

국내신형원전의 격납건물 설계유형별 방사선영향 평가 Radiological Consequences on the Containment Design Types for Korean ALWR

조성환*, 이재성*, 임우상
이여종**

* 한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16
** 한국전력기술(주)
경기도 용인시 구성읍 마북리 360-9

요약

국내신형원전은 현재 3단계 설계가 진행 중에 있다. 국내신형원전 2단계 설계는 기존 원전에 대비하여 안전성 및 경제성 향상을 목표로 수행되었으며, 국내신형원전 3단계 설계는 2단계 설계를 기초로 안전성 및 경제성을 고려한 설계최적화를 목표로 진행되고 있다. 이에 따라, 한전 전력연구원과 한국전력기술(주)에서는 여러가지 설계최적화 방안을 도출하였으며 이 중의 하나로 이중격납건물 설계를 단일격납건물 설계로 변경하고 격납건물 설계누설율을 낮추는 방안을 채택하였다. 격납건물은 원전의 다중방호벽(Multiple Barrier)개념에 따라 설치되는 원전 사고시 방사성물질의 환경방출을 방지하는 최후의 설비이다. 원전 사고시 일반인의 안전에 대한 격납건물의 중요성은 TMI 사고와 Chernobyl 사고를 통하여 입증되었다. 본 논문에서는 국내신형원전의 격납건물 설계유형에 따라 사고시 일반인의 방사선영향에 미치는 영향을 비교/평가하였다.

Abstracts

The design goal of Korean ALWR Phase II Design is to improve safety and to reduce costs in comparison with existing plants. The design goal of Korean ALWR (III) is to optimize Korean ALWR (II) in regards to safety and cost. Therefore KEPRI(Korea Electric Power Research Institute) and KOPEC (Korea Power Engineering Company) evaluated and selected various items to optimize Korean ALWR (II). One of these items is to change the containment design from the double containment into the single containment with a reduced design basis leak rate of containment. The importance of containment, as a multiple-barrier to fission product release, is demonstrated through the accidents in TMI and Chernobyl. The containment is the final barrier to prevent fission products from release to environment. In this paper, the radiological consequences of the containment design types were estimated.

1. 서론

국내신형원전은 현재 3단계 설계가 진행 중에 있다. 국내신형원전 2단계 설계는 기존 원전에 대비하여 안전성 및 경제성 향상을 목표로 수행되었으며, 국내신형원전 3단계 설계는 2단계 설계를 기초로 안전성 및 경제성을 고려한 설계최적화를 목표로 진행되고 있다. 따라서, 한전 전력연구원과 한국전력기술(주)에서는 여러가지 설계최적화 방안을 도출하였으며[1] 이 중의 하나로 이중격납건물 설계를 단일격납건물 설계로 변경하고 격납건물 설계누설율을 낮추는 방안을 채택하였다. 격납건물은 원전의 다중방호벽(Multiple Barrier)개념에 따라 설치되는 원전 사고시 방사성물질의 환경방출을 방지하는 최후의

설비이다. 원전 사고시 일반인의 안전에 대한 격납건물의 중요성은 TMI 사고와 Chernobyl 사고를 통하여 입증되었다.

따라서, 본 논문에서는 국내신형원전의 격납건물 설계유형에 따른 사고시 일반인의 방사선피폭 위험도에 미치는 영향을 비교/평가하였다.

2. 국내신형원전 격납건물 설계요건 및 설계특성

2.1 격납건물 설계요건

국내신형원전의 방사선방호 측면에서 격납건물 설계와 관련된 설계요건[2]은 다음과 같다.

- ◆ 제한구역경계 설정 요건

제한구역경계(Exclusion Area Boundary, EAB) 설정 요건은 10CFR50.34에 제시된 EAB에서의 선량기준 요건에 따라 다음과 같이 설정되었다.

- 노심용융을 유발하는 가상사고의 경우 제한구역경계에서 소외선량기준(사고후 임의 2시간동안 EAB에서 유효선량을 25rem 이하로 유지)을 만족해야 함

2.2 격납건물 설계특성

국내신형원전 2단계설계에서 격납건물이 이중격납건물로 설계된 가장 큰 이유는 기존의 원전에 비하여 강화된 안전성목표, 제한구역경계 설정 요건 및 비상계획 단순화 요건을 만족하기 위한 것이었다. 그러나 3단계 설계에서는 경제성을 고려하여 기존원전의 격납건물과 유사한 구조의 단일격납건물 설계로 변경되었다. 격납건물 설계변경 내용은 표 2.1과 같다. 표 2.1에서 보듯이 이중격납건물 설계에서는 일차격납건물 외부에 이차격납건물이 추가로 설치되어 있어 일차격납건물로부터 방사성물질이 방출되는 가상사고의 경우에 이를 환형공간에서 지연시키고 환형공간 배기시스템의 여과기를 통해 제거한 후 환경으로 방출함으로써 단일격납건물 설계에 비해 방사선영향을 낮게 유지할 수 있었다(그림 2.1 참조). 국내신형원전 3단계에서는 단일격납건물 설계로 인하여 소외로의 방사성물질의 방출이 증대되어 일반인에 대한 방사선영향의 증가가 예상된다.

