

원전 계통 분석코드 TASS의 CE형 원전 적용을 위한 검증 계산

윤한영, 이병일, 유형근, 엄길섭, 김희철, 심석구
한국원자력연구소

요약

현재 사용중인 Non-LOCA 해석용 인허가 코드들은 특정한 형태의 가압경수로에 맞게 짜여진 것들이어서 모든 형태의 가압경수로에 적용할 수 있는 범용 코드의 개발이 필요한 실정이다. 이를 위하여 한국원자력연구소에서는 웨스팅하우스 및 CE형 발전소에 공히 적용할 수 있는 과도현상 해석 코드인 TASS코드를 개발하고있다. 이 TASS 코드는 실시간보다 빠르게 핵증기계통에 대한 모의계산을 수행하며 대화식의 입출력을 통하여 사용자가 원하는 과도현상을 정확히 모사할 수 있다. 이 TASS코드의 웨스팅하우스형 발전소에 대한 적용타당성은 이미 검증되었으며, 본 논문에서는 CE형 발전소에 대하여 TASS 코드를 적용하여 Non-LOCA 인허가 해석을 하기위한 검증을 위해 주급수관 파단사고 및 주 증기관 파단사고에 대하여 RELAP5/MOD3 코드와의 비교계산을 수행하였다.

1. 서론

기존의 Non-LOCA 안전해석 코드들은 노드 구성이 사용자가 임의로 변경할 수 없으며, 제어 및 보호계통에 대한 변경이 있을 경우 프로그램 수정이 필요하기 때문에 그 사용에 있어서 범위가 매우 제한적이다. 따라서 다양한 형태의 가압경수로 특히 개량된 가압경수로의 적용을 위해서 보다 일반적인 Non-LOCA 해석 코드로서 TASS 코드를 개발중에 있다. 이 TASS코드는 사용자가 임의의 가압경수로를 적당한 노드구성을 통하여 구현할 수 있을뿐 아니라 다양한 형태의 보호 및 제어계통을 입력을 통하여 구성할 수 있다. 이 TASS 코드의 웨스팅하우스형 원전에 대한 적용성은 이미 확인되었으며[1], 본 논문에서는 TASS 코드의 CE 형 발전소에 대한 적용성 확인을 위한 검증계산을 수행하였다. 검증계산으로는 설계기준 사고인 주급수관 파단사고 및 주 증기관 파단사고에 대한 사고 해석을 수행하여 그 결과를 대형코드인 RELAP5/MOD3[2] 코드의 계산결과와 비교하였다.

2. 주 급수관 파단사고

주급수관 파단사고는 주급수 계통의 파단으로 인하여 발생된다. 배관파단에 따른 영향은 배관 파단의 크기와 위치, 주급수 계통의 반응에 따라서 핵증기공급계통을 급속가열, 또는 급속냉각시키게 된다. 파단위치는 증기발생기 급수 노출과 격납용기 관통부 사이에 있는 역류방지밸브를 고려하여 결정한다. 만약 관파단이 역류방지밸브의 상류에 위치하면 역류방지밸브가 닫혔을 때 이 밸브에 근접한 증기발생기의 건전성은 유지된다. 역류방지밸브 상류의 배관파단은 다음과 같은 과도상태 중 한가지를 유발할 수 있다. 배관 파단후 주급수계통이 유용하지 못하면 완전한 정상 급수유량 상실(loss of normal feed water; LOFW)을 초래한다. 주급수계통이 운전가능하다면 소형파단인 경우는 주급수 유량의 감소가 발생하지 않지만 대형파단인 경우는 파단부를 통한 방출

