

대용량 피동형원자로의 안전계통 성능평가를 위한 냉각재상실사고 해석

김성오, 김영인, 정법동, 황영동, 장문희

한국원자력연구소

요 약

1000MWe급 피동형원자로의 안전계통 성능 및 RELAP5 코드의 적용성 평가를 목적으로 AP600을 참조노형으로 설정된 1000MWe급 대용량 피동형원자로에 대한 냉각재 상실사고를 모의 해석하였다. 대형냉각재상실사고시 발생하는 현상들은 기존 원자로와 큰 차이가 없고, 이들 현상을 모의하기 위한 모델링 요건들이 피동형계통 분석에 동일하게 요구되었으며, 계산된 PCT가 규제기관의 허용치에 충분한 여유도를 갖고 있어 대형냉각재상실사고시 충분한 노심냉각 능력을 갖는 것으로 평가되었다. 또한 안전주입 배관이 파단되는 소형냉각재 상실사고를 해석한 결과 KP1000의 피동안전계통은 ADS의 작동에 의하여 노심을 노출시키지 않고 적절한 사고완화 기능을 수행 할 수 있는 것으로 분석되었다.

1. 서론

피동형 원자로는 능동형 원자로와는 달리 사고시에 중력과 밀도차이에 의해 작동되는 자연대류 방법과 압축공기와 같이 외부전원이 필요 없는 계통과 기기로 구성되었기 때문에 원자로용기 및 격납용기 등의 크기에 제한을 받아 용량이 작은 300~600MWe급의 중소형으로 개발되고 있다. 중소형 피동형원전은 우수한 안전성 확보와 계통의 신뢰도 향상에 의한 운전성 및 경제성 향상에도 불구하고 용량이 작은 단점이 피동형원전의 건설의 주요 장애 요인이 되고 있다. 따라서 피동형원전의 용량에 따른 단점을 극복하기 위해서는 중소형의 피동형원자로가 갖는 장점을 최대한 유지하면서 용량격상이 가능한 피동형원전의 출력증대에 관한 연구가 필요하다. 또한 피동형 원자로의 안전주입기능이 중력 등 자연력에 의하여 이루어져 구동력이 작기 때문에 계통 작동성 및 성능에 대한 신뢰도를 확인하기 위해서는 기존원자로에 비해 보다 정확한 분석이 요구된다.

본 연구는 대용량 피동형원자로의 타당성 연구의 일환으로 원자로의 출력증대에 따른 안전계통

의 성능평가를 목적으로 수행되었다. Westinghouse사의 AP600을 참조노형으로 1000MWe급 대용량 피동형원전(KP1000)의 계통개념을 설정하였으며 안전계통 설계인자들의 변화에 따른 민감도 분석 등 관련 연구가 수행되었다.^[1~6] 본 연구에서는 KP1000의 자동감압계통과 안전주입계통의 성능평가를 목적으로 저온관 양단과단사고와 안전주입배관의 양단과단사고를 제한사고로 선정하여 RELAP5/ MOD3코드^[7]를 이용하여 해석하고 그 결과를 분석하였다.

2. 분석모델

대용량 피동형원자로(KP1000)의 기본설계개념은 참조노형인 AP600과 유사한 능동형의 원자로 냉각재 계통과 피동형 안전계통으로 구성된다. 원자로냉각재계통은 3-loop로 구성되어 있으며 용량증대에 따라 원자로 용기의 크기가 증대되었다. 노심은 피동형 안전계통의 설계특성을 고려하여 저밀도 노심으로 구성하고 원자로냉각재계통 온도제어는 저온관의 온도를 일정하게 유지하고 고온관의 온도를 출력에 따라 변화시켜서 비교적 완만한 sliding T_{avg} 를 갖는 방법을 채택하였다. 안전설비는 피동안전주입계통, 피동잔열제거계통, 자동감압계통, 피동격납용기냉각계통 등으로 구성되어 있으며 사고시 격납용기 내부로 방출된 에너지는 철제격납용기를 통하여 최종 열침원인 대기중으로 열을 방출하도록 설정하였다.^[5] KP1000의 주요 계통 및 설계 변수들은 표 1과 같다.

