

**최적 계통분석 코드를 이용한 울진표준원전 시뮬레이터용
NSSS 열수력 프로그램 개발: 제 2부 독자평가 결과**

**Development of An NSSS Thermal-Hydraulic Program for the
KSNP (UCN-3/4) Simulator Using a Best-Estimate Code:
Part II. Results of Non-Integrated Standalone Test**

정재준, 김경두, 이승욱^a
한국원자력연구소, (주)액트^a

이명수, 홍진혁, 이용관, 서재승, 박세진^b
한국전력공사, 한국수력원자력(주)^b

요약

전력연구원과 한국원자력연구소는 울진표준형 원전(울진 3/4호기) 시뮬레이터 개발 과제
의 일환으로 최적 계통분석 코드인 RETRAN을 이용하여 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그
램 ARTS-UCN을 개발하고 있다. 원래 RETRAN 코드는 최적 계산을 주 목표로 개발되었
기 때문에 시뮬레이터의 성능 요건을 만족시키기 위해서는 상당한 수정 및 개선이 필요했다.
또한 보조계산체계 및 전문화된 모델을 일부 개발하였다. 본 논문에서는 ARTS-UCN 코드를
실제 시뮬레이터에 장착하기 전에 수행된 독자시험(Non-Integrated Standalone Test)의 결과를
간략하게 소개한다.

Abstract

KEPRI and KAERI have jointly developed an NSSS thermal-hydraulics simulation program
(called ARTS-UCN), based on the best-estimate system code, RETRAN, as a part of the
development project for the Korea Standard Nuclear Power Plant (UCN-3/4) Simulator. A
number of code modifications, such as simplifications and removing of discontinuities of the
physical correlations, were made in order to change the RETRAN code as an NSSS T/H engine
in the simulator. Some simplified models and a backup system were also developed. This paper
briefly presents the results of non-integrated standalone test of ARTS-UCN.

1. 서론

한국전력공사 전력연구원과 한국원자력연구소는 최적 계통분석 코드인 RETRAN을 이용하
여 울진 표준형 원전의 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그램(ARTS-UCN이라 함)을 개발하고
있다[1]. 원래 RETRAN 코드[2]는 최적 계통분석 코드로 개발된 것인데, 이를 시뮬레이터용
으로 개발하기 위해 여러 가지 수정 및 개선이 필요했다. 즉, 실시간 계산 및 Robustness

요건[3]을 만족시킬 수 있도록, RETRAN 코드에서 사용되는 복잡한 물리적 상관식(Correlations)을 단순화하고 유동영역에 따른 불연속성을 제거함으로써, 코드의 Robustness를 보완함과 동시에 실시간 계산이 가능하도록 개선했다. 또한 RETRAN 코드의 모의영역을 벗어나는 대형 냉각재 상실사고 등을 모의하기 위해 전문화된 모델을 개발하였다[4].

이와 같은 개발과정은 RETRAN 코드 고유의 장점을 훼손시킬 우려가 있으므로 물리현상을 왜곡시키지 않는 범위에서 코드를 수정해야 하며 그 결과가 물리적으로 타당한지를 확인해야 한다. 또한 종합적인 모의 결과가 시뮬레이터의 시험 요건[3]을 만족하는지 확인해야 한다. 이러한 맥락에서 현재 개발된 ARTS-UCN 코드를 이용하여 울진 3/4호기[5,6]의 다양한 운전 상황을 모의하고 그 결과를 평가하는 작업은 필수적이다.

그런데, ARTS-UCN 코드는 시뮬레이터 환경에 포함되는 여러 가지 모듈(Module)중의 한 개에 불과하며 특히 주증기 계통이 모의대상에 포함되지 않기 때문에 독자적인 평가계산(Non-Integrated Standalone Test; NIST)이 용이하지 않다. 즉, NSSS 전체의 열수력적 거동을 모의하기 위해서는 BOP 및 각종 경계조건(SI, SCS, CVCS, 원자로 보호 및 정지 계통 등)에 관한 모델이 필요하다. 이를 위해 주증기 계통의 간단한 모델을 도입하고 급수계통 및 1차 계통의 각종 유로(Flow paths)를 모델하여 경계조건으로 처리함으로써 NIST 수행을 위한 환경을 구축했다. ARTS-UCN 코드의 NIST는 PC 환경 및 시뮬레이터 환경에서 각각 수행했다.

본 논문에서는 ARTS-UCN 코드의 NIST 결과[7]를 간략하게 소개한다. 그러나 평가 대상 사고가 아주 다양하고, 이들을 각각 평가하는 일 자체가 방대한 업무이므로 여기에서는 ARTS-UCN 코드의 NIST 결과중에서 일부만을 소개하고, 모의결과의 정성적/정량적인 타당성을 논의하는데 주안점을 두었다.

2. ARTS-UCN 코드의 Non-Integrated Standalone Test 환경 개발

ARTS-UCN 코드는 Windows 환경에서 개발되어, Windows NT 환경에서 운용되는 시뮬레이터 환경에 탑재된다. ARTS-UCN 코드의 NIST 수행을 위해 우선 ARTS-UCN 코드를 독자적인 시험이 가능한 상태를 만들어야 한다.

앞에서 설명한 바와 같이 ARTS-UCN 코드는 독립적인 프로그램으로 개발된 것이 아니라 시뮬레이터의 NSSS 열수력 모듈로 개발되었기 때문에 독자적인 시험이 용이하지 않다. 예를 들면, ARTS-UCN 코드에는 노심 Kinetics Model, 증기관 모델, CVCS, SCS, ECCS 계통 모델, 원자로 제어 및 보호 계통 모델 등이 없다. 이들 모델이 결여된 상태에서 ARTS-UCN 코드의 성능시험은 곤란할 뿐만 아니라 의미도 없다. 따라서 NIST를 위한 환경 개발이 우선 수행되어야 한다. 여기에서는 필요한 모델을 아주 간단하게 ARTS-UCN 코드에 구현하여 NIST가 가능하도록 했다[7].

2.1 NIST를 위한 임시 열수력 모델 및 기타 모델

2.1.1 노심 모델

노심모델은 RETRAN 3D 코드의 Point-Kinetics Model을 사용한다.

