

## 1300MWe PWR의 완전급수상실사고시 방사선원향 분석

송용만, 박수용  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

1962년에 발간된 기술정보문건인 TID-14844는 노심용융사고시 방사선원향의 규제응용에 이용되어 왔다. 그러나 최근 미국 NRC는 신형 원자로에 대한 규제 목적으로 TID-14844 대신 좀 더 현실적인 방사선원향을 대표하는 NUREG-1465를 발간하였다. 여기에는 약 40년에 걸쳐 경수로의 사고시 방사선원향에 대한 그 간의 연구결과 및 통찰력이 포함되어 있다. 이러한 움직임에 발맞추어 본 연구에서는 1300MWe 가압경수로형 원전의 완전급수상실사고에 대해 격납건물내 방사선원향을 계산하고 NUREG-1465 방사선원향과의 비교를 수행하였다. 본 연구는 MELCOR1.8.4 및 최신 모델을 사용한 새로운 방사선원향 계산 데이터를 제공할 뿐 아니라 1300MWe 원전의 중대사고 대처능력을 평가하는 기준을 제공하는 데 기여할 것으로 사료된다.

### Abstract

TID-14844, which was issued in 1962, has been used for regulatory applications of source term under core melt accidents. But recently, USNRC issued NUREG-1465 for regulatory purposes, which represents more realistic source term than TID-14844. NUREG-1465 is based upon research results and insights for accident source terms obtained over 40 years in PWRs. Following these movements, in-containment source term calculations for TLOFW (Total Loss of Feed Water) in 1300MWe PWR is calculated and compared with NUREG-1465 source term. This study provides not only new source term data using MELCOR1.8.4 and its state-of-the-art models but also evaluating basis for mitigation capability under severe accidents in 1300MWe PWR.

### 1. 서론

TMI 사고이후 미국을 비롯하여 세계적으로 중대사고에 관한 연구가 매우 활발하였으며 중대사고에 관한 연구의 일환으로 방사선원향에 관한 연구도 활발히 진행되어 왔다. 최근에는 유럽을 중심으로 핵분열생성물 및 에어로졸의 거동에 관련된 실험(PHEBUS [1], VANAM [2])을

통하여 자국의 방사선원향 관련 모델을 검증하고 새로운 모델을 추가하는 작업이 적극적으로 이루어지고 있으며, 미국에서도 중대사고 해석코드의 방사선원향 모델을 개선하는 작업 (예 : MELCOR 1.8.5의 RN패키지 모델 개선)이 진행되고 있다. 이에 따라 국내에서도 유럽의 실험데이터를 일부 입수하고 이의 해석 (B9+ [3], FPT0 [4], FPT1 [5], ISP44 [6])을 통해 규제용 종합코드인 MELCOR 코드의 분석능력 평가 및 개선을 수행함과 더불어 방사선원향 해석능력 향상을 꾀하고 있다.

한편, 미국의 NRC에서는 지금까지의 연구결과를 토대로 향후 경수로에 적용키 위한 규정 (10CFR50)의 개선을 추진해 왔고, 그 내용에는 신방사선원향 (Revised or New Source Term)을 적용하고 중대사고시 발전소 성능기준을 명시하는 것이 포함되어 있다. 신방사선원향의 적용은 Regulatory Guide 1.183 [7]에서, 중대사고로부터 공중이 받는 위험도는 NRC 안전목표 정책 (Arg. 1986; 51FR28044)에서 각각 보여주고 있다. 국내에서도 최근 차세대발전소의 신방사선원향 적용성을 연구중이며, 원자력발전소 중대사고 대책안 (2000.7)을 통해 가동중/신규원전을 포함한 차세대 원전의 노심손상빈도 및 중대사고 대량누출빈도를 규정하였다. 이러한 때에 1300MWe 가압경수로형 원전의 방사선원향 평가는 비록 완전급수상실사고 (Total Loss of Feed Water : TLOFW)라는 대표 사고경위에 대해서만 수행되었음에도 불구하고 방사선원향의 특성을 분석하는 틀을 제공하고 이해를 증진시키는 데 크게 기여하리라 예상된다.