그림 1은 안전주입계통의 성능을 평가하기 위하여 설정한 분석모델로서 3개의 루프를 각각 독립적으로 모델하였다. 각 루프는 고온관, 증기발생기, CMT, 축압기, 2개의 저온관과 두개의 펌프로 모델링 하였으며 증기발생기는 출구측 플레넘을 둘로 나누어 각각 캔드모터를 사용하는 펌프의 입구측과 연결하였다. 루프-1에는 가압기와 가압기에 연결된 1단계부터 3단계까지의 ADS밸브를 모델하였으며 4단계 ADS밸브는 각 루프의 고온관에 연결되고, 가압기 방출관과 DVI 라인 사이에 IRWST를 모델하였다. 원자로용기는 하부 플레넘, 노심, 반사체, 핵연료 안내관, 상부 플레넘 및 원자로 헤드를 각각 모델하였으며 downcomer는 주입된 냉각수의 우회현상과 이에 따른 냉각수의 노심내 주입량의 감소를 고려하기 위하여 원주형 방향으로 3개의 section으로 나누고 cross flow junction으로 연결하였다. 핵연료 및 IRWST의 열교환기는 물론 주요 기기를 구성하는 열구조물도 함께 모델 하였다.^[6]

정상상태의 원자로 열출력은 3,125MWt로 가정하였으며 붕괴열 모델로는 1.2배의 ANS73 모델이 사용되었다. 노심의 열구조물은 1개의 고온핵연료봉, 263개의 핵연료봉으로 구성된 고온핵연료 다발과 192개의 평균핵연료 다발로 모델링 되었으며 축방향 출력분포는 1.55 chopped cosine shape을 가정하였다. 정상상태시 1개의 고온관 유량은 10,307 lbm/sec, 노심의 우회유량은 전체원자로 유량의 약 7.46%로 가정하였다. IRWST는 격납용기 대기에 노출되어 있으며 액체체적은

350,000 gal으로서 온도는 90°F로 가정되었다. CMT는 100°F의 냉각수가 2000ft³로 채워져 있는 것으로 가정하였다.^[5,6]

3. 해석결과 및 분석

3.1 대형냉각재 상실사고

대용량 피동형원자로 KP1000의 저온관 완전파단사고를 안전계통 성능 평가를 위한 대형냉각재 상실사고의 제한사고로 선정하여 분석하였다. 그림 2는 저온관파단사고시 일차계통의 압력변화를 보여주고 있다. 사고직후 파단부위를 통한 과냉각상태의 냉각재 방출로 일차계통의 압력은 급격히 감소하며, 압력이 더욱 감소하여 포화상태에 도달하면 기포가 발생하여 압력감소율이 다소 둔화된다. 가압기 압력이 저압 설정치에 도달하면 안전주입 신호가 발생하여 CMT로부터의 냉각수 주입이 시작되고 일차계통압력이 더욱 감소하여 축압기 주입 설정치 이하로 떨어지면 축압기의 냉각수가 DVI배관을 통하여 원자로용기내로 주입된다(그림 3).

그림 3, 4는 안전주입배관을 통한 주입유량에 대한 해석결과로서 가압기 저압 신호에 의하여 원자로가 정지되고 동시에 CMT 연결배관의 밸브가 개방되어 CMT로부터의 냉각수 주입이 개시되었다. 그러나 이 주입유량은 파단부위를 통한 냉각수 유출량에 비하여 매우 작아 노심의 냉각을 유지하기에 불충분하다. 노심에 기포가 발생하기 시작하면 압력감소는 다소 둔화되나 지속적인 파단유출로 인하여 압력이 계속 감소되어 결국 축압기로부터의 냉각수 주입이 개시된다. 이때 축압기로부터 주입된 냉각수는 다시 노심을 채우기 시작하며 핵연료는 냉각상태를 회복한다(그림 5). 축압기에 의한 비상노심냉각수의 주입이 완료되면 CMT와 IRWST의 냉각수가 안정적으로 노심에 공급되어 원자로는 안전하게 장기냉각모드로 진행되는 것을 알 수 있다.

