2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

설계기준사고시 대체방사선원 적용에 따른 방사선량 계산 프로그램(DBADOSE) 개발

Development of Dose Calculation Program(DBADOSE) Incorporating Alternative Source Term Due to Design Basis Accident

임석남*, 박연선*
남기문**, 배영직**, 이여종**, 정찬영**

* 한국수력원자력(주)
서울특별시 강남구 삼성동 167

** 한국전력기술(주)
경기도 용인시 구성읍 마북리 360-9

요 약

기존 가압경수로형(PWR) 발전소의 인허가를 위한 설계기준사고시 방사선량 분석에는 TID-14844[1] 및 Reg. Guide 1.4[2]에 제시되어 있는 사고시 방사선원항이 적용되어 왔다. 그러나, TID-14844 발간 이후 30여년동안 중대사고에 대한 실험 및 연구결과에 따라 설계기준사고에 적용될 보다 물리적이며 실제적인 방사선원항 개발이 필요하게 되었으며 이에 따라 1995년 NRC는 NUREG-1465[3]를 통해 새로운 방사선원항을 제시하였다. 또한, 국제방사선방호위원회 (ICRP)에서는 ICRP-9[4], ICRP-26[5], ICRP-60[6]의 발행을 거듭하여 지속적으로 선량평가기준 및 방법을 개정하여 왔으며, ICRP-26 이후부터는 장기별 선량평가 및 선량기준 대신에 장기별 가중치를 고려한 유효선량개념을 도입한 선량평가 및 선량기준을 권고하였다. 이에 따라, 기존원전 및 신규원전의 설계기준사고시 NUREG-1465로 대표되는 대체방사선원항과 ICRP-60으로 대표되는 방사선량 평가체제를 적용한 전산프로그램 (DBADOSE로 명명)을 개발하게 되었다. 본 DBADOSE 전산프로그램은 기존의 사고시 방사선량평가 전산프로그램인 POSTDBA[7] 및 STARDOSE[8]의 평가결과와 비교 검증하였으며, 검증결과 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 본 프로그램은 향후 개정이 예상되는 국내법규에 준한 원전 인허가 적합성 평가에 사용될 것이다.

Abstract

Source terms presented in TID-14844 and Regulatory Guide 1.4 have been used for radiological analysis of design basis accidents for licensing existing pressurized water reactor (PWR). However, more realistic and physically-based source terms based on results of study and experiments for about 30 years after the publication of TID-14844 was developed and presented in NUREG-1465 published by NRC in 1995. In addition, ICRP has been revising dose concepts and criteria through the publication of ICRP-9, 26, 60 and recommended effective dose concepts rather than critical organ concept since the publication of ICRP-26. Accordingly, multipurpose computer program called DBADOSE incorporating alternative source terms in NUREG-1465 and effective dose concepts in ICRP-60 was developed. Comparison of results of DBADOSE with those of POSTDBA and STARDOSE was performed and verified and no significant difference and inaccuracy were found. DBADOSE will be used for evaluation of licensing according to the domestic laws that are expected to be revised in the near future.

1. 서 론

지금까지 가압경수로형(PWR) 발전소의 인허가를 위한 설계기준사고 분석에 있어서

TID-14844 및 Reg. Guide 1.4에 제시되어 있는 사고시 방사선원항이 적용되어 왔다. 그러나, NRC는 1962년 TID-14844 발행 이후 30여년동안 수행된 중대사고에 대한 실험 및 연구결과에 따라 설계기준사고에 적용될 보다 물리적이며 중대사고시의 핵분열생성물 방출거동 및 격납건물내 거동을 고려한 실제적인 방사선원항인 NUREG-1465를 발행하였다.

또한, 국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 ICRP-2, ICRP-9, ICRP-26 및 ICRP-60 등의 발행을 통해서 지속적으로 선량평가방법 및 기준을 개정하여 왔으며, ICRP-26이후부터는 장기별 선량평가 및 선량기준 대신에 장기별 가중치를 고려한 유효선량 평가 및 선량기준을 권고하고 있다. NRC에서는 이를 원자력발전소를 비롯한 방사선과 관련된 시설의 인허가요건으로 채택하였다.

NRC는 NUREG-1465 방사선원을 기존의 TID-14844 및 Reg. Guide 1.4 방사선원을 대체하는 방사선원의 하나로 인정하였으며, NUREG-1465 또는 이와 유사한 새로운 방사선원항과 ICRP-26에 근거한 선량평가방법을 수용하기 위해 방사선방호관련법 (10CFR20, 10CFR50, 10CFR100 등)을 개정하였으며, 관련 규제 및 심사지침 (Reg. Guide 1.183[9] 및 SRP15.0.1)을 발행함으로써 기존원전 및 신규원전에 대한 대체방사선원항 적용관련 규제체계를 확립하였다.

국내에서도 과기부고시 제 2002-1호[10]를 통해 유효선량을 채택하였으며 대체방사선원의 적용과 관련해서는 현재 관련 법규의 개정이 진행중에 있으며 2003년경에는 과기부고시를 통해 법제화될 것으로 예상된다[11].

본 논문에서는 기존원전 및 신규원전의 설계기준사고시 방사선량 평가 및 관련 설계에 있어서 NUREG-1465로 대표되는 대체방사선원항과 ICRP-60으로 대표되는 방사선량 평가체제의 적용방법론을 개발하고, 이와 관련한 전산프로그램을 개발 및 검증하여 대체 방사선원항 및 ICRP-60의 적용기술을 확립하고자 하였다.

2. 프로그램 적용이론

2.1 방출량 평가모델

설계기준사고중에서 방사성핵종의 환경방출이 예상되는 사고는 초기 사고유형에 따라 아래와 같이 구분하며 각 사고별 방출특성 및 평가모델은 다음과 같다.

