

Evaluation of the Size of Emergency Planning Zone for the Korean Standard Nuclear Power Plants

In-Young Jeon · JaiKi Lee

Department of Nuclear Engineering, Hanyang University

한국표준형 원전에 대한 방사선비상계획구역 범위 평가

전인영 · 이재기

한양대학교 원자력공학과

(2003년 7월 13일 접수, 2003년 9월 6일 채택)

Abstract - Against major release of radioactive material in nuclear power plant, Emergency Planning Zone(EPZ)s are typically established around nuclear power plants to effectively perform the public protective measures. The domestic methodology to determine the size of the EPZ is similar to that of Japan established in 1980, where calculations were based on the conservative accident source term. The objective of this study is to re-evaluate the validity of established EPZ, the area within the radius of 8~10km around domestic nuclear power plants, using the source terms covering full spectrum of accidents obtained from PSA study of ULJIN 3&4. To evaluate the risks of health effects, the computer code MACCS2(MELCOR Accident Consequence Code System2) was used. The result shows that the existing EPZ can reduce the probability of early fatality adequately for most of the source term categories(STCs) except for STC-14 and STC-19. In case of STC-14 and 19, the evacuation distance of 16km and 13km, respectively, are required. These distances can be reduced by improving emergency preparedness since the sensitivity studies for the public protective actions show that the magnitude of early fatality is largely affected by the time delays in notification and evacuation.

Key words : accident, emergency, evacuation, EPZ, fatality, MACCS

요약 - 원자력발전소로부터의 만일의 방사성물질 누출사고에 대비해 원자력발전소 주변에는 주민보호조치를 효율적으로 수행하기 위해 비상계획구역이 설정되어 있다. 그러나 이러한 비상계획구역 크기를 결정하는 국내의 방법론은 보수적인 사고선원항을 이용하여 계산한 1980년에 발표된 일본의 이론에 근거하고 있다. 본 연구의 목적은 울진 3&4호기의 확률론적 안전성점검 연구결과로 얻어진 사고선원항을 토대로 현재 원전을 중심으로 반경 8~10km의 주변지역으로 설정되어 있는 방사선 비상계획구역의 적합성을 재평가하는 것이다. 방사선영향평가를 위해서 컴퓨터 코드인 MACCS2(MELCOR Accident Consequence Code System2)코드를 사용하였다. 연구결과는 현재 울진원전을 중심으로 설정되어 있는 반경 8~10km의 비상계획구역으로서 STC-14 및 STC-19를 제외한 대부분의 선원항들에 대해 조기사망 발생확률을 크게 낮출 수 있음을 보여주고 있다. STC-14의 경우는 16km 이상, STC-19의 경우는 13km이상 소개되어야 조

기사망 발생확률이 현저하게 감소되었다. 주민보호조치에 대한 민감도 분석결과에서는 사고통보 및 소개와 관련된 시간지연이 조기사망효과에 대해 직접적이고도 매우 큰 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다.

서 론

원자력발전소로부터의 만일의 방사성물질 누출 사고에 대비한 방사선비상계획은 발전소 주변지역에 설정된 방사선비상계획구역을 중심으로 수립된다. 이러한 비상계획구역의 크기는 주로 원전 및 주변의 지역적 특성 등을 고려하여 결정되며, 국가에 따라서 비상계획구역의 크기를 다양하게 설정하고 있다[1-4]. 현재 국내에서는 원자로를 중심으로 반경 약 8~10km의 지역을 방사선 비상계획구역으로 정하고 있다. 그러나 이러한 비상계획구역 설정에 대한 국내의 이론적 근거는 과거 1980년 일본에서 발표된 이론을 토대로 하고 있어[5], 미국 TMI-2 원전사고 이후 지금까지 국내·외에서 수행해온 사고 선원향에 대한 연구결과[6-9]들을 바탕으로 그 타당성 여부를 재검토할 필요성이 대두되고 있다. 특히 지금까지의 연구결과에서 나온 사고 선원향들은 과거의 보수적인 가정에서 탈피하여 확률론적 방법을 이용하여 도출된 것으로 보다 현실적인 비상계획구역 크기를 결정하는 데 있어 유용하다고 할 수 있다.

