

MACCS2 코드를 이용한 연구용원자로 ‘하나로’ 설계기준사고시 비상대응조치 효과분석

이관엽, 김종수, 이해초, 김봉석
한국원자력연구원

2014년 4월 1일 접수 / 2014년 5월 29일 1차 수정 / 2014년 6월 4일 채택

방사선비상계획은 원자력시설에 대한 사고해석을 통해 산출한 방사선원향과 기상자료에 근거한 선량평가 결과를 기초로 비상계획이 필요한 거리를 산출하고, 비상계획이 필요한 거리 내에 거주하고 있는 거주민에 대한 옥내대피, 소개, 갑상선방호 등의 보호조치 계획을 수립하는 방식으로 이루어진다. 본 연구에서는 연구용원자로 ‘하나로’에서 가상할 수 있는 최대사고 조건 하에서 부지내외 거주자에 대한 보호조치 전 후의 선량변화를 1년간 기상자료에 기초하여 확률론적으로 평가하고, 국제방사선방호위원회의 2007년 권고에서 제시한, 비상피폭상황에서 보호조치 이후 잔여선량으로 정의된 참조준위 개념을 사용하여, 최적의 보호조치 유형을 도출하였다. 하나로의 경우 최대 가상사고시 최적의 보호조치 유형은 반경 300 m 이내 거주자 소개, 반경 800 m 이내 거주자 옥내대피로 평가되었으며, 갑상선방호는 반경 600 m 이내 거주자에 국한하여 해당되는데 이 지역 거주자가 소개 또는 옥내대피시는 방사능방재요원 외에 필요가 없는 것으로 평가되었다.

중심어: MACCS2, 보호조치, 옥내대피, 소개, 갑상선방호, 방사선비상대책

1. 서론

30 MW 열출력을 가진 연구용원자로 ‘하나로’에 대한 방사선비상계획은 ‘하나로’의 설계기준사고(DBA)를 기준으로 수립되었다. 방사선비상계획을 수립하기 위해, 하나로 설계기준사고시 방사선원향과 연구원 부지 내 10 m 고도의 5년간 기상관측자료를 근거로 산출한 대기확산인자의 누적확률분포를 구하여, 국소 방위에 대해 큰 값으로부터 99.5분위 수와 부지전체에 대해 95분위 수에 속하는 값 중 큰 값을 선택하여 거리별 선량을 평가하였다. 이 선량평가 결과에 따라 소개, 옥내대피 및 갑상선방호가 필요한 거리를 확인한 후 방사선비상계획 필요거리로 600~ 800 m를 산출하였다[1]. 하나로에 대한 방사선비상계획은 청색비상 또는 적색비상 수준이 되면 부지전체 비필수요원에 대한 부지경계(하나로 반경 800 m) 밖으로의 소개를 적용하고 있다[2]. 비상계획 거리산출시 적용한 거리별 선량 산출 조건은 사람이 2일 또는 7일간 아무런 보호조치 없이 옥외에 있을 때 받을 수 있는 선량이고 이 선량에 기초하여 부지전체에 대한 소개계획을 수립한 것이다.

한편 국제방사선방호위원회는 2007권고에서 사고시 처하게 되는 피폭상황을 비상피폭상황으로 정의하고, 비상피폭상황에서 적용할 선량개념으로 보호조치 이후 받

게 될 잔여선량으로의 참조준위를 제시하였다. 국제방사선방호위원회는 비상비폭상황에 적용되어야 할 참조준위 범위로 20~100 mSv를 제시하고 비상피폭상황에 적용할 방호전략을 최적화 할 때 이 준위를 적용할 것을 강조하였다[3]. 즉 방호전략은 소개, 옥내대피, 갑상선방호 등 보호조치를 통해 이행되며, 방호전략이 최적화되었는지 여부는 방호전략을 적용하고자 하는 대상에 대해 사고 상황을 적용해야만 파악할 수 있기 때문에, 결국 국제방사선방호위원회의 2007 권고를 비상계획 수립에 적용하기 위해서는 사고평가 및 보호조치 전략을 상호 연계하여 평가하는 것이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 MACCS2 컴퓨터코드를 활용하여, ‘하나로’ 설계기준사고에 따른 방사성물질 환경방출 조건에 대해 연구원 부지에서 1년간 기상 관측자료와 비상발령, 사고상황전파, 보호조치유형 결정, 통보 등의 사결정 및 적용시간, 부지내 건물의 차폐성능을 반영하여 보호조치 별 효과를 분석하였으며, 이를 토대로 국제방사선방호위원회의 비상피폭상황 하에서의 참조준위 개념을 반영하여, 부지전체에 대한 최적화된 보호조치 전략을 도출하였다.

2. 평가 방법

2.1 가상사고 적용

연구용원자로에서 확률론적으로 발생빈도가 10^{-6} 회/년

교신저자: 이관엽, gylee@kaeri.re.kr
대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

Table 1. Inventory of the 36 Rod Fuel Assembly.

Nuclide	Inventory(Ci)	Nuclide	Inventory(Ci)
^{83m} Kr	4.35×10 ³	^{134m} Cs	5.33×10 ²
⁸⁵ Kr	6.28×10 ¹	¹³⁵ Cs	8.83×10 ⁴
^{85m} Kr	1.01×10 ⁴	^{135m} Cs	1.43×10 ²
⁸⁷ Kr	2.03×10 ⁴	¹³⁶ Cs	2.39×10 ²
⁸⁸ Kr	2.87×10 ⁴	¹³⁷ Cs	5.28×10 ²
^{131m} Xe	2.26×10 ²	¹³⁸ Cs	5.57×10 ⁴
¹³³ Xe	5.40×10 ⁴	⁸² Br	5.56×10 ¹
^{133m} Xe	1.68×10 ³	⁸³ Br	4.35×10 ³
¹³⁵ Xe	5.90×10 ³	⁸⁴ Br	8.07×10 ³
^{135m} Xe	9.86×10 ³	¹²⁸ I	6.58×10 ¹
¹³⁸ Xe	5.14×10 ⁴	¹³⁰ I	2.95×10 ²
⁸⁶ Rb	1.61×10 ¹	¹³¹ I	2.40×10 ⁴
⁸⁸ Rb	2.90×10 ⁴	¹³² I	3.75×10 ⁴
⁸⁹ Rb	3.77×10 ⁴	¹³³ I	5.66×10 ⁴
¹³² Cs	2.85×10 ⁰	¹³⁴ I	6.37×10 ⁴
¹³⁴ Cs	3.90×10 ²	¹³⁵ I	5.28×10 ⁴

