

감압시 수직 용기 내부에서의 이상혼합물의
축방향 기포분율분포 및 수위의 측정

Measurements of Axial Void Fraction Distributions and Swelled Level of
Two-Phase Mixture in a Vertical Tank During Depressurization

김장현, 이상규, 이경원, 전문현

한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

요 약

감압시 수직용기 내부에서 증기와 물의 이상혼합물의 형성에 의한 수면상승 및 entrainment/off-take 현상을 해석하기 위하여 높이 2m, 내경이 0.3m인 가압용기를 이용한 감압에 의한 이상혼합물의 수면상승 실험을 수행하였다. 감압률을 변화시키기 위해서 10mm와 20mm의 내경을 가지는 두가지 오리피스를 사용하여 초기압력을 10기압에서 40기압까지, 그리고 초기수위를 40%에서 80%까지 변화시켜가면서 15회의 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 차압계를 이용한 감압시 수직용기 내부의 축방향 기포분율분포 및 수면상승에 대한 측정방법 및 실험결과를 제시하였다. 축방향 기포분율 및 수면상승에 대한 차압계의 측정 결과와 가시창을 통한 육안 관측결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Abstract

To analyze the two-phase mixture level swelling and the water entrainment and/or off-take phenomena from the two-phase mixture surface in a vertical tank during a depressurization, a series of experiments were performed using a pressurized vessel with 2m height and 0.3m ID. To vary the depressurization rate, two different orifice plates whose inner diameters were 10mm and 20mm, respectively, have been used and a total of 15 tests have been performed varying the initial pressure from 10 to 40bars and changing the initial water level from 40% to 80%. This paper presents the measurement methods and the experimental results obtained with a parallel set of DP Cells for axial void fraction distributions and the level swelling of a two-phase mixture in a vertical tank during a depressurization. A comparison between the measured axial void fraction distributions and the level swelling with DP Cells and the results obtained by visual observations using a view port attached to the pressurized tank showed a good agreement.

1. 서 론

향후 건설될 신형경수로1400(APR1400: Advanced Power Reactor 1400)에는 설계기준초과사고인 완전급수상실사고(TLOFW: Total Loss of Feedwater Flow)시 일차계통이 가압되는 것을 방지하고 또한 가압기에 연결된 POSRV(Power Operated Safety Relief Valve)를 통해 일차계통을 빠르게 감압시킴으로써 고압안전주입(HPSI)이 가능하도록 하기 위한 안전감압계통이 채택되었다. 이와 같이 일차계통의 급격한 감압시 가압기에서는 flashing에 의한 이상혼합물의 생성 및 수면상승 현상이 발생하게 된다. flashing에 의한 이상혼합물이 생성 및 수면상승은 용기내부 액체 잔존량을 급격히 감소시킬 뿐만 아니라 방출구와 수면과의 수직거리의 감소가 수면에서 액체의 결합력을 감소시키기 때문에 방출되는 증기에 의한 물의 entrainment 또는 off-take 현상을 촉진하게 된다. 따라서 감압에 의한 이상 혼합물의 생성 및 수면상승과 수면으로부터 물이 entrainment되는 현상에 대한 정확한 해석은 안전감압계통을 통한 방출유량 및 방출시간 뿐만 아니라 잔존 냉각재량의 결정에 매우 중요하다.

