

자유액면에서 액면파의 붕괴에 의해 공기가 혼입되는 임계조건

Critical Conditions for Air Entrainment Inception by Breaking of Surface Waves at the Free Surface

남호윤, 김종만, 최병해, 최종현

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로 노심의 상부에는 냉각재인 소듐의 자유액면이 존재한다. 이 자유액면에서 커버가스가 소듐 속으로 혼입되면 중간열교환기의 성능저하와 노심의 핵반응도에 문제점을 야기시킨다. 이 연구는 자유액면에서 액면파의 붕괴에 의해 커버가스가 물 속으로 혼입되는 조건을 측정하기 위하여 원통의 하부에서 물이 주입되어 자유액면을 형성한 후 측면으로 배출되는 구조를 갖는 실험장치로 실험하였다. 이 실험에서 커버가스가 물 속으로 혼입되는 임계조건을 분석할 수 있는 444개의 실험자료를 측정하였고, 주요 실험인자를 무차원화하여 임계조건을 기술하는 실험식을 개발하였다. 주요인자로는 실험부 직경(D), 주입노즐 직경(d), 자유액면 수위(H) 및 유량(Q) 등으로 이 인자들의 최대 값은 각각 1000mm, 100mm, 1490mm 및 15 l/sec 이었다. 실험식은 D/H , d/H , Froude 수 및 새로이 정의한 Weber 수로 기술되어 있다.

Abstract

In a liquid metal nuclear reactor using the sodium as a 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. An experimental study has been carried out to measure the critical conditions for the inception of air entrainment by breaking of surface wave at the free surface in the water test facility where the water is injected at the bottom of the tank and flows out at the side wall whose level is lower than the level of free surface. The 444 data set are obtained and an experimental correlation with dimensionless parameter for the critical gas entertainment condition is developed. The experimental parameters are the vessel diameter(D), the nozzle size(d), the mean water level(H) and the flow rate, and those maximum values are 1000mm, 100mm, 1490mm and 15 l/sec respectively. The experimental correlation is described by D/H , d/H , Froude number and a new dimensionless parameter We^* , a modified Weber number.

1. 서론

액체급속로 노심의 상부에는 냉각재인 소듐의 자유액면이 존재한다. 노심에서 분출된 소듐은 자유액면에 도달하고, 다시 자유액면보다 낮은 위치에 있는 중간열교환기로 흡입된다. 이때 소듐은 530°C 정도의 온도를 갖고 있으며 이에 반해 커버가스는 300°C 정도의 온도로 유지된다. 자유액면이 존재하므로 인하여 열유체적으로는 두 가지 관점에서 문제가 제기된다. 첫째는 자유액면의 요동으로 인해 인접한 재질에 열피로 현상이 유발시키고, 둘째로는 중간열교환기로 소듐이 흡입될 때 자유액면에서 소용돌이가 발생하여 커버가스가 중간열교환기로 혼입(gas entrainment)될 수도 있다. 커버가스가 중간열교환기로 혼입되면 열교환기의 성능이 저하되고, 또한 노심으로 커버가스가 들어가서 핵반응도에 문제점을 야기시킨다. 이 논문에서는 자유액면의 요동에 의한 가스혼입에 관하여 실험적으로 연구하였다.

Baum과 Cook[1]은 소듐 등 4종류의 유체를 사용하여 측면원통 벽면에 접선방향으로 주입되어 하부로 나가는 구조로 소규모 실험을 수행하였다. 가스혼입이 일어나는 임계높이는 유체의 표면장력의 영향은 미미하고, 단지 주입속도에 비례함을 실험적으로 나타내었다. Takahashi 등[2]은 가스혼입 현상을 3종류 mechanism으로 구분하였다. 첫째 vortex에 의해 접시 모양으로 찌그러진 표면에서의 가스혼입이 일어나는 현상이고, 둘째는 자유액면이 요동할 때 파고가 임계값을 지나면 표면파가 붕괴되면서 가스가 혼입되는 현상이며, 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. 흡입구에 유체가 빨리 들어가는 속도로 인해 vortex가 발생하여 가스가 혼입되는 조건을 측정된 실험[7]에서는 임계조건에서 수위(H)와 유출유량(Q)과의 관계를 나타내면 $H = b \ln(Q - a)$ 로 나타났다. 이 논문에서는 가스혼입 유형 중에서 표면파가 붕괴되면서 가스가 혼입되는 현상을 모의하는 실험을 물을 사용하여 수행하였다.

