

# Study on the Code System for the Off-Site Consequences Assessment of Severe Nuclear Accident

## 원전 중대사고 연계 소외결말해석 전산체계에 대한 고찰

Sora Kim, Byung-Il Min, Kihyun Park, Byung-Mo Yang, and Kyung-Suk Suh\*

*Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea*

김소라, 민병일, 박기현, 양병모, 서경석\*

*한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111*

(Received July 4, 2016 / Revised October 27, 2016 / Approved November 10, 2016)

The importance of severe nuclear accidents and probabilistic safety assessment (PSA) were brought to international attention with the occurrence of severe nuclear accidents caused by the extreme natural disaster at Fukushima Daiichi nuclear power plant in Japan. In Korea, studies on level 3 PSA had made little progress until recently. The code systems of level 3 PSA, MACCS2 (MELCORE Accident Consequence Code System 2, US), COSYMA (COde SYstem from MAria, EU) and OSCAAR (Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Releases in reactor accidents, JAPAN), were reviewed in this study, and the disadvantages and limitations of MACCS2 were also analyzed. Experts from Korea and abroad pointed out that the limitations of MACCS2 include the following: MACCS2 cannot simulate multi-unit accidents/release from spent fuel pools, and its atmospheric dispersion is based on a simple Gaussian plume model. Some of these limitations have been improved in the updated versions of MACCS2. The absence of a marine and aquatic dispersion model and the limited simulating range of food-chain and economic models are also important aspects that need to be improved. This paper is expected to be utilized as basic research material for developing a Korean code system for assessing off-site consequences of severe nuclear accidents.

Keywords: MACCS2, COSYMA, OSCAAR, Level 3 Probabilistic Safety Assessment, Off-site consequence assessment, Severe nuclear accident

\* Corresponding Author.

Kyung-Suk Suh, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: [kssuh@kaeri.re.kr](mailto:kssuh@kaeri.re.kr), Tel: +82-42-868-4788

### ORCID

Sora Kim <http://orcid.org/0000-0002-8971-3327>

Kihyun Park <http://orcid.org/0000-0002-4201-6110>

Kyung-Suk Suh <http://orcid.org/0000-0002-1355-119X>

Byung-Il Min <http://orcid.org/0000-0002-8518-6275>

Byung-Mo Yang <http://orcid.org/0000-0003-1847-4805>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

인접 국가인 일본의 후쿠시마 원전에서 극한 자연재해로 인한 중대사고가 발생하면서, 국내에서 중대사고 및 확률론적 안전성 평가 (PSA, Probabilistic Safety Assessment)에 대한 중요성이 재인식되었다. 국내에서는 원전의 소외결말을 평가하는 3단계 PSA에 대한 연구개발이 최근까지 거의 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 국외 3단계 PSA 전산코드 중, 미국의 MACCS2 (MELCORE Accident Consequence Code System 2), 유럽의 COSYMA (COde SYstem from Maria) 그리고 일본의 OSCAAR (Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Releases in reactor accidents)에 대한 간략한 분석과 미국의 MACCS2에 대한 단점 및 한계점 분석을 수행하였다. 국내·외 전문가들에 의해 공통적으로 지적되어 온 MACCS2의 한계점은 다수호기사고와 사용후핵연료 저장조로부터의 방출 모사의 불가능, 그리고 대기확산모델을 단순 가우시안 플룸모델을 기본으로 한다는 것이며, 이중 일부는 MACCS2업데이트 버전을 통해 개선되어 왔다. Food chain 모델의 모사의 제한, 해양 및 수계 확산모델의 부재, 제한된 범위의 경제영향평가 등 또한 개선되어야 할 사항이다. 기술보고의 결과는 국내 3단계 PSA 관련 기술 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

중심단어: MACCS2, COSYMA, OSCAAR, 3단계 확률론적 안전성 평가, 소외결말평가, 중대사고

## 1. 서론

2011년 3월 인접 국가인 일본의 후쿠시마 원전에서 극한 자연재해로 인한 중대사고가 발생하면서, 국내에서 중대사고 및 확률론적 안전성 평가(PSA, Probabilistic Safety Assessment)에 대한 중요성이 재인식되었다. 특히, 국내에서는 원전의 소외결말을 평가하는 3단계 PSA에 대한 연구개발이 최근까지 거의 이루어지지 않았으며, 미국의 MELCORE Accident Consequence Code System 2 (MACCS2)를 국내 특정 원전들을 대상으로 하여 시범적으로 적용한 단계에 머무르고 있다.

미국에서는 1970년대 Reactor Safety Study (WASH-1400, 1975 [1])를 통해 미국의 상업용 원전의 가상사고에 대한 확률론적 위험도 평가가 최초로 수행되었고, 1979년에 발생한 스리마일 섬(TMI, Three Mile Island) 원전사고로 인해 원전의 확률론적 안전성 평가에 대한 중요성이 크게 재고되었다. 1990년대 초반에는 확률론적 위험도 평가 분야에 대한 미국 원자력규제위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission)의 전폭적인 지원으로 미국 내 5개 원전에 대한 전 범위의 PSA가 수행되었으며, 그 결과는 NUREG-1150 (Severe Accident Risks: An Assessment for U.S. Nuclear Power Plants, 1990 [2])에 수록되었다. 2000년대 후반, State-Of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA, 2012 [3]) 프로젝트가 진행되면서, MELCOR와 MACCS2를

사용하여 사고의 진행과정에서부터 선원향, 소외결말에 이르기까지의 통합적인 모델링을 통해 제한된 범위의 확률론적 사고결말 평가(3단계 PSA)가 수행되었다.

3단계 PSA 수행을 위한 전산코드는 미국의 MACCS2 이외에도, 유럽연합의 COSYMA, 일본의 OSCAAR, 영국의 CONDOR, 핀란드의 ARANO, 스웨덴의 LENA 등이 1970~1990년대에 각 국가의 특성을 반영하여 개발되었고, 현재까지 그 완성도를 높여오고 있다[4]. 3 단계 PSA 기술은 환경·사회적 특성이 다른 각국이 개발한 기술을 도입하여 적용하기 보다는 우리나라 고유의 환경·사회적 특성을 반영하여 기술개발을 하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 3단계 확률론적 안전성 평가 코드에 대한 국외 현황에 대해 검토하고, 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 3단계 PSA 코드인 미국의 MACCS2의 단점 및 한국 적용의 한계점에 대해 분석하였다.