사고 선원향 외에 비상계획구역을 결정하는 데 있어 주요 요소 중 하나는 원전 주변의 지역적 특성이라고 할 수 있다. 여기서 지역적 특성이라 함은 주변 인구밀도, 도로망, 지형, 소개차량 등 물리적 특성 외에 비상계획의 적절성 및 비상시의 주민행동특성도 포함된다. 본 논문에서는 원전 및 지역적 특성을 동시에 고려하여 비상계획구역의 크기를 평가하고자 하였으며 한국표준형원전인 울진 3&4호기를 대상으로 하였다. 울진원전 주변의 지역적 특성은 주민소개시간 예측평가를 위해 조사·연구된 자료를 이용하였다[10].

사고선원향 및 지역적 특성을 고려한 인체에 대한 방사선영향평가는 MACCS2(MELCOR Accident Consequence Code System 2)를 이용하여 계산하였다. MACCS2 코드는 기존의 보수적인 기상 및 확산조건 가정에서 탈피하여 확률론적 방법을 적용함으로써 방사선영향평가에 있어서도 보다 현실적인 계산을 가능하게 한 것으로 평가된다[11-12]. 또한 MACCS2 코드는 다양한 비상대응 시나리오를 입력할 수 있어 본 연구목적에 잘 부합되고 있다(그림1).

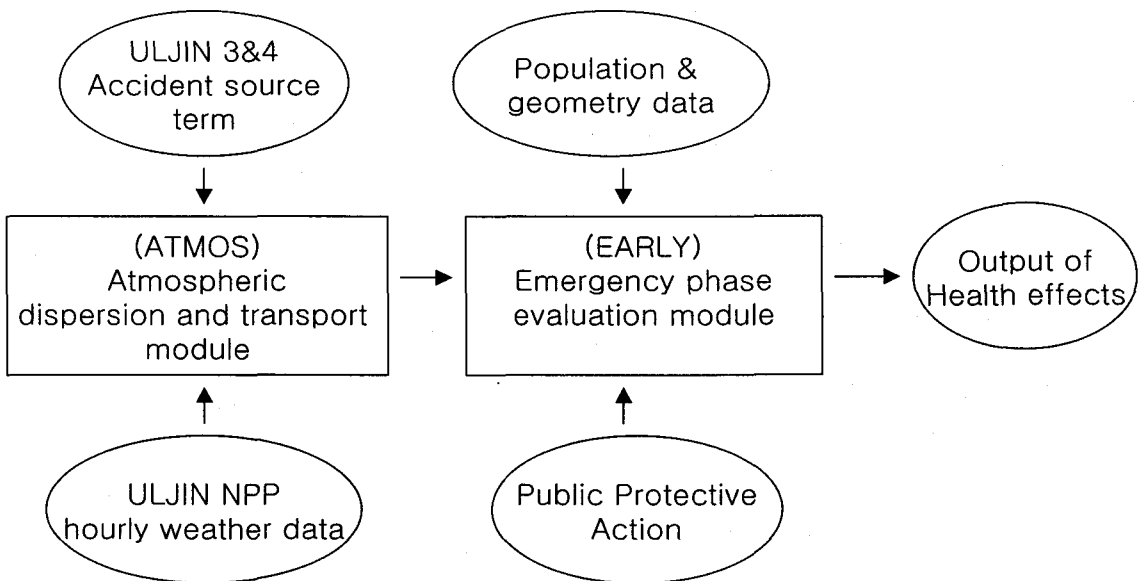


Fig 1. Consequence calculation process in MACCS2

가 정

본 논문에서 비상계획구역 범위를 평가하는 데 있어서 사용한 가정은 다음과 같다.

-본 연구에 적용한 사고선원항은 기존의 비상계획구역 설정시 적용하였던 사고선원항과 비교할 때 격납용기내 사고선원항의 크기에 있어서는 작다고 할 수 있으나 환경방출 선원항에 있어서는 오히려 더 크기 때문에 기존의 주민보호지침선량(전신 5 rem)은 비상계획구역의 크기를 결정하는 기준으로 적절치 않으며, 이는 중대사고시 발생할 수 있는 인체 영향, 즉, 조기사망 또는 조기상해 효과로 대체되어야 한다

-비상계획구역 범위 설정에 있어서 주민보호조치(옥내대피 또는 소개)가 고려되어야 한다. 즉, 방사선 비상사고시 주민들이 전혀 보호를 받지 못한다는 가정은 비현실적이며, 이는 특히 국내원전 주변의 높은 인구밀도를 고려할 때 보다 현실적인 비상계획구역을 설정하기 위한 가정으로서 매우 중요하다