본 분석은 중대사고 해석용 2세대 코드인 MELCOR 코드 [8] 및 State-of-the-Art 모델 (1.8.4 버전)을 사용하여 수행되었다.

## 2. 사고경위

본 사고는 (주급수상실 + 이차계통감압실패 + 일차계통감압성공 + 안전주입실패)로 정의된다. 계통의 이용면에서는, 주급수 및 보조급수, 안전주입계통이 작동불능이고 안전감압계통은 안전밸브의 설정치에 도달했을 때 4개의 안전밸브 (Pressurizer Safety Relief Valve : PSRV)중 2개가 열림고장을 일으키고 나머지 2개는 정상작동 하는 것으로 가정하였다. 또한 약간의 보수성을 주기 위하여 성공요건 (Success Criteria)에 따라 4대의 안전주입탱크 (SIT)중 2대 (압력설정치 = 610 psia)만이 주입가능한 것으로 가정하였다. 최종분석의 범위는 격납건물내 방사선원향 (In-Containment Source Term)으로 제한하였으며 격납건물내 방사선원향의 극한계산 (Bounding Calculation)을 위하여 격납건물 살수계통과 같은 공학적안전설비는 작동되지 않는 것으로 가정하였다.

## 3. 사고진행 분석

사고모의에 따른 주요 사고진행 결과는 표.1에 기술되어 있고 시간에 따른 주요 열수력 변수값은 그림.1부터 그림.6에 나타나 있다.

사건	시간 [초]
사고 발생	100
원자로 정지	129
증기발생기 이차측 고갈	1713
노심 노출	2544
가압기 안전밸브 개방 시작	2642
안전주입탱크 주입 시작	3526
간극방출 시작 (Ring1/Ring2/Ring3) (특정 cell 피복재 온도 $\geq$ 손상온도 (=1173K))	4207/4215/4313
핵연료방출 시작 (Ring1/Ring2/Ring3) ( $UO_2$ 용융시작)	4817/4855/5031
원자로용기 파손	16786

표.1 주요사고 진행

사고모의는 100초간의 평형상태 (steady-state) 모의를 포함하고 있으므로 완전급수 상실에 따른 사고시작은 100초이다. 사고시작후 약 30초만에 증기발생기 저압력 (< 128.3 기압) 또는 증기발생기 저수위 (< 9.8 m)에 의해 원자로정지가 발생하고 노심출력은 붕괴열로 대체된다. 따라서 그림.1 처럼 일차계통의 압력은 약 125-130 기압까지 감소하나 증기발생기 이차측의 고갈이후 2200초경 가압기 안전밸브의 열림시작압력인 170 기압까지 상승하여 그림.2 에서 알수 있듯이 안전방출밸브를 통하여 냉각수의 유출이 일어난다. 냉각수의 유출은 열림고장을 가정한 2개의 안전밸브를 통하여 급격히 발생하므로 압력 역시 급격히 감소한다. 2500초경에는 그림.3 에서처럼 노심노출이 시작된다. 원자로심의 바닥까지 수위가 감소하고 압력이 약 40기압 이하로 떨어지는 4000초경에는 2개의 안전주입탱크에서 냉각수가 주입된다 (그림.4 참조). 이후 16800초경에 원자로용기 하부의 파손으로 일차계통의 압력이 격납건물 대기의 압력과 동일해질 때까지 압력이 서서히 감소하게 된다.

