2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 발전원별 중대사고 리스크 비교 평가
# A Comparive Estimation of Severe Accident Risks for Various Electricity Generation Systems

정종태, 김태운, 하재주
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

## 요약

경수로형인 1,000MWe 한국형 표준원전과 중수로형인 600MWe CANDU 원자력 발전소의 가상 중대사고시 대기 중으로 방출되는 방사성 물질로 인한 인체 건강영향에 미치는 리스크를 평가하고 비교하였다. 또한, 외국의 다양한 발전원에 대한 중대사고 리스크와 비교하였다. 두 발전소 모두 반경 80km 까지의 인구분포와 2단계 PSA의 결과로 주어지는 방사선원 방출군별 방출 분율과 노심 재고량을 이용하였으며 평가 도구로는 MACCS2를 이용하였다. 인체에 미치는 영향은 조기사망과 암사망을 선정하였으며 반경 10 마일 밖으로 소개가 이루어진다고 가정하고 평가 결과는 사고 발생빈도를 고려한 리스크를 CCDF 곡선군으로 나타냈다. 평가 결과에 의하면 경수로형 원전에 비해 중수로형 원전이 리스크가 적게 나타나는데 이는 중수로형 원전이 경수로형 원전에 비해 가상 중대사고로 인해 대기중으로 방출되는 방사성 물질의 양이 적기 때문이다. 또한, 외국의 결과인 화석연료 및 수력 발전소의 중대사고 리스크와 비교하였을 경우, 국내의 원자력발전소의 중대사고 리스크는 이들 발전소 보다 1/100 ~ 1/1,000의 값을 나타내기 때문에 국내 원자력 발전소는 매우 안전하다는 것을 확인하였다.

## Abstract

The health effects resulting from severe accidents of typical 1,000MWe KSNP(Korea Standard Nuclear Plant) PWR and typical 600MWe CANDU(CANada Deuterium Uranium) plants were estimated and compared. Also, the results were compared with the risks of foreign nuclear power plants and risks of various power plants such as coal, oil, LNG, and hydro power systems. The population distribution of the site extending to 80km for both site were considered. The releaese fraction for various source term categories(STC) and core inventories were used in the estimation of the health effects risks by using the MACCS2(MELCOR Accident Consequence Code System2) code. Individuals are assumed to evacuate beyond 16km from the site. The health effects considered in this comparative study are early and cancer fatality risk, and the results are presented as CCDF(Complementary Cumulative Distirbution Function) curves considering the occurrence probability of each STC's. According to the results, the early and cancer fatality risks of PHWR plants are lower than those of PWR plants. This is attributed the fact that the amount of radioactive mateials that released to the atmosphere resulting from the postulated severe accidents of PHWR plants are smaller than that of PWR plants. From the respect of occurrence frequency of severe accidents that cause fatalities, the nuclear power system shows the frequency of 1/100 ~ 1/1,000 comparing with the fossil fuel systems(coal, LNG, oil) and hydro plants.

## 1. 서론

우리나라의 에너지 부문은 지난 40여년간 에너지 소비의 급속한 양적 팽창과 함께 새로운 에너지원의 지속적인 도입으로 질적 고도화를 경험하였으며 이는 우리나라의 고도성장을 뒷받침하고 소비자의 편익을 증진하는데 크게 기여하였다. 이 중 원자력은 지속가능한 발전을 위해 불가피한 선택이라는 평가를 받을 뿐만 아니라 1986년 이후 최대 전력공급원의 위치를 유지해오고 있으며 이로 인하여 원자력이 에너지수급 안정화와 에너지 다변화 및 에너지 안보에 크게 기여함에도 불구하고 국민의 이해를 충분히 얻지 못하고 있는 실정이다[1]. 또한, 최근에는 유럽을 중심으로 전통적인 연료주기에 대한 경제성 평가에서 무시되어온 에너지 사용으로 인한 사회나 환경에 부과되는 외부비용 평가가 수행되고 이를 정량화하여 에너지 정책 결정 과정에 반영하려는 움직임이 매우 활발하게 진행되고 있다[2]. 따라서, 이러한 국내외 환경변화를 고려한 에너지 정책결정을 뒷받침하기 위해서는 발전원별로 환경에 미치는 영향과 함께 사고로 인한 리스크를 평가하여 서로 비교함으로써 원자력에 대한 국민수용도를 높일 필요가 있다.

이러한 원전에 대한 국민수용도를 높이기 위해서는 의사결정의 민주성과 투명성을 제고시키는 한편 안전성에 관한 정보가 공개되어야 하는데, 본 논문에서는 경수로형과 중수로형 원자력 발전소의 가상 중대사고로 인해 건강영향에 미치는 리스크를 평가하고 비교하는데 목적이 있다. 이를 위하여 경수로형과 중수로형 원자력 발전소의 가상 중대사고로 인해 대기중으로 방출 가능성이 있는 방사성 물질로 인한 주변 주민의 인체에 미치는 조기사망과 암사망 리스크를 MACCS2[3] 코드를 이용하여 평가하고 서로 비교하였다. 또한, 외국의 원자력발전소의 리스크 평가 결과 뿐만 아니라 외국에서 수행한 다른 발전원의 사고로 인한 리스크 평가와 비교하였다. 이는 앞으로 원자력 이외 다른 발전원의 사고로 인한 리스크와 함께 비교함으로써 국민수용도 증대를 위한 자료로 이용될 수 있을 뿐만 아니라 모든 발전원의 전력생산으로 인한 환경영향 평가 결과를 함께 고려한 발전원별 국민수용도 평가를 위한 기초자료로 이용될 예정이다.

