

입자크기분포 설정 및 멀티스레딩을 통한 소외사고영향분석 최적화 타당성 평가

김승환¹ · 김성엽^{2†}

Feasibility Study on the Optimization of Offsite Consequence Analysis by Particle Size Distribution Setting and Multi-Threading

Seunghwan Kim¹ · Sung-yeop Kim^{2†}

[†]Corresponding Author

Sung-yeop Kim

Tel : +82-42-866-6248

E-mail : sungyeop@kaeri.re.kr

Received : December 4, 2023

Revised : January 15, 2024

Accepted : February 8, 2024

Abstract : The demand for mass calculation of offsite consequence analysis to conduct exhaustive single-unit or multi-unit Level 3 PSA is increasing. In order to perform efficient offsite consequence analyses, the Korea Atomic Energy Research Institute is conducting model optimization studies to minimize the analysis time while maintaining the accuracy of the results. A previous study developed a model optimization method using efficient plume segmentation and verified its effectiveness. In this study, we investigated the possibility of optimizing the model through particle size distribution setting by checking the reduction in analysis time and deviation of the results. Our findings indicate that particle size distribution setting affects the results, but its effect on analysis time is insignificant. Therefore, it is advantageous to set the particle size distribution as fine as possible. Furthermore, we evaluated the effect of multithreading and confirmed its efficiency. Future optimization studies should be conducted on various input factors of offsite consequence analysis, such as spatial grid settings.

Key Words : particle size distribution, multi-threading, offsite consequence analysis, Level 3 PSA

Copyright©2024 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

소외사고영향분석은 원자력 시설의 사고로 인해 적 납건물 외부로 유출된 방사성물질에 의한 주민의 방사선 피폭 및 환경영향을 평가하는 “3단계 확률론적안전성평가”의 분석 과정이다^{1,2)}. 원전의 사고 선원향 정보를 기반으로 방사성물질의 방출 및 환경에서의 거동으로 인한 방사선량, 보건영향, 경제영향 등 잠재적 유해영향을 분석한다. 따라서 소외사고영향분석은 원전 사고로 인한 대중의 리스크를 평가하고, 원전의 안전성을 검증하며, 주민의 비상대응 전략을 수립하는 데 사용되기에 방사성물질의 유출로 인한 주민과 환경에 대한 잠재적 영향을 이해하고 관리하는 데 중요한 도구이다.

소외사고영향분석의 정확도 및 분석 속도는 다중플룸, 입자크기분포, 공간격자 등 다양한 입력에 의해 영향을 받으며, 분석의 정확도를 높이기 위해 다양한 입력 요소를 상세히 설정할 수 있지만, 분석 시간의 증가를 감수해야 한다. 그동안 고속 분석보다 결과의 정확성 향상이 더 강조되었지만, 단일기 및 다수기 리스크 분석에 있어 고려해야 하는 시나리오의 수가 굉장히 많기 때문에 고속 분석의 필요성이 증가하고 있다^{3,4)}. 따라서, 다양한 시나리오를 고려한 분석을 통해 분석 시간과 결과에 영향을 미치는 요소를 파악하고, 결과의 차이를 최소화하면서 분석시간을 최대한 줄일 수 있는 효율적인 모델링 방법, 즉 분석의 정확도와 속도를 동시에 향상시키는 방법의 개발이 필요하게 되었다.

¹한국원자력연구원 리스크평가연구부 책임연구원 (Risk Assessment Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute)

²한국원자력연구원 리스크평가연구부 선임연구원 (Risk Assessment Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute)

한국원자력연구원은 효율적인 소외사고영향분석을 수행하기 위해, 분석 모델의 최적화 연구를 수행중에 있는데, 그 일환으로 분석 결과의 정확도를 유지하면서 분석 시간을 최대 55%까지 단축할 수 있는 누적방출분율 기울기 기반 플룸분할 최적화 방법론을 개발하였다^{5,6)}. 그리고 사용자가 입력의 값뿐 아니라 입력의 범위와 개수까지 유연하게 설정할 수 있기에 분석 속도와 결과 모두에 영향을 미칠 수 있는 입자크기분포 및 공간격자 등의 인자들이 미치는 영향을 평가하는 연구를 지속적으로 수행하고 있다⁷⁾.

본 연구에서는 소외사고영향분석의 주요 입력 요소 중 하나인 입자크기분포의 변화가 보건영향평가(조기사망 및 암사망) 결과의 정확도와 분석에 소요되는 수행시간의 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 컴퓨터의 멀티프로세서를 이용한 멀티스레딩(다중수행) 기법을 통한 분석의 효율화 정도를 관찰하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 입자크기분포의 설정에 대한 연구 내용을 기술하였고, 3장은 입자크기분포 그룹을 변경하여 소외사고영향분석을 수행한 결과를 기술하였다. 4장은 컴퓨팅 자원의 활용을 통한 멀티스레딩 기법을 이용한 다중수행 분석의 평가 결과를 기술하였으며, 5장에서 결론을 맺었다.

2. 입자크기분포 설정

원전 사고 발생 시에 대기로 방출되는 방사성물질은 입자크기분포에 따라 건식침적에 영향을 받는다. 건식침적은 소외사고영향분석을 수행할 때 고려하는 피폭경로 중 지표면에 침적된 방사성물질로부터의 피폭(ground-shine)을 평가할 때 중요한 요소로 작용한다. 방사성물질의 건식침적은 건식침적속도로 정량적으로 표현되며 건식침적속도는 입자의 크기에 영향을 받는다. 일반적으로 입자의 크기는 각 방사성 핵종 그룹에 대한 입자크기분포로 정의되는데, 입자크기그룹 (particle size bin)에 따라 서로 다른 건식침적속도가 할당된다. 입자크기그룹을 정의하는 방식에 따라 입자크기그룹의 수가 결정되며 분석의 정확성과 속도에 영향을 미칠 수 있다.

