2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

국내 가동중 원전에 대한 대체 방사선원항 적용성 평가

Evaluation of Applicability of Alternative Source Terms to Operating Nuclear Power Plants in Korea

임 석남*, 박 연선*
남 기문**, 송 덕빈**, 배 영직**, 이 여종**, 정 찬영**

*한국수력원자력㈜
서울 강남구 삼성동 167
**한국전력기술㈜
경기도 용인시 구성읍 마북리 360-9

요 약

NRC에서는 기존 설계기준사고(DBA) 평가시 방사선원항으로 사용된 TID-14844[1] 및 Regulatory Guide 1.4[2], 1.25[3], 1.77[4]을 대체하는 방사선원항과 관련하여 NUREG-1465[5] 및 Regulatory Guide 1.183[6]을 1995년 및 2000년에 각각 발표하였다. 이 보다 앞선 1990년 ICRP 에서는 방사선량 기준 및 개념과 관련한 새로운 권고안으로 ICRP-60[7]을 발행하였다.
국내에서도 신형경수로(APR1400) 설계에서 설계기준사고 분석시에 대체 방사선원항을 적용하여 유효선량을 평가한 바 있으나[8], 해외에서 개발된 전산프로그램이 사용되었다.
한편, 한국수력원자력㈜와 한국전력기술㈜에서는 대체 방사선원항 및 유효선량 개념의 선량 평가체계를 반영한 새로운 설계기준사고 방사선영향 분석용 전산프로그램인 DBADOSE[9]를 개발하였으며 이를 사용하여 고리 3,4호기 설계기준사고를 재분석하였다. 분석결과, 안전여유도의 추가확보가 가능하여 몇 가지의 보수적인 설계변수나 운전절차가 완화되거나 단순화될 수 있으며 이로 인해 가동중 원전의 경제성 및 운용성이 향상될 수 있을 것으로 평가되었다.
본 논문에서는 대체 방사선원항의 고리 3,4호기 적용과 관련한 설계기준사고 재분석 및 유효선량 평가방법, 주요설계변수의 완화에 따른 민감도 분석방법 및 결과를 소개한다.

Abstract

In 1995 and 2000, NRC issued NUREG-1465 and Regulatory Guide 1.183 with respect to alternative source terms(AST) replacing the existing source terms of TID-14844 and Regulatory Guide 1.4, 1.25, and 1.77 for radiological design basis accidents(DBA) analysis. In 1990, ICRP published ICRP Pub. 60 which represents new recommendations on dose criteria and concepts.
In Korea, alternative source terms were used for evaluation of effective doses for design basis accidents of advanced power reactor(APR1400) using the computer program developed by an overseas company.
Recently, DBADOSE, new computer program for DBA analysis incorporating AST and effective dose concept was developed by KHNP and KOPEC, and reanalysis applying AST to operating nuclear power plants, Kori units 3&4 in Korea using DBADOSE has been performed. As the results of this analysis, it was concluded that some conservative variables or operation procedures of operating plants could be mitigated or simplified by virtue of increased safety margin and consequently, economical and operational benefits ensue.
In this paper, methodologies and results of Kori 3&4 DBA reanalysis and sensitivity analysis for mitigation of main design variables are introduced.

1. 서 론

NRC는 1995년 및 2000년에 NUREG-1465 및 Regulatory Guide 1.183을 각각 발표하면서 대체 방사선원항 및 이의 적용방법 등을 제시하였다. 또한, 1990년 ICRP는 Pub. 60을 통해 방사선량 기준 및 선량개념과 관련한 새로운 주권고안을 발표하였다.

이번에 개발된 설계기준사고분석용 전산프로그램인 DBADOSE는 기존 방사선원항 및 결정장기개념에 근거한 선량평가방법을 적용한 사고시 선량평가는 물론, Regualtory Guide 1.183에 제시된 대체 방사선원항 및 ICRP Pub. 60에 제시된 유효선량개념의 선량평가방법을 적용한 선량평가도 가능한 전산코드이다.