상온의 물을 사용하여 원통형 실험부의 하부에서 물이 유입되어 자유액면을 형성한 후 4개의 측면으로 유출되는 형태의 실험장치에서 자유액면에서 액면파가 붕괴되면서 가스가 혼입되는 조건을 분석할 수 있는 실험자료 444개를 생산하였다. 이 실험에서 변화시킨 주요인자는 실험부의 직경, 주입노즐의 직경, 노즐에서 자유액면까지의 수위 및 유입하는 유량 등이었다. 이 실험인자들로 공기가 물 속으로 혼입되는 임계조건을 기술하는 실험식을 개발하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

자유액면에서 표면파의 파손에 의해 공기가 물 속으로 혼입되는 조건을 측정하기 위한 실험부는 그림.1에 보이고 있다. 이 실험부는 원통형으로 하부의 주입노즐을 통하여 주입된 물이 상부에 자유액면을 형성한 후 측면의 4곳에서 내경 66mm인 유출구로 배출된다. 유출구는 실험부 바닥에서 1000mm에 위치한다. 주입노즐의 직경은 38mm, 48mm, 58mm, 78mm 및 100mm 다섯 종류를 교체하면서 사용하였다. 하부의 주입노즐의 위치는 상하로 변경할 수 있으나 이 실험에서는 바닥에서 260mm 높이로 고정하여 실험하였고, 노즐의 위치가 실제 하부 바닥이 되게 실험부 직경과 같은 규격인 아크릴로 만든 원판을 설치하였다. 실험부의 직경은 380mm, 480mm, 680mm, 780mm 및 1000mm 다섯 종류를 투명

아크릴로 제작하였다. 각 실험부의 높이는 동일하게 2000mm 이다. 직경 1000mm 실험부는 고정하여 설치하였고, 다른 실험부 들은 하부 바닥에 설치한 동심원 홈에 교대로 삽입하면서 실험하였다.

실험부에 물을 공급하는 실험장치는 그림.2와 같고 구성은 다음과 같다. 저장탱크의 물이 펌프를 통하여 탬퍼로 들어간다. 이 탬퍼는 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 전동밸브를 사용하여 조절한다. 물은 실험부의 하부에서 주입되어 자유액면을 만든 후 측면에 설치된 출구노즐을 통하여 나간다. 실험부를 통과한 물은 수위조절용 밸브를 지나 가스제거기에 자유낙하한 후에 저장탱크로 되돌아간다. 저장탱크에는 가열기와 냉동형인 열교환기가 설치되어 있어 물의 온도는 자동으로 제어된다.

자유액면의 수위의 요동은 주입되는 유체의 유입조건과 출구에서의 유동조건에 전파되어 연동된다. 그러므로 유입유체의 riffle을 최소로 줄이기 위하여 3단 원심형 펌프를 사용하였고, 이 펌프의 출구에 대용량 탬퍼를 설치하여 유동 riffle을 전력원에서 발생하는 노이즈 수준으로 감소시켰다. 실험부의 하류에는 가스제거기를 설치하였다. 하류에 설치한 가스제거기는 두 가지 목적이 있다. 즉, 실험부에서 혼입된 공기를 저장탱크에 들어가기 전에 제거하는 역할과 저장탱크에서의 요동이 실험부로 전파되는 것을 방지하는 역할이다. 가스제거기가 없으면 실험부의 유출유량은 펌프의 하류에 있는 물 공급탱크로 직접 들어가게 된다. 이때 저장탱크에서 자유낙하하면 저장탱크의 액면이 심하게 요동하여 펌프의 주입 유량을 요동시키고 또한 이 탱크에서 공기가 물 속으로 혼입되어 실험부로 다시 들어오게 된다. 이를 방지하기 위하여 실험부에서 방출되는 유출유량을 저장탱크의 자유액면보다 낮은 위치에서 저장탱크로 주입하면 저장탱크에서의 자유액면 요동과 실험부에서의 자유액면 요동이 연동되어 실험부에 영향을 미친다.

