

RELAP5/Mod3.1을 이용한 자연순환 실험 SNC-3, SNC-4의 모사

김상녕, 안성수, 장완호

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천 1번지

요 약

자연대류 현상의 특성과악과 주요 관련변수들에 대한 이론적인 연구를 위하여 단일 순환계통 자연대류 실험인 SNC-3, 4를 RELAP5/Mod3.1로 모사계산하여, RELAP5/Mod1의 모사결과와 비교하여, RELAP5의 버전에 따른 결과의 차이를 비교하도록 하였다. 이를 위하여 Mod1의 input을 수정하여 Mod3.1로 바꾸고 이를 계산하도록 하였다. 두 실험에 대한 Mod3.1 모사계산 결과는 Mod 1의 계산결과와는 달리 실험을 매우 훌륭히 모사함을 보이고 있다.

1. 서 론

원자력 발전소의 인허가시 원자력 발전소 안전성 평가에 사용되는 기존의 방법은 많은 보수성이 내포되어 있다. 이는 원자력 발전소의 안전성과 관련된 기술개발이 완벽하지 못하고 운전경험도 충분하지 못하였기 때문이다. 하지만 최근 안전성 평가 관련기술의 비약적인 발전 (특히 전산코드 분야)으로 최적 평가기술이 상당한 신뢰성을 갖게 되고 또한 근거도 마련되었다 (Reg. 1. 157). 따라서 최근의 연구는 원자력 발전소 인허가시 보수성이 강조된 기존의 해석방법(10 CFR Appx. K)에서 최적 전산코드를 이용한 평가방법으로 바뀌는 경향이다. 단지 최적 평가방법 (코드)의 사용시, 최적코드의 불확실성을 정확히 예측하여 이를 평가에 반영하여야 한다. 따라서 이러한 불확실성의 정확한 계산이 가장 중요한 핵심이 된다.

한편 안전해석과 관련하여 국제적으로 널리 보급되고 가장 신뢰성있으며 최근까지 계속 개발되고 있는 전산코드는 RELAP5이다. 하지만 아직도 원자력 발전소에서 일어나는 각종 사고와 이와 관련한 여러 현상을 완벽하게 모사하는 데는 한계가 있다. 특히 자연대류 냉각현상은 소규모 냉각재 상실사고시 안전성 관점에서 매우 중요함에도 불구하고 현상의 복잡성과 모델의 미비로 인하여 많은 불확실성을 갖고있다.

그러므로 본 연구에서는 최적코드의 불확실성 예측을 위해 기존의 실험 및 모사자료를 RELAP5/Mod3.1과 비교 검토하여 RELAP5에 사용된 해석모델의 정당성과 코드의 불확실성을 평가하고자 한다.

2. SNC-3, 4 실험과 RELAP5의 모사

자연순환실험 SNC-3, SNC-4는 Semiscale Mod-2A 실험장치를 이용하여 수행되었다 (그림 1). 이 실험장치는 PWR에서 발생할 수 있는 LOCA사고(Loss Of Coolant Accident)에 수반된 열수학적 현상을 조사할 목적으로, 4 루프 PWR을 1/1705 volume scale로 축소제작한 장치이다. 장치의 계통은 파단이 발생한 순환

루프를 모사하는 broken loop와 파단되지 않은 3개의 순환루프를 모사한 intact loop으로 구성되어 있다. SNC-3, SNC-4 실험은 SB LOCA시 증기발생기가 정상적으로 작동하는 경우, 자연대류의 발생과 단상류, 이상류, 리플릭스 자연순환간의 전이현상을 조사하였다.