## 2. 국외 3단계 PSA 코드

확률론적 사고 평가모델과 전산코드는 원전의 3단계 확률론적 안전성 평가에 필수적인 요소이다. 전세계적으로 다양한 확률론적 안전성 평가코드가 개발되었고, 여러 국가들에서 널리 사용되고 있다. 대표적인 3단계 PSA 전산코드로는 MACCS2 (미국), COSYMA (유럽연합), OSCAAR (일본),

Table 1. Characteristics of level 3 PSA codes

	MACCS2 [5-7]	COSYMA [12-14]	OSCAAR [15-17]
Developing country	US	EU	Japan
Atmospheric dispersion model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• straight-line Gaussian plume model</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &lt; 60 km                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- segmented Gaussian plume model</li> <li>- straight-line Gaussian plume model</li> <li>- Gaussian puff trajectory model</li> <li>- statistical Gaussian plume model</li> </ul> </li> <li>• ≥ 60 km                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- trajectory puff model</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• multiple puff trajectory model</li> </ul>
Exposure pathway	<ul style="list-style-type: none"> <li>• cloudshine, groundshine, external exposure from material deposited on the skin</li> <li>• cloud inhalation, resuspension inhalation</li> <li>• internal exposure from food and water ingestions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• cloudshine, groundshine, external exposure from material deposited on the skin or clothes</li> <li>• cloud inhalation, resuspension inhalation</li> <li>• internal exposure from food ingestion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• cloudshine, groundshine</li> <li>• cloud inhalation, resuspension inhalation</li> <li>• internal exposure from food ingestion</li> </ul>
Protective action	<ul style="list-style-type: none"> <li>• evacuation, sheltering, relocation</li> <li>• decontamination</li> <li>• temporary interdiction and condemnation for residential and agricultural land uses</li> <li>• food bans</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• evacuation, sheltering, relocation</li> <li>• food bans</li> <li>• decontamination</li> <li>• skin decontamination</li> <li>• thyroid blocking agent (KI)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• evacuation, sheltering, relocation</li> <li>• food bans</li> </ul>
Results of the calculations	<ul style="list-style-type: none"> <li>• exposure dose</li> <li>• health effects (early fatal and non-fatal health effects, fatal and non-fatal cancer risk)</li> <li>• effectiveness of countermeasures</li> <li>• off-site economic cost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• exposure dose</li> <li>• health effects (early fatal and non-fatal health effects, late effect (fatal and non-fatal cancer, hereditary effects))</li> <li>• off-site economic cost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• exposure dose</li> <li>• health effects (early fatal and non-fatal health effects, fatal and non-fatal cancer)</li> <li>• effectiveness of countermeasures</li> <li>• off-site economic cost</li> </ul>

CONDOR (영국), ARANO (핀란드), LENA (스웨덴) 등이 있다[4]. 국내 고유의 3단계 PSA 기술을 개발하기 위해서는 기존 국외 코드들에 대한 이해가 매우 중요하므로, 본 논문에서는 MACCS2, COSYMA, 그리고 OSCAAR의 특성에 대해 분석하여 다음과 같이 정리하였고, 각 코드들의 주요 특징들을 Table 1에 제시하였다.

### 2.1 미국 MACCS2 [5-7]

MACCS2의 계산은 기본적으로 시간과 공간의 측면으로 나누어진다. 시간의 관점에서 사고단계는 발생 시점부터 비상단계, 중단단계, 그리고 장기단계로 나누어지며, 이는 사고 발생 후 뒤따르는 사회적 반응 순서에 기반하여 구분(미국

환경보호청(EPA, Environmental Protection Agency) (1992) [8]의 Protective Action에서의 정의에 따름) 된다. MACCS2의 모든 계산 결과는 극좌표 공간격자를 기본으로 저장된다. 방출된 방사성 물질에 의해 영향을 받을 가능성이 있는 지역은 방출위치를 중심으로 하여 반지름과 각도( $r, \theta$ ) 격자로 나타내어 진다. 공간격자는 반경방향으로 9,999 km 이내에서 최대 35개까지 설정할 수 있고, 원주방향으로는 북쪽을 기준으로 시계방향으로 16방위로 나누어진다. MACCS2는 ATMOS, EARLY, 그리고CHRONC의 3가지 주요 모듈로 구성되어 있다. Fig. 1은 MACCS2의 계산 실행 순서도[7]이다.

ATMOS 모듈에서는 대기에 방출된 방사성 물질의 확산 및 지표로의 침적을 풍하 이동 거리에 관한 함수로 계산한다. MACCS2의 대기확산모델은 직선궤도 가우시안 플룸모델

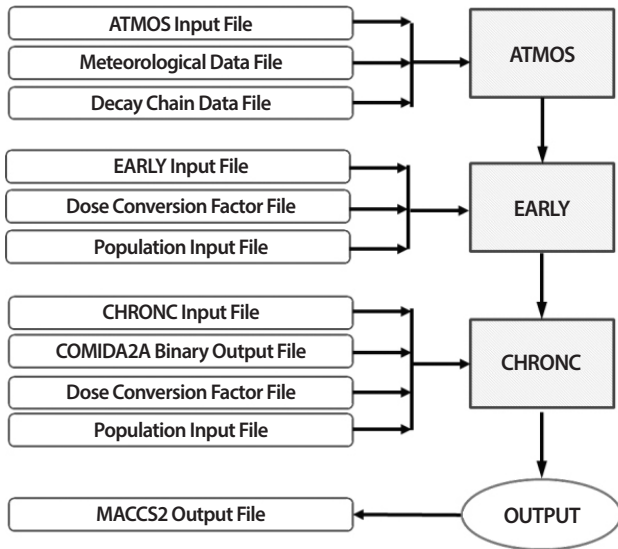


Fig. 1. Progression of the MACCS2 calculation [7].

(straight-line Gaussian plume model)을 기본으로 하며, 플룸의 수직·수평방향 분산형태는 대기확산계수 값(Pasquill-Gifford dispersion parameter)에 의해 결정된다. 플룸의 사행효과(Gifford (1975) [9])에 의한 수평방향으로의 퍼짐 현상과, 표면 거칠기(미국 기상학회(AMS, American Meteorological Society) (1977) [10])에 의한 수직방향의 난류발생으로 인한 퍼짐 현상은 각각의 보정인자를 적용하여 계산한다. 건물의 와류현상을 고려하여 초기 플룸 크기를 지정하며, Briggs (1975) [11]의 플룸상승모델이 적용된다. 플룸으로부터 방사성 물질이 제거되는 경로는 방사성 붕괴 및 건·습식 침적이 고려된다. MACCS2에서는 1년 간의 풍향, 풍속, 대기 안정도, 강우량, 그리고 계절에 따른 혼합층 높이 자료가 한 시간 단위로 입력된다. 입력된 8,760시간의 기상자료 중 120시간에 해당하는 기상자료가 선택되어 평가에 사용되며, 기상자료 선택방법은 사용자에게 의해 결정된다. 방사선원항 자료는 사고시 핵종 종류 및 재고량, 플룸 내 핵종 그룹별 방출 분률, 플룸수, 방출시간 및 기간, 방출고도, 열함량 등이다.

EARLY 모듈에서는 비상단계(방사성 물질의 방출시점으로부터 1주일 이내 범위) 기간에서의 방사선 피폭에 의한 주민선량과 건강영향(조기상해, 조기사망, 암사망 등의 위험도)에 대한 계산이 수행된다. 고려되는 피폭 경로는 방사성 구름이나 지표와 피부에 침적된 물질에 의한 외부피폭과 방사성

구름이나 지표로부터 재부유된 물질의 흡입으로 인한 내부 피폭이다. 비상단계에서 고려되는 선량완화 조치는 소개, 대피, 일시 이주가 있다. 소개나 대피의 경우 선량에 무관하게 특정지역(비상계획구역(EPZ, Emergency Planning Zone))에서 실시되며, 일시 이주의 경우 일정 준위의 선량 기준을 초과하여 피폭될 경우에 대해 실시되는 것으로 가정한다.