2.1.2 증기관 모델

증기관 모델은 BOP 영역에서 취급되어야 할 모델이지만, 여기에서는 NSSS와 BOP model 간의 연계시험 및 자체 시험을 위해 아주 간단하게 모델했다. 각 증기발생기 출구의 유량제한기에서 주증기관 차단밸브(MSIV)까지의 증기관을 각각 하나의 제어체적으로 두고, MSIV 후단 및 공통관을 하나의 제어체적으로 둔다. 총 5개의 제어체적(그림 1 참조)에 대해 각각 질량 및 에너지 보존방정식을 풀어서 증기관의 거동을 모의한다.

각 증기관의 질량 보존방정식

$$V_{SL,i} \frac{\rho_i^{n+1} - \rho_i^n}{\Delta t} = W_{st,i} - W_{msiv,i} - W_{Valves} - W_{SLB} \quad (1)$$

여기에서 W_{st} : 증기발생기 출구유량

W_{msiv} : MSIV에서의 유량

W_{Valves} : PORVs, Safety valves 등의 유량

W_{SLB} : 주증기관 과단유량

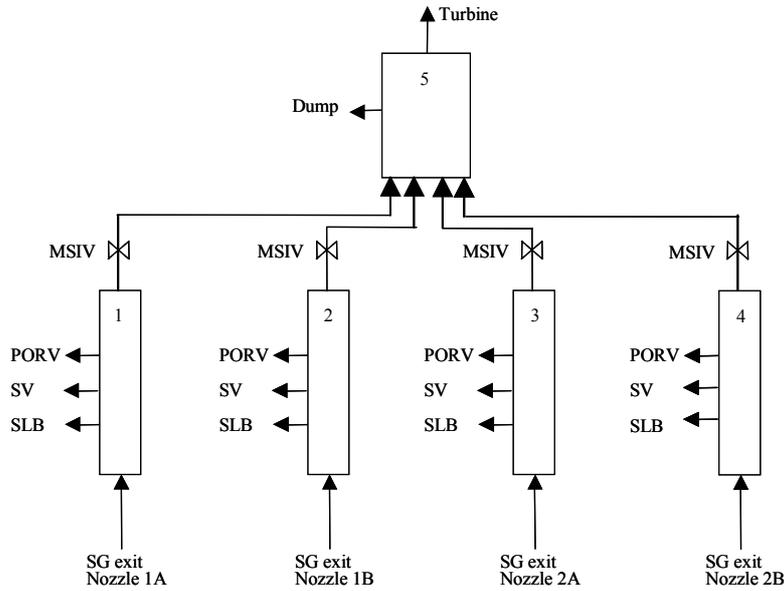


그림 1. 증기관 모델을 위한 Nodalization

각 증기관의 에너지 보존방정식

$$V_{SL,i} \frac{(\rho h)^{n+1} - (\rho h)^n}{\Delta t} = W_{st,i} h_{st,i} - W_{msiv,i} h_{msiv,i} - W_{SLB} h_{SLB} - W_{Valves} h_{Valves} + V_{SL,i} \frac{P^{n+1} - P^n}{\Delta t} \quad (2)$$

공통관의 질량 보존방정식

$$V_{CH} \frac{\rho^{n+1} - \rho_i^n}{\Delta t} = \sum_{i=1,4} W_{msiv,i} - W_{TBN} - W_{Dump} \quad (3)$$

여기에서 W_{TBN} : 터빈 유량, $W_{TBN} = A_{TBN} G_{crit}(P, h)$

W_{Dump} : Dump 유량, $W_{Dump} = A_{Dump} G_{crit}(P, h)$

공통관의 에너지 보존방정식

$$V_{CH} \frac{(\rho h)^{n+1} - (\rho h)_i^n}{\Delta t} = \sum_{i=1,4} W_{msiv,i} h_{msiv,i} - W_{TBN} h_{TBN} - W_{Dump} h_{Dump} + V_{CH} \frac{P^{n+1} - P^n}{\Delta t} \quad (4)$$

운동량 보존방정식(증기발생기 출구 및 MSIV에서의 유량계산)

$$I \frac{dW}{dt} = g_c (P_i - P_j) - \frac{1}{2\rho A^2} (f \frac{L}{D} + K) |W| W \quad (5)$$

계산순서

위의 식 (1) ~ (4)에서 유량 $W_{st,i}$ 와 $W_{msiv,i}$ 를 식 (5)를 써서 압력의 함수로 대체한다. 나머지 유량 (W_{TBN} , W_{Dump} , W_{SLB} 등)은 임계유동 경계조건을 써서 계산한다. 그 다음, 식(1) ~ (4)에 상태방정식을 대입하여 밀도를 소거하고, Newton-Raphson 방법을 써서 New time step에 서 각 제어체적의 압력과 엔탈피 및 유량을 계산한다. 유량은 역치환하여 계산한다.

이 계산 방식은 NSSS T/H 모델과 모 과제에서 개발중인 BOP Model의 주증기관 모델의 연계방식을 재현한 것이다. 즉, NSSS T/H model에서 계산한 증기발생기의 돔의 압력을 주 증기관의 입구 경계조건으로 쓰고, 결과적으로 계산되는 증기발생기 출구 유량은 다시 NSSS T/H Model의 경계조건으로 활용하는 방식을 말한다. 이 방식의 시험 결과, 저출력 운전에서 증기발생기의 출구 형태손실과 수력학적 관성을 약간 증가시키면 수치적 불안정성이 없음을 확인했다.

2.1.3 원자로 제어 및 보호계통 모델

울진표준원전의 설계자료 [5] 등을 참고로 원자로 제어 및 보호계통을 간략하게 모델했다. 단, COLSS/CPC는 모델하지 않았다. 필요시에는 수동으로 원자로를 정지시킬 수 있도록 했다.

2.1.4 ECCS, CVCS, SCS 모델

고압 및 저압 안전주입계통의 주입유량은 1차계통의 압력에 따라 결정된다. 설계자료 등을 참조로 하여 이를 Fill Junction으로 모델했으며, Accumulator 유량은 별도의 Accumulator 모델을 만들어 모의했다. CVCS 및 SCS 계통은 자동 및 수동운전이 가능하도록 모델했다.

