Leakage From Reactor Containment Building, E Stability, Wind Speed 2.35 m/sec Leakage Rate: 1% and N Wind Direction (SSE or NE Direction escape to Kunnam Myeon, Kunseo Myeon and YeongKwang Gun Escape Office)

Fig. 13. Radioactivity Release at Core Meltdown (35~40%), Leakage From Reactor Containment Building, A Stability, Wind Speed 2.35 m/sec Leakage Rate: 0.1% and N Wind Direction (SSE or E Direction Escape to Jangseong Gun and Hampyung Gun Escape Office)

Fig. 15. Radioactivity Release at Core Meltdown (35~40%), Leakage From Reactor Containment Building, E Stability, Wind Speed 2.35 m/sec Leakage Rate: 0.1% and S Wind Direction (S or E Direction Escape to Any Place)

Fig. 14. Radioactivity Release at Core Meltdown (35~40%), Leakage From Reactor Containment Building, E Stability, Wind Speed 2.35 m/sec Leakage Rate: 0.1% and WNW Wind Direction (SSE or E Direction Escape to Kunnam Myeon, Kunseo Myeon and YeongKwang Gun Escape Office)

Fig. 16. Radioactivity Release at Core no Meltdown, Leakage From Auxiliary Building, E Stability, Wind Speed 2.35 m/sec Leakage Rate: 100% and N Wind Direction (SSE or E direction escape to Yeongkwang Gun)

주요 행동은 사건의 발생인 비상발령 정보 인지 후 안내방송 청취, 구호요원의 안내 시 옥내 대피, 농작물 보호조치, 구호요원의 안내에 따라 주민집결지 이동, 구호소 이동, 체내 피폭 시 갑상선 약(KI) 복용, 돌발상황(교통 체증 등) 시 교통안내요원의 시 순응, 복합재난(지진 등 동반) 사고에 대처할 수 안내 지시 순응 등 필요 행동을 취해야한다(OrionEnC, 2018). 피폭저감을 위한 훈련의 경우, VR 장치 내 Display 상 피폭량 정도를 나타내게 하여 현재 위치의 피폭량과 현재 위치 기준 좌우 지역의 피폭량을 표시하여 현 위치보다 적은 피폭량을

나타내는 좌측 또는 우측 지역으로 선택할 수 있도록 하여 피폭이 적은 지역으로 대피토록 가상훈련이 이루어지도록 하였다. 궁극적으로 주민의 보호는 피폭에 대한 안전보호 조치로 주민의 인체 건강을 보호함에 있고 이는 다양한 사고의 조건으로 구성된 훈련 시나리오를 이행하고 이동시간 및 이동경로와 방사선차폐의 함수(Shielding Factor-방호복 착용, 옥내 대피, 구호소 소개 등)로 결정되는 보호조치 행동과 방사성물질의 체외 방출을 위한 KI (Potassium Iodine) 약품 복용 요인 등 행동으로 주민 보호조치가 충분히 이루어지도록

하였다. 또한 Table 4와 같이 풍향 속도 및 풍향의 방향이 피폭을 결정하는 중요 요소이므로 각 구호소에서의 기본 풍향에 따른 피폭량을 계산하여 주민이 기본 구호소에서 다른 구호소로의 이동 시 (좌,우 및 앞쪽으로 이동) 각 방향에 대한 다른 참고 선량값도 구하여 가장 낮은 선량값을 갖는

지역으로 주민이 이동할 수 있도록 훈련 시나리오를 구성하였다. 예를 들어 영광전자고의 구호소의 경우 북풍이 불면 가장 낮은 선량값을 갖는 SW(남서쪽) 구호소를 선정하여 이동하도록 훈련시나리오에 구현하였다.

