

자유액면에서 가스혼입이 시작되는 임계조건 측정

Measuring the Critical Conditions for Gas Entrainment Inception at the Free Surface of Water

남호윤, 김종만, 이길용, 김병호, 최종현

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로 노심의 상부에는 있는 자유액면에서 커버가스가 냉각재인 소듐 속으로 혼입되면 중간열 교환기의 성능저하와 노심의 핵반응도에 문제점을 야기시키므로 평균수위와 유량을 인자로 커버가스가 혼입되는 임계조건을 측정하였다. KALIMER의 상부플레넘을 길이스케일로 1/4 규모로 1/4 section을 모의하여 상온의 물을 사용하여 가스혼입이 발생하는 시점의 자유액면의 높이와 유량을 측정(28set)하여 가스혼입이 일어나는 임계조건을 측정하였다. 가스혼입이 일어나는 판단조건을 3가지 경우로 나누어 측정하였는데 모든 경우에 가스혼입이 일어나는 임계조건에서 수위(H)와 유출유량(Q)과의 관계를 나타내면 $H = b \ln(Q - a)$ 로 나타났고, 상수인 a , b 의 값은 달랐다. 또한 자유액면에서의 가스혼입은 vane의 위치가 높을수록 더 잘 일어나는 것을 볼 수 있다.

Abstract

In a liquid metal nuclear reactor using a sodium as coolant, the upper plenum of reactor vessel has a free surface where the coolant sodium contacts with the cover gas. If the cover gas is entrained by the sodium flow at the free surface, the gas causes a change in reactivity of the core and also reduces the heat removal capability of the intermediate heat exchanger. It is important to investigate the critical conditions for the inception of gas entrainment at the free surface. An experimental study has been carried out to measure the critical conditions in the 1/4 section of KALIMER upper plenum with 1/4 length scale in the water test facility. The experimental variables are the mean water level and the flow rate. The measurements have been carried out according to three cases of inception condition. In all of the cases, the relations between the mean level(H) and the flow rate(Q) are represented as $H = b \ln(Q - a)$, but the constants a and b are different. Also it is observed that the gas entrainment in the free surface occurs easily when the vane level becomes higher.

1. 서론

액체금속로 노심의 상부에는 냉각재인 소듐의 자유액면이 존재한다. 노심에서 분출된 소듐은 대략 0.5 m/sec 정도로 자유액면에 도달하고, 다시 자유액면보다 낮은 위치에 있는 중간열교환기로 흡입된다. 이때 소듐은 530℃ 정도의 온도를 갖고 있으며 이에 반해 커버그스는 300℃ 정도의 온도로 유지된다. 이런 경우에 열유체적으로는 두 가지 관점에서 문제가 제기된다. 첫째는 자유액면의 요동으로 인해 인접한 재질에 열피로 현상이 유발시키고, 둘째로는 중간열교환기로 소듐이 흡입될 때 자유액면에서 소용돌이가 발생하여 커버그스가 중간열교환기로 혼입(gas entrainment)될 수도 있다. 커버그스가 중간열교환기로 혼입되면 열교환기의 성능이 저하되고, 또한 노심으로 커버그스가 들어가서 핵반응도에 문제점을 야기시킨다.

