

2001 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

MIDAS 실험장치에서의 물-증기 유동의 다차원적 혼합거동 관찰

Experimental Observation of a Multi-dimensional Mixing Behavior of Steam-Water Flow in the MIDAS Test Facility

권태순, 윤병조, 어동진, 주인철, 송철화, 박종균

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

강수부 직접주입 방식의 가압경수로의 환상형 강수부에서의 비상노심냉각수 우회, 비상노심냉각수 침투, 물-증기 응축과 축적수위 등에 대한 다차원적 열수력 거동을 MIDAS 실험장치에서 실험적으로 관찰하였다. 대형 냉각재상실사고의 후기 재관수 기간을 모의하는 정상상태 실험을 통해 강수부에서의 주요 열수력 거동을 넓은 범위의 실험조건 하에서 정량적으로 고찰하였다. MIDAS 실험장치는 1400 MWe의 가압경수로형 원자로의 1/4.93 선형 축소된 물-증기 개별효과 실험장치로서, 대형 냉각재상실사고의 충수 또는 재관수 기간 동안 다양한 안전주입 위치에 따른 환상형 강수부에서의 다차원적 열수력 거동을 이해하는데 초점이 맞추어져 있다. 등온선은 환상형 강수부에서의 물-증기의 상간 간섭에 관한 다차원적 거동을 잘 보여주고 있으며, 또한 거시적인 실험결과는 강수부 영역에서 예상되는 다차원적 열수력 거동을 잘 보여주고 있다.

Abstract

Multi-dimensional thermal-hydraulic behavior, such as ECC(Emergency Core Cooling) bypass, ECC penetration, steam-water condensation and accumulated water level, in an annular downcomer of a PWR (Pressurized Water Reactor) reactor vessel with a DVI(Direct Vessel Injection) injection mode is presented based on the experimental observations in the MIDAS (Multi-dimensional Investigation in Downcomer Annulus Simulation) steam-water test facility. From the steady-state tests to simulate a late reflood phase of LBLOCA(Large Break Loss-of-Coolant Accidents), major thermal-hydraulic phenomena in the downcomer are quantified under a wide range of test conditions. Especially, isothermal lines show well multi-dimensional phenomena of phase interaction between steam and water in the annulus downcomer. Overall test results show that multi-dimensional thermal-hydraulic behaviors occur in the downcomer annulus region as expected. The MIDAS test facility is a steam-water separate effect test facility, which is 1/4.93 linearly scaled-down of a 1400 MWe PWR type of nuclear reactor, with focusing on understanding multi-dimensional thermal-hydraulic phenomena in annulus downcomer with various types of safety injection location during refill or reflood phase of a LBLOCA in PWR.

1. 서론

차세대원자로(APR1400)의 가상적인 대형 냉각재상실사고(LBLOCA) 발생시 재관수(Reflood)기간 동안 원자로용기 강수부(Downcomer)에서 상온의 안전주입수와 과열증기 사이의 열수력적 상호작용에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다[1,2,3]. 원자로용기의 저온관 노즐로부터 약 2.1 m 상부에 위치한 비상노심냉각수 주입노즐을 통해 비상노심냉각수를 강수부로 직접주입(DVI: Direct Vessel Injection)하는 안전주입방식을 갖는 원자로용기 강수부에서의 열수력 관련 주요 관심사는 비상노심냉각수의 우회율(ECC Bypass), 증기 응축(Steam Condensation), 비상노심냉각수 우회(ECC Bypass), 비상노심냉각수 강수부 하부 침투(ECC Penetration), 강수부의 온도분포 및 과냉각 여유도(Subcooling Margin) 및 강수부 수위 등이다.

대형 냉각재상실사고시의 비상노심냉각시스템의 성능에 관한 평가 계산시, 동일한 경계조건을 적용한 평가모델(Evaluation Model)과, 최적코드(Beast Estimate Code) 결과가 재관수 기간 동안에 강수부 수위, 피복재 온도 등 주요 항목에서 상호 차이를 보이고 있다[1]. 이러한 상이한 결과로 인하여 강수부의 열수력 현상에 대한 이해의 필요성과 해석코드에 대한 평가 계산용 실험 데이터의 필요성이 증대된 시점이다. 이에 따라 안전주입수의 강수부 직접주입에 따른 강수부 물-증기 열수력에 초점을 맞춘 MIDAS(Multi-dimensional Investigation in Downcomer Annulus Simulation) 개별효과 실험이 수행되고 있다[2,3]. MIDAS 실험은 대형 냉각재상실사고의 재관수 기간동안 원자로용기 강수부로 주입되는 안전주입수와 저온관을 통해 강수부로 유입되는 증기와 열수력적 상호작용에 관한 개별효과 실험이다.