Flashing에 의한 이상혼합물의 수면상승 현상에 관하여 몇 건의 실험적 연구가 수행된바 있다. 대표적인 것으로는 GE Level Test[1]와 Marviken Test[2]이다. GE Level Test는 BWR의 냉각재상실사고시 Refill-Reflood 현상의 연구에 중점을 두고 수행되었으며, 임계유동 실험인 Marviken Test에서는 추가적으로 감압에 의한 수면상승 실험도 수행하였다. 기존의 연구결과들은 공통적으로 탱크내부의 기포분율 및 2상 혼합물의 수위측정에 여러개의 차압계를 병렬연결하여 사용하고 있다. 외부로 방출되는 2상 혼합물의 방출 유량은 T. Watanabe et al.[3]가 오리피스를 이용하여 전체 증기 방출유량을 측정된 경우를 제외하고는 탱크내부에 남아있는 물의 체적 변화로부터 증기 방출량을 간접적으로 추측하였으며, 수면상승에 따른 이상혼합물이 방출되는 상황은 고려하지 못하였다. 그러나 급격한 감압이 이루어지고 있는 상태에서는 차압계의 신호로부터 측정된 탱크내부의 물의 체적변화만으로 증기 및 2상 혼합물의 방출량을 유추하는 방법은 보완이 필요하다.

Yassin[4]는 GE Level Test와 TRAC-PF1코드 계산 결과를 비교하였으며, Rosdahl, and Caraher[5]은 RELAP5/MOD2를 이용하여 Marviken Test 결과와 비교하였다. 감압시 압력변화 및 수면상승을 해석하기 위해서는 flashing에 의해 생성되는 기포의 분율과 방출구를 통해서 방출되는 증기 또는 이상 혼합물의 방출유량에 대한 새로운 해석모델이 필요하다. 현재까지의 이러한 현상에 대한 열수력 코드의 적용은 감압시 압력변화를 예측할 때 방출구 입구에서의 유체의 상태에 대한 정보를 알 수 없기 때문에 방출구에서의 Loss Coefficient를 튜닝하는 방법으로 Best Estimate 결과를 사용할 수 밖에 없는 단점이 있다. 또한 가압용기 내부의 기포분율을 예측하는데 있어서 flashing 조건에서 적용 가능한 모델을 포함하고 있지 않다.

따라서 본 실험의 목적은 감압시 수직 용기 내부의 증기와 물의 이상혼합물의 형성에 의한 수면상승 현상 및 방출되는 증기에 의해 수면으로부터 물이 entrainment 또는 off-take되는 현상을 해석할 수 있는 새로운 모델을 개발하고, 개발된 모델을 열수력 최적코드에 적용함으로써 코드의 해석능력을 향상 및 검증하는 것을 목적으로 수행되고 있다. 본 논문에서는 기 수행된 감압 및 수면

상승 실험 결과중 감압시 수직용기 내부의 축방향 기포분율 및 수면상승에 대한 결과를 중심으로 기술하였다.

2. 실험 개요

실험장치는 그림.1에서와 같이 가압용기와 히터계통, 배관계통, 외부 응축폴 그리고 계측계통들로 구성되어 있으며, 실험장치와 실험경수로 가압기와의 제원 비교는 표.1에 요약하였다. 가압용기는 내부의 높이가 2m, 내경은 0.3m로 제작되었으며, 용기 벽면에 두께가 20mm인 강화유리판을 이용한 가시창을 설치하여 감압에 의한 이상혼합물 생성 및 수면상승을 육안으로 관찰할 수 있도록 되어 있다. 가압용기의 재질은 스테인레스-304이고 두께는 10mm, 용기내부 압력은 40기압까지 가압할 수 있도록 설계하였다. 가압용기 양쪽 측면에 각각 0.2m 간격의 측정탭을 설치하여 열전대 및 차압계를 설치하였고 가압용기 상부 및 하부에는 플랜지를 설치하여 필요시 개폐가 가능하도록 하였다. 또한 가압용기 하부에는 30kW 용량의 히터가 하부 플랜지를 통해서 히터의 출력조절장치와 연결하였다.