량이 주급수 펌프의 전체용량보다 클 때 부분 급수유량상실(partial LOFW) 또는 완전 급수유량상실(total LOFW)을 초래한다. 부분 또는 완전 급수유량상실의 가능성 외에도 역류방지밸브의 하류의 관파단인 경우에는 파단부에 관접한 증기발생기(파단측 증기발생기)에서 파단부로 역류가 형성될 가능성이 있다. 관파단시 주급수계통이 운전불능상태이거나 주급수계통이 운전가능하더라도 파단부의 압력이 증기발생기 압력보다 높게 유지되지 않으면 역류가 발생된다. 이 해석에서 관심이 있는 파단은 역류가 발생하는 경우이다. 역류의 엔탈피와 파단측 증기발생기의 열전달 특성에 따라서 원자로냉각재계통은 가열되거나 냉각될 수 있다. 그러나 원자로냉각재계통의 냉각 가능성이 주증기 재고량감소(Loss of Main Steam Inventory; LMSI)사건보다 적기 때문에 파단부를 통한 과도한 열제거는 본 해석에 고려되지 않았다. 다음은 주급수계통이 운전불가능하고 파단부로 낮은 엔탈피의 유량이 방출되며 역류방지밸브 하류에서 배관파단이 발생했다고 가정할 때의 일반적인 주급수재고량상실 사고에 대한 기술이다. 양쪽 증기발생기로 주입되던 주급수가 상실되면 증기발생기의 온도가 상승되고 재고량 및 수위가 감소하게 된다. 증기발생기의 온도가 상승되면 일차측에서 이차측으로의 열전달이 감소하여 원자로냉각재계통이 가열되고 가압된다. 파단부로 방출이 계속됨에 따라 파단측 증기발생기의 재고량이 불충분하여 열전달 능력이 더욱 감소하게 되어 일차계통의 가열이 계속된다. 이러한 초기 사건진행은 가압기 고압력, 증기발생기 저수위 또는 격납용기 고압력에 의해 원자로가 정지하게 되면 중단된다. 파단측 증기발생기가 고갈되면 증기발생기의 열전달능력이 완전히 상실되어 원자로 정지후에도 원자로냉각재계통은 계속 가열될 수 있다. 그러나 결국에는 원자로 정지후에 노심출력이 감소되어 노심 열발생률이 전전한 증기발생기의 열제거 용량 이내로 감소하게 된다.

TASS 코드의 예측능력 평가를 위하여 다음과 같은 가정하의 주급수관 파단사고에 대한 분석을 수행하였다.

- 가. 주급수관의 파단면적은 0.01858 M^2 으로 한다.
- 나. 주급수관의 파단과 동시에 주급수계통은 운전불가능하다고 본다.
- 다. 원자로의 정지는 가압기 고압력 신호에 의하여 발생한다.
- 라. 원자로 정지신호의 지연시간은 1.15 초이다.
- 마. 원자로가 정지될 때 터빈정지밸브가 순간적으로 닫힌다고 가정한다. 빠른 터빈정지는 주증기압력을 증가시켜서 원자로냉각재계통을 가열하게 된다.
- 바. 소외전원상실은 터빈정지와 동시에 발생하는 것으로 간주한다. 터빈정지시 소외전원이 상실되면 원자로냉각재펌프가 감속하여 일차측에서 이차측으로의 열전달이 감소하게 되어서 원자로냉각재계통을 가압하게 된다.
- 사. 보조급수계통의 동작은 다음과 같다.
 - 동작 신호 : 5% WR (4.33 M)
 - 지연 시간 : 46.25 초
 - 유량 : 처음에는 13.776 kg/sec의 양이 손상되지 않은 증기발생기로 공급되며 두개의 증기발생기 압력차가 2.43 MPa 이상이면 34.45 kg/sec의 양으로 공급된다.
 - 압력 : 8.756 MPa
 - 온도 : 322.04 K

그외의 사고 초기조건들에 관한 사항은 표 1에 나타나있으며 표 3에는 두 개의 코드에 의하여 예측된 사고 진행 과정이 비교되어 나타나있고 그림 1에서 4까지는 중요한 변수들에 대한 비교 그림이 나타나있다. 그림 3 및 4에 나타난 바와 같이 사고초기의 파단된 주급수관 쪽의 증기발생기의 냉각재 유출량 계산에 있어서 TASS 코드가 RELAP5 코드보다 약간 많게 예측함으로써 TASS 코드 계산결과와 경우 RELAP5 코드의 계산에 비하여 일차측 가열 및 가압 비율이 높게 나타났으며 이로인하여 TASS 코드의 경우 원자로 정지가 약 8 초 빠르게 예측되었음을 알 수 있다. 또한 이와같은 원인으로 TASS 코드의 경우에 손상된 증기발생기의 감압이 RELAP5 코드의 경우보다 조금 빨리 예측됨으로서 주증기관 차단이 빨리 이루어졌고 이에따라 손상되지 않은 쪽의 증기발생기 냉각재 질량은 TASS 코드가 RELAP5 코드보다 약간 많게 예측하였다. 위의 차

이를 제외한 다른 모든 변수들의 예측에 있어서 TASS 코드는 RELAP5 코드와 잘 일치하였다.