본 논문에서는 대형 냉각재상실사고시 후기 재관수(late reflood)기간 동안 강수부에서의 물-증기 혼합유체의 등온선 등 강수부에서의 다차원적 열수력 거동에 관한 결과를 논의하고자 한다.

2. 실험장치

MIDAS 실험장치의 주요 구성을 Fig. 1에 나타내었다. MIDAS 실험장치는 1400 Mwe의 가압경수로를 선형 축소비 1/4.9295 비로 축소하였으며, 최대 운전조건은 10 Bar, 300 °C이다. 별도의 증기공급장치에서 생성된 증기가 강수부에 주입되고, 파단 부위를 통과한 증기는 격납건물 모의기를 거쳐 대기로 방출되는 개방형 형태(Open Loop)의 실험장치이다. 원자로용기의 강수부와 노심 사이의 열수력적 간섭 및 상호반응, 그리고 원자로용기의 벽면가열 효과는 실험장치를 이용한 모의대상에서 배제하였다. MIDAS 실험장치에서 각 저온관의 증기유량, 비상노심냉각수 주입유량 등은 각각 개별적으로 조절 가능하며, 비상노심냉각수의 주입위치는 체적척도비와 선형척도비에 따라 각각 설치되어 있다. 강수부의 수위에 따른 Sweep-out, 안전주입수 우회 현상, 안전주입 노즐의 위치에 따른 안전주입수 직접우회(Direct Bypass) 현상, 그리고 전체 우회율(Total Bypass Fraction) 등에 관한 관찰이 각각 가능하며, 증기 및 안전주입수의 주입조건을 다양하게 변경하며 정상상태 개별효과 실험을 수행할 수 있다. 주요 제어변수는 증기의 온도, 증기유량, 증기압력, 강수부 온도, 강수부 압력, 강수부 수위, 안전주입수 온도, 안전주입수 유량 및 격납건물 압력 등이다.

2.1 유체 계통

Fig.2 에 나타낸 강수부의 상세도와 같이, MIDAS 실험장치는 노심과 동 측의 강수부를 노심과 분리하여 강수부를 환형으로 제작하여, 강수부의 안쪽과 바깥쪽에서의 계측의 편이성을 증대 시켰다. 강수부의 전체 형상은 Fig. 3 에 나타낸 바와 같다. 각 계통은 저온관, 노심 모의부, 파단유동 물-증기 분리기(Separator), 격납건물 모의기(Containment), 고압 비상노심냉각계통(HPSI), 안전주입탱크(SIT) 모의계통 및 외부 증기공급계통으로 구성되어 있다. 주요 계통의 상호연결은 Fig.1 에 나타내었다. 저온관 배치 및 비상노심냉각계통의 주입노즐(DVI) 설치 각도는 Fig. 4 에 나타낸 바와 같다. 저온관에서 강수부 하부로 약 2.8 m 지점 이상의 강수부는 환상형(Annulus)강수부로, 그 이하는 단일 파이프로 설계되었다. 강수부와 노심모의기 사이는 분리 가능한 차단벽을 설치함으로써 강수부와 노심 사이의 열수력적 상호작용을 의도적으로 차단시켰다. 증기공급장치는 2~10 Bar 압력범위에서 300°C 과열증기를 공급할 수 있다. 증기공급장치는 포화증기와 과열증기를 각각 발생시킬 수 있으며, 주어진 포화압력에서 최대 증기과열도는 약 180 °C 이며, 증기 과열도는 개별 제어가 가능하다.

파단유동(Break Flow)의 계측오차를 감소시키기 위하여 물-증기 분리기(Separator)를 도입하였다. 물-증기 분리를 통과한 파단유동은 증기와 냉각수를 각각 분리된 후 각각을 개별적으로 계측되도록 하였다. Separator 수위의 변화에 따른 축적수의 계측오차를 감소시키기 위하여 물-증기 분리기에는 내경 600mm 인 Separator 하부에 파이프 외경이 508 mm, 길이 약 3.3 m 인 파이프를 삽입하여 Separator 하부의 유체 제적을 감소시켰다. 단면적의 축소비만큼 계측오차는 감소한다.