배관계통은 크게 감압 배관 계통과 물 공급 및 배수 계통으로 나누어진다. 감압 배관 계통은 내경이 50mm인 파이프에 터빈 및 Venturi 유량계, 오리피스, 감압밸브, 스파저가 설치되어 있다. 감압밸브는 air-actuated valve로서 약 0.5초 이내에 개폐가 가능하다. 또한 가압용기 내부의 감압율을 제어하기 위해서 여러 가지 직경의 오리피스를 설치 가능하도록 하였다. 외부 응축폴은 감압용기 내부의 증기와 물의 2상 혼합물이 전부 방출되는 경우에도 모두 수용할 수 있도록 직경이 0.3m 높이는 2m가 되도록 설계하였다.

계측계통은 크게 온도측정과 압력, 그리고 차압측정 장치로 나누어진다. 차압 측정장치는 압력 용기 내부의 수면 상승량 및 축방향 기포분율을 측정하기 위한 10대의 차압계와 이들 차압계의 신호확인 및 Collapsed Liquid Level을 측정하기 위한 차압계 1대, Venturi 및 오리피스에서의 압력강하를 측정하기 위한 차압계 2대, 그리고 외부 응축폴에서의 물의 평균 밀도 및 수면 상승량을 측정하기 위한 차압계 등 총 14대의 차압계로 차압을 측정한다. 압력은 압력 용기 내부와 외부 응축폴에서 측정하며, 온도는 압력 용기 내부의 차압 측정 위치와 동일한 높이에서 측정된다. 그 이외에 오리피스 입구와 출구, 그리고 외부 응축폴에서 평균 압력을 측정을 할 수 있도록 설계하였다.[표.2]

본 실험에서는 10mm와 20mm의 내경을 가지는 두가지 오리피스에 대해서 초기압력을 10기압에서 40기압까지, 그리고 초기수위를 40%에서 80%까지 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. [표.3]

3. 실험결과 및 토의

각 노드에서의 축방향 기포분율은 0.2m 간격으로 병렬연결된 총 10개의 차압계로부터 측정된 차압신호로부터 각 노드에서의 평균 기포분율을 측정하게 한다. 또한 2m 간격의 차압계 1개를 병렬로 설치하여 10개의 노드에서 나오는 차압신호의 합과 비교하여 차압계의 정상작동 유무

를 동시에 확인 할 수 있도록 하였으며, Collapsed Liquid Level를 측정하도록 하였다. 차압계를 이용한 측방향 기포분율은 다음과 같이 결정된다.

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\rho_f g \Delta h_i - \Delta P_i}{\rho_{fg} g \Delta h_i} \quad (1)$$

가압용기 내부 2상 혼합물의 수위 변화는 i 번째 노드에서 2상 혼합물의 수위가 위치하고 있을 경우(partially filled node)의 차압신호로부터 계산된 평균 밀도와 그 아래 완전히 2상 혼합물로 채워진 $i-1$ 번째 노드 (completely filled node)에서의 차압신호로부터 결정되는 평균 밀도의 값으로부터 선형보간(linear interpolation)한 값을 사용하여 계산된다. 즉,

$$\bar{z}_i = \frac{\bar{\rho}_i - \rho_g}{\rho_{i-1} - \rho_g} \Delta h_i \quad (2)$$

$\bar{\alpha}_i$ = i 번째 노드에서의 평균 기포 분율

ρ_f = i 번째 노드의 압력으로부터 계산된 물의 밀도

ρ_g = i 번째 노드의 압력으로부터 계산된 증기의 밀도

ΔP_i = i 번째 노드에서의 차압신호

Δh_i = i 번째 노드의 수직 길이

$\bar{\rho}_i$ = i 번째 노드에서의 2상 혼합물의 평균 밀도 (partially filled node)

$\bar{\rho}_{i-1}$ = $i-1$ 번째 노드에서의 2상 혼합물의 평균 밀도 (completely filled node)