3. 주 증기관 파단사고

주증기관 파단사고는 주증기 계통의 배관이 파단되는 사고로 정의된다. 이 사고는 증기 유량의 증가로 인하여 계통이 냉각되는 사고이며, 원자로냉각계통과 증기발생기로부터 열량이 과도하게 제거되는 특징을 갖는다. 그 결과 원자로 냉각계통의 온도와 압력 및 증기발생기의 압력이 감소한다. 이러한 냉각은 감속재 및 도플러 부반응도 계수에 의해 노심의 반응도 증가를 야기시킨다. 원자로 냉각계통의 냉각은 가압기 또는 증기발생기의 저압력 경보, 원자로 고출력 경보, 증기발생기 저수위 경보에 의해서 탐지된다. 소외전원상실을 수반한 주증기관 파단사고는 터빈정지밸브의 잠김과 동시에 원자로냉각재펌프의 감속이 시작된다. 보조급수는 원자로 정지 이후 전량이 파단측 증기발생기로 유입되며, 또한 원자로 정지시 최대 반응도를 갖는 제어봉은 완전인출 상태에서 고착되어 있다고 보수적으로 가정한다. 파단측 증기발생기의 감압으로 인하여 주증기관 격리신호가 발생하며, 이 신호에 의해 주증기관 격리밸브들이 닫혀서 파단측 증기발생기로부터 증기방출이 차단됨과 아울러 주 급수 격리밸브들이 닫혀 양측 증기발생기로 공급되는 주급수가 격리된다. 가압기의 압력감소는 고압안전주입펌프의 안전주입 작동신호를 발생하게하여 노심에 붓소를 주입시킨다.

주증기관 파단사고 해석을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 가. 주증기관 파단사고는 하나의 증기발생기의 주증기관에서 양단 파단이 발생하고 그와 동시에 소외전원이 상실되어 모든 냉각재 펌프에 전원이 공급되지 않아서 원자로 냉각재 유량이 상실된다.
- 나. 소외전원상실에 따라 원자로 냉각재 펌프 축의 속도가 감소되어 정격속도의 94.86%에 도달하면 원자로 정지신호가 발생한다.
- 다. 정지 반응도가는 10% $\Delta\rho$ 가 사용되었으며, 최대 반응도가를 갖는 제어봉이 완전인출 상태에서 고착되어 있다고 가정하여 결정된 반응도가이다.
- 라. 원자로 정지 지연시간은 0.3 초이다. (트립 차단기 열림시간 0.1 초 포함)
- 마. 제어봉 구동장치 코일 자장 감쇄시간은 0.5 초가 사용되었다.
- 바. 도플러 계수 및 냉각재 온도계수는 핵연료 온도와 냉각재 온도의 감소가 수반되는 사고이므로, 가장 부의 값을 갖는 경우를 사용하였다.
- 사. 주급수는 주증기관 격리신호가 발생하기 전까지는 양쪽 증기발생기로 공급되며, 신호 발생 10초 후에 주급수는 완전히 차단된다. 보조급수는 원자로 정지와 동시에 파단측 증기발생기로 144.999 kg/sec 로 주입되며, 양 증기발생기의 압력차가 2.4269 MPa 이상이 되면 보조급수가 차단된다.
- 아. 안전주입계통 작동시 하나의 안전주입 펌프의 고장을 가정하였다.
- 자. 사고초기조건은 표 2에 기술되어 있다.