CHRONC 모듈에서는 비상단계 이후 중·장기단계에서의 방사선 피폭에 의한 주민선량, 건강영향(암사망 등의 위험도), 토양오염, 그리고 경제적 비용에 대한 평가가 수행된다. 중기단계에서는 비상단계 이후 1년 이내 기간에 대해서 평가되며, 지표에 침적된 물질으로부터의 외부피폭과 지표로부터 재부유된 물질의 흡입으로 인한 내부피폭만 고려된다. 선량완화조치로는 일시 이주가 고려되며, 일정 준위 이상의 피폭이 예상될 경우 주민들이 비오염 지역으로 중기단계 전체 기간 동안 이주한 것으로 가정한다. 장기단계는 중기단계 이후 전체 기간에 대해 평가되며, 중기단계에서 평가되는 피폭경로에 음식이나 물 섭취로 인한 내부피폭이 추가적으로 고려된다. 선량완화조치로는 제염, 금지구역 설정, 영구적인 토지 사용 및 거주 금지 등이 고려되며, 건강 영향의 경우 암발생 위험도를 평가한다. 또한 CHRONC 모듈에서는 전 기간의 경제적 비용(소개비용, 임시 이주비용, 제염비용, 피해 농산물 가격, 사용 및 거주가 영구적으로 금지된 토지에 대한 가격 등)을 평가한다.

## 2.2 유럽연합 COSYMA [12-14]

COSYMA (COde SYstem from MAria)는 1990년대 유럽연합의 MARIA 프로젝트의 일환으로 영국의 국립방사선방호원(NRPB, National Radiological Protection Board)와 독일의 Kern forschungszentrum Karlsruhe GmbH (KfK)에 의해 개발되었다. COSYMA는 시간 간격과 거리 범주에 따라 달리 적용하기 위해 디자인된 세 개의 주요 사고결말분석 프로그램으로 구성되어 있다. COSYMA를 구성하는 주요 프로그램은 Near Early (NE), Near Late (NL), 그리고 Far Late (FL)이며, Fig. 2에 COSYMA의 구성[12]이 간략히 도시화되어 있다. NE 프로그램은 사고 발생지점으로부터 근거리 지역의 비상대책의 영향과 조기 건강영향에 대한 계산을 수행한다. NL 프로그램에서는 사고 발생지점으로부터 근거리 지역에서 나타나는 만성 건강영향과 선량완화조치에 대한 평가가



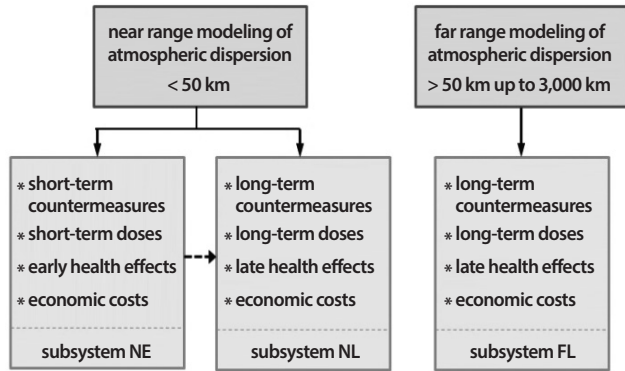


Fig. 2. Structure of the COSYMA program [12].

수행된다. 마지막으로 FL 프로그램에서는 사고 발생 지점으로부터 원거리 지역에서 나타나는 만성 건강영향과 선량완화조치에 대한 평가가 수행된다.

COSYMA는 다섯 가지의 대기확산모델로 구성되어 있다. NE와 NL 프로그램은 가우시안 분절플룸모델(Gaussian segmented plume model)을 기본으로 하는 MUSEMET이 사용되며, 플룸이 이동하는 동안 시간에 따른 기상조건과 바람방향의 변화가 고려된다. 이 모델은 풍향, 풍속, 대기안정도 등급, 강수세기, 그리고 혼합고 높이의 시간 당 평균값이 저장되어 있는 데이터 파일의 정보를 사용하여 계산이 수행된다. 플룸의 상승과 방출지점 근처에 위치한 건물에 의한 연속적인 분산현상의 모사가 가능하며, 분산되는 물질의 건·습식 침적효과와 고려가 가능하다. 이 프로그램들에서는 대기확산 모델을 COSGAP, 또는 RIMPUFF와 호환 가능하다. COSGAP는 영국 국립방사선방호원의 MARC의 확산모델이 바탕이 된 것으로, 직선궤도 가우시안 플룸모델을 기본으로 하고 있다. MUSEMET과 비슷하지만, 플룸이 이동하는 동안의 바람방향 변화에 대한 고려는 할 수 없다. RIMPUFF는 덴마크의 Ris 0 National Laboratory에서 개발한 가우시안 퍼프궤적모델(Gaussian puff trajectory model)을 기본으로 하고 있다. 관심지역의 수많은 기상관측소로부터 얻은 데이터를 내삽하여 플룸에 영향을 미치는 기상정보를 얻는다. 또한, NL 프로그램에는 통계적 가우시안 플룸모델(statistical Gaussian plume model)인 ISOLA 또한 호환 가능하지만, 이 모델의 경우 긴 기간 동안 매우 적은 방출량에 대해서만 계산 가능하며, 조기 건강영향이나 선량완화조치에 대한 고려가 불가능하다. FL 프로그램은 궤적퍼프 확산모델(trjectory

puff dispersion model)인 MESOS (영국, Imperial College)가 사용된다. 장거리 확산 계산이 수행되며, 유럽 전체와 같은 넓은 지역의 기상자료가 계산에 사용된다.

NE, NL, 그리고 FL에서 공통적으로 고려되는 피폭경로는 방사성 구름, 지표나 피부 및 의복에 침적된 방사성 물질에 의한 외부피폭, 방사성 구름 및 재부유된 방사성 물질의 흡입에 의한 내부피폭이며, NL과 FL에서는 오염된 음식의 섭취에 의한 내부피폭이 추가적으로 고려된다. 방사성 물질 방출 이후, 주민들의 피폭을 감소시키기 위한 다양한 종류의 선량을 저감할 수 있는 조치가 가능하며, 특정 조치의 시행 및 철회를 위한 기준 선량, 기간 등을 사용자가 자유롭게 설정할 수 있다. 소개, 대피, 이주, 음식물에 포함되어 있는 방사성 핵종의 농도와 섭취 기간 등을 고려한 음식물 섭취 금지, 오염된 토양 제염, 피부에의 침적된 오염물질 제거, 갑상선 방호약품(stable iodine tablet) 배포 등을 고려할 수 있다. 계산 결과로 피폭선량, 건강영향(조기상해, 조기사망, 암사망, 유전적 영향 등), 그리고 사고로 인한 소외 경제적 비용이 평가된다.

