

'98 춘계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

CE LBLOCA EM의 개선 방향 고찰

최동수, 박병서, 이상종, 조창석

한국원전연료 주식회사

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

이종 코드에 의한 CE형 발전소의 대형 냉각재 상실 사고 해석이 수행되었다. 이 연구는 상대적으로 최근에 개발된 웨스팅하우스 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드를 사용하여 영광 3&4호기의 대형 냉각재 상실 사고를 계산해 봄으로써 CE 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드의 개선 방향을 고찰하는 것을 목적으로 하였다. 계산은 가장 제한적인 대형 냉각재 상실 사고의 Blowdown 및 Refill 기간 동안 수행하였다. 이 기간 동안의 RCS내 열수력적 거동 및 연료봉 온도 변화는 CE 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드를 사용하여 계산한 경우와 크게 다르지 않음을 확인하였다. 따라서 향후 CE 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드의 성능 개선은 Reflood 해석용 코드의 개선 및 개발을 중심으로 이루어져야 한다는 결론을 얻었다.

1. 서 론

CE형 발전소는 일반적인 웨스팅하우스형 발전소와는 루프 배열이나 원자로 용기 내부의 구조가 다르다. 웨스팅하우스형 발전소의 한 루프가 각각 한 개의 고온관과 저온관으로 구성되는데 반하여 CE형 발전소는 한 루프당 한 개의 고온관과 두 개의 저온관이 있고, UGS (Upper Guide Structure), Flow Skirt 등 웨스팅하우스형 발전소와는 다른 노심 상부 및 하부 구조를 가지고 있으며, 안전주입탱크의 주입 각도도 웨스팅하우스형 발전소와는 다르다[1]. 그러나, 이러한 부분적인 차이에도 불구하고 전체적인 시스템은 유사하기 때문에 한 쪽의 시스템을 다른 쪽의 코드를 사용하여 해석하는 것이 가능하다. 실제로 이미 이 같은 시도는 행해진 적이 있는데, CE 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드를 사용하여 웨스팅하우스형 발전소의 대형 냉각재 상실 사고를 해석한 예[2]가 있으며, 웨스팅하우스 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드를 사용하여 Fort Calhoun이나 Millston 2와 같은 CE형 발전소의 대형 냉각재 상실 사고를 해석한 예[3, 4, 5]도 찾을 수 있다.

영광 3&4호기는 CE의 설계 개념에 따라 건설된 발전소로서 인허가를 위한 대형 냉각재 상실 사고 해석은 CEFLASH-4A를 비롯한 일련의 CE 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드를 사용하여 수행된 바 있다[6]. 그런데, CE 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드 중 CEFLASH-4A와 STRIKIN-II는 미 정부 제한 코드로서 지속적인 사용에 제한이 있다. 또한 CE 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드는 비교적 과도한 보수성을 지니고 있어서 이를 대체할 진보된 국산 코드 및 방법

론의 개발이 불가피한 상황이다. 이에 따라 현재 대형 냉각재 상실 사고 해석을 위한 코드 및 방법론의 개발에 대한 다각적인 검토가 진행 중에 있다.

이 연구에서는 현재 국내에 들어와 있는 같은 Appendix K EM인 웨스팅하우스 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드와 CE 대형 냉각재 상실 사고 코드를 비교, 검토하고 비교적 최근에 개발된 코드 체계인 웨스팅하우스 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드를 사용하여 영광 3/4호기의 가장 제한적인 대형 냉각재 상실 사고를 계산하여 봄으로써 Appendix K 방법론을 사용하면서 해석 코드만을 교체할 경우에 과연 어떤 코드를 개선하여야 PCT 여유도 확보 등의 성능 개선을 이룰 수 있는지 알아보았다.

2. 코드 체계 비교

웨스팅하우스의 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드는 크게 Blowdown 기간 동안의 열수력적 거동을 계산하는 SATAN-VI와 Refill/Reflood 기간 동안의 열수력적 거동을 계산하는 BASH, 그리고 SATAN-VI와 BASH가 계산한 열수력 정보를 받아서 전 사고 기간 동안의 Hot Rod 온도 변화를 계산하는 LOCBART로 구성되어 있다.