대표적인 소외사고영향분석 코드로는 미국의 U.S. Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC)의 관리 하에 Sandia National Laboratories (SNL)에서 개발된 MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS)이 있다. 그리고 소외사고영향분석에 선원항 정보를 제공하는 중대사고해석 코드는 MACCS와 동일한 기관에서 개발된 MELCOR와 미국 Electric Power Research Institute

(EPRI)의 관리하에 Fauske가 개발한 Modular Accident Analysis Program (MAAP)이 있다. MELCOR와 MACCS는 같은 기관에서 개발된만큼 호환이 용이하나 MAAP 코드의 경우 선원항 정보를 MACCS로 연계하기 위해서는 일련의 변환작업이 필요하다⁸⁾.

중대사고해석 코드인 MAAP 코드의 분석기간 동안의 핵종그룹별 및 입자크기별 누적 환경 방출량은 다음과 같이 계산된다⁸⁾.

$$RDPSDIST_{MB, MG} = \int \left(\sum_{SB, IV, IG, IS, JJ, II, IE, t} \left(\frac{FMXRB_{SG, IV, t} \times WFPJ_{IG, IS, JJ, t} \times MFPIN_{II} \times FAFPO_{IE} \times MTFPO_{IG}}{NFPIN_{II} \times MFPO_{IG}} \right) \right) dt$$

- t : Calculation Time [s]
- MB : Number of Particle Size Bin in MACCS (1~12)
- MG : Fission Product Group Number in MACCS (1~10)
- RDPSDIST : Fraction of Aerosol in Each Particle Size Array in Group MG
- SB : Number of Particle Size Bin in MAAP5 (1~30)
- IV : Donor Compartment Index of Release Junction
- IG : Fission Product Group Number in MAAP5 (1~18)
- IS : Species Type (1 = Vapor, 2 = Aerosol)
- JJ : Release Junction Number
- II : Number of Element (1~25)
- IE : Number of Element for Mole Fraction (1~31)
- FMXRB : Fraction of Aerosol in Each Particle Size Array in Compartment IV
- WFPJ : Fission Product Flows through Junction JJ [kg/s]
- MPFIN : Initial Mass of Element II [kg]
- FAFPO : Element Mole Fraction in Fission Product Group
- MTFPO : Initial Number of Fission Product Atoms in Group IG
- NFPIN : Initial Number of Fission Product Atoms by Element II
- MFPO : Initial Mass of Group IG [kg]

MAAP 코드의 입자크기그룹(bin)은 30개로 구성되며 MELCOR 및 MACCS의 입자크기 그룹은 최대 20개 안에서 사용자가 유연하게 지정할 수 있다. 본 연구에서는 MAAP의 30개의 입자크기그룹을 MELCOR의 12개 그룹으로 할당하였다. 이를 적용하였을 때의 MELCOR의 입자크기그룹의 입자 직경 범위 최대값과 최소값은 Table 1과 같으며, 특정 핵종그룹에 대한 입자크기의 분포는 상기 식⁸⁾과 같이 계산된 입자크기별 누적 환경 방출량의 상대적인 비를 통해 계산된다.

Table 1. MELCOR particle size bins

Bin No.	MELCOR Particle Size Bin		MAAP5 Bin
	Diameter range [μm]		
	Min	Max	
1	6.53E-02	1.21E-01	Bin 1~3
2	1.21E-01	2.23E-01	Bin 4~5
3	2.23E-01	4.12E-01	Bin 6~7
4	4.12E-01	7.61E-01	Bin 8~9
5	7.61E-01	1.41E+00	Bin 10~11
6	1.41E+00	2.60E+00	Bin 12~13
7	2.60E+00	4.80E+00	Bin 14~15
8	4.80E+00	8.88E+00	Bin 16~17
9	8.88E+00	1.64E+01	Bin 18~19
10	1.64E+01	3.30E+01	Bin 20~21
11	3.30E+01	5.60E+01	Bin 22~23
12	5.60E+01	1.04E+02	Bin 24~30

본 연구에서는 입자크기분포 변경의 영향을 관찰하기 위해 입자크기그룹의 개수를 1개에서 3개까지 변경하여 소외사고영향분석을 수행한 후 그 결과를 6개의 입자크기그룹을 가진 베이스케이스와 비교하여 결과의 정확도와 속도의 영향을 관찰하였다.

Table 2. Diameter range of each particle size bin

Bin No	6 Bins (Base case)		3 Bins		2 Bins		1 Bin	
	Min (μm)	Max (μm)	Bin No	Min (μm)	Max (μm)	Bin No	Min (μm)	Max (μm)
1	6.53E-02	1.21E-01	1	6.53E-02	2.23E-01	1	6.53E-02	4.12E-01
2	1.21E-01	2.23E-01						
3	2.23E-01	4.12E-01						
4	4.12E-01	7.61E-01	2	2.23E-01	7.61E-01	2	4.12E-01	2.60E+00
5	7.61E-01	1.41E+00						
6	1.41E+00	2.60E+00	3	7.61E-01	2.60E+00	1	6.53E-02	2.60E+00

Table 3. A sample of radionuclide release fraction and dry deposition velocity by particle size distribution