Table 4. Direction Guide for Resident Protection Action in Consideration of Radiation Exposure

City/Gun	Eup	Protection place	Expose Dose (mSv)			
Youngkwang Gun	Evacuation	14 places	wind direction	direction based on present place		
	Yeomsan Myon	Youngkwang Electronic High School	wind direction	SW	SSW	S
			N (360°)	0.0269	0.134	0.0157
			NNW (340°)	0	0	0
			NW (320°)	0.013	0.074	0.011
			WNW (290°)	0.035	0.039	0.003
			S (180°)	0	0	0
	Yeomsan Myon	Yeomsan Elementry School	wind direction	SW	SSW	S
			N (360°)	0.0269	0.134	0.0157
			NNW (340°)	0	0	0
			NW (320°)	0.013	0.074	0.011
			WNW (290°)	0.035	0.039	0.003
			S (180°)	0	0	0
	Yeomsan Myon	Yeomsan Middle School	wind direction	SW	SSW	S
			N (360°)	0.0269	0.134	0.0157
			NNW (340°)	0	0	0
			NW (320°)	0.013	0.074	0.011
			WNW (290°)	0.035	0.039	0.003
			S (180°)	0	0	0
	Yeomsan Myon	Yeomsan Elementry School Choya branch	wind direction	SW	SSW	S
			N (360°)	0.0269	0.134	0.0157
			NNW (340°)	0	0	0
			NW (320°)	0.013	0.074	0.011
			WNW (290°)	0.035	0.039	0.003
			S (180°)	0	0	0
	Gunnam Myon	Youngkwang Information Industrial High School	wind direction	S	SSE	SE
			N (360°)	0.0157	0	0
			NNW (340°)	0	3.11E-10	0
			NW (320°)	0.011	0.004	0.013
			WNW (290°)	0.003	8.04E-05	9.03E-07
			S (180°)	0	0	0
	Gunseo Myon	Sungji Middle School	wind direction	S	SSE	SE
			N (360°)	0.0157	0	0
			NNW (340°)	0	3.11E-10	0
			NW (320°)	0.011	0.004	0.013
			WNW (290°)	0.003	8.04E-05	9.03E-07
			S (180°)	0	0	0

Table 4. (Continued)

City/Gun	Eup	Protection place	Expose Dose (mSv)			
Youngkwang Gun	Gunseo Myon	Gunseo Elementry School	wind direction	S	SSE	SE
			N (360°)	0.0157	0	0
			NNW (340°)	0	3.11E-10	0
			NW (320°)	0.011	0.004	0.013
			WNW (290°)	0.003	8.04E-05	9.03E-07
			S (180°)	0	0	0
	Gunnam Myon	Songheung Elementry School	wind direction	S	SSE	SE
			N (360°)	0.0157	0	0
			NNW (340°)	0	3.11E-10	0
			NW (320°)	0.011	0.004	0.013
			WNW (290°)	0.003	8.04E-05	9.03E-07
			S (180°)	0	0	0
	Gunnam Myon	Gunnam Middle School	wind direction	S	SSE	SE
			N (360°)	0.0157	0	0
			NNW (340°)	0	3.11E-10	0
			NW (320°)	0.011	0.004	0.013
			WNW (290°)	0.003	8.04E-05	9.03E-07
			S (180°)	0	0	0
	Bulkab Myon	Youngkwang House for Schoolboys	wind direction	S	SSE	SE
			N (360°)	0	0	0
			NNW (340°)	0	0	0
			NW (320°)	4.82E-05	0	0
			WNW (290°)	0	0	0
			S (180°)	0	0	0
	Bulkab Myon	Bulkab Elementry School	wind direction	S	SSE	SE
			N (360°)	0	0	0
			NNW (340°)	0	0	0
			NW (320°)	4.82E-05	0	0
			WNW (290°)	0	0	0
			S (180°)	0	0	0
	Yeomsan Myon	Seoldo hang	wind direction	SW	SSW	S
			N (360°)	0.0269	0.134	0.0157
			NNW (340°)	0	0	0
			NW (320°)	0.013	0.074	0.011
			WNW (290°)	0.035	0.039	0.003
			S (180°)	0	0	0
	Yeomsan Myon	Hyanghwado hang	wind direction	SW	SSW	S
			N (360°)	0.0306	0.01	0
			NNW (340°)	0	0	0
			NW (320°)	1.79E-02	0.004	4.82E-05
			WNW (290°)	0.035	0.039	0.003
			S (180°)	0	0	0