DBADOSE를 사용하여 대체 방사선원항을 국내 가동중 원전에 적용하기 위하여 고리 3,4호기를 대상으로 최종안전성분석보고서[10]에 제시된 사고들에 대한 대체 방사선원항 및 선량평가방법을 사용한 재분석, 설계여유도 확인 및 변경가능한 설계변수들의 완화에 따른 민감도분석이 수행되었다.

본 논문에서는 대체 방사선원항의 고리 3,4호기 적용과 관련한 설계기준사고 재평가 및 주요 설계변수의 완화에 따른 민감도 분석방법 및 결과를 소개한다

2. 방사선원항 및 선량평가체계

본 장에서는 대체 방사선원항 적용과 관련하여 사용한 사고시 방사선원항 및 선량평가체계에 대하여 기술한다.

2.1 방사선원항

사고시 방사선원항은 사고발생시점에 냉각재, 핵연료 간극, 원자로 노심 등으로부터 외부로 방출가능한 방사성물질을 일컫는데, 핵종 종류, 방출량 및 방출시간, 화학적 형태 등으로 나타내며 설계기준사고 분석에 사용된다.

지금까지 사용되어 왔던 방사선원항 및 분석방법은 TID-14844 및 Regulatory Guide 1.4, 1.25, 1.77 등에 제시되었다. TID-14844 발간 이후 30여년동안 중대사고에 대한 실질적인 이해가 증대되면서 설계기준사고에 적용될 보다 물리적이며 실제적인 방사선원항 개발의 필요성이 제기되었으며, TMI-2 발전소 사고를 계기로 보다 가속화되었다. 이에 따라, 1995년 2월에 NRC는 이와 같은 수 십년 간의 중대사고 연구결과를 종합하여 NUREG-1465를 발간하였으며 이를 통해 새로운 방사선원항을 제시하였다. 또한 NRC는 2000년 7월에 Regulatory Guide 1.183을 발표하면서 대체 방사선원항 및 이의 실제 설계에의 적용방법 등을 제시하였다.

TID-14844, Regulatory Guide 1.25 및 Regulatory 1.183에 각각 제시된 기존 및 대체 방사선원항은 표 2-1 및 표 2-2와 같다.

2.2 선량평가체계

기존 사고시 선량평가체계에 따르면, 사고시 소외주민의 방사선량은 전신선량 및 갑상선선량에 대하여 평가하는데, 전신선량은 주로 불활성기체에 의한 것이며 갑상선선량은 방사성요오드의 호흡에 의한 것이다. 1997년 1월, NRC는 10 CFR Part 21, 50, 52, 54, 그리고 100의

법규를 개정하면서 제한구역 및 저인구지대에 대한 요건은 유지하였으나, 관련 선량기준에 있어서는 전신 및 갑상선 각각에 대한 두가지 다른 선량기준을 총유효선량당량(total effective dose equivalent, TEDE)으로 대체하였다. 구체적으로는, 기존 사고시 선량한도인 전신 0.25 Sv 및 갑상선 3 Sv가 총유효선량당량 0.25 Sv로 대체되었다.

표 2-1. LOCA 방사선원항

항　　목	기존 방사선원항	대체 방사선원항
핵종 구분	2개 그룹(불활성기체,요오드)	8개 그룹(불활성기체, 요오드, 알칼리금속 등)
방출량	불활성기체 : 100% 요오드 : 50%	불활성기체 : 100% 요오드 : 40% 알칼리금속 : 30%
방출시간	순간방출	1.8 시간에 걸친 연속방출
화학적 형태	원소형 : 91 % 유기형 : 4 % 입자형 : 5 %	원소형 : 4.85 % 유기형 : 0.15 % 입자형 : 95 %

표 2-2 핵연료 간극내 Non-LOCA 방사선원 분율

항　　목	기존 방사선원항	대체 방사선원항
I-131	0.10	0.08
Kr-85	0.30	0.10
기타 불활성기체	0.10	0.05
기타 요오드핵종	0.10	0.05
알칼리금속	-	0.12