2.2 실험방법 및 범위

본 실험에서는 실험부 직경, 주입노즐, 평균수위, 유량 순으로 교체하면서 수행하였다. 즉, 실험부 직경은 5 종류, 주입노즐 5종류, 수위 4 종류 및 유량 4~5 종류를 순차적으로 바꾸면서 측정하였다. 기포가 혼입되는 조건을 결정하는 것은 매우 어려우나 이 실험에서는 실험부 내부의 유동현상을 육안으로 관찰하여 한 두개가 기포가 발생하였다 사라지는 것을 기준으로 정하였다.

주입하는 유량의 범위는 2~15 l/sec 이었다. 다른 실험조건이 설정되면 기포가 발생하는 유량까지 높이고, 이 상태에서 수위가 평형을 이룬 후 측정하였다. 다음은 유량을 조금씩 감소하면서 다시 임의의 유량 조건에서 수위가 평형을 이룬 후 측정하였다. 물의 온도는 가열기와 냉각기로 조절하여 모든 실험에서 $20\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 로 유지시켰다.

본 실험에서 사용한 국소수위계는 물의 전기전도도를 이용하여 수위를 측정하는 센서로 본 실험에서 설계, 제작하여 실험을 수행하였다. 물 속에서 전기저항이 큰 가느다란 $\Phi 0.025\text{mm}$ 정도의 스테인레스 스틸 wire에 전류를 통과시킬 때 물의 수위에 따라 전류가 달라지는 양을 측정하는 것으로 전류는 1kHz AC 전원으로 공급하였다. DC 전원이면 전기적으로는 좋으나 물의 전기분해가 일어나므로 AC 전원을 사용하여야 가능하다. 1개의 wire를 사용한 예비실험에서 감응도가 매우 빠르고, 길이 90mm 정도의 wire를 사용하면 정지된 수위에서는 $\pm 0.2\text{mm}$ 정도의 감응도를 보였다. 자유액면의 평균수위로는 반경방향 위치에 따라 설치한 10개의 국소수위계로 측정하여 위치에 따라 보정한 평균값을 사용하였다. 설정한 평균수위는 주입노즐에서 890mm, 1190mm, 1290mm 및 1590mm 등 4 종류의 위치에 설정하여 측정하였으나 실제로 측정할 때 나타난 수위는 설정한 값의 $\pm 20\text{mm}$ 범위 내에 있었다.

그림.1에는 내경 1000mm인 고정된 실험부 내에 내경 780mm 실험부가 설치되어 있는 모습과 이 실험부에 설치한 10개의 wire 국소수위계와 지지대의 형상을 보이고 있다. 250mm 정도의 wire의 상부는 전기가 잘 통하게 황동봉에 연결하여 각각 양극으로 사용하였으며, wire의 하부는 절연되게 아크릴에 연결한 후 다시 강철로 만든 $\Phi 3\text{mm}$ 봉인 하부지지대에 고정시켰다. 하부 지지대는 음극에 연결하여 공용으로 접지하

었다. 지지대의 측면들은 절연재 피복재로 절연시켰다.

본 실험의 예비분석 결과 액면요동의 최대범위가 $\pm 40\text{mm}$ 이내이기 때문에 센서의 길이 90mm에 대해 보정하였다. 수위가 최소일 때에 5~6 VDC로 Span을 설정하고 최대일 때는 0 VDC가 되게 설정하여, 수위를 12구간 나누어 보정하였다. 각 실험부 즉, 실험부의 직경이 달라지면 wire 지지대가 달라지므로 각 실험부에서 실험을 시작하기 전과 실험 후에 각각 3회씩 센서를 보정하기 위한 실험을 수행하였다. 유량측정에서는 저유량에서 2.5% 정도의 최대오차를 갖고 고유량 범위에서는 1% 정도의 오차를 나타내었다. 국소 수위 측정에서는 최대 $\pm 0.8\text{mm}$ 오차를 보였다. 아크릴로 제작한 실험부 직경의 오차는 제작방법에 따라 많은 차이를 보였다. 내경이 1000mm인 실험부의 직경의 오차는 $\pm 10\text{mm}$ 이고, 이보다 적은 실험부의 직경의 오차는 $\pm 2\text{mm}$ 이었다. 노즐직경의 오차는 $\pm 0.2\text{mm}$, 노즐에서 센서지지대 이송장치까지의 오차는 $\pm 0.5\text{mm}$ 이다.