### 2.3 일본 OSCAAR [15-17]

일본의 OSCAAR (Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Releases in reactor accidents)는 1980년대 후반 ~ 1990년대 초반에 걸쳐 일본 원자력연구소(JAERI, Japan Atomic Energy Research Institute)에서 개발한 원전 사고 소의결말 분석용 코드이다. OSCAAR는 선택된 방사성 핵종이 샘플링 된 기상조건에서의 대기확산과 침적, 그리고 방사선에 노출된 주민의 피폭선량 분포와 건강영향 등을 계산하기 위해 연결된 모듈과 데이터 파일들의 시리즈로 구성되어 있으며, Fig. 3은 OSCAAR의 계산 실행 순서도[17]이다.

OSCAAR Atmospheric Dispersion and Deposition (OSCAAR-ADD) 모듈은 다중 퍼프궤적모델(multi-puff trajectory model)을 기본으로 하여, 바람방향의 변화와 가변의 긴 기간 방출에 대한 고려가 가능하다. OSCAAR-ADD의 기상정보 입력방식은 기본적으로 두 종류의 격자 시스템으로 구성되어 있다. 첫 번째 기상정보 입력시스템은 일본 기상청(JMA, Japan Meteorological Agency)에서 제공하는 수치예보자료(GPV, Grid Point Value) 중 표준의 일정한 기압(950, 850, 700hPa)에서 수치적으로 분석된 세 시간 단위의

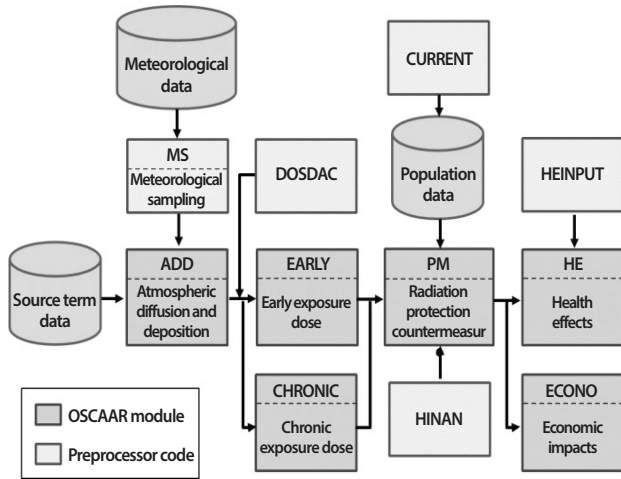


Fig. 3. Progression of the OSCAAR calculation [17].

바람자료를 이용하는 대규모 오일러리언 격자(synoptic scale Eulerian grid)모델이다. 두 번째 기상정보 입력시스템은 중규모의 격자(meso scale grid)모델로 일본 기상청에서 제공하는 수치예보자료 중 시간 단위의 지표바람(surface wind)과 대기안정도 데이터가 사용된다. 플룸상승은 플룸 방출고도에서의 기상조건과 Briggs (1975 [11])에 의해 제안된 플룸 상승모델을 통해 계산된다. 혼합층 높이는 안정도의 함수에 의해 결정된다. 혼합층 내에서, 역법칙 풍속 프로파일(power-law wind profile)이 각 퍼프의 수직방향의 평균 이류풍을 계산하는데 사용된다. 중규모 시스템(meso scale system)의 지표 바람자료와 대규모 시스템(synoptic scale system)의 수평방향 바람자료가 계산에 사용된다.

각 퍼프 오염농도가 가우시안 분포를 이룬다는 통계적 가정을 채택하고, 지표면으로부터 반사되는 것으로 가정한다. 수평·수직방향으로의 분산형태를 결정짓는 대기확산계수는 퍼프가 이동한 거리와 대기 안정도에 대한 함수로 나타난다. 방사성 붕괴와 건·습식 침적에 의한 방사성 구름 내의 방사성 물질의 감소는 ADD에서 각 퍼프의 궤적을 따라 고려된다.

OSCAAR에서는 두 종류의 모듈(EARLY와 CHRONIC 모듈)이 대기와 토양에서 추정된 시·공간에 따른 방사성 물질의 농도분포를 주민(인구)에 대한 피폭선량분포로 전환하는데 이용된다. 사고 발생 직후 수 시간에서 수 주 내에 발생하는 방사성 구름과 오염된 토양으로부터의 외부피폭과

흡입에 의한 내부피폭에 대한 계산이 EARLY 모듈에서 수행된다. CHRONIC 모듈에서는 장기간 피폭선량을 평가하며, 오염된 토양으로부터의 외부피폭, 토양으로부터 재부유된 방사성 핵종의 흡입에 의한 내부피폭, 오염된 음식의 섭취로 인한 내부피폭 계산이 수행한다. 토양으로부터의 장기간에 걸친 피폭선량 계산시에는 침적된 물질이 아래층 토양으로 이동하는 현상과 방사성 핵종의 붕괴가 고려된다. 주요 계산 결과는 건강영향(조기상해, 조기사망, 그리고 암사망 위험도 등), 선량완화조치의 효과, 그리고 경제적 비용이다.

### 3. MACCS2 의 단점 및 한국 적용의 한계점 분석

MACCS2는 3단계 PSA 평가를 위해 전 세계적으로 가장 많이 사용되는 코드이며, 국내에서도 MACCS2를 몇몇 원전에서 3단계 PSA 평가를 하는데 적용한 바 있다[18]. MACCS2는 상업용 원전 및 원자력 시설의 사고로부터 방출되는 방사성 핵종들의 대기로의 확산 및 침적, 주민피폭선량, 피폭에 의한 건강 및 경제적 영향 등의 소의결말까지 모두 평가할 수 있다는 점에서 활용도가 매우 높지만, 국내 적용을 위해서는 여러 측면에서 한계를 가진다. 특히, 후쿠시마 원전 사고 이후, 3단계 PSA의 중요성이 재고되면서, MACCS2의 단점들이 국내·외에서 지적되어 왔다. 단점으로 지적되어 오던 사항들이 2011년 이후 MACCS2가 업데이트 되면서 많은 부분 개선되었고, 현재도 진행 중에 있다. 기존 미국 에너지부(DOE, Department of Energy), 산업계, 그리고 미국 원자력규제위원회 등에 가장 널리 배포되어 사용되어온 버전은 MACCS2 ver. 1.12이며, 2001년 미국 원자력규제위원회의 요구에 따라 윈도우 기반의 인터페이스와 체제를 개발하기 시작하였고, 그 결과로 WinMACCS2가 개발된 바 있다. WinMACCS ver. 3.6 (MACCS2 ver. 2.5), WinMACCS ver. 3.7 (MACCS2 ver. 2.6) (2012), WinMACCS ver. 3.9 (2014), 그리고 WinMACCS ver. 3.10 (2015)이 현재까지 배포되어 온 WinMACCS의 주요 버전이며, 다음 버전이 현재 개발 중에 있다[19]. 기존 MACCS2가 가지고 있던 단점과 코드의 버전이 업데이트 됨에 따라 개선된 사항들에 대해 분석 및 정리하였다. Table 2에서는 업데이트된 MACCS2 최신 버전들에서도 여전히 나타나고 있는 한계점들에 대해 요약하였다.