CE 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드의 구성도 웨스팅하우스 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드의 구성과 흡사한데, Blowdown 동안의 열수력적 거동은 CEFLASH-4A에 의해 계산되며, Refill/Reflood시의 열수력적 거동은 COMPERC-II에 의해서, 그리고 Hot Rod의 온도 변화는 STRIKIN-II에 의해서 계산된다.

이 중에서 Blowdown 동안의 열수력적 거동을 계산하는 코드인 SATAN-VI와 CEFLASH-4A는 그 기본적인 구조와 구성 모델에 있어서 큰 차이가 없는데, 두 코드 공히 One-Dimensional Homogeneous Equation을 기본 방정식으로 하고 있고, 유사한 Critical Flow Model 및 Flow Regime Map을 사용하고 있다. 차이점이라면 CEFLASH-4A가 Sub-cooled Critical Flow에 대해서 Modified Henry-Fauske Model을 사용하는데 반하여 SATAN-VI의 경우 Modified Zaloudek Model을 사용한다는 것과 SATAN-VI가 이상 유동의 상대적 운동 효과를 보다 정확히 계산하기 위한 Drift Flux Model을 가지고 있다는 것 정도이나, 이러한 차이는 Blowdown 기간 동안의 전체적인 현상 예측에 심각한 결과 차이를 야기하는 것은 아니다.

두 코드 체계의 차이는 Reflood 기간 동안의 열수력 거동 계산을 수행하는 BASH와 COMPERC-II에서 현격히 나타난다. COMPERC-II가 루프에서의 열수력적 거동을 Steam Flow Resistance Network을 구성함으로써 계산하고, FLECHT 실험에 기초한 열전달계수를 STRIKIN-II에 제공하는데 반하여, BASH는 노심을 제외한 루프 및 하향유로, 하부 플레넘에서의 열수력적 거동은 4 방정식 코드인 NOTRUMP가 계산하고, 노심은 별도의 Reflood Model을 가지고 있는 BART 코드를 사용하여 계산하는데 이 BART는 Flow Regime에 따른 열전달계수를 사용한다. 특히 이 BART Reflood Model은 FLECHT 실험식을 사용하던 BASH 이전 코드인 WREFLOOD에 비해 낮은 Entrainment와 높은 초기 Reflood Rate를 제공함으로써 Reflood PCT 측면에서 많은 여유도를 갖게 한다.

Hot Rod 온도 변화 계산에 사용되는 LOCBART 코드와 STRIKIN-II 코드는 그 사용 목적이 같고 연료봉내의 열전도를 계산하는 부분도 매우 유사한 것으로 판단되나, STRIKIN-II가 Reflood 동안의 열전달계수를 COMPERC-II (PARCH 및 HTCOF)로부터 FLECHT 실험에 기초한 값을

전달받아 사용하는 반면에, LOCBART는 BASH로부터 제공된 노심 입구 질량 유속과 엔탈피를 경계 조건으로 하고 BART Reflood Model을 사용하여 Flow Regime에 따른 열전달 계수를 계산하여 사용한다. 이상에서 살펴본 코드들의 구성 모델 차이는 표 1에 요약되어 있다.

3. Blowdown/Refill 계산 및 결과

웨스팅하우스 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드를 사용하여 가장 제한적인 영광 3&4호기 대형 냉각재 상실 사고의 Blowdown 및 Refill 기간을 계산하였다. 계산에 사용된 초기 조건은 영광 3&4호기 FSAR 작성시 사용된 초기 조건[6]과 동일하다.