주증기관 파단사고가 발생함과 동시에 소외전원이 상실되면, 즉시 비상디젤발전기의 작동신호가 발생한다. 원자로 냉각재펌프에 전원이 상실되어 노심유량이 감소되면 저 핵비등이탈을 정지조건이 형성된다. 사고후 1.2 초에 원자로 냉각재 펌프 저속도 정지신호가 발생하며, 동시에 보조급수가 파단측 증기발생기로 유입되기 시작한다고 가정한다. 20.1 초에 증기발생기 압력이 주증기관 격리신호 설정치인 2.4269 MPa 아래로 떨어진다. 주증기관 격리신호에 의해서 21.25 초부터 주 급수 격리밸브와 주증기 격리밸브가 잠기기 시작하여, 각각 26.25 초와 31.25 초에 완전히 잠긴다. 35.2 초에 가압기 압력은 안전주입 설정치인 10.7213 MPa 아래로 떨어진다. 작동가능한 고압 안전주입 펌프는 안전주입 작동신호 발생후 30 초내에 비상디젤발전기에 접속 기동되어 정격속도에 도달하고 고압안전주입 밸브는 완전히 개방된다. 52.5 초에 원자로용기 상부덮개내에 기포가 형성되기 시작하고 안전주입 펌프에 의해 주입된 붓소는 66.5 초에 노심에 도달하기 시작한다. 노심내 반응도는 228 초에 최대 -5.99 \$에 도달한다.

TASS의 결과와 RELAP5의 결과를 주요한 변수들에 대하여 그림 5에서 8까지 비교하였으며, 예측된 사고진행경위는 표 4에 나타나있다. 비교그림들은 대체적으로 같은 변화추이를 보이고 있으나, 상부덮개에서 생성되는 기포의 양과 생성시점의 차이에 따라 가압기의 압력차이가 나타나고 있으며, 또한 이로 인하여노심내로 주입되는 고압안전주입 유량과 붕소농도가 차이를 보이고 있다. 이러한 상부덮개에서의 기포양과 시점의 차이는 TASS 코드의 경우 상부덮개에서의 초기온도가 RELAP5의 경우보다 낮게 예측되어 평형상태에 도달하는 시간이 늦게 발생하고 또한 그 기간도 짧기 때문이다.

4. 결론

일반적으로 개발된 원전계통코드는 최적 코드 계산 결과와의 비교를 통하여 그 성능을 판단할 수 있다. TASS 코드의 CE형 원전의 과도현상에 대한 예측능력 평가를 위하여 주급수관 파단사고 및 주증기관 파단사고에 대하여 RELAP5/MOD3 코드와의 비교계산을 수행하였다. 계산결과 TASS 코드는 RELAP5/MOD3 코드의 예측결과와 비교적 잘 일치하였다. 서론에서 언급된 바와 같이 TASS 코드의 웨스팅하우스형 원전에의 적용 타당성은 이미 확인되었으므로 TASS 코드는 웨스팅하우스형 및 CE형 원전을 포함한 모든 가압경수로의 Non-LOCA 안전해석에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. H.Y.Yoon, et al, "Development of TASS Code for Non-LOCA Analysis Licensing Application," Feb., 1995.
2. EG&G, "RELAP5/MOD3 Code Manual, Vol.,I,II,III,IV,V," NUREG/CR-5535, EGG-2596. June, 1990.

표 1. 영광 3/4호기 주급수관 파단사고 분석을 위한 초기조건

변수	값
노심출력	2818.384 MW
정지반응도가	10.0 % $\Delta\rho$
노심입구온도	568.8 K
가압기압력	15.8772 MPa
증기발생기압력	7.3888 MPa
가압기 압력제어계통	작동 불능
터빈 증기 우회계통	작동 불능
주급수 제어계통	작동 불능
외부전원 상실	트립 차단기 열림 · 1.15 초후
보조급수계통	작동

표 2. 영광 3/4 호기 주증기관 파단사고 분석을 위한 초기조건

주요인자	값
노심출력	2816 MW
정지반응도가	10.0 % ρ
노심출력	568.8 K
가압기압력	15.51 MPa
증기발생기 압력	7.367 MPa
노심 유량	14910 kg/sec
가압기 압력 제어계통	수동
터빈증기 우회계통	수동
소외전원상실	사고와 동시 발생

