

## 비상대응 시나리오별 건강영향 평가

### The Estimation Health Effects for the Various Scenarios of Emergency Response

정종태, 정원대

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

원자력 발전소의 중대사고시 대기 중으로 방출되는 방사성 물질로 인한 피폭으로부터 주민을 보호하기 위해 다양한 대응조치들이 수행된다. 이 중 사고 후 약 일주일 이내에 실시되는 조기 보호조치로는 대피, 소개, 주민 이주가 있다. 이들 조치의 시행으로 인한 주민보호 효과를 파악하기 위해서는 보호조치의 효율성과 시행 시간이 우선적으로 고려되어야 한다. 본 연구에서는 조기 보호조치인 대피, 소개, 주민 이주를 조합한 가장 이상적인 보호조치 선정을 위하여 다양한 비상대응 시나리오를 구성하여 보호조치를 실시하지 않는 경우와 비교함으로써 보호조치들의 상대적인 효율성을 파악하는데 그 목적이 있다. 또한, 가장 효율적인 보호조치인 소개와 관련된 변수인 소개 지연시간과 소개속도에 관한 민감도 분석을 통하여 효율적인 소개를 위한 기본자료를 얻고자 하는데도 그 목적이 있다. 가장 효율적인 보호조치로는 짧은 소개 지연시간과 빠른 소개속도를 가진 경우인데 이를 위해서는 소개 지연시간을 최소화시킬 수 있는 방법이 강구되어야 한다. 결과는 개발 중인 NARIS(Nuclear Accident Risk Information System)의 입력자료로 활용될 예정이다.

#### Abstract

The various protective actions are implemented in order to protect the neighboring population when radioactive materials are released to the atmosphere due to the severe accidents of a nuclear power plant. The early protective actions such as sheltering, evacuation, and relocation are implemented immediately after the accident and could last up to one week following the accident. The effectiveness of protective actions and implementation time should be considered first to find the impact of emergency response actions. The objective of this research is to find the relative effectiveness of early protective actions by estimating health effects for the various scenarios of emergency response actions. Also, the sensitivity analysis of evacuation delay time and evacuation speed was made to acquire basic data for making an effective evacuation strategy. The fast evacuation with short delay time is most effective among the various scenarios. Therefore, the strategy for minizing the evacuation delay time must be made to protect the neighboring population in most effective manner. The results will be used as input when developing the nuclear accident risk information system, NARIS.

## 1. 서론

원자력 발전소는 설계 단계에서부터 발전소 뿐만 아니라 주변 주민의 안전을 고려하기 위해 심층방어 개념을 이용하여 안전성을 확보하고 있다. 그러나, 설계기준 사고를 벗어나는 중대사고는 비록 발생 확률은 매우 낮지만 사고 발생시 주변 주민과 환경에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 그 현상 및 사고 전개 과정, 그리고 이로 인해 대기 중 방출되는 방사성 핵종 방출 특성 및 기상자료가 결말 효과에 미치는 영향 등에 대한 연구를 통하여 안전성을 증진시키려는 노력이 꾸준히 진행되고 있다. 1979년의 TMI 사고나 1986년의 체르노빌 사고로 인하여 일반 대중들의 원자력 발전소의 안전성에 대한 관심이 증대되었으며 특히, 1999년 일본의 핵연료 공장에서의 방사능 누출 사고로 인해 국내의 방사성 물질의 안전에 대한 관심은 더욱 더 증대되었다.

원자력 발전소에서 중대사고가 발생하여 격납건물 파손이 일어나면 방사성 물질이 대기 중으로 방출되며 방사성 물질은 바람에 의해 이동하면서 주변 주민의 건강 뿐만 아니라 주변환경의 오염이라는 심각한 문제를 야기시킨다. 이러한 방사성 물질로 인한 건강에 미치는 영향이나 경제적 영향은 리스크로써 표현되는데 이는 특정 사고의 발생 확률에 사고로 인한 결말 효과를 곱한 값으로 정의된다. 이 리스크는 발전소에서 발생하는 사고의 중요도를 결정하는 가장 중요한 판단 기준이 된다.

모든 원자력 발전소에서는 발전계통의 안전성이나 방사선에 관련된 심각한 사고가 발생할 우려가 있거나 발생했을 때 방사선이나 기타 장애로부터 발전소 종사자와 주변 주민의 건강과 재산 피해를 최소화하고, 신속하고 효과적인 사고확대 방지 및 최선의 사고수습을 위하여 적절한 준비와 대책을 강구하며, 발전소 종사자 및 지원기구의 활동과 책임을 기술하고, 비상사태 발생시 대처능력을 배양시키기 위한 목적으로 방사선 비상계획을 준비하고 있다. 이를 위하여 비상조직을 구성하고 각 조직의 임무를 지정하여 비상사태 발생시 효율적으로 대처할 수 있도록 하고 있다 [1].