-비상계획구역의 크기는 발생가능한 다양한 중대사고 조건하에서 비상기간동안 조기사망효과가 극소화되는 거리로서 결정되어야 한다

계산코드 및 방법

사고 선원항

사고선원항은 울진3,4호기에 대해 확률론적 안전성평가(PSA) 방법으로 중대사고의 취약성을 평가한 원자력발전소 안전성점검 연구결과(IPE)에서 나온 사고선원항을 이용하였다[9]. Source Term Category(STC)는 노심손상 및 격납용기 손상 유형에 따라 외부로 방출될 수 있는 사고선원항을 19개로 범주화한 것으로, 이 가운데 사고빈도가 높거나, 환경으로의 방출 방사능이 높은 사고선원항을 중심으로 인체에 대한 방사선 영향을 평가하였다. 즉, STC-6, STC-8, STC-13, STC-19는 노심손상빈도가 높은 선원항으로, STC-4, STC-14, STC-17은 환경으로 방출되는 방사능이 높기 때문에 평가대상에 포함되었다. 전체 노심손상빈도의 70%를 차지하는 STC-1, STC-2는 환경으로의 방사능방출이 전혀 없어 제외하였다(그림2).

주요 STC들에 대한 초기사건(Initiating events)을 보면 STC-6는 Small LOCA, STC-8은

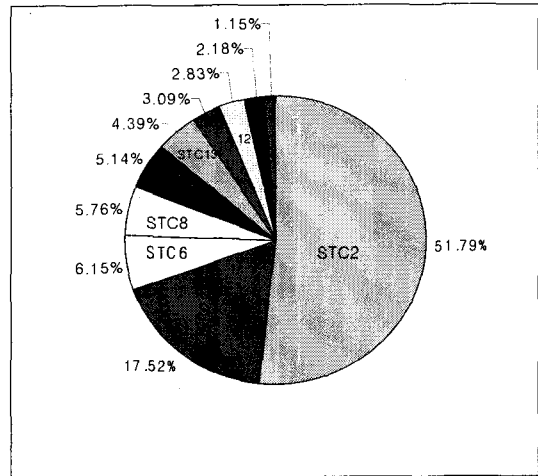


Fig 2. Contributions to core damage frequency of Source Term Categories(STCs)

Station Blackout, STC-4, STC-13 및 STC-14는 Loss of Feed Water, STC-17은 Large LOCA, STC-19는 SGTR(Steam Generator Tube Rupture)로 이루어져 있다. 여기에서 특히 STC-19는 노심손상빈도와 환경방출 방사능이 높은 두 가지 조건을 모두 만족하는 선원항임을 유의할 필요가 있으며, 이로 인해 민감도 분석을 위한 선원항으로 이용되었다.

방사선 영향평가

방사선 비상사고시의 기상상태를 모사하기 위하여 Weather Bin Sampling Method를 사용하였다. 즉, MACCS2 코드는 sampling 기법을 이용하여 사고 시점에서 일년간의 기상자료를 대표할 수 있는 기상데이터들을 추출하여 이를 방사능 구름의 대기확산 및 이동 계산에 적용시킨다. 본 연구에서는 이를 위해 울진원전부지의 일년간(2001년)의 기상자료를 시간대별 기상자료(풍향, 풍속, 대기안정도, 강우량)로 변환하여 사용하였다.

방사선영향평가를 위해서는 발전소주변 인구분포자료가 요구된다. 이를 위해 원전주변 인구분포를 16방위를 기준으로 1km간격의 16개의 angular sector를 가진 극좌표 격자상에서 추출될 수 있도록 구성하였다. 본 인구분포 산출에는 울진군의 최근 통계연보가 이용되었다[13].

MACCS2 코드는 사고 후 경과된 시간에 따라 사고단계를 비상, 중기, 말기단계로 구분하며, 본 연구에서는 사실상 비상사고시 주요 방사선피폭

이 발생되는 기간이라고 할 수 있는 비상단계에 대해서 평가하였다. 이 단계에서는 방사능 구름 및 지표면 오염이 주요 피폭원이 되며 피부 오염 및 호흡으로 인한 내부 피폭도 동시에 고려된다. 계산수행시 비상단계를 1일로 가정하였으며, 방사선 영향에 대해서는 비상단계에 나타날 수 있는 조기사망확률에 대해 평가하였다.

