

MACCS II 코드를 이용한 국내 경수로 및 중수로형 원전의 소외결말분석

전호준[†] · 지문구 · 황석원

한국수력원자력(주) 한수원중앙연구원
(2011. 4. 12. 접수 / 2011. 9. 8. 채택)

Off-Site Consequence Analysis for PWR and PHWR Types of Nuclear Power Plants Using MACCS II Code

Ho-Jun Jeon[†] · Moon-Goo Chi · Seok-Won Hwang

Central Research Institute of Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd
(Received April 12, 2011 / Accepted September 8, 2011)

Abstract : Since a severe accident, which happens in low frequency, can cause serious damages, the interests in off-site consequence analysis for a nuclear power plant have been increased after Chernobyl, TMI and Fukushima accidents. Consequences, which are the effects on health and environment caused by released radioisotopes, are evaluated using MACCS II code based on the method of Level 3 PSA. To perform a consequence analysis for the reference plants, the input data of the code were generated such as meteorological data, population distribution, release fractions, and so on. Using these input data, acute and lifetime dose as an organ, CCDF for early fatalities and latent cancer fatalities, and average individual risk were analyzed by using MACCS II code in this study. These results might contribute to establishing accident management plan and quantitative health object.

Key Words : offsite consequence analysis, level 3 PSA, MACCS II code, CCDF

1. 서론

원자력발전소(이하 원전)는 그 설계 개념부터 발전소와 대중의 안전을 생각하며, 설계기준사고(DBA: Design Basis Accident)라고 지칭되는 모든 가능한 사고에 대해 다양하고 다중 방어적인 안전장치들을 이용하여 발전소의 안전성을 확보하고 있다. 그러나 설계기준사고를 초과하는 중대사고는 그 발생 확률은 매우 낮지만 사고 발생시 결말효과가 크기 때문에 그 현상 및 사고전개과정, 그리고 이로 인해 대기로 방출되는 방사성원 방출 특성 등이 연구되었으며, 체르노빌사고나 TMI사고 및 최근 발생한 후쿠시마 원전 사고 이후 이에 대한 관심은 더욱 고조되고 있다.

일반적으로 원전의 안전성은 확률론적 안전성 평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment) 방법을 통해 분석되고 있다. 이 방법은 수행범위에 따라 세 단계로 구분되며, Level 1 PSA에서는 발전소 계통

및 사고경위 분석으로 노심손상빈도를 평가하고, Level 2 PSA에서는 격납건물 외부로의 방사능물질 방출빈도를 평가하며, 마지막으로 Level 3 PSA에서 원전 사고후 방사성물질의 환경누출에 따른 피폭선량 및 사고결말을 평가하는 소외결말분석 즉, 원전의 리스크를 평가한다.

Level 3 PSA 분석용 전산도구로는 일반적으로 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서 개발된 MACCS(MELCOR Accident Consequence Code System) II 코드가 이용되고 있으며, 이 코드는 사고 시 누출되는 방사성 동위원소로 인한 발전소 주변의 인체 및 환경에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 이 코드의 전체적인 분석 구조는 Fig. 1과 같다¹⁾.

본 논문에서는 원전 사고시 발생 가능한 발전소 외부로의 방사성물질 방출에 의한 주민의 피폭 선량 및 사망자 수를 평가하는 소외결말분석을 수행하기 위해 상보누적함수(CCDF: Complementary Cumulative Distribution Function), 건강영향평가(Health Effect Assessment) 및 평균개인리스크(Average Individual Risk)를 평가하였다. 또한, 반경 80 km까지

[†] To whom correspondence should be addressed.
jhj@khnp.co.kr

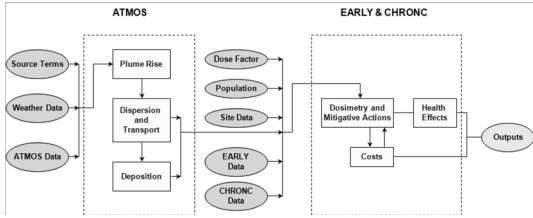


Fig. 1. Framework of MACCS II Code.