방사선 비상계획을 통하여 빠른 시간 내에 주민들을 방사선으로부터 보호하기 위한 대응조치는 대피(sheltering), 소개(evacuation), 주민 이주(population relocation) 등이 실시된다. 대피의 주된 목적은 방사성 구름에 의한 피폭, 지표면에 침적된 방사성 물질에 의한 피폭, 호흡으로 인한 피폭으로 인한 주민들의 피폭선량을 최소화하는데 있다. 소개는 주변 주민들을 발전소로부터 일정 거리 밖으로 이동시키는 것으로 방사선 피폭을 피할 수 있는 가장 효과적인 방법으로 알려져 있으며 방사성 구름이 도착하기 전에 소개가 완료된다면 일반 대중을 방사선 피폭으로부터 안전하게 보호할 수 있다. 주민 이주는 방사성 구름이 지나간 이후에 방사능 준위가 정해진 기준을 초과할 경우에 주민들을 일정 기간 동안 다른 장소로 이주시키는 방법이다. 이들 조치를 적절한 시기에 효율적으로 수행한다면 주민들을 방사선 피폭으로부터 보호할 수 있다.

원자력 발전소의 중대사고시 대기 중으로 방출되는 방사성 물질로 인한 피폭으로부터 주민을 보호하기 위해 실시되는 조기 보호조치는 이들 조치의 시행으로 인한 주민보호 효과를 파악하기 위해서는 보호조치의 효율성과 시행 시간이 우선적으로 고려되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 조기 보호조치인 대피, 소개, 주민 이주를 조합한 가장 이상적인 보호조치 선정을 위하여 다양한

비상대응 시나리오를 구성하여 보호조치를 실시하지 않는 경우와 비교함으로써 보호조치들의 상대적인 효율성을 파악하는데 그 목적이 있다. 결과는 개발 예정인 원자력 중대사고 리스크 정보 시스템(NARIS, Nuclear Accident Risk Information System)의 기본 입력자료로 활용될 예정이다.

## 2. 비상대응 조치

원자력 발전소 사고로 인해 영향을 받는 각 개개인의 피폭선량 집적 계산시 피폭 받는 기간 뿐만 아니라 사고 도중이나 사고 이후의 각각의 위치도 고려되어야 한다. 원자로 사고시 방사능 누출 영향을 완화시키기 위한 비상대응 조치들은 사고결말에 매우 중요한 영향을 미친다. 비상대응 조치는 방사성 피폭선량과 일반대중의 건강에 미치는 영향을 감소시키고 이로 인하여 사고로 인한 경제적 비용을 절감하기 위해 설계된 보호조치(protective measure)를 의미한다. 이들 보호조치 중 대표적인 것은 소개, 대피, 임시이주, 오염된 작물의 폐기 처분, 제염, 한시적 경작금지, 재산 수용, 경작물 생산 제한 등이 있다. MACCS[2] 코드에서 이들 완화조치를 시행하는 기간은 3가지로 구분되는데 이는, 비상 단계, 중간 단계, 후기 단계이다.

발전소 부지의 계산격자 내에 거주하는 사람들은 cloudshine, groundshine, cloud inhalation, deposition to skin, resuspension inhalation에 의한 조기피폭을 받게 된다. 이들은 또한, groundshine이나 inhalation에 의한 후기피폭을 받을 수도 있다. 소개, 대피, 임시이주는 사고 후 약 일주일 이내에 시행되므로 일반적으로 비상대응조치(Emergency Response Action)로 불린다. 비상대응을 위한 여러 계획들은 미국 내의 방사선 비상 준비 프로그램(Radiological Preparedness Program)의 기초를 이룬다.

비상 단계 이후는 중간 단계로 이때에는 임시 이주만이 보호조치로써 고려된다. 이는 중간단계에서의 피폭선량이 사용자에게 의해 지정된 선량 제한치 이상이 되면 수행된다. 후기 단계에서는 오염된 작물의 폐기처분, 제염, 한시적 경작 금지, 재산수용, 경작물 생산 제한 등이 고려되며 장기 조치로 불린다. 임시 이주, 제염, 일시적 경작 금지는 발전소 주변에 거주하는 사람들을 groundshine이나 resuspension inhalation으로 인한 후기 피폭을 조절하는데 그 목적이 있다. 작물의 폐기 처분이나 경작물의 생산 금지는 그 지역에서 생산되는 음식물을 소비하는 사람들의 오염된 음식물 섭취로 인한 피폭을 조절하는데 그 목적이 있다.

MACCS 코드에서는 3가지의 서로 다른 비상대응 전략 혹은 시나리오와 각각의 가중치를 구성할 수 있다. 이 가중치는 사람이나 시간의 비율로 지정되며 각각의 합은 1이 된다. MACCS 코드 내의 EARLY 모듈에서 수행되며 결과는 각각의 시나리오별로 제공된다. 서로 다른 비상 시나리오에 대한 가중 합은 지정된 가중치들을 이용하여 각각의 조기 건강영향 척도들에 대해 계산이 이루어진다.

주어진 하나의 비상대응 시나리오에 대해 3개의 서로 다른 형태의 보호조치들이 사용자에게 의해 지정되는데 이는 소개, 대피, 임시 이주이다. MACCS 코드에서의 비상대응 모델은 내부의 대피구역, 3개까지의 소개구역, 그리고 외부의 대피구역을 사용할 수 있다. 그림 1은 서로 다른 비상대응 구역의 대표적인 모습을 보여준다.