	Number of Particle Size Bin											
	6 Bins						3 Bins			2 Bins		1 Bin
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	1	2	1
Dry deposition velocity (VDEPOS)	8.10E-04	9.01E-04	1.35E-03	2.46E-03	4.94E-03	9.87E-03	8.84E-04	2.18E-03	7.94E-03	1.22E-03	6.73E-03	6.21E-03
RDPSDIST001	1.67E-01	1.67E-01	1.67E-01	1.67E-01	1.67E-01	1.67E-01	3.33E-01	3.33E-01	3.33E-01	5.00E-01	5.00E-01	1.00E+00
RDPSDIST002	5.50E-03	2.39E-02	7.05E-02	1.94E-01	2.60E-01	4.46E-01	2.94E-02	2.64E-01	7.07E-01	9.99E-02	9.00E-01	1.00E+00
RDPSDIST003	4.30E-03	1.93E-02	6.40E-02	2.02E-01	2.78E-01	4.32E-01	2.36E-02	2.66E-01	7.10E-01	8.76E-02	9.12E-01	1.00E+00
RDPSDIST004	5.30E-03	2.30E-02	6.87E-02	1.92E-01	2.60E-01	4.52E-01	2.83E-02	2.60E-01	7.11E-01	9.70E-02	9.03E-01	1.00E+00
RDPSDIST005	5.30E-03	2.30E-02	6.98E-02	2.09E-01	2.96E-01	3.97E-01	2.83E-02	2.79E-01	6.93E-01	9.81E-02	9.02E-01	1.00E+00
RDPSDIST006	4.70E-03	2.06E-02	6.64E-02	2.04E-01	2.80E-01	4.24E-01	2.53E-02	2.71E-01	7.04E-01	9.17E-02	9.08E-01	1.00E+00
RDPSDIST007	4.10E-03	1.82E-02	6.06E-02	1.91E-01	2.71E-01	4.55E-01	2.23E-02	2.52E-01	7.26E-01	8.29E-02	9.17E-01	1.00E+00
RDPSDIST008	5.00E-03	2.22E-02	6.99E-02	2.07E-01	2.77E-01	4.19E-01	2.72E-02	2.77E-01	6.96E-01	9.71E-02	9.03E-01	1.00E+00
RDPSDIST009	4.80E-03	2.13E-02	6.85E-02	2.09E-01	2.81E-01	4.15E-01	2.61E-02	2.78E-01	6.96E-01	9.46E-02	9.05E-01	1.00E+00

Table 2는 입자크기분포를 1개에서 6개까지 나눌 때의 최소 및 최대 입자 직경을 보인다. MAAP 코드의 30개의 입자크기그룹을 12개의 MELCOR 및 MACCS 코드의 그룹으로 연계하였으나, 대상 원전 방출특성을 고려했을 때 거의 발생하지 않는 Bin No. 7부터 12까지는 제외하고 입자크기분포를 6개의 그룹으로 구성하여 베이스케이스로 설정하였다.

Table 3은 OPR1000의 선원방향출군(source term category: STC)에서 베이스케이스(6 bin) 대비 3개, 2개, 1개 그룹으로 입자크기분포를 변경했을 때의 핵종그룹별 입자크기분포 및 건식침적속도를 보인다. 입자크기분포 설정을 통한 영향평가는 OPR1000 노형의 선원방향출군 전체를 분석 대상으로 입자크기분포 변경 영향분석을 수행하고 이를 베이스케이스와 비교하였다.

Fig. 1은 OPR1000의 선원방향출군 사전수목도이다⁹⁾. 선원방향출군의 분기는 사고 진행 양상에 있어 주요한 8개의 변수로 구성되어 있다. 본 연구에서는 21개 전체 선원방향출군에서 17개의 선원방향출군에 대하여 입자크기분포를 조정하여 영향평가를 진행하였으며 방출이 미미하거나 선원향 정보 연계에 어려움이 있는 4개의 선원방향출군은 평가에서 제외하였다.

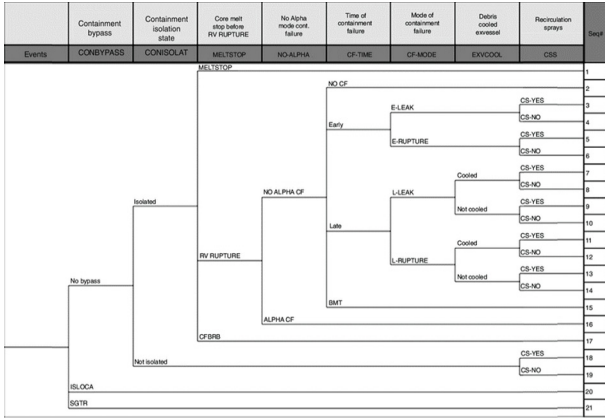


Fig. 1. Source term category logic diagram for OPR1000.

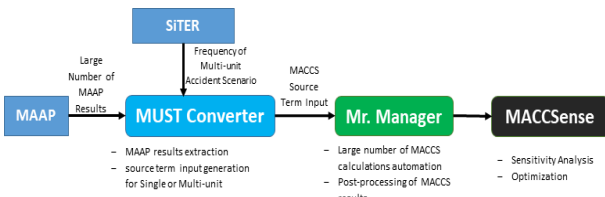


Fig 2. Computerized mass analysis framework for offsite consequence analysis.

17개 선원항방출군에 대하여 6개의 입자크기그룹을 가진 베이스케이스의 보건영향평가 결과와 비교하기 위해, Table 2와 Table 3에서 정의한 바와 같이 전체 입자를 3개의 입자크기그룹에 할당할 3 BINs와 전체 입자를 2개의 입자크기 그룹에 할당할 2 BINs 그리고 전체 입자크기분포를 한개의 입자크기 그룹으로 통합한 1 BIN으로 각각 변경하여 소외사고영향분석을 수행하였다.

소외사고영향분석 코드는 MACCS 코드를 사용하였으며¹⁰⁾, 소외사고영향분석 대량계산을 위해 KAERI에서 개발한 Multi-Unit Source Term (MUST) Converter, Multi-run (Mr.) Manager 및 MACCS Sensitivity analysis supporting interface (MACCSense) 등으로 구성된 PSA 대량 분석 자동화 체계를 이용하여 분석하였다¹¹⁻¹³⁾. Fig. 2는 본 연구에서 활용한 대량 분석 자동화 전산 체계 관계도를 나타낸다.