그림 6은 노심 중심노드의 핵연료 피복재 온도거동을 보여주고 있다. 파단발생 직후 blowdown 시기에는 초기 핵연료내부의 저장에너지를 CMT로부터 주입된 냉각수만으로는 충분히 제거할 수 없기 때문에 핵연료가 가열된다. 핵연료 내부의 잠열의 소진과 함께 CMT 및 축압기로부터의 냉각수 주입에 의하여 핵연료가 다시 냉각되지만 지속적인 파단유출로 인한 노심노출과 핵연료의 붕괴열에 의하여 피복재가 다시 가열되기 시작한다. 그러나 지속적인 냉각수 주입으로 인하여 결국 노심은 냉각수로 채워지게 되며 핵연료는 냉각상태로 회복된다. 축압기 고갈 이후에도 CMT로부터 냉각수 주입이 다시 개시되어 핵연료는 냉각상태로 유지되고 있음을 알 수 있다. 최대피복재 온도는 Cd=1.2의 경우가 가장 보수적인 것으로 나타났으며, 사고 후 약 2초 후 1254°F(952.0°K)로 계산되었다. 이는 AP600의 해석결과에(재관수 기간인 154초에 PCT가 1236.2°F) 비해 노심출력밀도 증가 등의 영향으로 다소 높은 PCT를 갖으나, 기존 상용로인 고리 3&4호기의 1918.4 °F

보다는 원자로용기의 크기 증대, 저출력밀도 노심과 원자로용기 직접주입 등의 영향으로 충분히 낮은 PCT를 갖는 것을 알 수 있다. 또한 사고발생직후 약 200초부터 IRWST의 냉각수가 안정적으로 주입되어 장기냉각이 안정적으로 진행됨을 알 수 있다.

3.2 소형냉각재 상실사고

DVI 배관 양단파단사고를 KP1000의 소형냉각재상실사고(SBLOCA)에 대한 제한사고로 선정하여 분석하였다. 표 2에는 DVI 배관 양단파단사고에 대한 사고전개 과정을 나타냈다. 그림 7은 DVI 배관 양단파단사고에 대한 압력변화를 보여주고 있다. DVI 배관에 파단사고가 발생되면 손상유로의 축압기 유량은 파단부위를 통하여 격납용기로 방출되기 시작한다. 파단부를 통한 과냉각상태의 냉각재 방출로 원자로냉각재계통은 신속하게 감압되고 원자로정지신호와 안전주입신호가 발생되며, 저온관과 CMT상단 사이의 압력균형관의 밸브가 개방되기 시작한다. 안전주입신호에 따라 주급수계통격리밸브가 작동되고, 원자로냉각재펌프는 coastdown을 시작한다. CMT 격리밸브의 개방으로 손상유로에 있는 CMT의 냉각수는 격납용기 대기로 직접방출되고, 정상유로의 CMT는 원자로계통과 소량의 순환 유로를 형성하기 시작한다.^[8]

RCS 압력이 감소됨에 따라, 유체는 포화상태가 되면서 upper plenum의 수위가 감소하기 시작한다(그림 8). 이어서 원자로수위는 고온관 이하로 떨어지고, RCS 상단유로의 냉각수가 고갈되면서 downcomer까지 mixture level이 형성되고, 이후 파단부위까지 수위가 감소하게 된다. 수위가 파단부위 이하로 감소하면 손상유로의 downcomer를 통한 이상유체 방출이 시작된다. 손상유로의 CMT 상단이 포화상태가 되어 증기가 생성되면서 CMT 수위는 감소하기 시작하여 수위가 75%에 도달하면 1단계 ADS밸브가 열리게 된다(그림 9). 가압기 상단의 ADS밸브를 통한 증기방출은 RCS의 감압율을 증가시킨다. 또한 DVI 노즐 이하로 원자로수위(mixture level)가 떨어지면 downcomer로부터 파단부위를 통한 격납용기 대기로의 증기방출로 RCS 감압율은 더욱 가속된다.

손상유로 CMT 수위의 2단계 ADS밸브 설정치 도달시간은 매우 빠르지만 1단계와 2단계 ADS밸브 사이의 최소지연요구시간이 지나서야 2단계 ADS밸브가 개방된다. 정상유로의 downcomer로의 CMT 주입이 시작되면서, downcomer의 수위는 서서히 증가하고 노심 수위는 재상승하여, 수위는 upper plenum으로 증가 고온관 수위를 회복하게 된다.

단계별 최소지연요구시간이 지나면 3단계 ADS밸브와 4단계 ADS밸브가 각각 개방된다. 4단계 ADS밸브는 격납용기 대기로 직접 방출하도록 설계되어 있어 밸브가 개방되면 이상유체의 방출유로가 형성된다. 이후 손상유로의 CMT와 축압기가 고갈된다. 정상유로의 CMT 상단이 포화상태가 되어 기포가 형성되면 CMT 수위는 서서히 감소한다. 정상유로의 축압기가 고갈되면 이로 인