기존 사고시 선량평가체계에서는, 사고에 따른 소외주민의 방사선량은 제한구역경계에서 사고 후 최초 2시간에 대하여, 그리고 저인구지대외곽경계에 대해서는 30일 사고기간 동안에 대하여 계산된다. 그러나, 대체 방사선원항에서는 노심핵종이 단계적으로 방출되고, 사고 후 약 30분에 비로서 상당량의 핵분열생성물 누출이 시작된다고 가정한다. 2시간 피폭기간이 방사성물질 누출개시 후 바로 시작된다는 가정은 대체 방사선원항에 있어서의 이러한 단계적 방출가정과 모순되기 때문에 10 CFR 50.34에서는, 제한구역경계 및 저인구지대외곽경계에서의 사고시 선량한도와 관련해서 제한구역경계에 위치한 개인에 대해서는 가상 핵분열생성물 방출개시 후 임의의 2시간동안, 저인구지대외곽경계에 위치한 개인에 대해서는 가상 핵분열생성물 방출로 발전소 주변에 형성된 방사능운이 전부 지나갈 동안에 대하여 각각 0.25

Sv TEDE를 초과하지 않도록 요건을 명시하고 있다.

또한, 1990년 ICRP는 Pub. 60을 통해 방사선량 기준 및 선량개념과 관련한 새로운 주권고안을 발표하였는데, 이는 방사선과 인체의 상호작용 및 방사선 영향 등과 관련한 그 동안의 연구결과를 반영한 것이며 유효선량개념을 채택하였다.

3. 고리 3,4호기에 대한 대체 방사선원항 적용

본 장에서는 해외원전에서의 대체 방사선원항 적용사례를 간략히 살펴보고, 국내원전인 고리 3,4 호기에 대체방사선원항 및 유효선량을 적용하여 기존 고리 3,4 호기 최종안전성분석보고서의 설계기준사고를 재평가하고, 제한구역경계, 저인구지대외곽경계, 주제어실에서 방사선량을 평가하여 선량기준과 비교한 후 안전여유도를 확인하며, 설계기준을 만족하는 범위 내에서 민감도분석을 통해 대체방사선원을 적용하는 경우에 가능한 여러 가지 설계완화 또는 설계변경(안)을 도출하는 과정 및 결과를 기술한다.

3.1 해외원전에서의 대체 방사선원항 적용사례

NUREG-1465 및 Regulatory Guide 1.183 의 발행 이후 미국내 일부 가동중 원전에서는 대체 방사선원항을 적용하여 공학적안전설비계통의 운영 및 시험절차 등을 완화하는 인허가변경이 진행중이거나 또는 완료된 바 있다. 표 3-1 은 미국내 일부 원전에서의 대체 방사선원항 적용사례를 요약한 것이다

3.2 대체 방사선원항 적용방법

대체방사선원항의 시범적용 대상 원전으로는 고리 3,4호기를 선정하였다. 고리 3,4호기는 1985 년 및 1986 년 상업운전을 시작하였으며 전기출력은 호기당 950MW 이다.

대체방사선원항의 적용방법은 다음과 같다.

- 고리 3,4 호기 공학적안전설비계통 설계특성 검토
- 기존 설계기준사고 분석내용 검토
- 대체방사선원 적용 설계기준사고 재분석
- 대체방사선원 및 유효선량 적용에 따른 안전여유도 평가
- 설계변수의 변화에 따른 민감도분석 및 유효선량 평가
- 설계변경(안) 도출
- 위험도영향 및 환경영향 평가

표 3-2에서는 기존의 고리 3,4호기 설계기준사고 분석방법 및 대체 방사선원을 적용한 설계기준사고 분석방법을 비교하였다.

표 3-1 해외원전에서의 대체 방사선원항 적용사례

발 전 소 명	적 용 사 례
Indian Point 2	• 격납건물 Fan Cooler 계통의 활성탄여과기 및 HEPA여과기 요건 삭제 • 노심교체전 미임계시간 요건 완화 : 174 시간 → 100 시간 • 핵연료재장전기간 동안 personnel airlock 개방 허용
Surry 1&2	• 핵연료재장전기간 동안 equipment hatch, personnel airlock 개방 허용 • 핵연료재장전기간 동안 격납건물 및 핵연료건물 HVAC 요건 삭제 • 격납건물 감압률 요건 완화 : 1 시간 이내 대기압 이하 → 1 시간 이내 0.5 psig, 4 시간 이내 대기압 이하
Beaver Valley 1&2	• 핵연료재장전기간 동안 equipment hatch, personnel airlock 개방 허용
Crystal River 3	• 주제어실 비상환기계통의 방사선감시기 interlock 요건 삭제 • 주제어실 inleakage 관련 추적기체시험 요건 삭제 • 보조건물 HVAC 여과기 시험 요건 삭제
Three Mile Island 1	• 핵연료재장전기간 동안 personnel airlock, emergency airlock 개방 허용 • 비상노심냉각계통 누설률 요건 완화