SNC-3실험에서는 92%~100%의 1차측 mass inventory에서 자연순환에 대한 증기발생기 2차측의 열전달 면적 감소 효과를 조사하였다. 1차계통의 냉각수 방출로 인한 계통 내의 동요를 최소화 하도록 충분한 시간차를 두고, 원자로 용기 하부를 통하여 1차계통의 최대 mass inventory의 약 4%정도를 반복하여 방출하여 실험을 진행한 결과, 92% 1차계통 mass inventory가 92%근방에 도달하자 이상자연순환이 형성되었다. SNC-4 실험은 이상유동실험 SNC-3 실험의 reflux 냉각현상을 심도 있게 조사한 실험으로, 서로 다른 1차계통의 조건(1차계통 Mass Inventory: 50% ~ 70%, 로심출력: 30kW, 60kW)에서 reflux 자연순환에 대한 증기방생기 2차측 냉각수에 의한 효과를 조사한 것이다.

RELAP5/Mod1을 이용한 SNC-3의 모사는 1979년 5월에 Sandia Lab.에서 수행한 것이다. 이의 nodalization은 그림 2와 같다. 모사결과 2차측 수위가 낮은 경우 유동율의 급격한 감소를 충분히 예측하지 못하고 계산된 flow oscillation의 값도 작게 나타났다. SNC-4의 경우는 case 8에서 carryover mass flow값과 steam generator의 liquid level값이 더 크게 나타났으며 reflux mass flow의 경우는 실험보다 적은 것으로 나타났다. 또한 30 kW의 경우 case 3에서 primary system pressure가 더 작은 것으로 모사되었다.

위의 결과와 Mod3.1의 결과를 비교하기 위하여 Sandia Lab.에서 입력화일 작성시 채택했던 모델링과 동일한 모델링을 토대로 하여 입력화일을 작성하고, steam generator의 separator 부분을 개정하고 압력유지를 위한 control component를 수정하여 input을 작성하고 이를 모사하도록 하였다(그림 3).

3. 모사결과

(1) SNC-3의 모사

실험결과는 증기발생기 2차측이 500 cm이상인 경우, 1차계통 유동율은 증기발생기 2차측 수위의 변화에 영향받지 않으며, 2차측이 500 cm이하일 경우, 자연대류 유동율 또한 급격하게 감소하며, flow oscillation이 발생하고 있다. Mod 1의 모사결과는 2차측 수위가 300 cm까지 유동율이 일정하게 유지되며, 실험에 비해 약 0.5~0.8 kg/s정도 낮다. 2차측 수위가 200 cm 에서야 비로서 약간의 유동율 감소 경향이 나타나고 있다. 한편, Mod 3.1의 경우 전구간에서 실험의 경향과 그 크기를 잘 모사한다. 그림에서 40%이하인 경우 다소 어긋나는 것처럼 보이나 표 1의 no. 17~19에서 실험값이 가지는 오차범위를 벗어나지 않는다.

1차계통 압력의 경우 실험값은 증기발생기 2차측 수위가 500 cm 근방에서 1차 계통 압력이 급등하는 반면에, Mod 1은 380 cm 근방에서 급등하는 경향을 보이고 있으며, 실험에서의 측정값에 비해서 예측 압력의 최고값은 약 14% 높게 나타나며, 최저값은 약 7%정도 낮게 나타난다. Mod 3.1의 경우 실험에서의 변동 경향과 380 cm 근방에서 크기를 잘 모사하고 있다.

1차계통 저온관의 온도는 증기발생기 2차측의 수위가 500 cm이하인 경우, 실험값보다는 Mod 1의 모사결과 쪽으로 편중되는 현상을 보이고 있다. 이상의 결과를 볼 때 그림 3의 노드구조를 갖는 입력화일을 이용한 Mod 3.1의 모사계산은 Mod 1보다 실험에 근접한 결과를 예측하는 것이 가능하다.

(2) Test S-NC-4의 모사

Mod 3.1을 이용한 SNC-4 실험의 모사결과는 로심출력이 60Kw인 경우, 증기발생기 2차측의 변화에 따른

주요변수(reflux mass flow rate, carryover mass flow rate, primary pressure, core in/out temp.)의 거동을 그림 7~11에 표시하였고, 로심출력이 30kW인 경우 증기발생기 2차측의 변화에 따른 주요변수의 거동을 그림 12~16에 나타냈다. 두 경우의 그래프를 비교해 볼 때, 전체적인 열수력학적인 응답은 로심출력 차에 관계없이 거의 비슷하다. 1차 계통압력, 고온관, 저온관의 유체온도, reflux flow rate, 그리고 carryover flow rate와 같은 주요한 변수들에 대한 로심출력 감소효과는 2차측 효과 열전달 면적의 변화에 의한 영향보다는 작았다.