3. 입자크기분포 설정 영향 평가

입자크기분포 설정의 영향을 관찰하기 위하여 실험군의 입자크기 그룹의 정의를 변경하여 소외사고영향 분석을 수행하고 이 결과를 베이스케이스와 비교하였는데, 대표적인 보건영향 척도로 사용되는 단기 영향 척도인 인구 가중 조기사망 리스크(population-weighted early fatality risk)와 장기 영향 척도인 인구 가중 암사

망 리스크(population-weighted cancer fatality risk)에 대하여 베이스케이스의 결과와의 편차를 측정하는 방식으로 수행하였다.

Table 4는 모든 핵종그룹의 입자를 1개의 BIN에 포함되도록 설정한 후, 전체 선원항방출군에 대한 소외사고영향분석을 수행한 결과를 보인다. 결과에서 볼 수 있듯이 6개의 BIN으로 설정한 베이스케이스의 결과와 비교했을 때, 전체 선원항방출군에 대해 1BIN 그룹에서 인구가중 조기사망 리스크와 인구가중 암사망 리스크는 각각 1.3%와 8.6%의 편차를 보이고 있으며 분석시간은 평균 0.4%의 시간이 단축되었다.

Table 4. Impact of changes in particle size distribution (1 BIN)

No	Source Term Category	Time			Population-weighted early fatality risk (0-80Km)			Population-weighted cancer fatality risk (0-80Km)		
		Base case (sec)	1 BIN (sec)	%	Base Case	1 BIN	%	Base Case	1 BIN	%
1	STC01	2217.7	2205.5	99.5%	100%	100%	0.0%	100%	106.5%	6.5%
2	STC02	2170.4	2174.9	100.2%	100%	100%	0.0%	100%	110.4%	10.4%
3	STC03	1214.0	1218.4	100.4%	100%	100%	0.0%	100%	115.1%	15.1%
4	STC04	2439.5	2433.4	99.8%	100%	100%	0.0%	100%	112.0%	12.0%
5	STC05	1747.2	1739.5	99.6%	100%	100%	0.0%	100%	105.3%	5.3%
6	STC06	2418.3	2405.6	99.5%	100%	107.5%	7.5%	100%	111.7%	11.7%
7	STC08	948.5	940.0	99.1%	100%	100%	0.0%	100%	104.3%	4.3%
8	STC09	433.0	429.5	99.2%	100%	100%	0.0%	100%	102.7%	2.7%
9	STC10	946.1	941.6	99.5%	100%	100%	0.0%	100%	105.6%	5.6%
10	STC12	921.6	919.6	99.8%	100%	100%	0.0%	100%	117.8%	17.8%
11	STC13	372.5	370.2	99.4%	100%	100%	0.0%	100%	105.0%	5.0%
12	STC14	926.5	921.4	99.4%	100%	100%	0.0%	100%	109.8%	9.8%
13	STC17	1337.1	1332.3	99.6%	100%	100%	0.0%	100%	121.3%	21.3%
14	STC18	1563.2	1556.6	99.6%	100%	100%	0.0%	100%	102.9%	2.9%
15	STC19	2608.0	2597.3	99.6%	100%	97.3%	2.7%	100%	106.7%	6.7%
16	STC20	2506.7	2496.9	99.6%	100%	109.8%	9.8%	100%	104.7%	4.7%
17	STC21	814.8	809.8	99.4%	100%	102.6%	2.6%	100%	104.5%	4.5%
Average				99.6%			101.3%	1.3%	108.6%	8.6%

Table 5. Impact of changes in particle size distribution (2 BINs)

No	Source Term Category	Time			Population-weighted early fatality risk (0-80Km)			Population-weighted cancer fatality risk (0-80Km)		
		Base case (sec)	2 BINS (sec)	%	Base Case	2 BINS	%	Base Case	2 BINS	%
1	STC01	2217.7	2201.4	99.3%	100%	100%	0.0%	100%	104.2%	4.2%
2	STC02	2170.4	2168.5	99.9%	100%	100%	0.0%	100%	106.7%	6.7%
3	STC03	1214.0	1205.9	99.3%	100%	100%	0.0%	100%	108.9%	8.9%
4	STC04	2439.5	2413.9	98.9%	100%	100%	0.0%	100%	107.1%	7.1%
5	STC05	1747.2	1737.9	99.5%	100%	100%	0.0%	100%	104.0%	4.0%
6	STC06	2418.3	2405.5	99.5%	100%	105.0%	5.0%	100%	107.2%	7.2%
7	STC08	948.5	938.6	99.0%	100%	100%	0.0%	100%	101.4%	1.4%
8	STC09	433.0	431.6	99.7%	100%	100%	0.0%	100%	102.1%	2.1%
9	STC10	946.1	942.3	99.6%	100%	100%	0.0%	100%	103.3%	3.3%
10	STC12	921.6	916.4	99.4%	100%	100%	0.0%	100%	103.1%	3.1%
11	STC13	372.5	373.4	100.2%	100%	100%	0.0%	100%	103.9%	3.9%
12	STC14	926.5	918.8	99.2%	100%	100%	0.0%	100%	102.9%	2.9%
13	STC17	1337.1	1337.7	100.0%	100%	100%	0.0%	100%	112.5%	12.5%
14	STC18	1563.2	1550.9	99.2%	100%	100%	0.0%	100%	102.4%	2.4%
15	STC19	2608.0	2590.0	99.3%	100%	98.0%	2.0%	100%	104.1%	4.1%
16	STC20	2506.7	2490.0	99.3%	100%	105.9%	5.9%	100%	102.9%	2.9%
17	STC21	814.8	816.6	100.2%	100%	102.4%	2.4%	100%	103.9%	3.9%
Average				99.5%	100.0%	100.9%	0.9%	100.0%	104.7%	4.7%