Baum과 Cook[1]은 소듐등 4종류의 유체를 사용하여 측면원통 벽면에 접선방향으로 주입되어 하부로 나가는 구조로 소규모 실험을 수행하였다. 가스혼입이 일어나는 임계높이는 유체의 표면장력의 영향은 미미하고, 단지 주입속도에 비례함을 실험식으로 나타내었다. Takahashi 등[2]은 가스혼입 현상을 3종류 mechanism으로 구분하였다. 첫째 vortex에 의해 일어나는 현상과 둘째는 자유액면의 파동에 의해 접시 모양으로 찌그러진 표면에서의 가스혼입이며, 셋째로는 바닥보다 높이 설치된 주입구의 벽면을 타고 유출구로 가스혼입이 일어나는 현상 등이다. 유량이 1.67 l/sec인 그들의 소규모 실험에서는 임계수위가 속도에 비례함을 보였고, 출구노즐의 직경에 관계되었다. 유량범위가 16.7 l/sec인 Takahashi 등[3]의 실험에서는 유속과 수위의 연관은 미약한 것으로 나타난다. 사각 형태의 측면에서 유체를 빠른 속도로 주입하는 Madarame and Chiba[4]의 실험에서는 가스가 혼입되는 임계조건은 유로 패턴과 국소유속에 기준은 둔 Froud 수와 Weber 수의 곱의 함수로 나타났다. Govindaraj 등[5] 소규모 유량을 사용한 실험에서는 유입구와 유출구의 위치에 따라 임계조건이 많이 다르게 나타났으나 수위는 속도에 비례함을 보였다. 실험규모에 따른 가스혼입이 일어나는 조건을 보기 위하여 Eguchi 등[6]이 수행한 실험에서 보면 실험규모가 임계조건에 많은 영향을 보였고, Froud 수는 규모가 클수록 감소하였다.

이 실험의 목적은 상온의 물을 사용하여 가스혼입이 일어날 수 있는 임계조건 즉, 가스혼입이 발생하는 시점의 자유액면의 높이와 유출유량을 측정하여 가스혼입이 일어나는 조건을 분석하였다. 실험장치의 규모는 액체금속로인 KALIMER의 길이스케일로 1/4 정도이며, 상부 플레넘의 1/4 section을 모의하였다. 유출구는 그릴 형태로 이루어졌고, 유출유량은 최대 40 l/sec 이며, 이 때 그릴에서의 평균유속은 0.86m/sec 정도이다. 이 실험에서는 부차적으로 안쪽 벽면에 vane을 설치하여 UIS에 부착된 구조물이 자유액면의 유동에 어떤 영향을 미치는지를 조사코자 하였다. 가스혼입이 일어나는 임계조건을 측정하는 실험에서는 28개의 실험자료를 획득하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

하부에서 물이 주입되어 하부로 나가는 실험부(그림.1)를 설계, 제작하여 기존의 번들압력강하 실험장치에 부착하여 실험을 수행하였다. 실험장치는 16기압에서 최대 50 l/s의 물을 흘릴 수 있는 용량으로 온도는 70℃까지 가능하나 이 실험에서는 상온(20℃)의 물을 사용하였다. 실험장치의 구성은 다음과 같다. 저장탱크의 물이 펌프를 통하여 탱퍼로 들어간다. 이 탱퍼는 유동의 ripple을 제거하기 위한 장치로 상부에 설치된 질소가스 공간으로 유동의 ripple을 흡수하는 장치이다. 이 곳에서 병렬로 설치된 3개의 유량계(OMEGA model 터바인 유량계 3", 2.5", 1")를 통해 실험부로 들어간다. 유량은 펌프의 속도조절용 인버터로 주로 조절하고, 보조적으로 펌프의 출구에 설치된 바이패스 관의 진동밸브를 사용하여 조절한다. 물은 실험부의 하부에서 주입되어 자유액면을 만든 후 하부에 설치된 출구노즐을 통하여 나간다. 실험부를 통과한 물은 수위조절용 밸브를 지나 자유낙하하여 저장탱크로 되돌아

간다. 저장탱크에는 가열기와 냉동형인 열교환기가 설치되어 물의 온도는 자동으로 제어된다.

그림.2는 실험부의 상세한 규격이다. 실험장치의 규모는 액체금속로인 KALIMER의 길이스케일로 1/4 정도이며, 상부 플레넘의 1/4 section을 모의하였다. 실험장치는 부채꼴 모양이며 안쪽 원통은 반응도 제어장치가 설치되는 UIS를 모의하며, 바깥 원통은 원자로의 벽면을 모의하였다. 유입부는 노심에서 상부 플레넘으로 흐르는 유로를 모의하며 유출부는 중간열교환기로 들어가는 유로를 모의하였다. 실험부의 하부 즉, 유입부와 유출부는 스테인레스 스틸로 만들었고, 자유액면이 있는 부위는 투명한 아크릴로 만들었다. 이 논문에서의 수위는 스테인레스 스틸과 아크릴이 플렌지로 접하는 지점을 기준점으로 정하였다. 유입부에는 실험부로 균일하게 물이 유입되도록 하기 위하여 2 종류로 만든 5개의 스크린을 설치하였다. 하부의 두 개의 노즐들은 들어오는 유체를 분산시키는 역할을 하며, 상부의 3개는 균일한 속도를 갖도록 만들었다.