4. 토 의

원전 지역 주민에 대한 방재훈련시스템의 경우, 주민의 순응 및 적극적인 참여를 기반으로 진행하게 되나 실제로 사고 시 주민들이 지자체 비상요원의 지시에 적극적 순응을 할지는 미지수이다. 따라서 지자체는 가상현실 훈련시스템을 적극적으로 활용하여 주민들로 하여금 사고 시 발생할 수 있는 상황들에 대한 공감을 얻도록 노력하여야 하며 실제 사고 시 효율적인 행동 및 보호조치 노력이 일어날 수 있도록 훈련의 형태를 결정하여 대처하는 가상훈련을 수행하고 훈련결과를 피드백(Feedback)하여 훈련의 성과를 극대화하도록 하여야 한다. 사건의 다양한 조건을 가정한 훈련법은 훈련효율을 더욱 증가시킬 수 있고 따라서 주민들을 상대로 한 훈련의 효율성을 높이는데 본 방법이 기여할 것으로 판단된다. 사고의 조건을 만족시키는 훈련 목표 달성에는 한계가 있으나 주민에 대한 다양한 가상훈련 시나리오를 통해 사고 대처 경험을 구축하여야 한다(YeonHap News, 2017). 지자체는 지속적으로 주민의 피폭을 최소화하고 가장 적시에 적재의 장소(구호소 등)로 이동하는 가상훈련을 통해 주민의 안전과 주민보호에 만전을 기해야 한다. 또한 원전 재난 사고 시는 중앙정부와 지자체 그리고 원전운영기관(한수원)이 협동하여 효율적으로 재난 대응시스템이 운용되어야 한다. VR 교육의 효과를 고취하기 위해서 여러 계층의 주민들에 대하여 시나리오의 반복적 활용 적용 훈련을 통한 실제 사고 시와 같은 조건에서의 훈련 학습을 지속적으로 고취하고 주민들로 하여금 막연한 방사선피폭의 실체를 접하도록 하여 불안한 피폭의 공포를 벗어날 수 있도록 해야한다.

5. 결 론

원전 주변지역의 경우 긴급보호조치계획구역(UPZ)이 20~30 Km로 확대되고 따라서 주민 훈련자도 증가되었다. 그러나 주민에 대한 효율적인 훈련 방법을 도입하기 위해서는 가상현실에 의한 훈련법이 적절하며 훈련의 결과 및 피드백 등을 충분히 반영한 가상현실 훈련시나리오(VR Training Scenario)로 발전시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 주민들에 대한 가상현실 훈련시나리오를 개발하여 주민 피폭을 최소화하고 주민 보호 행동을 극대화하기 위한 적용 방안을 마련하였다. 따라서 다양한 사건에 대한 훈련 시나리오를 제안하여 사고 발생이후부터 사고 종결 시까지 주민 피폭을 최소화하고 주민 보호를 성공시키기 위하여 거의 모든 상황이 모사되도록 훈련시나리오를 구성하였다. 본 구성에 더해 주민 피폭의 최소화하고 구호소로의 이동의 최적화의 성취와 더불어 본 훈련 시나리오를 통해 원전 인근 주민들을 대상으로 피폭에 대한 보호조치 행동의 선택, 행동의 정확성, 행동 조치 시간의 단축, 피폭의 저감, 적정 구호소로의 신속 이동

등을 훈련의 주요 결정요인으로 정하여 훈련을 숙달하도록 하였다. 가상현실의 훈련을 극대화하기 위해서는 가상현실 구현 기기의 제공 및 운영 상 애로(적정기기 수 제공 불가 및 장기간 사용 시 현기증 발생 등) 등에 대한 해결책 마련 및 교육 콘텐츠의 개발 확대(예를 들어 복합재난 등 가상현실 환경 구현), 최적의 훈련환경(훈련장소 및 적정 훈련인원 결정 등) 마련 등의 조치가 보완되어야 한다(KINS, 2013).