Table 6. Impact of changes in particle size distribution (3 BINs)

No	Source Term Category	Time			Population-weighted early fatality risk (0-80Km)			Population-weighted cancer fatality risk (0-80Km)		
		Base case (sec)	3 BINS (sec)	%	Base Case	3 BINS	%	Base Case	3 BINS	%
1	STC01	2217.7	2212.0	99.7%	100%	100%	0.0%	100%	101.5%	1.5%
2	STC02	2170.4	2171.7	100.1%	100%	100%	0.0%	100%	102.8%	2.8%
3	STC03	1214.0	1204.9	99.3%	100%	100%	0.0%	100%	102.2%	2.2%
4	STC04	2439.5	2416.1	99.0%	100%	100%	0.0%	100%	102.3%	2.3%
5	STC05	1747.2	1737.7	99.5%	100%	100%	0.0%	100%	101.8%	1.8%
6	STC06	2418.3	2407.0	99.5%	100%	101.5%	1.5%	100%	101.8%	1.8%
7	STC08	948.5	943.2	99.4%	100%	100%	0.0%	100%	100.7%	0.7%
8	STC09	433.0	429.3	99.1%	100%	100%	0.0%	100%	100.9%	0.9%
9	STC10	946.1	942.5	99.6%	100%	100%	0.0%	100%	101.2%	1.2%
10	STC12	921.6	913.5	99.1%	100%	100%	0.0%	100%	105.4%	5.4%
11	STC13	372.5	371.0	99.6%	100%	100%	0.0%	100%	101.4%	1.4%
12	STC14	926.5	924.2	99.7%	100%	100%	0.0%	100%	102.0%	2.0%
13	STC17	1337.1	1331.3	99.6%	100%	100%	0.0%	100%	100.7%	0.7%
14	STC18	1563.2	1552.5	99.3%	100%	100%	0.0%	100%	101.0%	1.0%
15	STC19	2608.0	2590.1	99.3%	100%	99.0%	1.0%	100%	101.2%	1.2%
16	STC20	2506.7	2506.6	100.0%	100%	101.1%	1.1%	100%	100.7%	0.7%
17	STC21	814.8	811.2	99.5%	100%	100.7%	0.7%	100%	101.6%	1.6%
Average				99.5%			0.3%			1.7%

Table 5는 모든 핵종 그룹의 입자를 2개의 BIN에 포함하도록 설정한 후, 전체 선원방향출균에 대한 소외사고영향분석을 수행한 결과를 보인다. 베이스케이스의 결과와 비교했을 때, 전체 선원방향출균에 대해 2BINs 그룹에서 인구가중 조기사망 리스크와 인구가중 암사망 리스크는 각각 0.9%와 4.7%의 편차를 보이고 있으며 분석시간은 평균 0.5%의 시간이 단축되었다.

Table 6은 모든 핵종 그룹의 입자를 3개의 BIN에 포함하도록 설정한 후, 전체 선원방향출균에 대한 소외사고영향분석을 수행한 결과를 보인다. 베이스케이스의 결과와 비교했을 때, 전체 선원방향출균에 대해 3BINs 그룹에서 인구가중 조기사망 리스크와 인구가중 암사망 리스크는 각각 0.3%와 1.7%의 편차를 보이고 있으며 분석시간은 평균 0.5%의 시간이 단축되었다.

Table 7은 베이스케이스와 비교한 1BIN, 2BINs, 3BINs의 상대 비교 결과이다. 6개의 BIN으로 구성된 베이스케이스와 가장 유사한 평가결과를 보이는 것은 3개 BIN 그룹으로 구성된 3BINs이며, 2개의 BIN으로 구성된 2BINs와 1개 그룹으로 통합된 1BIN은 상대적으로 평가결과의 상대오차가 큰 것으로 나타났다. 또한 분석시간은 실험에 투입된 선원방향출균 전체에서

Table 7. Relative errors of results by particle size grouping

Case	Average of STCs (Early Fatality)	Average of STCs (Cancer Fatality)
Basecase (6 BINs)	0%	0%
3 BINs	0.30%	1.70%
2 BINs	0.90%	4.70%
1 BIN	1.30%	8.60%

베이스케이스에 비하여 큰 절감이 일어나지 않았다.

따라서 입자크기분포 그룹의 개수를 세분화하는 것이 베이스케이스의 결과와 상대오차를 줄이는데 더 유효한 것으로 판단되나, 분석시간의 단축효과가 미미한 것으로 보아 입자크기분포 설정은 소외사고영향분석 최적화 모델 개발에 큰 영향을 줄 수 없는 것으로 판단된다. 이는 코드의 계산부하가 입자크기분포의 수에 크게 영향을 받지 않는 것에서 기인한 것으로 판단된다.

기존 수행한 연구에서 효율적 플룸 분할을 통해 결과에 영향을 미치지 않으며 분석시간을 최대 54.5%까지 단축시킬 수 있었던 결과와 비교하면 본 연구에서 조사한 입자크기분포 설정의 분석시간에 대한 영향은 미미한 것으로 보일 수 있다. 그러나 본 연구의 취지처럼 시범적 분석을 수행함으로써 입자크기분포를 통하여 소외사고영향분석 모델링 최적화가 가능한지 그 타당성을 평가한 데 의의가 있으며, 향후 소외사고영향분석을 수행하는 분석자들에게 모델링 최적화를 위해서 입자크기분포보다는 다른 인자들에 집중하도록 안내하는 지침으로서의 의미를 지닌다.