표 3-2 고리 3,4호기 설계기준사고 분석방법 비교

구 분		기존 방사선원항 적용	대체 방사선원항 적용
방사선원	LOCA	TID-14844 Regulatory Guide 1.4	NUREG-1465 Regulatory Guide 1.183
	Non-LOCA	Regulatory Guide 1.25, 1.77	Regulatory Guide 1.183
격납건물 내부 방사성물질 제거 (LOCA)		ANSI/ANS-56.5 SRP-6.5.2	ANSI/ANS-56.5 SRP-6.5.2 NUREG/CR-5966, 6189
방사선량 평가		Regulatory Guide 1.4 (전신선량 및 갑상선선량 평가)	ICRP-68, 71, 72 (유효선량 평가)

3.3 설계기준사고 재분석 및 안전여유도 확인

설계기준사고 재분석의 목적은 기존의 설계기준사고의 분석결과와 대체 방사선원항의 적용에 따른 분석결과를 비교하고, 안전여유도를 확인하며, 민감도분석에 필요한 정보를 구하기 위한 것이다.

대체방사선원항의 적용에서는 기존 고리 3,4 호기 최종안전성분석보고서에 기술된 설계특성을 최대한 이용하였으며, 고리 3,4 호기 최종안전성분석보고서의 설계변수 중 대체방사선원의 적용과 관계없이 고정변수로 사용되는 것은 다음과 같다.

- 부지특성 관련자료 (기상자료, 대기확산인자, 제한구역경계/저인구지대외곽경계 거리)
- 설계자료 (노심재고량 및 계통내 방사선원, 건물배치 관련 자료, 설계기준사고 열수력분석(사고시나리오, 핵연료손상률, 출력첨두인자, 냉각재방출량) 자료)

설계기준사고 재분석에 앞서 다음과 같은 고리 3,4 호기 공학적안전설비계통(격납건물 격리계통, 격납건물 살수계통, 주제어실 비상환기계통, 핵연료건물 비상환기계통)의 설계특성에 대한 검토가 선행되었다.

분석대상 사고는 기존 고리 3,4 호기 최종안전성분석보고서에서 방사선량 평가가 수행된 설계기준사고들로서 다음과 같다.

- 증기배관파단 사고 (SLB)
- 교류전원상실 사고 (LOAC)
- 원자로냉각재펌프 회전자고착 사고 (RCP LR)
- 제어봉집합체이탈 사고 (CEA)
- 유출배관파단 사고 (LDLB)
- 증기발생기전열관파단 사고 (SGTR)
- 원자로냉각재상실 사고 (LOCA)
- 기체폐기물계통 고장 (GWSF)
- 액체폐기물계통 고장 (LWSF)
- 핵연료취급 사고 (FHA)

상기 사고에 대한 기존 분석방법 및 결과에 대한 검토 후 DBADOSE 전산프로그램을 사용한 재분석을 수행하였다.

재분석 결과를 사용하여 각 설계기준사고에 대한 방사선량 계산결과와 선량기준을 비교하여 다음과 같이 안전여유도(Safety Margin)를 평가하였다.

$$SM(\%) = \left(1 - \frac{D_{Calculated}}{D_{Criteria}}\right) \times 100(\%)$$

$D_{calculated}$: 제한구역경계 또는 주제어실 방사선량

$D_{criteria}$: 제한구역경계 또는 주제어실 선량기준

각 설계기준사고별 안전여유도는 표 3-3 과 같다. 표 3-3 에 나타낸 바와 같이, 대체 방사선원항 및 유효선량개념을 적용한 재분석 결과는 기존 분석 결과 대비 평균 10 ~ 20 %의 안전여유도 증가를 보여주며, 주요사고 재분석 결과 최소 75% 이상의 안전여유도 확보가 가능한 것으로 나타났다.