유입구에서 유입된 물은 자유액면을 형성한 후 출구노즐로 자유낙하하여 빠져나간다. 출구노즐(그림.3)은 내경이 250mm인 원형이나 측면에 높이 100mm, 폭 14.54mm, 피치 24.54mm인 32개의 홀을 통해 유출구로 물이 들어가고, 이 상부에는 높이 100mm인 아크릴 돔으로 막혀진 형태이다. 자유액면의 평균수위는 출구노즐의 하류에 설치된 5" 수동밸브와 2" 전동밸브로 제어한다. 평균수위는 Rosemount model 1200mm 용량인 차압계로 측정하였다.

2.2 실험방법 및 범위

실험방법은 설정한 임의의 유입유량에서 평균수위를 800mm로 유지하다가 평형상태가 이루어지면 출구에 있는 밸브를 조금 더 개방하여 유입 유량보다 유출유량을 증가시켜 수위가 출구노즐까지 도달하도록 천천히 감소시킨다. 이때 유입유량과 평균수위를 계측기로 기록하면서 실험부 내부의 상태를 관찰하여 공기혼입이 일어나는 시각, 즉 판단기준 상태가 일어나면 계측기에 신호를 보내어 일어나는 시각을 기록하였다. 이와 병행하여 VIDEO를 사용한 사진 촬영도 동시에 수행하였다. 공기가 혼입이 일어난다고 판단하는 기준을 결정하는 것은 매우 어렵다. 유출배관에서 기포율을 정밀하게 측정하여야 하나 이에 합당한 미세한 기포를 초기에 측정할 수 있는 기포율 측정기를 사용하는 데는 어려움이 따르므로 자유액면에서의 상태를 육안으로 보면서 결정하였다. 실험에서 자유액면의 변화상태를 세 가지 경우로 구분하여 각각의 기준을 정하였다.

Case 1: 물의 자유액면에 소용돌이(vortex)가 최초로 나타나서 뚜렷한 vortex의 형태를 이룰 때를 기준으로 정하였다. 즉, 자유액면에 소용돌이가 생성되는 시각을 기준으로 정했다.

Case 2: Vortex가 더 성장하여 접시 모양이 되는 시각을 기준으로 설정하였다.

Case 3: Vortex가 더욱더 성장하여 접시모양의 하단부가 파단되면서 공기가 유입되기 시작할 때를 기준으로 설정하였다. 앞에 기술한 참고문헌들에서의 가스혼입 조건은 본 실험에서의 case-3의 가스혼입이 일어나는 판단조건에 해당한다.

유입유량은 5~35 l/sec 범위에서 5 l/sec 간격으로 7 종류의 유량에 대해 실험하였고, 각각의 유량에 대해서 vane의 위치를 0, 200, 400, 600mm 네 가지 경우로 바꾸면서 측정하였다. 유출유량은 기준시각에서 평균수위의 감소율과 유입유량으로 계산하였다. 평균수위의 감소율은 밸브의 주입유량 및 밸브의 열린 상태에 따라 달라지므로 일정하게 유지할 수 없었으나 각 실험에서 대략 2~3 mm/sec로 수위가 감소하였다. 데이터의 측정간격은 0.8sec 정도였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 자유액면의 변화

최대의 유입유량 상태에서도 평형상태에서의 액면의 변화는 수 mm 정도의 파형을 형성하여 매우

잔잔한 형태였다. 수위가 어느 정도 낮아지면 vortex가 일어나는 것이 관찰되었다(그림.4(a)). 생성된 vortex는 발생한 위치에서 머물거나 또는 천천히 이동하다가 사멸되기도 하였다. Vortex가 일어나는 위치는 특정하지 않는 액면의 전 영역에서 관찰되었다. 이러한 현상이 한동안 계속되다가 수위가 더 낮아지면 vortex의 회전 속도가 더 빨라지고 중심 부분이 분명한 접시 모양으로 파인 형태로 발전하였다(그림.4(b)). 그러나 이때에도 vortex는 생성과 사멸과정을 반복하여 일어나고, 다음에 기술하는 Case-3의 경우보다는 생성하는 지역이 넓은 범위에서 일어났다.

