

플룸분할 및 멀티스레딩을 통한 소외사고영향 분석시간 최적화 연구

김승환* · 김성엽**†

A Study on the Optimization of Offsite Consequence Analysis by Plume Segmentation and Multi-Threading

Seunghwan Kim* · Sung-yeop Kim**†

†Corresponding Author

Sung-yeop Kim

Tel : +82-42-866-6248

E-mail : sungyeop@kaeri.re.kr

Received : November 29, 2022

Revised : December 21, 2022

Accepted : December 22, 2022

Abstract : A variety of input parameters are taken into consideration while performing a Level 3 PSA. Some parameters related to plume segments, spatial grids, and particle size distribution have flexible input formats. Fine modeling performed by splitting a number of segments or grids may enhance the accuracy of analysis but is time-consuming. Analysis speed is highly important because a considerably large number of calculations is required to handle Level 2 PSA scenarios for a single-unit or multi-unit Level 3 PSA. This study developed a sensitivity analysis supporting interface called MACCSsense to compare the results of the trials of plume segmentation with the results of the base case to determine its impact (in terms of time and accuracy) and to support the development of a modeling approach, which saves calculation time and improves accuracy. MACCSsense is an automation tool that uses a large amount of plume segmentation analysis results obtained from MUST Converter and Mr. Manager developed by KAERI to generate a sensitivity report that includes impact (time and accuracy) by comparing them with the base-case result. In this study, various plume segmentation approaches were investigated, and both the accuracy and speed of offsite consequence analysis were evaluated using MACCS as a consequence analysis tool. A simultaneous evaluation revealed that execution time can be reduced using multi-threading. In addition, this study can serve as a framework for the development of a modeling strategy for plume segmentation in order to perform accurate and fast offsite consequence analyses.

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : plume segmentation, multi-threading, offsite consequence analysis, level 3 PSA

1. 서론

3단계 확률론적안전성평가 (Level 3 Probabilistic Safety Analysis: Level 3 PSA)는 원자력발전소 사고로 인해 격납건물 외부로 유출된 방사성물질에 의한 주민의 방사선 피폭 및 환경피해를 평가하는 PSA의 최종단계이다. Level 2 PSA에서 도출된 사고 선원항 (accident source term) 정보로부터 방사성물질의 방출 및 환경에서의 거동으로 인한 방사선량, 보건영향, 경제영향 등 잠재적

유해 영향을 분석하는데, 이 과정을 소외사고영향분석 (offsite consequence analysis)이라고 한다^{1,2)}.

소외사고영향분석의 입력 요소는 다양한데, 그중 다중플룸, 공간격자, 입자크기분포와 같은 몇 가지의 입력력은 유연한 양식을 지원하여 분석자가 그 개수 및 값을 조정할 수 있다. 따라서 평가의 정확도 향상을 위하여 플룸분할이나 공간격자 설정을 최대한 상세히 하는 것이 가능하나 그에 따르는 분석시간 증가를 감수해야 한다³⁾.

*한국원자력연구원 리스크평가연구실 책임연구원 (Risk Assessment Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute)

**한국원자력연구원 리스크평가연구실 선임연구원 (Risk Assessment Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute)

그동안 소외사고영향분석에서 분석결과의 정확도 향상이 분석 소요시간을 고려한 고속 분석보다 훨씬 더 강조되어온 바 있다. 그러나 단일기 Level 2 PSA 선원항 범주 전체 시나리오에 대하여 포괄적으로 분석하거나, 다수기 복합 사고시나리오에 대하여 소외사고영향분석을 수행하기 위해 막대한 양의 시나리오를 모두 분석하는 대량 소외사고영향분석의 필요성이 대두되기 시작하였다.

예를 들어 단일기 소외사고영향분석은 기존에는 선원항 범주 (Source Term Category: STC)를 고려하여 대표 계산만을 수행하는 경향이 있었으나, 최근에는 이로 인한 불확실성 저감을 위하여 모든 Level 2 PSA 시나리오에 대하여 소외사고영향분석을 시도하는 사례가 늘고 있다⁴⁾.

또한 다수기 소외사고영향분석의 경우 고려하는 원전 수와 STC의 수가 증가할수록 사고 시나리오의 수는 기하급수적으로 증가한다. Table 1은 각 호기의 STC 종류가 같다고 가정했을 때 분석해야 할 시나리오 조합의 수를 나타내고, Table 2는 각 호기의 STC 종류가 같고 동일 위치 방출을 가정했을 때 조합의 수를 보이고 있는데, Table 2의 경우 Table 1에 비해 조합의 수가 확연히 줄어들고 있음에도 불구하고 STC와 사고원전의 수가 증가할수록 분석할 시나리오 수는 여전히 많은 수를 보이고 있다^{5,6)}.

이러한 상황에서 기존에도 분석해야 하는 시나리오의 수를 줄이는 등 소외사고영향분석을 최적화하기 위한 노력이 있었으나⁶⁾ 모델링적 접근법으로서 분석시간에 대한 모델 최적화 연구는 부족한 편이었다³⁾.

