

“하나로”의 채널유동 차단사고시 방사선 환경 영향평가

이종태, 한문희, 황원태, 이병철, 박 철
한국원자력연구소

요 약

개방수조형 연구로인 하나로에서 가상적인 채널유동 차단사고에 따른 방사능 방출시의 환경영향을 부지 기상자료 측정결과를 이용하여 고공방출과 지표면방출의 두가지 경로에 대해 평가하였다. 계산 결과, 지표면방출이 고공방출보다 피폭선량이 크게 나타났으나, 두 경우 모두 제한구역(EAB) 및 저인구지역(LPZ) 경계에서의 피폭선량 허용기준치를 만족하였다. 그리고, 비상계획구역은 800 m 로 설정하면 적절함을 입증하였다.

1. 개 요

하나로는 실험시 노심으로의 접근을 용이하게 하기위해 개방수조형으로 설계되어 있으므로 이물질의 수조유입에 따른 채널 유동차단 사고의 발생 개연성을 내포하고 있다. 만약, 하나로에서 채널유동사고가 발생하는 경우, 차단 정도에 따라 그 영향은 다르지만 채널내 핵연료의 냉각능력 상실로 핵연료손상이 발생할 수 있다. 핵연료가 손상되면 핵연료내에 포함되어 있는 방사성물질이 수조를 통과하여 원자로실로 방출될 수 있다. 원자로실로 방출된 방사성물질은 비상환기계통을 통하여 68m 높이의 굴뚝으로 고공방출시키거나 비상환기계통을 정지하여 원자로실내에서 자연붕괴시켜 방사능을 감소시킨다. 원자로실내에 억제된 방사성물질은 자연붕괴되는 동안 건물 내부와 외부의 압력차에 의해 실내공기가 밖으로 누출될 수 있는데 이를 지표면 방출이라 한다.

본 논문에서는 하나로에서 채널유동 차단사고시 방사선원의 환경으로의 방출에 따른 환경영향평가에 대해 기술하였다.

2. 방사선원

하나로의 유동채널은 각각 분리된 유동관으로 구성되어 있으므로 채널유동 차단사고시 손상될 수 있는 핵연료 최대량은 36봉 핵연료집합체 1개이다. 따라서, 본 방사선 환경 영향평가에 사용된 방사선원은 36봉 핵연료집합체의 전체용융을 가정하여 고려하였으며 이 값은 전체 노심 총량의 3.7% 에 해당한다.

방사선원은 1.2 MW의 출력으로 연소시켰을 때의 36봉 핵연료집합체에 대해 ORIGEN-2 코드[1]를 이용하여 계산하였다. 이때 연소기간은 하나로의 노심관리 계산[2]에 근거하여 28일 연소 후 1주일 정지를 7회 반복함으로써 노심에서의 연소기간을 238일(35일 x 7 - 7일)로 가정하였다. 이는 하나로의 정격 출력 운전시 36봉 핵연료집합체가 노심에서 연소될 수 있는 최장기간이다.

핵연료내에서 환경으로 방출되는 방사성물질은 불활성기체와 할로겐원소로서 36봉 핵연료집합체에 대해 계산된 방사선원은 표 1과 같다.

3. 누출 경로

손상된 핵연료봉내에서 원자로수로 방출되는 방사성물질은 불활성기체 100%, 할로겐원소 50%로 가정한다[3].

수조에서 원자로실로 방출되는 방사성물질의 방출율은 제염인자와 관련된다. 제염인자(Decontamination Factor, DF)는 수조위로 방출되는 방사성물질에 대한 핵연료에서 수조로 방출되는 방사성물질의 비를 말한다. 하나로의 노심은 높이 12 m, 직경 4 m의 수조내에 잠겨있으며, 침니 상부에는 노심 하향 방향으로의 우회유동이 있으므로 할로겐원소의 경우 현실적으로 DF 값은 대략 1000 정도로 예상된다[4]. 그러나 보수적 계산을 위해 할로겐원소의 DF 값으로 100을 적용하였다. 따라서, 핵연료에서 수조수로 방출된 방사성물질중 불활성기체의 100%, 그리고 할로겐원소의 1%가 원자로실로 방출된다.

원자로실로 방출된 방사성 기체생성물은 격납건물 내에서 환경으로의 방출이 억제되며 할로겐원소의 50%가 다시 건물벽, 주변기기 등에 흡착된다[3]고 가정한다. 다만, 고공방출인 경우에는 방사성물질의 건물 체류기간이 지표면 방출의 경우보다 짧으므로 보수적 계산을 위해 건물흡착율을 고려하지 않는다.