Blowdown 동안의 RCS 천이 거동은 SATAN-VI를 사용하여 계산되었는데, 모두 59개의 Fluid Volume을 사용하였으며, 파단 루프의 두 개의 저온관은 각각 분리하여 모델 하였고 건전 루프의 저온관들은 한 개의 관으로 단순화하여 모델 하였다. 이러한 Nodalization은 영광 3&4호기 FSAR 작성시 사용된 CEFLASH-4A의 Nodalization (그림 1)과도 크게 다르지 않다. 코드 입력은 주로 FSAR과 CEFLASH-4A 코드의 입력 계산에 사용된 NEDS (Nuclear Engineering Documentation System)를 사용하여 작성하였는데, 방법론상의 차이나 코드의 특성상 그대로 적용하기 힘든 몇몇 입력 변수에 대해서는 코드 내에 내장되어 있는 기본 값을 사용하거나, 적절한 가정을 통한 공학적 판단을 기초로 하여 작성하였다.

SATAN-VI 및 COCO에 의해 계산된 Blowdown 동안의 1차측 및 격납 용기의 압력이 그림 2에, Hot Assembly 입구에서의 유량이 그림 3에, 그리고 SIT 주입 유량이 그림 4에 제시되어 있다. 이 그림들로부터 비록 SATAN-VI가 계산한 1차측 압력이 CEFLASH-4A가 계산한 1차측 압력에 비해 상대적으로 빠르게 감소하고 이로 인해 사고의 진행이 CEFLASH-4A로 계산한 경우보다 빠르게 계산되고는 있으나, 전체적인 진행 양상은 비슷하게 계산됨을 알 수 있다.

LOCBART로 계산한 8.25 ft 높이에서의 Cladding Temperature는 그림 5에 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 SATAN-VI와 LOCBART로 계산한 Blowdown 동안의 Cladding Temperature 변화 양상은 CEFLASH-4A와 STRIKIN-II로 계산한 결과와 크게 다르지 않다. 단지 PCT 발생 시간이 조금 이를 뿐인데, 이것은 SATAN-VI가 계산한 초기 파단 유량이 CEFLASH-4A로 계산한 경우보다 크고 그에 따라 Core Flow Reversal로 인한 Top-down Quenching이 조금 일찍 일어나기 때문이다. 이 그림에는 Refill 기간 동안의 Hot Rod 온도 변화도 포함되어 있는데, 이 기간 동안에는 CE 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드와 웨스팅하우스 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드 모두 단열 가열 조건을 전제로 계산하기 때문에 거의 같은 온도 상승 구배를 갖는다.

4. 결론

CE 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드와 웨스팅하우스 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드를 비교해 본 결과 Blowdown 동안의 열수력적 거동을 계산하는 SATAN-VI와 CEFLASH-4A는 상당히 유사한 기본 방정식과 모델을 사용한다는 것을 알았다. 양 코드 체계상의 큰 차이점은 Reflood 기간 동안의 RCS 거동을 계산하여 노심 재관수율을 Hot Rod 온도 계산 코드에 제공하는 BASH와 COMPERC에서 두드러진다.

양 코드 체계의 Blowdown 및 Refill 계산이 크게 다르지 않음을 확인하기 위해 웨스팅하우스 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드를 사용하여 영광 3&4호기 대형 냉각재 상실 사고의 Blowdown

및 Refill 기간을 계산하였는데, CE 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드를 사용하여 계산한 결과와 크게 다르지 않은 결과를 얻었다.

이상의 결과로부터 향후 CE 대형 냉각재 상실 사고 해석 코드의 개선 시에는 Reflood 기간을 계산하는 COMPERC-II를 개선하여야 한다는 결론을 얻었다.