따라서 우선적으로 다양한 시나리오를 고려한 대량 분석을 통하여 분석시간 및 결과에 영향을 미치는 인

자를 파악하고 결과에 영향을 최소한으로 미치면서 분석시간을 최대한 줄일 수 있는 효율적인 모델링 방법의 개발이 필요하며 이를 위해 우선적으로 대량 계산을 위한 도구의 개발이 필수적이다.

한국원자력연구원 (Korea Atomic Energy Research Institute: KAERI)에서는 MAAP (Modular Accident Analysis Program) 코드 중대사고해석 결과로부터 다수기 및 단일기 선원항 정보 입력 파일을 자동으로 생성해주는 MUST (Multi-Unit Source Term) Converter를 개발하였으며⁷⁾, 생성된 대량의 입력 파일을 컴퓨터의 다중 프로세서 (multi-processing)를 이용하여 MACCS (MELCORE Accident Consequence Code System) 코드로 소외사고영향분석을 동시에 다중수행하고 관리하기 위한 Mr. (Multi-run) Manager를 개발하였다^{8,9)}.

Fig. 1은 MUST Converter와 Mr. Manager를 이용한 단일기/다수기 선원항 생성 및 PSA 대량 분석 자동화 전산 체계 관계도를 보이고 있으며, Fig. 2는 MUST Converter와 Mr. Manager가 구축된 시스템 및 다중 프로세서 CPU를 활용한 소외사고영향분석 대량 계산 예시를 보인다.

MUST Converter와 Mr. Manager 같은 PSA 자동화 도구의 개발로 인해 단일기/다수기의 Level 3 PSA를 수행

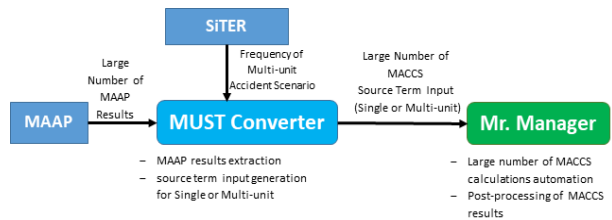


Fig. 1. Interface between MUST Converter and Mr. Manager.

Table 1. Number of combinations assuming same STCs for all units: $(N+1)^M - 1$

Number of STC (N)	Number of Units Undergoing Accident (M)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5	55	35	215	1,295	7,775	46,655	279,935	1,679,615
10	100	120	1,330	14,640	161,050	1,771,560	19,487,170	214,358,880
15	155	255	4,095	65,535	1,048,575	16,777,215	268,435,455	4,294,967,295
20	200	440	9,260	194,480	4,084,100	85,766,120	1,801,088,540	36,822,859,360

Table 2. Number of combinations assuming same STCs for all units that are collocated: $n+1H_k-1$

Number of STC (N)	Number of Units Undergoing Accident (M)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5	55	20	55	125	251	461	791	1,286
10	100	65	285	1,000	3,002	8,007	19,447	43,757
15	155	135	815	3,875	15,503	54,263	170,543	490,313
20	200	230	1,770	10,625	53,129	230,229	888,029	3,108,104

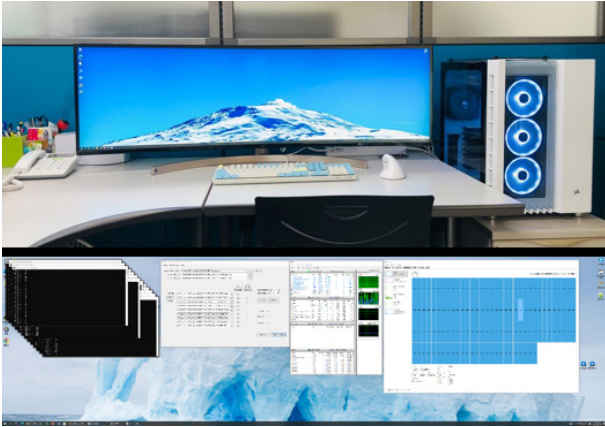


Fig. 2. Example of bulk calculation using Mr. Manager and 128 processors.

하기 위한 대량 계산은 가능하게 되었으나, 대량으로 생산된 소외사고영향분석 결과를 바탕으로 하는 민감도 분석을 위한 도구의 개발 역시 필요한 상황이었다. 분석 자동화로 생성되는 대량의 소외사고영향분석 결과를 읽어 평가 결과와 수행시간 정보를 비교하여 기존의 표준 결과(베이스케이스 분석 결과)와 일일이 비교해야 하는 작업이 필요하다.

이러한 문제를 해결하고자 본 연구에서는 Mr. Manager을 이용하여 수행된 대량의 소외사고영향분석 결과를 읽어 자동으로 베이스케이스의 결과와 비교하는 민감도 분석 인터페이스인 MACCSense를 개발하였다¹⁰⁾.