4. 결론

Semiscale one-loop 정상상태 자연대류 실험에 대한 분석결과는 Mod 3.1은 역류냉각을 포함한 모든 자연대류 현상을 모사하였으며 계산된 이상유동은 이런 정상상태 자연대류실험에서 측정된 것에 근사(약 1 - 20 %이하)근사하고 있었고, 최대 유동률이 발생하는 지점은 증기발생기 2차측 수위가 600 cm 근방이다.

SNC-3에 대한 결과에서 RELAP5/Mod 3.1은 낮은 이차측 유량에선 약간의 불일치가 있지만, 92 % 1차유량에 대해서 양적으로 잘 일치함을 보였다. 전체 튜브 열전달면적의 55 %까지의 유량에 대해선 1차측 자연대류는 대체로 실험 값과 같은 변동 경향을 보이고 있으며, 55% 아래에선 감소가 발생했다.

92 % 유량에서, 실험의 최대 이상유동은 기포들이 U 튜브 꼭대기에 도착하자마자 아래쪽으로 내려가는 것을 지적하지만, 계산에서 기포들이 U 튜브 꼭대기보다 낮은 지역에서 응집됨을 말한다. U 튜브 내의 이상 혼합물의 높이와 분포를 2차측 액체의 높이와 분포로 조화시키는 것이 S-NC-3에서 보이는 감소되는 열전달행동을 올바르게 계산하는데 필수적이다.

역류 냉각실험 SNC-4에서, 유동률에 대한 계산과 측정된 결과들은 실험에서 보고되지 않지만 RELAP5에 의해 예견된 역류유동 oscillation과는 다소 다르다. 이러한 유동 oscillation의 존재를 무시하고 time-averaged 유동만을 고려하면, 계산과 측정된 결과의 비교는 좋다.

이상과 역류 자연대류에 대한 이런 계산들시 발생했던 비현실적 oscillation은 time step의 조절로 소멸시킬 수 있었다. 따라서 이러한 현상에 보다 적절하게 적용되지 못한, 코드의 자동 time control algorithm의 문제점을 지적한다. 다른 평가계산들은 RELAP5 time step control은 특히 액체와 기체 상태 사이의 상당한 마찰 또는 교류하는 유동이 있는 이상 유동 상황에선 불충분하다고 보인다.

5. 참고문헌

1. K. E. Carlson et al., RELAP5/Mod3 Code Manual, Vol. I ~ 5, EG & G Idaho, June 1990.
2. V. H. Ransom et al., RELAP5/Mod2 Code Manual, Vol. II, EG & G Idaho, December, 1985.
3. V. H. Ransom et al., RELAP5/Mod1 Code Manual, Vol. I, II, EG & G Idaho, September 1981.
4. G.G. Loomis and K. Soda, Experimental Operating Specification : Natural Circulation Test Series Semiscale Mod-2A, EGG-SEMI-5427, USNRC, April 1981.
5. G.G. Loomis and K. Soda, Results of the Semiscale Mod-2A Natural Circulation Experiments, NUREG/CR-2335, EGG-2200, EG & G Idaho, September 1982.
6. C. C. Wong and L.N.Kmetyk, RELAP5 Assessement : Semiscale Natural Circulation Tests S-NC-3, S-NC-4 and S-NC-8, NUREG/CR-3690, Sandia National Lab., May 1984.

표 1 SEMISCALE S-NC-3 실험조건 및 모사계산 결과.