2.2. 대화형 입출력 제어 기능 개발

ARTS-UCN 코드로 어떤 과도현상을 모의하려면 운전원의 제어행위나 Malfunction의 구현이 가능해야 하는데, ARTS-UCN 코드에서는 이러한 것들을 근본적으로 입력자료를 통해 가능하게 되어있다. 그러나, 어떤 과도현상을 모의할 때마다 입력자료를 수정·작성하는 일이 번거로울 뿐만 아니라, 다중사고 등을 모의할 때는 입력자료의 량도 상당히 증가하게 되어 모의 자체가 어렵게 될 수도 있다. 이 문제점을 해결하기 위해 대화형 입력제어기능을 개발했다. 즉, QuickWin 프로그램을 이용하여 대화상자를 만들고 이를 통해 사용자가 특정 밸브를 임의로 개방(혹은 폐쇄)할 수 있도록 했다. 이와 유사하게 원자로의 수동정지, 펌프의 정지 및 재가동 등을 가능하게 했으며, 경우에 따라서 Debugger를 이용해 모의변수 값을 직접 변경시키는 등의 방식으로 ARTS-UCN 코드를 대화형 제어가 가능하도록 개발했다 (그림 2 참조). 이 기능을 이용하면 다양한 운전조건의 수용여부를 시험하기 위한 입력자료의 생성이 불필요하며, 어떤 과도 운전 및 사고도 대화형으로 제어할 수 있게 된다.

또한, ARTS-UCN 코드의 출력은 Text File 형태로 만들어지기 때문에 모의결과의 추이 등을 파악하기에는 부적합하다. 그래서, 개발의 편의성과 효율을 도모할 수 있도록 On-line X-Y plot 기능을 개발했다 (그림 2의 배경화면 참조). 이 기능을 이용하면 미리 지정한 변수에 대한 On-line X-Y plot을 스크린에 나타내게 된다. 이와 같은 대화형 입출력 기능은 자체 평가를 위해 한 시적 용도로 제작한 것이기 때문에 일반화되어 있지 않으며 경우에 따라서 Debugger 기능을 활용했다.

시뮬레이터 환경에서는 위에서 설명한 대화형제어기능을 직접 쓸 수 없기 때문에 대화형 입출력 제어 변수를 직접 수동으로 바꾸면서 과도현상을 모의했다.

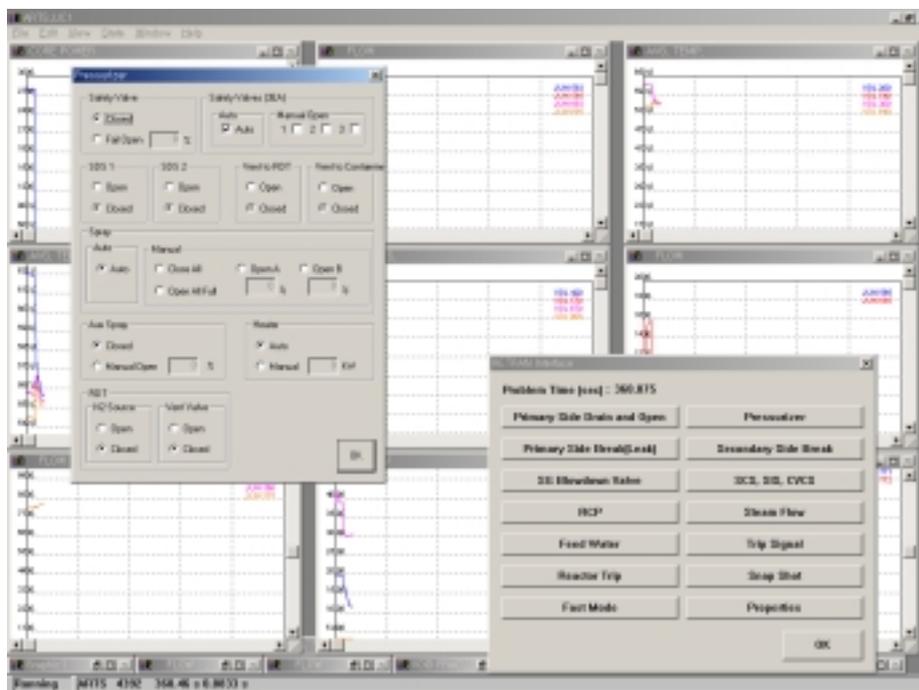


그림 2. NIST를 수행중인 ARTS-UCN 코드의 실행화면 (Windows 2000에서 작동)

3. NIST 수행 결과

시뮬레이터의 성능시험에는 안전상태시험, 열평형 시험, 종합운전시험, 과도상태시험 및 고장운전 시험 등이 포함된다. 표 1에는 울진표준형 원전과 유사한 영광 3/4호기의 시뮬레이터 인수시험 절차서에 포함된 성능시험 항목중에서 NSSS 열수력 모듈과 관련성이 큰 항목이 요약되어 있다. ARTS-UCN 코드의 NIST는 표 1에 열거된 항목중에 각 사고유형별로 제한적인 사고를 선정하여 수행했으며 NIST 결과는 참고문헌[7]에 요약되어 있다.

표 1. 시뮬레이터 성능시험 항목중 NSSS 열수력 모듈과 관련성이 큰 항목 (뒤 쪽으로 계속됨).

종 류	내 용	출력 (%)	기타
안전상태시험	출력 100%, 지논평형, 노심초기, 안정상태시험	100	BOL/안정상태
	출력 75%, 지논평형, 노심초기, 안정상태시험	75	BOL/안정상태
	출력 50%, 지논평형, 노심초기, 안정상태시험	50	BOL/안정상태
	출력 25%, 지논평형, 노심초기, 안정상태시험	25	BOL/안정상태
	고온대기, 지논전무, 노심초기, 안정상태시험	고온대기	BOL/지논없음
	저온정지, 지논전무, 노심초기, 안정상태시험	저온정지	BOL/지논없음
열평형시험	100% 출력 열평형시험	100	BOL/안정상태
	75% 출력 열평형시험	75	BOL/안정상태
	50% 출력 열평형시험	50	BOL/안정상태
	25% 출력 열평형시험	25	BOL/안정상태
종합운전시험	100% 출력에서 75% 출력까지의 운전	100	BOL/안정상태
	75% 출력에서 50% 출력까지의 운전	이하 시험은 위 조건으로 연속적으로 시행	
	50% 출력에서 2% 출력까지의 운전		
	2% 출력에서 고온대기까지의 운전		
	고온대기에서 고온정지까지의 운전		
	고온정지에서 저온정지까지의 운전		
	저온정지에서 고온정지까지의 운전		
	고온정지에서 고온대기까지의 운전		
	고온대기에서 2% 출력까지의 운전		
2% 출력에서 100% 출력까지의 운전			
과도상태시험	수동원자로정지	100	BOL/지논평형
	모든 급수펌프 동시트립	100	BOL/안정상태
	모든 주증기 차단밸브의 동시폐쇄	100	BOL/안정상태
	모든 원자로냉각재펌프의 동시트립	100	BOL/안정상태
	한 대의 원자로냉각재펌프 트립	100	BOL/안정상태
	주 터빈트립	100	BOL/안정상태
	최대출력 변동 (-100% → 100%)	100	BOL/안정상태
	격리불능 주증기관의 최대파열	100	BOL/안정상태
	소형냉각재 상실사고	100	BOL/안정상태
	증기발생기 세관파단	100	BOL/안정상태
	부분충수운전	-	저온정지