4. 멀티스레딩 영향 평가

입자크기분포를 조정하여 소외사고영향분석을 수행하면 베이스케이스와 비교하여 결과의 정확도는 어느 정도 확보할 수 있으나 수행시간의 단축은 효과가 미미한 것으로 나타났다. Level 3 PSA의 소외사고영향분석은 사고 시 외부로 유출되는 선원향, 기상자료, 지리정보 및 인구 정보 등 다양한 입력을 바탕으로 대기확산 및 침적, 피폭 경로별 선량평가, 비상대응 및 보건영향 평가 등의 일련의 종합과정으로 상당한 분석시간이 소요된다. 본 연구에서는 컴퓨터 멀티코어 프로세서의 멀티스레딩 기법을 이용하여 소외사고영향분석을

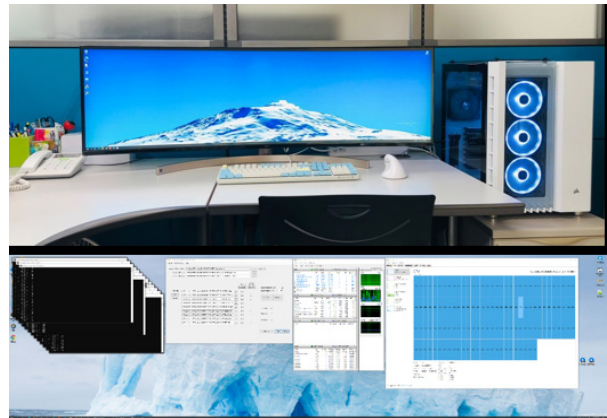


Fig. 3. Example of mass analysis using Mr. Manager and Multi-threading technology.

Table 8. Comparison of single-thread and multi-thread analysis results for all STCs

Source term category	Particle size distribution group	Time estimated for base case (sec)	Single run (Single-threaded)		Multiple runs (Multi-threaded)	
			Time (sec)	%	Time (sec)	%
STC01	Base case	2217.7	2205.5	99.5%	3582.5	161.5%
	1 BIN		2201.3	99.3%	3565.4	160.8%
	2 BINs		2211.9	99.7%	3568.3	160.9%
STC02	Base case	2170.4	2174.8	100.2%	3534.0	162.8%
	1 BIN		2168.5	99.9%	3518.8	162.1%
	2 BINs		2171.7	100.1%	3536.7	162.9%
STC03	Base case	1214.0	1218.3	100.4%	1929.9	159.0%
	1 BIN		1205.9	99.3%	1932.2	159.2%
	2 BINs		1204.9	99.3%	1931.5	159.1%
STC04	Base case	2439.5	2433.4	99.8%	3973.0	162.9%
	1 BIN		2413.8	98.9%	3950.7	161.9%
	2 BINs		2416.0	99.0%	3952.2	162.0%
STC05	Base case	1747.2	1739.5	99.6%	2814.7	161.1%
	1 BIN		1737.8	99.5%	2821.5	161.5%
	2 BINs		1737.6	99.5%	2815.0	161.1%
STC06	Base case	2418.3	2405.6	99.5%	3927.0	162.4%
	1 BIN		2405.5	99.5%	3931.1	162.6%
	2 BINs		2407.0	99.5%	3959.6	163.7%
STC08	Base case	948.5	940.0	99.1%	1529.4	161.3%
	1 BIN		938.5	99.0%	1532.1	161.5%
	2 BINs		943.2	99.4%	1529.0	161.2%
STC09	Base case	433.0	429.4	99.2%	689.1	159.2%
	1 BIN		431.6	99.7%	693.3	160.1%
	2 BINs		429.2	99.1%	689.3	159.2%
STC10	Base case	946.1	941.5	99.5%	1529.3	161.6%
	1 BIN		942.2	99.6%	1535.3	162.3%
	2 BINs		942.4	99.6%	1534.3	162.2%
STC12	Base case	921.6	919.6	99.8%	1483.9	161.0%
	1 BIN		916.4	99.4%	1486.0	161.2%
	2 BINs		913.4	99.1%	1487.9	161.5%
STC13	Base case	372.5	370.2	99.4%	593.2	159.2%
	1 BIN		373.3	100.2%	590.6	158.5%
	2 BINs		370.9	99.6%	592.0	158.9%
STC14	Base case	926.5	921.3	99.4%	1490.4	160.9%
	1 BIN		918.7	99.2%	1494.0	161.2%
	2 BINs		924.1	99.7%	1495.0	161.4%
STC17	Base case	1337.1	1332.2	99.6%	2107.7	157.6%
	1 BIN		1337.6	100.0%	2124.3	158.9%
	2 BINs		1331.3	99.6%	2149.7	160.8%
STC18	Base case	1563.2	1556.5	99.6%	2402.9	153.7%
	1 BIN		1550.8	99.2%	2407.1	154.0%
	2 BINs		1552.5	99.3%	2411.6	154.3%
STC19	Base case	2608.0	2597.2	99.6%	3433.0	131.6%
	1 BIN		2590.0	99.3%	3628.8	139.1%
	2 BINs		2590.0	99.3%	3433.8	131.7%
STC20	Base case	2506.7	2496.8	99.6%	3294.5	131.4%
	1 BIN		2489.9	99.3%	3318.8	132.4%
	2 BINs		2506.6	100.0%	3325.2	132.7%
STC21	Base case	814.8	809.7	99.4%	1203.6	147.7%
	1 BIN		816.5	100.2%	1260.9	154.7%
	2 BINs		811.1	99.5%	1205.6	148.0%
Particle size distribution (51 scenarios)		Total time estimated (Sum)	76396.2		118,925.4	
		Individual analysis time (Average)	1497.96sec = 76396.29sec / (51 scenarios)		137.17 sec = 118,925 sec / (51 scenarios) * 17 threads	

동시에 다중으로 수행하고 분석시간에 대한 영향을 도출하는 연구를 수행하였다. 멀티스레딩 기법을 이용한 소외사고영향분석 다중수행은 KAERI에서 개발한 다중수행 인터페이스 Mr. Manager를 이용하였다. Fig. 3은 Mr. Manger를 이용하여 소외사고영향분석 다중수행을 통한 대량계산 예시를 보인다.