본 논문에서는 MUST Converter와 Mr. Manager의 Level 3 PSA 대량 분석 자동화 기술로 생산된 대량의 소외사고영향분석 결과를 MACCSense를 이용하여 민감도 분석을 수행하고, 이를 바탕으로 분석 정확도를 유지하면서도 분석시간을 줄이기 위한 최적화 모델 개발을 하기 위한 연구 내용을 기술하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 민감도 분석 지원 시스템 MACCSense의 구축에 관하여 기술하였으며, 3장에서는 다중수행 및 플룸분할을 통한 민감도 분석으로, 다중수행으로 인한 분석시간 절감 효과와 플룸분할로 인한 분석시간 절감 효과에 관해 기술하였다. 4장에서는 소외사고영향 분석시간 최적화 기술 개발을 위하여 다중수행과 플룸분할을 통한 분석 효율화 전략 수립에 관하여 기술하였고, 5장에서 결론을 맺었다.

2. 민감도 분석 지원 시스템 MACCSense 개발

MACCSense는 KAERI에서 개발한 MUST Converter와 Mr. Manager를 이용하여 생산하는 다량의 소외사고

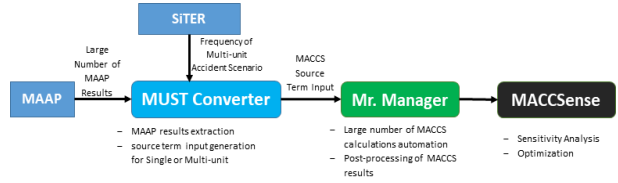


Fig. 3. Interface between MUST Converter, Mr. Manager, and MACCSense.

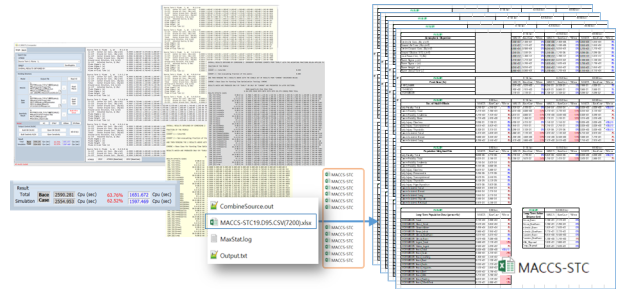


Fig. 4. MACCSense off-site consequence analysis sensitivity analysis supporting interface.

영향분석 결과와 베이스케이스의 분석 결과를 비교하여 플룸분할이 소외사고영향분석에 끼치는 영향(분석 소요 시간차, 보건영향평가 결과 편차 등)을 정리해주는 민감도 분석 지원 도구이다.

Fig. 3은 MACCSense 소외사고영향분석 민감도 평가 지원 인터페이스의 데이터 흐름을 보인다. MAAP 코드 중대사고해석 결과로부터 MUST Converter를 이용하여 대량의 MACCS 선원항 입력 파일을 생성하면 Mr. Manager가 MACCS 대량 분석 자동화를 통해 대량의 MACCS 분석 결과를 도출하고 MACCSense를 이용하여 민감도 분석을 수행한다.

Fig. 4는 MACCSense 소외사고영향분석 민감도 평가 지원 시스템의 실행 예를 보인다. MACCSense는 대량 MACCS 분석 결과 각각을 베이스케이스의 결과와 비교한 민감도 분석결과를 생성하고 중요 항목을 통합한 민감도 분석 최종결과를 도출한다. 이와 같이 대량으로 생성되는 소외영향분석 결과에 대한 민감도 분석은 MACCSense를 활용하여 용이하게 수행할 수 있다.

3. 다중수행 및 플룸분할을 통한 민감도 분석

Level 3 PSA는 Level 2 PSA로 도출된 사고 선원항으로부터 소외사고영향을 분석하여 Level 2 PSA의 빈도 결과와 연계하여 리스크를 평가하는 것으로, 사고 시 외부로 유출되는 선원항, 기상, 지리, 인구 정보 등 다양한 입력이 필요하다. 이 입력을 통하여 대기확산 및 침적, 피폭 경로별 선량평가, 비상대응 및 보건영향평