원자로실에서 환경으로의 방출경로는 비상환기시스템의 작동 여부에 따라 2가지 경로로 구분할 수 있다: (1)굴뚝에 의한 고공방출과 (2)지표면방출. 사고시 비상환기시스템이 작동하면 원자로실로 방출된 방사성물질은 비상환기시스템의 헤파/활성탄 필터를 통과한 후 굴뚝으로 방출된다. 이 때 배출율은 6,200m³/hr이다. 비상환기시스템에 설치된 활성탄 필터의 설계효율은 99.95%[5]이나 보수적 계산을 위해 95% 효율을 가정한다. 비상환기시스템을 정지시키는 경우 방사성물질은 원자로실내에서 억제된다. 이 경우에는 격납건물과 외부의 압력차에 따른 대기누설에 의해 방사성물질이 환경으로 방출된다. 격납건물에 적용되는 누설율은 최초 24시간 까지 600 m³/hr로 가정하며 이후에는 50 m³/hr로 가정한다[6].

4. 방사성 물질 방출량

원자로실에서 환경으로 방출되는 방사능량은 다음과 같이 계산된다. 활성탄 필터의 효율을 f , 방출율을 $R(F/V)$ 이라 하면, 사고후 시간 t 에서 단위시간당 환경으로 방출되는 방사능량(Q)은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$Q(t) = Q_0 F(1-f) \text{Exp}[-(\lambda + R)t]$$

여기서, F : 사고후 공기가 외부로 방출되는 량

f : 0.95 (고공방출), 0.5 (지표면방출)

λ : 핵종의 붕괴상수 (sec^{-1})

V : 원자로실 체적 ($39,000 \text{ m}^3$)

Q_0 : 시간 t = 0 에서 특정핵종의 총 방사능량

따라서, 사고후 특정시간까지 환경으로 방출되는 방사능 총량은 고려하는 각 핵종에 대해 윗 식을 시간에 따라 적분하여 계산하였다.

5. 대기 확산

환경으로 방출된 방사성물질의 확산은 풍향, 풍속 및 대기 안정도를 고려한 대기확산인자로 나타낼 수 있다. 평가를 위해 1992년 10월 1일부터 1993년 9월 30일 까지의 하나로 부지 기상자료가 사용되었다. 지표면방출과 고공방출의 경우 각각 10m 와 67m 에서 측정된 기상자료가 사용되었다.

사고시 대기확산인자, χ/Q 는 기상탑에서 얻은 기상자료의 16 방향에 대한 각 방향별 0.5% χ/Q 를 비교하여 구한 최대 소구역 χ/Q 와 풍향에 관계없이 모든 기상자료를 이용한 5% 전체부지 χ/Q 값을 비교하여 큰 값으로 결정하였다 [7]. 지표면방출시의 χ/Q 값은 대기안정도와 풍속을 고려하여 (1) 대기안정도가 D, E, F, G 이며 풍속이 6 m/sec 이하인 경우와 (2) 대기안정도가 A, B, C 또는 풍속이 6 m/sec 이상인 경우로 구분하여 계산되었으며, 고공방출시의 χ/Q 또한 Non-fumigation과 fumigation 조건에 대해 대기안정도를 고려하여 계산하였다.

소내 기상자료를 이용하여 계산된 고공방출 및 지표면방출시의 대기확산인자, χ/Q 는 그림 1과 2에 도시되어 있다.

6. 피폭선량 평가

6.1 피폭선량 허용기준

10 CFR 100 "Reactor Site Criteria" 의 Section 100.11 [8] 및 과기처 고시[9]에 근거하여 설계기준 사고시 제한구역(EAB)과 저인구지역(LPZ) 경계에서의 개인에 대한 피폭선량 허용기준은 아래와 같다.

지 역	전신선량	갑상선선량
제한구역 (EAB)	25.0 rem/2hr	300 rem/2hr
저인구지역 (LPZ)	25.0 rem/event	300 rem/event

6.2 피폭선량 계산

사고로 인하여 방출되는 방사성물질에 의해 원자로 건물 밖에 있는 소외 개인이 받는 피폭선량은 전신 및 갑상선에 대하여 거리별, 시간대별로 피폭선량을 구분하여 계산하였다. 환경으로 방출되는 방사능량과 대기 확산인자, 그리고 표.3 및 표.4의 전신 및 갑상선에 대한 선량 환산인자 및 호흡률을 사용하여 피폭선량을 계산하였다.

계산은 사고 전기간은 30 일로 가정하고 고공방출과 지표면방출을 구분하여 수행하였으며, 비상계획구역(EPZ)을 고려하기 위해 LPZ 거리인 300m 밖 5km까지의 구간에 대해서도 방사선량을 평가하였다.

고공방출과 지표면 방출시의 전신선량 및 갑상선선량을 거리별로 도시하면 그림.3 및 그림.4와 같다. 그리고, 결과를 제한구역과 저인구 지역에 대해 요약하면 다음과 같다.