2.2 계측계통

저온관의 계측계통은 Fig.4 와 과 같으며, 계통에서 나가는 유동 경로는 강수부 하부 배출라인, 물-증기 불리기의 증기 라인 및 물 배출라인 등이다. 총 파단유량은 물-증기 분리기의 증기유량, 물유량 및 물-증기 분리기 하부 파이프에 축적되는 물 등이다. 주요 질량보존은 Fig.5 에 나타낸 바와 같다. 강수부 상부 환형지역에서의 온도계 배치는 Fig. 6 과 같다. 환형 강수부를 따라 22.5 도 간격으로 열전대가 배치되어 있다. 강수부에서의 열전대는 증기-물 혼합지역은 반경방향으로 각각 3 개를 배열하여 안쪽과 바깥쪽에서의 비상냉각수의 온도 및 증기의 온도를 계측한다. 단상유동이 예측되는 곳 즉, 액상이 예상되는 하부 쪽과 증기의 온도 계측을 위한 곳은 강수부의 가운데에 열전대를 1 개씩만 균등 배치하였다. 강수부의 열전대 반경 방향 배치는 Fig.6 의 “b”-column 위치와 동일하다.

3. 실험방법

안전주입계통은 단일고장 가정이 적용되어, 파단 저온관 및 이와 180 도로 서로 마주보는 반대편에 위치하는 두개의 안전주입 노즐(DVI-2 & 4)을 통해 안전주입수가 강수부로 유입된다. 본 실험에서는 저온관 및 강수부의 수위는 충분히 낮게 유지하여 저온관 하단부에서 파단 저온관으로 누출되는 냉각수의 sweep-out 현상을 배제시킨다. 이러한 조건하에서 증기와 안전주입수 사이의 열수력적 상호작용에 따른 비상노심냉각수의 직접우회 현상에 관한 실험이 수행되었다.

실험의 초기조건 및 경계조건은 TRAC 코드에 의한 안전해석 결과[5,6]로부터, 사고 발생후 약 250 초가 경과된 시점에서의 열수력적 조건을 적용하였다. 각 저온관에서의 유동 조건은 시간에 대해 주기가 빠른 유동진동이 있는 상황이므로 평균값을 적용하였다. 3 개의 저온관 증기 유량, 온도, 및 압력은 동일한 것으로 가정하였다. 실험기준 조건은 코드결과 평균치로부터 (+) 방향의 보다 큰 값을 선택하였으며, 공칭 강수부 압력(Nominal Downcomer Pressure), 공칭 저온관 주입 과열증기 온도를 적용하였다. 실험의 초기조건 및 경계조건은 Table.2 에 정리하였다.

본 실험을 위하여 수정 선형척도법이 적용되었다[4]. 저온관 및 강수부에서의 평균값을 기준으로 한 각 척도값은 Table 1 과 같다.

Table 1 Scaling Parameter

Parameter	Ratio	Reference Value	Scaled Value
C.L Steam Flowrate per Coldleg	$(I)^{2.5}$	14.51 [kg/sec]*3	0.269[kg/sec]*3
D/C Pressure	1	180 [kPa]	180.0 [kPa]
C.L Steam Temperature	1	197 [°C]	197.0 [°C]
C.L Steam Velocity	$(I)^{0.5}$	39.8 [m/sec]	17.93 [m/sec]

선형 척도비 : $l = 1/4.9295$

Table 2 Initial and Boundary Conditions of the Test

Component	Parameter [unit]	Set Value	Actual Value
Cold leg-1	Steam Flowrate [kg/sec]	0.260	0.262
	Pressure [kPa]	-	-
	Temperature [°C]	197	198.26
Cold leg-2	Steam Flowrate [kg/sec]	0.26	0.2578
	Pressure [kPa]	-	-
	Temperature [°C]	197	199.34
Cold leg-3	Steam Flowrate [kg/sec]	0.26	0.2603
	Pressure [kPa]	-	-
	Temperature [°C]	197	197.49
ECC-1	Flowrate [kg/sec]	N/A	N/A
	Pressure [kPa]	-	-
	Temperature [°C]	N/A	N/A
ECC-2	Flowrate [kg/sec]	1.37	1.3665
	Pressure [kPa]	-	-
	Temperature [°C]	49	49.26
ECC-3	Flowrate [kg/sec]	N/A	N/A
	Pressure [kPa]	-	-
	Temperature [°C]	N/A	N/A
ECC-4	Flowrate [kg/sec]	1.37	1.3570
	Pressure [kPa]	-	-
	Temperature [°C]	49	49.71
Downcomer (LT-DU-0117F)	Pressure [kPa]	180	179.38
	Temperature [°C]	N/A	N/A
	Water Level [m]	0.4	0.4
Containment	Pressure [kPa]	-	177.87
	Temperature [°C]	N/A	N/A
D/C Drain	Heatup	N/A	2.949 kg/sec
	$t > 0. \text{ sec}$	-	2.949 kg/sec
	$t < 600. \text{ sec}$	-	2.949 kg/sec