3. 실험결과 및 검토

실험부 직경, 노즐직경, 평균수위 및 유량에 따라 자유액면에서 기포가 발생하는 지를 분석할 수 있는 실험자료 444개를 획득하였다. 유출구에서 유출에 의해 기포가 혼입[7]하는 현상과는 달리 이 경우에는 자유액면에서 vortex는 발생하지 않았다. 자유액면에서 액면파가 붕괴되면서 발생하는 가스혼입은 다음의 두 가지 경우인 것으로 관찰되었다. 첫 번째는 실험부의 중심에서 파고가 붕괴(disruption)되면서 공기가 물 속으로 들어오는 것이 관찰되었다. 유량이 많을 경우 대부분이 이러한 현상으로 기포가 발생되었다. 다음의 경우는 파고가 벽면에 부딪친 후 붕괴되면서 물 속으로 들어왔다. 두 가지 경우로 볼 때 실험범위 내에서는 어느 것이 더 빨리 일어나는 것인지는 구별하기 어려우나 실험부의 직경이 크고 노즐의 직경이 적을 때는 첫 번째의 현상이 먼저 일어났고, 실험부의 직경이 작고 노즐의 직경이 큰 경우에는 두 번째 경우가 먼저 발생하는 경향이 높았다. 실험에서는 기포가 한 두 개 발생하여 물 속에서 떠돌다 사라지고 다시 발생하는 유량범위까지 측정하였다.

이 기포가 혼입되는 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 방출되었다. 그러나 유량이 증가하면 기포의 많은 양이 유출구로 빠져나갔다. 유량이 높을 경우 출구의 영향에 의한 가스혼입의 경우[7]에는 혼입된 기포가 유체 내에 고루 분포하지 않고 기포가 유선을 그리면서 긴 터널을 형성하여 유출구로 빠져나가는 현상을 관찰할 수 있었으나, 자유액면에서 액면파의 붕괴에 의한 가스혼입에서는 기포가 유체에 골고루 분포하는 것이 관찰되었다.

그림.3은 기포가 발생한 실험조건의 자료를 Reynolds 무차원수로 나타낸 것이다. Reynolds 수는 노즐직경과 노즐에서의 유속으로 계산하였다. 각 실험부에서 이 무차원수보다 적으면 기포가 발생하지 않았다. 이 그림에서 보면 실험부 직경이 가장 작은 ID380mm 실험부에서는 가장 높은 Reynolds수에서 기포가 발생하였으나 실험부 직경이 줄어들면 임계 Reynolds수는 감소하다가 ID680mm에서 최소 임계 Reynolds 수를 보이고 다시 이 직경이 증가할수록 기포가 발생하는 Reynolds 수는 약간씩 증가한다. 그림.4에서는 같은 경향을 Reynolds수 대신 Froude 수, 노즐직경과 평균수위와의 비 및 실험부 직경과 평균수위와의 비의 곱으로 나타낸 것이다. 여기에서는 실험부의 직경이 작을수록 이 무차원이 더 낮은 값에서 기포가 발생하였다. 여러 종류의 무차원수가 기포발생에 미치는 경향들을 분석하여 그림.5와 같이 기포발생의 임계조건을 한 개의 식으로 기술할 수 있는 무차원수를 도출하였다. 이 그림에서 기호 중 'o'는 기포가 혼입되는 것을 의미하며, 'x'는 기포가 혼입되지 않는 것을 의미한다. 이 그림에서 기포가 발생하는 조건은 다음과 같다.