구 분	경 계	전신선량	갑상선선량
• 고공방출	- EAB(200 m)	0.933 rem/2hr	0.180 rem/2hr
	- LPZ(300 m)	0.881 rem/30d	0.248 rem/30d
• 지표면방출	- EAB(200 m)	4.889 rem/2hr	12.370 rem/2hr
	- LPZ(300 m)	5.104 rem/30d	41.64 rem/30d

표에서 보듯이 하나로 방사능 환경영향은 지표면 방출이 고공방출의 경우보다 더 크다. 그러나, 이 경우도 피폭선량 허용기준치인 전신선량 25 rem, 갑상선 선량 300 rem 을 초과하지 않는다.

그리고, 연구소 부지 경계 근처에서 4일간 피폭선량은 아래와 같다. 사고 시 대부분의 방사능은 0.5 시간에서 30시간 사이에 방출되므로 비상계획구역 설정과 관련하여서는 피폭기간을 4일[10]로 기준하였다.

거 리 (m)	피폭 선량 (rem/4d)			
	고공 방출		지표면 방출	
	전 신	갑상선	전 신	갑상선
600	0.485	0.151	1.549	11.10
700	0.443	0.142	1.196	8.59
800	0.409	0.136	0.955	6.87
1000	0.364	0.127	0.748	5.34
1200	0.335	0.122	0.624	4.40

표에서 보듯이 지표면방출의 경우가 고공방출보다 피폭선량이 크게 나타나므로 지표면방출을 기준으로 원자로 주위 800 m 지점이면 주민보호지침 기준치 (전신: 1 rem, 갑상선: 10rem)를 만족한다. 따라서, 현재 설정된 연구소 부지 경계 약 800 m는 비상계획구역으로 적절하다.

7. 결 론

하나로의 가상적인 채널유동 차단사고시 방사능 누출에 따른 환경영향평가를 수행하였다. 방사선 환경영향은 비상환기계통 작동 여부에 따라 고공방출과 지표면방출로 방사능 누출경로를 구분하여 계산하였다. 평가 결과, 하나로에서는 지표면방출의 경우가 고공방출의 경우보다 방사선 환경영향이 큰 것으로 나타났으나, 36봉 핵연료집합체가 1개가 전부 용융된다 하더라도 설정된 제한구역과 저인구지역 경계에서 피폭선량 허용기준을 충분히 만족하고 있다. 또한, 비상계획구역도 주민보호지침 기준치를 만족하도록 적절하게 설정되어 있다.

참고 문헌

1. A.G. Croff, "ORIGEN2, Isotope Generation and Depletion Code-Matrix Exponential Code", ORNL CCC-371, (1983)
2. 김학노 외 3인, "The In-Core Fuel Management of the KMRR," KM-031-RT-K045, Rev.0, (1993. 10)
3. Reg. Guide 1.4, US NRC NUREG 0555, App. A, Feb. (1979)
4. Preliminary Safety Analysis Report, "MX10-05200-002, Rev.0, MAPLE-X10 Project, CRNL, P16.406 ~ 16.407, June (1993)
5. "다목적 연구로 SAR 제 10장 보조계통의 비상 환기계통(10.4.2항)." KMRR SAR (개정판), p10 - 33, 발간 예정
6. 류정수와 2인, "KMRR 원자로건물의 누설율 기준 및 시험 결과", KM-210-RT-K076, Rev.1, 1995. 1.
7. Reg. Guide 1.145, US NRC, 1983.
8. 10 CFR, "Code of Federal Regulations: Part 100-Reactor Site Criteria (100.11)", 10 CFR 100, 100.11, p817, Jan. (1985)
9. MOST, Rule 90-11 of Most, ROK, Oct.1990.
10. IAEA, Planning for Off Site Response to Radiation accidents in Nuclear Facilities, Safety Series No.55, 1981.

표.1 채널유동 차단사고시의 방사선원

핵종	반감기	방사능량(Ci)
불활성기체		
Kr-83m	114 M*	4.595E + 03**
Kr-85m	4.4 HR*	1.062E + 04
Kr-85	10.76 YR*	8.873E + 01
Kr-87	76 M	2.124E + 04
Kr-88	2.8 HR	3.000E + 04
Kr-89	3.2 M	3.778E + 04
Kr-90	33 S*	3.756E + 04
Kr-91	10 S	2.775E + 04
Xe-131m	11.8 D*	2.809E + 02
Xe-133m	2.26 D	1.832E + 03
Xe-133	5.27 D	5.927E + 04
Xe-135m	15.6 M	1.081E + 04
Xe-135	9.2 HR	3.336E + 03
Xe-137	3.9 M	5.437E + 04
Xe-138	17 M	5.526E + 04
Xe-139	43 S	4.452E + 04
Xe-140	16 S	3.064E + 04
할로겐원소		
Br-83	2.41 HR	4.591E + 03
Br-84	31.8 M	8.486E + 03
Br-85	3 M	1.049E + 04
I-131	8.07 D	2.732E + 04
I-132	2.3 HR	4.131E + 04
I-133m	9 S	1.351E + 03
I-133	21 HR	6.142E + 04
I-134m	3.7 M	4.747E + 03
I-134	52 M	6.891E + 04
I-135	6.7 HR	5.734E + 04
I-136	83 S	2.774E + 04