- 대형냉각재상실사고 (LOCA)
- 대형냉각재상실사고 외 사고 (Non-LOCA)
  - 주증기배관 파단사고 (Steam Line Break, SLB)
  - 주급수배관 파단사고 (Feedwater Line Break, FWLB)
  - 단일 원자로냉각재펌프 회전자고착사고 (RCP Locked Rotor, RCP LR)
  - 제어봉인출 사고 (Control Rod Ejection Accident, CEA)
  - 격납건물외부 소형냉각재유출배관 파단사고 (Letdown Line Break, LDLB)
  - 증기발생기 전열관파단사고 (S/G Tube Rupture, SGTR)
  - 사용후연료 취급사고 (Fuel Handling Accident, FHA)

2.1.1 대형냉각재상실사고(LOCA)

대형냉각재상실사고시 소외로의 방사성핵종 방출량 평가를 위해 다음과 같이 크게 5 개 구역으로 구분하였다.

- 격납건물내 살수구역
- 격납건물내 비살수구역
- 이중 격납건물을 고려한 환형(Annulus)구역
- 주제어실 또는 기술지원실 구역
- 소외(제한구역경계, 저인구지대)구역

상기 각 구역들에 대한 방사성핵종 농도 및 누적 방출량은 시간종속적 미분방정식을 사용하여 수치해석 방법으로 계산하며 평가모델은 그림 1 과 같다.

그림 1 에 표시된 각 변수들은 다음과 같다.

Ccore = 원자로 노심재고량 (Ci)
Cs = 격납건물 살수구역내의 방사능 농도 (Ci/ft^3)
Vs = 격납건물 살수구역 부피 (ft^3)
Cu = 격납건물 비살수구역내의 방사능 농도 (Ci/ ft^3)
Vu = 격납건물 비살수구역 부피 (ft^3)
M = 살수구역과 비살수구역간의 혼합률 (ft^3/hr)
Rc = 원자로노심으로부터 격납건물 대기중으로의 방출률 (1/hr)
R = 격납건물로부터의 환형공간으로의 누설률 (1/hr)
λ_S = 살수구역내 살수제거상수 (1/hr)
Ep = 격납건물 퍼지 필터 효율 (%)
C1 = 집수정구역(Anulus area)내의 방사능농도 (Ci/ ft^3)
V1 = 집수정구역 부피 (ft^3)
C2 = 환형공간(Anulus area)내의 방사능농도 (Ci/ ft^3)
V2 = 환형공간 부피 (ft^3)
Rf = 환형공간의 재순환률 (cfm)
Rv = 환형공간으로부터 대기중으로의 방출률 (cfm)

원자로노심으로부터 방출되는 방사성핵종은 불활성기체, 요오드 핵종, 알칼리메탈 핵종 등을 포함하여 총 8 개그룹으로 구분되며 이들 방사성핵종 그룹들은 물리적, 화학적 특성에 따라 살수에 의한 제거효과, 여과기에 의한 제거효과가 상이하다. 각 구역별 방사성핵종 농도 및 방출량 산출을 위한 평가모델은 다음과 같다.

가) 불활성기체

- 격납건물 대기

격납건물 대기내 불활성기체의 농도는 사고초기(t=0)에는 0 으로 가정하며, 일정시간 경과 후에는 표 1 의 식 (1)로 계산한다.

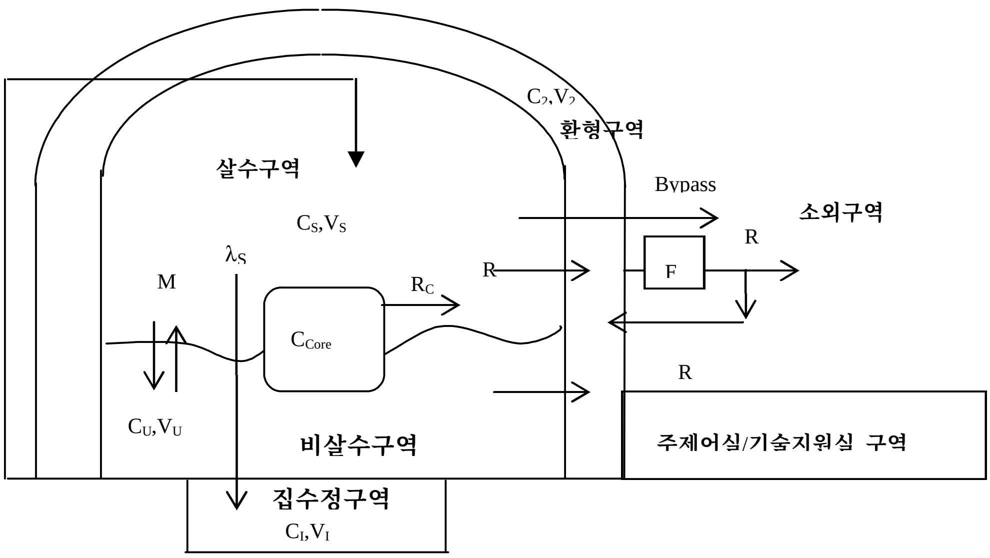

그림 1. LOCA 시 각 구역별 방사성핵종 농도 및 방출량 평가 모델

- 환형구역

  환형구역은 이중 격납건물을 가정할 경우 고려되는 구역으로 환형구역내 불활성기체 농도는 표 1 의 식 (2)로 계산하게 된다.

- 소외구역

  소외로의 총 방출량은 표 1 의 식 (3)로 계산하며 계산된 방출량은 제한구역경계 및 저인구지대에서 불활성기체에 의한 개인 방사선량을 평가하는데 사용된다.

- 주제어실구역

  주제어실내 방사능농도는 주제어실 흡입구의 방사능농도를 기초로 하여 결정되며 공기중 방사능 양을 감소시키는 공학적안전설비인 비상환기계통의 필터에 의한 제거효과가 고려되지만 불활성기체는 화학적 특성이 불활성이기 때문에 이를 고려하지 않는다. 표 1 의 식 (4)는 주제어실내 불활성기체 방사능농도를 계산하기 위한 미분방정식이다.