참고 문헌

1. WR-SA-96011, "해외연수보고서 (웨스팅하우스 LOCA 해석 방법론)", 1996.
2. CENPD-132P, "Calculative Methods for the C-E Large Break LOCA Evaluation Model for the Analysis of C-E and W Designed NSSS", 1985. 6.
3. WCAP-9528, "ECCS Evaluation Model for Westinghouse Reloads of Combustion Engineering NSSS", 1979. 6.
4. WCAP-13027-P, "Topical Report : Westinghouse ECCS Evaluation Model for Analysis of CE-NSSS"
5. WCAP-10054-P-A, Addendum 1, "Addendum to the Westinghouse Small Break ECCS Evaluation Model Using the NOTRUMP Code for the Combustion Engineering NSSS", 1987. 3.
6. Yonggwang Units 3&4, Final Safety Analysis Report, Vol. 10
7. WCAP-10266-P-A, Rev. 2, "The 1981 Version of the Westinghouse ECCS Evaluation Model Using the BASH Code", 1987. 3.
8. WCAP-9220-P-A, Rev. 1, "Westinghouse ECCS Evaluation Model 1981 Version", 1982. 2.

표 1. 코드 구성 모델 비교			
Item	레스팅하우스 코드	CE 코드	
B L O W D O W N	Conservation Eq.	3 Eq. HEM + 1 Sep. Vapor Eq.	3 Eq. HEM
	Bubble Rise Model	Yes	Yes
	Drift Flux Model	Modeled locally	No
	ECCS Bypass	Yes	Yes
	Downcomer Model	2-D Modeling	1-D Modeling
	Cross Flow Model	Yes	Yes
	Break Flow Model	Sub : Modified Zaloudeck Sat : Moody Sup : Murdock & Bauman	Sub : Modified Henry-Fauske Sat : Moody Sup : Murdock & Bauman
R E F L O O D	Core Modeling	1 Hot + 1 Average	1 Hot - 1 Neighbor + 1 Remainder
	Governing Eq.	Drift Flux Model	HEM
	Loop Modeling	Explicitly Modeled	Steam Flow Resistance Network
C O R E	Core Modeling	24 Nodes - Single Phase Liquid - Two Phase Mixture - Single Phase Vapor	3 Regions - Sub. Water - Sat. Steam & Water - Sup. Steam & Ent. Water
	Quench Front Model	Yes	No
H.T.C.	Mechanistic Model	FLECHT Correlation	