총 10개의 거리 구간에 위치한 피폭자(Receptor)의 대표적인 장기에 대하여 유효급성선량(Acute Dose) 및 만성선량(Lifetime Dose)을 평가하였다.

2. 방법론

2.1. 소외결말분석 도구(MACCS II 코드)

소외결말분석 과정은 Fig. 2와 같으며, 소외결말 분석 코드인 MACCS II 코드는 크게 시간 및 공간 관점으로 구성되며, 시간 관점으로는 사고 이후의 시간을 기준으로 비상, 중간 및 장기 단계로 구분한다. 또한, 공간 관점으로는 극좌표 격자로 발전소 주변지역을 구분하여 계산을 수행한다¹⁾.

이 코드는 크게 3가지 모듈로 구성되는데, 첫 번째로 ATMOS 모듈에서는 대기중에 방출된 물질의 확산과 침적을 바람 방향에서의 거리에 관한 함수로 계산한다. ATMOS 모듈에서 고려하는 영향 인자로는 건물의 wake 영향, buoyant plume 상승, 이동중 plume의 확산, 건침적과 습침적, 방사성 붕괴 등이며, 기상 조건 및 plume 상승 여부 선택에 따라 아래와 같은 계산 기능을 제공한다¹⁾.

- 방출전의 방사성붕괴 계산
- Plume 도달 시간의 계산
- 습식침적 후 잔류물질의 양 계산
- Plume의 확산계산
- 이동중 방사성 붕괴의 계산
- 대기확산인자(X/Q)의 계산
- 건식 및 습식침적으로 동시에 유실되는 물질량
- 대기 및 지표면에서의 평균농도 계산

두 번째로, EARLY 모듈에서는 사고 후부터 7일까지의 비상 단계 기간에 대한 방사선 피폭으로 인한 건강영향 및 피폭선량을 계산하며, 아래와 같은 기능을 제공한다¹⁾.

- 방사선플룸으로부터 피폭받는 교정인자 계산

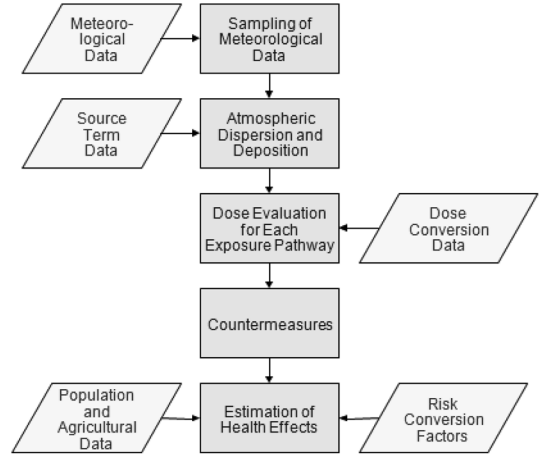


Fig. 2. Schematic Diagram of Off-Site Consequence Analysis.

- Sheltering People와 Evacuee가 받는 선량평가
- 이주지역에서의 선량평가
- 이동중인 대피자가 받는 선량평가
- 건강영향 리스크의 계산
- 사용자가 요청한 EARLY 결과의 출력

마지막으로, CHRONC 모듈은 비상 단계 이후의 기간에 대하여 영향평가를 계산하며, 다음과 같은 내용을 포함한다¹⁾.

- 공간격자에서의 지표농도 계산
- 재이주나 대피로 사람들이 이동한 거리 계산
- 중간단계에서 필요한 조치의 결정
- 중간단계에서 발생한 선량의 결정
- 제염의 효율성과 비용 결정
- 선택한 조치의 비용-효율성 결정
- 모든 경로와 조치로 인한 선량과 비용의 합산
- 사용자가 요청한 CHRONC 결과의 출력

MACCS II 코드로 계산되는 소외결말분석 결과는 중대 사고로 인해 발생하는 방사선원향(Source Term)의 양, 방출 발생 시의 기상 조건, 인구밀도 등에 의해 큰 영향을 받는다. 따라서 선원향, 기상 및 피폭집단 등에서 가능한 모든 조합을 고려하여, 소외결말분석 결과인 선량 및 건강영향에 대한 통계적 확률분포를 추정한다¹⁾.