나) 요오드핵종

요오드핵종은 불활성기체와 달리 필터에 의한 제거 뿐만 아니라 살수계통에 의해 대부분 제거되므로 살수에 의한 제거 메커니즘이 중요하다. 살수제거 효과와 관련된 살수제거상수는 기존에는 SRP 6.5.2[12]모델을 준용하여 평가되었으나 NUREG/CR-5966[14]에서는 격납건물 살수에 의한 에어로졸 제거효과를 평가하는 단순하고 보다 실제적인 모델이 제시되고 있다. 따라서, DBADOSE 전산프로그램에서는 두 모델을 모두 고려할 수 있도록 하였다.

- 격납건물 대기

  표 1 의 식 (5)와 (6) 각각은 격납건물내 살수구역 및 비살수구역내의 요오드핵종 방사능농도 계산을 위한 미분방정식이다.

- 환형구역

  환형구역내 요오드핵종 방사능농도는 격납건물 대기로부터 유입되는 방사능농도와 환형구역 방출구를 통해 방출되는 분율 및 재순환필터에 의한 요오드핵종의 제거효과를 고려하여 표 1 의 식 (7)에 의해 계산된다.

- 소외구역

  소외구역에서의 요오드핵종 방사능농도는 표 1 의 식 (8)에 의해 계산되며 요오드핵종에 의한 전신선량은 불활성기체와 동일한 방법에 의해 평가되어지나 갑상선선량에 대해서는 호흡에 의한 내부피폭이 고려된다.

- 주제어실 및 기술지원실 구역

  주제어실이나 기술지원실에서의 요오드핵종 방사능농도는 소내 대기확산인자만큼 희석되어진 후 그림 2 에서와 같이 주제어실 비상환기계통에 설치된 필터에 의해 제거된 후 주제어실내로 유입된다. 표 1 의 식 (9)는 주제어실내 요오드핵종 방사능농도를 계산하는 식이고, 식(10)은 주제어실내 비상환기계통의 총 필터효율을 계산하는 식이며, 식 (11)은 주제어실내로 유입되는 총 공기유량을 계산하는 식이다.

다) 알칼리금속을 포함한 기타 방사성핵종 그룹

알칼리금속을 포함한 기타 핵종들은 화학적형태가 전량 입자형이라는 점만 제외하면 요오드핵종과 동일하다. 따라서, 동 핵종들에 의한 선량 계산식은 앞서 고려한 각 구역간 요오드핵종 방사능농도, 소외선량 및 주제어실내 선량에 대한 계산식 중에서 입자형 요오드핵종을 평가하는 식과 동일하다.

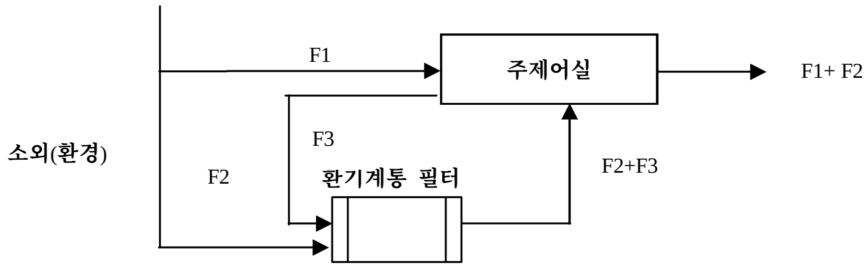

그림 2. 주제어실 또는 기술지원실 방사성핵종 농도 평가 모델

표 1. LOCA시 각 구역별, 방사성핵종 그룹별 농도 및 방출량 계산식

핵종 그룹명	구역명	수식번호	계산식
불활성 기체	격납건물 살수 및 비살수구역	(1)	$V\cdot dC/dt = R_c\times C_{core} - l_{dcy}\times V\times C-(Rl+Pg)\times C$
	환형구역	(2)	$V_a\cdot dC_a/dt=(1.0-f_b)\times Rl\times C-l_{dcy}\times V_a\times C_a-Rv\times C_a$
	소외구역	(3)	$dQ/dt=f_b\times(Rl+Pg)\times C+Rv\times C_a$
	주제어실구역	(4)	$dC_{CR}/dt=(R_i+f_1+f_2)\times C_Q-(l_{dcy}+R_t)\times C_{CR}$
요오드 및 기타 핵종	격납건물 살수구역	(5)	$V_s\cdot dC_s/dt=f_sR_cC_{core}-(l_s+l_{dcy})\cdot V_sC_s-f_s(Rl+Pg)C_s-M(C_s-C_u)$
	격납건물 비살수구역	(6)	$V_u\cdot dC_u/dt=(1-f_s)R_cC_{core}-l_{dcy}V_uC_u-(1-f_s)(Rl+Pg)C_u-M(C_u-C_s)$
	환형구역	(7)	$V_a\cdot dC_a/dt=Rl\cdot(1-f_b)\cdot\{f_sC_s-(1-f_s)C_u\}-\{l_{dcy}V_a+E_fR_f+R_v\}C_a$
	소외구역	(8)	$dQ/dt=(f_b\cdot Rl+(Pg\cdot(1-E_{pg}))\cdot(f_sC_s+(1-f_s)C_u)+(1-E_f)\cdot Rv\cdot C_a$
	주제어실구역	(9)	$dC_{CR}/dt=(R_i\times(1-E_t)+R_f)\times C_Q-(l_{dcy}+R_t)\times C_{CR}$
		(10)	$E_t=1.0-(1.0-E_i)\times(1.0-E_c)$
		(11)	$R_t=f_1+E_c\bullet f_3+f_2$
상기식의 요소들은 각각 다음과 같음. V:격납건물 자유체적 (ft^3), dC/dt : 격납건물 대기내 단위시간당 불활성기체 방사능농도 (Ci/ft^3 -sec), Rc :핵분열생성물의 원자로노심으로부터 격납건물 대기로의 방출률 (1/hr), C_{core} :노심재고량 (Bq) , l_{dcy} :붕괴상수 (1/hr), C :격납건물내 불활성기체 농도(Ci/ft^3), Rl: 격납건물 최대허용누설율 (ft^3/hr), Pg:퍼지율 (ft^3/hr), fb: 우회(bypass)되는 분율, Rv :환형구역 방출구를 통해 소외로의 방출률 (cfm), dQ/dt :단위시간당 소외로 방출되는 양(Bq/sec), E_f : 환형구역 재순환필터에 의한 요오드핵종 제거율, R_f :환형구역 재순환율 (cfm) E_c : 주제어실 재순환 필터효율(%), R_f :비상환기계통을 거치지 않고 총 유입되는 율 (1/sec), Fs : 살수구역 체적/격납건물 자유체적 비, M :살수구역과 비 살수구역의 혼합율 (cfm), f_s : 살수구역 체적/격납건물 자유체적 비, E_{pg} :격납건물 퍼지필터에 의한 요오드핵종 제거율, E_f :환형구역 재순환필터에 의한 요오드핵종 제거율 R_f :환형구역 재순환율 (cfm), E_I :주제어실 흡입 필터효율 (%), E_c : 주제어실 재순환 필터효율 (%) , f1 : 주제어실내 유입률(cfm), f2 : 재순환율(cfm), f3 : 비여과 누설유입률(cfm)			
아래첨자는 다음과 같음. a : 환형구역, i : intake, Q : 소외구역, s : spray, u : unspray, CR : control room			