그림.2은 초기압력이 20.3기압, 초기수위 1.1m, 방출구의 Orifice 내경이 10mm인 경우에 가압용기 측면을 통하여 설치된 차압계의 차압신호를 나타낸 것이다. 그림.2에서 보는바와 같이 노드에서 이상혼합물이 존재하지 않는 경우의 차압계 신호는 Zero 또는 음의 값을 나타내며, 만일 노드 내에 이상 혼합물이 존재하게되면 이상 혼합물의 무게만큼 차압이 발생하게 되며 void의 생성 정도에 비례하여 차압신호가 감소하게 된다. 그림.2에서 알 수 있듯이 제일 상부에 설치된 차압계 A(1.8m-2.06m)와 차압계 B(1.6m-1.8m)의 위치에서는 증기만 존재한다는 것을 알 수 있다. 감압이 시작됨에 따라 수위는 차압계 C(1.4m-1.8m)의 하부까지 상승하였다가 차압계 D(1.0m-1.4m)와 차압계 E(0.8m-1.0m)의 위치까지 감소하는 것을 알 수가 있다.

고온/고압 상태의 이상혼합물의 기포분율 및 수위 측정에 사용되는 차압계는 간단한 작동 원리와 빠른 응답시간 때문에 기존의 감압 관련 실험에 적용되어 왔지만, 사용상 많은 제약이 따른다. 첫째, 이상혼합물의 차압을 측정할 때는 측정탭에 기포나 증기가 유입되지 않도록 각별히 주의하여야 한다. 특히 유체가 냉각중일때는 유체의 부피가 감소하기 때문에 각별한 주의를 요한다. 둘째, 정적압력은 온도차에 민감하기 때문에 측정지점과 측정탭을 통한 차압계의 센서까지의 온도차를 고려할 수 있는 방법이 필요하다. 마지막으로 고온/고압 조건에서는 육안 관찰이 어렵고, 감압시 수위가 차압계 측정탭 근처에 있을때 두 개의 차압계가 동시에 반응하게 되므로 측정 결과를 해석하는데 있어서 정확성을 요하고 차압계의 신뢰성을 확인할 수 있는 부가적인 방법이 필요

하다.

그림.3은 식(1)을 이용하여 오리피스 내경이 10mm, 20mm에 대하여 초기압력은 약 30기압, 초기수위는 약 1m 정도에서 감압이 일어나는 경우에 대한 축방향 기포분율을 나타낸 것이다. 10mm 내경의 오리피스를 사용한 실험에서는 완만한 감압과 함께 flashing에 의한 기포생성은 상경계면에서 집중적으로 발생하며, 축방향 기포분율도 상부와 하부간의 격차가 줄어들음을 알 수 있다. 그러나 감압률이 클수록 상부와 하부의 열적 불균형 상태는 커지며, Flashing에 의한 기포생성도 상경계면 뿐만 아니라 용기내부 액체 전체에 걸쳐서 강도 높게 발생한다. 본 실험장치에서 감압시간은 이차응축물의 온도가 포화상태에 도달할 때까지로 제한하였기 때문에, 오리피스 내경이 20mm인 경우에는 실험시간이 짧게는 10여초 정도이다. 그림.4와 그림.5에 오리피스 내경이 각각 10mm, 20mm인 경우에 대해서 가압용기 내부 압력 변화 및 수위변화를 도시하였다. 오리피스 내경이 10mm인 경우에는 수위가 1.5m 정도까지 상승하다가 완만히 감소하는 형태이지만, 20mm인 경우에는 수면이 방출구 입구까지 상승하는 것으로 나타났다. 이것은 가시창을 통한 육안관측 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 감압시 이상혼합물의 상경계면은 매우 요동이 크고 수면이 방출구 입구까지 상승했을 때에는 수면과 방출구와의 수직거리 감소 때문에 발생하는 증기에 의한 물의 entrainment 또는 off-take 현상에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