4. 실험결과 및 고찰

계통에 유입되는 증기 및 비상노심냉각수, 그리고 계통으로 배출되는 과단류 사이의 질량 보존에 대한 정의는 식(1)과 같다. 평균 질량보존은 약 -1.168%로서 배출유량이 주입 유량보다 작게 측정되고 있으며, 표준편차는 1.987 이다. 실험시간에 따른 질량보존 오차를 Fig. 7 에 나타내었다.

계통에 유입되는 증기 및 비상노심냉각수, 그리고 계통으로 배출되는 과단류 사이의 에너지 보존에 대한 정의는 식(2)와 같다. 에너지 보존은 약 2.042% 정도가 배출에너지 보다 많게 측정되고 있으며, 표준편차는 1.215 이다. 단, 구조물 열손실은 고려되지 않았다. 시간에 따른 에너지 보존 오차를 Fig. 8 에 나타내었다.

Fig.7 과 Fig.8 은 각각 질량보존 및 에너지의 보존이 충분히 낮은 범위에서 잘 보존되고 있음을 보여주고 있다.

$$Mass\ Balance(\%) = \frac{m_{Total,in}(t) - m_{Total,out}(t)}{m_{Total,in}(t)} * 100 \quad (1)$$

$$Energy\ Balance(\%) = \frac{e_{Total,in}(t) - e_{Total,out}(t)}{e_{Total,in}(t)} * 100 \quad (2)$$

실험에서 강수부 수위는 저온관 하단부에서의 Sweep-out 현상을 배제하기 위하여 충분히 낮게 유지하였다. 강수부 내부의 수위는 저온관 근처의 수위를 측정하는 4 개의 축은 약 90 도 간격으로 강수부에 배치되어 있다. Fig.9 는 네 방향에서의 강수부 수위를 나타내고 있다. 강수부의 수위는 저온관 바닥을 기준으로 평균 0.4m 위치에 유지되고 있다. 강수부의 수위에 따른 강수부 축적량의 측정에 따른 질량 변화량이 크므로 이를 방지하기 위하여 강수부의 수위는 거의 일정하게 유지하였다.

Fig.10 은 강수부의 바깥쪽 벽 근처에서의 온도분포를 나타내고 있다. DVI-2 및 DVI-4 주입노즐을 통해 차가운 비상노심냉각수가 주입되고 있다. 저온관 1 번, 2 번 및 3 번으로 과열증기가 강수부로 주입되고 있다. 고온관 주위의 상대적으로 낮은 온도영역이 관측되고 있는데, 저온의 비상노심냉각수가 강수부의 하부쪽으로 강하되고 있는 현상으로 해석된다.

Fig.11 은 강수부의 안쪽 벽면 근처에서의 온도분포를 나타내고 있다. 저온관 주변의 고온 영역이 축소되었고, DVI 노즐 근처의 저온대가 약간 확장되어 나타나고 있다. 이는 강수부로 주입된 저온의 비상노심냉각수가 벽에 부딪치고, 이로 인해 비상노심냉각수가 퍼지면서 안쪽 벽면근처에서의 온도를 떨어뜨리는 현상을 나타나고 있는 것으로 해석된다.

Fig.12 는 강수부의 중심선에서의 온도분포를 나타내고 있다. 과단 저온관에 180 도의 반대편에 위치한 저온관 2 번 하부의 저온대가 크게 나타나고 있다. 이 영역은 과단 저온관을 중심으로 대칭축에 해당하는 영역이므로 여타 영역보다 상대적으로 약한 증기 횡류(Steam Crossflow)의 영향을 받아 비상노심냉각수의 침투가 활발한 영역이 나타난 것으로 해석된다. 두 개의 고온관 주변에서의 저온대가 나타나는 것은 공기 실험에서도 이미 관측되었지만 고온관의 차단효과(Blocking Effect)와 두 저온관의 고속증기 제트가 만나 횡류가 작아

지는 증기 정체영역(Stagnation region)이 고온관 주변에 존재하고, 이 정체영역에서 상부의 비상노심냉각수가 침투되고 있는 것으로 해석된다.