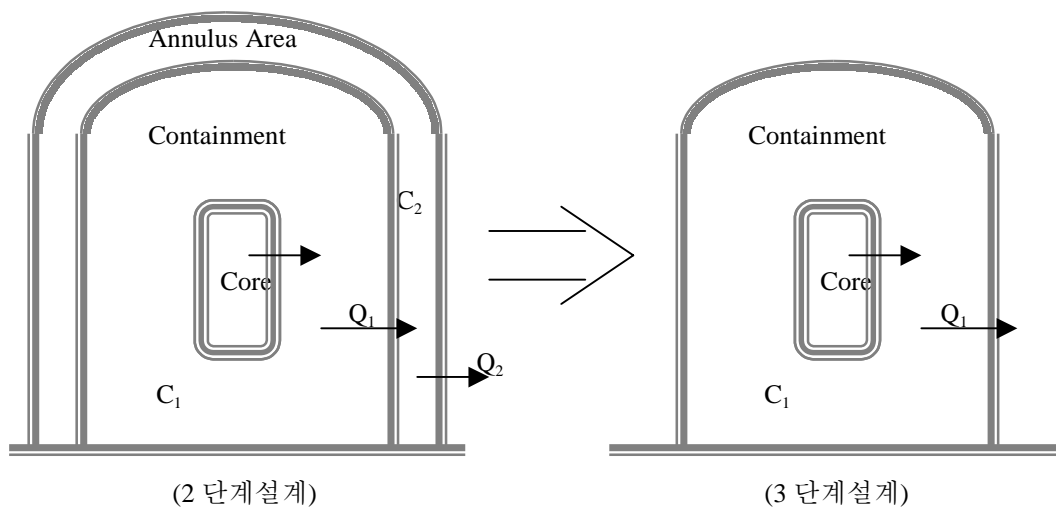


그림 2.1 국내신형원전 격납건물 설계변경에 따른 방사성물질 방출경로

표 2.1 국내신형원전 격납건물 설계특성

설 계 변 수		2단계설계	3단계설계
일차 격납 건물	구조물설계	Pre-Stressed Concrete	
	내경 (ft)	75	
	콘크리트 두께 (ft)	4	
	자유체적 (ft ³)	3.13E+06	
이차 격납 건물	격납건물 설계누설율	0.5%/day	0.15%/day
	환형공간 체적 (ft ³)	1.23E+06	없음
	환형공간 배기계통 총 환기율 (cfm)	18,000	
	배기율(부압후) (cfm)	1,000	
	여과기 효율 (입자)	95% 이상	

2.3 방사성물질 방출량 평가

본 절에서는 단일격납건물 대비 이중격납건물 설계의 방사성물질 방출 저감효과를 정량적으로 분석한다. 그림 2.1은 가상사고(LOCA)시 단일격납건물 및 이중격납건물 설계의 방사성물질 방출경로를 보여주고 있다. 단일격납건물 및 이중격납건물의 방사성물질 방출율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

- 단일격납건물 설계의 경우

$$Q_1(t) = R_1 C_1(t)$$

- 이중격납건물 설계의 경우

$$\frac{dC_2(t)}{dt} = R_1 C_1(t) - \lambda C_2(t) - (1 - E_f) R_2 Q_2(t) = (1 - E_f) f R_2 C_2(t)$$

여기서,

- R_1, R_2 : 일차격납건물 설계누설율 및 환형공간 환기율
- C_1, C_2 : 일차격납건물 및 환형공간내 방사성물질 농도
- Q_1, Q_2 : 일차격납건물 및 이차격납건물로부터 방사성물질 방출율
- f : 환형공간 환기율중 배기분율
- E_f : 환형공간 배기계통 여과기 효율 (95%)

따라서, 이중격납건물 설계에 의한 방사성물질 방출 저감효과는 Q_1 및 Q_2 를 비교하여 평가할 수 있다.