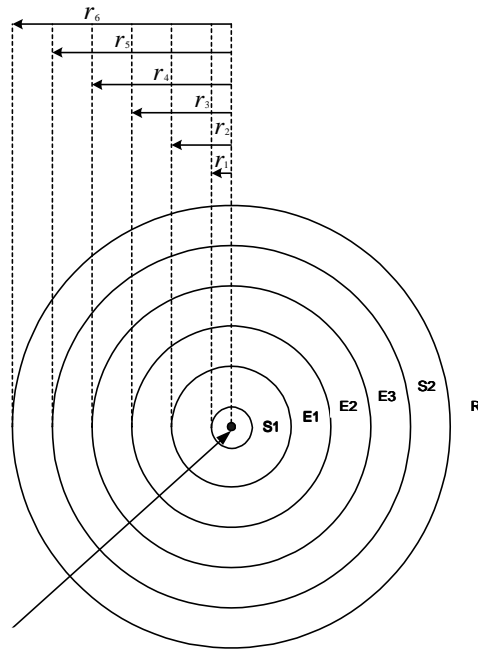


그림 1. 비상 대응 구역

여기서 반경  $r_1$ 은 발전소 부지의 비거주 지역 경계이다. 임시이주 보호조치는 소개나 대피구역 외부의 모든 공간 계산격자에 대해 적용된다. 위 그림의 서로 다른 보호조치의 공간 계산격자는 내부 대피구역, S1, 소개구역 1, E1, 소개구역 2, E2, 소개구역 3, E3, 외부 대피구역, S2, 임시 이주 구역 R로 정의된다.

소개나 대피구역은 선택사항이다. 즉 소개나 대피구역 어느 것도 지정을 하지 않으면 전지역은 임시이주 구역이 된다. 차폐계수(shielding factor)는 사용자에게 의해 지정되는데 소개자, 대피자, 일상 생활을 계속하는 사람의 3가지 그룹에 대해서 지정된다. 차폐계수는 각각의 피폭경로에 대해 정의되는데, 이들 차폐계수는 1.0보다 작거나 같은 값을 가지며 보호 조치에 따른 피폭선량의 감소를 계산하기 위한 인자로써 이용된다. 사용자에게 의해 지정되는 차폐계수를 유도하기 위해서는 가정들이 필요한데 건물의 구조물 특성이나 사람들이 실내나 실외에 있는 시간 비율 등이다. 이 차폐계수는 계산된 피폭선량을 0과 1 사이의 선형 보정 인자로 감소시켜주기 위해 이용된다. 따라서, 차폐계수가 적으면 적을수록 보호조치 효과가 커지게 된다.

## 2.1 소개(Evacuation)

많은 양의 방사성 물질 방출에 대한 경고시간(warning time)은 0부터 수 시간까지 다양하다. 사고경위나 발전소의 거리에 따라 몇 시간에 걸쳐 방출된 방사성 구름이 특정 인구 그룹에게 도달하기 전에 지나갈 수도 있는데 이는 방출 이후 풍속에 좌우된다. 이 시간 때문에 소개는 미국 내의 방사선 비상대비 프로그램(radiological emergency preparedness program)에 있어서 대중 보호 조치로써 상당한 주목을 받는 것이다. 이 소개는 방사선 피폭을 피할 수 있는 가장 효과적인 방법

이며 만약에 방사성 구름이 도착하기 전에 소개가 완료되면 완전하게 일반 대중을 보호할 수 있다.

MACCS 코드에서 사용하는 소개 모델에서는 사람들이 이동하기 전에 지연시간(delay time)이 이용되는데 이 시간 이후 사람들은 일정한 속도로 원자로로부터 방사상으로 외부로 이동하게 된다. 이 때 서로 다른 차폐계수와 호흡률이 적용되는데 소개를 기다리는 소개자(normal activity)와 소개 중인 사람(evacuees)들에 대해 각각 다르게 적용된다. 사용자는 3개의 서로 다른 소개구역을 지정할 수 있다. 각각의 소개구역은 각각의 사용자가 지정한 소개 시작 이전의 지연시간을 가질 수 있다. 지정된 소개구역의 사람들은 지정된 지연시간 이후에 하나의 그룹으로써 이동한다고 가정한다. 그러나, 3개의 소개구역 내의 모든 소개자들은 사용자에게 의해 지정된 동일한 소개속도로써 소개가 이루어진다.

소개자들은 사용자가 지정한 원자로로부터의 일정거리 밖으로 소개가 이루어지며 여기에서는 더 이상 방사성 구름으로부터의 피폭은 발생하지 않는다고 가정한다. 이는 SNL Siting Study[3]에서 사용된 가정과 유사하다. 만약에 플룸이 소개구역 내의 특정 공간 계산격자를 통과하지 않았다면 그 격자 내의 사람들은 소개가 이루어지지 않은 것처럼 취급한다. 만약, 방사성 구름이 소개자의 공간 계산격자를 통과했다면 소개자들은 사용자에게 의해 지정된 비상단계 종료시점(예를 들면, 방사성 구름 도착 후 7일)에서 그들 원래의 공간 계산격자로 되돌아갈 수도 있다. 소개자들이 원래의 공간 계산격자로 되돌아가느냐 그렇지 않느냐는 CHRONC 모듈에서 평가되는 생존기준(habitability criterion)에 의해 결정된다. 따라서, 소개자들에 대한 더 이상의 방사선 피폭은 EARLY 모듈에서는 계산이 이루어지지 않으며 추가적인 방사선 피폭은 CHRONC 모듈에서 계산이 이루어진다.