감압시 수직용기 내부에서 증기와 물의 이상혼합물의 형성에 의한 수면상승 현상을 해석하기 위한 해석모델 개발 및 검증에 위하여 높이 2m, 내경이 0.3m인 가압용기를 이용한 감압 및 수면상승 현상 실험을 수행하였다. 실험은 감압률을 변화시키기 위해서 10mm와 20mm의 내경을 가지는 두가지 오리피스를 사용하여 초기압력을 10기압에서 40기압까지, 그리고 초기수위를 40%에서 80%까지 변화시켜가면서 수행하였다. 본 논문에서는 기 수행된 감압 및 수면상승 실험 결과중 차압계를 이용한 감압시 수직용기 내부의 축방향 기포분율 및 수면상승에 대한 측정방법 및 실험 결과를 기술하였다. 오리피스 내경이 10mm인 경우에는 전반적으로 완만한 감압이 발생하는데 반하여, 내경이 20mm인 오리피스를 이용한 실험은 감압이 아주 짧은 시간동안 급격하게 일어나기 때문에 flashing에 의한 기포생성도 가압용기 하부와 상부간의 격차가 매우 큰 열적 비평형상태에 있는 것으로 확인되었다. 이 결과는 가시창을 통한 육안 관측결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 초기수위가 1m정도(50%)이고 초기압력이 30기압정도에서도 이상 혼합물에 의한 수면상승은 용기내부 방출관 입구까지 상승한 것으로 나타났으며, 이에 따른 증기에 의한 물의 entrainment 또는 off-take 현상에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 "한국차세대원자로 기술개발사업"의 일환으로 수행되었으며, 한국전력공사의 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. J. A. Findlay, "BWR (Boiling Water Reactor) Refill-Reflood Program Task 4.8-Model Qualification Task Plan," NUREG/CR-1899.
2. M. A. Grolmes et al., "Level Swell Analysis of the Marviken Test T-11," Nucl. Sci. Eng., v.93, pp.229-239, 1986.
3. T. Watanabe et al., "A Mechanistic Model for the Analysis of Flashing Phenomena," Ann. Nucl. Energy, v.23, n.10, pp.801-811, 1996.
4. Yassin A. Hassan, "Transient Two-Phase Blowdown Predictions of an initially Stagnant Saturated Liquid Steam in a Vessel Using TRAC-PF1," Nucl. Tech., v69, pp.388-392, 1985.
5. O. Rosdahl, and D. Caraher, "Assessment of RELAP5/MOD2 Against Marviken Jet Impingement Test 11 Level Swell," NUREG/IA-0006, Sept. 1986.