이하의 사고를 제한사고라고 명명하는데, 연구용원자로 ‘하나로’에서 고려하는 제한사고에는 설계기준 지진사고, 비임튜브 파손사고, 채널유동 차단사고가 있다. 이중 채널유동 차단사고시 그 영향이 가장 크기 때문에 하나로에서 고려할 수 있는 최대 가상사고는 채널유동차단사고이며, 하나로에서 이 사고가 발생할 확률은 10⁻⁷ 회/년 이하로 평가되었다. 하나로 채널유동차단사고는 노심의 냉각 채널이 차단되어 1개의 36봉 핵연료다발이 모두 용융되는 조건을 가정한다. 이 때 고려한 핵종 그룹별 누설율은 불활성기체 100%와 할로젠 50%이었다[4]. 이는 시험용원자로에 적용 가능한 TID-14844의 방사선원항을 따랐기 때문이다[5]. 그러나 사고시 주요방출핵종인 알칼리메탈이 포함되어 있지 않아 사고 핵연료 다발내 핵종 재고량을 ORIGEN2 코드로 다시 산출하였다. 다시 산출한 사고 핵연료 다발내 핵종 재고량은 하나의 총 중성자속인 7.0×10¹⁴ cm⁻²sec⁻¹으로 36봉 핵연료 다발을 하나의 정상시 운전주기인 27일 운전 14일 정지를 1주기로 하여 총 5주기 동안 연소시켰을 때 생성된 양이다. 고려한 원소는 Xe, Kr, Cs, Rb, Br, I이며, 산출된 재고량은 표 1과 같다.

핵연료다발 내 생성된 핵종은 화학적 거동특성에 따라 그룹화 되는데 이는 미국 에너지성(U.S.DOE)이 발간한 안전성분석을 위한 MACCS2 코드 적용지침에 제시된 분류를 적용하여 Xe, Kr은 1 그룹으로 Cs, Rb는 2 그룹으로 Br, I는 3 그룹으로 분류하였다[6]. 사고핵연료로부터의 방출율은 1 그룹 및 3 그룹은 기존의 TID-14844에 제시된 100% 및 50%를 각각 적용하였으며, 2그룹은 TID-14844에는 1%만을 고려하고 있기 때문에 IAEA의 연구용원자로사고시 방사선원항 유도 및 방사선원항분석에 대한 안전보고서의 부록 6에 제시된 사례[7]와 NUREG-1465의 PWR의 사고전개과정 중 Early In-Vessel 단계까지의 방출율[8]을 반영하여 30%를 적용하였다. 하

나로의 경우 사고 핵연료다발에서 방출된 핵분열생성물은 수조수를 거친 후 원자로실로 방출된다. 이 때 수조수에 의한 저감인자가 적용되는데, NUREG-1465에서는 입자성 핵분열생성물에 대해 냉각수에 의한 저감인자(제염인자)로 3 m 당 10을 제시한다[8]. 이것이 의미하는 바는 입자성 핵분열생성물이 사고 핵연료다발 위에 덮인 냉각수를 통과할 때 3 m 당 1/10로 준다는 것이다. 하나의 경우 노심 상단 수조수의 깊이가 대략 12 m이기 때문에 1/1000로 저감되지만, 보수성을 감안하여 1/100로 저감되는 것으로 고려하였다. 따라서 입자성인 알칼리메탈 및 할로젠은 수조수에 의해 1/100로 저감된 후 원자로실로 방출되는 것으로 가정하였다.

2.2 환경방출

하나로 방사선비상계획구역 설정을 위해 가정한 설계 기준사고 평가조건에서는 건물 외부 태풍조건으로 인해 건물외벽에 부압이 발생하여 원자로실 내 공기가 환경으로 누설되는 사항을 가정한다. 이때 적용한 건물 누설율은 첫날 10.1 %day⁻¹, 이후 6일간 3.1 %day⁻¹이었으며, 이 양을 합산하면 대략 30%의 누설량이 된다[1]. 그러나 U.S.DOE의 ‘MELCOR 컴퓨터 코드를 사용한 건물 누설을 산출방식’으로 2012년에 대전지역에 상륙한 실제 태풍조건을 적용하여 산출한 자료에 따르면 하나로건물의 누설율은 0.1 %day⁻¹이었다[9]. 이 평가결과가 더 타당하지만, 이 누설을 적용시 사고로 인한 주변선량이 지극히 낮아 보호조치의 효과를 분석할 수 없으며, 정부로부터 승인받은 하나로 방사선비상계획구역 설정을 위한 선량평가 결과와도 차이가 크기 때문에 기존 하나로 방사선비상계획구역 설정시 적용한 건물 누설량을 적용하였다.

한편, MACCS2 코드의 경우 10 시간 이상 연속적인 환

Table 2. Applying Time of Protective Measures.

Protective Measure	Time(sec)	
	Radius < 200m	Radius > 200, < 800m
Alarm	900	900
Sheltering	900	1800
Evacuation	1800	5400

Table 3. Shielding Factor.

Activity type	Cloud shine shielding factor	Inhalation		Skin protection factor	Ground shine shielding factor
		Shielding factor	Breathing rate(m ³ sec ⁻¹)		
Normal activity	0.75	0.41	2.66×10 ⁻⁴	0.41	0.33
Sheltered activity	0.2	0.01	2.66×10 ⁻⁴	0.33	0.2
Evacuees while moving	1	1	2.66×10 ⁻⁴	1	0.5
No shielding	1	1	2.66×10 ⁻⁴	1	1

경 방출을 모의하지 않는다. 이는 일반적인 원자력시설 사고해석시 하나로에서와 같이 외부 기상조건에 근거한 건물내 방사성물질의 지속적 환경방출을 고려하지 않기 때문이다. 일반적으로 원자력시설내 방사성물질의 환경 방출은 화재, 폭발 등으로 인한 건물내 고압으로 방사성 물질이 환경 방출되는 조건을 가정한다. 이 경우 고압이 형성된 건물내 공기가 환경으로 방출되면 자연히 건물내 압력이 낮아져서 더 이상 환경방출이 지속되지 않는다. 이러한 사고 특성과 반복되는 사고 상황을 반영하기 위해 MACCS2 코드는 10시간씩 4회 환경방출을 모의할 수 있도록 설계되었다[10].