2.1.2 대형냉각재상실사고외 사고(Non-LOCA)

Non-LOCA 설계기준사고시 환경으로의 방출이 가능한 주요 방사선원 및 방출경로는 그림 3 및 그림 4와 같다. 그림 3은 이차계통 증기발생기를 통한 방출의 경우이며, 그림 4는 격납건물이나 핵연료건물 등의 건물을 통한 방출의 경우이다. 방사성핵종의 환경방출률 $\dot{Q}$는 설계기준사고시 모든 방사선원에 대해 방출경로 p를 통해 방출되는 방출률의 합으로 다음과 같다.

$$\dot{Q} = \sum_p \dot{Q}_p \qquad \text{(식 12)}$$

또한, 방출경로 p는 다음과 같이 구분할 수 있다.

- Fuel (핵연료/핵연료 간극)→RCS (원자로냉각계통)→CTMT(격납건물)→Envir(환경)
- Fuel → RCS → ASG(Affected S/G) → Envir
- Fuel → RCS → ISG(Intact S/G) → Envir
- Fuel → RCS → CDNSR(응축기) → Envir
- Fuel → SFP(사용후연료저장조) → FB(핵연료건물) → Envir (핵연료취급사고의 경우)

따라서, 상기의 Non-LOCA에 대한 방출경로를 일반적인 방출경로로 다음과 같이 재정의할 수 있다.

- Fuel (핵연료/핵연료 간극) → RCS (원자로냉각계통, SFP냉각계통) → SCS(이차냉각계통, 응축기, 격납건물, 핵연료건물) → Envir(환경)

위에서 정의한 방출경로를 네 개의 Compartment로 구분하고 이를 각각 fuel, rcs, scs, env 라 하면, 사고후 이차계통을 통한 방출의 경우 방사능농도 및 방출량은 다음과 같이 계산한다. 특히 fuel에서 rcs로의 방출은 순간방출로 가정하고 방출경로를 뜻하는 아래첨자 p를 생략하면,

$$\frac{dC_{rcs}}{dt} = -(\frac{\dot{m}_{rs}}{M_{rcs}} + l)C_{rcs} \qquad \text{(핵연료손상 또는 Pre-accident Iodine Spike)} \quad \text{(식 13-a)}$$

$$\frac{dC_{rcs}}{dt} = -(\frac{\dot{m}_{rs}}{M_{rcs}} + l)C_{rcs} + R_{gis} \qquad \text{(Generated Iodine Spike)} \quad \text{(식 13-b)}$$

$$\frac{dC_{scs}}{dt} = (1 - f_{rs})\frac{\dot{m}_{rs}}{M_{scs}}C_{rcs} - (\frac{1}{DF_{se}}\frac{\dot{m}_{se}}{M_{scs}} + l)C_{scs} \qquad \text{(식 14)}$$

$$\dot{Q} = f_{rs}\dot{m}_{rs}C_{rcs} + \frac{1}{DF_{se}}\dot{m}_{se}C_{scs} \qquad \text{(식 15)}$$

$$\frac{dM_{rcs}}{dt} = -\dot{m}_{rs} + \dot{m}_{SI} \qquad \text{(원자로냉각계통 냉각재 질량)} \quad \text{(식 16)}$$

$$\frac{dM_{scs}}{dt} = \dot{m}_{rs} + \dot{m}_{afw} - \dot{m}_{se} \qquad \text{(이차계통 냉각재 질량)} \quad \text{(식 17)}$$

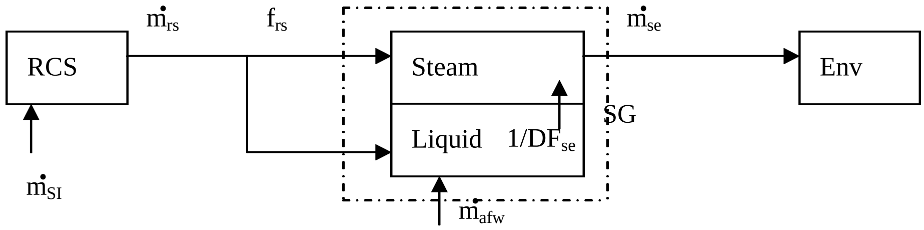

그림 3. Non-LOCA 시 방사성물질의 방출경로 모델 (이차계통을 통한 방출)

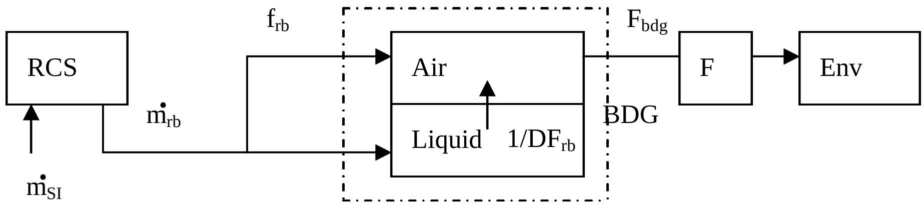

그림 4. Non-LOCA 시 방사성물질의 방출경로 모델 (건물을 통한 방출)

여기서, C, $\dot{m}$, M은 각 Compartment 내의 방사성물질 농도, 냉각재의 방출률, 냉각재 양을 나타내며, f는 기화율, DF는 제염계수, R은 핵연료로부터 누설률, $\dot{Q}$ 는 방사성물질 방출률을 나타낸다. 또한 아래첨자 rs, se, si, afw는 각각 일차계통→이차계통, 이차계통→환경, 안전주입수, 보조급수를 나타낸다. 건물을 통한 방출의 경우에 계산식은 그림 4에서 보듯이 이차계통을 통한 방출의 경우와 유사하다.