그림.5는 증기발생기 이차측의 냉각수 수위와 냉각수량의 변화를 나타내고 있다. 정상상태 모의 100초 이후 원자로가 정지될 때까지 급격한 열전달로 수위 및 냉각수량은 급격히 감소한다. 원자로 정지이후 열전달을 및 냉각수량의 감소율은 둔화되어 사고시작 1700초경에 냉각수는 고갈된다. 증기발생기 이차측의 압력은 급수정지후 주증기관 안전밸브의 개방 설정치인 83기압 까지 증가하며 안전주입탱크로부터 일차측으로의 냉각수 주입이후 압력이 다소 감소하게 된다.

앞에서 언급되었듯이 증기발생기 이차측의 고갈이후 2200초경 가압기 안전밸브의 설정치에 도달하여 냉각수가 격납건물내 재충수탱크 (IRWST)로 방출되기 시작한다 (그림.2 참조). 2500초경에

노심노출이 시작되면, 노출된 상단의 핵연료 온도가 상승하기 시작한다. 이후 노심노출이 빠르게 진행되다가 3500초경 안전주입탱크의 냉각수가 주입되면 노심노출의 진행은 느려지고 약 8000초 이후 안전주입탱크의 냉각수 주입이 중단되면 다시 진행이 빨라진다. 따라서 그림.6에서 알 수 있듯이 8000초 이후에는 노심하단의 핵연료의 온도도 상승함을 알 수 있다. 피복관은 1173 K의 온도에 도달하는 4200초경에 손상되어 핵분열생성물의 간극방출 (gap release)이 시작되고 일부 핵연료가  $UO_2$ 의 용융온도에 도달한 4800초경에 핵연료방출 (fuel release)이 시작된다. 이후 핵연료는 노출정도에 따라 온도가 상승되고 용융된 핵연료는 원자로용기 하부에 재배치되며 재배치된 핵연료가 관통부위를 손상시키는 17000초경에 원자로용기 파손이 발생한다.

#### 4. 방사선원항 분석 결과

본 방사선원항의 모의에서는 분석대상으로 원자로용기 파손시점까지의 격납건물내 방사선원항으로 제한하였다. 즉, 일차계통으로부터 격납건물내로 방출된 핵분열생성물중 열침원 또는 바닥의 Sump에 부착 (deposition)되거나 침적 (settlement)된 양을 제외하고 격납건물 대기내에 존재하는 양만을 우선 추적하였다. 이는 최근 기존 방사선원항 분석방법인 TID-14844를 대체하는 신방사선원항 NUREG-1465 [9]와의 비교를 위한 것이다. 다음으로 격납건물내 냉각수조 (pool)에 존재하는 양과 격납건물내 전체에 존재하는 양을 추적하여 시간에 따른 격납건물 위치별 핵분열생성물의 농도에 대한 정보를 제시하였다. 한편 본 방사선원항 분석의 시간적 범위는 원자로용기 파손시점 (= 16800초)까지이다. 따라서 원자로용기파손이후 원자로 공동에서 CCI (Corium Concrete Interaction) 반응시의 핵분열 생성물의 방출등은 분석대상으로 고려되지 않았다.

그리고 본 계산에서는 격납건물 살수계통과 같은 인공적인 제염과정은 고려하지 않았으나 중력에 의한 에어로졸 침적 및 온도차에 의한 에어로졸 부착등과 같은 자연적 제염과정은 포함하였다. 따라서 추후 보수적인 비교를 위해서는 자연적인 제염과정도 제외시킨 비교결과도 필요할 것으로 사료된다. 완전급수상실사고 및 가압기안전밸브의 열림고장에 따른 냉각수 또는 수증기의 유출과 함께 노심에서 발생한 핵분열생성물은 스파저 (Sparger)를 거쳐 재충수탱크로 유입된다. 유입당시 재충수탱크에는 물이 채워져 있으므로 대부분의 핵분열생성물은 물에 의해 제거되는 (scrubbing) 과정을 거치게 된다. 이러한 제거과정은 MELCOR 코드의 SPARC 모델을 사용했다.