한편, IAEA는 원자력시설 사고에 기초한 비상구역 및 거리 설정을 위한 사고해석에서 환경 방출조건으로 10시간 지표면방출을 적용하였다[11]. 일본은 방재지침에서 시험연구로 방사선비상계획구역 설정을 위한 평가시 사고조건으로, 방출지속시간을 24시간으로 정하였다[12]. 이와 같이 사고 해석시 장기간 다량의 환경누설을 일반적으로 고려하지 않기 때문에, 본 연구에서는 환경 방출율로 30 %day⁻¹을 적용하였으며, 방출기간은 1일로 국한하고, 방출고도는 가장 높은 선량을 유발하는 지표면 방출을 적용하였다.

기타 계산조건으로서, 환경방출시 기상자료는 한국원자력연구원 부지 기상탑 10 m 고도에서 2012년 1년간 관측한 풍향, 풍속, 대기안정도 및 강우량 자료를 사용하였다. 2013년의 경우 한반도에 태풍이 한 번도 상륙한 적이 없었고 강우량도 많지 않아 평가조건 다양성이 적용될 수 있도록 태풍이 2회에 걸쳐 상륙하였던 2012년도 기상 자료를 사용하였다. 또한, 방출지점의 건물에 의한 외류 효과가 반영될 수 있도록 하나로건물의 폭 43 m 및 지상 고도 27 m를 적용하였으며, 건물누설에 의한 방출이기 때문에 필터를 경유하지 않은 입자에 대한 건침적 속도로 MACCS2 코드가 제시하는 0.01 msec⁻¹를 적용하였다. 1년간 기상자료에 근거한 확률론적 선량평가를 위한 기상 자료 샘플링 방식은 년 중 일간 무작위 샘플링방식을 선

택하였다.

2.3 보호조치시나리오

연구용원자로 ‘하나로’를 포함한 연구원 부지현황을 설명하면 다음과 같다. 먼저 연구원 부지 내에 하나로 등 원자력시설이 밀집된 통제구역이 있다. 이 구역은 제한구역 및 물리적방호 요건에 의해 별도의 울타리로 경계되어 있는데, 울타리 경계까지의 거리는 하나로 기준으로 대략 반경 200 m 전후이다. 하나로 통제구역 울타리의 북동쪽 방향에는 한전원자력연료(주)가 위치해 있으며, 이 회사에도 별도의 울타리와 별도의 출입구가 있다. 하나로 통제구역 남쪽 방향으로 연구원 부지가 위치한다.

보호조치시나리오를 적용함에 있어, 하나로 통제구역 내부와 외부가 각각 시간적인 차이가 발생할 수 있다. 통제구역 내부는 원자력시설운영자가 관찰하기 때문에 의사결정이 빠르지만, 그 밖의 지역은 시설운영자 관찰구역 밖이기 때문에 의사결정이 늦을 것이다. 특히 통제구역 외부지역에 대한 소개의 경우 방사선비상대응기구 발족 이후에나 가능할 것이다. 이러한 현황을 반영하여 보호조치 적용시간을 하나로 반경 200 m 안쪽 지역과 바깥쪽 지역에 대해 표 2와 같이 설정하였다.

보호조치시나리오를 적용함에 있어 부지 내 근무자들의 활동유형을 살펴보면, 첫째 옥내대피 지시 이전까지는 일상 활동을 유지할 것이며, 둘째 옥내대피가 지시되면 실내에 머무를 것이고, 셋째 소개가 지시되면 소개지역으로 이동할 것이다. 한편 옥내대피 관점에서 부지내 건물들은 대부분 대형건물로서 주민이 거주하는 일반 가옥 보다 차폐효율이 좋다. 따라서 부지내 건물에 대한 차폐효율은 국제원자력기구(IAEA)가 대형건물에 대해 제시한 값의 최저값을 적용하였고, 그 외의 값들은 코드에서 제시되는 기준을 따라 표 3과 같이 설정하였다. 한편 연구원 관찰부지의 직원 소개지는 자운대 합동군사대학으로 지정되어 있고, 한전원자력연료(주)의 소개지는 별도로 지정되어 있으며, 연구원과 한전원자력연료(주)의 출입구

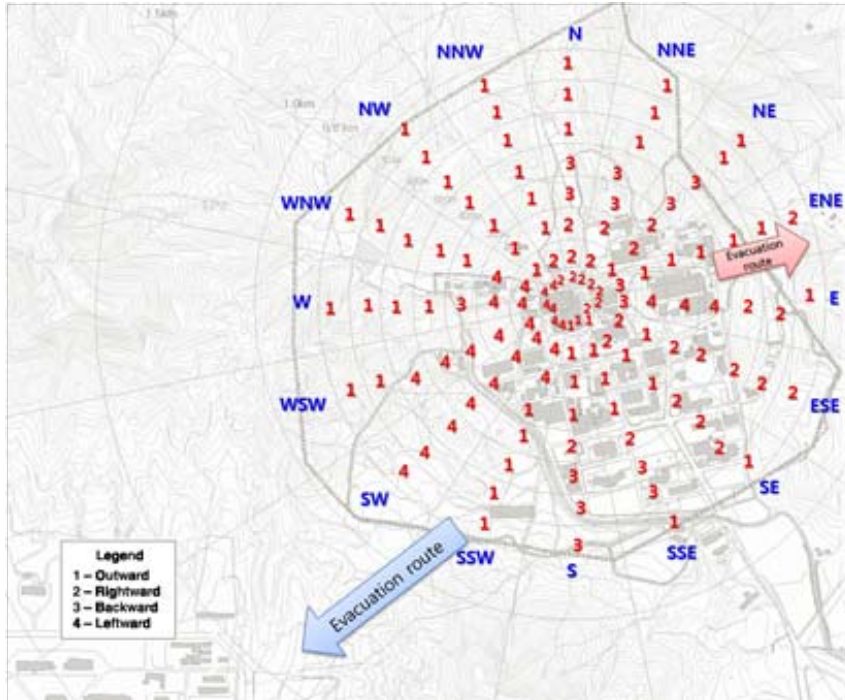


Fig. 1. Evacuation route by network type.