Vortex가 더욱 성장하면서 접시모양의 하단부가 파단되면서 공기가 기포형태로 유출구 쪽으로 빨려 들어 갔다(그림.5(a)). 이 때의 공기 유입과정은 매우 불규칙하게 일어나고, 모두 0° 와 90° 부근 바깥쪽 모서리에서 대칭적으로 먼저 발생하였다. 이 초기에는 기포의 유입과 사멸이 반복되었는데 이러한 현상은 유입된 공기가 모두 유출구를 통해서 빠져나가는 것은 아니고, 공기의 부력과 유속 그리고 점성이 평형이 이루어지는 위치에서 어느 정도 고정되다가 어느 한쪽이 우세한 쪽으로 평형이 깨어지면 그 입자가 유출구를 통해서 빠져나가거나, 수면위로 방출되기도 하는 것으로 사료된다. 유량이 더 증가하면 공기가 유선을 그리면서 긴 터널을 형성하여 유출구로 빠져나가는 현상을 관찰할 수 있었다. 수위가 더 낮아지면 모서리 부근에서 중심부로 발생하는 위치가 변하였고 공기의 터널의 폭도 증가하였다(그림.5(b)). 이러한 현상은 모두 유출구를 기준으로 양쪽에 대칭으로 발생한다.

공기의 유입시점은 vane의 높이보다는 유량의 크기에 보다 지배적인 것으로 나타났다. 즉 유출 유량이 크면 수위가 600mm인 곳에서도 공기 유입 현상이 나타났으며 반대로 어떤 유량 이하가 되면 수위에 관계없이 공기 유입 현상이 나타나지 않는 것으로 나타났다.

3.2 가스혼입 임계조건

측정오차는 ASME 규정에 의해 계산하였다. 제작오차 및 측정오차는 표.1에 기술되어 있다. 그림.6는 각각의 가스혼입이 일어난다는 판단기준에 따라 유출유량과 평균수위의 임계조건을 보이고 있다. 가스혼입이 일어나는 상태를 육안으로 관찰하여 결정한 것이기 때문에 어느 정도의 오차는 인정하더라도 실험자료는 어떤 경향을 보이고 있다. 이 그림에서 level이 0인 경우는 임계조건은 아니지만 그 유량에서는 가스혼입이 일어나지 않는다는 것을 나타내고 있다. 각각의 기준에서 보면 미세하지만 vane의 위치가 높을수록 같은 높은 수위에서 가스혼입이 더 잘 일어나는 것을 볼 수 있다. 즉, vane의 위치가 높을수록 가스혼입이 잘 일어남을 볼 수 있다.

가스혼입이 일어나는 임계조건에서 수위(H)와 유출유량(Q)과의 관계를 나타내면 $H = b \ln(Q - a)$ 로 나타나고, 이 관계식을 실험자료와 비교한 것이 그림.7과 같다. 세가지 기준에서 임계조건을 관계식으로 나타내면 다음과 같다. 여기에서 H는 평균수위로 단위는 mm이며, Q는 유출유량으로 단위는 l/sec이다.

$$\text{case-1: } H = 214 \ln(Q - 5.27) \quad (1)$$

$$\text{case-2 : } H = 185 \ln(Q - 9.11) \quad (2)$$

$$\text{case-3 : } H = 160 \ln(Q - 14.4) \quad (3)$$

실제로 공기가 혼입되는 조건인 case-3과 자유액면에 vortex가 초기에 생성되는 조건인 case-1에서 임계조건은 같은 모양으로 기술됨을 알 수 있으며, 임계유량이 case-3의 경우에는 14.4 l/sec이고 case-1에서는 5.27 l/sec이다. 그러므로 자유액면에 vortex가 생성되는 것은 가스가 혼입되는 조건과 형태적으로 유사한 관련을 갖고 있으므로 이론을 개발하는데는 자유액면에 vortex가 생성되는 조건을 구한 후에 발전되어가는 과정을 고려하는 것이 타당하다고 생각할 수 있다.