표.1 APR1400 가압기와 실험장치 제원 비교

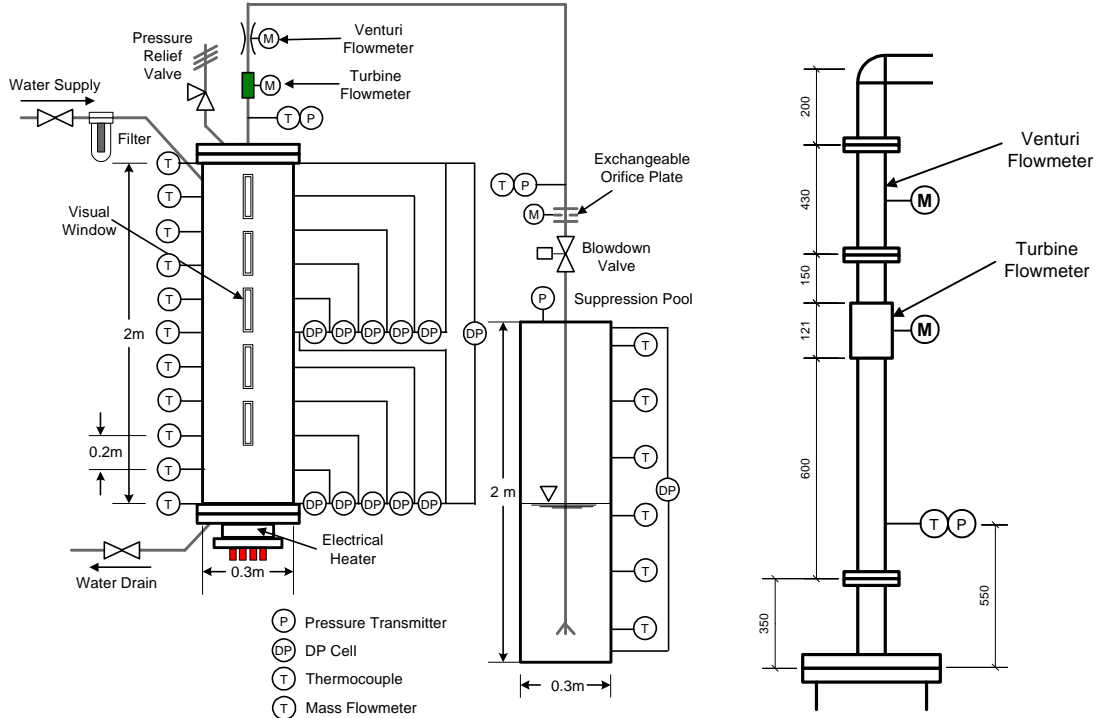
Item	APR1400 Prz.	Expermental App.	Remarks
Valve Set Point [bar]	165	40	
Height [m]	14.61	2	
Inner Diameter [m]	2.44	2	
Ratio of Height to Diameter [H/D]	6	6.6	
Volume (Liquid/Total) [m ³]	34.98/64.24	(0.057-0.113)/0.141	40%-80% of Total Vol.
Initial Water Level (Relative) [m]	7.683 (53%)	0.8 - 1.6 (40-80%)	
Valve Area	$2.156 \times 10^{-3} \times 4$	7.85×10^{-4} 3.14×10^{-4}	4 POSRV
Discharge Mass Flux [kg/m ² -s]	31,558-36,818	6,085-21,985	- InsentropicDischarge of Pure Steam - Fauske Model

표.2 주요 계측 인자 및 계측 방법

Measurement	Instrument (Method)	Range	Accuracy	Remarks
System Pressure	-Pressure Transmitter	5 MPa 0.2 MPa	0.5% of Range	-
Void Fraction	-DP Cell	0 - 4 kPa 0 - 40 kPa	0.1% of Range	10 Set (0.2m Interval) 11 Set (2m Interval)
Mixture Level	-DP Cell -Video Camera	0 - 4 kPa -	0.1% of Range -	10 Set (0.2m Interval) -
Temperature	-T/C (K-type)	0 - 250℃	±1℃	Pressure Vessel Suppression Pool Discharge Line
Mass Flowrate Steam Quality	-Mass Inventory -Suppression Pool Level -Turbine+Venturi -Orifice	- - - 20 kPa	- - - 0.1% of Range	-

표.3 Test Matrix

Initial Pressure	Orifice Plate ID	Initial Water Level
10 bar	10 mm	40% - 80%
	20 mm	
20 bar	10 mm	40% - 80%
	20 mm	
30 bar	10 mm	40% - 80%
	20 mm	
40 bar	10 mm	40% - 80%
	20 mm	



(a) 실험장치 구성도

(b) 방출 배관 및 유량 측정 장치

그림.1 감압 및 수면상승 실험장치 구성도.