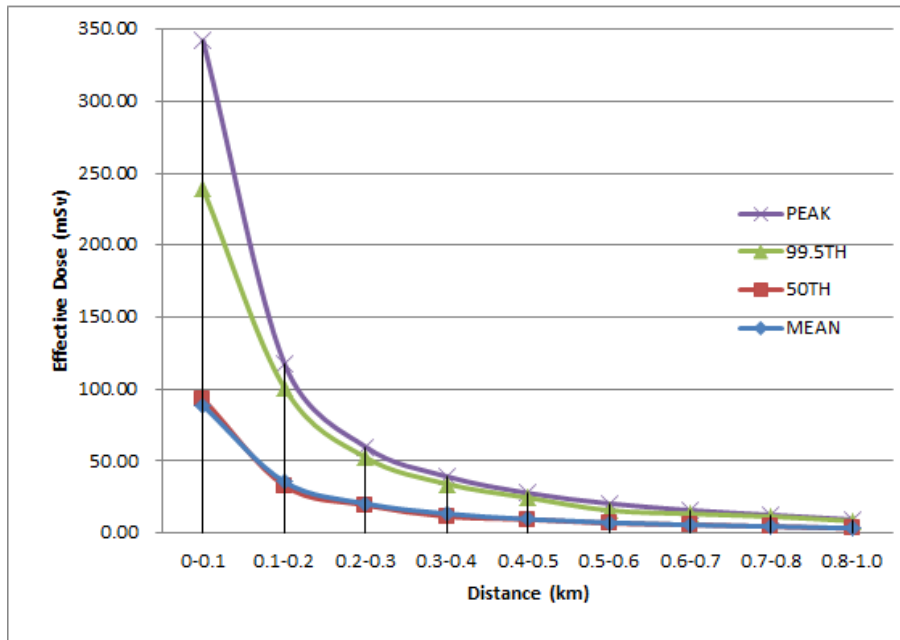


Fig. 2. Effective dose by distance before protective measures.

와 부지경계 철책이 다르므로 이러한 현황을 고려하여 소개경로를 네트워크 방식으로 그림 1과 같이 설정하였다.

사고시 보호조치의 효과를 분석하기 위한 부지내 보호조치 시나리오는 1) 아무런 보호조치가 없는 경우, 2) 옥내대피만을 적용한 경우, 3) 반경300 m 이내 옥내대피 후 소개와 기타지역 옥내대피 유지를 적용한 경우, 4) 부지전체 옥내대피 후 소개를 적용한 경우로 구분하여 적용하였다. 부지 밖 일반주민 거주 지역에 대해서는 보호조치 1) 시나리오와 나머지 경우에 대해서는 모두 보호조치

2) 시나리오를 적용하였다.

3. 결과 및 논의

MACCS2 코드는 평가 결과를 CCDF(complementary cumulative distribution function) 형태로 제공하는데, 본 연구에서는 최대값, 99.5분위 값, 50분위 값, 평균값에 대해서만 기술하였다. 또한 본 연구에서는 초기단계에 대

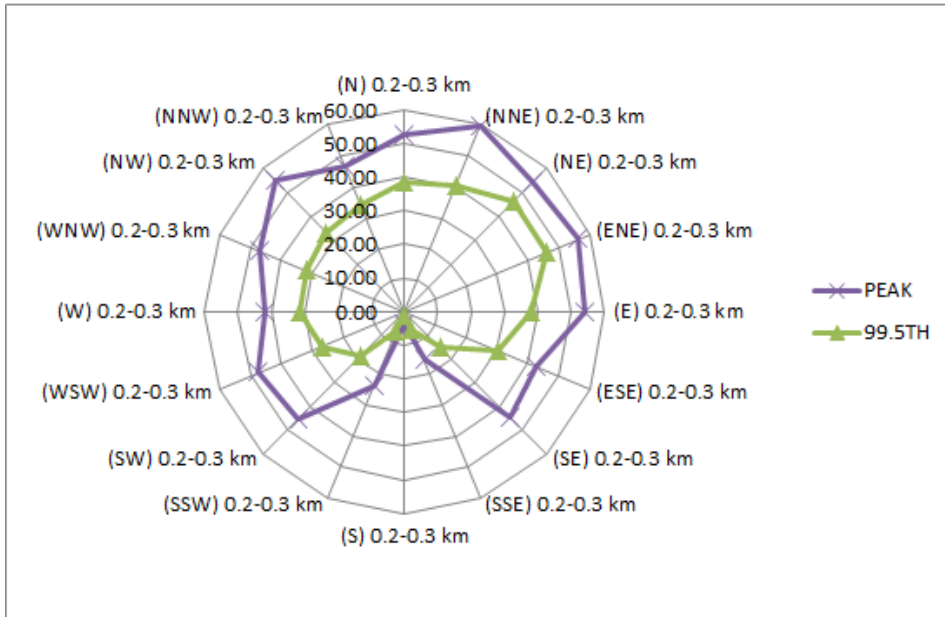


Fig. 3A. Effective dose by 16th direction before protective measures at 250 m and 350 m.