Table 2. Disadvantages and limitations of MACCS2

Disadvantages and limitations	
Source term	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Total duration of atmospheric release of radioactive material is limited to no more than one month.</li> </ul>
Atmospheric dispersion model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitations come from using the straight-line Gaussian plume model.               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Release duration of each plume segment is limited to 1 day.</li> <li>- Apply weather data of the release point (accident site) to the whole interest region.</li> <li>- Impossible to consider the spatial and temporal changes of wind field.</li> <li>- It is assumed that released radionuclides only influence on the restricted area defined by the straight-line Gaussian plume.</li> <li>- Not applicable to dispersion modeling at distance less than 100 m and beyond 10 ~ 20 km from the release point [7].</li> <li>- Gaussian plume model performs best over the flat terrain, so it is difficult to predict the typical atmospheric dispersion phenomenon in a complex terrain.</li> </ul> </li> <li>• Using 120 hours of weather data.               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Impossible to simulate continuously released plume over months.</li> <li>- Limitation to evaluate the mid- and long-term effects.</li> </ul> </li> </ul>
Absence of an aquatic and marine dispersion model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absence of a marine and aquatic dispersion model.               <ul style="list-style-type: none"> <li>- A marine and aquatic dispersion models should be set up to evaluate the influence of aqueous radioactive release.</li> </ul> </li> <li>• Consider only atmospheric fallout (wet and dry deposition) on the water as a source of water contamination.               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Water contamination is evaluated to calculate internal exposure dose following water ingestion.</li> </ul> </li> </ul>
Food chain model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Not include an aquatic plant and animal foods.</li> <li>• It is assumed that people only consume foods which are produced in their residential area.</li> </ul>
Dose assessment model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MACCS2 is based on the outdated dose assessment system of ICRP publication 26, so it is necessary to update of the latest dose assessment system (ICRP publication 60 or 103).</li> <li>• Consider water ingestion as the only exposure pathway from water contamination.               <ul style="list-style-type: none"> <li>- It is necessary to consider external exposure from the contamination of water bodies and marine environment</li> <li>- It is necessary to consider internal exposure from the ingestion of an aquatic plant and animal foods.</li> </ul> </li> <li>• Realistic shielding (or reduction) factor should be obtained by considering surrounding environment.</li> </ul>
Health effect model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• It is necessary to improve health effect model and parameters by reflecting the latest research data such as BEIR-VII.</li> <li>• It is necessary to reflect the differences of ages and sexes on health effect model.</li> <li>• Not include calculation module for evaluating the hereditary effects.</li> </ul>
Economic cost model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluate the limited off-site economic cost.               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluate only the direct cost related to emergency protective actions and decontamination.</li> </ul> </li> <li>• Underestimate the duration and cost of decontamination and cleanup (only up to 1 year).</li> <li>• Not consider radioactive waste.</li> <li>• Not consider decontamination of certain areas, such as forest, wetland, and water bodies [25].</li> <li>• Not consider the additional cost of decontaminating the re-contaminate area (such as by runoff) [25].</li> <li>• Underestimate economic cost because MACCS2 economic model is based on the economic model of WASH-1400 which was developed by using decontamination and cleanup data related to nuclear weapon as source information [25].</li> <li>• Not consider the direct and indirect economic cost related to health effect of exposed residents.</li> </ul>

### 3.1 선원항

후쿠시마 사고 이후, 다수호기사고와 사용후핵연료 저장조로부터의 방사성 물질 방출에 대한 고려의 중요성이

부각되었고, 이 부분은 많은 전문가들이 그 중요성을 지적하였다. 기존의 MACCS2 (ver 1.12)의 경우 단일의 노심재고량 (Bq) 자료가 입력되며, 각 플룸의 핵종 그룹별 방출율, 방출 시작시간, 방출기간, 방출고도, 열함량 값 등을 지정해주는

방법으로 선원항을 설정한다. 이와 같이, 기존 MACCS2에서는 사고시 다수호기와 사용후핵연료에 대한 평가가 불가능하였다. 하지만, WinMACCS ver. 3.10 (2015)에서는 선원항 입력 부분을 개선하여, 다중의 방사선원항 자료가 입력 가능하며, 사용후핵연료에 대한 계산이 가능하다[19].

핵종의 물리, 화학적 특성에 따른 방출군을 기존 MACCS2에서는 9개의 그룹으로 정의하여, 방출되는 수많은 핵종들에 대한 방출 및 대기확산특성을 사실적으로 평가하기에는 한계가 있었다. WinMACCS ver. 3.9 (2014)에서 핵종 그룹을 최대 150 그룹으로 세분화하여 이러한 단점을 일부 개선하였다[19].

기존 MACCS2에서는 총 4개의 플룸이 발생가능하며, 각 플룸의 최대 방출기간은 1일이었다. 각 플룸의 방출시작 시점은 사고발생 시점으로부터 최대 4일까지 지연되도록 지정할 수 있다. 따라서, 사고시점 이후 최대 5일까지 플룸의 방출을 모사할 수 있는 것이다. 방사성 물질의 방출이 수개월 이상 지속된 후쿠시마 사고의 예에서 볼 때 개선이 요구되는 부분이다. 이 부분 역시, WinMACCS ver. 3.9 (2014)에서 플룸의 수가 최대 500개까지 지정 가능하게 되었고, WinMACCS ver. 3.10 (2015)에서는 플룸의 방출시작 시점이 사고발생 시점으로부터 최대 30일까지 지연되도록 지정될 수 있도록 개선되었다[19]. 따라서, 현재 버전에서는 사고시점 이후 최대 30일까지 플룸의 방출을 모사할 수 있다. 플룸 방출기간 관련 사항은 개선이 되었음에도 불구하고, 수개월 이상에 걸친 방사성 물질의 지속적인 방출을 모사하는 데는 여전히 한계가 있다.

### 3.2 대기확산모델

우리나라 지형은 산지와 구릉, 그리고 해안이 어우러진 복잡한 지형이며, 대부분의 발전소는 바람장의 순환이 활발하고, 확산이 잘 이루어지는 해안가에 위치하고 있다. 특히, 원전의 정상 운영 시와는 달리, 사고 시에는 대량의 방사성 물질이 비교적 짧은 시간에 우발적으로 방출되고 확산되는 특성을 가지기 때문에, 사고 당시의 기상 및 지형 특성이 매우 중요한 변수가 될 수 있다[20].