표.2에서는 격납건물 대기에 존재하는 핵분열생성물 양 (초기량에 대한 분율)을 NUREG-1465의 핵연료방출량 (= 초기원자로용기 방출량(early in-vessel release))과 비교하였다. 여기서 간극방출은 MELCOR 코드의 입력으로 NUREG-1465의 값이 사용되었으며 특정 cell의 피복재가 손상온도(=1173K)에 도달하면 일시에 (puff-type) 방출되며 또한 해당cell이 포함된 전체 radial ring의 간극 재고량이 동시에 방출되는 것으로 모의된다. 핵분열생성물은 16개의 MELCOR 코드의 핵종군을

9개의 MAAP 코드의 핵종군으로 전사 (mapping)하여 비교하였다. 시간에 따른 CsI 및 Cs 핵종군의 대기 및 냉각수조내 농도변화는 그림.7 및 그림.8 에서 보여주고 있다.

결과에 의하면 불활성 기체 (Xe 핵종군)는 원자로용기파손시까지 거의 전부가 방출되어 격납건물 대기내에 존재한다. 그러나 나머지 핵종군은 스파저에 의한 제거효과에 의해 대부분 냉각수조내에 존재하며 대기내 농도는 미미하여 NUREG-1465 방사선원항에 비해 매우 작은 것으로 나타났다.

마지막으로 원자로용기파손시까지 지르코늄의 산화율은 약 35%였다. 이는 NUREG-1465에서 사용된 구분에 의하면 낮은 산화율 경우 (Low Zr Oxidation case < 50%)에 해당하며 NUREG-1465의 방출율의 정의시에 사용된 높은 산화율 경우 (High Zr Oxidation case > 50%)와 차이가 있고 이의 보정에 대한 추가연구가 추후 필요할 것으로 사료된다.

\* : 간극방출을 포함한 방출률

핵종군	사고경위	간극방출	핵연료방출*
시작/지속시간	TLOFW	<b>4215초/~10분</b>	<b>4855초/~3.3시간</b>
	N-1465	<b>NA/~30분</b>	<b>NA/~1.3시간</b>
Xe(1)	TLOFW	<b>0.05</b>	<b>0.99</b>
	N-1465		<b>1.0</b>
CsI(16)	TLOFW	<b>0.05</b>	<b>0.14E-2</b>
	N-1465		<b>0.40</b>
Cs(2)	TLOFW	<b>0.05</b>	<b>0.13E-2</b>
	N-1465		<b>0.30</b>
Te(5)+Cd(11)	TLOFW	<b>0.0</b>	<b>0.13E-2</b>
	N-1465 (N-5747)		<b>0.05 (0.15)</b>
La(9)	TLOFW	<b>0.0</b>	<b>0</b>
	N-1465(Mean/Median/75 <sup>th</sup> )		<b>0.2E-3 (0.2E-2/0.3E-4/0.3E-3)</b>
U(10)	TLOFW	<b>0.0</b>	<b>0.14E-5</b>
	N-1465		<b>N/A</b>
Ba(3)	TLOFW	<b>0.0</b>	<b>0.80E-4</b>
	N-1465(Mean/Median/75 <sup>th</sup> )		<b>0.02 (0.04/0.003/0.009)</b>
Ru(6)+Mo(7)	TLOFW	<b>0.0</b>	<b>0.16E-7</b>
	N-1465		<b>0.0025</b>
Ce(8)	TLOFW	<b>0.0</b>	<b>0.10E-7</b>
	N-1465(Mean/Median/75 <sup>th</sup> )		<b>0.50E-3 (0.01/0.6E-4/0.6E-3)</b>