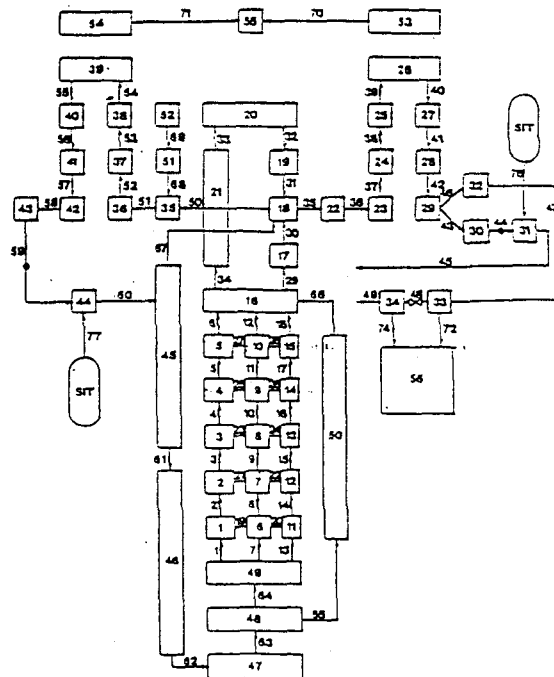


그림 1. CEFLASH-4A Nodalization Diagram

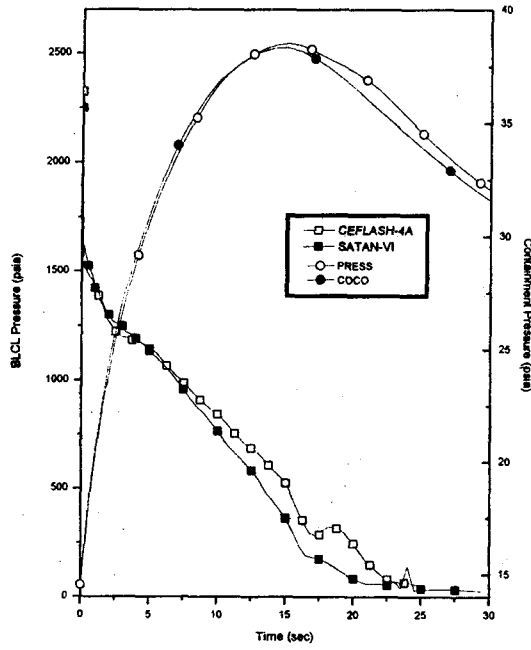


그림 2. BLCL Pressure and Containment Pressure

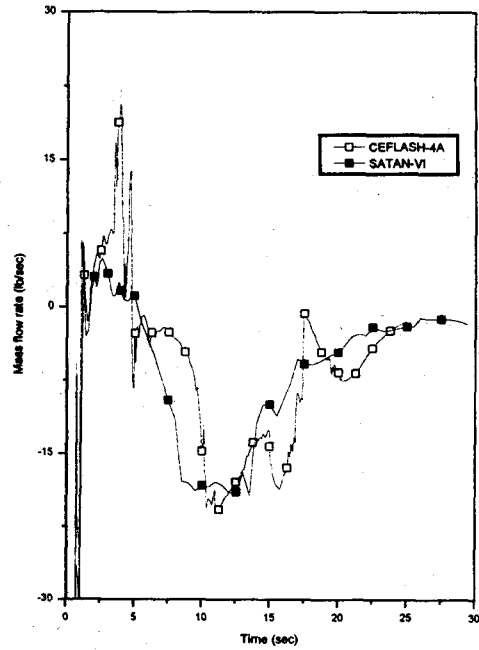


그림 3. Hot Assembly Inlet Mass Flow Rate

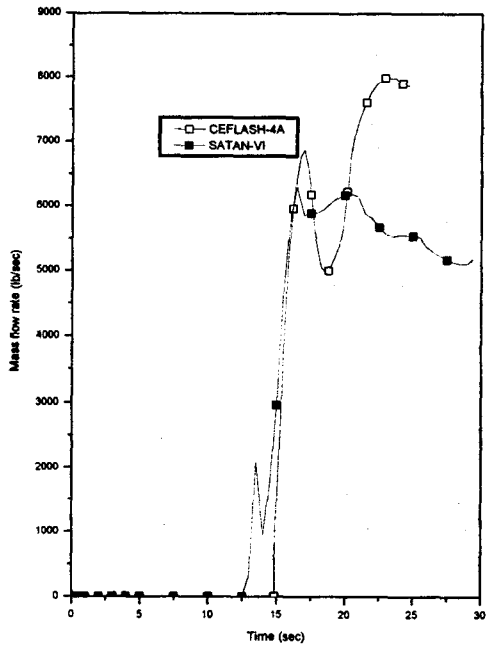


그림 4. Intact Loop SIT Flow Rate

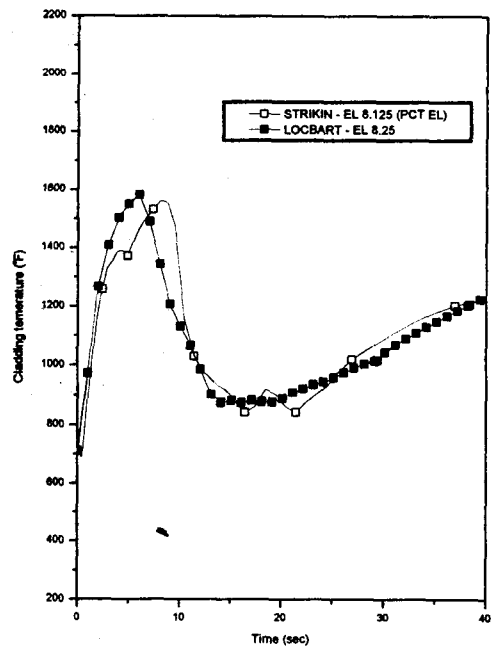


그림 5. Cladding Temperature at 8.25 ft Elevation