Case NO	Mass Inventory (%)		Primary Pressure (Mpa)		Cold Leg Temp (K)		Hot Leg Temp (K)		SG Pressure (MPa)		SG Sec. Liquid Level (cm)		Core Power (kW)		Mass Flow Rate (kg/s)	
	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1
1	100	100	11.2	11.2	540	527.7	566	568.0	5.0	5.0	1080	1078	32.8	32.8	0.33	0.323
2	100	100	12.5	12.5	539	537.9	566	567.6	5.0	5.0	1073	1080	62.6	62.6	0.38	0.401
3	94.1	94.1	8.2	8.2	540	537.6	568	564.9	5.0	5.0	1039	1014	62.6	62.6	0.40	0.536
4	93.1	93.2	8.1	8.1	540	527.8	565	562.0	5.0	5.0	1011	1098	67.0	62.0	0.40	0.581
5	100	97.8	10.1	10.1	545	548.2	577	574.5	5.9	5.9	1067	1080	62.6	62.6	0.40	0.395
6	98.0	97.7	9.2	9.2	550	548.3	577	574.1	5.9	5.9	1067	1088	62.6	62.6	0.40	0.402
7	95.7	95.7	8.0	8.0	550	548.4	572	569.1	5.9	5.9	1039	1056	62.6	62.6	0.50	0.486
8	93.6	93.6	7.2	7.2	550	548.5	563	560.9	5.9	5.9	1053	1080	62.6	62.6	0.83	0.638
9	92.6	92.6	6.5	6.5	550	548.5	560	558.1	5.9	5.9	1067	1086	62.0	62.0	0.40	0.606
10	91.8	91.8	6.9	6.9	550	548.5	557	558.1	5.9	5.9	1067	1085	62.6	62.6	0.75	0.707

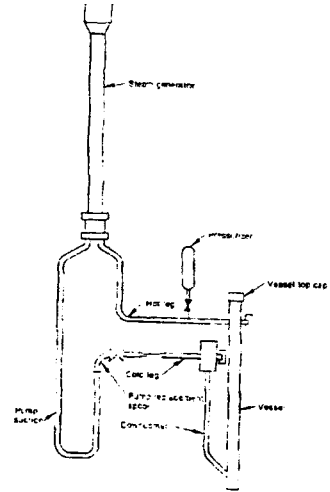


그림 1 SEMISCALE MOD 2A ONE LOOP CONFIGURATION

표 1 계속

Case NO	Mass Inventory (%)		Primary Pressure (Mpa)		Cold Leg Temp (K)		Hot Leg Temp (K)		SG Pressure (MPa)		SG Sec. Liquid Level (cm)		Core Power (kW)		Mass Flow Rate (kg/s)	
	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1	EXP.	RELAPS / ACS.1
11	91.8	91.8	7.0	7.0	550	548.6	568	568.0	5.9	5.9	970	944.5	62.0	62.0	0.89	0.880
12	91.8	91.8	6.9	6.9	550	548.6	567	568.0	5.9	5.9	804	797.9	62.0	62.0	0.76	0.710
13	91.8	91.8	6.8	6.8	551	548.5	566	567.1	5.9	6.2	684	689.9	62.0	62.0	0.75	0.718
14	91.8	90.1	6.8	6.81	551	549.8	556	557.2	6.0	6.0	634	618.5	62.0	62.0	0.71	0.736
15	91.8	91.2	6.9	6.9	553	550.2	557	558.2	6.0	6.0	514	510.7	62.0	62.0	0.88	0.879
16	91.8	91.8	7.4	7.4	556	550.9	561	562.8	6.0	6.0	404	388.3	62.0	62.0	0.59 ± 0.06	0.636
17	91.8	91.8	7.8	7.8	558	552.7	568	566.4	6.0	6.0	307	301.9	62.0	62.0	0.45 ± 0.11	0.517
18	91.8	91.8	8.7	8.7	564	552.1	572	572.9	6.0	6.0	230	202.6	62.0	62.0	0.30 ± 0.17	0.459
19	91.8	91.8	8.8	8.8	566	555.1	580	578.4	6.0	6.0	141	134.1	62.0	62.0	0.39 ± 0.13	0.385

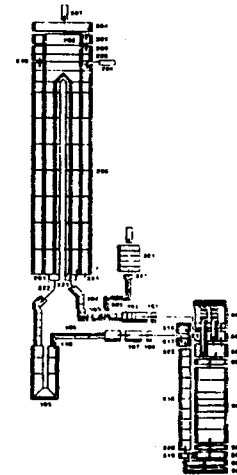


그림 2 RELAPS/MOD1 NODALIZATION FOR TEST S-NC-3 AND S-NC-4.