기존 MACCS2의 대기확산모델은 평지를 기본으로 하는 직선궤도 가우시안 플룸모델을 적용하고 있으며, 이로 인한 다음과 같은 여러 한계점들이 존재한다. 바람장의 시·공간적

변화가 고려되지 않고, 한 지점(일반적으로 방출지점)의 기상정보를 전체에 적용하기 때문에, 플룸 방출 후의 기상변동으로 인한 영향을 고려할 수 없다. 평지를 기본으로 한 가우시안 모델은 산지, 협곡, 강 등의 복잡한 지형으로 인한 대기 확산 특성을 예측하기 어려우며, 대부분의 원전은 해안에 위치하고 있지만, 가우시안 모델로는 해륙풍의 영향을 전혀 고려할 수 없다. 또한, 직선궤도 가우시안 플룸에 의해 정의되는 제한된 구역에만 방사성 물질이 영향을 미치는 것으로 가정된다. MACCS2의 ATMOS 모듈에서 계산되는 방사성 핵종의 농도는 플룸의 중심선에서의 값이다. 플룸의 중심선을 벗어난 지역의 방사성 핵종의 농도를 계산하기 위해서 가우시안 횡풍(crosswind) 분포를 사용하여, 반경방향의 간격( $r$ )과 플룸의 중심선이 위치한 격자로부터의 원주방향으로의 격자 간격 수( $m$ )에 대해 유도한 비중심선 보정인자(off-centerline correction factor)를 적용한다. 가우시안 플룸의 크기 내 구역에 대해서만 각 격자 별로 플룸 중심선에서의 농도와 비중심선 보정인자에 의해 보정된 농도를 이용해 사고결말이 평가된다. 가우시안 모델의 특성상 선원으로부터 100 m 이내의 근거리나, 10~20 km 이상의 원거리에서 나타나는 분산현상을 모델링하는데 한계가 있다[7]. 기존 MACCS2가 공간에만 의존한 대기확산계수를 사용(distance-based model)하기 때문에 발생하는 문제로, WinMACCS ver 3.6에서는 이러한 단점을 개선하기 위해, 시간에 기반한 분산모델(time-based dispersion model)을 옵션으로 추가하여, 특정 거리 이상에서는 시간을 기반으로 플룸의 분산이 평가될 수 있도록 하였다. 이는 가우시안 퍼프모델에 주로 적용되는 방법이다[21]. 하지만, 후쿠시마 사고에서 방출된  $^{137}\text{Cs}$ 의 지표 침적 농도를 후쿠시마 원전 반경 240 km 이내 지역에 대해 공간과 시간에 기반한 분산모델을 각각 적용하여 평가하여 보았지만, 그 결과에는 크게 차이가 없는 것으로 평가되었다(Fig. 4). MACCS2 계산 입력자료 및 계산 조건은 Kim et al. (2015) [22]와 동일하게 적용하였다.

현재 개발 중인 버전에서는 기존의 MACCS2의 대기확산 모델을 HYSPLIT의 가우시안 퍼프모델과 라그랑지안 입자 추적 모델로 개선할 예정인 것으로 발표된 바 있다[19]. 따라서, 가우시안 모델을 사용함으로써 나타나는 MACCS2의 문제점들은 대기확산모델을 교체함으로써 개선될 것으로 기대된다.

또한, MACCS2에서는 사고발생 시점으로부터 120시간에



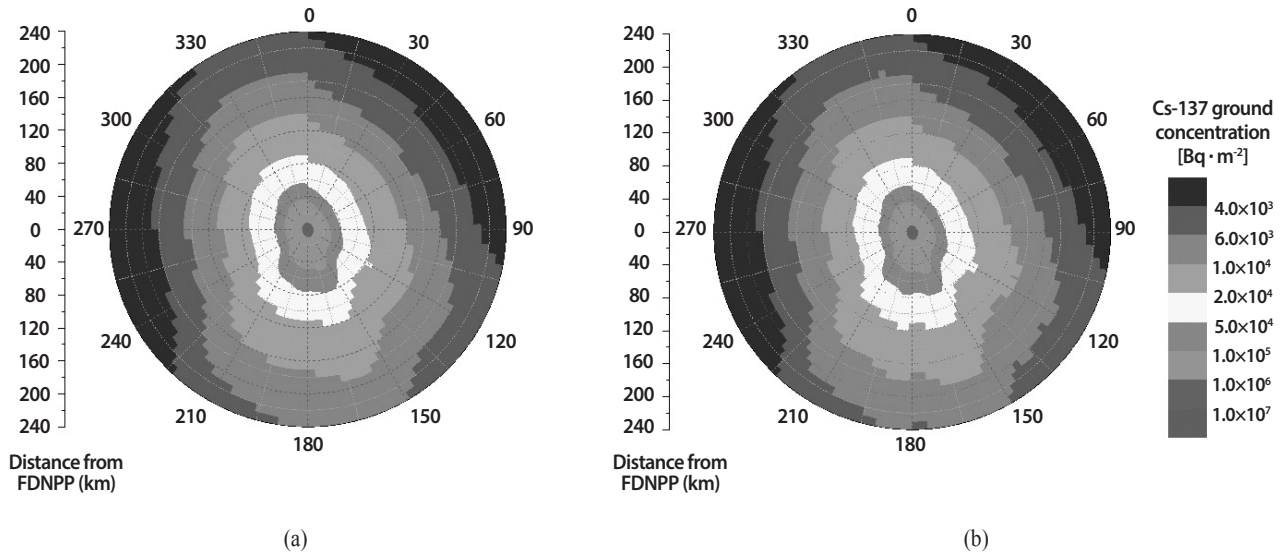


Fig. 4. MACCS2 results of <sup>137</sup>Cs ground concentration (Bq·m<sup>-2</sup>) calculated by two different dispersion modelling options: (a) distance-based dispersion model, (b) time-based dispersion model.

해당하는 기상자료를 사용하여 계산이 수행된다. 방사성 플룸이 120시간 이내에 관심영역(반경)까지 도달하지 못할 경우에는 사용자가 입력한 일정한 기상조건이 계산에 적용된다. 수개월 이상 지속적으로 방출되는 방사성 물질의 중·장기적인 대기확산을 평가하기 위해 120시간의 기상연속자료를 적용하는 것은 적절하지 않다.

### 3.3 해양 및 수계확산모델의 부재

후쿠시마 사고 후 수계 및 해양으로의 방사성 핵종의 유입에 의한 수생환경의 오염이 큰 문제가 되고 있으며, 해양으로 방출된 방사성 물질이 미국 서해연안까지 도달한 것이 확인된 바 있다. 또한, UNSCEAR 2013 보고서[23]에 따르면, 후쿠시마 원전사고 후 해양으로 직접적으로 유입된 액체상의 <sup>137</sup>Cs과 <sup>131</sup>I의 양은 대기확산을 통해 해양으로의 침적된 방사성 물질의 양에 못지 않게 많았던 것으로 평가된 바 있다. 따라서, 원전의 사고결말을 평가하는데 해양확산모델은 필수적이라고 할 수 있다. MACCS2에서 수계로의 방사성 핵종의 유입 경로는 대기로 방출된 핵종의 습식 및 건식 침적에 의한 경우 만 고려하고 있으며, 수계로 유입된 핵종의 거동에 대한 모델링은 따로 수행되고 있지 않다. 수계를 통한 피폭경로는 오염된 식수 섭취로 인한 내부피폭 만이 고려되고 있다.

대기로 확산된 핵종의 수계로의 침적(직접적인 침적, 토양으로 침적된 후 강수에 의해 수계로 침투)과 직접적으로 수계로 방출되는 방사성 핵종에 대한 지하수, 하천 호수, 해양으로의 확산모델이 구축되어야 한다. 수계확산모델의 구축을 통해, 오염된 수생환경으로 인한 외부피폭(물가에서의 활동, 어업이나 수상 스포츠 등)과 수생생물의 섭취에 의한 내부피폭이 필수적으로 고려되어야 한다.