## 2. 리스크 평가 모델링 및 입력자료

원자력 발전소에서 중대사고가 발생하여 격납건물 파손이 일어나면 방사성 물질이 대기 중으로 방출되며 방사성 물질은 바람에 의해 이동하면서 주변 주민의 건강 뿐만 아니라 주변환경에 영향을 미치게 된다. 이러한 방사성 물질로 인한 건강에 미치는 영향이나 경제적 영향은 리스크로써 표현되는데 이는 특정 사고의 발생 확률에 사고로 인한 결말 효과를 곱한 값으로 정의된다. 이러한 원자력 발전소의 중대사고로 인한 영향은 3단계 확률론적 안전성 평가(Level-3 PSA, Probabilistic Safety Assessment)를 이용하여 평가한다. 이 3단계 PSA를 통한 영향 평가는 공중 위험도(Public Risk)로 표현되며 이 공중 위험도는 조기 및 암 사망, 조기 및 암 상해, 유전적 영

향, 농경지 및 토양, 농작물, 건축물, 물 등의 방사능 오염, 그리고 경제적 손실 등을 포함한다.

가상 중대사고로 인한 인체건강에 미치는 리스크를 비교, 평가하기 위하여 국내 대표적인 원자력 발전소인 경수로형 원자력 발전소인 1000MWe 한국형 표준원전과 중수로형인 600MWe CANDU형 발전소를 선정하였다. 각각의 발전소에 대한 가상 중대사고로 인한 리스크 평가 도구로는 MACCS2를 이용하였다. 계산을 위한 방사선원 자료는 각각의 발전소에 대해 노심손상사고 발생시 격납건물의 건전성과 방사선원항의 방출량을 분석하는 2단계 확률론적 안전성평가(Level-2 PSA)의 결과로 주어지는 방사선원 방출군(STC, Source Term Category)별 핵분열생성물 방출분율[4,5]을 이용하였다. 각 발전소별 방사선원 방출군별 방출 특성은 표 1과 2에 요약된 바와 같다. 원자로 내의 핵분열생성물의 노심 재고량(Core Inventory)은 ORIGEN2[6] 전산코드에 의한 계산결과를 이용하였다. 이 노심 재고량은 가장 보수적인 방사선 영향 평가 결과를 얻기 위하여 핵분열 생성물의 양이 최대가 되는 시점에서의 노심재고량을 이용하였는데, 경수로형의 경우는 주기말의 결과, 중수로형의 경우는 내부 및 외부 노심의 최대 노심체류 기간(Channel Dwell Time)의 평균값의 결과를 이용하였다.

표 1. PWR 발전소의 방사선원 방출군 특성

| STC No. | Dominant Initiating Events | Containment Failure Mode | Frequency (/RY) |
|---|---|---|---|
| 1 | Large LOCA | Core melt stopped before Reactor Vessel failure | $4.87\times10^{-5}$ |
| 2 | Loss of Feedwater | Reactor Vessel failed, Containment do not failed | $1.44\times10^{-5}$ |
| 3 | Loss of Feedwater | Early Containment failure, Leak | $1.71\times10^{-7}$ |
| 4 | Small LOCA | Early Containment failure, Rupture | $5.39\times10^{-8}$ |
| 6 | Small LOCA | Late Containment failure, Leak | $1.71\times10^{-6}$ |
| 7 | N/A | Late Containment failure, Leak | $6.57\times10^{-9}$ |
| 8 | Station Blackout | Late Containment failure, Leak | $1.60\times10^{-6}$ |
| 10 | Small LOCA | Late Containment failure, Leak, Rupture | $8.58\times10^{-8}$ |
| 11 | N/A | Late Containment failure, Leak, Rupture | $2.19\times10^{-9}$ |
| 12 | Station Blackout | Late Containment failure, Leak, Rupture | $7.87\times10^{-7}$ |
| 13 | Loss of Feedwater | Basemat Melt-throough | $1.22\times10^{-6}$ |
| 14 | Loss of Feedwater | Alpha mode failure | $3.22\times10^{-8}$ |
| 15 | Large LOCA | Containment failure before RV failure | $6.05\times10^{-7}$ |
| 16 | Large LOCA | Isolation Failure | $1.18\times10^{-8}$ |
| 17 | Large LOCA | Isolation Failure | $1.97\times10^{-8}$ |
| 18 | V-sequence | V-sequence (Bypass) | $1.20\times10^{-9}$ |
| 19 | SGTR | Steam Generator Tube Rupture (Bypass) | $1.43\times10^{-6}$ |

표 2. PHWR 발전소의 방사선원 방출군 특성

| STC No. | Dominant Initiating Events | Containment Failure Mode | Frequency (/RY) |
|---|---|---|---|
| 1 | No Severe Core Damage | No Containment Failure | $2.652 \times 10^{-5}$ |
| 2 | Small LOCA | No Containment Failure | $5.228 \times 10^{-6}$ |
| 3 | Small LOCA | Late Containment Failure | $4.928 \times 10^{-9}$ |
| 4 | Loss of Service Water | Late Containment Failure | $1.363 \times 10^{-7}$ |
| 5 | Small LOCA | Very Late Containment Failure | $4.865 \times 10^{-9}$ |
| 6 | Total Loss of End Shield Cooling | Very Late Containment Failure | $3.006 \times 10^{-7}$ |
| 7 | Dual Control Computer Failure | Containment Isolation Failure | $3.563 \times 10^{-8}$ |
| 8 | Multiple SGTR | Containment Bypass | $6.853 \times 10^{-7}$ |
| 9 | Multiple SGTR | Containment Bypass | $1.063 \times 10^{-7}$ |