특히, 각각의 기상연속 발생확률(P_{wj})과 각 인구 집단에 대한 피폭확률(P_{pk})이 주어지면, 기상과 인구에 따른 평가 값을 추정할 수 있는데, 이것을 상보누적함수(CCDF)라 한다. CCDF로부터 아래의 통

계적 결과를 확인할 수 있다¹⁾.

- 임의의 결말이 일어날 확률(y-절편)
- 예측된 결말정도, $E(x)=\sum P_i X_i$ (여기서, P_i 는 확률($P_i = P_{wij} \cdot P_{pk}$)이며, X_i 는 각각 2,400개 결말의 정도)
- 주어진 백분위수에 대응하는 결말정도(예, 임의의 결말에 대해 90번째 백분위수는 조건부 확률이 0.1 이상인 중대성 정도임)
- 임의의 기상조건에 대해 계산된 최대 중대성 정도(CCDF 끝부분에 해당하는 중대성 정도)

2.2. 중요 입력 자료 및 가정 사항

본 논문에서는 국내의 통계청 자료를 이용하여 PWR(Pressurized Water Reactor) 및 PHWR(Pressurized Heavy Water Reactor) 원전 반경 80 km 이내의 인구분포도를 조사하고, 이를 16개 방위별로 구분하여 인구분포에 대한 MACCS II 코드의 입력 자료를 Table 1과 같이 작성하였다.

소외결말분석 평가를 위해서는 방사선원항 범주(STC: Source Term Category)별로 방출분율이 필요한데, 이것은 해당 원전의 2단계 PSA 결과로부터 도출할 수 있다.

PWR 원전의 경우, PSA 보고서⁴⁾의 결과와 MELCOR 코드 계산 결과³⁾를 이용하여 분석하였고, PHWR 원전은 PSA 보고서⁵⁾의 결과 자료만을 활용하여 방출분율을 계산하였다. Table 2는 발생빈도가 비교적 큰 소형냉각재상실사고(Small LOCA: Loss Of Coolant Accident)에 대하여 MACCS II 코드에서 고려하는 9가지 핵종그룹별 방출분율을 나타낸다. 이 자료를 기반으로 방출기간(Duration Time)은 1,800 초, 방출시간(Release Time)은 3,700초, 방출높이는

Table 2. Release Fraction for 9 radioisotope group (small LOCA)

Radioisotope Group	PWR (PSA Report)	PWR (MELCOR)	PHWR (PSA Report)
XE/KR	9.40E-01	9.60E-01	1.00E+00
I	2.40E-03	9.60E-01	7.70E-01
CS	1.70E-03	1.50E-01	8.50E-03
TE	1.60E-02	1.70E-02	5.20E-03
SR	4.40E-04	9.60E-02	2.60E-04
RU	1.10E-03	4.40E-02	1.20E-06
LA	1.50E-04	1.40E-03	4.70E-06
CE	4.30E-04	4.50E-04	2.50E-08
BA	1.00E-03	9.60E-02	1.30E-04

지표면 방출로 보수적으로 가정하여 MACCS II 코드의 입력 자료를 작성하였다.

각 부지별 기상자료는 원전별 기상탑에서 측정된 1년간의 자료를 이용하여 매 시간별로 풍속, 풍향, 강수량, 대기안정도 등에 대한 8,760(365일×24시간)개의 입력 자료를 생성하였으며, MACCS II 코드 분석시 선택해 주어야 하는 사항에 대해서는 발진소 특성 등을 고려하여 아래와 같이 가정하였다.