앞에서 기술한 참고문헌[1~5]들에서 보면 저유량에서는 임계수위는 속도 즉 유량에 비례하였다. 참

고문헌에서와 같은 기준인 가스가 혼입되는 그림.6의 case-3의 경우에서 보면 25 l/sec까지는 유량과 임계수위는 일차적으로 증가하지만 유량이 더 증가하면 일차적으로 변하지 않고 휘어지는 것을 볼 수 있다. 그러므로 유량과 임계수위가 일차적으로 변하지 않음을 알 수 있다. 본 실험에서 이 유량이면 출구노즐 그림에서의 평균속도는 0.54 m/s 정도이다. 인용한 참고문헌들에서는 대개 출구속도와 수위를 기준으로한 Froud 수를 사용하여 분석하였다. Froud 수(F_r)는 다음과 같이 정의된다.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad (4)$$

여기에서 V 는 유속, g 는 중력가속도, H 는 길이 스케일이다. 대략적으로 비교하여 보면 본 실험에서는 25 l/sec에서 F_r 은 0.27 정도이다. 예로 Baum과 Cook의 실험에서는 속도는 0.94m/s, F_r 은 0.24 정도로 유속과 무차원 범위는 비슷하지만 임계수위와 유속은 일차적으로 나타나므로 유속을 기준으로한 Froud 수만으로 임계조건을 기술할 수 없으며 구조적 영향이 주요한 역할을 함을 알 수 있다. Eguchi 등[6]의 결과에서도 규모의 중요성이 지적되었으므로 이 논문에서는 실험의 경향을 보이고 차후 출구노즐의 직경등 다른 scale 영향을 고려하여 실험식을 개발할 예정이다.

4. 결 론

자유액면에서의 가스혼입은 vane의 위치가 높을수록 더 잘 일어나는 것을 볼 수 있다. 가스혼입이 일어나는 판단조건을 3가지 경우로 나누어 측정하였는데 모든 경우에 가스혼입이 일어나는 임계조건에서 수위(H)와 유출유량(Q)과의 관계를 나타내면 $H = b \ln(Q - a)$ 로 나타났고 상수인 a , b 의 값이 달랐다. Vortex 발생 조건과 가스혼입 조건이 유사한 형태로 기술된다. Froud 수만으로 임계조건을 기술할 수 없으며 구조적 영향이 주요한 역할을 한다. 이 실험자료와 문헌을 바탕으로 차후에 이 현상이 일어나는 mechanism 분석과 실험식 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌

1. M.R. Baum and M.E. Cook, "Gas Entrainment at the Free Surface of a Liquid: Entrainment Inception at a Vortex with an Unstable Gas Core," Nuclear Eng. & Des., 32, 239-245, 1975.
2. M. Takahashi, A. Inoue and M. Aritomi, "Gas Entrainment at Free Surface of Liquid, (I) : Gas Entrain Mechanism and Rate," J. of Nuc. Sci. & Tech., 25(2), 131-142, 1988.
3. M. Takahashi, A. Inoue and M. Aritomi, "Gas Entrainment at Free Surface of Liquid, (II) : Onset Conditions of Vortex-Induced Entrainment," J. of Nuc. Sci. & Tech., 25(3), 245-253, 1988.
4. H. Madarame and T. Chiba, "Gas Entrainment Inception at the Border of a Flow-Swollen Liquid Surface," Nucl. Eng. & Des., 120, 193-201, 1990.
5. G. Govindaraj et al., "Gas Entrainment in Surge Tank of Liquid Metal Gas Breeder

- Reactors," J. of Nucl. Sci. & Tech., 30(7), 712-716, 1993.
6. Y. Eguchi et al., " Gas Entrainment in the IHX Vessel of Top-entry Loop-type LMFBR," Nucl. Eng. & Des., 146, 373-381, 1994.