시범분석 대상부지로 선정한 각 부지별 기상자료는 발전소 인근의 기상탑에서 1년 동안 측정된 자료를 수집하여 8,760개의 시간별로 정리된 풍속, 풍향, 강수량, 대기안정도로 구성된 기상자료를 이용하였다. 각 부지의 연간 기상자료를 분석하면 울진의 경우, 가장 빈도가 큰 풍향은 서풍과 남서풍이며 월성의 경우에는 북서풍과 서북서풍이다. 따라서, 사고로 인해 방사성 물질이 대기중으로 방출이 되더라도 인구가 적은 동해쪽으로 방사성 물질이 이동할 확률이 매우 크다. 또한, 대기안정도를 보면 울진의 경우에는 중립(neutral)이, 월성의 경우에는 약간 안정(slightly stable)이 가장 빈도가 크다. 대기안정도가 건강영향에 미치는 연구결과[7]에 의하면 조기사망과 같은 조기 건강영향은 대기가 안정할수록 크게 나타나며 불안정할수록 적게 나타난다. 이는 대기가 불안정하면 대기난류의 영향으로 인해 방사성 구름의 팽창이 크게 나타나기 때문에 방사성 물질에 의해 영향을 받는 지역이 넓어지지만 그 농도는 감소하기 때문이다. 그러나, 대기안정도가 암사망에 미치는 영향에 의하면 대기가 중립일 경우에 암사망에 미치는 영향이 가장 적게 나타나며 안정이나 불안정일 경우에는 중립상태보다 약간 크게 나타나지만 그 차이는 크지 않다. 또한, 기상자료가 건강영향에 미치는 연구결과에 의하면 풍속이 증가함에 따라 조기사망 및 암사망 리스크는 그 값이 감소한다. 풍속이 증가하면서 리스크가 감소한다는 것은 풍속이 약할수록 사고결말 효과에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 의미하며 이는 풍속이 증가할수록 대기난류 영향에 의한 대기확산이 크게 나타나면서 방사성 플륨에 의해 영향을 받는 지역은 넓어지지만 상대적으로 방사능 농도는 줄어들기 때문이다. 각 부지의 연간 평균 풍속은 울진이 1.87 m/sec, 월성이 2.86 m/sec이다.

대기확산 계산을 위해 각각의 발전소 부지를 중심으로 16개의 방위각으로, 반경 80km 까지 10개의 격자로 구분하여 격자별 인구분포를 고려하였다. 각 발전소의 최종 확률론적 안전성평가 자료를 이용하여 울진 원전 부지의 경우 반경 80km 내에 약 50만명의 인구가 거주하는 것으로 가

정하였고 월성 원전 부지의 경우 685만 명의 인구가 거주하는 것으로 가정하였다. MACCS2 코드에서 조기건강 영향은 사고 발생 후 1년 이내에 발생하는 사망이나 상해이며 암사망이나 암 상해는 사고 발생후 50년 동안 받게되는 예탁선량을 이용하여 계산이 이루어진다. 이를 위한 성인의 호흡율, 차폐계수, 리스크 계산을 위한 모델 변수 등과 입력자료는 향후 외국 연구결과와의 비교를 위해 MACCS2 사용자 지침서에 나와 있는 기본 값들을 사용하였는데 이는 NUREG-1150[8] 연구에서 이용한 값들과 같다.

MACCS2 코드에서 사고 발생 후 약 1주일 정도인 비상기간 동안 방사선 피폭으로 인해 인체에 미치는 영향을 감소시키기 위해 고려하는 비상대응 조치는 차폐, 소개, 임시 이주이다. 본 연구에서는 소개와 임시이주를 비상대응 조치로 선정하였으며 차폐 지역은 고려하지 않았는데, 이는 NUREG-1150 연구에서 사용한 방법으로 비교가 용이하기 때문이다. 소개는 발전소로부터 16km 바깥의 지역으로 소개하는 것으로 가정하였으며 소개 속도는 1.8 m/sec라고 가정하였다. 소개시 반경 16km 이내의 주민들 중 95%는 16km 이외의 지역으로 소개되고 나머지 5%는 방사성 구름이 통과한 이후 이주하는 것으로 가정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

경수로형 원전과 중수로형 원전에 대한 방사선원 방출군별 조기사망 및 암사망에 대한 리스크는 그림 1~4에 도시된 바와 같다. 결과에 의하면 경수로형 원전과 중수로형 원전 모두 STC에 따라 조기사망 및 암사망 리스크가 차이가 발생하기 때문에 사고로 인한 리스크를 줄이기 위해서는 리스크가 큰 STC의 지배적인 초기사건에 대한 관리가 필요함을 알 수 있다. 울진과 월성의 경우, 조기사망 및 암사망 리스크가 가장 큰 STC는 각각 STC-19와 STC-8이며 최소인 경우는 STC-18과 STC-5이다. 최소 리스크를 나타내는 울진과 월성의 STC는 그 발생확률이 각각의 발전소 STC 중에서 발생확률이 최소이다. 따라서, 경수로형 및 중수로형 발전소 모두 중대사고로 인한 인체건강에 미치는 리스크를 최소화하기 위해서는 각각의 중요한 초기사건의 발생확률과 이로 인한 방사선원 방출군의 발생확률을 최소화하는 방안이 강구되어야 한다.