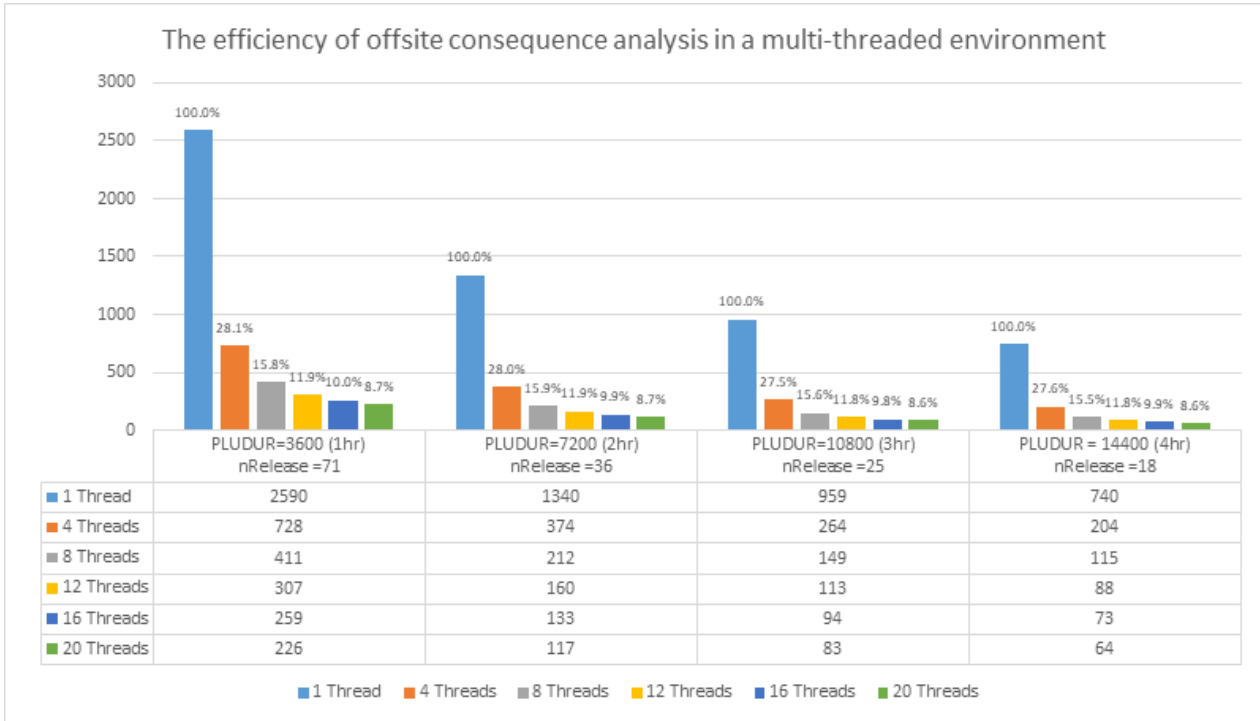


Fig. 5. The efficiency of offsite consequence analysis in a multi-threaded environment.

가 등을 수행하는 일련의 종합과정에는 상당한 시간이 소요된다. 예를 들어 현존하는 코드를 사용했을 때 가장 단순한 사고 시나리오인 단일기 단일지점방출의 경우에도 소외사고영향분석의 소요 시간은 수십 분에서 수 시간이 소요된다.

또한 단일기 단일지점방출보다 복잡한 다수기 단일지점방출 및 다수기 다중지점방출의 경우 분석 시나리오의 경우의 수가 급격히 증가하기에 현재의 컴퓨팅 파워로 처리가 불가능한 수준이다. MUST Converter와 Mr. Manager의 개발로 인해 동시에 다중으로 소외사고영향분석을 수행할 수 있게 되었고 이에 따라 컴퓨터 멀티코어의 수만큼 다중 분석이 가능하게 되었다^{7,8)}.

그러나 여전히 사고 분석 유형에 따라 기하급수적으로 늘어난 분석 시나리오를 모두 대응하기에 현재의 컴퓨팅 파워와 프로세서 수는 제한적이라 할 수 있다. 따라서 대량 시나리오에 대한 효과적인 소외영향분석을 수행하기 위해 본 연구에서는 멀티스레딩을 통한 동시 다중 분석의 효과를 먼저 파악하였고, 모델링 기법을 통하여 개별 계산의 시간을 절감하기 위한 연구도 수행하였다. 특히 분석시간 절감과 분석결과(인구가중 조기사망 및 암사망 리스크) 정확도 향상을 함께 추구하기 위한 플룸분할 모델링 기법을 적용하여 그 영향을 파악하였다¹⁰⁾.

3.1 다중수행 효과 분석

앞서 언급한 바와 같이 동시 다중수행을 통한 분석 시간 절약은 제한된 컴퓨터 자원에 한정되어 적용된다. 예를 들어 16코어 CPU를 가진 컴퓨터에서 40개의 시나리오에 대한 소외사고영향분석을 Mr. Manager를 이용하여 동시 다중수행(multi-threading)하면 16개의 시나리오에 대한 분석이 동시에 수행되고 나머지 24개의 시나리오는 분석은 대기상태로 있게 된다. 그리고 먼저 수행되고 있던 16개 동시 다중수행 중 분석이 완료되어 CPU 코어 자원이 반납되면 순차적으로 해당 코어를 지정받아 분석을 수행하게 된다.

그러므로 멀티스레딩을 통한 분석 효율은 해당 컴퓨터 멀티코어의 수에 비례하고 분석 효율화를 위해서는 더 많은 멀티코어를 가진 CPU를 장착한 컴퓨터를 사용하거나 복수의 컴퓨터를 이용하여 동시 다중 분석의 수를 늘려야 하는데 이는 현실적인 제한이 많다고 할 수 있다.

따라서 멀티프로세서를 이용한 다중분석의 이점을 유지하면서 플룸분할 등에 있어 최적 모델링을 통한 효율화를 복합적으로 적용하는 것이 이상적이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 우선적으로 다중수행을 통한 분석시간의 단축을 확인하기 위해 단일기 단일지점방출 시나리오에 대한 싱글코어 수행시간을 기준으로 멀티코어

다중수행 시간에 대한 효과를 관찰하였다. 즉, 다중수행 시 첫 번째 수행된 분석 시작 시점과 멀티스레딩을 통해 마지막 분석 종료 시점 간의 소요 시간을 투입된 분석 건수로 나눠 이를 분석 건당 소요시간으로 정의하였으며, 싱글코어 단독 수행 소요 시간과 비교하여 다중수행 소요 시간의 상대적 효율성을 계산하였다¹¹⁾.