이상에서와 같이 3 개의 저온관을 통해 주입되는 과열증기와 강수부로 직접 주입되는 비상노심냉각수가 혼재하는 강수부는 고온관의 차단효과 및 증기의 응축과 정체, 그리고 횡류의 복합적인 유동장이 존재하는 매우 복잡한 다차원 유동을 형성하고 있음을 유추할 수 있다.

5. 결론

강수부 직접주입 방식을 갖는 가압경수로의 대형 냉각재상실사고의 후기 재관수 기간을 모의하는 정상상태 실험을 통해 환상형 강수부에서의 비상노심냉각수 우회, 비상노심냉각수 침투, 물-증기 응축과 축적수위 등에 대한 다차원적 열수력 거동을 MIDAS 실험장치에서 실험적으로 관찰하였다.

등온선은 환상형 강수부에서의 물-증기의 상간 간섭에 관한 다차원적 거동을 잘 보여주고 있으며, 또한 거시적인 실험결과는 강수부 영역에서 예상되는 다차원적 열수력 거동을 잘 보여주고 있다. 3 개의 저온관을 통해 주입되는 과열증기와 강수부로 직접 주입되는 비상노심냉각수가 혼재하는 강수부는 고온관의 차단효과 및 증기의 응축과 정체, 그리고 횡류의 복합적인 유동장이 존재하는 매우 복잡한 다차원 유동을 형성하고 있음이 관찰되었다.

Acknowledgements

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기사업의 지원하에 수행되었습니다. MIDAS 실험장치 척도법의 검토 및 조언을 주신 노희천 교수, 실험 수행에 귀중한 자문을 주신 오승중, 이원재 박사, 실험조건 결정에 도움을 주신 김한곤 박사께 감사 드립니다.

References

- [1] K.H. Bae et al., "Pre-test Analysis for the KNGR LBLOCA DVI Performance Test Using a Best Estimate Code MARS", NTHAS-2: 2nd Japan-Korea Symposium on Nuclear Hydraulics and Safety, Fukuoka, Japan, Oct. 15-18, 2000.
- [2] B.J. Yun, et al., "Experimental Observation of the Direct ECC Bypass during LBLOCA Reflood Phase in the Air/Water Test :UPTF Test 21-D Counterpart Test", 4th Int'l Conf. Multiphase Flow, May 27 to June 1, 2001, New Orleans, USA.
- [3] T.S. Kwon, et al., "A Study on the Liquid Film Width of ECC Water Jet for DVI Injection", 4th Int'l Conf. Multiphase Flow, May 27 to June 1, 2001, New Orleans, USA.
- [4] 윤병조 외, "차세대원자로 대형 냉각재상실사고 모의를 위한 열수력 실험장치의 척도해석", KAERI/TR-1878/2001, 한국원자력연구소 (2001)
- [5] NKD/RD-01100M, "KNGR DVI 성능 검증 Test Matrix 송부", 2001. 5. 7, 전력연구원, 신형 원전개발센터.
- [6] 김한곤, "신형경수로 안전주입 성능평가를 위한 실험조건", Private Communication (2001).