그림 1~4에 도시된 두 발전소의 조기사망 및 암사망 리스크 평가 결과에 의하면 조기사망이나 암사망 모두 인구밀도가 높은 중수로형 원전인 월성 부지가 인구밀도가 낮은 경수로형 원전인 울진부지에 비해 적은 값을 나타낸다. 특히 월성의 경우, 반경 80km 이내에 거주하는 전체 인구가 울진 주변 인구의 10배 이상인데도 불구하고 주변 주민의 건강영향에 미치는 리스크가 적게 나타나는데 이는 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 양 차이 때문이다.

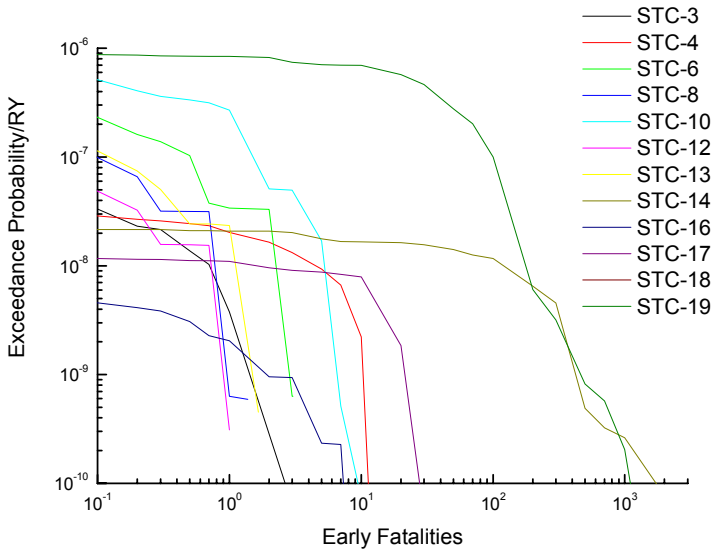


그림 1. PWR 발전소의 방사선원 방출군별 조기사망 리스크

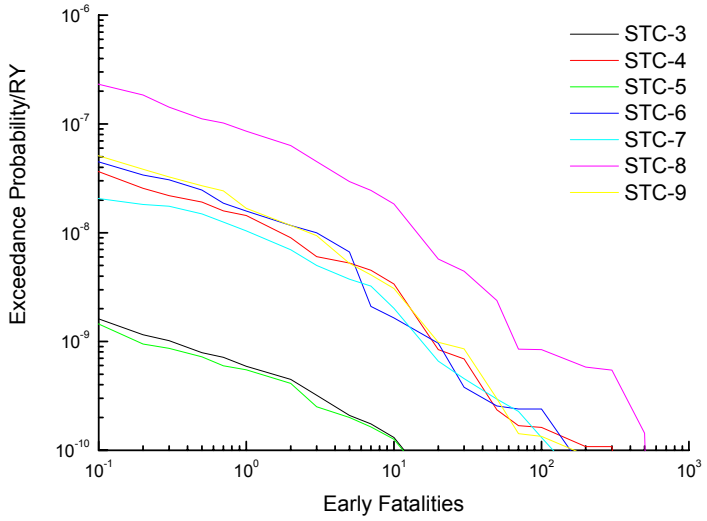


그림 2. PHWR 발전소의 방사선원 방출군별 조기사망 리스크

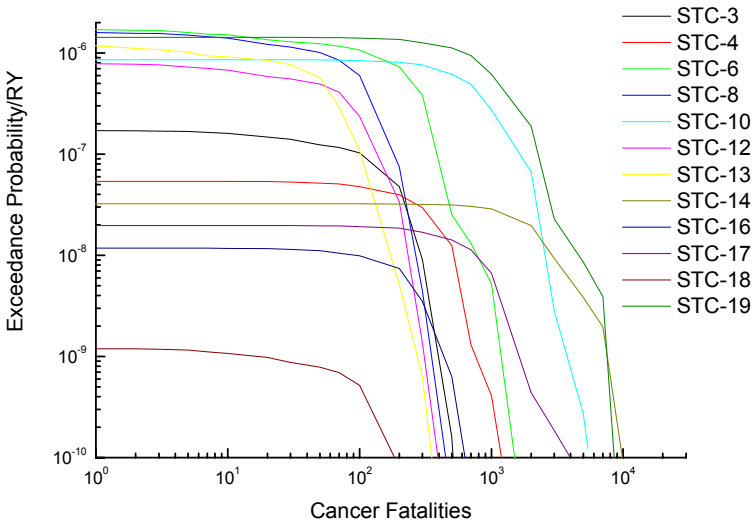


그림 3. PWR 발전소의 방사선원 방출군별 암사망 리스크

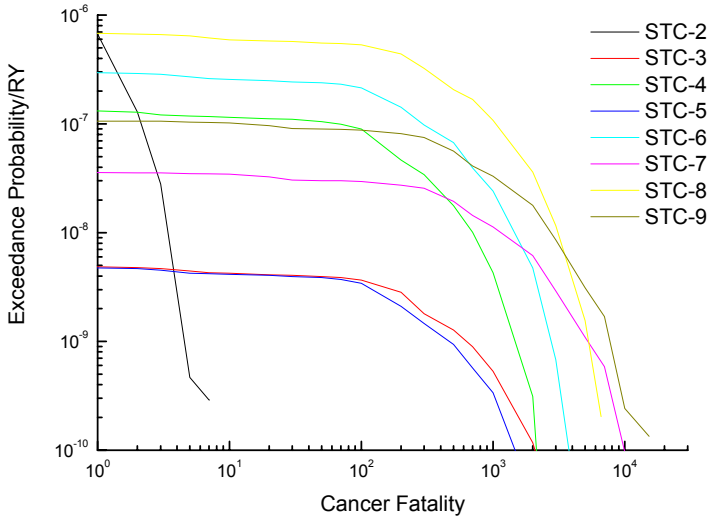


그림 4. PHWR 발전소의 방사선원 방출군별 암사망 리스크

WASH-1400[9]의 연구결과에 의하면 조기 건강영향에 가장 많은 영향을 미치는 방사성 동위원소들은 요오드(I)와 텔루륨(Te)이며 후기 건강영향에 가장 많은 영향을 미치는 방사성 동위원소들은 반감기가 비교적 긴 세슘(Cs) 등이다. 또한, 같은 양의 방사성 물질이 방출된다는 가정하에 방사성 동위원소들의 건강영향에 미치는 상대적 중요도를 파악한 D. J. Alpert 등의 연구결과[10]에 의하면 조기 건강영향의 경우, 요오드와 텔루륨 다음으로는 골수 피폭선량에는 크립톤(Kr)이 폐 피폭선량에는 루테늄(Ru)이 많은 영향을 미치며 암 사망에 많은 영향을 미치는 방사성 동위원소로는 세슘 다음으로 텔루륨이다. 조기 사망 및 암사망에 가장 많은 영향을 미치는 이들 방사성 동위원소들의 방출분율은 표 3에 요약된 바와 같이 중수로형 원전이 경수로형 원전에 비해 10배 이상 적다. 핵분열 생성물의 노심내 재고량과 방출분율을 고려한 대기중으로 방출되는 방사성 동위원소의 양은 표 4에 요약되어 있다. 표의 결과에서 알 수 있듯이 중대사고로 인해 대기중으로 방출되는 방사성 동위원소 중 크립톤 동위원소 일부를 제외하고는 모든 방사성 동위원소의 대기중으로의 방출량이 중수로형 발전소의 경우가 경수로형 발전소에 비해 매우 낮다. 즉, 조기 건강영향에 많은 영향을 미치는 동위원소 중 요오드와 크립톤은 중수로형 발전소가 경수로형 발전소에 비해 약간 낮은 정도이지만 텔루륨과 크립톤은 1/10 이하의 양이다. 또한, 루테늄은 중수로형 발전소가 경수로형 발전소에 비해 현저히 낮아 무시할 정도의 수준의 양이다. 또한, 암 사망이나 상해에 많은 영향을 미치는 세슘과 텔루륨은 중수로형 발전소가 경수로형 발전소에 비해 1/10 이하의 값을 보여준다. 따라서, 가상 중대사고로 인해 대기중으로 방출되는 방사성 물질의 양을 결정하는 STC별 방출분율이 중수로형 원전이 경수로형 원전에 비해 적으며 이로 인해 대기중으로 방출되는 방사성 물질의 양이 적기 때문에 중수로형 원전이 경수로형 원전에 비해 사고로 인해 인체건강에 미치는 리스크가 적다.

표 3. Source Term Release Fractions for PWR and PHWR Plants