표 1. 시뮬레이터 성능시험 항목중 NSSS 열수력 모듈과 관련성이 큰 항목 (앞 쪽에서 계속됨).

종 류	내 용	출력 (%)	기타
고장운전시험	제어봉 낙하사고	15	BOL
	제어봉 이탈사고	7.5	BOL
	부하 상실	100	안정상태
	부하 증가	100	안정상태
	급수관 파열	100	안정상태
	증기발생기 노즐부위 급수관 파열	100	안정상태
	부주의에 의한 터빈구동 보조급수펌프 기동	100	안정상태
	격납용기내 증기관 파열 (설계기준)	100	안정상태
	격납용기 외부 증기관 파열 (MSIV 전단)	100	안정상태
	주증기 격리밸브 고장	100	안정상태
	증기덤프 고장	고온대기	트립 1시간후
	증기덤프밸브의 부주의한 개방	30	지논없음
	증기발생기 안전밸브 고장	50	안정상태
	부적절한 원자로정지	100	안정상태
	가압기 압력채널 고장	100	안정상태
	가압기 압력 주제어기 고장	100	안정상태
	가압기 수위 채널 고장	0	안정상태
	가압기 안전밸브 누설	100	안정상태
	가압기 분무밸브 고장	100	안정상태
	가압기 전열기 고장	100	안정상태
	대형 냉각재 상실사고	100	안정상태
	RCS 누설 (C/L)	25	안정상태
	원자로냉각재 펌프 정지	25	안정상태
	원자로냉각재 펌프 축 파손	100	안정상태
	원자로냉각재 펌프 회전자 고착	100	안정상태
	원자로냉각재계통 붕소농도 변화	100	안정상태
	연료피복재 파손	100	안정상태
	증기발생기 튜브 누설	100	안정상태
	원자로냉각재 펌프의 부적절한 기동	저온정지	BOL/가압기기포
	원자로 압력용기 플랜지 누설	100	안정상태
	정지냉각계통 유량 조절밸브 고장	저온정지	BOL/만수위

3.1. 정상운전 NIST 결과

NIST를 수행함에 있어서 먼저 정상상태 결과를 비교해 보았다. 울진 3/4호기의 전출력 운전조건은 정상운전 자료, 최종안전분석보고서[5,6] 등을 참고하여 설정하였다. ARTS-UCN 코드로 2500초간 Null-transient 계산을 수행하여 최종적인 정상상태 운전조건을 얻었으며, 설정 운전조건 및 계산결과의 비교는 표 2에 나와있다. 실제 시뮬레이터 환경에서는 별도의 노심모형을 사용하므로 정상상태 운전시험에서의 원자로 열출력을 2815 MWt로 고정하여 테스트를 진행하였다. 결과표에 보면 모든 주요 원자로 계통 변수들이 ± 1%의 오차 범위내에 들고 있음을 알 수 있다.

표 2. ARTS-UCN 코드의 NIST 결과: 정상상태 운전

원자로 계통 변수	입력 초기 조건	모의된 초기 조건	오차 (%)
노심 열출력 (MWt) *	2815.0	2815.0	0.00
가압기 압력 (psia)	2250.0	2253.9	0.17
가압기 수위 (%)	52.6	52.6	0.00
냉각재 유량 (lb/sec)**	3.3750E+4/3.2750E+4	3.3245E+4	-1.5 / +1.5
고온관 온도 (°F)	621.2	621.19	0.00
저온관 온도 (°F)	564.5	564.49	0.00
냉각재 평균온도 (°F)	592.85	592.84	0.00
주증기관 압력 (psia)	1070.0	1069.69	-0.03
증기발생기 수위 (%)	44.0	44.0	0.00
주급수 유량 (lb/sec)	1766.4 (×2)	1763.6 (×2)	-0.16
증기유량 (lb/sec)	1766.4 (×2)	1763.6 (×2)	-0.16

* 1차측 열출력을 2815 MWt로 고정

** 총유량 / 최소설계유량

3.2. 과도 운전 NIST 결과

ARTS-UCN의 Robustness와 정확도를 평가하기 위해 표 1에 열거된 사고중에서 각 사고유형별로 제한적인 사고를 다음과 같이 선정하여 과도현상 모의를 수행하였다:

과도상태 시험

- 수동 원자로정지
- 모든 급수펌프 동시트립
- 모든 주증기차단밸브의 동시 폐쇄
- 모든 원자로냉각재펌프(RCP)의 동시 트립
- 한 대의 원자로냉각재펌프 트립
- 주 터빈트립

- 최대 출력변동 (100%→75% →100%)
- 소외전원상실 및 원자로냉각재관 최대과열에 의한 혼합사고
- 격리불능 주증기관의 최대과열

고장운전시험

- 부하 상실
- 부하 증가

- 급수관 파열
- 증기발생기 노즐부위 급수관 파열
- 부주의에 의한 터빈구동 보조급수펌프 기동
- 격납용기내의 증기관 파열 (DBA)
- 격납용기 외부 증기관 파열 (MSIV 전단)
- 증기덤프 고장
- 증기발생기 안전밸브 고장
- 부적절한 원자로정지
- 가압기 압력채널 고장
- 가압기 압력 주제어기 고장
- 가압기 수위 채널 고장
- 가압기 안전밸브 누설
- 가압기 분무밸브 고장
- 가압기 전열기 고장
- 대형 냉각재 상실사고
- 원자로냉각재 펌프 정지
- 원자로냉각재 펌프 축 파손
- 원자로냉각재 펌프 회전자 고착
- 증기발생기 튜브 누설
- 원자로 압력용기 플랜지 누설

위의 사고에 대한 ARTS-UCN 코드의 NIST 결과 "실시간 계산 능력" 및 "Robustness" 측면에서 모두 만족스러웠다[7]. 상기 시험은 Windows 2000, 500 MHz Pentium CPU를 장착한 개인용 컴퓨터에서 수행했는데, 모두 실시간 요건 및 정확도를 만족시켰으며, LBLOCA의 경우에는 보조계산체제로 자연스럽게 전환되어 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

여기에서는 모든 RCP의 동시 트립 사고, 대형냉각재 상실사고, ARTS-UCN에 새롭게 도입된 충수 및 배기운전 모델에 대한 시험 결과 및 주증기관 파단사고 모의결과를 소개한다.