표 2, SEMISCALE MOD-2A, S-NC-4 실험조건 및 모사계산 결과.

No.	Primary Pressure (MPa)		Core Inlet Temp. (K)		Core Outlet Temp. (K)		Core Power (kW)		S.G. Condition				Pri. System Mass Inventory				Refueling Rate			
	Pressure (MPa)		Temp. (K)		Temp. (K)		Power (kW)		Pressure (MPa)		Liq. Level (cm)		Start of Mass (%)		End of Mass (%)		Carrier (kg/s)		Reflex (kg/s)	
	Exp.	RELAPS.1	Exp.	RELAPS.1	Exp.	RELAPS.1	Exp.	RELAPS.1	Exp.	RELAPS.1	Exp.	RELAPS.1	Exp.	RELAPS.1	Exp.	RELAPS.1	Exp.	RELAPS.1	Exp.	RELAPS.1
1	6.3	6.38	548	562.1	548	565	68.9	68.9	5.72	5.72	1087	1072	38.5	38.5	48.1	48.1	---	---	0.002	0.004
2	6.3	6.38	538	552.7	538	551	69.9	69.9	5.74	5.74	88	83.7	41.1	41.1	52.3	52.3	---	---	0.004	0.009
3	6.1	6.14	538	548.9	538	547	71.4	71.4	5.74	5.74	88	79.8	49.7	49.7	39.8	39.8	---	---	0.002	0.009
4	6.1	6.14	546	548.9	546	548	71.4	71.4	5.74	5.74	88	80.5	42.4	42.4	42.4	42.4	0.016	0.004	---	---
5	6.2	6.18	548	548.3	548	548	69.9	69.9	5.74	5.74	88	83.1	42.4	42.4	42.4	42.4	0.016	0.007	---	---
6	6.2	6.27	536	563.7	536	562.4	69.9	69.9	5.74	5.74	749	788.4	44.4	42.4	51.9	51.9	---	---	0.0154	0.015
7	6.2	6.26	526	545.6	526	547.3	69.9	69.9	5.75	5.75	62	60.9	60.9	60.9	38.6	38.6	---	---	0.0138	0.007
8	6.4	6.37	546	557.4	546	558.7	69.9	69.9	5.75	5.75	62	63.4	71.7	71.7	71.7	71.7	0.0132	---	---	---
9	6.2	6.26	548	549.1	548	549.1	71.4	71.4	5.75	5.75	62	60.7	71.7	71.7	71.7	71.7	0.0127	0.011	---	---
10	6.7	6.18	548	563.3	548	567.1	71.4	71.4	5.76	5.76	42	42.6	71.7	71.7	71.7	71.7	0.0239	0.0143	---	---
11	6.7	6.18	538	546.8	538	547	71.4	71.4	5.76	5.76	62	60.9	70.1	71.7	67.8	67.8	---	---	0.009	0.004
12	6.9	6.5	536	560.1	536	561.4	71.4	71.4	5.76	5.76	74	704	69.9	69.9	61.7	61.2	---	---	0.0070	0.009

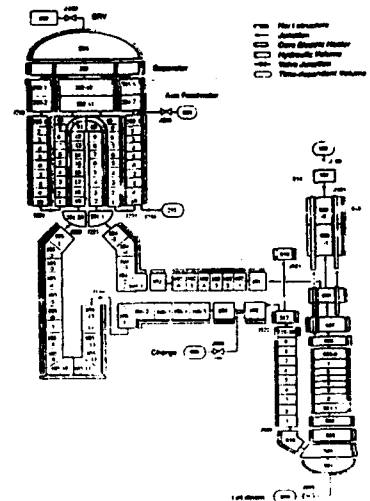


그림 3 RELAPS/MOD3.1 NODALIZATION FOR TEST S-NC-4.