소개자들은 이동하기 전에 정상 활동을 한다고 가정한다. 이 기간 동안에는 정상 활동시의 차폐계수(cloudshine, groundshine, inhalation and skin)가 적용된다. 이동 후에는 소개자들은 소개자들에 대한 차폐계수가 소개 동안에 적용된다. MACCS 코드의 방사성 구름 이동 모델에서는 방출이 일어나는 동안 가정된 방출 지속시간과 풍속을 이용하여 계산된 유한 방사성 구름 길이를 지정하게 된다. 계산상 편의를 위해 방사성 구름의 길이는 방출기간 동안 일정하다고 가정하며(즉, 방사성 구름의 앞과 뒤가 같은 속도로 이동) 방사성 물질의 농도는 방사성 구름 길이에 대해 일정하다고 가정한다. 소개 중인 사람들의 대기중 방사성 동위원소의 피폭기간을 결정하기 위해서 정지중이거나 이동 중인 소개자들의 방사선 위치의 시간의 함수로써 방사성 구름의 전면과 후면의 위치가 비교된다. 소개 중인 사람들의 방사선 피폭은 소개하기 전에 받은 피폭선량과 소개 도중에 받는 피폭선량의 합으로써 결정된다.

## 2.2 대피(Sheltering)

대피구역 내에서 소개하지 않은 사람들은 소개구역에 대해 정의된 차폐계수를 이용하여 방사선 피폭계산이 이루어진다. 비상대응 모델에서 이용되는 대피는 방사선 피폭에 대한 예방수단으로써

일반대중에 의해 행해지는 신중한 행동으로 정의된다. 이 때 방사선 피폭은 방사성 구름이 지나가는 동안이나 이후에 실내에 있거나 문이나 창문으로부터 떨어져 있음으로써 받을 수 있는 모든 방사선 피폭을 의미한다. 사람이 거주하는 건축 구조물 자체에 의한 대피는 대기 중에 존재하거나 지표면에 침적된 방사성 동위원소의 외부피폭에 대해 어느 정도 방호 역할을 해준다.

또한, 창문을 닫거나 공기순환 시스템을 통해 구조물 내부에 존재하는 방사성 동위원소를 제거하는 것도 호흡으로 인해 인체 내부에 흡수되는 방사성 동위원소의 양을 줄여줄 수 있다. 대피에 의한 보호조치의 경우, 사용자는 대피 지연시간(sheltering delay time from the alarm time)과 대피기간(sheltering duration time)을 지정해 주어야 한다. 사람들이 실내에 들어가거나 창문을 닫거나 하여 대피를 하기 전에 사람들은 정상 활동을 하고 있다고 가정하며 정상 활동시의 차폐계수가 이 기간 동안 적용된다. 대피를 한 이후에는 대피기간 동안 대피시의 차폐계수가 적용된다. MACCS 코드에서는 대피 이전과 대피 이후에 받는 피폭선량의 합을 계산한다. 대피기간 이후에는 사람들은 공간 계산격자로부터 벗어나는 것으로 가정하며 EARLY 모듈에서는 더 이상의 방사선 피폭계산은 이루어지지 않는다. 만약 방사성 구름이 공간 계산격자를 벗어난다면 대피자들은 비상단계 종료시점(약 7일)에서는 그들의 본래 공간 계산격자로 되돌아갈 수 있다. 대피자들이 본래의 공간 계산격자로 돌아가느냐 그렇지 않느냐는 CHRONC 모듈에서 평가되는 생존 조건(habitability criterion)에 의해 결정된다. 따라서, 대피자들에 대한 추가 방사선 피폭은 CHRONC 모듈에서 계산이 이루어진다.

## 2.3 인구 이주(Population Relocation)

인구 이주는 비상대응 모델에서 침적 이후 소개하지 않은 사람들의 일시적인 이주으로써 정의된다. 이 모델은 임시이주에 대한 두개의 모델 즉, hot-spot relocation, normal relocation을 제공하는데 이는 방사성 구름 도착 이후 사용자가 지정하는 시간에 이루어지며 이는 cloudshine, groundshine, cloud inhalation, resuspension inhalation으로부터 받은 피폭선량이 사용자가 지정한 제한치를 초과했을 경우 수행된다.

이 인구 이주는 지표면이나 다른 표면에 침적된 방사성 동위원소로 인한 방사선 피폭을 제한하기 위해 이용되는 사고 이후 보호조치이다. 이 임시 이주는 사고 이후 대응조치이기 때문에 즉시 소개와는 달리 선택적인 방식으로 수행될 수 있다. 많은 경우, 오염된 표면에 대한 외부피폭은 상대적으로 짧은 시간에 cloudshine이나 inhalation 피폭경로로 인한 피폭보다 훨씬 더 많은 피폭을 야기한다.

사용자는 hot-spot relocation 기준이나 normal relocation 기준을 정의할 수 있다. 두개의 이주 기준에 대해 사용자는 선량 제한치, 선량 제한치에 대한 인체 기관, 이주시간을 지정한다. 예를 들어, normal relocation에 대해 일주일에 0.25 Sv 유효 전신피폭 선량당량(effective whole body dose equivalent, EDE), 방사성 구름 도착 이후 24시간의 이주 시간 또는 hot-spot relocation에 대해 일주일에 0.5 Sv EDE, 방사성 구름 도착 이후 12시간의 이주시간이 이용될 수 있다. Normal 또는 hot-spot relocation의 필요성을 평가하기 위해 다음 피폭경로에 대해서 받는 예탁선

량(dose commitment)들이 고려된다. 방사성 구름이 이동하는 동안의 cloudshine과 호흡에 의한 피폭선량, 비상 단계 동안의 groundshine에 의한 피폭선량, 비상 단계 동안의 재부유된 방사성 물질에 의한 피폭선량, 두 가지 형태의 호흡에 의한 전 생애 동안의 예탁 선량이다.