3.2.1 모든 RCP의 동시 트립

이 사고의 초기조건은 100 % 전출력, 정상운전 (Steady-state operation 상태라고 가정했다. 전출력 운전중 수동으로 모든 RCP를 트립시켜 이 사고를 유발시켰다. 이후 운전원의 조치는 없으며 모든 계통은 자동으로 작동하게 했다. 모든 RCP가 정지하면 즉시 원자로 저유량 신호에 의해 원자로가 정지된다 (그림 3과 4 참조). 그후 원자로는 자연순환에 의해 냉각되며 이때 고온관과 저온관의 냉각재 온도차이는 그림 4에 나타난 바와 같이 정상운전시의 온도차이를 초과하지 않는다. 가압기 압력은 원자로 정지 직후에 떨어지며 그 후에 덤프계통이 작동하면서 더 떨어지다가 일차측 온도가 무부하 조건에 도달하여 덤프계통의 작동이 중지되면서 서서히 증가하여 정상 압력에 도달한다 (그림 6 참조).

그림 7과 8은 각각 증기발생기 수위 및 가압기 수위를 나타낸다. 증기발생기 수위는 원자로 정지 직후에 Shrink 현상에 의해 급격히 감소하지만 광역수위 기준 50 % 정도의 수위를 유지하므로 보조급수는 공급되지 않는다. 이후 증기발생기 수위는 증기발생기 강수관으로 공급되는 주급수에 의해 서서히 회복된다. 본 모의에서는 저출력 급수제어 논리를 사용하지 않기 때문에 증기발생기의 수위는 정상운전 수위인 44 %를 초과하는 결과를 보여준다. 이 사고의 모의를 통해 1차 냉각계통의 자연순환 및 이차 계통의 일반적 특성이 잘 모의되고 있음을 알 수 있다.

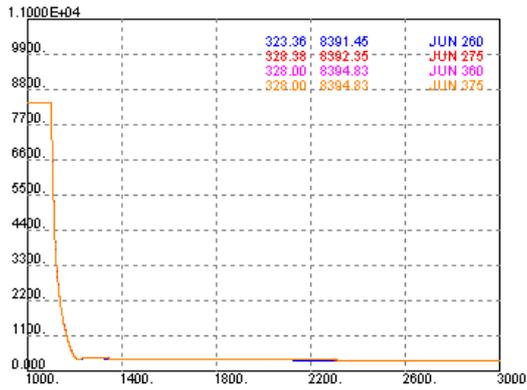


그림 3. 모든 RCP 정지: 일차측 루프유량 (lb/s)

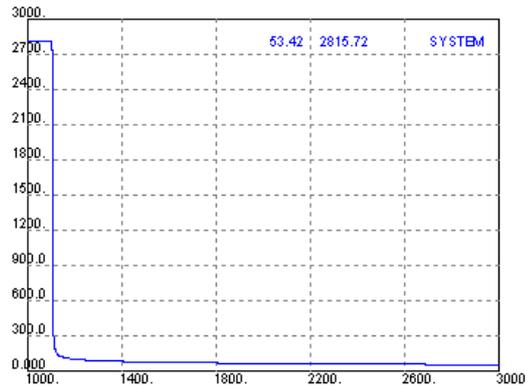


그림 4. 모든 RCP 정지: 원자로 출력 (MW)

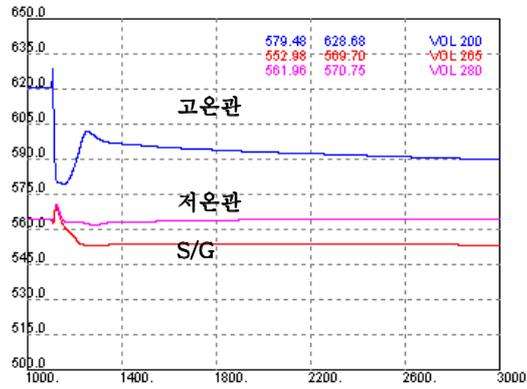


그림 5. 모든 RCP 정지: 일차냉각재 온도 (F)

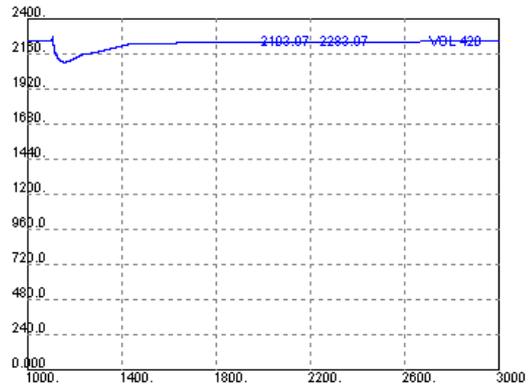


그림 6. 모든 RCP 정지: 가압기 압력 (psia)

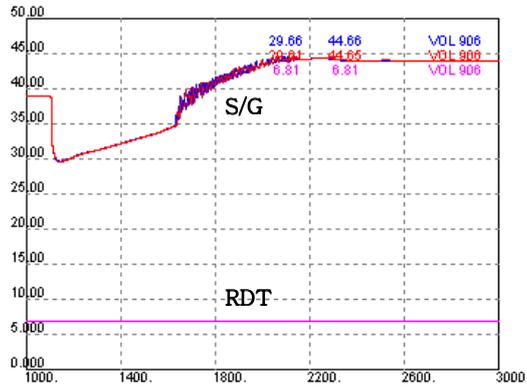


그림 7. 모든 RCP 정지: SG 수위 (ft)