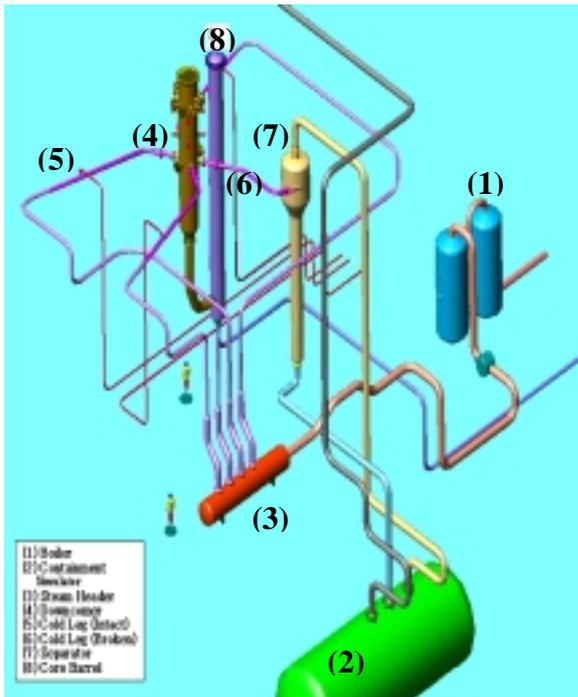


Fig. 1 Isometric View of the MIDAS Facility

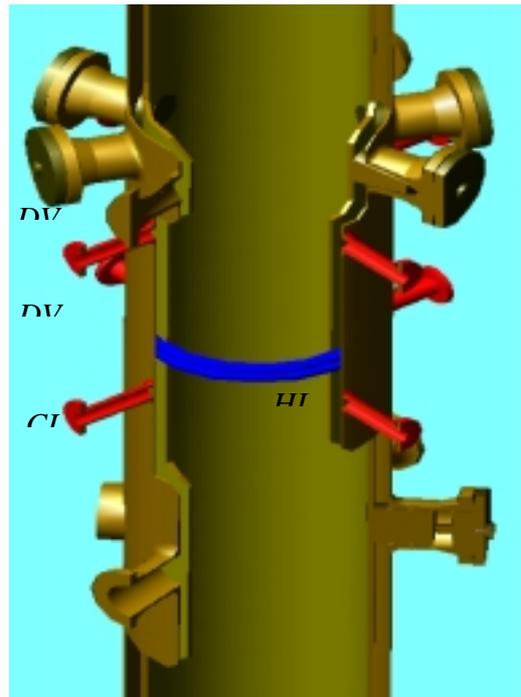


Fig.2 Downcomer Annulus

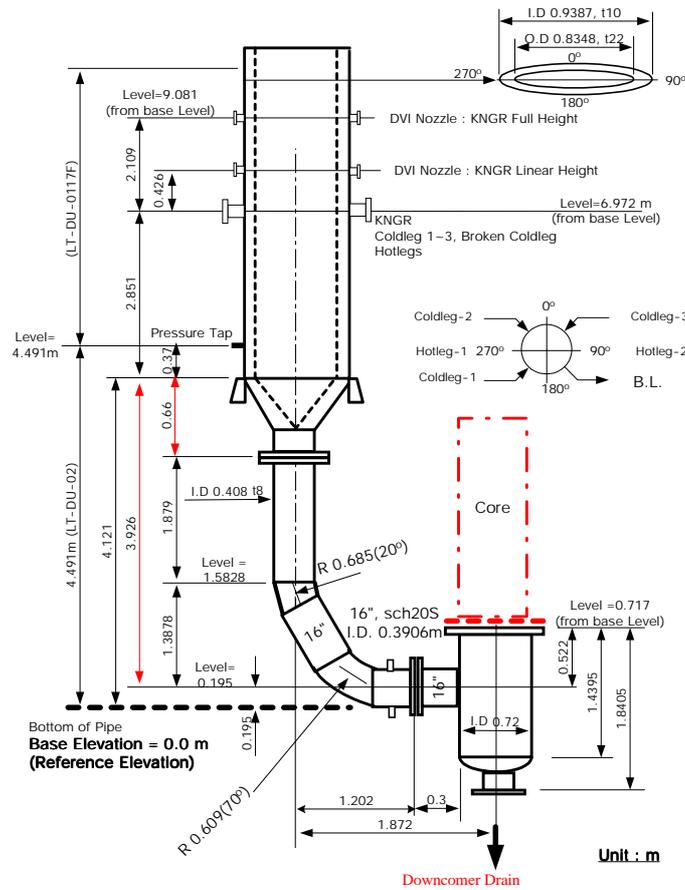


Fig.3 Sketch of the Downcomer

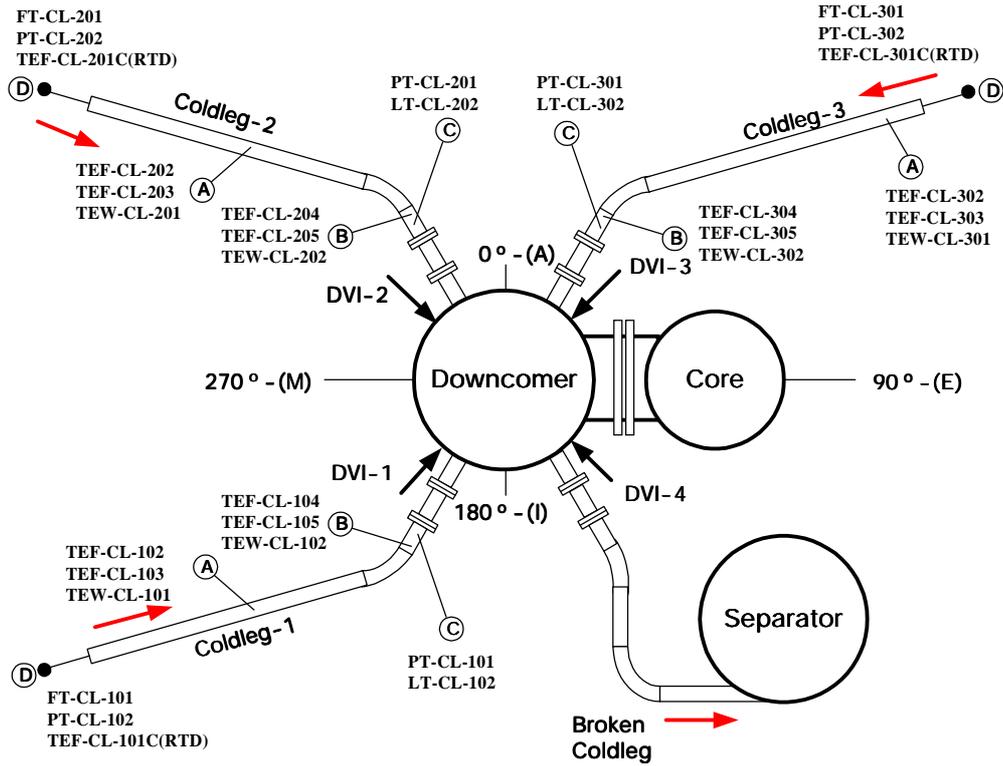


Fig. 4 Top view of Cold Leg Arrangement