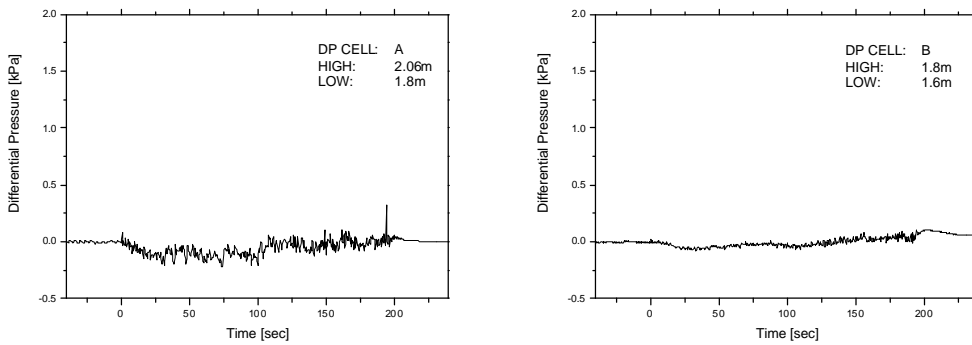


그림.2 가압용기 내부의 각 차압측정 위치에서 시간에 따른 차압계 반응 변화 추이.
(Initial Pressure: 20.3bar, Initial Water Level:1.11m, Orifice ID:10mm)

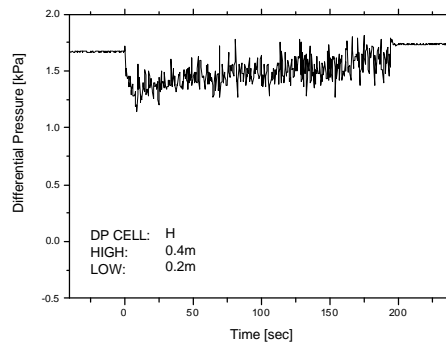
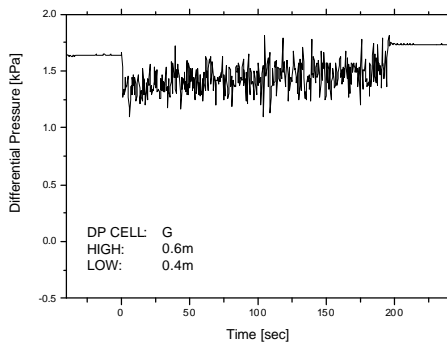
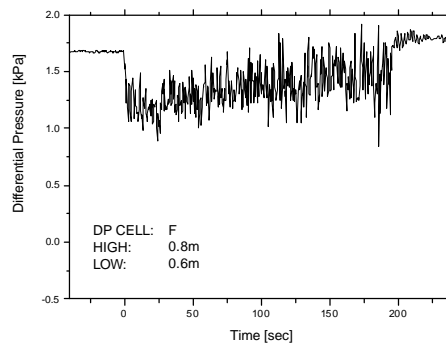
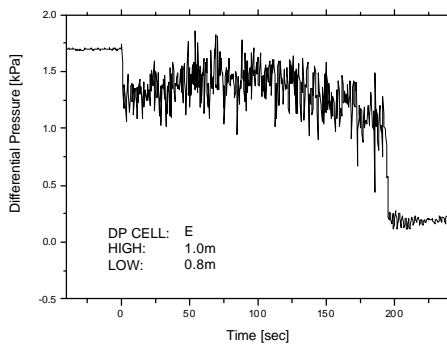
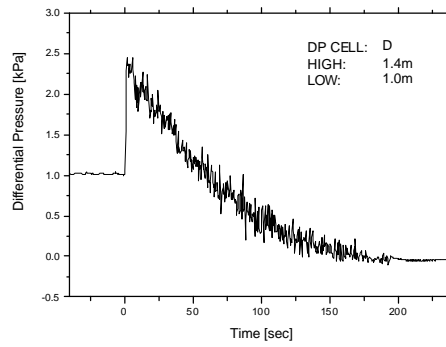
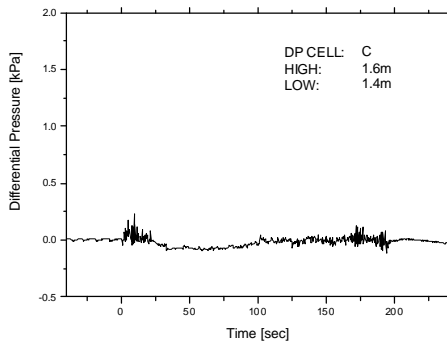