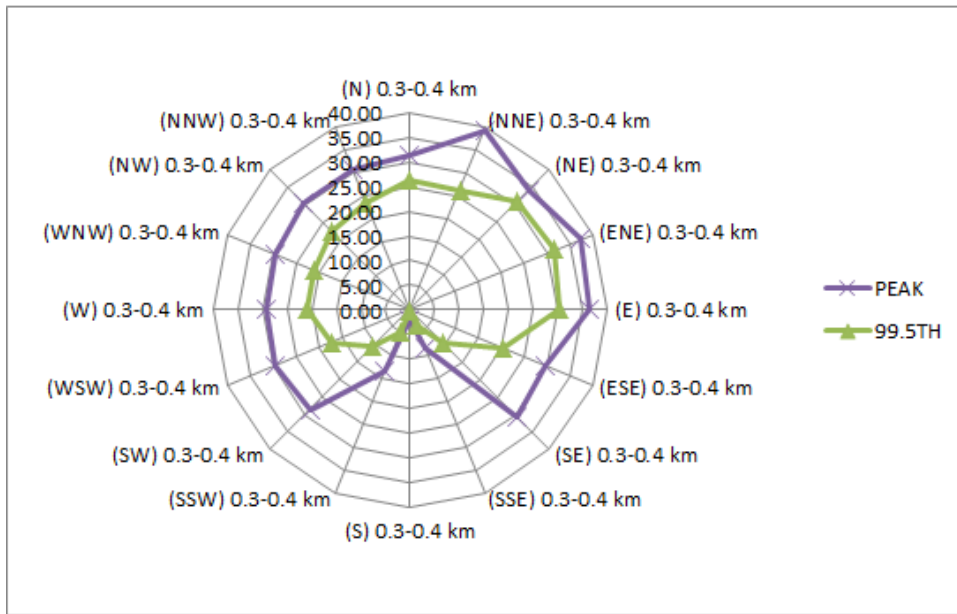


Fig. 3B. Effective dose by 16th direction before protective measures at 250 m and 350 m.

해서만 평가하였으므로, 평가 결과는 사고 후 7일까지에 대한 값이다. 각 보호조치 시나리오에 대한 평가 결과는 다음과 같다.

3.1 보호조치가 없는 경우

보호조치가 없는 경우 거리별 유효선량은 그림 2와 같다. 그림 2에서 소개기준인 50 mSv를 초과하는 거리는 최대 약 300 m까지이며, 약 260 m를 넘을 확률은 0.05%(99.5분위)이고, 약 120 m를 넘을 확률은 50% (50분위)이다. 방위별로 최대값 및 99.5분위 값에 대해서 반경 250 m와 350 m 선량에 대해 평가한 결과는 그림 3과 같다. 그림 3에서 최대값이 나타나는 방향은 NNE방

향이다. 그러나 99.5분위에서는 NE 및 ENE 방향에서 더 높은 값이 나타난다. 반경 250 m 기준으로 50 mSv를 초과하는 방위는 NW, N, NNE, NE, ENE, E 방향이다. 한편 SSE, S, SSW 방향에서는 선량이 매우 낮는데, 이는 2012년도 기상자료의 경우 북쪽 방향에서 불어온 바람의 빈도가 매우 낮았거나 선량평가조건에서 높은 선량이 나타날 기회가 거의 없었음을 나타낸다. 연구원의 지형상 원자력시설로부터 남쪽에 대부분의 연구원 건물들이 위치하고 있기 때문에, 연중 어느 시점에서 사고가 발생하더라도 하나로 통제구역 밖의 대부분의 연구원 부지 내에서는 높은 피폭선량을 받을 확률이 매우 낮다는 것을 암시한다. 반면 가장 높은 선량이 나타나는 NNE, NE, ENE

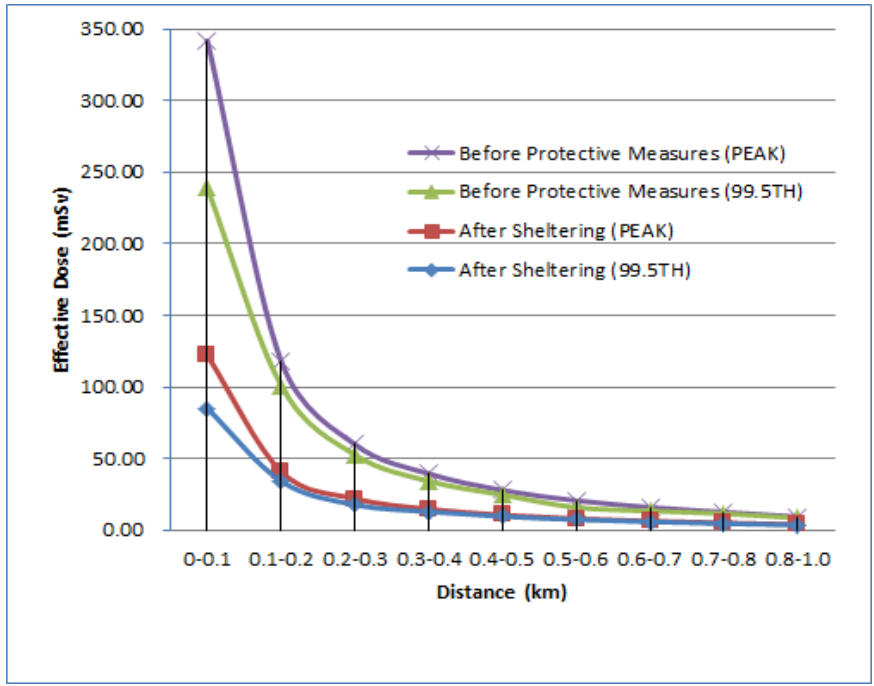


Fig. 4. Change of effective dose after sheltering.