주민보호조치

방사선비상시 주민보호를 위해 취해지는 조치에는 옥내대피, 주민소개 및 주민이주 등이 있다. 이 가운데서 가장 모사하기 어려운 조치는 주민 소개로서 MACCS2 코드에서는 network evacuation model을 도입하여 이러한 복잡한 주민 소개에 대한 시뮬레이션을 부분적으로 가능하게 하였다. 그러나 이러한 network model을 효과적으로 응용하기 위해서는 대상지역에 대한 도로 및 주민소개특성 등이 사전에 조사되어야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 “울진원전 주변주민에 대한 소개시간평가연구[10]”에서 조사된 주민소개 평가자료중 주민통보시간, 소개준비시간, 차량소개시간 등에 대한 데이터를 이용하였으며, 소개도로망 및 소개방향에 대해서 모델링한 결과는 그림3과 같다. 주민통보시간은 비상대책과 관련하여 MACCS2 코드의 가장 큰 장점이라고 할 수 있는

것은 방사선영향평가에 앞서 주민보호조치가 고려된다는 점이다. 즉, MACCS에서는 방사선피폭에 영향을 줄 수 있는 옥내대피, 주민소개 및 주민이주 등의 대응행동이 입력될 수 있어 보다 현실적인 방사선 영향평가를 가능하게 해준다. 본 연구에서는 옥내대피 및 소개에 대한 보호조치를 가정하였으며 이러한 보호조치로 인한 피폭선량에의 영향은 민감도 분석을 통해 평가하였다.

결과 및 논의

계산결과

그림 4에서 그림 10까지는 선원향 STC-4, STC-6, STC-8, STC-13, STC-14, STC-17, STC-19 각각에 대해 동일한 방출조건하에서 주민보호조치 유형에 따라 조기사망(early fatality)이 발생할 수 있는 거리의 최대값을 보여주고 있다. 이 가운데서 최대 거리는 STC-14에서 나타나며, 95 percentile 및 최대값이 각각 13.5 km 및 23km이다. STC-6, STC-8, STC-13의 경우는 5km(95 percentile) 및 8km(peak value) 이내에서, STC-4, 17은 10km(95 percentile) 및 13km(peak value) 이내에서, STC-19는 12km(95 percentile) 및 17km(peak value)이내에서 조기사망이 발생하고 있음을 알 수 있다. 여기에서 주민보호조치와 관련한 조기사망 발생거리는 STC-6, 8 및 13을 제외하고는 주민보호조치 시행과는 무관한 듯이 보여진다. 이러한 이유는 그림 4~그림 10은 조기사망이 발생한 인구수에 관계없이 조기사망이 발생할 수 있는 최대거리만을 나타내고 있기 때문이다. 그림11~그림14는 STC-4, 14, 17, 19에 대해 주민보호조치 형태에 따른 개인의 평균 조기사망 발생위험도 변화를 보여주고 있으며 개인에 대한 실질적인 조기사망 위험도가 어떻게 변화하는가가 잘 나타내고 있다. 여기에서 알 수 있듯이 주민보호조치 유형에 따라 조기사망 발생 거리에 있어서는 차이가 없어 보이는 이들 선원향들이 개인 평균 조기사망확률에서는 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 특히 주민 소개의 경우에 있어서 뚜렷한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 옥내대피에 있어서는 5km 이상의 거리에서 조기사망 발생위험도를 감소시키고 있으나, 그림 13 및 그림 14에서 보여지는 바와 같이 환경방출 방사능이 큰 STC-17 및 STC-19에 대해서는 옥내대피로 인한 조기사망 발생위험도에 미치는 영향은 매우 적다는 사실을 알 수 있다.