3.4 민감도분석 및 설계변경(안) 제시

민감도분석은 대체 방사선원을 적용한 유효선량 평가결과로 나타난 각 설계기준사고의 안전여유도를 근거로 한다. 민감도분석 대상은 공학적판단 및 해외원전에서의 대체방사선원 적용에 따른 설계변경 사례 등을 근거로 다음과 같이 선정하였다.

- 격납건물 최대허용누설률
- 격납건물 살수계통
- 격납건물 격리계통
- 주제어실 비상환기계통
- 주제어실 비여과 누설유입률
- 원자로냉각재 비방사능
- 핵연료교체작업(핵연료교체 가능시간, 핵연료건물 비상배기계통, 격납건물출입구 격리요건)

표 3-3 고리 3,4 호기 현설계에서 설계기준사고 재분석 결과

설계기준사고	선량기준(rem)	유효선량(rem)	안전여유도(%)[주)]
주증기배관파단 사고	25	2.65	76.6 → 89.4
교류전원상실 사고	2.5	0.00397	99.7 → 99.8
원자로냉각재펌프 회전자고착 사고	2.5	1.45	18.2 → 41.8
제어봉집합체이탈 사고	6.25	0.583	79.7 → 90.6
유출배관파단 사고	25	3.79	78.9 → 84.8
증기발생기전열관파단 사고	25	5.36	66.3 → 78.6
원자로냉각재상실 사고	25	7.25	48.0 → 71.0
기체폐기물계통 고장	2.5	2.01	25.3 → 19.6
액체폐기물계통 고장	2.5	0.750	56.8 → 70.0
핵연료취급 사고	6.25	1.13	28.1 → 81.9

주) 제한구역경계에서의 기존 방사선원항 적용 장기선량 평가결과 → 대체 방사선원항 적용 유효선량 평가결과

민감도분석에서는 계통의 안전등급 하향조정 또는 제거하는 경우를 가정하여, 상기의 주요 설계변수들을 일정범위까지 변화시키면서 제한구역경계 및 주제어실(LOCA경우)의 방사선량을 유효선량으로 평가하고, 평가결과 일정수준의 안전여유도가 확보되는 지를 확인하였다. 민감도분석 과정에서 중복계산을 피하기 위하여 각 계통의 설계변수의 변동에 따라 분석방법이나 방사선량이 영향을 받는 설계기준사고에 대해서만 민감도분석을 수행하였으며 대상 설계변수들의 조합에 따른 민감도분석은 제외하였다.

민감도 분석결과를 기본자료로 하여 도출된 설계변경(안)은 표 3-4 와 같다. 표 3-4 에 제시된 설계변경(안)은 민감도분석 방법에서 고정변수로 사용된 주요 변수들에 대한 불확실성 또는 변경 가능성을 고려하여 최소 안전여유도를 약 40%로 설정하고 각 설계변경 대상 및 설계변수별 최소 안전여유도에 해당하는 값을 확인하는 방법으로 산출하였다.

표 3-4 고리 3,4 호기 설계변경(안)에 따른 설계기준사고 분석결과

계 통 / 설 계 변 수		현설계	설계변경(안)	안전여유도(%)주 1)
격납건물 최대허용누설률		0.1 %/일	0.2 %/일	48.0 → 40.8
격납건물 배기계통 격리 지연시간		5 초	2 분	48.0 → 42.4
격납건물 살수첨가계통		설치	삭제	48.0 → 55.2
주제어실 비상환기계통 작동 지연시간		51 초	30 분	39.7 주 2) → 81.7
주제어실 비여과 누설유입률		0 cfm	200 cfm	39.7 주 2) → 48.4
원자로냉각재 비방사능(I-131 DE)		1.0 uCi/gm	2.0 uCi/gm	66.3 → 57.4
핵연료교체작업	핵연료교체 가능시간 (미임계후)	100 시간	24 시간	28.1 → 67.7
	비상배기계통	작동가능상태 유지	미작동	28.1 → 36.2
	격납건물출입구 격리요건	유지	삭제	28.1 → 36.2