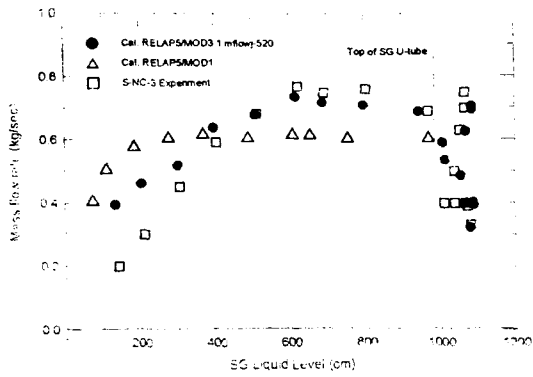


Fig. 2. Measured and calculated mass flow rates for test SNC-3

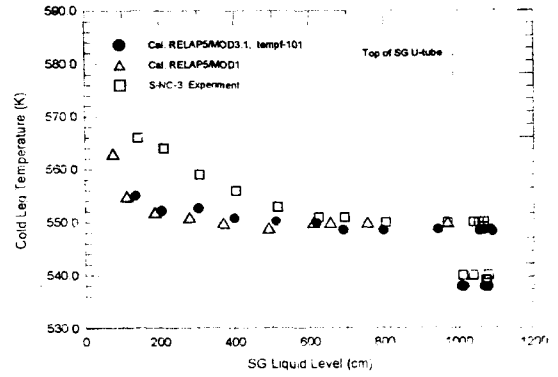


Fig. 6. Measured and calculated cold leg temperatures for test SNC-3

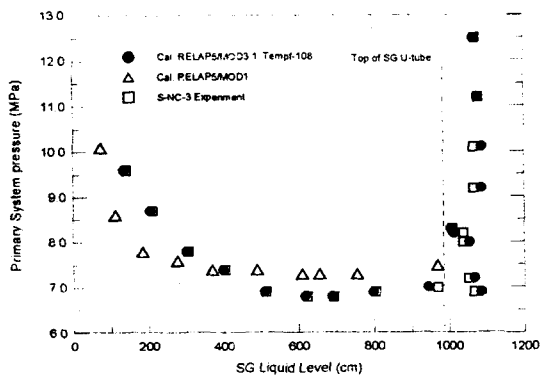


Fig. 4. Measured and calculated primary system pressures for SNC-3

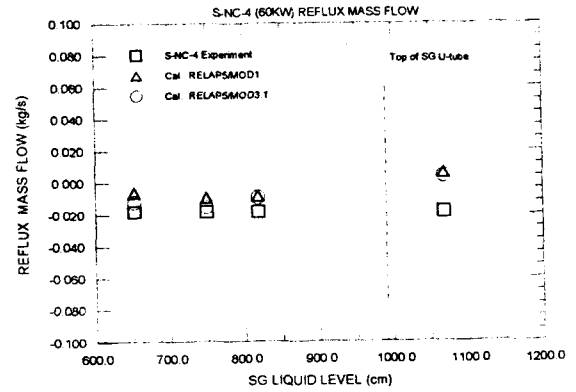


Fig. 7. Measured and calculated reflux mass flow rates for test SNC-4 (60kW power case)