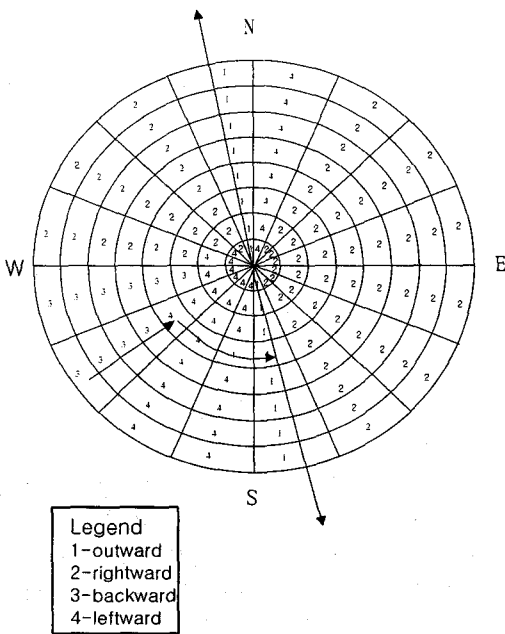


Fig. 3. A network evacuation grid for EPZ of ULJIN NPP

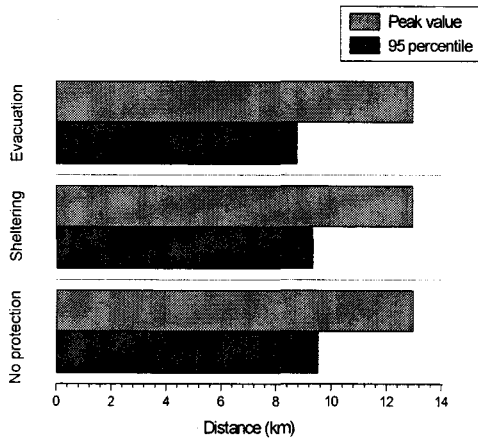


Fig. 4. Distance occurring early fatality for STC-4

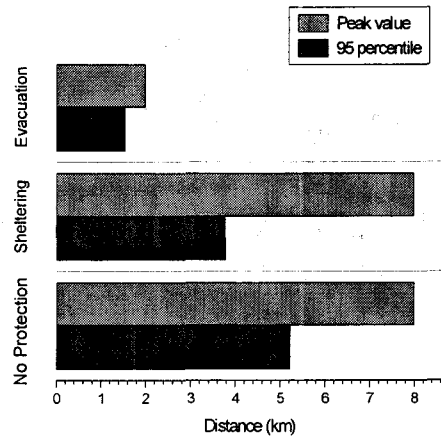


Fig. 7. Distance occurring early fatality for STC-13

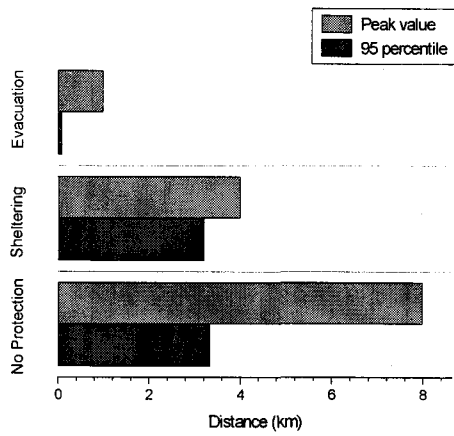


Fig. 5. Distance occurring early fatality for STC-6

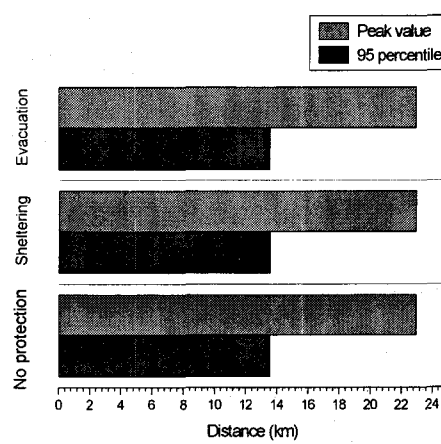


Fig. 8. Distance occurring early fatality for STC-14

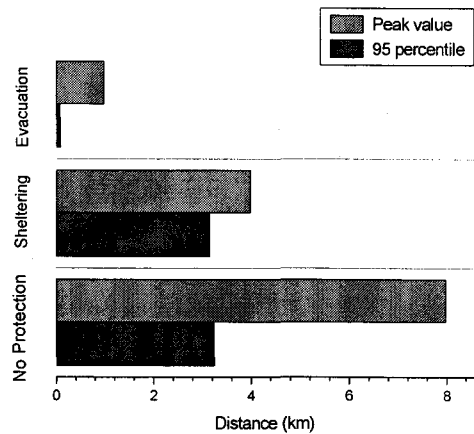


Fig. 6. Distance occurring early fatality for STC-8

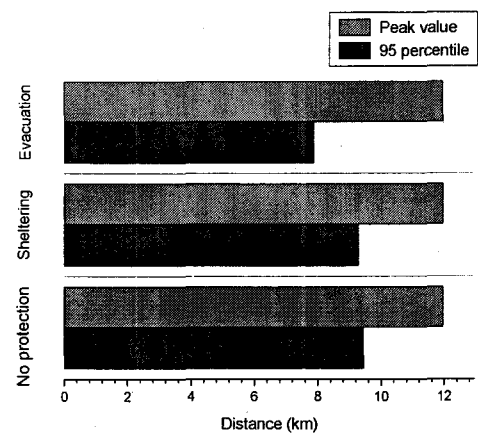


Fig. 9. Distance occurring early fatality for STC-17

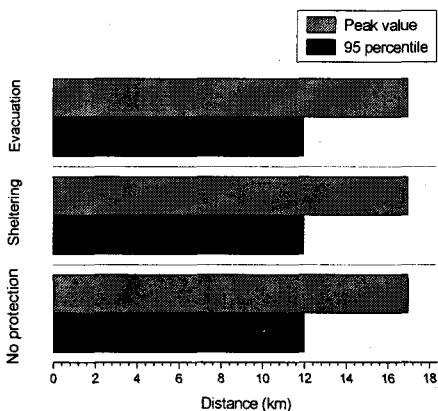