주민의 훈련대상 인원은 상당히 많고, 따라서 상당한 인원이 동원되는 가상훈련 교육훈련 시는 훈련 항목(경보발령, 피폭 사고 발생, 구호소 대피 등) 구성 상황을 선택하여 교육을 진행함이 바람직하다. 또한 방사선 피폭이 환경의 조건에 따라 많은 영향이 따름을 주지하여 자연환경 변화에 대한 관심도 지속적으로 갖도록 조치한다. 특히 방사선 사고에 대한 관리자적인 위치에 있는 비상조직표 상 해당 인력을 선택하여 행동 지시로 훈련을 진행토록 하며 방사선 피폭 저감의 경우 해당 매뉴얼(피폭 저감 및 주민 보호 매뉴얼 추가 필요)에 따른 행동 절차를 진행하도록 하고 적절한 평가를 통하여 적합한 행동 시 가점 및 부적절한 조치 결과 시 재교육 등 페널티를 부여하여 교육의 효과를 높여가게 바람직하다. 페널티에 대하여는 피드백을 통해 성공의 결과가 항상 이루어지도록 하고 교육의 성공적 결과는 실제 사고 시 주민들을 방사선으로부터 보호할 수 있는 기본 밑거름임을 주지하도록 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20161520101150).

References

- BEES, Inc. (2017a). *Resident's participation system via radioactivity preparedness training using VR based on radioactivity release accident situation at nuclear power plant*. Workshop Material.
- BEES, Inc. (2017b). *Result of visit to local government office for resident's participation system via radioactivity preparedness training using VR based on radioactivity release accident situation at nuclear power plant*. Feb-May, 2017, Uljin Office/Kijang Office/Ulju Office/Gyeongju Office.
- Cha, M.H., Lee, D., Park, Y., and Lee, B. (2017). A study for implementing virtual reality based on radiological exercise system. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol 17. No. 4, pp. 327-334.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2015). *The*

- Fukushima Daiichi accident*. Technical Volume 3.5, Emergency preparedness and response.
- Kim, T.Y., Lee, U.J., Chung, S.W., Ha, S.H., and Chae, S. (2019). Development of a radiological training scenario for local government staff in the case radioactivity release accident at nuclear power plant. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 1, pp. 361-371.
- Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. (KHNP). (2014). *User's guide for radiation dose evaluation program during radiation emergency*. KHNP, K-REDAP Vol. 220.
- Korea Institute of Nuclear Safety (KINS). (2013). *A study on the development of the radiological emergency plan for schools*. KINS/GR-508.
- Lee, B.I., Park, S.J., Lee, D.W., Song, S.L., and Park, Y.W. (2016). Development of public training system for emergency excise using virtual reality technology based on radioactive release accident. *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Gyeongju, Korea.
- Nuclear Safety and Security Commission (NSSC). (2014). *Radiation emergency measures of nuclear licensees* (Article 21-3). Notification No. 2014-082.
- OrionEnC. (2018). *VR story board for response organizations against nuclear power plant accident*.
- Park, C.G., and Ha, J.J. (2003). *Probabilistic safety analysis*. Seoul: BrainKorea Publishing.
- YeonHap News. (2017). *22 hours is needed to escape during Kori Nuclear Power Plant Accident at the place 22 km radius away from Kori Nuclear Power Plant* (March 8, 2017).
-
Received	January 21, 2019
Revised	January 25, 2019
Accepted	February 12, 2019