이주하는 사람들은 그들의 위치를 떠나기 전에는 정상 활동을 하고 있다고 가정한다. 이들이 이주하기 전 정상 활동을 하는 기간에는 정상 활동에 대한 차폐계수가 적용된다(예를 들어, normal relocation에 대해 방사성 구름 도착 후 24시간). 일단 이주를 하게 되면 EARLY 모듈에서는 더 이상의 피폭선량 계산은 이루어지지 않는다. 추가적인 피폭선량은 CHRONC 모듈에서 계산이 이루어진다. 이주민들이 원래의 지점으로 되돌아갈지 그렇지 않을지는 CHRONC 모듈에서 평가되는 생존조건(habitability criterion)에 의해 결정된다.

### 3. 비상대응 시나리오

모든 원자력 발전소에서는 발전계통의 안전성이나 방사선에 관련된 심각한 사고가 발생할 우려가 있거나 발생했을 때 방사선이나 기타 장애로부터 발전소 종사자와 발전소 인근 주민의 건강과 재산피해를 최소화하고, 신속하고 효과적인 사고확대 방지 및 최선의 사고 수습을 위하여 적절한 준비와 대책을 강구하며, 발전소 종사자 및 소외 지원기구 간의 활동과 책임을 기술하고, 비상사태 발생시 대처능력을 배양시킬 목적으로 비상계획을 준비하고 있다. 이 비상계획서에는 비상계획 수행 절차서, 운영 절차서 및 비상운전 절차서에 관한 사항을 총괄적으로 기술하며 세부적인 수행 사항이 기술되어 있다.

또한, 비상계획서에는 주민 보호조치에 관한 내용이 기술되어 있는데 대표적인 주민보호 조치인 대피 및 소개는 사고의 형태 및 주민보호 기준에 의거 결정되나 예상 피폭선량이 그다지 크지 않거나 예상 피폭선량이 주민 보호기준의 소개 단계이거나 또는 방사성 물질의 확산 시간이 방재 관계자 동원 지시 및 주민 이동시간에 비하여 짧을 경우에는 동요나 혼란 등을 초래할 위험성이 높은 소개조치에 우선하여 옥내 대피를 취하도록 하고 있다. 사고 초기단계 주민 보호조치에 대한 피폭선량 기준은 대피의 경우에는 전신 피폭선량 5~50 mSv, 단일장기 피폭선량 50~500 mSv, 갑상선 옥소에 복용은 단일장기 피폭선량 50~500 mSv, 소개의 경우에는 전신 피폭선량 50~500 mSv, 단일장기 피폭선량 500~5,000 mSv로 규정하고 있다.

주민의 소개 기준에 따라 사고의 규모, 풍향 및 그 변화 상태 등을 고려하여 오염농도가 클 것으로 예측되는 지점에 대하여 발전소로부터의 거리를 고려하여 확대 조정할 수 있도록 하였으며 소개 범위는 농도 지점을 중심으로 비상계획 구역 내의 풍하측 60° 지역 이내의 거주민을 주 대상으로 한다. 그리고, 주민의 소개는 소개 기준에 의해서만 결정되는 것이 아니고 발전소 상태, 시행 가능성 여부, 시행시 발생될 수 있는 위험, 영향 범위 내의 주민분포 및 소개시 방사선량율의 감소 효과 등을 고려하도록 규정하였다.

방사선 비상계획서에는 또한, 대피 및 소개에 관한 규정 뿐만 아니라 음식물 섭취 제한 조치, 방사성 방호 약품 사용, 오염지역 제염 요령 등에 관한 세부적인 기준이나 절차, 방법 등에 대해서도 기술되어 있다.

실제로 중대사고가 발생하여 대기 중으로 방사성 물질이 방출되면 위의 일반적인 규정을 기준으로 실제적인 주민보호를 위한 효율적인 비상대응 조치가 신속하게 시행되어야 한다. 본 연구에서는 사고 발생 이후 약 일주일 정도의 기간을 가지는 비상단계에서 주민들에게 미칠 수 있는 건강영향을 최소화하기 위해 취할 수 있는 소개, 대피, 임시이주를 고려한 비상대응 시나리오를 구성하여 건강영향 값들의 변화를 비상대응 조치를 취하지 않았을 경우의 값들과 비교/분석함으로써 각각의 비상대응 수단의 효율성을 파악하고 최적의 비상대응 시나리오를 선정할 수 있는 기본 자료를 확보하였다. 선정된 비상대응 시나리오는 표 1에 요약되어 있다. 시나리오 1은 소개와 대피가 이루어지지 않는 경우로 계산 결과는 나머지 비상대응 시나리오 실시 후의 건강영향 결과와의 비교/분석을 위한 기본 자료로써 활용된다.