$$W_e^{-1/8} D/H \leq 0.6209 + 0.113 \text{Ln}(F_r^* D/H) \quad (1)$$

여기에서

$$W_e^* \equiv \frac{\rho g D}{\sigma / D} \quad (2)$$

$$F_r^* \equiv \frac{d_n}{H} \frac{v}{\sqrt{\rho H}} \quad (3)$$

여기에서 D 는 실험부의 직경, d_n 은 노즐의 직경, H 는 평균수위, v 는 노즐에서의 속도이다. 물리적 특성으로 ρ 는 밀도, σ 는 표면장력 계수이다. 액면의 파고는 대략 다른 조건이 같으면 용기의 직경에 비례하므로 이를 이용하여 실험을 잘 기술하는 새로운 무차원수 W_e^* 을 정의하였다. 이 무차원수는 파고가 받는 중력과 표면장력의 비를 나타낸다. 여기에서 정의한 새로운 무차원수 F_r^* 는 평균수위와 노즐을 사용하는 Froude 수에 노즐직경과 평균수위의 비를 곱한 형태이다.

4. 결 론

- (1) 기포발생의 임계조건을 기술할 수 있는 실험식을 개발하였다.
- (2) 자유액면에서 액면파가 파괴되면서 발생하는 가스혼입에서는 기포가 유체에 골고루 분포되고, 가스혼입은 실험부의 중심부에서 액면파가 붕되면서 들어오는 경우와 벽면에서 부딪친 후 유입되는 두 가지 경우가 있었다. 그러나 일어나는 순서는 일정하지 않았다.
- (3) 실험부 직경이 가장 작은 ID380mm 실험부에서는 가장 높은 Reynolds수에서 기포가 발생하였으나 실험부 직경이 줄어들면 임계 Reynolds수는 감소하다가 ID680mm에서 최소 임계 Reynolds 수를 보이고 다시 이 직경이 증가할수록 기포가 발생하는 Reynolds 수는 약간씩 증가한다

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 되었다.

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.
7. 남호윤 et al. "자유액면에서 가스혼입이 일어나는 조건 측정," KNS 춘계학술대회, 2002.