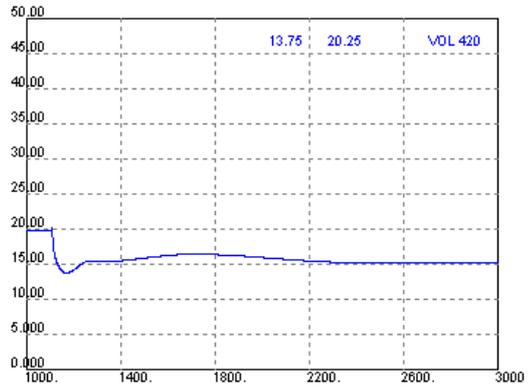


그림 8. 모든 RCP 정지: 가압기 수위 (ft)

3.2.2 대형 냉각재 상실 사고

그림 9 ~ 14는 저온관 1B의 양단 파단(Double-ended break)에 의한 대형냉각재상실사고의 모의결과를 보여준다. 파단 발생이후 운전원의 조치는 전혀 없는 것으로 가정하였다. 파단 직후에 원자로가 정지되며 일차냉각계통의 압력은 거의 대기압에 가깝게 떨어진 것으로 계산된다. 이 사고의 계산은 원래 ARTS-UCN의 RETRAN module로 수행되다가 실시간 계산

(real-time calculation)의 제약으로 인해 자연스럽게 보조계산체계로 전환되어 진행되었다.



그림 9. LBLOCA: 원자로출력 (MW)

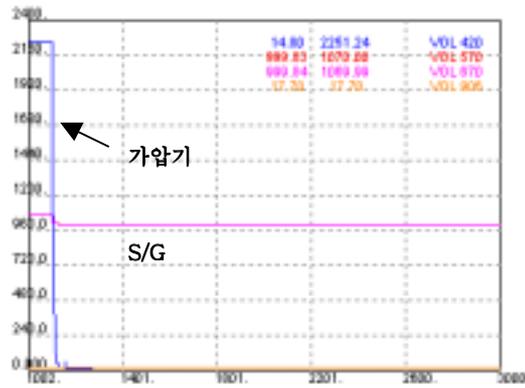


그림 10. LBLOCA: 가압기 및 SG 압력 (psia)

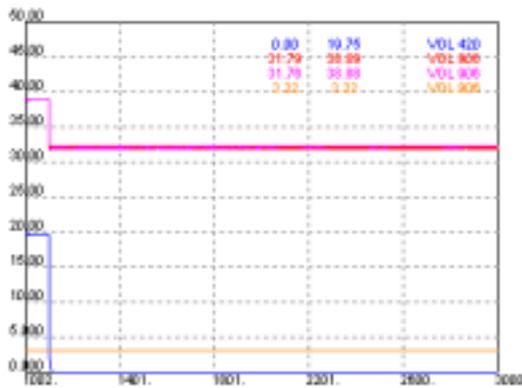


그림 11. LBLOCA: 가압기/SG 수위 (ft)

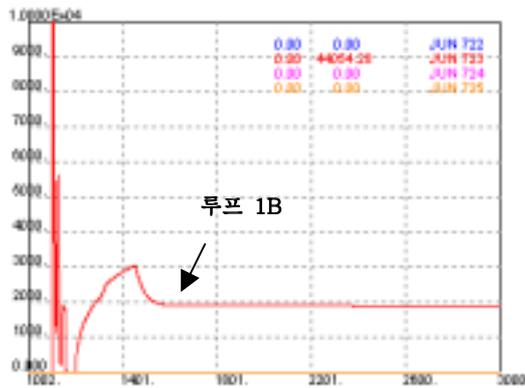


그림 12. LBLOCA: 파단유량 (lb/s)

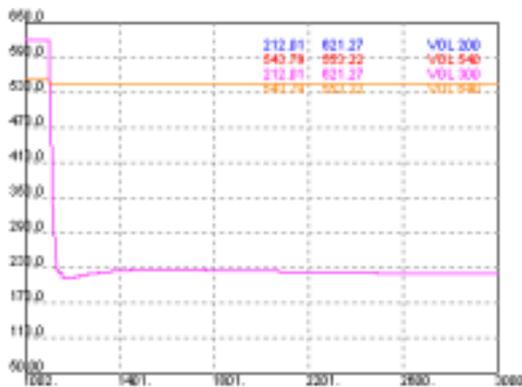


그림 13. LBLOCA: RCS 및 SG 2차측 온도 (F)



그림 14. LBLOCA: 1차계통 냉각재유량 (lb/s)

3.2.3 충수 및 배기운전

충수 및 배기운전 시험에서는 부분충수운전 모드를 초기조건으로 사용하였다. 원자로 냉각재 계통의 부분충수운전이 종료되면 계통내에 냉각재를 채우는 충수운전을 하는데 증기발생기 튜브와 같이 밀폐되어 있는 계통 특성상 충수운전 후에도 계통내에는 비응축성 기체가

다량 존재하게 된다. 충수에 의한 정적배기 운전만으로는 증기발생기 튜브와 같이 밀폐된 공간내에 잔존하는 비응축성 기체를 완전히 제거할 수는 없으므로 RCP를 운전하여 세관내에 남아 있는 기체를 가압기 및 원자로용기 상부로 이동시켜 배기하는 동적배기 운전을 실시한다. ARTS-UCN 코드에서는 이런 배기운전을 모의하기 위해 별도의 전문 모델을 만들었다.

충수 및 배기 운전 결과는 그림 15~18에 나타나 있다. 초기 냉각재 계통의 상태는 원자로냉각재의 수위가 고온관 기포율이 약 0.47 정도로 유지되는 부분충수운전 상태이다. RCS 냉각재 온도는 정지냉각계통을 이용하여 약 70 °C 정도를 유지하고 있으며 충수를 위해 정상충전유로를 통하여 계통내에 냉각재를 주입하여 냉각재 수위를 상승시킨다. 이에 따라 원자로용기 상부 플레넘 및 고온관의 기포율은 감소한다. 지속적인 충수에 따라 가압기 수위가 상승하며 수위가 100%에 이르면 가압기 상부에 연결된 배기밸브를 폐쇄한다. 계통이 밀폐되면서 충수에 의해 계통압력은 계속 증가하게 되고 RCP 구동압력인 약 400 psia에 이르면 충수를 정지하고 계통의 압력을 일정하게 유지한 다음, 동적 배기에 들어 간다. 동적 배기는 RCP를 순차적으로 약 30초 이내로 구동하여 증기발생기 세관의 비응축성 개스를 가압기 및 원자로용기 상부로 이송한 다음, 계통을 다시 감압하고 배기를 하는 과정을 말한다. 그림 18은 동적 배기중 RCP를 계통압력을 변화를 보여준다.