MACCS2 뿐 만 아니라 유럽연합의 COSYMA, 일본의 OSCAAR, 영국의 CONDOR, 핀란드의 ARANO, 그리고 스웨덴의 LENA에도 수계확산모델은 구축되어 있지 않다. 1990년부터 원전 사고시 소의 비상대응조치를 위해 유럽 전역에 적용 가능하도록 개발된 RODOS (Real-time On-line Decision Support)의 경우 수계확산모델을 포함하고 있다. 이는 체르노빌 원전사고로 방출된 방사성 핵종에 의해 오염된 수계가 주민피폭에 크게 영향을 주었음이 확인되고, 수생환경으로의 방사성 물질 방출에 의한 영향 평가의 중요성이 부각됨에 따라, 수계확산모델을 시스템에 구축한 것이다[24].

### 3.4 Food chain 모델

MACCS2는 food chain 모델인 COMIDA2에서는 다음과 같은 9가지 식품군, (1) 곡물, (2) 잎채소, (3) 뿌리채소,

(4) 과일, (5) 콩류, (6) 소고기, (7) 우유, (8) 가금류, 그리고 (9) 이외 축산물에 대한 평가만 수행된다[6]. MACCS2는 수생 생물에 대한 고려는 제외되어 있다. 후쿠시마 사고 후 수계 및 해양으로의 방사성 핵종의 유입에 의한 수생환경의 오염이 발생되었고, 그 결과로 수생 동·식물 내 방사성 물질의 축적이 문제가 되고 있다. 한국인의 경우 식생활에서 생선이나 해조류 등의 섭취 비율이 높게 나타나는 만큼 food chain 모델에는 수생 동·식물 식품군에 대한 평가가 필수적이다.

또한, COMIDA2는 미국 실정에 맞추어 농·축산물 생산 및 수확시기 섭취량 등의 변수가 적용되어 있다. 음식 섭취로 인한 피폭량은 국내고유특성, 주로 계절특성, 농·축산물 생산 특성 및 식품 소비 습관 등에 크게 영향을 받는다. 미국 외 다른 국가에서는 이러한 변수 및 조건들을 각 국가의 실정에 맞게 개선하여야 한다. COMIDA2는 주민이 거주하고 있는 지역에서 생산된 식품만 섭취한다는 가정 하에 피폭선량이 계산되고 있어, 이 부분 또한 개선의 필요성이 있을 것으로 보인다.

### 3.5 선량평가모델

MACCS2는 기본적으로 ICRP 26 체계를 기본으로 하고 있는데, 이는 일부 미국의 규제들이 여전히 ICRP 26 체계를 기본으로 하고 있다는 것에도 일부 영향이 받은 것으로 보인다. 최신의 선량평가체계인 ICRP 60 (ICRP 103)을 기본으로 한 선량평가모델로 개선되어야 한다.

MACCS2에서 선량계산 식을 단순화하면 주어진 격자 공간 내에서 방사성 핵종의 농도, 선량환산인자, 노출기간, 그리고 차폐계수(shielding factor 또는 protection factor)의 곱으로 나타난다. MACCS2에서 적용되는 차폐계수는 보호조치에 의한 피폭선량 감소 정도를 고려해 주기 위한 계수로, 피폭경로 별(방사성 구름, 흡입, 지표침적, 피부침적)로 세 가지 활동유형 그룹(실내대피, 소개, 일상생활)에 대해 사용자가 정의한 값이 적용된다. 이러한 차폐계수 또는 선량저감계수는 피폭선량평가 결과 값을 좌우할 수 있는 요소이며, 보건영향이나 경제적 영향과 같은 사고결말의 크기는 평가된 피폭선량 값을 이용해 평가되기 때문에, 주변 환경 및 상황을 고려하여 더욱 세분화하여 현실적으로 평가된 값이 적용되어야 한다.

또한, 수계오염으로 인한 피폭경로는 물섭취 이외에는

고려하고 있지 않다. 오염된 수생환경에 의한 외부피폭과 수생 동·식물 섭취에 의한 내부피폭에 대한 평가모델이 고려되어야 한다.

### 3.6 건강영향평가모델

최신의 연구결과(e.g. BEIR-VII)를 반영한 건강영향평가 모델 및 관련 계수의 개선이 필요하다. 또한, 암-영향 모델에 적용되는 계수들의 연령별, 성별 등에 따라 건강영향의 결과가 크게 달라질 수 있다. MACCS2의 경우 이러한 그룹별 차이에 대한 고려없이 건강영향을 평가한다. 각 그룹 별 위험도 계수를 적용하여 건강영향평가를 수행하도록 개선되어야 한다. 일본의 OSCAAR의 경우 나이와 성별 위험도 계수를 암사망 위험도 평가에 적용하고 있다.

방사선에 의한 건강영향은 크게 급성영향, 잠재적 암발생, 유전적 영향으로 분류된다. 하지만, MACCS2에서는 유전적 영향에 대한 평가가 포함되어 있지 않다. 이는 유전적 영향 평가를 위한 기반 자료들의 신뢰도 등의 문제로 인해 유전적 영향평가모델 구축에 어려움이 존재하기 때문이다. 유럽의 COSYMA의 건강영향평가모델에서는 유전적 영향에 대한 평가가 포함되어 있다.

### 3.7 경제영향평가모델

MACCS2의 경제영향평가모델에서는 비상대응 및 선량 완화조치와 직접적으로 관련된 제한된 범위의 경제적 비용에 대해서만 평가가 이루어진다. 비상단계에서 소개와 임시이주에 대한 비용, 중·장기단계에서 주민이주와 제염관련 비용을 산정하며 농지 및 도심지역 소유지에 대한 일시적 및 영구적 사용금지에 따른 비용, 오염된 농·축산 작물에 대한 처리 비용 등이 포함된다.

MACCS2의 경제영향평가모델은 WASH-1400을 기본으로 하고 있다. WASH-1400은 핵폭탄의 폭발 이후 발생한 오염에 대한 제염 및 정화작업에 대한 정보를 기본으로 하고 있어, 원전사고 결과로 발생하는 결과와는 차이가 있다. 따라서, 경제적 비용 산정이 과소평가 될 수 있다. 또한, 제염 및 정화에 소요되는 비용과 기간은 사고 후 1년까지로 매우 과소평가되고 있으며, 제염작업 결과 발생하는 많은 양의 방사성 폐기물에 대한 고려가 되지 않고 있다. 숲, 습지,

수계(지하수로부터 해양까지) 등과 같이 제염이 쉽지 않은 지역이나, 유출(runoff) 등으로 인한 재오염의 가능성에 따른 추가 비용도 고려되어야 한다[25].

또한, MACCS2에서는 피폭된 주민들의 건강영향과 관련한 직·간접적 비용 및 사고 후 발생할 수 있는 경제적 손실 등에 대한 간접적인 비용에 대한 고려가 되지 않고 있어, 이 또한 고려가 필요하다.