- 원전중심 80 km 이내 거주인구에 대하여 평가
- 원전 비상대응 계획서의 EPZ(Emergency Planning Zone)를 8km로 적용하여 사고 후 8 km 이내의 주민은 모두 소개되는 것으로 가정
- Plume 및 지표상에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭 선량환산 인자와 호흡선량 인자는 MACCS II 코드에 default 되어 있는 값을 적용
- 분석시 고려되는 피폭 경로는 plume에 의한 외부피폭과 침적 및 음식물섭취에 의한 내부피폭을 고려함

Table 1. Population distribution for PWR and PHWR sites

	0~1.6 (km)	1.6~3.2 (km)	3.2~4.8 (km)	4.8~6.4 (km)	6.4~8 (km)
PWR (person)	283	1,717	4,569	4,383	5,693
	8~16 (km)	16~32 (km)	32~48 (km)	48~64 (km)	64~80 (km)
	17,714	38,667	141,595	182,667	106,455
PHWR (person)	0~1.6 (km)	1.6~3.2 (km)	3.2~4.8 (km)	4.8~6.4 (km)	6.4~8 (km)
	848	2,762	2,449	2,338	5,693
	8~16 (km)	16~32 (km)	32~48 (km)	48~64 (km)	64~80 (km)
	59,288	1,090,499	558,491	639,866	4,492,820

3. 결과

3.1. 장기별 선량평가

본 논문에서는 MACCS II 코드를 활용하여 PWR 및 PHWR 원전에 대해 장기(Organ)별 선량평가를 수행하였다. MACCS II 코드에서는 총 12가지 주요 장기에 대한 선량 평가를 수행할 수 있으며, 급성선량에 대해서는 최대 6가지, 만성선량에 대해서는 최대 11가지 장기에 대한 선량 평가가 가능하다.

본 연구에서는 피부, 폐, 적색 골수, 위, 갑상선

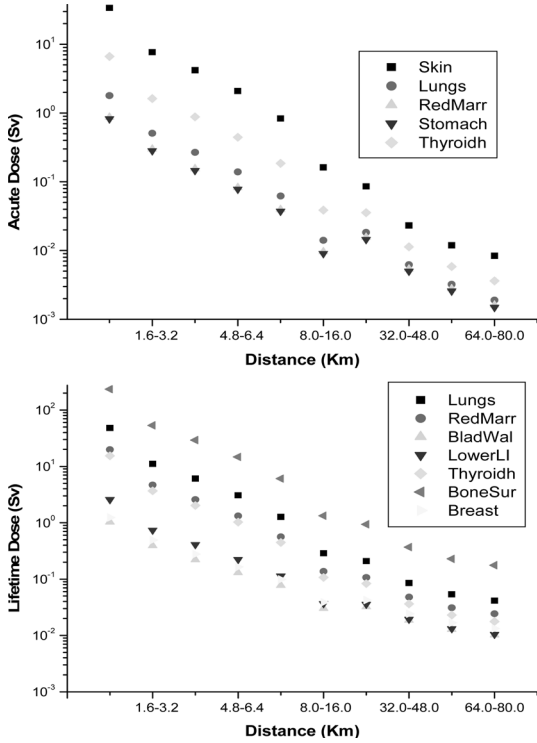


Fig. 3. Acute and lifetime dose for PWR.

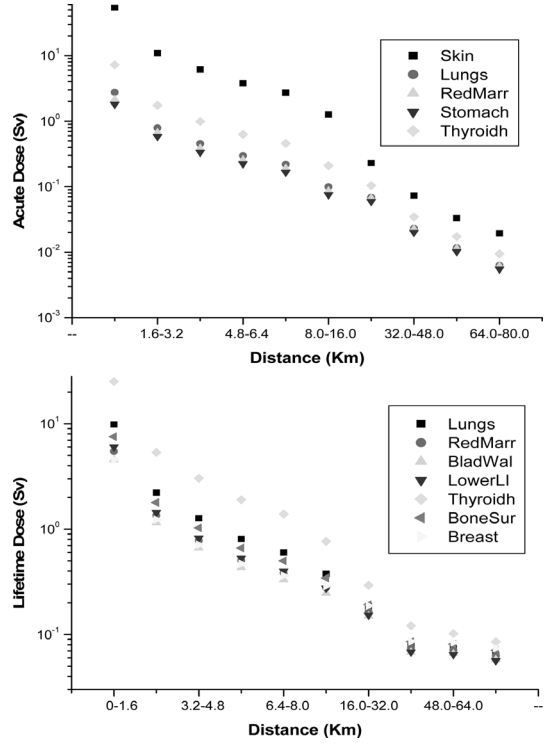


Fig. 4. Acute and lifetime dose for PHWR.