이차계통을 통한 방출의 경우 방사능농도 및 방출량은 식 (13)~식 (17)를 이용하여 평가한다. 식 (13)~식 (17)를 유한차분식으로 전개하기 위하여 일반식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{dX}{dt} = aX + bY + cZ + d \qquad \text{(식 18)}$$

이를 유한차분식으로 전개하면 다음과 같다.

$$X^{n+1} = (1 + a \cdot dt)X^{n} + b \cdot dt \cdot Y^{n} + c \cdot dt \cdot Z^{n} + d \cdot dt \qquad \text{(식 19)}$$

따라서, 식 (13)~식 (17)을 식 (18) 및 식 (19)에 따라 유한차분식으로 전개하면 표 2와 같다. 표 2에는 이차계통 또는 건물을 통한 방출의 경우 각 Compartment 별 방사능농도와 방출량이 제시되어 있다.

표 2 Non-LOCA 시 방사능농도 및 방출량 계산을 위한 유한차분 전개

a) **이차계통을 통한 방출의 경우**

X	a	b	Y	c	Z	d
C_{rcs}	$-(\frac{\dot{m}_{rs}}{M_{rcs}}+l)$	-	-	-	-	-
C_{scs}	$-(\frac{1}{DF_{se}}\frac{\dot{m}_{se}}{M_{scs}}+l)$	$(1-f_{rs})\frac{\dot{m}_{rs}}{M_{scs}}$	C_{rcs}	-	-	-
Q	-	$f_{rs}\dot{m}_{rs}$	C_{rcs}	$\frac{1}{DF_{se}}\dot{m}_{se}$	C_{scs}	-
M_{rcs}	-	-	-	-	-	$-\dot{m}_{rs}+\dot{m}_{SI}$
M_{scs}	-	-	-	-	-	$\dot{m}_{rs}+\dot{m}_{afw}-\dot{m}_{se}$

b) **건물을 통한 방출의 경우**

X	a	b	Y	d
C_{rcs}	$-(\frac{\dot{m}_{rb}}{M_{rcs}}+l)$	-	-	-
C_{bdg}	$-(\frac{F_{bdg}}{V_{bdg}}+l)$	$(f_{rb}+\frac{1-f_{rb}}{DF_{rb}})\frac{\dot{m}_{rb}}{V_{bdg}}$	C_{rcs}	-
Q	-	$\frac{F_{bdg}}{DF_{F}}$	C_{bdg}	-
M_{rcs}	-	-	-	$-\dot{m}_{rb}+\dot{m}_{SI}$

2.2 소외선량 평가모델

소외선량 평가는 총 유효선량(total effective dose, TED)로 계산되어야 하며 TED 는 호흡에 의한 내부 유효선량과 외부피폭에 의한 외부 유효선량의 합이다.

외부피폭에 의한 유효선량은 개인이 지표면 위에 무한하게 퍼져 있는 방사능운의 중심에 있다는 보수적인 가정하에 무한 반구형의 방사능운을 방사선원으로 하여 다음식으로 계산된다.

$$D_{ED} = X/Q \times \sum_i (DCF_{EDi} \times Q_i) \quad \text{(식 20)}$$

호흡에 의한 내부 유효선량은 내부피폭에 기인하며 다음 계산식으로 계산된다.

$$D_{ID} = X/Q \times Br \times \sum_i (DCF_{IDi} \times Q_i) \quad \text{(식 21)}$$

식 (20) 및 식 (21)에서 D_{ED}, D_{ID} 는 각각 외부피폭에 의한 유효선량 및 호흡에 의한 내부 유효선량이며, X/Q 는 소외 대기확산인자, Br 은 호흡률, DCF_{Edi} 및 DCF_{IDi} 는 각각 방사성핵종 i의 외부피폭선량환산인자 및 내부피폭선량환산인자, Q_I 는 방사성핵종 i의 방사능 방출량을 나타낸다.

3. 프로그램 구조

DBADOSE 전산프로그램은 그림 5 와 같이 대형냉각재상실사고(LOCA)를 평가하는 LOCA 부프로그램과 대형냉각재상실사고 이외의 사고를 평가하는 NONLOCA 부프로그램으로 구성한다. DBADOSE 전산프로그램은 사용자의 입·출력을 손쉽게 할 수 있도록 그래픽 사용자 인터페이스 방법으로 구성하였으며 부프로그램의 계산결과는 사용자가 선택 옵션 기능을 사용하여 텍스트로 화면에 표시되며 프린터를 통해 출력할 수 있도록 하였다.

각 부프로그램의 입력은 모두 Microsoft Visual Basic 6.0 프로그램을 사용하여 GUI(Graphic User Interface)형식으로 제어되는데, 기본값을 데이터베이스 파일로 저장하여 짧은 시간 내에 입력이 가능하도록 하며 기본값은 사용자의 편의에 따라 수정이 가능하게 하였다. 각 부프로그램의 사용언어는 공학적 연산프로그램인 FORTRAN 언어로 작성 및 Digital Visual FORTRAN 을 사용하여 컴파일함으로써 FORTRAN 90 및 95 언어의 특성도 포함하였다. GUI 와 공학연산 프로그램간의 연결은 기존의 2 언어(Basic+FORTRAN) 프로그래밍에서 사용하던 외부 쉘(External Shell)형식의 프로그래밍을 지양하고, 프로그램간 변수 전환이 가능한 동적 연결 라이브러리(Dynamic Link Library, DLL) 형식을 도입하여 실행의 편의성을 배가시켰으며, Windows 95, 98 및 Windows NT 에서 실행시 DOS 실행창이 발생하지 않고 Visual Basic 의 부프로그램에서 직접 처리할 수 있도록 하였다.