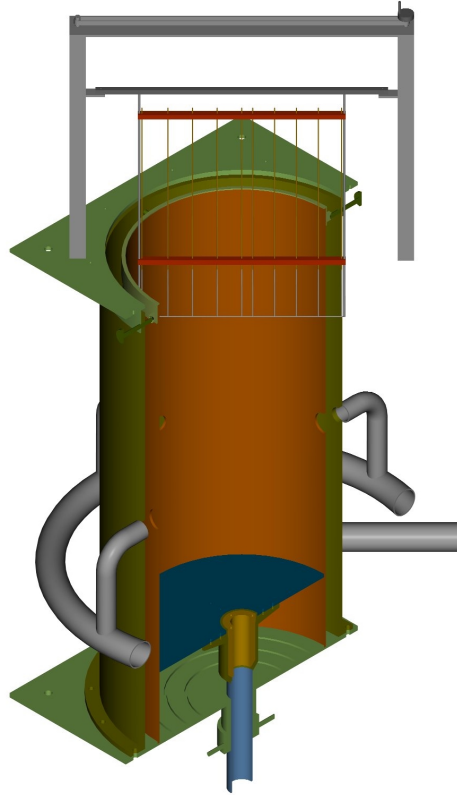


그림.1 자유액면 가스혼입 실험부의 구조

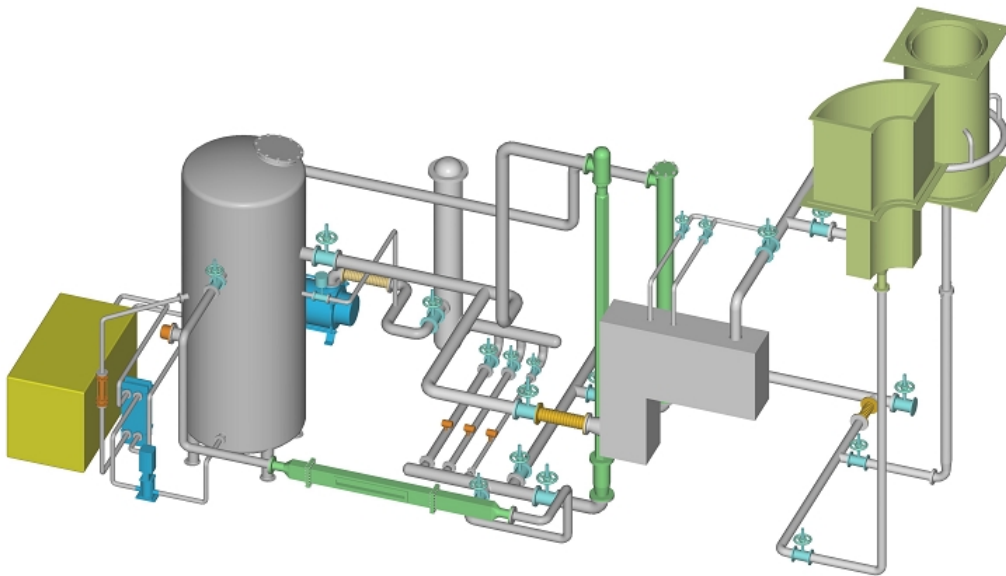


그림.2 액면요동 가스혼입 실험장치 입체도

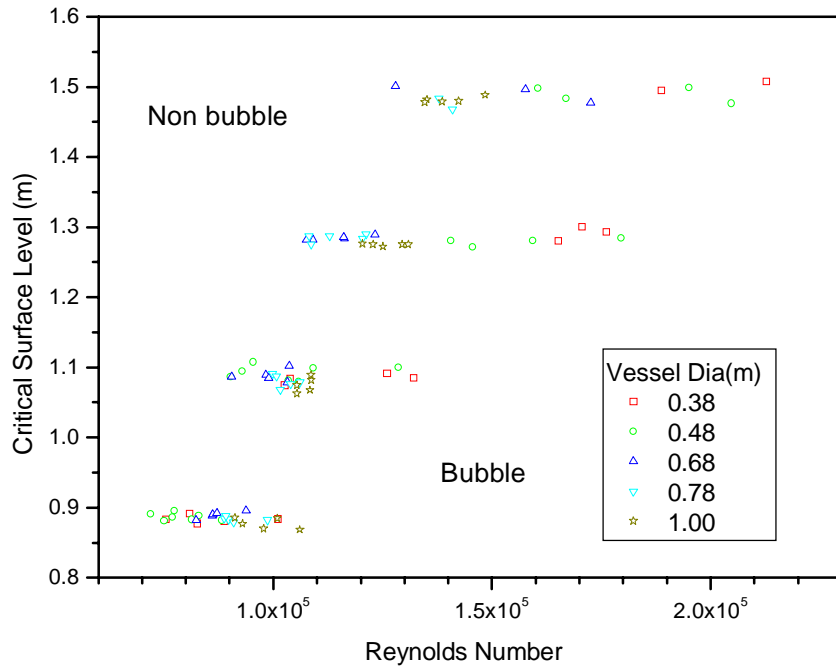