등 총 5가지 장기에 대한 급성선량을 평가하였으며, 만성선량에 대해서는 폐, 적색골수, 갑상선 등 총 7가지 장기에 대해 선량 평가를 수행하였다. 각 선량의 단위는 시버트(Sv)이며, 원전 부지 반경 80 km 이내의 10개 구간에 대하여 선량 값을 도출하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 PWR 및 PHWR 원전의 PSA 보고서 결과를 입력 자료로 계산한 거리에 따른 장기별 급성 및 만성 선량을 나타낸다.

급성선량의 경우, 일반적인 피폭 전달 경로에 의해 피부에서의 피폭 선량이 가장 지배적이며 거리 별로 감소됨을 알 수 있고, 전세대에 걸쳐 영향이 지속되는 만성선량의 경우에는 뼈와 폐의 피폭 선량이 가장 큰 것으로 확인되었다.

3.2. 상보누적함수 및 평균개인리스크

MACCS II 코드는 소외결말 측정인자의 크기와 기상 근거(Meteorology-based) 확률을 각 방출군에 대해서 상보누적함수(CCDF) 형태로 결과를 제공한다.

MACCS II 코드를 이용하여 조기 및 암사망자에 대한 결말분석시 일반적인 주민 소개시나리오(Evacuation Scenario)는 95%소개, 5% 비소개를 사용하

Table 3. Early and cancer fatality for PWR and PHWR

	PWR (PSA Report)			PWR (MELCOR)			PHWR (PSA Report)		
Frequency (yr)	1.17E-06			1.17E-06			4.93E-09		
Evacuation scenario	0%	95%	100%	0%	95%	100%	0%	95%	100%
Early fatality (person)	1.45 E-01	3.46 E-02	2.88 E-02	8.37 E+01	7.73 E+01	7.70 E+01	5.50 E+00	3.02 E+00	2.89 E+00
Cancer fatality (person)	1.87 E+02	2.22 E+02	2.24 E+02	1.44 E+03	1.59 E+03	1.60 E+03	1.81 E+03	1.89 E+03	1.89 E+03

며, 본 연구에서는 비소개(0%), 95%소개, 100% 소개에 대한 조기 및 암사망자에 대하여 분석을 수행하였다. Table 3은 소형냉각재상실사고로 인해 방출된 방사성물질에 의한 조기 및 암사망자 수를 소개 시나리오별로 분석한 결과이다.

Fig. 5는 NUREG-11502)에서 제시하는 형태의 조기 및 암 발생으로 인한 사망자수에 대한 초과 발생확률을 나타낸다. 규제기관에서 일반적으로 사용하고 있는 MELCOR 코드를 이용하여 분석된 결과가 비교적 보수적으로 평가되어, PSA 보고서에서 제시된 결과를 이용하여 분석된 조기 및 암 사망자수 발생 초과확률보다 더 큰 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 PWR 및 PHWR 원전에 대한 기상, 인구, 방사선원항 자료를 수집하고 분석하여 MACCS II 코드의 입력 자료를 생성하였으며, MACCS II 코드를 이용하여 참조 원전의 소외결말 분석을 수행하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 소외결말분석 결과는 방사성물질의 방출분율에 따라 영향을 많이 받음을 확인하였고, 기상자료, 인구자료, 및 노심재고량도 소외결말분석 결과에 큰 영향을 주는 주요 입력 자료임을 알 수 있었다.
- 2) 각 주요 장치에 대한 선량을 거리별로 평가함으로써 원전 주변 주민들이 사고시에 받을 수 있는 선량을 정량적으로 계산하여, 비상관리계획 수립 및 정량적 보건목표 설정 등에 적용할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 기상, 인구, 선원항 등 다양한 입력 변수에 따른 조기 및 암사망자 수의 초과 확률(Exceedance Probability)을 확인하였다.