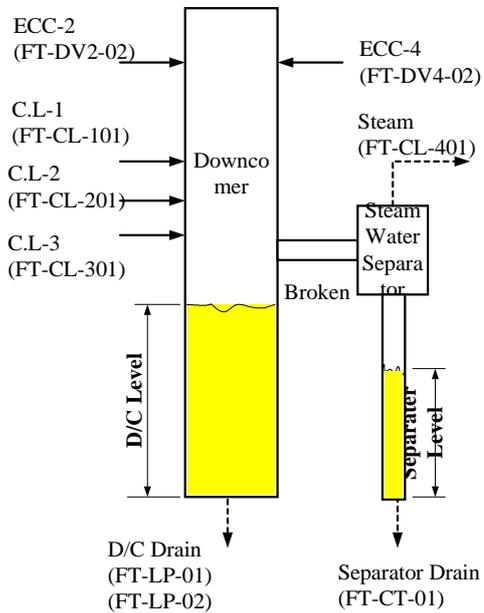


Fig.5 Break Flow Measurement

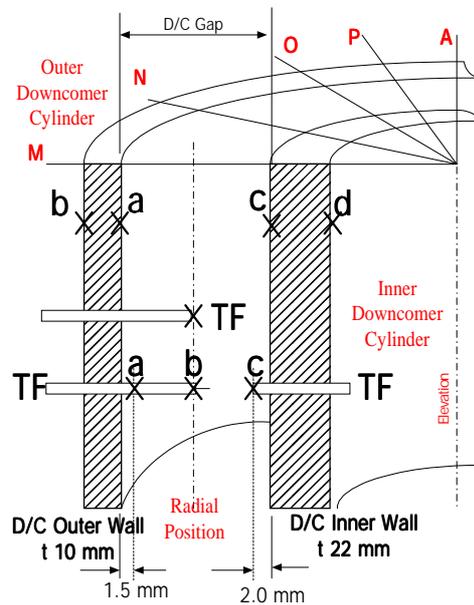


Fig.6 Location of Thermocouple in the Downcomer

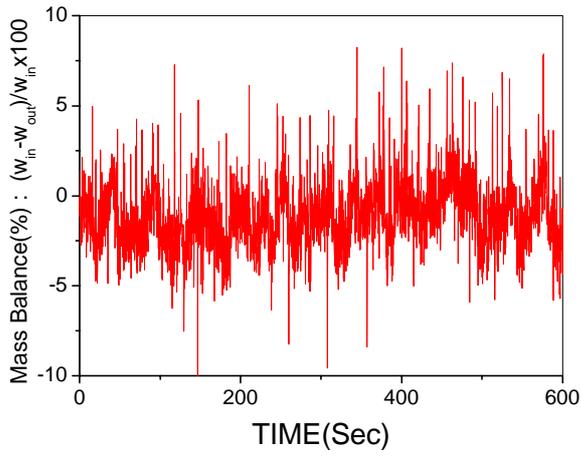


Fig. 7 Mass Balance

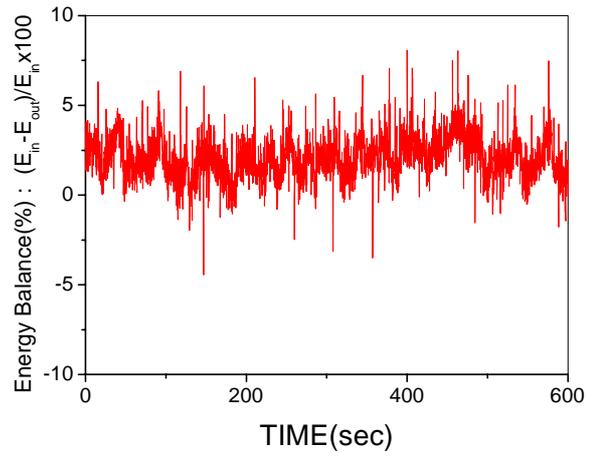


Fig. 8 Energy Balance

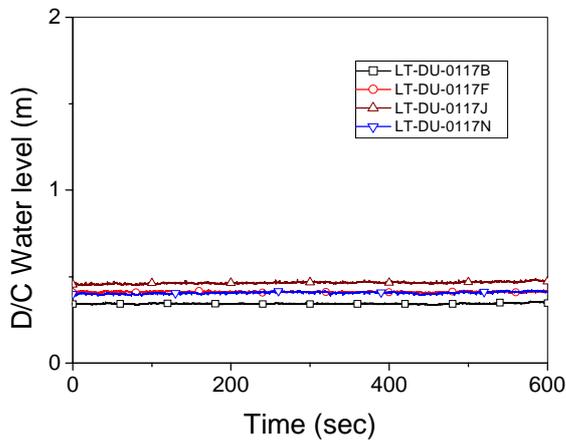