표.2 NUREG-1465 간극방출 및 핵연료 방출량과의 비교

## 5. 결론

MELCOR1.8.4 코드를 사용하여 노심손상사고중 발생빈도가 비교적 큰 사고인 완전급수상실사고를 분석하였다. 최종분석의 범위는 원자로용기실폐시까지의 격납건물내 방사선원향으로 제한하였으며 격납건물내 방사선원향의 극한계산을 위하여 격납건물 살수계통과 같은 공학적안전설비는 작동되지 않는 것으로 가정하였다. 결과에 의하면 방출지속시간은 간극 및 핵연료방출시 NUREG-1465의 지속시간에 비해 약 1/3 이었다. 방출분율은 불활성 기체 (Xe 핵종군)는 원자로용기 파손시까지 거의 전부가 방출되어 격납건물 대기내에 존재하나, 나머지 핵종군은 스파저의 제염효과에 의해 대기내 존재량이 미미하였다. 즉, 스파저 제거효과로 인해 대부분의 핵종군에서 NUREG-1465 대표값보다 2차 (two-order) 이상 감소한 결과를 보여주었다. 따라서 스파저의 제염효과를 거치는 중대사고시의 격납건물내 방사선원향은 연장된 방출 지속시간에도 불구하고 기존 방사선원향 분석방법인 TID-14844를 대체하는 최근의 NUREG-1465 신방사선원향이 적용 가능하다. 본 연구는 MELCOR1.8.4 및 최신 모델을 사용한 새로운 방사선원향 계산 데이터를 제공할 뿐 아니라 1300MWe 원전의 중대사고 대처능력을 평가하는 기준을 제공하는 데 기여할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. W.Krischer and M.C.Rubinstein (1992), "The PHEBUS Fission Product Project", Elsevier Applied Science
2. KAERI (1996), ISP37 : MELCOR 코드를 이용한 VANAM M3 실험 해석, KAERI/TR-737/96.
3. KAERI (1994), ICARE2 V2 Mod1을 사용한 B9+의 재계산 및 민감도 분석 연구, KAERI/TR-421/94.
4. KAERI (1996), PHEBUS FPT0 실험을 이용한 MELCOR 코드 평가, KAERI/TR-751/96.
5. KAERI (1998), MELCOR1.8.4 코드를 이용한 PHEBUS FPT1 실험 해석, KAERI/TR-989/98.
6. Y.M.Song (2001), MELCOR 1.8.4 코드를 사용한 KAEVER 에어로졸 실험 계산결과의 정확성 분석 - ISP44, Proceedings of the KNS '2001 Spring Meeting.
7. USNRC (2000), Regulatory Guide 1.183: Alternative Radiological Source Term for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors.
8. SNL (1990), MELCOR Computer Code Manuals, NUREG/CR -6119, SAND97-2398.
9. USNRC (1995), Accident Source Terms for Light Water Nuclear Power Plants, NUREG-1465.