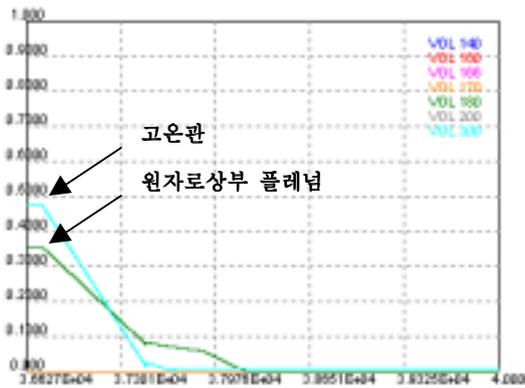


그림 15. 정적배기: 기포율



그림 16. 정적배기: 수위 (ft)

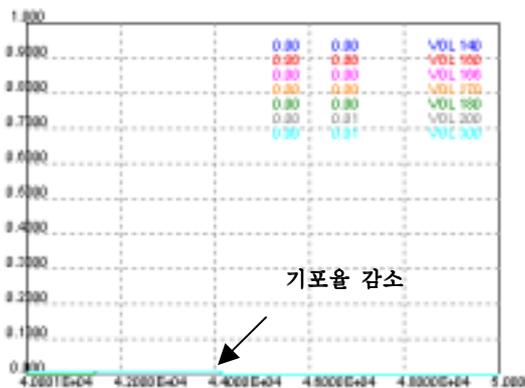


그림 17. 동적배기: 기포율

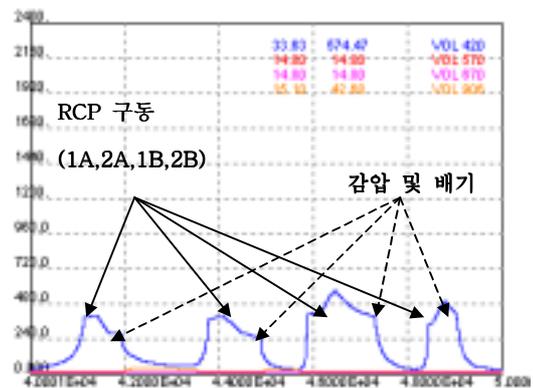


그림 18. 동적배기: 가압기 압력 (psia)

배기에 소요되는 시간은 RCP 구동시간에 따라 달라진다. 본 모의에서는 RCP 구동시간을 비교적 길게 하여 배기에 소요되는 시간이 상대적으로 짧았다. 이상의 결과로 볼 때 충수 및 배기운전을 위해 개발된 모델은 비록 실제 물리적 현상을 완벽하게 모델링하지 않았지만 실제 발전소 운전과 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

3.2.4 주증기관 파단사고(시뮬레이터 환경에서 수행)

제 3.2.1 ~ 제 3.2.3절에 소개된 NIST 결과는 PC 환경(Windows 2000)에서 수행된 것이다. ARTS-UCN이 실제 시뮬레이터 환경(Windows NT, SimSuite 환경)에 장착되었을 때의 성능을 보기 위한 시험도 병행해서 수행했다. PC 환경의 NIST에 비해 시뮬레이터 환경에서의 NIST는 좀더 실제 시뮬레이터와 유사한 환경의 시험이라는 장점이 있을 뿐만 아니라 실시간 시험 (Real-time test)가 자연스럽게 이루어 진다는 큰 장점이 있다. 따라서 PC 환경에서 수행된 NIST 항목중에서 실시간 계산 여부가 의문시되는 항목은 모두 시뮬레이터 환경에서 재 평가를 했다. ARTS-UCN의 실시간 계산능력은 이 같은 시험을 통해 확인이 되었고, 이미 ARTS 코드의 성능시험을 통해 간접적으로 입증된 바 있다.

그림 19와 20은 시뮬레이터 환경에서 제공되는 ATTACHE 화면을 보여준다. 이 그림들은 주증기관 1A가 80 % 파단된 경우의 사고 추이를 보여준다. 이와 유사한 계산결과가 ARTS-UCN의 NIST 보고서[7]에 나와 있으므로 상세한 설명은 생략한다.