그림.3 Reynolds 수에 따른 기포발생 조건

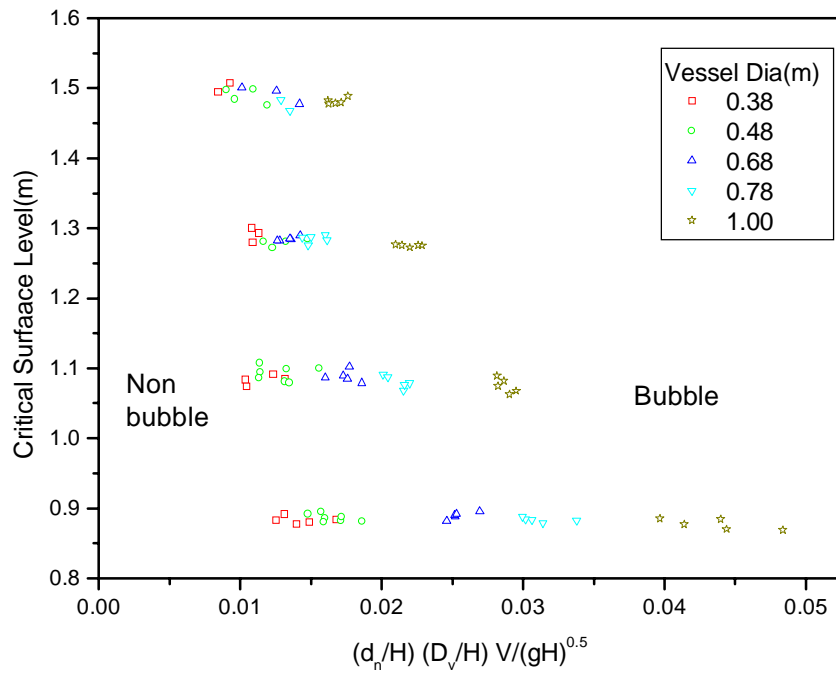


그림.4 특정 무차원수에 따른 기포발생 조건

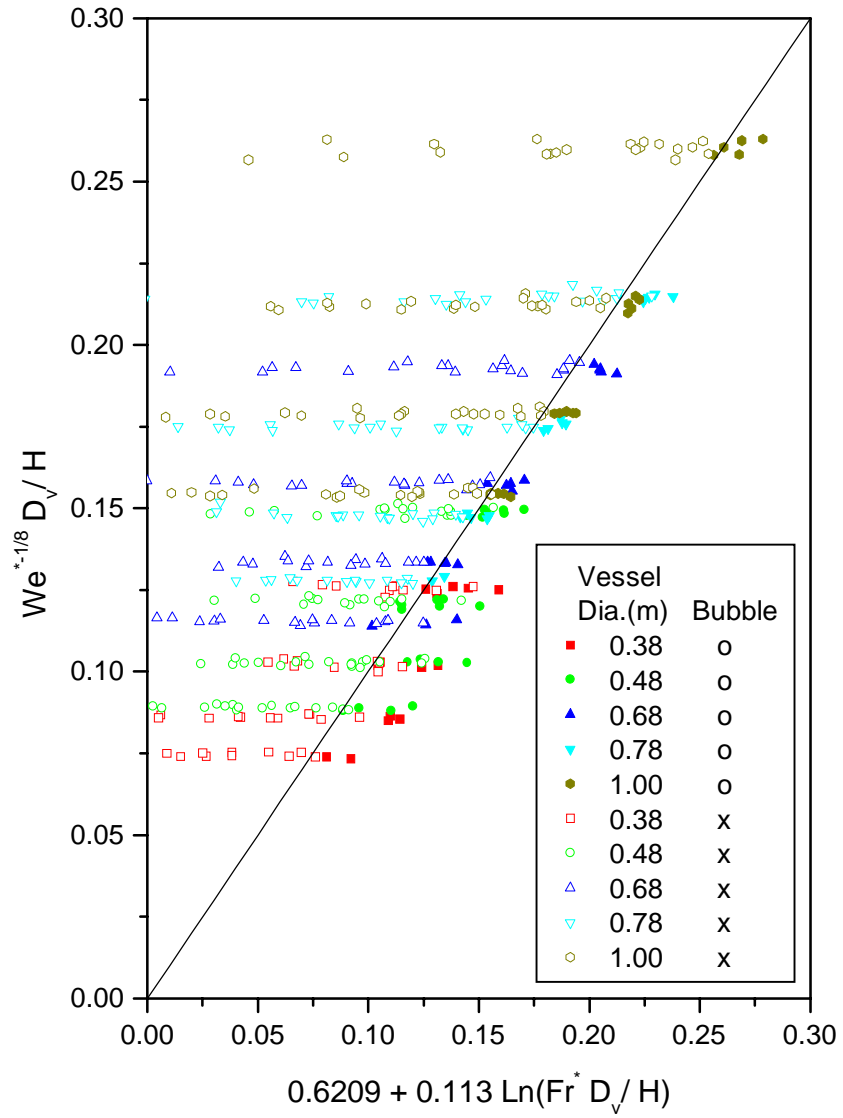


그림.5 자유액면 요동으로 인한 기포발생 임계조건