| Release Fraction / Plants | Radionuclide Group | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | I | Te | Kr | Cs | Ru |
| PWR (STC-19) | $1.3\times10^{-1}$ | $4.9\times10^{-1}$ | $9.5\times10^{-1}$ | $1.3\times10^{-1}$ | $4.6\times10^{-2}$ |
| PHWR (STC-8) | $1.2\times10^{-2}$ | $4.2\times10^{-3}$ | $9.6\times10^{-1}$ | $1.3\times10^{-2}$ | $5.3\times10^{-7}$ |

표 4. 각 발전소별 대기중으로 방출되는 방사성 물질의 양

| Radionuclide | Half Life(sec) | PWR(Bq) | PHWR(Bq) |
|---|---|---|---|
| Kr-85 | $3.39x10^{8}$ | $5.24x10^{16}$ | $8.32x10^{15}$ |
| Kr-85m | $1.61x10^{4}$ | $3.56x10^{17}$ | $5.53x10^{17}$ |
| Kr-87 | $4.56x10^{3}$ | $6.32x10^{17}$ | $1.04x10^{18}$ |
| Kr-88 | $1.01x10^{4}$ | $8.76x10^{17}$ | $1.49x10^{18}$ |
| Ru-103 | $3.42x10^{6}$ | $1.96x10^{17}$ | $3.12x10^{12}$ |
| Ru-105 | $1.60x10^{4}$ | $1.59x10^{17}$ | $2.47x10^{12}$ |
| Ru-106 | $3.19x10^{7}$ | $1.14x10^{17}$ | $6.45x10^{11}$ |
| Te-127 | $3.37x10^{4}$ | $1.47x10^{17}$ | $2.07x10^{15}$ |
| Te-127m | $9.42x10^{6}$ | $2.03x10^{16}$ | $2.31x10^{14}$ |
| Te-129 | $4.20x10^{3}$ | $3.97x10^{17}$ | $6.29x10^{15}$ |
| Te-129m | $2.89x10^{6}$ | $5.88x10^{16}$ | $9.54x10^{14}$ |
| Te-131m | $1.08x10^{5}$ | $1.70x10^{17}$ | $2.93x10^{15}$ |
| Te-132 | $2.81x10^{5}$ | $1.57x10^{18}$ | $2.65x10^{16}$ |
| I-131 | $6.95x10^{5}$ | $3.01x10^{17}$ | $5.37x10^{16}$ |
| I-132 | $8.23x10^{3}$ | $4.24x10^{17}$ | $7.75x10^{16}$ |
| I-133 | $7.49x10^{4}$ | $5.69x10^{17}$ | $1.06x10^{17}$ |
| I-134 | $3.16x10^{3}$ | $6.19x10^{17}$ | $1.15x10^{17}$ |
| I-135 | $2.37x10^{4}$ | $5.39x10^{17}$ | $1.01x10^{17}$ |
| Cs-134 | $6.50x10^{7}$ | $2.16x10^{16}$ | $2.10x10^{15}$ |
| Cs-136 | $1.12x10^{6}$ | $4.76x10^{16}$ | $1.61x10^{15}$ |
| Cs-137 | $9.50x10^{8}$ | $1.18x10^{16}$ | $2.15x10^{15}$ |