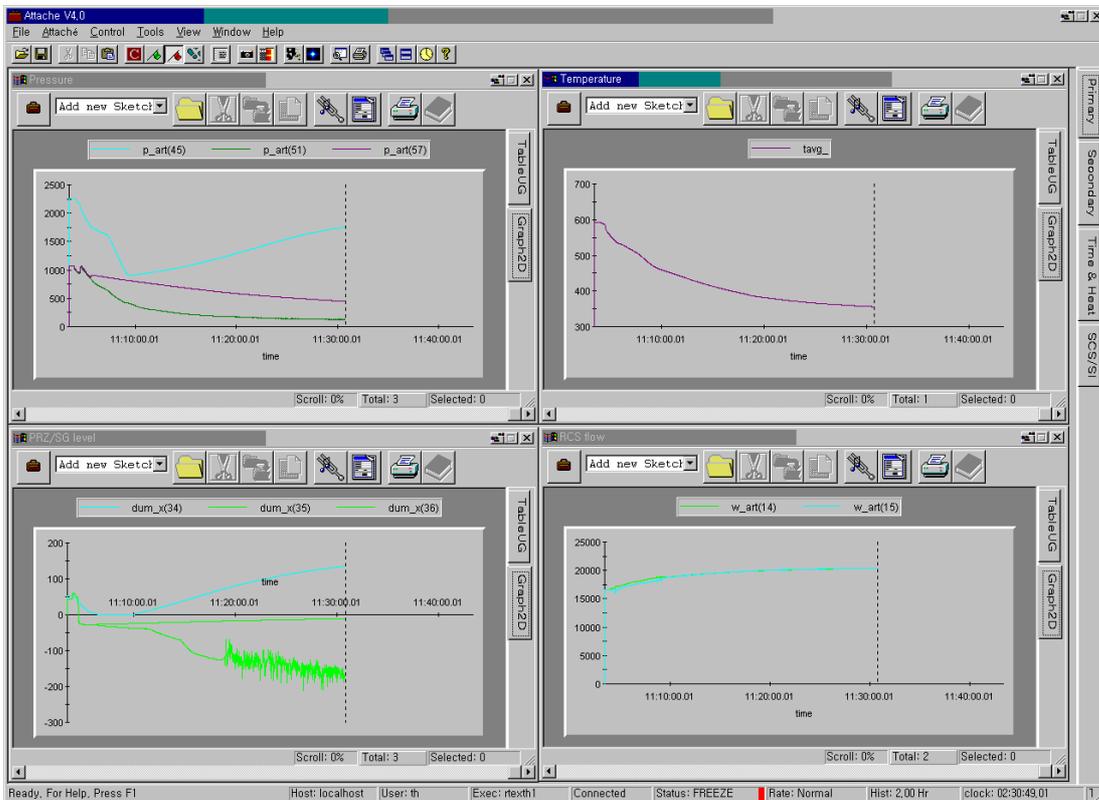


그림 19. MSLB 계산중의 ATTACHE 화면: 가압기/SG 압력, Tavg, 가압기/SG 수위, 냉각재유량

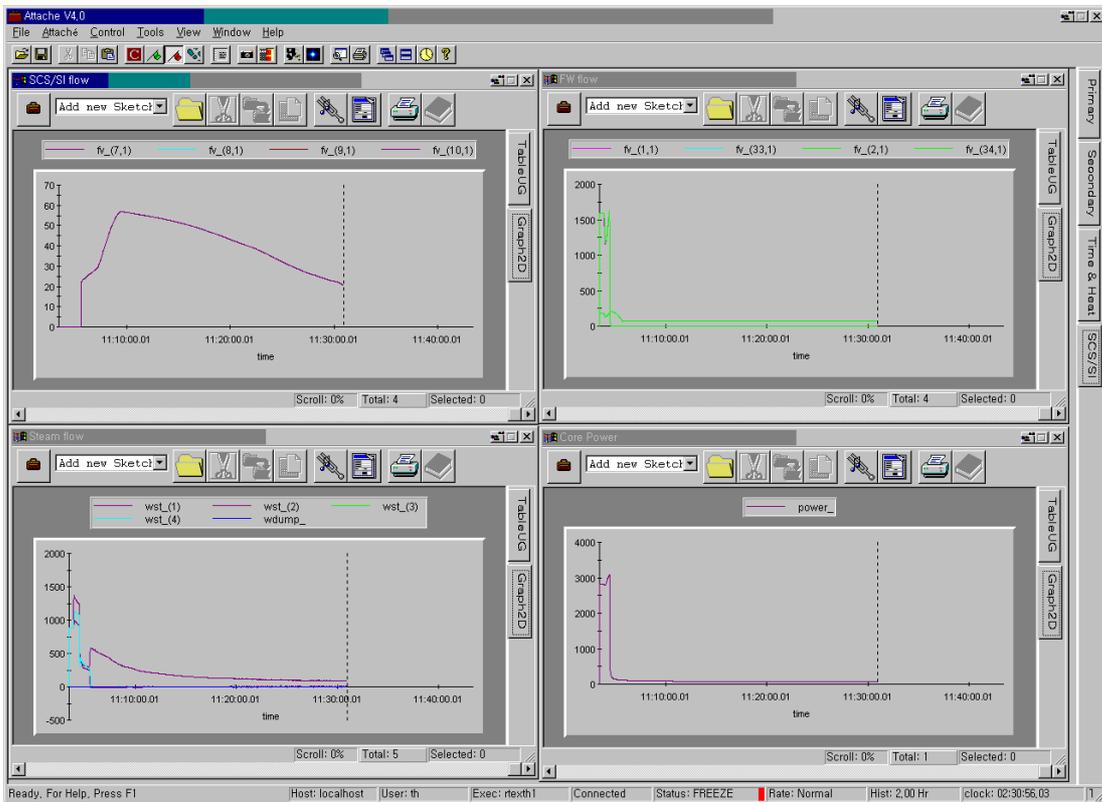


그림 20. MSLB 계산중의 ATTACHE 화면: 안전주입유량, 급수유량, 증기유량, 원자로출력

4. 결론

전력연구원과 한국원자력연구소는 기존의 RETRAN 3D 및 ARTS 코드 (원자력 교육원 시뮬레이터 2호기용 NSSS T/H 프로그램)를 기반으로 하여 울진 원자력 3/4호기 시뮬레이터의 NSSS 열수력 모델인 ARTS-UCN 코드를 개발하고 있다. ARTS-UCN 코드의 전반적인 성능, 즉, 다양한 운전 및 사고 시나리오에 대한 실시간 모의능력, Robustness, Realistic Simulation Capability 등을 평가하기 위해 NIST를 수행했다. NIST는 PC 환경 및 시뮬레이터 환경에서 각각 수행되었으며 그 결과는 만족스러운 것으로 입증되었다.

현재 ARTS-UCN 코드는 노심 및 BOP 모델 등과 연계되고 있으며, 연계된 상태에서 일부 시험이 진행되고 있다. ARTS-UCN 코드가 울진표준형 원전 시뮬레이터의 NSSS T/H 모델로서 성공적으로 장착되면, 운전원의 훈련 및 평가에 최적(Best-Estimate)의 시뮬레이션 환경을 제공할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김경두 외, “최적계통분석코드를 이용한 울진표준원전 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그램 개발: 제 1부 코드개발”, 한국원자력학회 2001년도 추계학술발표회.
2. M. P. Paulsen et al., RETRAN 3D code manual, EPRI NP-7450, Electric Power Research Institute (1998).

3. Nuclear Power Plant Simulators for Use in Operator Training and Examination, ANSI/ANS-3.5-1998, American Nuclear Society (1998).
4. 이명수 외, 원자력교육원 2호기 시뮬레이터 성능개선, 01-전력연-단251, 한국전력공사 전력연구원, 2001.6.
5. 울진 원자력 3/4호기 최종안전성 분석 보고서, 한국전력공사.
6. 한국형 표준원전 계통실무, KAERI/GP-108/96, 한국원자력연구소 (1996).
7. 울진 표준 원전 시뮬레이터 NSSS T/H Model NIST 결과, 2001. 5, 한국원자력연구소.