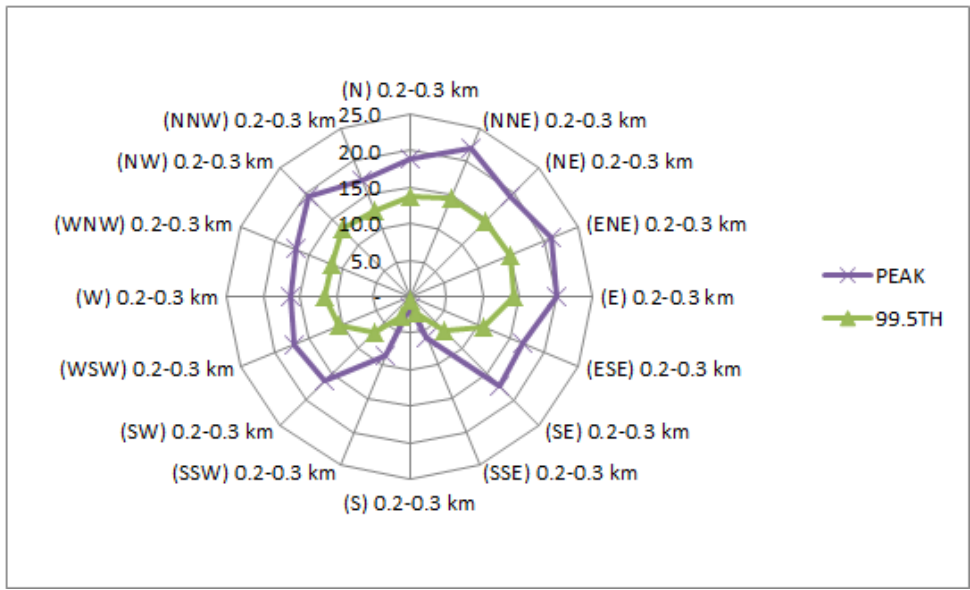


Fig. 5. Effective dose by 16th direction after sheltering at radius 250 m.

방위에는 한전원자력연료(주)가 위치해 있어, 만일 하나로에서 사고가 발생하면 하나로 통제구역내 직원과 함께 한전원자력연료(주)에도 신속한 상황통보 및 보호조치 권고가 필요한 것을 알 수 있다.

3.2 부지전체 옥내대피 적용

아무런 보호조치를 취하지 않은 경우에 대비하여 옥내대피를 적용했을 때 거리별 유효선량의 변화가 그림 4와 같은데, 보호조치를 취하지 않았을 때에 대비하여 옥내대피를 적용하였을 때의 피폭선량이 37% 내지 51% 수준으로 저감되었다. 국제방사선보호위원회(ICRP)는 2007 권

고에서 비상시 피폭한도를 잔여선량으로서 참조준위로 제시하였다[3]. 이 때 제시한 비상피폭상황에서의 선량밴드는 20-100 mSv이다. 즉 이 선량밴드는 비상피폭상황에서 보호조치를 수행하고 남는 피폭선량이 이 밴드에 있는 선량 범위를 유지해야 한다는 것이다. 한편 ICRP는 모든 사람이 참조준위 이하로 피폭되도록 방호전략을 수립할 것을 권고하고 있다. 옥내대피 후 최대피폭선량은 반경 100 m에서 약 100 mSv, 반경 150 m에서 41 mSv, 반경 250 m에서 22 mSv, 반경 350 m에서 14.7 mSv로 평가되었는데, 만일 비상피폭밴드의 최하 값인 20 mSv를 참조준위로 선정한다면, 대략 반경 300 m 이내 지역은 옥내

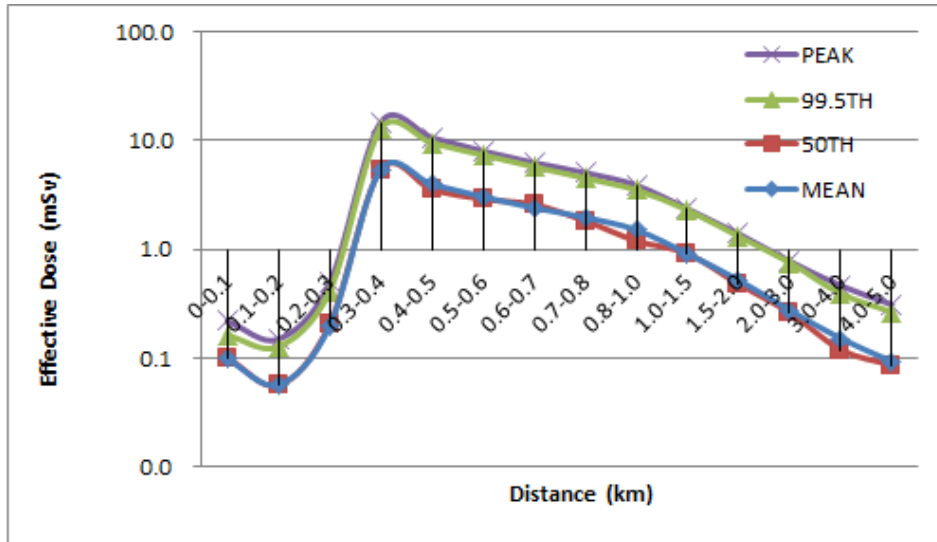


Fig. 6. Effective dose after evacuation to 300 m (other areas are kept sheltering).

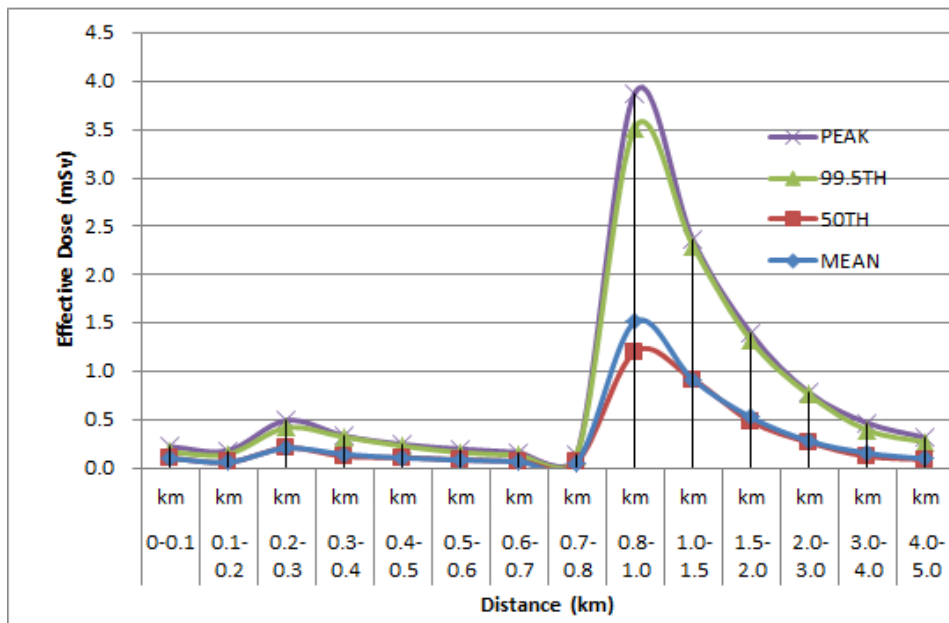


Fig. 7. Effective dose after evacuation to 800 m (other areas are kept sheltering).