### 3.1 비상대응 시나리오별 건강영향 평가

표 1의 비상대응 시나리오별 건강영향 평가 결과는 그림 2, 3, 4에 도시된 바와 같다. 조기 사망자 수나 조기 상해자 수를 시나리오 1의 결과와 나머지 비상대응 시나리오의 결과와 비교해 보면 모든 비상대응 시나리오에서 소개나 대피를 하지 않는 시나리오 1의 결과 보다 적게 나타나기 때문에 소개나 대피와 같은 주민 보호조치는 반드시 실시되어야 한다. 소개나 대피와 같은 보호조치를 시행했을 때 조기 사망자 수와 조기 상해자 수의 결과를 비교해보면 조기 사망자 수가 조기 상해자 수 보다 훨씬 더 많이 감소함을 알 수 있다. 즉, 가장 많이 감소하는 경우는 시나리오 6, 즉 짧은 소개 지연시간과 빠른 소개 속도의 경우로 조기 사망자 수는 시나리오 1의 1.8% 수준으로 감소하는데 반해 조기 상해자 수는 17.7% 수준으로 감소한다.

시나리오2~시나리오 7은 소개를 실시하는 경우를 소개속도와 소개 지연시간을 서로 달리한 경우인데 효과적인 소개를 위해서는 빠른 소개 속도, 같은 소개 속도의 경우에는 소개 지연시간이 짧을수록 주민에게 미치는 건강상의 피해를 최소화시킬 수가 있다. 즉, 가장 빠른 소개속도와 짧은 소개 지연시간을 가진 시나리오 6의 경우, 조기 사망자의 수는 소개나 대피를 하지 않은 시나리오 1의 약 1.8% 수준으로 감소한다. 그런데, 소개속도가 가장 느리고 소개 지연시간이 상대적으로 긴 시나리오 3는 조기 사망자의 수가 시나리오 1의 15.3% 수준이다. 그리고, 같은 소개속도의 경우, 소개 지연시간이 2시간인 경우와 4시간인 경우 조기 사망자의 수를 소개 속도가 0.33 m/sec 인 경우에는 약 2배, 소개 속도가 1.0 m/sec 인 경우에는 약 3배, 소개 속도가 1.8 m/sec 인 경우에는 약 4배 정도의 차이가 남을 알 수 있는데 이를 통하여 소개속도가 빨라질수록 소개 지연시간을 줄여줌으로써 보호조치 시행으로 인한 주민들의 건강상의 피해를 최소화시킬 수 있음을 알 수 있다.

시나리오 8과 9는 각각 소개구역 내부와 외부에 대피구역을 고려한 비상대응 시나리오인데 결과는 대피구역이 내부와 외부에 존재하는 경우의 값 차이는 없으며 소개만 이루어지는 경우보다 조기 건강영향의 값들이 높게 나타난다. 따라서, 대피구역을 두기보다는 소개를 함으로써 주민들의 건강상의 피해를 최소화시킬 수 있다. 그러나, 대피만을 통해서도 주민보호의 효과가 충분한 경우에도 사회적으로 많은 혼란을 야기할 수 있는 소개를 실시해야 하느냐의 여부는 피폭선량에



대한 정확한 예측을 기본으로 비상대응 수단을 선택해야 하는 사람들의 신중한 의사결정이 필요하다고 볼 수 있다.

표 1. 비상대응 시나리오

시나리오	설명	대표 변수 값
1	No Evacuation/No Sheltering	
2	Slow Evacuation/Short Delay Time	소개속도: 0.33 m/sec 소개지연시간: 2 hr
3	Slow Evacuation/Long Delay Time	소개속도: 0.33 m/sec 소개지연시간: 4 hr
4	Medium Evacuation/Short Delay Time	소개속도: 1.0 m/sec 소개지연시간: 2 hr
5	Medium Evacuation/Long Delay Time	소개속도: 1.0 m/sec 소개지연시간: 4 hr
6	Fast Evacuation/Short Delay Time	소개속도: 1.8 m/sec 소개지연시간: 2 hr
7	Fast Evacuation/Long Delay Time	소개속도: 1.8 m/sec 소개지연시간: 4 hr
8	Inner Sheltering and Evacuation	대피시간: 0.5 hr 대피기간: 0.5 일
9	Evacuation and Outer Sheltering	대피시간: 0.5 hr 대피기간: 0.5 일

다양한 비상대응 시나리오를 구성하여 보호조치를 시행하지 않은 경우와 비교/분석한 결과에 의하면 비상단계에서 수행할 수 있는 소개와 대피 중에서 소개가 주민들의 건강상의 피해를 최소화시킬 수 있는 가장 효과적인 수단임을 알 수 있다. 또한, 소개로 인한 주민보호 효과를 극대화시키기 위해서는 소개속도는 빠를수록 좋으며 더욱 더 효과적인 주민보호를 위해서는 소개 지연시간을 최소화시킬 수 있어야 한다. 그러나, 효율적인 비상대응 조치를 취하기 위해서는 소개로 인해 야기될 수 있는 사회적 혼란이나 부수적인 영향을 고려해야 하며 정확한 피폭선량 예측 결과에 기초한 신중한 의사결정이 이루어져야 한다.