표 3. 영광 3/4호기 주급수관 파단사고의 진행과정

시간 (초)		사 건
TASS	RELAP5	
0.0	0.0	주급수관 파단 (0.01858 M ²) 주급수계통 작동불능
19.8	30.0	증기발생기 저수위로인한 보조급수계통 작동신호 발생 (5% WR ; 4.33 M)
35.9	43.0	가압기 고압력에 의한 원자로정지신호 발생 (16.96 MPa)
35.2	44.2	원자로 정지 차단기 개방, 터빈정지밸브 닫힘, 소외전원 상실
37.0	47.0	가압기 안전밸브 열림 (17.51 MPa)
45.0	55.0	가압기 안전밸브 닫힘 (14.05 MPa)
66.1	76.3	보조급수계통에 의한 급수시작
174.0	193.0	주증기관 차단신호 발생 (5.44 MPa)
181.2	200.2	주증기관 차단밸브 닫힘

표 4. 영광 3/4호기 주증기관 파단사고의 진행과정

시간 (초)		사 건	값	
TASS	RELAP5		TASS	RELAP5
0.0	0.0	주증기관 파단사고 발생 및 소외전원 상실		
1.2	1.65	CPC 트립신호 발생, RCP 축 속도 (%)	94.86	94.86
20.1	19.75	증기발생기 압력이 주증기격리신호 설정치에 도달, MPa	5.4399	5.4399
35.35	30.85	가압기 압력이 안전주입 작동신호 설정치에 도달, MPa	10.721	10.721
46.1	43.65	양쪽 증기발생기의 압력차이가 보조급수 차단 설정치에 도달, MPa	2.4269	2.4269
66.5	60.05	안전주입 개시		
228.	468.	노심반응도가 최대치에 도달, \$	-5.99	-4.16