대피로 보호조치가 정당화되지 않아 소개가 필요한 구역이 된다. 한편 반경 250 m를 기준으로 옥내대피 후 방위별 선량은 그림 5와 같은데, 20 mSv를 초과하는 방위가 NNE, ENE, E로 나타나고 있으며, 나머지 방위는 모두 20 mSv 이내 이다. 따라서 반경 300 m까지 소개는 20 mSv를 초과한 방위만 고려하면 될 것이다. 20 mSv를 초과하지 않은 방위에 대해서는 250 m 이내로 소개를 적용하면 적절하다.

3.3 반경 300 m 소개적용, 기타지역 옥내대피 유지

반경 300 m 소개 및 기타지역 옥내대피 유지시 거리별 유효선량 변화가 그림 6과 같다. 그림에서 반경 50 m 지점의 최대 피폭선량은 0.22 mSv, 반경 150 m 지점의 최

대 피폭선량은 0.15 mSv, 250 m 지점에서의 최대 피폭선량은 0.49 mSv로 평가되었다. 반경 250 m 지점의 피폭선량이 더 높게 평가된 이유는 반경 200 m까지의 보호조치 적용시간과 그 외부 지역에 대한 보호조치 적용시간에 차이가 있기 때문이다. 따라서 하나로 통제구역 밖의 지점 중 가장 근거리에서 피폭선량을 보여주는 반경 250 m 지점의 선량이 소개 조치시 높은 선량을 나타낸다. 반면, 소개가 적용되지 않은 기타 지역 중 가장 높은 선량을 보이는 지점인 반경 350 m 지점에서의 선량은 14.7 mSv로 평가되었다. 이 값은 ICRP의 2007 권고에서 비상피폭상황에 대한 참조준위의 최하값 20 mSv보다 낮다. 따라서 비상피폭 상황 하에서의 최적화된 방호전략 관점에서는 반경 300 m 이상에 대한 소개가 필요하지 않다.

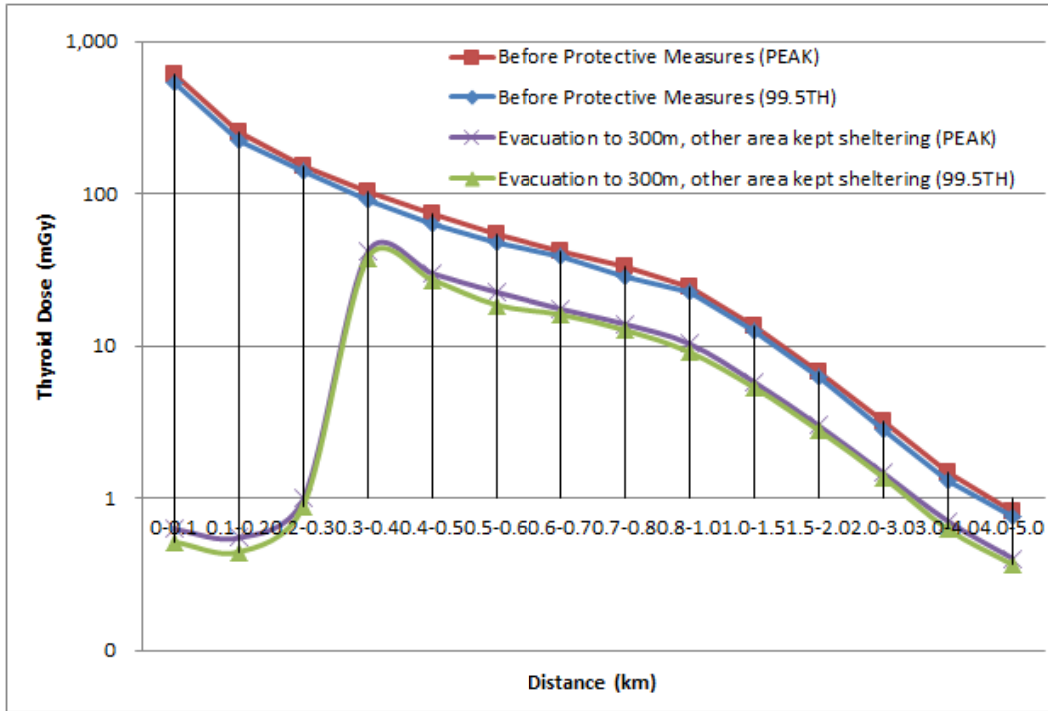


Fig. 8. Thyroid dose before and after protective measures.

3.4 반경 800 m 소개 적용

기존의 방사선비상계획을 적용하여 연구원부지 전체 소개시 평가된 거리별 선량분포는 그림 7과 같다. 하나로 반경 200 m를 기점으로 안쪽과 바깥쪽의 보호조치 적용 시간에 차이가 있기 때문에 결과적으로 반경 250 m 지점에서의 선량이 0.49 mSv로 높게 나타나다가 반경 800 m 까지 하강한다. 또한 소개조치 외부에 위치한 반경 850 m 지점의 선량이 최대 3.8 mSv까지 상승한 후 거리에 따라 하강한다. 실제 대부분의 주민 거주지가 위치한 반경 1.2 km 지점에서는 약 2.63 mSv이다. 반경 800 m 외부 지역에 대해서도 보호조치 시나리오에 따라 옥내대피를 적용한 결과이다.