NUREG-1465[4]에 제시된 방사선원중 5단계방출까지의 방사선원(노심용융 및 원자로압력용기 파손을 가정한 방사선원)을 이용하여 평가한 격납건물 설계특성에 따른 방사성물질 방출율은 그림 2.2와 같다. 그림 2.2에서 보듯이 단일격납건물 설계 대비 이중격납건물 설계의 방사성물질 방출율비(Q_2/Q_1)는 사고후 시간이 경과함에 따라 증가한다. 불활성기체(Kr-85)의 경우 방출율비는 3시간까지는 0.2이하이나 시간이 경과함에 따라 1.0에 근접한다. 할로젠(I-131)의 경우 방출율비는 사고후 24시간이내에서는 0.003이하이다. 이는 이중격납건물 설계에 의한 방사성물질(불활성기체 제외)의 실질적인 제거효율이 99.7% 이상임을 보여준다.

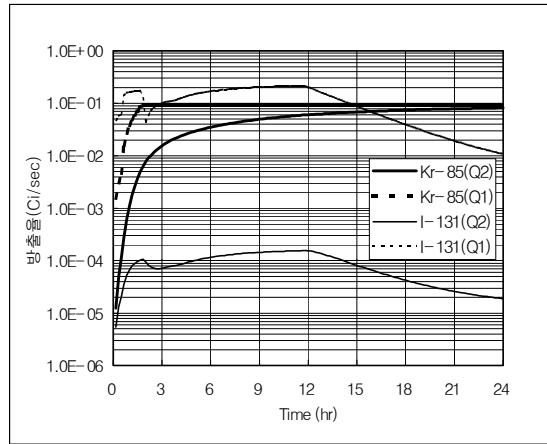


그림 2.2 국내신형원전 격납건물 설계변경에 따른 방사성물질 방출율 비교

3. 방사선영향 평가

본 절에서는 두 가지 격납건물의 구조에 따른 사고시 일반인에 대한 방사선영향을 결정론적 방법으로 평가한다. 평가의 단순화를 위하여 격납건물 설계차이에 의한 효과만을 평가하며, 격납건물 설계 특성은 다음의 3가지 경우로 구분된다.

Case0	이중격납건물 격납건물 설계누설율 : 0.5%/day (국내신형원전 2단계설계)
Case1	단일격납건물 격납건물 설계누설율 : 0.5%/day
Case2	단일격납건물 격납건물 설계누설율 : 0.15%/day (국내신형원전 3단계설계)

결정론적 방법은 원전의 부지승인 및 건설허가 신청단계에서 요구되는 것으로 노심용융을 가정한 가상사고에 대해 부지주변 일반인에 대한 방사선량을 평가하는 방법으로 그 가정이 매우 보수적이며 평가결과는 10CFR50.34의 제한구역경계에서 선량기준을 만족해야 한다.

3.1 방사선영향 평가

방사선량 평가는 제한구역경계 설정 요건 및 비상계획 단순화 요건의 만족성 평가에 사용된다. 제한구역경계 설정 요건은 10CFR50.34를 근거로 하며 이를 평가하는 경우에는 대형냉각재상실사고로 인한 노심용융사고를 가정하며 격납건물로 방출된 방사성물질의 제거과정이나 대기로 방출된 방사성물질의 확산조건은 매우 보수적으로 가정한다.

원전 사고에 대비한 비상계획 관련 요건은 10CFR50.47을 근거로 하며 국내신형원전에서는 특별히 사고초기에 대비한 비상계획 구역을 부지경계이내로 축소하기 위한 비상계획 단순화 요건을 기본 설계요건으로 설정한 바 있다. 비상계획 단순화 요건을 평가하는 경우에는 노심용융 및 원자로압력용기

파손사고를 가정하며 방사성물질의 제거과정이나 확산조건은 현실적(Best-Estimate)으로 가정한다. 상기 두 가지 방법의 비교는 표 3.1에 제시된다.

표 3.1 방사선량 평가방법

설 계 변 수	제한구역경계 설정
초기사고 및 사고결과	LOCA, 노심용융, RPV 건전, 격납건물 건전
방사선원 적용 (NUREG-1465)	3단계까지 적용 (Early In-Vessel Release)
살수제거계수	STARNAUA
대기확산인자 (Beaver Valley 기상자료)	상위 0.5%
피폭경로	방사성물질에 의한 외부피폭 및 호흡에 의한 내부피폭
방사선량 분석 코드	STARDOSE
방사선량 평가기간	사고후 임의 2시간
방사선량 평가 지점 (거리)	500m ~ 1000m

방사선량 평가식은 다음과 같다.

$$D_{EAB} = (x/Q)_{2hr} \cdot \sum_i Q_{i,2hr} \cdot (F_{i,ext} + B \cdot F_{i,inh})$$

- D_{EAB} : EAB선량 (제한구역경계 설정 요건의 만족성 평가를 위한 선량)
 x/Q_{2hr} : 사고후 2시간 및 임의 시간간격 t에 대한 대기확산인자
 $Q_{i,2hr}$: 핵종 i의 사고후 2시간동안 방출량 및 임의 시간간격 t동안 방출량
 $F_{i,ext}, F_{i,inh}$: 핵종 i의 외부피폭선량 및 내부피폭선량 확산인자
 B : 호흡률