그림 1. 노심 입구 온도

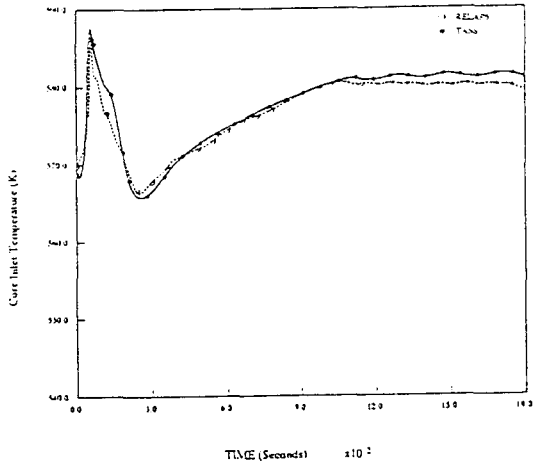


그림 2. 가압기 압력

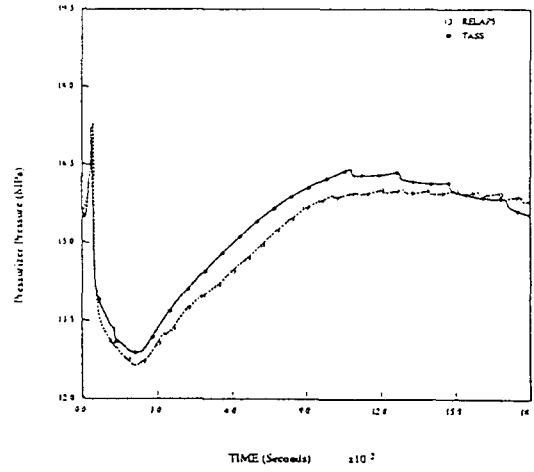


그림 3. 파단부위를 통한 누출유량

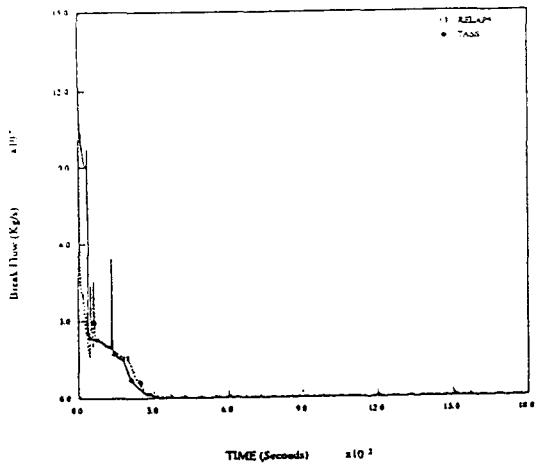


그림 4. 손상된 증기발생기 냉각수 재고량

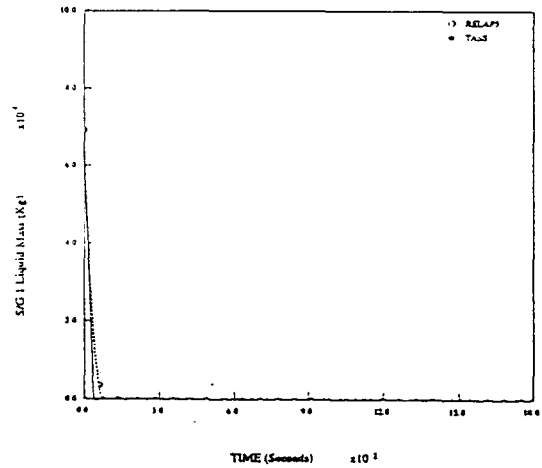


표 5. 사고유로의 고온관 온도

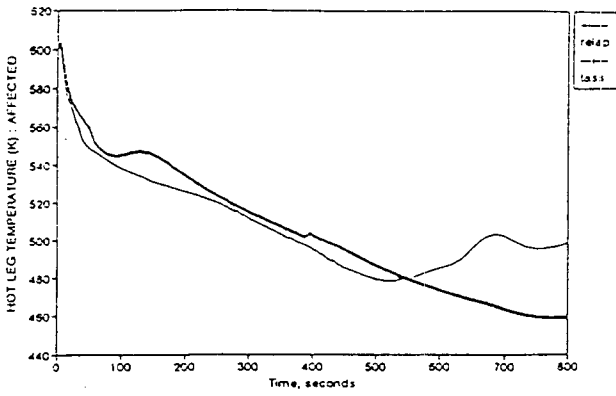


표 6. 사고유로의 저온관 온도

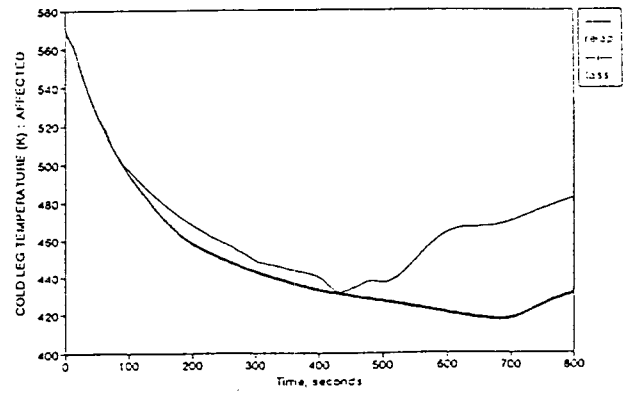


표 7. 사고유로의 증기발생기 유량

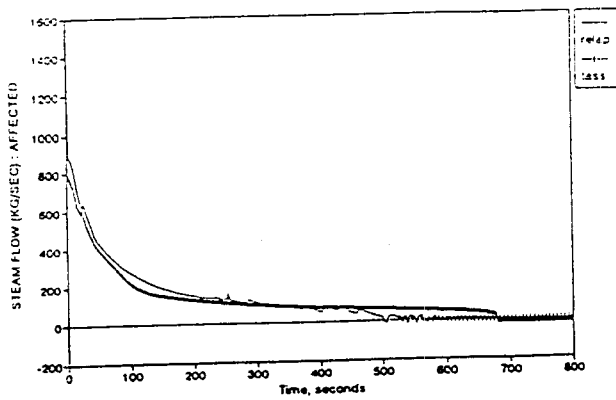


표 8. 상부덮개 기포율