* S:초, M:분, HR:시간, D:일, YR:년
 ** Read as 4.595 x 10³

표.3 내부피폭의 경우 갑상선에 대한 선량 환산계수

핵종	선량 환산 계수 [rem/Ci]
I-131	1.49E6
I-132	1.43E4
I-133	2.69E5
I-134	3.73E3
I-135	5.60E4

표.2 외부피폭의 경우 전신에 대한 선량 환산계수[rem-m³/Ci-sec]

핵종	선량 환산 계수
I-131	8.72E-2
I-132	5.13E-1
I-133	1.55E-1
I-134	5.32E-1
I-135	4.21E-1
Kr-83m	2.40E-4
Kr-85m	3.72E-2
Kr-85	5.25E-4
Kr-87	1.87E-1
Kr-88	4.64E-1
Kr-89	5.25E-1
Kr-90	2.68E-2
Kr-91	2.73E-2
Xe-131m	2.92E-3
Xe-133m	8.00E-3
Xe-133	9.33E-3
Xe-135m	9.92E-2
Xe-135	5.72E-2
Xe-137	4.53E-2
Xe-138	2.81E-1
Xe-139	1.29E-1
Xe-140	2.95E-2
Br-83	1.04E-2
Br-84	2.21E-1
Br-85	7.63E-2

표.4 시간에 따른 호흡률

사고 후 경과 시간	호흡률 [m ³ /sec]
0-8 hrs	3.47E-4
8-24 hrs	1.75E-4
1-30 days	2.32E-4

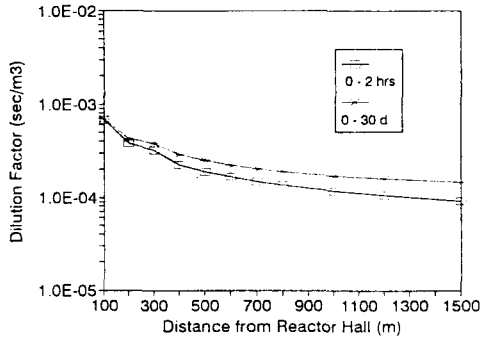


그림.1 고공방출시 대기확산인자

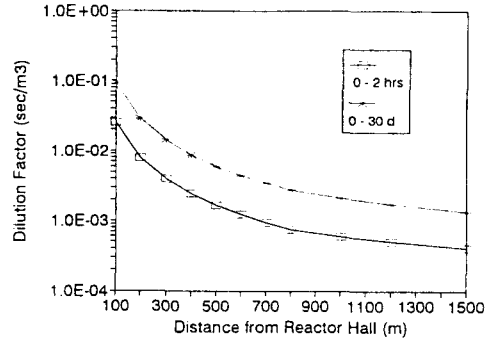


그림.2 지표면방출시 대기확산인자

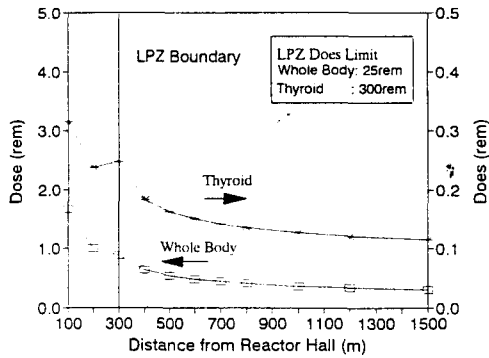


그림.3 고공방출시 30일간의 전신 및 갑상선 피폭선량

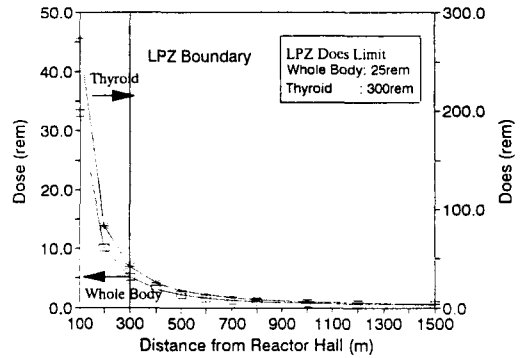


그림.4 지표면방출시 30일간의 전신 및 갑상선 피폭선량