표.1 실험장치의 제작오차 및 측정오차

인 자	범 위	오 차
내면반경(mm)	400	±1.0mm
외면반경(mm)	1100	±5.0mm
평균 수위계 (mm)	200~1200	±0.5%
주입유량(ℓ/s)	5~35	±0.5%
유출유량(ℓ/s)	5~40	±1.2%
Vortex 발생기준 (sec)	-	±1 sec (±3 mm)
Vortex 발생시 수위(mm)	-	±(0.5%+3mm)

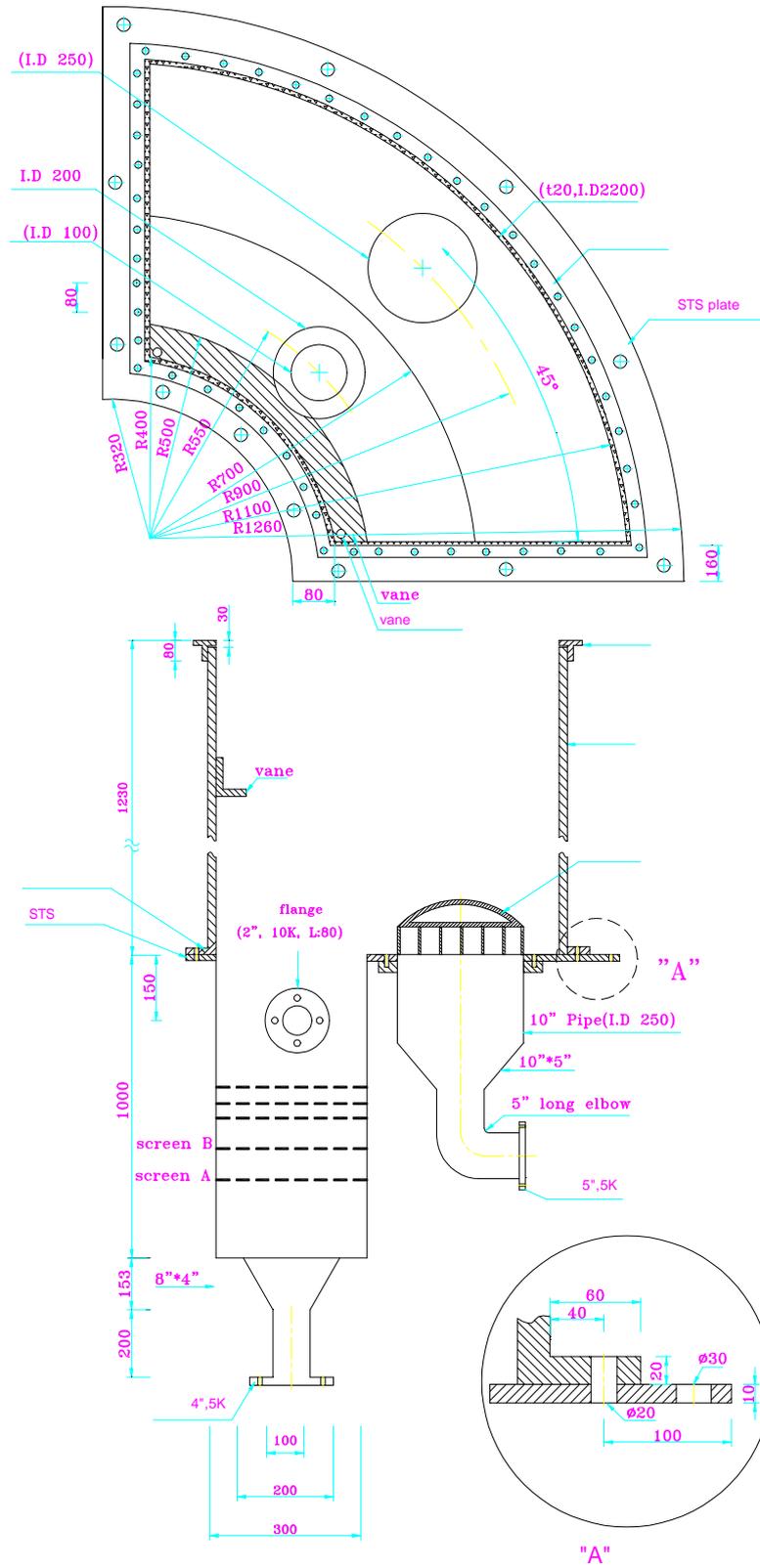