멀티스레딩의 효과를 확인하기 위해 전체 선원항방출 시나리오에 대해 단독수행으로 소외사고영향분석을 수행한 결과와 다중수행으로 분석한 결과를 비교하였다. Table 8은 전체 선원항방출군에 대한 단독수행과 다중수행의 분석시간 비교를 보인다.

Table 8의 단독수행은 컴퓨터 CPU의 싱글코어만으로 수행하는 싱글스레드 환경에서 수행한 분석 결과로 각 선원항방출군 별로 베이스케이스와 비교한 분석시간 정보를 포함하고 있으며, 다중수행은 각 입자크기분포 그룹별 17개 선원항방출군 시나리오를 컴퓨터 CPU 멀티코어(17 스레드)를 동시에 가동하여 수행한 멀티스레드 환경의 분석시간을 포함하고 있다.

먼저 Table 8에서 단독수행 환경에서 수행한 전체 선원항방출군의 입자크기분포 변경 분석시간을 보면, 전체 선원항방출군의 입자크기분포 그룹에서 99.0%에서 100.4% 범위로 베이스케이스와 거의 유사하게 소요되었음을 알 수 있다. 이는 입자크기분포의 변경 자체로는 분석시간의 단축에 도움이 되지 못함을 의미한다.

한편, Table 8에서 다중수행 환경에서 수행한 결과를 보면, 전체 선원항방출군의 입자크기분포를 변경한 각 BIN들의 개별 분석시간이 단독수행보다 더 소요되었음을 알 수 있다. 예를 들어 선원항방출군 STC01의 경우 단독수행 시 1BIN / 2BINs / 3BINs는 각각 2205.5초(99.5%), 2201.3초(99.3%), 2211.9초(99.7%)로 베이스케이스와 비슷하게 소요되었으나, 다중수행 시는 각각 3582.5초(161.5%), 3565.4초(160.8%), 3568.3초(160.9%)로 소요시간이 크게 증가하였다. 이는 단독수행의 경우 모든 컴퓨터 자원을 프로세스가 독점해서 분석에 사용하는 것에 비해, 다중수행 시 컴퓨터 자원을 공유해야 하므로 상대적으로 자원 이용효율 저하에 따른 것으로 판단된다. MACCS 코드는 원래 현재보다 훨씬 작은 용량의 메모리와 싱글코어 환경에서 계산을 수행하도록 개발되었다. MACCS는 계산 과정에서 생산되는 수많은 임시 결과들을 메모리뿐 아니라 임시파일을 통하여 저장 및 처리하기에 빈번한 파일 입출력(IO: Input & Output)이 발생하는데, 파일 입출력을 위한 저장장치(디스크) 접근은 여러개의 스레드에서 동시에 수행할 수 없다. 따라서 하나의 스레드가 파일 입출력을 하고 있을 때 다른 스레드의 파일 입출력 작업은 대기 상태

가 되기에 멀티스레딩으로 수행중인 다른 분석의 성능에 영향을 미치게 된다. 이러한 간섭에도 멀티스레딩은 아래에 제시할 결과와 같은 효과를 보이며, 현재의 고용량 메모리 및 멀티스레딩 환경을 반영하여 향후 개발하는 코드에서는 온전히 고용량의 메모리에서 임시 저장 및 계산을 수행하는 프로세스를 구축할 수 있을 것이다.

따라서 멀티스레딩의 장점이 컴퓨터 중앙처리장치 멀티프로세서의 병행 처리를 이용한 시간 단축인 점을 고려할 때 Table 8에서 다중수행 환경의 분석시간이 단독수행 분석시간보다 더 크게 소요된 점에 대해서는 선원항방출군 전체에 대한 분석을 모두 수행하는 총소요 시간을 고려해 볼 필요가 있다. 예를 들어 단독수행 환경에서의 선원항방출군 전체에 대한 분석 총소요 시간은 각 선원항 별 소요 시간의 합으로 표시할 수 있다. Table 8에서 분석된 선원항방출군 전체 17개에 대한 입자크기분포 설정(1BIN, 2BINs, 3BINs) 모델 51개의 대한 분석 총소요 시간은 76396.2초(21시간 13분 16초)이며, 개별 평균 분석 시간은 1497.9초(24분 58초)로 계산된다. 즉, 싱글스레드 단독수행으로 계산하면 분석 모델당 평균 24분 58초 소요됨을 의미한다.

이에 반해 멀티스레드 다중수행 환경의 선원항방출군 전체에 대한 분석 총소요 시간은 싱글스레드 단독수행 환경의 계산 방법과는 다르게 적용해야 한다. 싱글스레드에서는 각 모델별 소요 시간이 명시되어 있으므로 이를 더하여 전체 소요 시간을 산정할 수 있으나, 멀티스레드 환경에서는 각 계산이 동시에 수행되고 모델의 크기에 따라 종료 시각이 각각 다르게 표시되기 때문이다. 따라서 멀티스레드 환경에서의 개별 평균 분석 시간의 계산은 투입된 시나리오 개별 수행 로그를 참조하여 시나리오별 소요 시간을 모두 합한 후 이를 시나리오 수와 다중수행에 투입된 멀티스레드의 곱으로 나누는 것이 합리적일 것이다. 이 방법을 적용하여 분석한 개별 평균 분석시간은 다음 수식 1과 같다.

$$\begin{aligned} \text{식 1) 분석시간 합계} &/ (\text{시나리오 수} * \text{스레드 수}) \\ &= 118,925\text{초} / (51 \text{ 시나리오} * 17\text{스레드}) \\ &= 137.16\text{초} \end{aligned}$$

멀티스레드로 수행된 51개 시나리오 각각의 분석시간은 Table 8에서 보는 바와 같이 나타나고 이는 각 시나리오 개별 수행 로그에 기록된다. 따라서 다중수행 환경에서의 51개 시나리오의 평균 분석시간은 51개 개별수행시간의 합계(118,925초)를 동시에 투입된 자원(17스레드)과 시나리오(51ea)의 곱으로 나누는 것이다.