주 1) 제한구역경계에서의 기존 방사선원항 적용 장기선량 평가결과 → 대체 방사선원항 적용 유효선량 평가결과
2) 주제어실에서의 기존 방사선원항 적용 장기선량 평가결과 → 대체 방사선원항 적용 유효선량 평가결과

상기 내용은 민감도분석 결과와 안전여유도 만을 근거로 도출된 설계변경이 가능한 항목이다. 그러나, 실제 설계변경의 적용에 있어서는 설계변경과 관련한 규제요건과 관련 절차서를 검토하여야 하며 위험도 및 환경에 대한 영향을 평가하여야 한다. 또한, 규제요건을 만족하는 경우에도 원전 운영측면에서 관련 요건 및 절차서의 만족여부 및 계통의 유지,보수 측면에서의 적용가능성이 병행 검토되어야 한다.

향후에는, 위의 여러 가지 채택가능한 설계변경(안) 중 최종 선정된 (안)들의 조합에 따른 민감도 분석과 관련 규제요건 검토, 위험도/환경영향 평가, 운영측면에서의 적용가능성 검토 등이 수행될 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 다음과 같은 단계를 거쳐 대체 방사선원항 및 유효선량개념의 국내원전인 고리 3,4호기에의 적용성을 평가하였다.

- 설계기준사고 재평가
- 민감도분석 수행
- 안전여유도 평가
- 설계변경(안) 도출

설계기준사고 재평가 결과, 대체 방사선원항 및 유효선량개념을 적용할 경우 각 설계기준사고마다 편차가 심하기는 하나 대체적으로 기존 결과보다 안전여유도가 상당부분 증가함을 확인할 수 있었다.

설계기준사고 재평가 결과 등에 근거하여 선정된 몇 가지 계통 및 설계변수에 대한 민감도분석 결과, 안전여유도를 어느 정도 유지하며 설계완화가 가능한 것으로 나타났으며 각 항목별 안전여유도를 일정수치로 고정한 상태에서 설계변경(안)을 도출하였다.

이상에서, 대체 방사선원항 및 유효선량개념을 국내 가동중 원전에 도입할 경우 추가적인 안전여유도 확보가 가능하며 이에 따라 최소 안전여유도를 유지하면서 일부 계통 또는 설계변수에 대한 요건이 완화되거나 운영절차의 단순화가 가능함으로써 가동중 원전의 효율성 및 경제성이 향상될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1) TID-14844, “Calculation of Distance Factors for Power and Test Reactor Sites”, US AEC, 1962.

2) Regulatory Guide 1.4, “Assumptions Used for Evaluating the Potential Radiological Consequences of a Loss of Coolant Accident for Pressurized Water Reactors”, Rev.2, US NRC, 1974.

3) Regulatory Guide 1.25, “Assumptions Used for Evaluating the Potential Radiological Consequences of a Fuel Handling Accident in the Fuel Handling and Storage Facility for Boiling and Pressurized Water Reactors”, US NRC, 1972.

4) Regulatory Guide 1.77, “Assumptions Used for Evaluating a Control Rod Ejection Accident for Pressurized Water Reactors”, US NRC, 1974.

5) NUREG-1465, “Accident Source Terms for Light Water Nuclear Power Plants”, US NRC, 1995.

6) Regulatory Guide 1.183, “Alternative Radiological Source Terms for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors”, US NRC, 2000.

7) ICRP Publication 60, “1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, ICRP, 1991.

8) 이 여종 외, “대체 방사선원항 및 ICRP-60 체계를 적용한 차세대원전 설계기준사고시 방사선량 평가”, 한국원자력학회 2001 춘계 학술발표회 논문집, 2001.

9) 배 영직 외, “설계기준사고시 대체 방사선원항 적용에 따른 방사선량 계산 프로그램 (DBADOSE) 개발”, 한국원자력학회 2002 추계학술발표회 논문집, 2002.

10) “KNU 5&6 Final Safety Analysis Report”, Amendment 19, 1997.