이를 위해 멀티스레딩을 이용한 다중 평가는 4스레드, 8스레드, 12스레드, 16스레드, 20스레드로 각각 수행하였으며, 이를 싱글스레드(single thread)에서 수행한 기본 군의 수행 결과와 비교하였다.

Fig. 5는 멀티스레딩 환경에서의 소외사고영향분석 수행시간 절감 효과를 보이고 있다. Fig. 5의 4개 그래프는 사고 발생 후 3일간(72시간) 플룸이 1시간, 2시간, 3시간, 4시간 단위로 방출된다고 설정하여 분석한 것이고, 이를 각 싱글스레드의 수행 소요 시간과 비교한 결과이다.

분석 결과는 각 플룸 방출 군에서 멀티스레드 동시 수행의 평가시간이 싱글스레드 단독 수행에 비해 확연히 줄어들음을 보인다. 예를 들어 가장 왼쪽의 그래프인 플룸 방출주기 1시간(PLUDUR=3,600) 방출 군에서 싱글스레드로 수행 시 분석시간은 2,590초(100%)가 소요되었으나, 4스레드로 수행한 경우는 분석 건당 소요시간이 728초(28.1%), 8스레드는 411초(15.8%), 12스레드는 307초(11.9%), 16스레드는 259초(10.0%), 20스레드는 226초(8.7%)로 감소한다. 플룸 방출주기 2시간, 3시간, 4시간을 평가한 다중수행의 경우에서도 동일한 양상을 보인다.

이는 싱글스레드 단독 수행에 비해 멀티스레딩을 이용한 동시 평가 시 분석 건당 소요시간을 코어 수에 비례하여 효과적으로 단축할 수 있음을 의미한다.

3.2 플룸분할 효과 분석

방사선원항(Radiological source term)은 원자력시설의 사고로 인해 외부 환경으로 방출되는 방사성물질의 방출정보를 뜻하며, 방사성원소의 노심 재고량, 격납건물 외부로의 방출분율 및 방출빈도, 그리고 방출특성(방출시점, 방출기간, 방출높이, 입자크기분포, 방출에너지 등) 정보를 담고 있다. 소외사고영향분석은 방사선원항이 환경으로 누출되어 대기로 확산될 때 방사성물질의 방출을 여러 개의 플룸으로 분할하여 모사하는데, 이때 개개의 플룸의 시간 간격을 기상자료의 시간 간격과 일치시켜 기상 변화를 충실히 반영하여 방출과 확산을 연계한다^{2,12)}.

일반적으로 소외사고영향분석에서 기상자료는 매 1시간 단위로 구성되며 플룸 방출간격을 1시간으로 설정

하여 분석하고 있다. 따라서 원자력시설 사고 후 3일간(72시간) 방출시점부터 매 1시간 간격으로 방출이 있음을 가정하여 분석하고 이 결과를 최적분석(best-estimate) 결과로 고려한다.

플룸분할은 플룸의 방출주기에 변화를 주어 소외사고영향분석을 수행하는 것을 의미한다. 본 연구에서는 플룸분할을 통한 방출에 변화를 주었을 때의 분석 소요시간의 변화를 관찰함으로써 플룸분할이 소외사고영향분석에 미치는 영향을 조사하였다. 이때 다양한 시나리오별 분석의 유의성(분석시간의 절감과 결과의 일치성)을 확인하기 위해서 플룸을 1시간(3,600초) 단위의 방출로 설정하여 소외사고영향분석을 수행한 결과를 베이스케이스(base-case)로 지정하여 다양한 플룸분할 실험 사례들의 소외사고영향분석 결과와 비교하였다.

Table 3은 플룸분할을 통한 영향분석 결과를 보이는 데, 가장 대표적인 보건영향 척도인 인구가중 조기사망 리스크 (population-weighted early fatality risk)와 인구가중 암사망 리스크 (population-weighted cancer fatality risk)에서 베이스케이스와 실험 사례의 결과는 최대 15%의 편차를 보이고 있다.

Table 3에서 보면 베이스케이스는 1시간(PLUDUR=3,600) 플룸 방출주기로 71회의 플룸을 방출한다. 실험 사례들은 방출주기를 2시간(PLUDUR=7,200)으로 설정한 경우 36회의 플룸을 방출하고 이 경우 조기사망과 암사망에서 15.3%와 6.3%의 편차를 보이며, 방출주기를 3시간(PLUDUR=10,800)으로 설정했을 경우 플룸 방출횟수가 25회로 조기사망과 암사망이 6.1%와 6.7%의 편차를 보이고, 플룸 방출주기를 4시간(PLUDUR=14,400)으로 설정한 경우 플룸방출횟수는 19회로 줄어들고 조기사망과 암사망은 각각 14.3%와 10.6%의 편차를 보임을 알 수 있다.