경수로형과 중수로형 발전소에 대해 가장 큰 리스크를 보이는 STC인 STC-19와 STC-8에 대한 조기 사망과 암 사망 리스크를 WASH-1400[9]과 스위스 PSI(Paul Sherrer Institut) 연구소에서 수행한 연구 결과[11]와 비교하였는데 두 연구 결과는 그림 5와 6에 도시된 바와 같다. WASH-1400의 연구는 원자력과 비원자력 산업 및 인공재해로 인한 여러 가지 리스크를 비교하기 위한 연구로 100기의 원자력발전소의 운영으로 인한 조기사망 리스크가 비원자력 산업 및 인공재해로 인한 리스크에 비해 현저하게 낮다는 것을 보여줌으로써 원자력의 상대적인 안전성을 보여준다. 스위스 PSI(Paul Sherrer Institut) 연구소에서 수행한 연구는 스위스 Muhleberg 원자력발전소의 중대사고로 인한 암사망 리스크와 타발전원의 중대사고로 인한 경험적인 리스크를 비교한 연구로 마찬가지로 원자력의 상대적인 안정성을 입증해준다. 본 연구에서 수행한 리스크와 외국의 두 연구결과를 비교한 리스크 비교는 표 5와 6에 요약된 바와 같다. 표의 결과에 의하면 국내의 경수로형 및 중수로형 원전의 조기사망이나 암사망에 대한 리스크는 외국의 두 결과에 비해 1/10 이하의 매우 낮은 값을 나타낸다. 또한, 국내 경수로형 및 중수로형 원전의 가상 중대사고로 인한 리스크를 스위스 PSI 연구소에서 수행한 연구결과인 타발전원인 석탄, 오일, 천연가스, 수력의 경

우와 비교하면 원자력발전시스템은 중대사고 발생빈도 측면에서 1/100 ~ 1/1000의 빈도를 나타낸다. 따라서, 국내 원자력 발전소의 가상 중대사고로 인해 주변 주민에게 미치는 리스크는 다른 발전원에 비해서 현저히 낮은 값을 나타내기 때문에 매우 안전하다는 것을 알 수 있다.

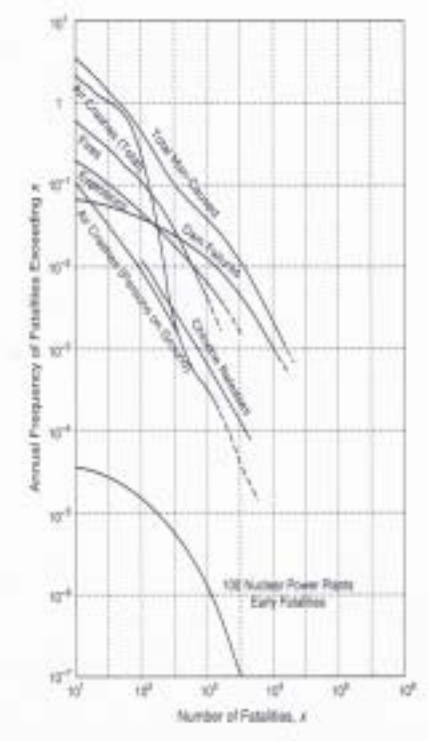


그림 5. WASH-1400 연구의 리스크 곡선군[9]

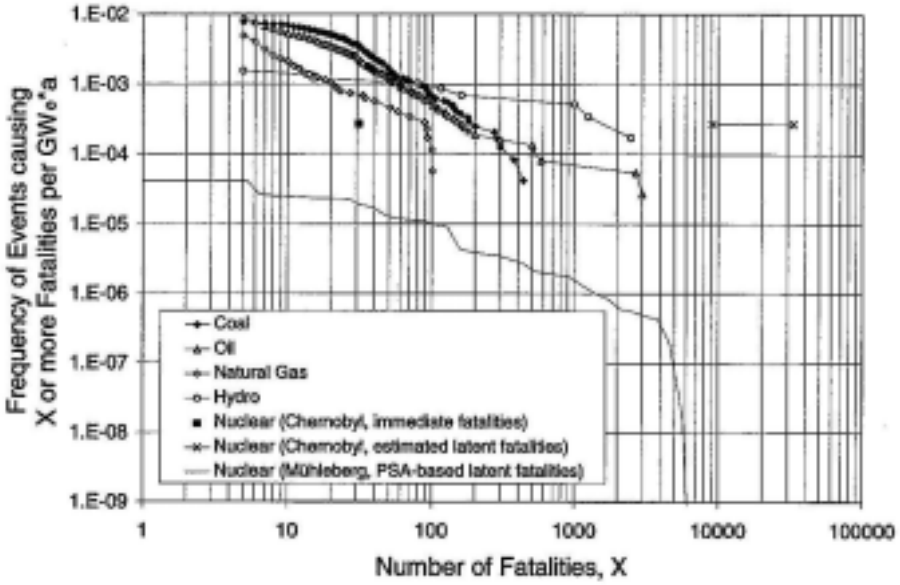


그림 6. 다양한 발전원에 대한 리스크 곡선군[11]