그림.2 가압용기 내부의 각 차압측정 위치에서 시간에 따른 차압계 반응 변화 추이(계속).
 (Initial Pressure: 20.3bar, Initial Water Level:1.11m, Orifice ID:10mm)

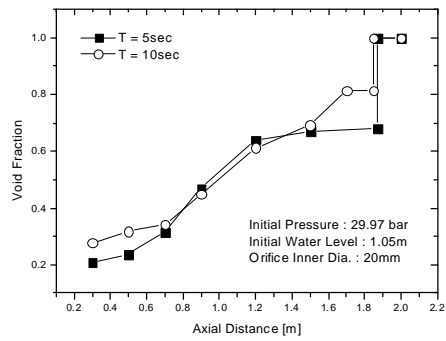
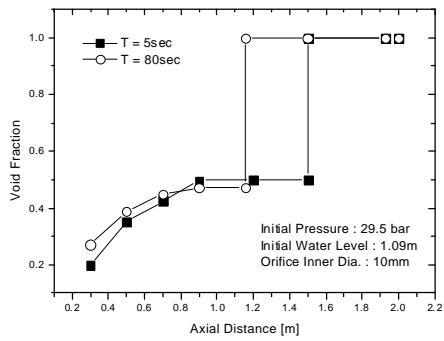


그림.3 시간에 따른 탱크내부 축방향 Void Fraction 분포.

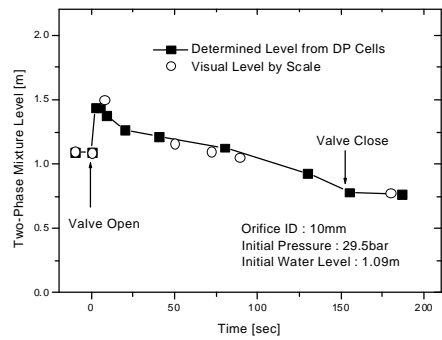
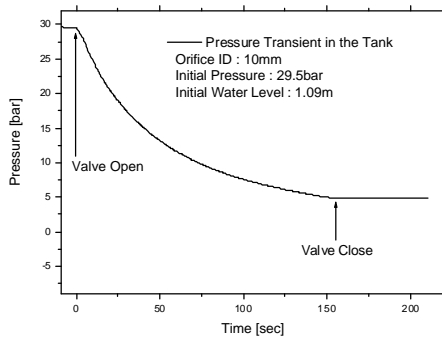


그림.4 감압에 따른 탱크내부 압력변화 및 이상 혼합물의 수위변화.
(Initial Pressure: 29.5bar, Initial Water Level:1.09m, Orifice ID:10mm)

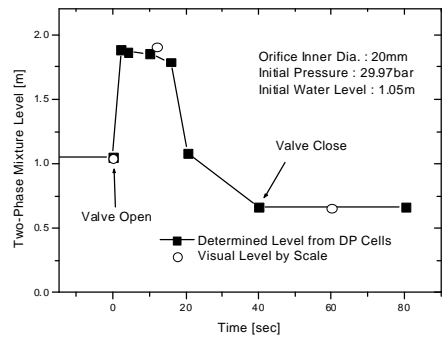
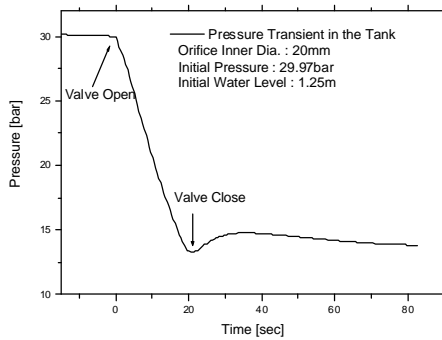


그림.5 감압에 따른 탱크내부 압력변화 및 이상 혼합물의 수위변화.
(Initial Pressure: 29.97bar, Initial Water Level:1.05m, Orifice ID:20mm)