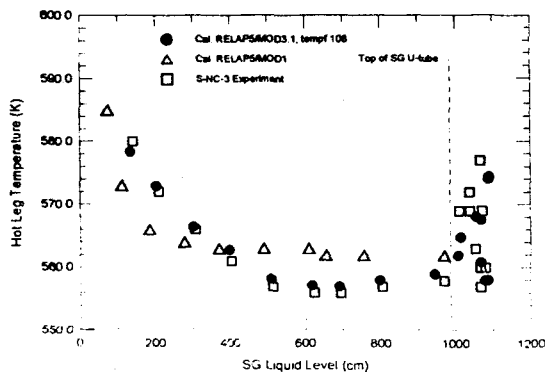


Fig. 5. Measured and calculated hot leg temperatures for test SNC-3

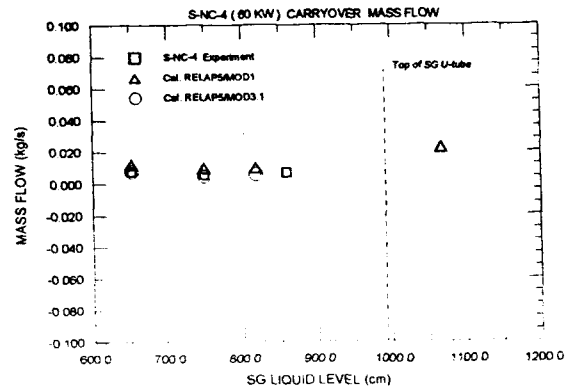


Fig. 8. Measured and calculated reflux mass flow rates for test SNC-4 (100kW power case)

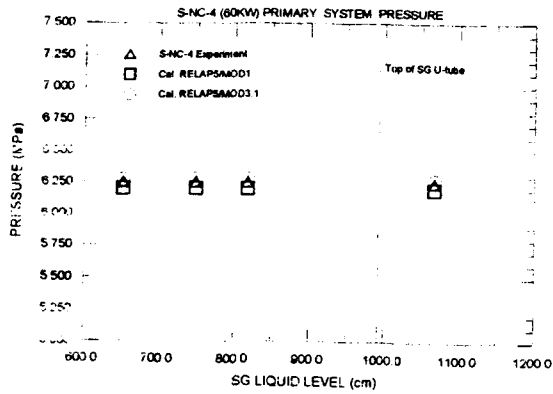


Fig. 9. Measured and calculated primary pressures for test SNC-4 (60kW power case)

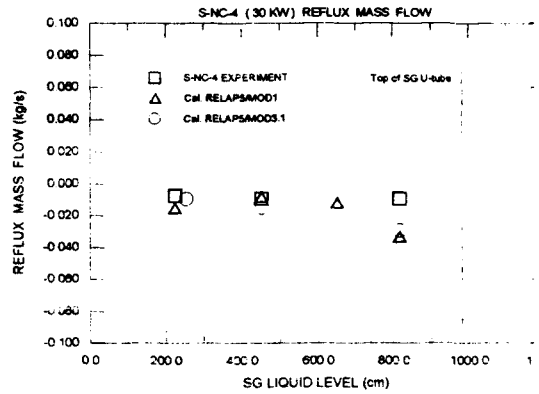


Fig. 12. Measured and calculated reflux mass flow rates for test SNC-4 (60kW power case)

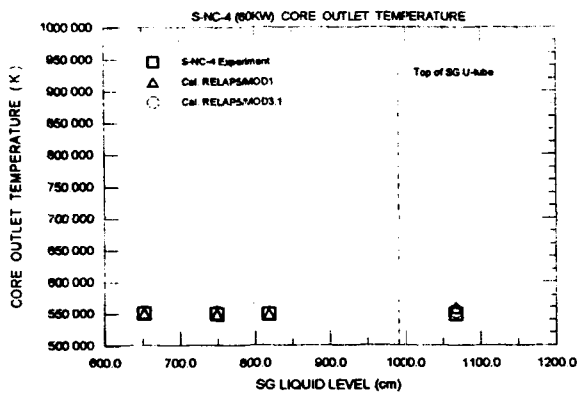


Fig. 10. Measured and calculated core outlet temperatures for test SNC-4 (60kW power case)