본 평가에서는 NUREG-1465의 방사선원 분석방법을 사용하고, 대기확산인자 평가방법은 R.G 1.145[5]에 따르며, 기상자료는 포괄부지를 고려하여 System80+ 설계의 참조부지인 미국 Beaver Valley의 기상자료를 사용한다. 또한 호흡률 및 선량환산인자는 ICRP-30[6]을 바탕으로 미국 EPA에 의해 FGR No.11[7] 및 FGR No.12[8]로 제시된 값을 사용한다. 격납건물의 살수제거계수는 STARNAUA Code[9]의 분석결과를 이용하며, 방사선량 평가에는 STAR DOSE Code[10]를 사용한다.

국내신형원전 격납건물 설계유형에 따른 제한구역경계에서의 EAB선량 평가결과는 각각 그림 3.1과 같다.

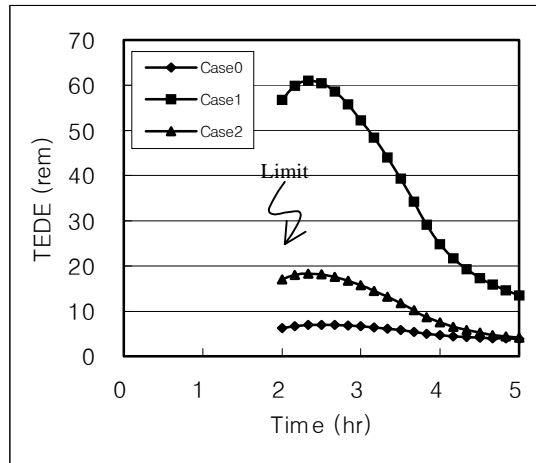


그림 3.1 사고후 시간대별 EAB선량 평가결과
($x/Q=8.92E-04\text{sec}/\text{m}^3$)

4. 결론

본 논문에서는 국내신형원전의 격납건물 설계유형별 방사선영향에 대한 사례분석을 수행하였다. NUREG-1465의 방사선원 분석방법을 적용하고, 대기확산인자 평가방법은 R.G 1.145[5]에 따라 계산된 결과를 사용하였으며 국내신형원전의 포괄부지 기상자료인 미국 Beaver Valley의 기상자료를 적용하여 사고후 2시간 동안 방사선량을 평가 하였다. 평가결과 제한구역경계거리에서 단일격납건물의 경우는 격납건물 설계누설율 0.15%/day 인 경우에 만족할 수 있었으며 이중격납건물의 경우는 설계누설율 0.5%/day 이며 환형공간 배기계통을 고려할 경우 제한구역설정 요건을 만족하는 것으로 나타났다.

5. 참고 문헌

- 1) "차세대원전 설계최적화 추진(안)," 한국전력공사, 1999. 6.
- 2) KRC-92N-J11, "차세대원자로 기술개발(I) 1권 : 차세대원전 기본요건(요약보고서)," 한국전력공사, 1994.
- 3) EPA 400-R-92-001, "Manual of Protective Action Guides and Protective Actions for Nuclear Incidents," US EPA, 1992.
- 4) NUREG-1465, "Accident Source Terms for Light Water Nuclear Power Plants," US NRC, 1995.
- 5) Regulatory Guide 1.145, "Atmospheric Dispersion Models for Potential Accident Consequence Assessments at Nuclear Power Plants," Rev.1, US NRC, 1982.
- 6) ICRP Publication 30, "Limits for Intakes of Radionuclides by Workers," ICRP, 1979.
- 7) Federal Guidance Report No.11, EPA-520-1-88-020, "Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion," US EPA, 1988.
- 8) Federal Guidance Report No.12, EPA-402-R-93-081, "External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil," US EPA, 1993.
- 9) "STARNAUA – A Code for Evaluating Severe Accident Aerosol Behavior in Nuclear Power Plant Containments," Rev. 1.02, Polstar Applied Technology, Inc., 1996.
- 10) "STARDOSE User Manual," Rev.0, Polestar Applied Technology, Inc., 1998.
- 11) KNGR(II) Document, N-001-END461-001, "New Source Term Study Report," KOPEC, 1999.

- 12) "MAAP4 - Modular Accident Analysis Program for LWR Power Plants," EPRI, 1994.
- 13) NUREG/CR-4691, "MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS)," US NRC, 1990.
- 14) KNGR1400(II) Document, N-001-END419-001, "PSA Report (Level 2)," KOPEC, 1998.
- 15) KNGR1400(II) Document, N-001-END419-002, "PSA Report (Level 3)," KOPEC, 1999.
- 16) ICRP Publication 60, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," ICRP, 1991.