따라서 멀티스레드 환경에서 한 개 시나리오당 평균 수행시간은 137.1초(2분17초) 범위로 판단된다. 이 결과는 싱글스레드 평균 수행시간 1497.9초(24분58초)에 비하여 약 10.9배 빠르게 수행되는 효율성을 갖는 것을 의미한다.

이렇듯 대량의 분석을 요구하는 선원항방출군 시나리오에 대한 포괄적인 분석에서 멀티스레딩 기법을 이용한 다중분석은 기존의 싱글스레드 기반의 단독분석에 비해 멀티프로세서의 투입에 따라 적게는 수십 배에서 수백 배까지 빠르게 분석할 수 있음을 보여주고 있으며, 다수기 복합 사고 등 고려해야 하는 시나리오가 많아서 대량의 계산이 필요한 경우 그 효과는 더 극대화될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

한국원자력연구원은 효율적인 소외사고영향분석을 수행하기 위해 결과의 정확도를 유지하면서 분석 시간을 최대한 단축하기 위한 모델 최적화 연구를 수행하고 있다. 다중플룸, 입자크기분포, 공간격자 등의 주요 입력을 대상으로 모델 최적화를 위한 방안을 도출하고 있으며, 다중플룸의 경우 누적 방출분율 기율기 기반 플룸분할 기법을 개발하여 분석결과의 정확도 확보 및 분석시간 단축을 꾀하였다.

본 연구는 이러한 노력의 연장선에서 수행된 후속 연구로 입자크기분포를 조정하여 소외사고영향분석 최적 방안 도출을 시도한 것으로 결과에서 알 수 있듯이 분석시간 절약을 위해 입자크기분포를 조정하는 것은 효과적이지 않은 것으로 판명되었다. 이는 이전 연구에서 제시한 플룸분할 최적화 방법을 적용했을 때 약 54.5%의 분석 수행 속도의 절감을 보여준 것에 비하면 상당히 미미한 수준이다. 따라서 계산속도 단축을 위하여 입자크기 BIN의 개수를 줄이는 것은 중요하지 않으며 데이터가 지원되는 선에서 최대한 상세히 입자크기분포를 세분화하는 것이 분석 정확도 향상에 유리할 것으로 판단된다.

다만 추가 연구로 멀티스레딩 기법을 이용하여 다중수행을 통해 동일한 시나리오를 분석했을 때 싱글코어 단독수행에 비해 10.9배 빠르게 수행하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 지향점은 대량 분석 시 소외사고영향분석 결과의 훼손 없이 분석시간을 단축하는 데 있으므로, 여러 입력인자들의 모델 최적화 및 멀티스레딩 각각의 요소의 개별적 효과보다 두 가지가 효과적으로 결합할 때 소외사고영향분석 시간 단축에 큰 시너지를 낼 수 있을 것으로 판단된다.

소외사고영향분석 모델 최적화 방법 개발을 위한 노력의 일환으로 공간격자와 같은 다양한 입력인자에 대해서도 최적화 모델 개발을 위한 지속적인 후속 연구가 필요할 것이다.

또한 본 연구는 단일기 단일지점 방출의 소수 시나리오만을 고려한 효과 검증으로서, 멀티스레딩 및 최적화 모델링 기법을 통한 대량 소외사고영향분석 시간 최적화 기술을 개발하기 위해서는 다른 여러 시나리오를 적용한 확인이 필요하다. 나아가 다수기 단일/다중 지점 방출에 대하여 시나리오를 확장하여 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

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) U.S. NRC, Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, NUREG-75/014 (WASH-1400), 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., "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.
- 4) 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.
- 5) S. H. Kim and S. Y. Kim, "A Study on the Efficiency of Offsite Consequence Analysis by Multi-Threading and Plume Segmentation", J. Korean Soc. Saf., Vol. 36, No. 1, pp. 166-173, 2022.
- 6) S. H. Kim and S. Y. Kim, "Apparatus, Method and Computer Program for Optimization of Offsite Consequence Analysis by Plume Segmentation", Korean Intellectual Property Office, (Korea Patent Pending No. 10-2023-0126451), 2023.
- 7) S. H. Kim and S. Y. Kim, "Influence of Particle Size Distribution Setting on the Results and Speed of Offsite Consequence Analysis", Asian Symposium on Risk Assessment and Management 2023, Hong Kong, Dec. 04-06, 2023.
- 8) S. Y. Kim et. al., "Interfacing between MAAP and MACCS to Perform Radiological Consequence Analysis", Nucl. Eng. Technol., Vol. 54, No. 4, pp. 1516-1525, 2022.
- 9) J. H. Cho, S. H. Han, D. S. Kim and H. G. Lim, "Multi-Unit Level 2 Probabilistic Safety Assessment: Approaches and Their Application to a Six-Unit Nuclear Power Plant Site", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 50, Issue 8, pp. 1234-1245, 2018.
- 10) SNL, MACCS (MELCOR Accident Consequence Code System) User Guide - Version 4.0, Revision 1, SAND2022-7112, Sandia National Laboratories, 2022.
- 11) 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, Changwon, Korea, Oct. 21-22, 2021.
- 12) S. Y. Kim, Development of Mr. (Multi-run) Manager Version 1.0, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Changwon, Korea, Oct. 21-22, 2021.
- 13) S. H. Kim and S. Y. Kim, "Development of Interfacing Software to Support MACCS Sensitivity Analyses", Asian MACCS User Group Meeting, Singapore, Nov. 9-11, 2022.