Table 3에서 베이스케이스와 가장 오차가 적은 실험 사례는 플룸 방출주기를 3시간(PLUDUR=10,800)으로

Table 3. Impact of plume segmentation

Plume Segmentation (second)	No of Plume Release	Early Fatality (0 Km-80 Km)			Cancer Fatality (0 Km-80 Km)		
		Base Case	Test Case	Error Rate	Base Case	Test Case	Error Rate
PLUDUR =3,600	71	100%	100.0%	0.0%	100%	100.0%	0.0%
PLUDUR =7,200	36	100%	115.3%	15.3%	100%	93.8%	6.3%
PLUDUR =10,800	25	100%	106.1%	6.1%	100%	93.3%	6.7%
PLUDUR =14,400	19	100%	114.3%	14.3%	100%	89.4%	10.6%

설정하여 25회의 플룸 방출횟수를 가진 사례이다. 만약 이 오차를 수용 가능하다고 가정할 경우, Fig. 3의 멀티스레딩 환경에서의 수행시간 절감 효과와 비교해 보면, 베이스케이스의 소요 시간(2,590초, 싱글스레드)보다 멀티스레드(20코어) 다중수행 분석 시 83초로 약 31배 빨라진 획기적인 시간 단축을 꾀할 수 있음을 확인할 수 있다. 한 가지 언급해야 할 점은 일반적으로 방출주기가 1시간에 가까울수록 정확도는 더 높을 것으로 예상되나 본 케이스의 경우 조기사망과 관련된 결과에 대해서는 방출주기가 3시간인 경우가 2시간인 경우보다 정확도가 높았다는 점이다. 이는 일정 선량 이하에서는 그 영향이 나타나지 않는 문턱선량 (threshold dose)을 포함하는 조기사망의 계산은 기상자료 및 공간격자와 함께 결과에 복합적으로 작용할 수 있음을 의미하며 분석 전략 설정에 주의를 요함을 의미한다.

4. 다중수행과 플룸분할을 통한 분석 효율화 전략 수립

앞 절에 언급한 바와 같이 멀티스레딩을 통한 다중수행과 플룸분할을 통하여 단독수행 베이스케이스에 비하여 수용 가능한 결과 오차 안에서 분석소요 시간의 최대 단축이 가능해지게 되었다.

멀티스레딩 다중수행을 통한 분석 건당 계산시간 단축은 컴퓨터 자원이 허용하는 선에서 최대한 추구할 수 있으나 제한된 자원으로 무한 확장은 쉽지 않을 것이다. 플룸분할의 경우 베이스케이스의 분석 결과와 허용가능한 최소한의 결과 오차를 갖기 위해서는 전략적인 플룸분할 방법이 마련되어야 한다.

이를 위해 본 연구에서는 베이스케이스의 72시간 플룸 방출에 대하여 초기/중기/후기로 분할하여 각각 해당 구간에서만 플룸이 1시간 간격으로 방출된다고 설정하여 민감도 분석을 수행하였다. Fig. 6의 그래프는 초기/중기/후기로 구분된 플룸분할 소외사고영향분석 개념을 보이고 있다. Fig. 6에서 곡선은 원자력시설 사고 후 선원항의 핵종 그룹별 누적 방출률을 나타내며, 세로의 실선과 점선은 1시간 단위의 플룸분할을 표현

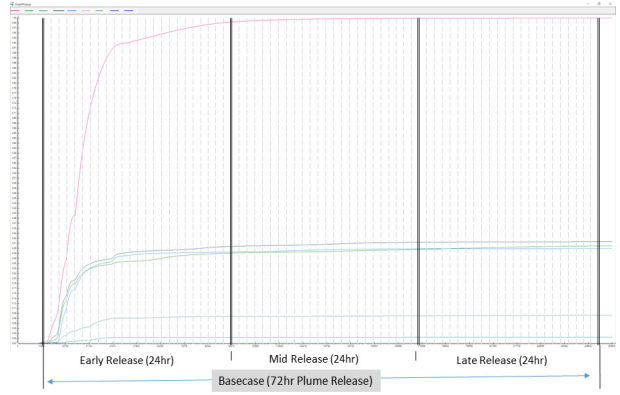


Fig. 6. The concept of plume segmentation (Early/Middle/Late).

하고 있다.

본 연구에서는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 1) 사고 후 초기 24시간에 대해서만 1시간 간격 플룸분할을 하고 중기 24시간과 후기 24시간은 각각 하나의 플룸만 설정한 경우, 2) 사고 후 초기 24시간과 후기 24시간은 각각 하나의 플룸만 설정하고, 중기 24시간에 대해서만 1시간 간격 플룸분할을 한 경우, 3) 사고 후 초기 24시간과 중기 24시간은 각각 하나의 플룸만 설정하고, 후기 24시간에 대해서만 1시간 간격 플룸분할을 한 경우 각각에 대해 소외사고영향분석을 수행하여 초기/중기/후기 72시간 모두에 대해 1시간 간격 플룸분할을 한 베이스케이스와 비교하였으며 그 결과는 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 보는 바와 같이 모든 경우의 플룸분할에서 평가 소요 시간이 평균 37% 정도로 단축되었으며, 조기/암사망 평가 결과는 초기 24시간의 급격한 방출에 대해서 1시간 간격 플룸분할을 한 경우 베이스케이스와 오차가 조기사망 0.2%와 암사망 1.6%로 비교적 작은 오차를 보이고 있음을 확인하였다.