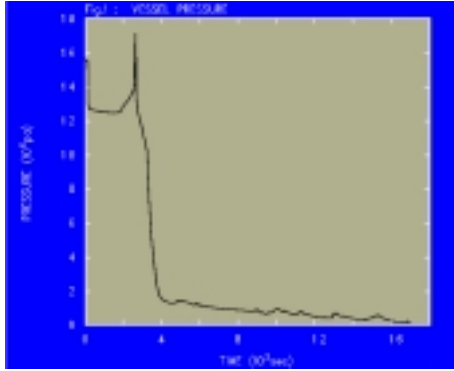


그림.1 일차계통 압력

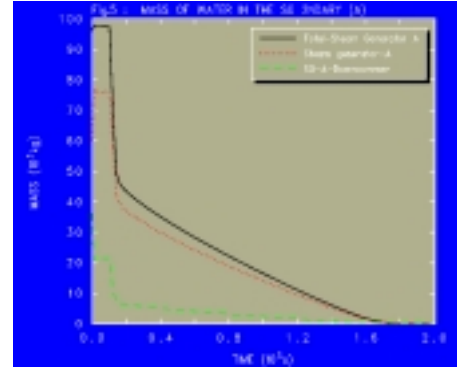


그림.5 증기발생기 이차측 냉각수량

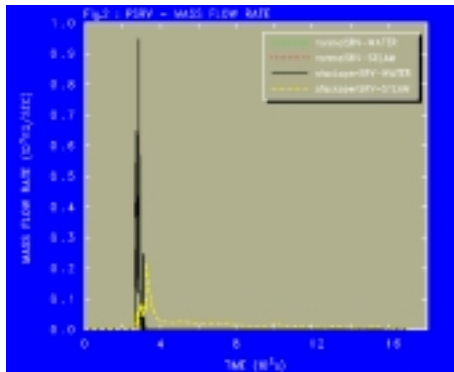


그림.2 가압기안전밸브 배출 유량

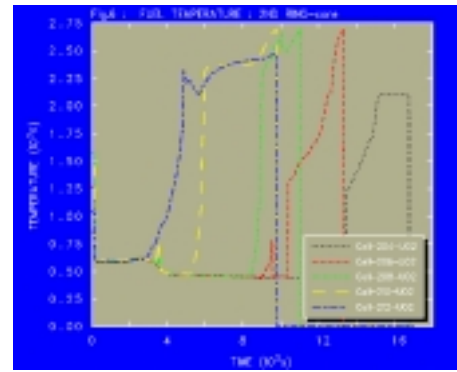


그림.6 노심 핵연료 온도

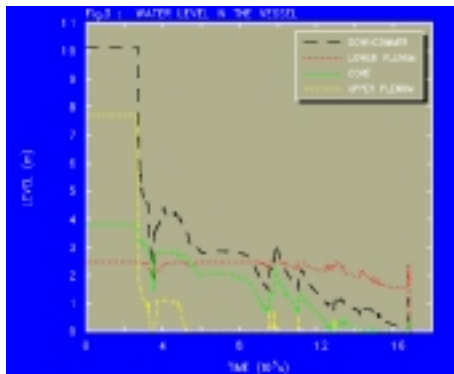


그림.3 원자로용기 수위

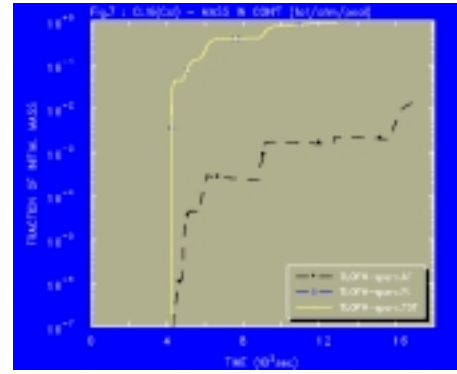


그림.7 CsI 핵종군의 격납건물내 농도

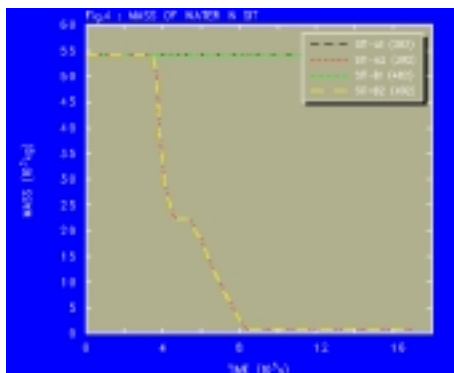


그림.4 안전주입탱크 냉각수량

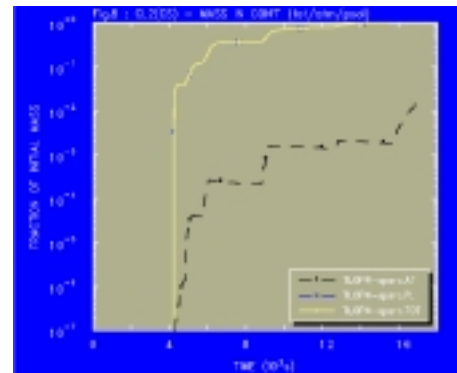


그림.8 Cs 핵종군의 격납건물내 농도