Fig. 10. Distance occurring early fatality for STC-19

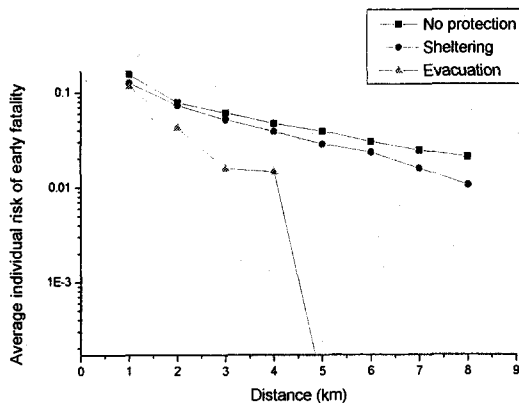


Fig. 13. Average individual risk of early fatality versus distance for STC-17

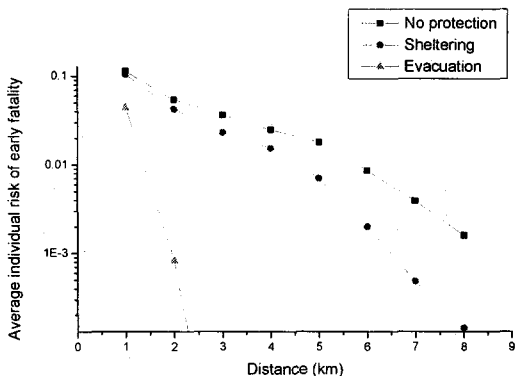


Fig. 11. Average individual risk of early fatality versus distance for STC-4

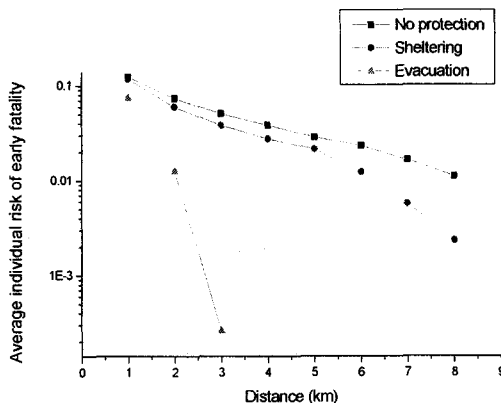


Fig. 14. Average individual risk of early fatality versus distance for STC-19

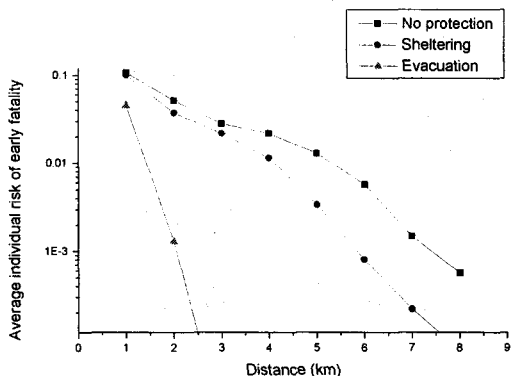


Fig. 12. Average individual risk of early fatality versus distance for STC-14

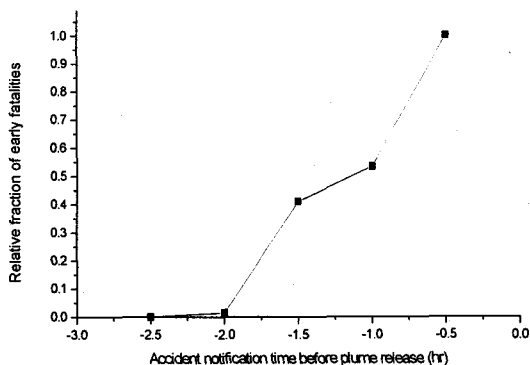


Fig. 15. Relative occurring fraction of early fatalities according to notification time delay