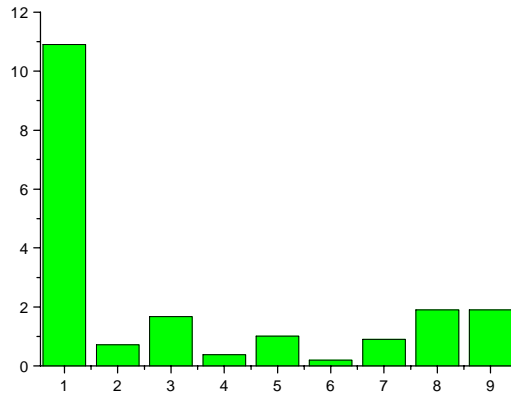


그림 2. 시나리오별 조기 사망자 수의 변화

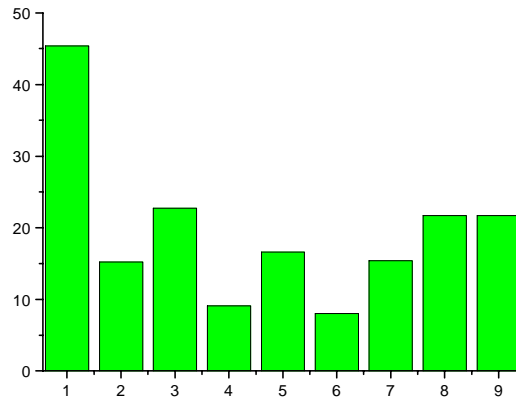


그림 3. 시나리오별 조기 상해자(구토) 수의 변화

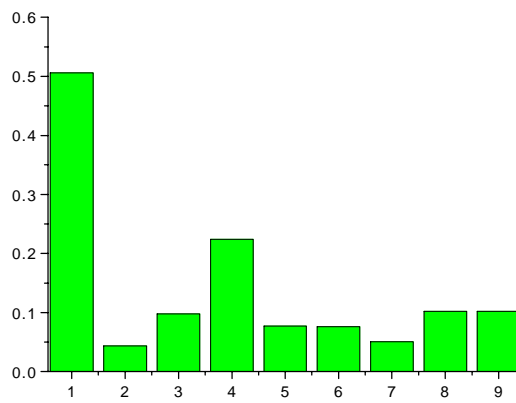


그림 4. 시나리오별 조기 사망 리스크의 변화

## 3.2 소개 변수의 민감도 분석

### 가. 소개 지연시간

소개 지연시간은 경고시간 이후 사람들이 소개를 시작하기 전까지의 시간으로 정의되며 허용 가능한 범위는 0초부터 1일(86,400초)까지이다. 사람들은 소개를 시작하기 전에는 정상적인 활동을 계속하면서 방사성 구름에 의한 피폭을 받게 된다. MACCS 코드에서는 소개구역을 3개까지 지정할 수 있으며 각각의 소개 구역에 대해 소개 지연시간을 지정해야 한다. RSS 연구의 기초가 되는 EPA의 소개자료 분석결과는 소개 지연시간의 평균값이 3시간임을 보여준다.

본 연구에서는 소개 지연시간으로 최소 0.5시간, 최대 5시간까지 변화시켜 가면서 건강영향 값들의 변화를 살펴 보았는데 소개 지연시간의 변화에 따른 조기사망 리스크의 변화는 그림 5에 도시된 바와 같다. 소개 지연시간이 0.5시간인 경우 조기 사망자의 수는 없는 것으로 나타나며 소개 지연시간이 증가하면서 조기 건강영향의 값들이 증가함을 보여준다. 이는 소개가 이루어지기 전에는 정상활동을 한다고 가정하기 때문에 방사성 구름에 의한 피폭을 받지만 소개가 이루어지면서 방사선 피폭을 피할 수 있기 때문이다. 즉, 개인이 받는 피폭선량은 소개를 위해 이동 중에 받는 피폭선량 보다 소개 지연시간 동안 방사성 구름에 의한 피폭이 크다는 것을 의미한다. 따라서, 소개가 필요한 경우에는 소개가 이루어지기 전까지 소모되는 시간을 최대한 줄여야만 소개 효과를 극대화시킬 수 있다.

### 나. 소개 속도

소개 속도는 일반적으로 소개해야 할 마지막 사람이 이동하는데 걸린 시간과 소개 거리를 이용하여 구해진다. RSS에서는 EPA의 소개자료를 근거로 유효 소개 속도를 구하여 이용하였지만 우리 나라에서는 아직 소개에 관한 자료가 없기 때문에 실제 소개 경험을 토대로 한 유효 소개 속도는 구할 수가 없다. 영광 1,2호기 비상계획서에는 발전소 주변을 1.6km, 4.8km, 8.0km로 구분하여 소개속도를 추정하였다. 결과에 의하면 최소 소개속도는 0.26m/sec, 최대 소개속도는 0.49 m/sec가 된다. 또한, NUREG-1150[4] 연구에서는 Surry 발전소의 소개속도로써 1.8 m/sec를 이용하였다. 본 연구에서는 소개속도로 0.1 m/sec부터 5.0 m/sec까지 변화시켜 가면서 조기사망 리스크 값들의 변화를 살펴보았는데 결과는 그림 6에 도시된 바와 같다. 또한, 0.1 m/sec의 소개속도를 기준으로 소개속도 증가에 따른 조기사망 리스크의 감소는 그림 7에 도시된 바와 같다. 결과에 의하면 소개 속도가 증가하면서 조기 건강영향의 값들은 모두 감소한다. 그러나, 소개속도가 1.0 m/sec까지 증가할 때까지 건강영향 값들의 감소 폭은 크지만 1.5m/sec 이상의 소개속도에서는 값들은 거의 변화가 없다. 따라서, 소개가 인근 주민들의 건강에 미치는 영향을 최소화시키기 위해서는 소개속도를 일정 값 이상으로 증가시키기보다는 소개 지연시간을 줄여서 소개가 필요할 때 빠른 시간 내에 소개가 이루어질 수 있도록 해야 하며 1.0 m/sec 내외의 소개속도로 소개가 이루어지는 것이 바람직하다.