표 5. 외국 연구결과와의 원전 중대사고 리스크 비교

| | WASH-1400 | PSI (Muhleberg) | PWR | | PWHR | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 조기사망 | 암사망 | 조기사망 | 암사망 |
| 사망자≥10 | $4.0x10^{-5}$ | $3.0x10^{-5}$ | $7.0x10^{-7}$ | $1.4x10^{-6}$ | $1.8x10^{-8}$ | $5.9x10^{-7}$ |
| 사망자≥100 | $2.0x10^{-5}$ | $1.0x10^{-5}$ | $1.0x10^{-7}$ | $1.5x10^{-6}$ | $8.4x10^{-10}$ | $5.3x10^{-7}$ |
| 사망자≥1000 | $1.2x10^{-6}$ | $2.0x10^{-6}$ | $2.0x10^{-10}$ | $6.2x10^{-7}$ | - | $1.1x10^{-7}$ |

표 6. 다른 발전원과의 리스크 비교

| | 원자력 | | | | 다른 발전원 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | PWR | | PWHR | | 석탄 | 오일 | 천연가스 | 수력 |
| | 조기사망 | 암사망 | 조기사망 | 암사망 | | | | |
| 사망자≥10 | $7.0x10^{-7}$ | $1.4x10^{-6}$ | $1.8x10^{-8}$ | $5.9x10^{-7}$ | $8.0x10^{-2}$ | $6.0x10^{-2}$ | $3.0x10^{-2}$ | $2.0x10^{-2}$ |
| 사망자≥100 | $1.0x10^{-7}$ | $1.5x10^{-6}$ | $8.4x10^{-10}$ | $5.3x10^{-7}$ | $8.0x10^{-3}$ | $6.0x10^{-3}$ | $1.0x10^{-4}$ | $9.0x10^{-4}$ |
| 사망자≥1000 | $2.0x10^{-10}$ | $6.2x10^{-7}$ | - | $1.1x10^{-7}$ | - | $8.0x10^{-5}$ | - | $1.0x10^{-4}$ |

경수로형 및 중수로형 원전 모두 가장 큰 리스크 값을 나타내는 방사선원 방출군인 STC-19와 STC-8의 주요 초기사건은 증기발생기 세관파손 사고(STGR)이다. 증기발생기 세관파손사고의 경우에는 원자로에서 누출된 방사능을 격리시키는 격납건물의 기능이 소용없게 된다. 따라서, 원전의 중대사고로 인한 주민의 인체 및 건강에 미치는 리스크를 줄이기 위해서는 증기발생기 세관파손사고 발생 빈도와 이로 인한 방사성 물질의 대기 중으로의 방출을 줄이기 위한 관리가 필요하다.

경수로형 및 중수로형 원전의 가상 중대사고시 최대 리스크를 나타내는 STC인 STC-19와 STC-8에 대한 결과 비교는 그림 7에 도시된 바와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 중수로형 발전소가 경수로형 발전소에 비해 조기 사망 및 암사망 리스크가 적게 나타나며 특히 조기 사망의 경우 차이가 더 크게 나타난다. 이는 조기사망을 야기시키기 위해서는 조기 피폭선량에 많은 영향을 미치는 방사성 동위원소의 방출 양이 문턱값 이상의 충분한 양이 되어야하는데 중수로형의 경우에는 대기중으로 방출되는 방사성 물질의 양이 경수로형에 비해 매우 적기 때문이다.

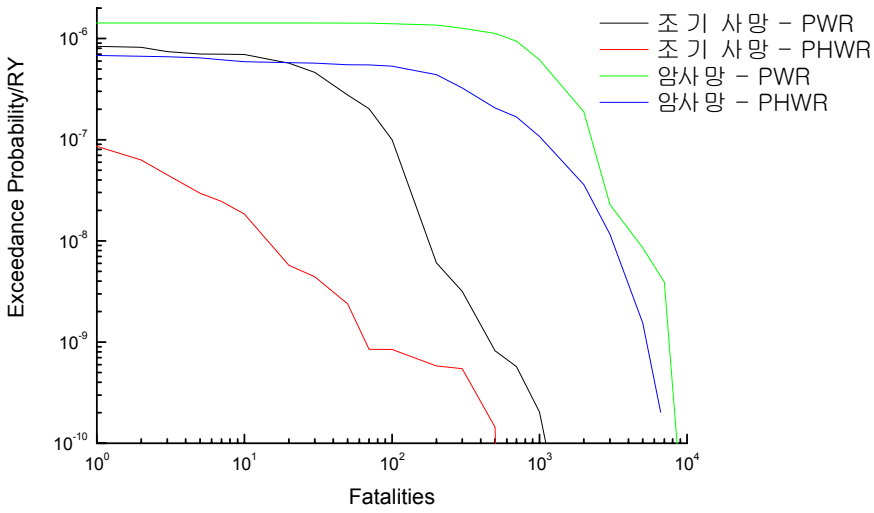


그림 7. 최대 리스크를 나타내는 방사선원 방출군의 리스크 비교

본 연구에서 채택한 비상대응 조치인 1.8 m/sec의 소개속도로 반경 16km 이내의 주민들 중 95%는 16km 이외의 지역으로 소개되고 나머지 5%는 방사성 구름이 통과한 이후 이주하였을 경우에 대해 각각의 발전소의 최대 리스크를 나타내는 방사선원 방출군인 STC-19와 STC-8에 대한 조기사망 및 암사망 자 수의 변화는 표 7에 요약되어 있다. 표에서 알 수 있듯이 조기사망 및 암사망 모두 소개가 이루어졌을 경우, 사망자 수가 감소함을 알 수 있다. 따라서, 중대사고로 인해 대기중으로 방사성 물질이 방출되었을 경우, 주민보호를 위해 소개가 매우 효과적이기 때문에 적절한 방법을 통하여 신속한 주민소개가 이루어져야 한다.