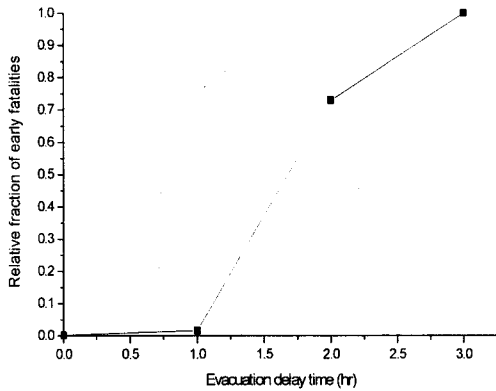


Fig. 16. Relative occurring fraction of early fatalities according to evacuation time delay

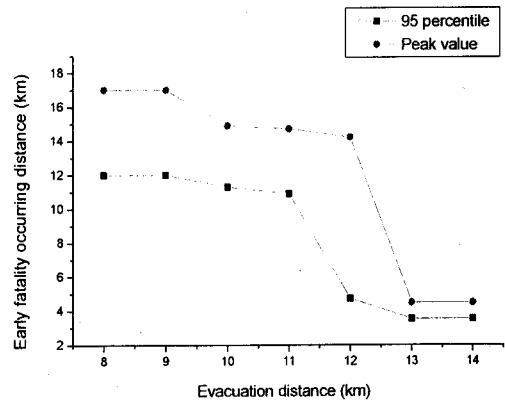


Fig. 19. Early fatality occurring distance versus evacuation distance for STC-19

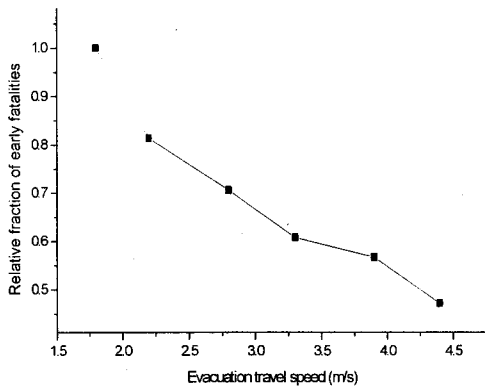


Fig. 17. Relative occurring fraction of early fatalities according to evacuation speed

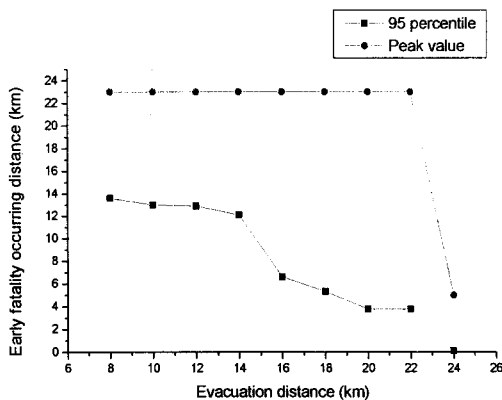


Fig. 18. Early fatality occurring distance versus evacuation distance for STC-14

주민보호조치에 따른 민감도 분석

주민보호조치 시행에 있어서 통보지연시간, 소개 지연시간, 소개속도 및 소개거리가 방사선 영향평가결과에 미치는 영향을 분석하였다. 옥내대피는 앞서 논의 된 바와 같이 주민피폭에 대해 큰 영향을 주지 못하기 때문에 민감도분석에서 제외하였다. 사고 선원항은 증기발생기 관 파단사고 선원항인 STC-19를 대상으로 하였다. 통보시간범위는 방출전 3시간부터 방출전 30분까지 30분 단위로, 소개지연시간은 0~4시간까지 1시간 단위로, 소개속도는 1.8m/s(=6.5km/hr)~4.4m/s(=16km/hr)에 대해 계산하였다. 그림15~그림17에서 알 수 있는 바와 같이 조기사망효과에 미치는 영향은 통보지연시간 및 소개 지연시간이 소개속도에 비해 매우 큰 것으로 나타났다. 즉, 소개속도증가로 인한 조기사망의 상대적 비율은 완만하게 감소하나, 통보지연시간 및 소개 지연시간의 단축은 조기사망효과를 급격히 감소시키고 있음을 알 수 있다. 특히 방사성 구름 방출전 2~3시간전의 사고통보 및 소개지연시간의 단축은 조기사망효과를 상당한 비율로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

소개거리에 따른 조기사망발생거리 분석

그림18 및 그림19은 선원항중 조기사망이 가장 먼 거리까지 발생할 수 있는 STC-14 및 STC-19에 대해 소개된 거리에 따른 조기사망 발생거리의 변화를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 STC-14의 경우는 16km 이상, STC-19의 경우는 13km이상 소개되어야 조기사망 발생거리가