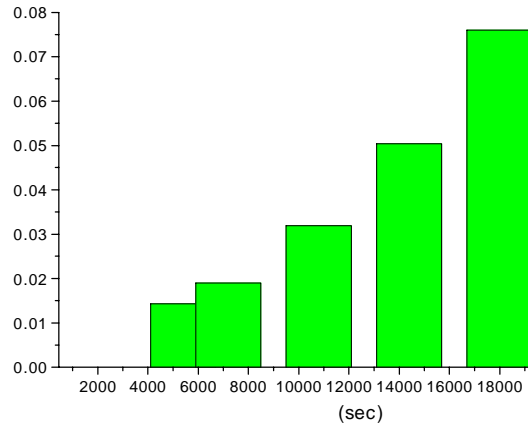


그림 5. 소개 지연시간 변화에 따른 조기 사망 리스크의 변화

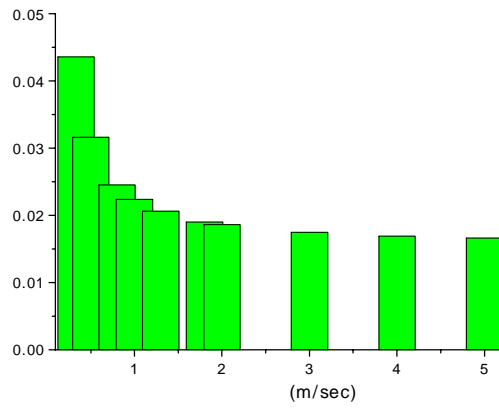


그림 6. 소개 속도 변화에 따른 조기 사망 리스크의 변화

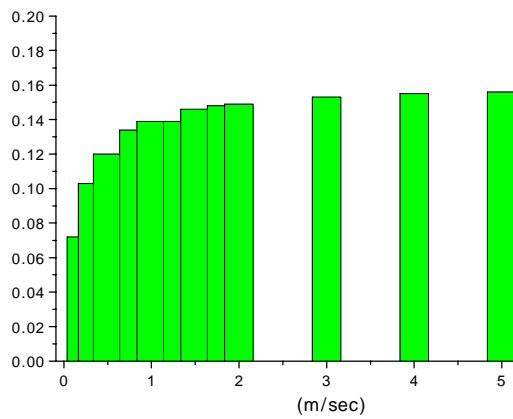


그림 7. 소개 속도 변화에 따른 조기 사망 리스크 감소의 변화

## 4. 결론

원자력 발전소에서 중대사고가 발생하여 대기 중으로 방사성 물질이 방출될 우려가 있거나 방출되었을 때 인근 주민과 환경 보호를 위하여 대응조치를 시행하게 된다. 이러한 비상대응 조치가 효율적으로 주민을 보호하기 위해서는 비상대응 수단 변수들에 대한 민감도를 분석하고 가장 효율적인 비상대응 수단을 선정하여 가장 적절한 시간에 시행되어야 한다. 본 논문에서는 효율적인 비상대응 수단 선정을 위하여 사고 발생 초기에 시행할 수 있는 비상 대응조치인 대피, 소개, 인구 이주를 조합한 다양한 비상대응 시나리오를 구성하여 조기 건강영향에 미치는 영향을 평가하여 주민 보호조치를 시행하지 않는 경우와 비교/분석을 수행하였다. 또한, 효율적인 비상대응 수단인 소개의 효율성을 파악하기 위하여 소개 지연시간과 소개속도에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 영광 3,4호기를 대상 발전소로 평가한 주요 결과는 다음과 같다.

1. 사고 발생 이후 약 일주일 이내에 실시되는 조기 비상대응 수단 중 주민들에 미치는 건강영향을 최소화시킬 수 있는 비상대응 수단은 소개이다.
2. 소개가 효율적인 주민 보호수단이 되기 위해서는 경고시간 이후 소개가 이루어지기 전까지의 시간인 소개 지연시간을 최소화해야 하며 빠른 소개속도를 가져야 한다. 그러나, 소개속도가 2m/sec 이상에서는 감소 효과는 매우 적다.
3. 여러 가지 비상대응 시나리오 중 가장 효율적인 시나리오는 짧은 소개 지연시간과 빠른 속도를 가진 소개인데, 소개가 가장 효율적으로 주민들을 보호하기 위해서는 소개 지연시간을 최소화시킬 수 있는 방법이 강구되어야 한다.
4. 가장 효과적인 주민 보호수단인 소개를 시행하기 위해서는 소개로 인해 야기될 수 있는 사회적 영향이나 부수적인 영향을 고려하여 정확한 피폭선량 예측에 기초한 신중한 의사결정이 이루어져야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. 영광원자력 1, 2, 3, 4 호기 방사선 비상계획서, 한국전력공사 1995.
2. D. I. Chanin, J. L. Sprung, L. T. Richie, and H. N. Jow, "MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS)," NUREG/CR-4691, SAND86-1562, Sandia National Laboratories, February, 1990.
3. Aldrich D. C. et al., "Technical Guidance for Siting Criteria Development," NUREG/CR-2239, 1982.
4. USNRC, "Severe Accidents Risks: An Assessment of Five Nuclear Power Plants," U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1150, June 1989.