그림.3 가스혼입 실험부의 규격

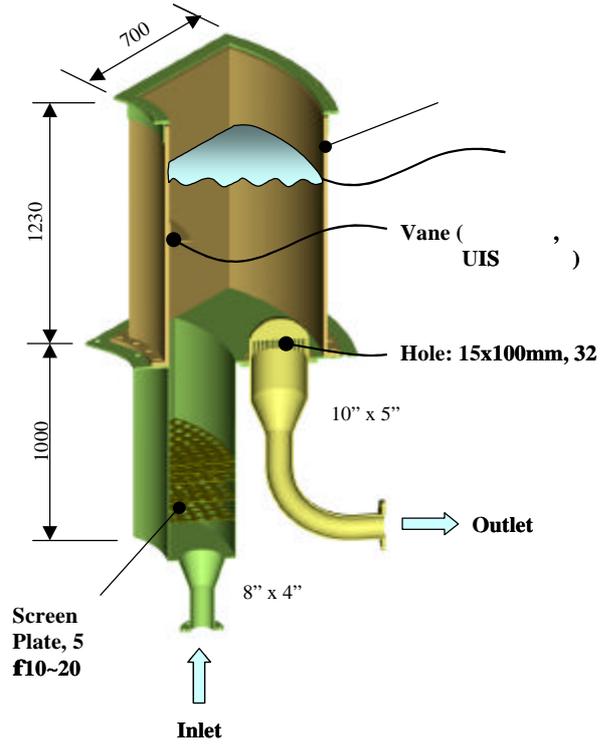


그림.2 가스혼입 실험부의 단면

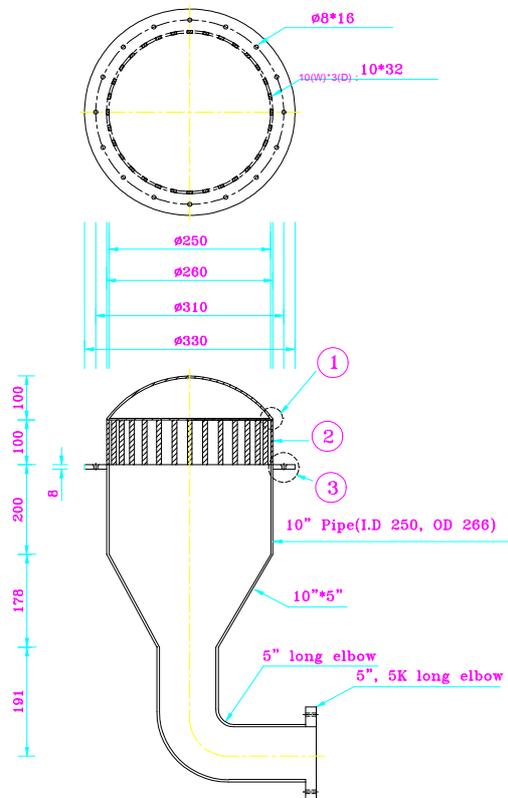


그림.3 실험부의 출구노즐 규격

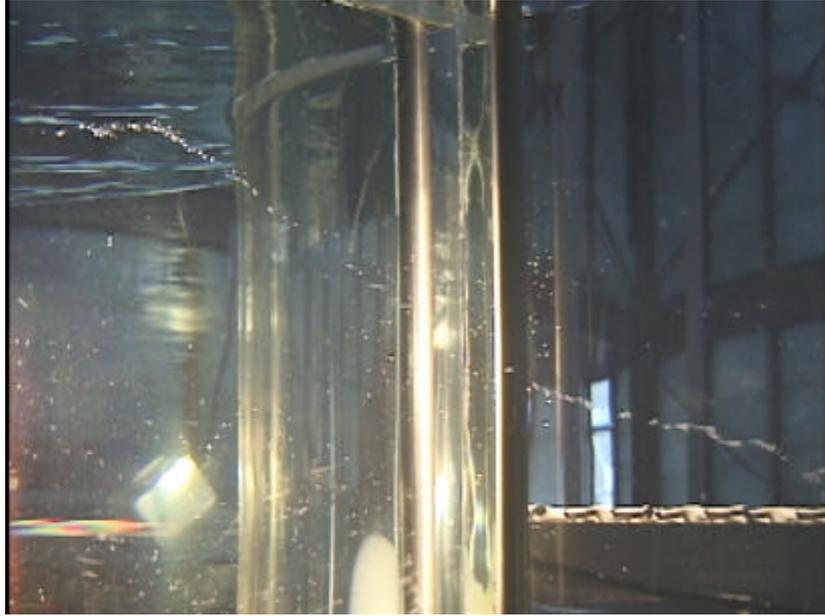


(a) Vortex 생성 (case-1)



(b) Vortex 발전 (case-2)