현저하게 감소됨을 알 수 있다. 이것은 현재의 비상계획구역으로 설정된 8~10km의 거리가 STC-14 및 19 선원항들을 유발시키는 중대사고들에 대해서는 효과적이지 않음을 보여주는 것이라 할 수 있다. 다만 STC-14의 경우는 그림2에서 보여지는 1.15%의 기타 사고에 포함되는 발생 확률이 매우 낮은 사고로서 고려의 대상에서 배제할 수 있지만, STC-19의 경우는 실제 발생 가능성이 있는 선원항중 3번째 순위(5.14%)에 해당되므로 비상계획 수립시 반드시 고려되어야 할 선원항이라 할 수 있다.

결 론

울진 3&4호기의 사고선원항(STC-4, 6, 8, 13, 14, 17, 19)을 이용한 방사선영향평가를 수행한 결과 조기사망효과가 가장 먼 거리까지 발생할 수 있는 선원항은 STC-14로서 최대 거리는 95 percentile 및 최대값이 각각 13.5 km 및 23km로 나타났다. STC-6, STC-8, STC-13의 경우는 5km(95 percentile) 및 8km(peak value) 이내에서, STC-4, 17은 10km(95 percentile) 및 13km(peak value) 이내에서, STC-19는 12km(95 percentile) 및 17km(peak value)이내에서 조기사망이 발생하고 있음을 알 수 있었다. 이들 계산결과는 95 percentile을 기준으로 했을 때 현재 비상계획구역으로 설정되어 있는 8~10km 거리로서 STC-14 및 STC-19를 제외하고 나머지 선원항들에 대해서는 조기사망 발생확률을 크게 낮출 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다. STC-14의 경우는 16km 이상, STC-19의 경우는 13km 이상 소개되어야 조기사망 발생확률이 현저히 감소됨을 알 수 있었다. 다만 STC-14의 경우는 발생 확률이 매우 낮은 사고로서 비상계획 수립시 고려의 대상에서 제외할 수 있지만, STC-19의 경우는 실제 발생확률이 높은 사고선원항에 해당되므로 이에 대한 대책은 사전에 마련되어야 할 것이다. 이것은 STC-19의 초기사건인 SGTR의 발생가능성을 낮추거나 이에 대한 비상훈련 강화 또는 현재의 비상계획구역범위를 보다 확장함으로써 충족될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 주민 보호조치에 대한 민감도 분석결과는 사고통보 및 소개과 관련된 시간지연 또는 단축이 조기사망효과에 대해 직접적이고도 매우 큰 영향을 주고 있음을 보여주었다.

참고문헌

1. C. Viktorsson and G. Boeri, "Emergency Planning Practices and Criteria in the OECD Countries After the Chernobyl Accident" in : Proc. of a joint NEA/CEC Workshop on Emergency Planning in case of Nuclear Accident, pp.23-35, June 27-29, OECD/NEA (1989).
2. H.E. Collins and B. K. Grimes, "Planning Basis for the Development of State and local Government Radiological Emergency Response Plans in support of Light Water Nuclear Power Plants," U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-0396 (1978).
3. "Planning for Off-site Response to Radiation Accidents in Nuclear Facilities", Safety Series No. 55, IAEA (1981).
4. "Nuclear Emergency Preparedness in Canada", Advisory Committee on Radiological protection and the Advisory Committee on Nuclear Safety of AECB, (1993).
5. "원자력발전소 주변의 방재대책에 관하여", 일본원자력안전위원회, (1980).
6. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Severe Accident Risks : An assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants," U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1150 (1989).
7. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants," U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1465 (1995).
8. "영광3,4호기 원자력발전소 안전성 점검연구," 한국전력공사 (1994).
9. "Uljin Units 3&4 Final Probabilistic Safety Assessment Report", 한국전력공사 (1998).
10. 전인영, 이재기, "울진원전 방사선비상계획구역에 대한 소개시간 예측", 대한방사선방어학회지, 27(3):189-198 (2002).
11. D. I. Chanin, J. L. Sprung, L. T. Ritchie, and H. N. Jow, "MELCOR Accident Consequence Code System," U.S. Nuclear

Regulatory Commission, NUREG/CR-4691 (1990).

12. D.I. Chanin and L.A. Miller, "MACCS2: An Improved Code for Assessing Nuclear Accident Consequences," SAND97-0594 (1997).
13. "제41회 울진통계연보", 울진군 (2001).