#### 4. 결론

후쿠시마 사고 이후, 한국형 3단계 PSA 전산코드 개발의 필요성이 계속하여 제기되어 왔다. 국외의 3단계 PSA 코드들은 1970~1990년대부터 개발되어 완성도를 높여오고 있는 만큼, 기존 국외 코드들에 대한 심도 있는 분석이 한국형 코드 개발에 앞서 필수적으로 수행되어야 한다.

본 논문에서는 국외의 3단계 PSA 전산코드들에 대한 간략한 분석과 미국의 MACCS2에 대한 단점 분석을 수행하였다. 국내·외 전문가들은 MACCS2에서 다수호기사고와 사용후핵연료 저장조로부터의 방출모사의 불가능, 가우시안 플룸모델을 기본으로 한 대기확산모델 등을 공통적으로 지적해왔다. MACCS2는 이러한 지적 사항들 중 일부를 반영하여 업데이트 버전을 통해 개선하여 왔으며, 이에 대한 내용도 본 논문에 기술하였다. Food chain 모델의 모사의 제한, 해양 및 수계 확산모델의 부재, 제한된 범위의 경제영향 평가 등 또한 개선되어야 할 사항이다. 기존 국외 PSA 전산코드들로부터의 교훈을 적절히 반영한다면, 국내 3단계 PSA 전산체계 개발과정에서의 시행착오를 줄임과 동시에, 완성도를 높일 수 있을 것이다. 기술보고의 결과는 국내 3단계 PSA 관련 기술 개발에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부, 원자력안전위원회)의 재원으로 한국연구재단과 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: NRF-2012M2A8A4025912, NRF-2015M2A2B2034282, KORSAF-1205014-0415-SB110).

#### REFERENCES

- [1] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, NUREG-75/014 (WASH-1400), U.S. NRC, Washington, DC (1975).
- [2] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants, NUREG-1150, U.S. NRC, Washington, DC (1990).
- [3] U.S. Nuclear Regulatory Commission, State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) Report, NUREG-1935, U.S. NRC, Washington, DC (2012).
- [4] European Commission, Probabilistic Accident Consequence Assessment Codes - Second International Comparison, EUR-15109, European Commission and OECD Nuclear Energy Agency, Luxembourg (1994).
- [5] D.I. Chanin and M.L. Young, Code Manual for MACCS2: Volume 1, User's Guide, NUREG/CR-6613, Vol.1, SAND97-0594, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (1998).
- [6] D.I. Chanin and M.L. Young, Code Manual for MACCS2: Volume 2, Preprocessor Codes COMIDA2, FGRDCF, IDCF2, NUREG/CR-6613, Vol.2, SAND97-0594, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (1998).
- [7] U.S. Department of Energy, MACCS2 Computer Code Application Guidance for Documented Safety Analysis, DOE-EH-4.2.1.4-MACCS2-Code Guidance, U.S. DOE, Washington, DC (2004).
- [8] U.S. Environmental Protection Agency, Manual of Protective Action Guides and Protective Actions for Nuclear Incidents, EPA 400-R-92-001, PB92-164763, U.S. EPA, Washington, DC (1992).
- [9] F.A. Gifford, "Atmospheric Dispersion Models for Environmental Pollution Applications", in: Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analysis, D.A. Haugen, ed., American Meteorological Society, Boston, MA (1975).
- [10] American Meteorological Society, "Workshop on Stability Classification Schemes and Sigma Curves

- Summary and Recommendations”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 58 (1977).
- [11] G.A. Briggs, “Plume Rise Predictions”, in: *Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analysis*, Workshop proceedings, American Meteorological Association, Boston, MA (1975).
- [12] F.T. Harper, S.C. Hora, M.L. Young, L.A. Miller, C.H. Lui, M.D. McKay, J.C. Helton, L.H.J. Goossens, R.M. Cooke, J. Pasler-Sauer, B. Kraan, and J.A. Jones, *Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Analysis: Dispersion and Deposition Uncertainty Assessment*, NUREG/CR-6244, EUR-15855EN, SAND94-1453, Vol.3, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (1994).
- [13] L.H.J. Goossens, J.A. Jones, J. Ehrhardt, B.C.P. Kraan, and R.M. Cooke, *Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Assessment: Countermeasures Uncertainty Assessment*, EUR-18821, European Commission, Luxembourg (2001).
- [14] J. Ehrhardt and J. A. Jones, “An outline of COSYMA, a New Program Package for Accident Consequence Assessments”, *Nuclear Technology*, 94(2), 196-203 (1991).
- [15] T. Homma, Y. Inoue, and K. Tomita, *OSCAAR Calculations for the Hanford Dose Reconstruction Scenario of BIOMASS Theme 2*, JAERI-Research 2000-049, Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki (2000).
- [16] T. Homma, K. Tomita, and S. Hato, “Uncertainty and Sensitivity Studies with the Probabilistic Accident Consequence Assessment Code OSCAAR”, *Nuclear Engineering and Technology*, 37(3), 245-258 (2005).
- [17] T. Homma, J. Ishikawa, K. Tomita, and K. Muramatsu, *Radiological Consequence Assessments of Degraded Core Accident Scenarios Derived from a Generic Level 2 PSA of a BWR*, JAERI-Research 2000-060, Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki (2000).
- [18] Korea Hydro and Nuclear Power, *Shin Kori 3&4 Probabilistic Safety Assessment (PSA) Report*. KHNP, Gyeongju (2011).
- [19] N.E. Bixler, M. Humberstone, and J. Barr, “MACCS Overview and Status”, Presented at the 6th International MACCS user group meeting, September 10-11 (2014).
- [20] J.T. Jeong, D.H. Yu, and S.H. Kim, *Research on Improvement of Nuclear Safety: Development of Computing Code System for Level 3 PSA*, KAERI/RR-1758/96, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon (1996).
- [21] K. McFadden, N.E. Bixler, and L. Eubank, *WinMACCS, a MACCS2 Interface for Calculating Health and Economic Consequences from Accidental Release of Radioactive Materials into the Atmosphere: User’s Guide and Reference Manual for WinMACCS Version 3\**, Draft NUREG/CR, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (2009).
- [22] S.R. Kim, B.I. Min, K.H. Park, B.M. Yang, and K.S. Suh, “Estimation of the Radiological Consequences of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident using MACCS2”, *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Gyeongju, Korea, October 29-30 (2015).
- [23] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Volume 1 : Report to the General Assembly, with Scientific Annex A. UNSCEAR 2013 Report*, UNSCEAR, 2013 United Nations sales publication E.14.IX.1. United Nations, New York (2014).
- [24] J. Ehrhardt, V. Shershakov, M. Zheleznyak, and A. Mikhalevich, *RODOS: Decision Support System for Off-Site Emergency Management in Europe*, EUR-16544EN, 1087-1096, European Commission, Luxembourg (1996).
- [25] M. Lampert, “Pilgrim Watch Comment Regarding SECY-12-110, Consideration of Economic Consequences within the NRC’s Regulatory Framework”, *United States of America Nuclear Regulatory Commission before the Commission*, September 6 (2012).