표 7. 소개가 이루어졌을 경우 사망자 수의 변화

| | PWR | | PHWR | |
|---|---|---|---|---|
| 최대 리스크 STC | STC-19 | | STC-8 | |
| 지배적인 초기사건 | 증기발생기 세관파손 | | 증기발생기 세관파손 | |
| 격납건물 파손형태 | 격납건물 우회 | | 격납건물 우회 | |
| Frequency(/RY) | $1.43 \times 10^{-6}$ | | $1.06 \times 10^{-7}$ | |
| | 비 소개 | 소개 | 비 소개 | 소개 |
| 조기사망자 수 | 28.4 | 27.8 | 1.38 | 1.32 |
| 암사망자 수 | 579 | 491 | 73.7 | 51.0 |

## 4.결론

국내의 대표적인 원자력 발전소인 1,000MWe 가압경수로형 원자력 발전소와 600MWe 가압중수로형 원자력 발전소의 중대사고 리스크를 평가하여 서로 비교하고 또한, 다른 발전원의 경험적 중대사고 리스크를 서로 비교하였다. 이 연구에 의한 주요 결론은 다음과 같다.

1. 경수로형 원전과 중수로형 원전 모두 STC에 따라 조기사망 및 암사망 리스크가 차이가 발생하기 때문에 사고로 인한 리스크를 줄이기 위해서는 리스크가 큰 STC의 지배적인 초기사건에 대한 관리가 필요함을 알 수 있다.
2. 경수로형 원전에 비해 중수로형 원전이 주변 인구가 매우 많은데도 불구하고 사망자 수나 리스크가 적게 나타나는데 이는 중수로형 원전이 경수로형 원전에 비해 가상 중대사고로 인해 대기중으로 방출되는 방사성 물질의 양이 적기 때문이다.
3. 외국의 연구결과와 비교하면 국내의 원자력 발전소의 대표적인 가압경수로형과 가압중수로형 발전소의 경우 사고로 인해 주변 주민에게 미치는 건강영향 리스크는 외국의 원자력 발전소뿐만 아니라 다른 발전원에 비해서 현저히 낮은 값을 나타내기 때문에 매우 안전하다는 것을 알 수 있다.
4. 두 발전소 모두 최대 리스크를 보이는 방사선원 방출군의 대표적인 초기사건은 증기발생기 세관파손 사고이다. 따라서, 경수로형 및 중수로형 발전소 모두 사고로 인한 주변 주민에게 미치는 리스크를 최소화하기 위해서는 증기발생기 세관파손 사고빈도와 이로 인한 대기중으로의 방사성 물질의 방출을 최소화하기 위한 방안이 강구되어야 한다.
5. 중대사고로 인해 대기중으로 방사성 물질이 방출되었을 경우, 주민보호를 위해 소개가 매우 효과적이기 때문에 적절한 방법을 통하여 신속한 주민소개가 이루어져야 한다.

평가 결과는 향후 원자력 이외 다른 발전원의 사고로 인한 리스크와 함께 비교함으로써 국민수용도 증대를 위한 자료로 이용될 수 있을 뿐만 아니라 모든 발전원의 전력생산으로 인한 환경영향 평가 결과를 함께 고려한 발전원별 국민수용도 평가를 위한 기초자료로 이용될 수 있다.

감사의 글
본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

**참고문헌**

1. 이상곤, “전환기의 에너지 정책과 원자력산업의 미래”, 17차 KAIF/KNS 연차대회(2002).

2. Rainer Friedrich, "ExternE, Externalities of Energy," European Commission(1995).
3. D. I. Chanin, and Mary Young, "Code Manual for MACCS2, Volume 1, User's Guide, SAND97-0594, Sandia National Laboratories(1997).
4. 한국전력공사, "Ulchin Units 3&4 Final Probabilisitic Safety Assessment Report,"(1997)
5. 한국수력원자력(주), 월성 1호기 확률론적 안전성 평가(2003).
6. A. G. Croff, "A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code: ORNL/TM-7175," Oak Ridge National Laboratory(1980).
7. 정종태, 하재주, "기상자료가 인체 건강에 미치는 영향 평가", 한국원자력연구소, KAERI/TR-1230/99 (1999).
8. USNRC, "Severe accident risks: an assessment of five nuclear power plants," NUREG-1150 (1990).
9. USNRC, "Reactor Safety Study Appendix VI: Calculation of Reactor Accident Consequences, WASH-1400," NUREG 75/014, USNRC(1975).
10. Daniel J. Alpert, David I. Chanin, and Lynn T.Ritchie, "Relative Importance of Individual Elements to Reactor Accident Consequences Assuming Equal Release Fractions," NUREG/CR-4467, USNRC(1986).
11. S. Hirshberg, G. Spiekerman, R. Dones, P. Burgherr, "Comparison of Severe Accident Risks in Fossil, Nuclear, and Hydro Elevtricity Generation," Paul Scherrer Institute, CH-5232, Switzerland(2000).