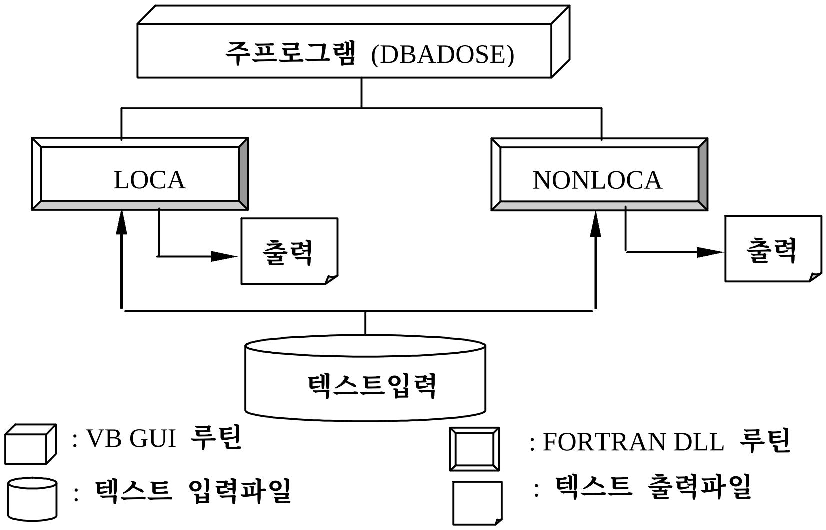

그림 5. 주프로그램(DBADOSE) 운영구조

4. 계산결과 및 검증

4.1 LOCA 부프로그램 검증방법

LOCA 부프로그램의 검증방법은 동 프로그램을 사용하여 평가한 결과와 기존 전산프로그램인 POSTDBA 및 STARDOSE 의 평가결과와 비교, 검증하는 방법을 사용하였다.

검증 목적상 POSTDBA, STARDOSE 두 전산프로그램에서 사용한 선량환산인자, 사고시 소외 및 소내 X/Q, 방사선원항 및 기타 설계입력값 등 모든 입력값들에 대해서 LOCA 부프로그램의 입력자료와 동일한 값을 사용하였다. 방사선원으로는 사고와 동시에 초기 노심재고량 전량이 격납건물 대기중으로 방출되는 TID-14844 방사선원과 사고 경과시간별로 방출되는 NUREG-1465 방사선원으로 구분되는데 상기 방사선원의 방출모드 차이점 및 검증의 편리성을 위해 각각의 경우로 구분하여 검증, 평가하였다.

4.2 LOCA 부프로그램 검증결과

LOCA 부프로그램을 이용하여 제한구역경계 및 저인구지대 외곽경계의 사고후 2 시간 및 720 시간에서의 소외방출량 및 방사선량 평가결과를 기존프로그램 POSTDBA 및 STARDOSE 코드에서 계산된 결과와 비교하였다. 그러나, 주제어실내 운전원의 선량평가 비교는 POSTDBA 코드에서 소내 대기확산인자를 입력값으로 사용하지 않고 직접 기상데이터의 joint frequency 를 사용하여 계산하는 차이점 때문에 동일한 입력방식을 사용하는 STARDOSE 전산코드만으로 비교, 평가하였다.

POSTDBA 및 STARDOSE 전산프로그램에 대한 사고발생 2 시간 및 720 시간후 소외방출량 비교는 표 3 및 4 와 같으며 TID-14844 및 ICRP-30 선량환산인자를 사용한 POSTDBA 와의 소외선량 평가 비교는 표 5, STARDOSE 와의 소외선량 평가 및 주제어실내 운전원에 대한 선량평가 비교는 표 6 과 같다. 기존 프로그램인 POSTDBA 및 STARDOSE 와의 검증 평가결과, 불활성기체 및 요오드핵종 방출량 및 선량평가 결과는 기존 전산프로그램인 POSTDBA 및 STARDOSE 전산코드 결과와 동일한 결과값을 얻을 수 있었다.

4.3 NONLOCA 부프로그램 검증방법

NONLOCA 부프로그램은 수치해석적인 방법에 의해서 Non-LOCA 시의 방사선량을 평가하기 위하여 개발된 프로그램이다. NONLOCA 부프로그램의 검증방법은 LOCA 부프로그램의 검증방법과 동일하게 동 프로그램을 사용하여 평가한 결과와 기존 전산프로그램인 STARDOSE 의 평가한 결과와 비교, 검증하는 방법을 사용하였다. 검증을 위한 실례로는 이차계통을 통하여 원자로냉각계통 및 이차계통내 방사성핵종이 방출되는 사고를 가정하였다.

4.4 NONLOCA 부프로그램 검증결과

NONLOCA 부프로그램에 의해 계산된 방사성물질 방출량 비교결과는 표 7 과 같으며, 표 7 에서 보듯이 STARDOSE 및 NONLOCA 에 의한 계산결과는 오차범위 10%내에서 대부분 만족하나 반감기가 짧은 핵종(Xe-135m : 15.2min, Xe-138 : 14.2min)의 경우에 오차가 10%이상으로 NONLOCA 계산결과가 크게 나타났다. 이는 STARDOSE 계산에서 증기발생기 증기부분에서의 Holdup Time 이 미비하게 큼에 기인하는 것으로 판단된다.

방사선량 비교결과는 표 8 과 같다. 표 8 에서 보듯이 방출량의 오차가 10%이상 크게 나타나는 핵종은 모두 단반감기 핵종으로 이들 핵종이 전체 방사선량에 미치는 영향은 적다. 따라서 소외선량(EAB 선량 및 LPZ 선량) 및 주제어실선량의 오차는 10% 이내로 평가되었다.