3.5 최적화된 방호전략 적용시 갑상선방호 범위

보호조치 전의 거리별 갑상선등가선량과 반경 300 m 소개 및 기타지역 옥내대피를 적용한 후의 거리별 갑상선등가선량은 그림 8과 같다. ICRP의 권고안을 반영하여 IAEA가 제시한 갑상선방호 일반기준은 첫 7 일에 50 mSv이다[13]. 보호조치를 적용하지 않았을 때의 피폭선량관점에서는 반경 600 m지점까지 갑상선방호가 요구됨을 알 수 있다. 그러나 반경 300 m 이내 소개 및 기타지역 옥내대피 적용 이후 최대값을 보이는 반경 350 m 지점의 갑상선 선량은 41.8 mSv로 저감되었음을 알 수 있다. 이들 결과로 볼 때 반경 300 m 소개 및 기타지역 옥내대피를 적용한다면 비필수요원에 대한 갑상선방호는 필요치 않다. 그러나 사고수습을 위한 방재요원에 대해서는 갑상선방호가 적용되어야 할 것이다.

4. 결론

방사선비상계획 수립관점에서 확률론적영향 평가 코드인 MACCS2 컴퓨터 코드를 사용하여 하나로 설계기준사고시 최적의 비상대책 수립방안을 모색하였다. 보호조치 효과에 있어서는 옥내대피만 적용하여도 적용하기 전의 값에 비해 37% 내지 51%로 피폭선량이 저감됨을 알 수 있었으며, 옥내대피로 선량이 저감되는 지역 중에서 소개가 필요한 지역을 결정함에 있어 ICRP의 2007 권고에 기술된 비상피폭상황에서의 잔여선량 개념의 참조준위가 매우 유용함을 확인할 수 있었다. 이 권고에 따르면 하나로 반경 250 m 내부는 옥내대피만으로 정당화되지 않으며 소개가 필요한 범위로 분석된다. 특히, NNE, ENE, E 방향에 대해서는 반경 300 m까지도 소개가 필요한 것을 알 수 있었다. 물론 전체 부지를 소개하면 부지 내에서 최대피폭선량이 0.5 mSv 이내로 제한되지만 이는 보호조치 기준자체가 정당화되는 범위 중 최적화된 값으로 설정된 것으로서, 이 기준 이하에서의 보호조치 적용은 이득보다는 손해가 커서 정당화되지 않는다. 한편 본 연구에서 적용한 환경방출 수준은 사고 전개특성을 감안할 때 지나치게 보수적이라는 점과 실제 확률적으로 이와 같은 사고전개 가능성이 거의 없다는 점을 고려하고, ICRP가 제시한 비상피폭상황 하에서 보호조치 후 잔여선량 개념의 참조준위 20~100 mSv를 적용할 때, 하나로 설계기준사고시 소개범위는 하나로 통제구역 내부와 높은 선량이 나타나는 NNE, ENE, E 방향에 위치한 한전원자력연료(주) 직원에 국한하여 반경 300 m까지 적용하는 것이 타당하다. 기타 지역은 기본적으로 옥내대피를 유지하고 환경감시결과에 기초하여 보호조치를 결정하는 것이 '하나

로' 설계기준사고에 있어 최적화된 방호전략으로 이해된다. 또한 갑상선방호는 초기단계 소개가 이루어질 경우 방재요원에 국한하는 것이 적절하다.

감사의 글

이 논문은 한국원자력연구원 주요사업 수행의 결과이다.

참고문헌

1. 황원태, 이종태, 한문희, 김은한, 최근식, 이창우, 강병위. 하나로시설의 방사선비상계획구역 기초지역 설정을 위한 기초자료. KAERI/TR-2831. 2004.
2. 한국원자력연구원. 방사선비상계획서. 6판. 2013:59.
3. 이재기 역. 2007 국제방사선방호위원회 권고. ICRP 간행물 103. 대한방사선방어학회. 2009:86-89, 102-105.
4. 한국원자력연구소. 하나로 안전성분석보고서. 4권. 1996:16-47, 16-61.
5. The United States Atomic Energy Commission. Calculation of distance factors for power and test reactor site. TID-14844, USA, 1962:14.
6. The United States Department of Energy. MACCS2 Computer Code Application Guidance for Documented Safety Analysis. USA, 2004.
7. International Atomic Energy Agency. Derivation of the source Term and Analysis of the Radiological Consequences of Research Reactor Accidents. SS No. 53. Vienna, 2008:114.
8. Soffer L, Burson SB, Ferrel CM, Lee RY, Ridgely JN. Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants. NUREG-1465. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1995:13-20.
9. 이관엽, 강병위, 김종수, 이해초, 최근식. 하나로시설 지표면 누설을 고찰. KAERI/TR-4735. 2012:34.
10. Chanin D, Young ML, Randall J, Jamali K. Code Manual for MACCS2: Volume 1, User's Guide. NUREG/CR-6613, SAND97-0594 Vol.1, U.S. Department of Energy. 1998.
11. International Atomic Energy Agency. Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor. EPR-NPP Public Protective Actions 2013. Vienna, 2013:91.
12. 원자력안전위원회. 원자력시설 등의 방재대책에 대하여. 일본. 1980:47.
13. International Atomic Energy Agency. Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. General Safety Guide No. GSG-2. Vienna, 2011:11.

Analysis of the Effectiveness of Emergency Response Measures during the Design Basis Accident of the Research Reactor 'HANARO' using MACCS2 Code

Goan-Yup Lee, Jong-Su Kim, Hae-Cho Lee, and Bong-Suk Kim
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - Nuclear emergency planning is to plan sheltering, evacuation and iodine prophylaxis for the residents living in the area where the emergency plan is needed, the area is confirmed based on the dose assessment using the source-term through an accident analysis and the data measured from meteorological tower. In this study, the does change before and after protective measures was assessed stochastically based on the one year meteorological data in the condition of the maximum hypothetical accident which can be considered at the research reactor 'HANARO', and the optimized protective measures were derived based on the reference levels defined as a residual dose by ICRP 2007 recommendation which can be applied in a emergency exposure situation. The optimized protective measures for the HANARO in the maximum hypothetical accident were the evacuation to radius 300 m, the sheltering from 300 m to 800 m, the iodine prophylaxis only for the emergency workers under the protective measures for non emergency workers.

Keywords : MACCS2, Protective measures, Sheltering, Evacuation, Iodine prophylaxis, Nuclear emergency preparedness