해 안전주입유로의 압력이 감소하게 되고 CMT로부터의 유량이 지속적으로 주입되게 된다. 축압기 주입기간 동안에 노심수위는 재상승하지만, CMT 만 주입되는 경우에는 노심수위는 서서히 감소하여 IRWST 주입이 시작되는 시점에 노심내의 collapsed liquid level은 최소수위에 도달한다. CMT로부터의 유량은 서서히 안정적으로 감소하고, RCS 압력 또한 서서히 감소한다. RCS 압력이 IRWST 주입압력 이하가 되면 IRWST로부터의 지속적인 주입이 시작되는 장기냉각(long term cooling)단계가 된다. 점차적으로 IRWST 주입유량이 손상유로와 ADS밸브들을 통해 방출되는 유량보다 많아지고 이로 인해 RCS의 냉각제 재고량이 서서히 증가한다(그림 10).

4. 결 론

가압경수형 피동형원자로인 미국 Westinghouse사의 AP600을 참조 발전소로 하여 설정된 1000MWe급 대용량 피동형원자로의 안전주입계통에 대한 성능 및 RELAP5/MOD3 코드의 적용성 평가를 목적으로 냉각제상실사고를 모의 분석하였다. KP1000의 경우 대형냉각제상실사고시 발생하는 현상들은 기존 원자로와 큰 차이가 없고 이들 현상을 모의하기 위한 모델링 요건들이 피동형 계통들을 분석하는데 동일하게 요구되는 것으로 나타났다. KP1000은 원자로용기의 크기 증대, 저출력밀도 노심과 노심냉각수의 원자로용기 직접주입 등의 영향으로 대형냉각제 상실사고시 노심냉각수의 주입이 원활하게 이루어져 충분한 노심냉각능력을 갖는 것으로 분석되었다. 또한 KP1000의 피동안전계통은 DVI배관 양단파단사고시 ADS밸브 작동으로 원자로냉각제계통을 신속하게 감압하여 노심으로 안정적인 안전주입을 수행할 수 있어 적절한 사고완화기능을 수행하는 것으로 분석되었다.

5. 참고 문헌

- [1] J. E. Fisher, "Large Break LOCA Calculations for the AP600 Design," pp. 54 - 59.
- [2] WCAP-14202 Rev. 1, "AP600 Plant Description Document", AP600 DOC. #GW GO 001, March, 1994.
- [3] PWR Passive Plant Heat Removal Assessment, EPRI NP-7080-M, Electric Power Research Institute, March 1991.
- [4] 장문희 등, "신형원자로 계통분석기술연구", KAERI/RR-1496/94, 한국원자력연구소, 1995
- [5] 장문희 등, "신형원자로 계통개념연구", KAERI/RR-1483/94, 한국원자력연구소, 1995
- [6] 김성오 등, "대용량 피동원자로계통개념 및 대형냉각제 상실사고에 대한 안전계통 성능평가", KAERI/TR-837/97, 한국원자력연구소, 1997
- [7] K. E. Karlson et. al., "RELAP5/MOD3 Code Manual", NUREG/CR5535, June, 1990.
- [8] AP600 SSAR Chapter 15, Westinghouse, June 1992.

표 1. AP600과 KP1000의 주요 계통 설계 변수 비교

구분	AP600	AP600	KP1000
노심 및 원자로냉각재 계통	NSSS 출력(MWt)	1940	3135
	노심출력(MWt)	1033	3125
	핵연료집합체 갯수	145	193
	평균선열출력(kw/m)	13.5	
	증기발생기 갯수	2	3
	원자로냉각재 펌프 갯수	4	6
	가압기 용량(m3)	36.8	60.0
자동감압계통	제1단밸브:트레인 x 밸브크기(inch)	2x4"	2x4"
	제2단밸브:트레인 x 밸브크기(inch)	2x8"	2x8"
	제3단밸브:트레인 x 밸브크기(inch)	2x8"	2x8"
	제4단밸브:트레인 x 밸브크기(inch)	2x12"	2x12"
피동안전주입계통	트레인 갯수	2	3
	축압기 용량(m3)	56.6	
	노심보충수탱크 용량(m3)	56.6	
	축압기 용량(m3)	56.6	
피동격납용기냉각계통	격납용기 부피(m3)	48100	
	격납용기 표면적(m2)	4980	
피동잔열제거계통	트레인 및 열교환기 갯수	1	2
	열전달 면적(m2)	382	764