5. 결론 및 향후 계획

DBADOSE 전산프로그램은 기본적으로는 Reg. Guide 1.4, NUREG-1465, SRP 6.4 및 SRP 6.5.2, NUREG/CR-5966 등에 제시된 방사선원 평가모델 및 격납건물내 방사성핵종의 제거모델을 수용하고 있으며 선량평가 결과는 기존 장기선량평가 방식인 TID-14844 및 향후 개정될 것으로 예상되는 유효선량평가 방식인 ICRP-30 및 ICRP-60 모델을 함께 고려할 수 있도록 다목적 패키지 프로그램으로 개발하였다.

또한, DBADOSE 전산프로그램은 사고시 소외선량평가 및 주제어실내 운전원 선량평가, 방사성핵종별, 시간별 선량률 평가, 다중언어 DLL 프로그래밍을 통한 코드개발 및 그래픽 사용자 인터페이스를 사용하여 입출력 오류발생 최소화 및 사용자 편의성을 제공하고 있다.

DBADOSE 전산프로그램은 향후 개정이 예상되는 국내 법규에 따른 원자력발전소 인허가 적합성 평가, 신규 원자력발전소의 건설허가 및 운영허가시 제출되는 사고시 소외선량평가 및 주제어실내 운전원의 선량평가에 사용될 것이며, 계속 수정, 보완해 나갈 계획이다.

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) NUREG-1465, "Accident Source Terms for Light Water Nuclear Power Plants", US NRC, 1995.
4) ICRP, Publication 9, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ", 1966.
5) ICRP, Publication 26, "Recommendations of International Commission on Radiological Protection", 1977.
6) ICRP Publication 60, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP, 1991.
7) "User' s Manual for POSTDBA", S&L Program No. 09.8.085-1.0,1978.
8) "STARDOSE User Manual", Rev.0, Polestar Applied Technology, Inc., 1998.
9) Regulatory Guide 1.183, "Alternative Radiological Source Terms for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors", US NRC, 2000.
10) 과기부고시 제 2002-1호, "방사선방호 등에 관한 기준", 과학기술부, 2002.
11) 과기부고시 제 2002-00호, "원자로시설의 위치제한 및 제한구역경계에 관한 지침(안)", 과학기술부, 2002.
12) SRP 6.5.2, "Containment Spray as a Fission Product Cleanup System", USNRC, 1988.
13) NUREG/CR-5966, "A Simplified Model of Aerosol Removal by Containment Sprays", SAND92-2689, US NRC, June 1993.

표 3. 사고후 2 시간동안 방출량 비교

핵 종	사고후 2 시간동안 방출량 (Ci)			핵 종	사고후 2 시간동안 방출량 (Ci)		
	LOCA결과	POSTDBA결과	비 율(주1)		LOCA 결과	STARDOSE 결과	비 율(주2)
Kr-85m	2.368E+03	2.37E+03	1.00	Kr-85m	9.460E+02	9.81E+02	0.96
Kr-85	9.930E+01	9.92E+01	1.00	Kr-85	4.265E+01	4.44E+01	0.96
Kr-87	3.373E+03	3.37E+03	1.00	Kr-87	1.102E+03	1.15E+03	0.96
Kr-88	6.176E+03	6.18E+03	1.00	Kr-88	2.359E+03	2.45E+03	0.96
Kr-89	3.756E+02	3.77E+02	1.00	Kr-89	2.920E+00	2.93E+00	1.00
Xe-131m	7.917E+01	7.91E+01	1.00	Xe-131m	3.397E+01	3.54E+01	0.96
Xe-133m	5.585E+00	5.58E+00	1.00	Xe-133m	2.385E+00	2.48E+00	0.96
Xe-133	1.444E+04	1.44E+04	1.00	Xe-133	6.187E+03	6.45E+03	0.96
Xe-135m	5.202E+02	5.22E+02	1.00	Xe-135m	4.558E+01	4.93E+01	0.92
Xe-135	4.399E+03	4.39E+03	1.00	Xe-135	1.825E+03	1.90E+03	0.96
Xe-137	6.057E+02	6.02E+02	1.01	Xe-137	5.843E+00	5.69E+00	1.03
Xe-138	2.312E+03	2.30E+03	1.01	Xe-138	1.796E+02	1.92E+02	0.94
I-131	6.223E+02	6.41E+02	0.97	I-131	6.808E+02	6.20E+02	1.10
I-132	7.233E+02	7.56E+02	0.96	I-132	6.213E+02	5.68E+02	1.09
I-133	1.251E+03	1.29E+03	0.97	I-133	1.337E+03	1.22E+03	1.10
I-134	9.115E+02	9.64E+02	0.95	I-134	5.174E+02	4.74E+02	1.09
I-135	1.122E+03	1.16E+03	0.97	I-135	1.133E+03	1.03E+03	1.10

주) 1. 비율 = (LOCA 계산값)/(POSTDBA 계산값) 2. 비율 = (LOCA 계산값)/(STARDOSE 계산값)