이와 같이 초기 24시간의 급격한 방출에 대해 1시간 간격의 플룸분할을 고려했을 때, 조기/암사망 평가의 결과는 베이스케이스와 비교하여 소요 시간은 약 1/3로 단축되었으며, 평가결과도 베이스케이스에 근소한 차이를 보이고 있다. Fig. 6의 그래프에서 확인할 수 있듯이 누적 방출분율이 급격히 상승하는 초기 24시간

Table 4. Impact of plume segmentation (Early/Middle/Late)

Plume Segmentation	No of Plume Release	Time Estimated		Early Fatality (0 Km-80 Km)			Cancer Fatality (0 Km-80 Km)		
		Time (sec)	%	Base Case	Test Case	Error Rate	Base Case	Test Case	Error Rate
Base-case	71	2,590	100%	100%	100.0%	0.0%	100%	100.0%	0.0%
Early 24hr Plume Segmentation	25	950	36.7%	100%	99.8%	0.2%	100%	98.4%	1.6%
Mid 24hr Plume Segmentation	26	977	37.7%	100%	128.7%	28.7%	100%	75.3%	24.7%
Late 24hr Plume Segmentation	26	970	37.5%	100%	128.7%	28.7%	100%	74.7%	25.3%

플룸 방출이 조기/암사망 결과에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 판단되며, 비교적 그래프의 기울기가 안정화되는 중기와 후기의 플룸 방출은 조기/암사망 평가 결과에 큰 영향을 미치지 않고 있는 것으로 판단된다.

따라서 핵종 그룹별 방출정보를 통하여 급격한 방출 구간은 더 세밀하게 플룸 방출을 반영한 플룸분할을 시행하고 완만한 방출 구간의 경우 플룸분할 간격을 넓게 하여 분석 소요 시간의 단축을 꾀할 수 있을 것으로 판단된다.

좀 더 자세한 결과의 해석을 논하자면 Table 4의 결과에서 초기 24시간의 급격한 방출에 대해 1시간 간격으로 플룸분할을 한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 조기사망의 결과는 증가하고 암사망의 결과는 감소하는 경향이 나타남을 확인할 수 있다. 이는 Table 3의 결과 해석과 마찬가지로 조기사망의 경우 문턱선량이 존재하며 암사망의 경우 문턱 없는 선형비례(Linear No-Threshold: LNT) 가정을 따르기에 기인한 결과라 해석할 수 있다. 초기 급격한 방출에 대해 플룸을 1개만 설정한 경우 그 플룸에 대해 한 방향의 풍향만 고려되고 그 풍하방향(downwind)의 인구가 고선량에 노출되게 된다. 따라서 문턱선량 이상으로 피폭되는 인구가 증가하고 조기사망의 발생 양상은 선량에 따라 급격히 증가하는 시그모이드 함수(sigmoid function)를 따르기에 조기사망이 증가하는 결과를 도출할 것이다. 반면 암사망의 경우 LNT 가정을 따르고 있기에 오히려 플룸분할을 많이 하여 다양한 풍향이 고려되고 다양한 방향의 더 넓은 지역의 다수의 인구가 피폭됨으로써 암사망이 증가되는 경향을 보임을 추정할 수 있다. 단, 이러한 해석은 본 연구에서 도출된 Table 4의 결과 해석으로는 유효하나 상이한 방출 농도와 기타 다양한 요소가 결합된 시나리오에서는 유효하지 않을 수 있음을 명시한다.

위와 같은 복합적 해석이 가능하지만 의외로 그 결론은 단순할 수 있다. 초기의 급격한 방출, 또는 그 어떠한 시점에서의 급격한 방출에 대하여 기상자료의 해상도에 맞게 플룸분할을 충실히 하지 않으면 결과의 정확도를 훼손하고 과소평가하거나 과대평가할 수 있는 가능성이 있다는 것이다. 따라서 Table 4의 결과는 방출이 급격히 일어나는 구간에 대하여 플룸분할을 충실히 해야 함을 보여준다는 결론을 다시 한번 얻을 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 대량 소외사고영향분석의 필요성이

대두되는 최근의 상황에서 분석시간을 최적화하여 효과적인 대량 분석이 가능하도록 하기 위한 연구를 수행하였다.

단일기와 다수기에 대해 자동으로 선원항 입력을 생성하는 MUST Converter와 대량의 소외사고영향분석을 멀티스레딩으로 처리하는 Mr. Manager에 대해 소개하였으며, 이를 통해 생성된 대량의 결과를 신속하게 분석하기 위해 개발한 MACCSense에 대하여 기술하였다.

이들의 개발로 인해 다양한 플룸분할 케이스를 반영한 소외사고영향분석 민감도 분석을 수행할 수 있게 되었고, 이를 바탕으로 분석 정확도를 유지하며 분석시간을 획기적으로 줄이는 분석방법론의 개발을 추구할 수 있게 되었다.

MACCSense를 이용하여 다중수행 효과를 분석하여 멀티스레딩을 이용한 동시 평가 시 분석 건당 소요시간을 멀티코어 수의 증가에 비례하게 효과적으로 단축할 수 있음을 확인하였다.