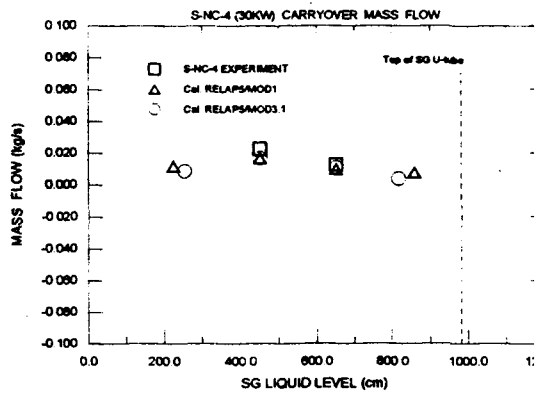


Fig. 13. Measured and calculated carryover mass flow rates for test SNC-4 (30kW power case)

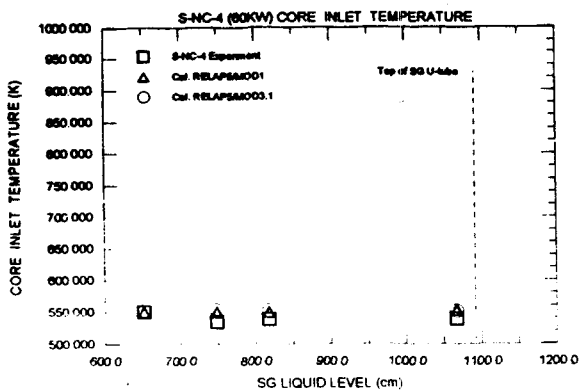


Fig. 11. Measured and calculated core inlet temperatures for test SNC-4 (60kW power case)

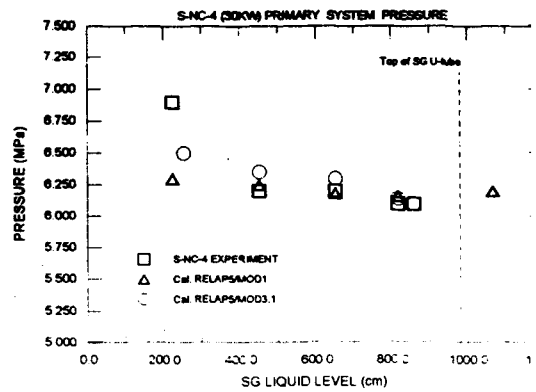


Fig. 14. Measured and calculated primary pressures for test SNC-4 (30kW power case)

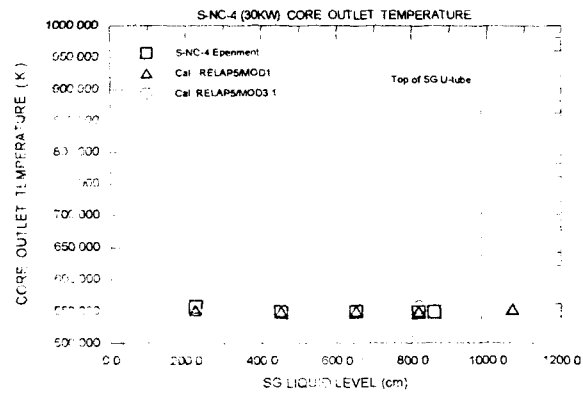


Fig 15 Measured and calculated core outlet temperatures
for test SNC-4 (30kW power case)

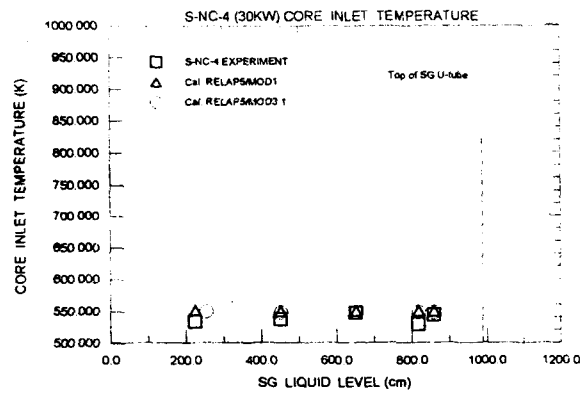


Fig 16 Measured and calculated core inlet temperatures
for test SNC-4 (30kW power case)