표 2. KP1000의 DVI배관 파단시 사고전개 순서

구분	Time (sec)
파단	0.0
원자로정지 신호	8.9
S 신호	10.0
주증기 격리 밸브 폐쇄	10.0
주급수 격리 밸브 폐쇄	15.0
원자로냉각재펌프 Coastdown	27.8
1단계 ADV 밸브 열림	90.8
2단계 ADV 밸브 열림	150.8
안전주입탱크 안전주입	153~333
3단계 ADV 밸브 열림	270.8
4단계 ADV 밸브 열림	390.8
CMT 안전주입	0 ~
IRWST 안전주입	615~

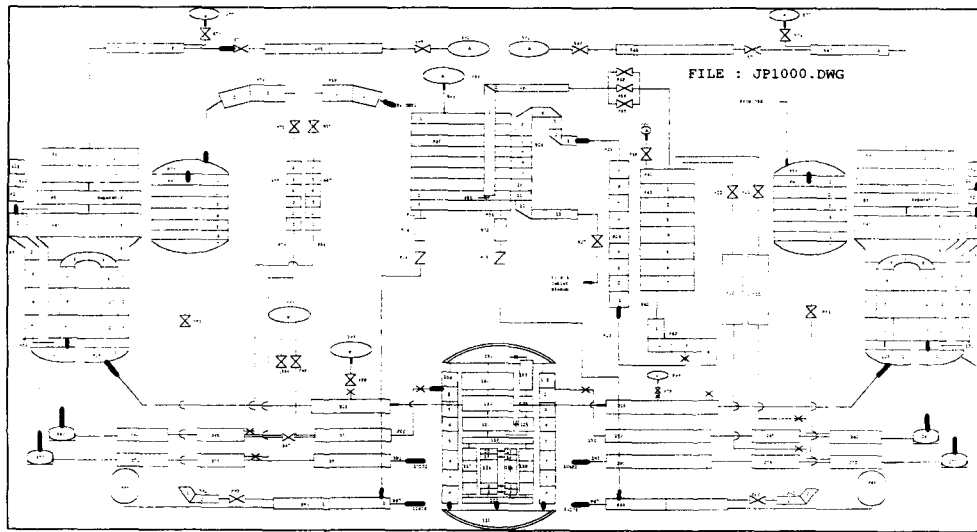


Fig.1 KP1000 nodalization scheme

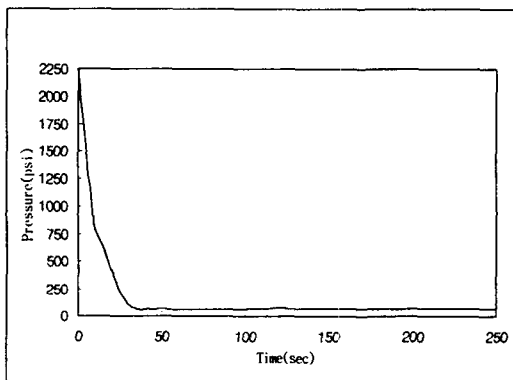


Fig.2 Pressurizer pressure

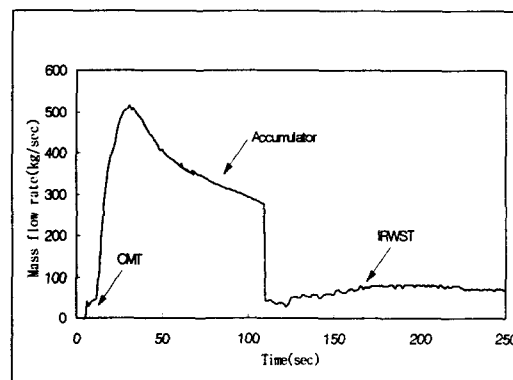


Fig.3 ECCS total injection flow rate