그러나 유형에 따라 기하급수적으로 늘어나는 분석 시나리오를 전산 자원의 확보를 통한 멀티스레딩 다중수행만으로 모두 대응하기에는 한계가 있음을 감안하여, 분석시간 절약과 분석 결과(조기사망 및 암사망 비율) 정확도 향상을 함께 추구하기 위한 플룸분할 모델링 기법을 적용하여 그 영향을 파악하였다.

플룸분할 모델링 기법을 적용한 효과를 파악한 결과 베이스케이스의 수행시간에 비해 플룸분할 시 수행시간은 계산에 사용되는 플룸 방출 횟수에 비례하여 단축됨을 확인하였고, 따라서 플룸 방출 군을 효과적으로 분할했을 경우, 건강영향평가(조기사망/암사망) 결과에 큰 편차가 발생하지 않으면서 분석시간을 단축시킬 수 있음을 확인하였다.

본 연구의 지향점은 대량분석 시 소외사고영향분석 결과의 훼손없이 분석시간을 단축하는데 있으므로, 최적 플룸분할 및 멀티스레딩을 통한 분석시간의 단축의 효과를 관찰하였다. 그리고 이 각각의 요소의 개별적 효과보다 두가지가 효과적으로 결합될 경우 소외사고영향 분석시간 단축에 큰 시너지를 낼 수 있을 것으로 판단한다.

따라서 본연구에서 추구하고 있는 대량 소외사고영향분석 시간의 최적화 기술 개발에 있어 멀티스레딩을 이용한 다중수행과 플룸분할 모델링 기법의 적용이 효과적으로 결합하는 최적점을 찾기 위한 후속 연구가 필요하며, 이를 통해 결과 오차를 유지하면서 분석시간을 최소화하여 신속 분석을 지향하는데 큰 효과를 낼 것으로 기대한다.

다만 본 연구에서는 플룸분할과 멀티스레딩의 효과를 통한 신속한 대량분석 가능성을 판단하기 위하여 건강영향평가 결과도출반경을 80 km (50 miles)로 일반화하였으나, 향후 연구에서는 조기사망과 암사망 각각에 대하여 세분화된 결과도출반경을 적용할 예정이다.

또한 본 연구는 단일기 단일지점 방출의 소수 시나리오 대해서만을 고려한 효과 검증으로서, 다중수행 및 플룸분할 모델링 기법을 통한 대량 소외사고영향 분석시간 최적화 기술을 개발하기 위해서는 다른 여러 시나리오를 적용하여 확인이 필요하며, 나아가 다수기 단일/다중지점 방출에 대하여 시나리오를 확장하여 추가적인 검증이 필요할 것으로 생각된다.

Acknowledgement: This work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIT: Ministry of Science, ICT) (No. RS-2022-00144405).

References

- 1) N. Rasmussen, "Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants", WASH-1400 (NUREG-75/014), U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1975.
- 2) S. J. Lee et al., "Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plants", Korea eBook Publishing Company, pp. 89-143, 2021.
- 3) S. Y. Kim et al., "Interfacing between MAAP and MACCS to perform radiological consequence analysis Development of MUST (Multi-Unit Source Term) Converter", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 54, Issue 4, pp. 1516-1525, 2022.
- 4) K. H. Jin, J. H. Cho and S. Y. Kim, "Machine Learning-based Categorization of Source Terms for Risk Assessment of Nuclear Power Plants", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 54, Issue 9, pp. 3336-3346, 2022.
- 5) S. Y. Kim et al., "Multi-unit Level 3 Probabilistic Safety Assessment: Approaches and Their Application to a Six-unit Nuclear Power Plant Site", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 50, Issue 8, pp. 1246-1254, 2018.
- 6) N. E. Bixler and S. Y. Kim, "Performing a Multi-unit Level-3 PSA with MACCS", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 53, Issue 2, pp. 386-392, 2021.
- 7) S. Y. Kim and D. S. Kim, "Development of MUST (Multi-Unit Source Term) Converter Version 1.0", Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, October 21-22, 2021, Changwon, Korea.
- 8) S. Y. Kim, "Development of Mr (Multi-run) Manager Version 1.0", Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, October 21-22, 2021, Changwon, Korea.
- 9) S. Y. Kim, "Current Development Status of MACCS-related pre-and post-processors at KAERI", 2022 Asian MACCS User group meeting, November 9-11, Singapore.
- 10) S. H. Kim and S. Y. Kim, "Development of Interfacing Software to Support MACCS Sensitivity Analyses", 2022 Asian MACCS User Group Meeting, November 9-11, Singapore.
- 11) S. H. Kim and S. Y. Kim, "Influence of Plume Segmentation on the Results and Speed of Offsite Consequence Analysis", Asian Symposium on Risk Assessment and Management 2022, November 30-December 2, Daejeon, Korea.
- 12) ASME and ANS, "Standard for Radiological Accident Offsite Consequence Analysis (Level 3 PRA) to Support Nuclear Installation Applications", ASME/ANS RA-S-1.3-2017, American Nuclear Society, 2017.