본 연구내용의 방법론 및 도출결과를 이용하여 다른 가동원전 및 신규 건설원전에 대한 사전 소외결말분석에 활용이 가능할 것이며, EPZ(Evacuation Planning Zone) 재설정, AMP(Accident Management Plan), QHO(Quantitative Health Object) 수립 및 PA (Public Acceptance) 등에 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한, 향후에는 국내와 같은 복잡지형에 적합한 분석 코드개발 및 대기확산모델 개발을 통하여 불확실성을 줄이기 위한 노력 역시 필요할 것이다.

참고문헌

- 1) David I, Chanin, Mary L, Young, "Code Manual for MACCS II, Vol 1, User's Guide", SAND97-0594, 1997.
- 2) U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Reactor Risk Reference Document", NUREG-1150, February, 1987.
- 3) 주형민, MELCOR 전산코드를 이용한 시간의존적 방사선원항 평가, 2003.
- 4) 한국수력원자력, 울진 3,4호기 확률론적 안전성 평가 보고서, 2004.
- 5) 한국수력원자력, 월성 1호기 확률론적 안전성 평가 보고서, 2007.

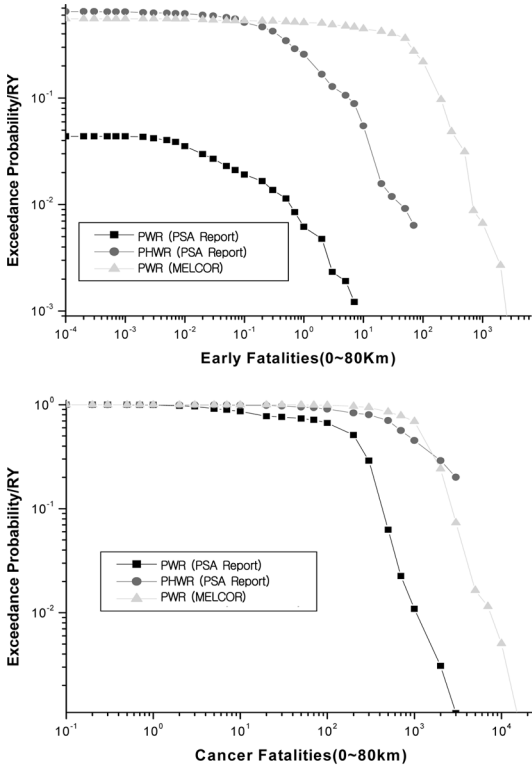


Fig. 5. CCDF of early and cancer fatality.

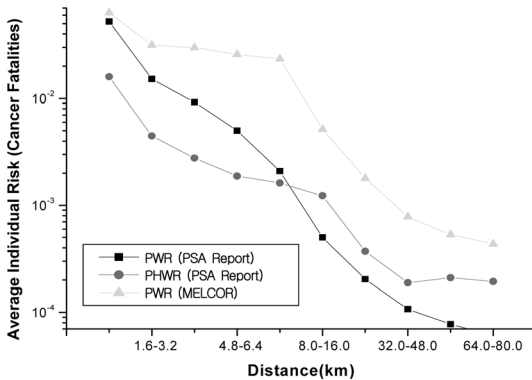


Fig. 6. Average individual risk for cancer fatality.

또한, MACCS II 코드의 EARLY 모듈 변경을 통하여 PWR 및 PHWR 원전의 각 거리별 암 발생으로 인한 개인 사망 발생확률인 평균개인리스크를 평가하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 평균개인리스크도 Fig. 5의 조기 및 암사망자에 대한 초과 발생확률과 같이 MELCOR 코드를 사용한 경우의 리스크 값이 PSA 보고서에서 제시한 값을 이용한 경우보다 더 높음을 알 수 있었다.