그림.4 Vortex의 발생과 성장



(a) 공기혼입 초기상태 (case-3)



(b) 공기의 대량 혼입 (case-3)

그림.5 Vortex의 하단부 파단과 공기의 혼입

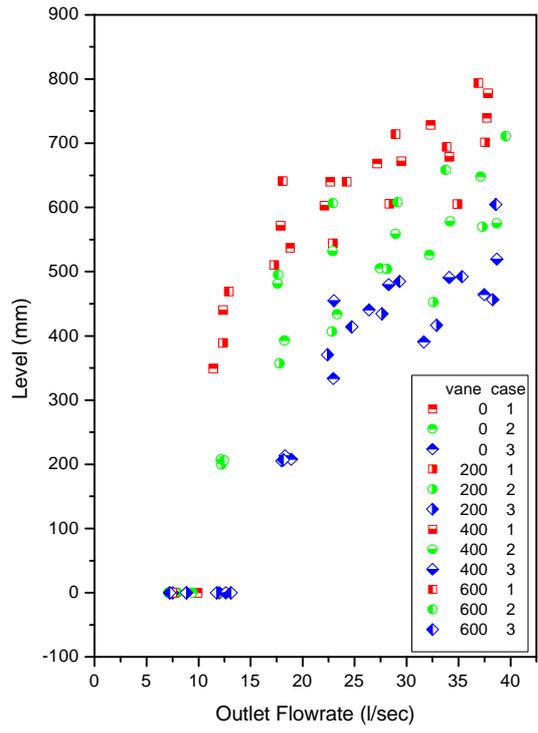


그림.6 각 가스혼입이 일어나는 기준에 따른 유량과 평균수위의 임계조건

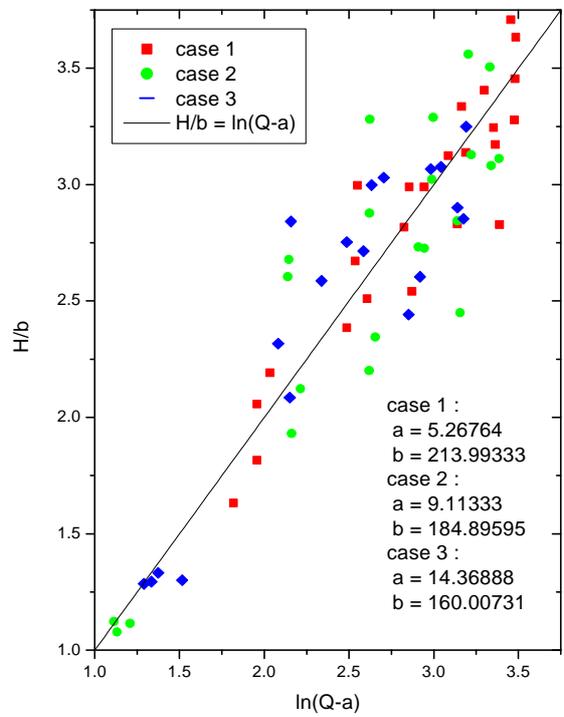


그림.7 가스혼입이 일어나는 임계조건과 관계식 비교