표 4. 사고후 720 시간동안 방출량 비교

핵 종	사고후 720 시간동안 방출량			핵 종	사고후 720 시간동안 방출량 (Ci)		
	LOCA 결과	POSTDBA 결과	비 율(주1)		LOCA결과	STARDOSE 결과	비 율(주2)
Kr-85m	6.305E+03	6.31E+03	1.00	Kr-85m	7.088E+03	7.24E+03	0.98
Kr-85	3.967E+02	3.97E+02	1.00	Kr-85	1.751E+04	1.82E+04	0.96
Kr-87	5.002E+03	5.02E+03	1.00	Kr-87	2.730E+03	2.85E+03	0.96
Kr-88	1.363E+04	1.37E+04	0.99	Kr-88	1.161E+04	1.20E+04	0.97
Kr-89	3.756E+02	3.77E+02	1.00	Kr-89	2.921E+00	2.93E+00	1.00
Xe-131m	3.140E+02	3.14E+02	1.00	Xe-131m	6.866E+03	7.02E+03	0.98
Xe-133m	2.147E+01	2.14E+01	1.00	Xe-133m	1.290E+02	1.36E+02	0.95
Xe-133	5.676E+04	5.67E+04	1.00	Xe-133	6.921E+05	7.22E+05	0.96
Xe-135m	5.224E+02	5.25E+02	1.00	Xe-135m	4.774E+01	5.18E+01	0.92
Xe-135	1.421E+04	1.42E+04	1.00	Xe-135	2.521E+04	2.64E+04	0.95
Xe-137	6.057E+02	6.02E+02	1.01	Xe-137	5.843E+00	5.69E+00	1.03
Xe-138	2.318E+03	2.31E+03	1.00	Xe-138	1.858E+02	2.13E+02	0.87
I-131	1.716E+03	1.66E+03	1.03	I-131	1.283E+05	1.16E+05	1.11
I-132	1.120E+03	1.13E+03	0.99	I-132	2.991E+03	2.73E+03	1.10
I-133	3.191E+03	3.10E+03	1.03	I-133	4.195E+04	3.79E+04	1.11
I-134	1.023E+03	1.07E+03	0.96	I-134	1.081E+03	9.82E+02	1.10
I-135	2.419E+03	2.37E+03	1.02	I-135	1.431E+04	1.30E+04	1.10

주) 1. 비율 = (LOCA 계산값)/(POSTDBA 계산값) 2. 비율 = (LOCA 계산값)/(STARDOSE 계산값)

표 5. POSTDBA 전산코드와의 선량평가 결과 비교

분 류			LOCA 결과 (rem)	POSTDBA 결과 (rem)	비 율 (주)
제한구역경계(EAB)	TID-14844	전신선량	1.78E+00	1.81E+00	0.98
		갑상선선량	1.48E+02	1.53E+02	0.97
	ICRP-30	전신선량	1.38E+00	9.50E-01	1.45
		갑상선선량	9.20E+01	9.10E+01	1.01
저인구지대외곽경계 (LPZ)	TID-14844	전신선량	1.09E-01	1.09E-01	1.00
		갑상선선량	2.40E+01	2.30E+01	1.04
	ICRP-30	전신선량	8.17E-02	5.04E-02	1.62
		갑상선선량	1.62E+01	1.51E+01	1.07

주) 비율 = (LOCA 계산값)/(POSTDBA 계산값)

표 6. STARDOSE 전산코드와의 선량평가 결과 비교

분 류			LOCA 결과 (rem)	STARDOSE 결과 (rem)	비 율 ㈜
제한구역경계(EAB)	TID-14844	전신선량	8.11E-01	7.99E-01	1.02
		갑상선선량	1.59E+02	1.45E+02	1.10
	ICRP-30	전신선량	6.16E-01	6.10E-01	1.01
		갑상선선량	9.86E+01	9.04E+01	1.09
저인구지대외곽경계 (LPZ)	TID-14844	전신선량	1.56E-01	1.46E-01	1.07
		갑상선선량	1.07E+02	9.62E+01	1.11
	ICRP-30	전신선량	1.13E-01	1.07E-01	1.06
		갑상선선량	7.27E+01	6.54E+01	1.11
주제어실	TID-14844	전신선량	5.44E-01	6.40E-01	0.85
		피부선량	3.76E+00	3.91E+00	0.96
		갑상선선량	1.14E+03	1.08E+03	1.05
	ICRP-30	전신선량	3.47E-01	3.99E-01	0.87
		피부선량	1.02E+00	1.07E+00	0.95
		갑상선선량	7.72E+02	7.34E+02	1.05

주) 비율 = (LOCA 계산값)/(STARDOSE 계산값)

표 7. 방사성물질 방출량 계산결과 비교

핵 종 주1)	2시간동안 방출량 (Ci)		비율 주2)
	NONLOCA	STARDOSE	
Kr 85m	8.77E-02	8.89E-02	0.99
Kr 85	4.32E-01	4.36E-01	0.99
Kr 87	4.11E-02	4.27E-02	0.96
Kr 88	1.69E-01	1.72E-01	0.98
Xe131m	4.76E-01	4.79E-01	0.99
Xe133m	2.74E-02	2.76E-02	0.99
Xe133	2.96E+01	2.98E+01	0.99
Xe135m	2.90E-03	4.10E-03	0.71
Xe135	5.52E-01	5.57E-01	0.99
Xe138	3.06E-03	4.13E-03	0.74
I 131E	8.85E-02	1.00E-01	0.88
I 132E	1.23E-02	1.39E-02	0.88
I 133E	1.14E-01	1.28E-01	0.89
I 134E	3.50E-03	4.08E-03	0.86
I 135E	5.40E-02	6.08E-02	0.89
I 131O	1.84E-01	2.23E-01	0.82
I 132O	2.68E-02	3.21E-02	0.83
I 133O	2.38E-01	2.87E-01	0.83
I 134O	7.95E-03	9.86E-03	0.81
I 135O	1.15E-01	1.38E-01	0.83
Cs134	4.14E-04	4.22E-04	0.98
Cs136	7.37E-05	7.50E-05	0.98
Cs137	5.62E-04	5.73E-04	0.98

주 1) E = 원소형 요오드, O= 유기형 요오드, 주 2) 비율 = (NONLOCA 계산값)/(STARDOSE 계산값)

표 8. 전체 방사선량 비교

위치 및 피폭경로		방사선량 (유효선량) (rem)		
		NONLOCA	STARDOSE	비율 주)
제한구역경계	외부피폭	3.83E-04	3.57E-04	1.07
	내부피폭	8.37E-03	7.93E-03	1.02
저인구지대 외곽경계	외부피폭	1.65E-04	1.63E-04	1.02
	내부피폭	3.83E-03	3.78E-03	1.05
주제어실	외부피폭	1.40E-04	1.37E-04	1.01
	내부피폭	1.05E-03	1.03E-03	1.01

주) 비율 = (NONLOCA 계산값)/(STARDOSE 계산값)