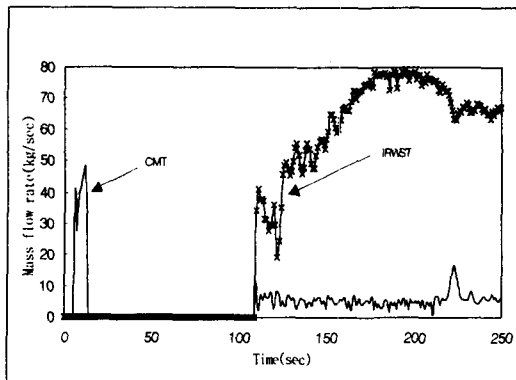


Fig.4 CMT and IRWST injection flow rate

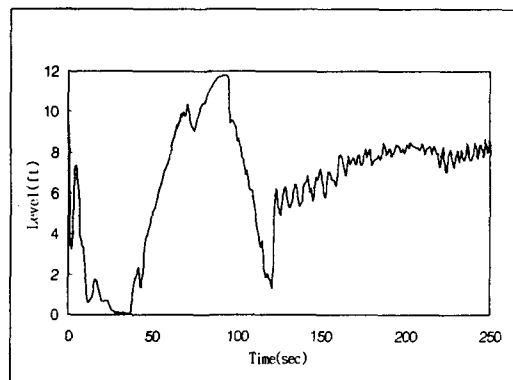


Fig.5 Core water level

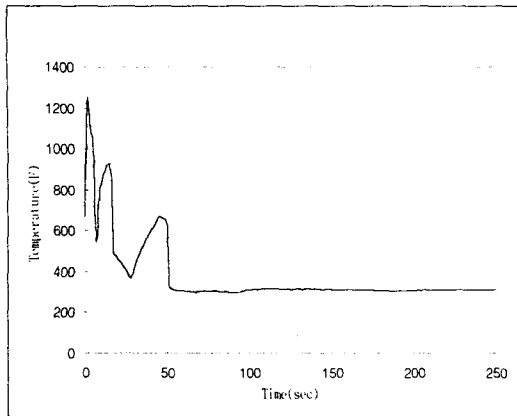


Fig.6 PCT at node #10

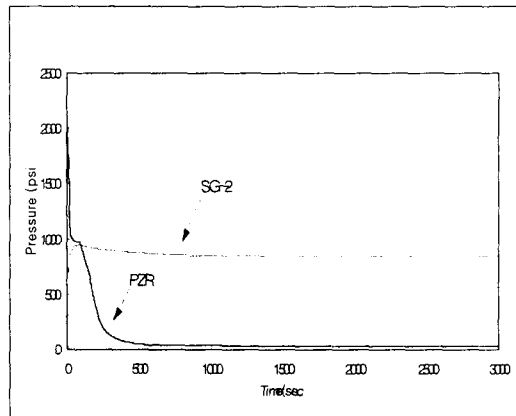


Fig.7 Pressure at pressurizer top and SG2

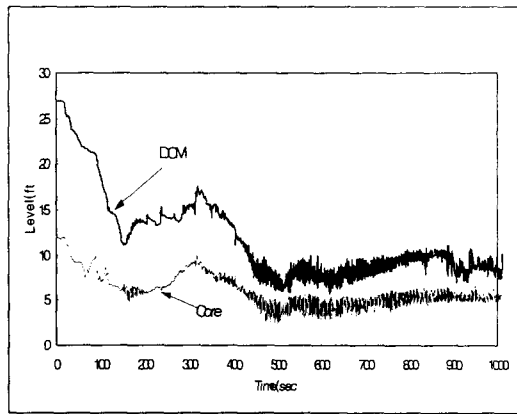


Fig.8 Core and DCM collapsed water level

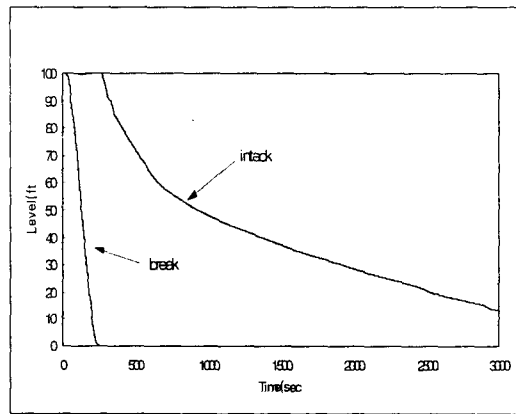


Fig.9 CMT water level

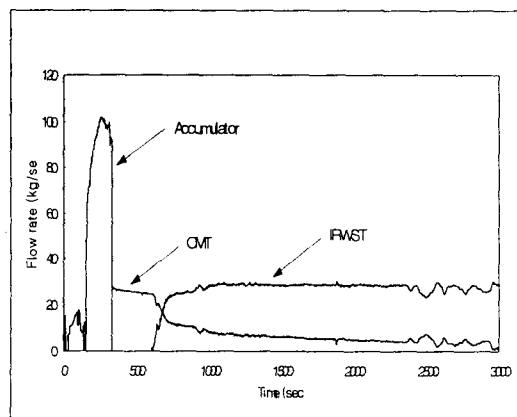


Fig.10 Core and downcomer water level