Fig. 9 Downcomer Water Level

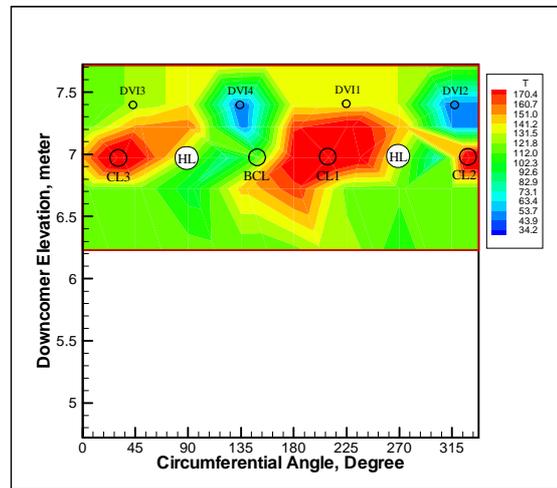


Fig. 11 Isothermal line at Downcomer Inner Wall

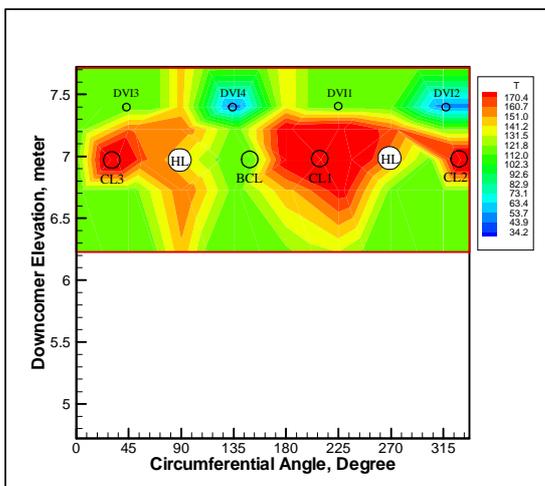


Fig. 10 Isothermal line at Downcomer Outer Wall

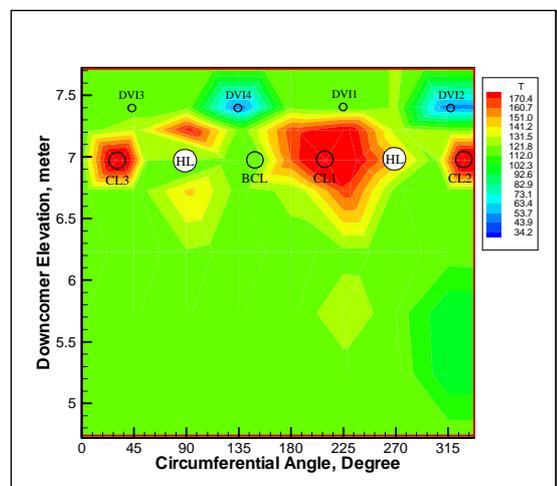


Fig. 12 Isothermal line at the Center of Downcomer