

경사유로내에서 유동비동에 관한 실험적 연구

이태호, 김문오, 박군철

서울대학교

요 약

비동이 발생하는 경사유로에서 이상유동 구조 파악을 위해 국부적 이상유동 변수의 측정이 이루어졌다. 국부 기포율, 국부 기포빈도, 국부기포속도 그리고 국부 기포크기와 같은 기상 관련 이상유동변수는 이중 전기전도도 탐침으로, 액상속도 분포는 pitot tube로 측정하였다. 유로의 경사도가 이상유동 구조에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험은 수직, 수직으로부터 30도 경사도 및 60도 경사도에서 유량과 열유속을 변화시켜 가며 수행하였으며 유동변수의 측정은 경사진 경우에 측면 방향으로의 대칭성을 고려하여 유로 반 단면내 총 91개 지점에서, 수직인 경우에는 13개 지점에서 이루어졌다. 유동조건은 1.4m/s 이하의 평균 액상 겉보기 속도에 제한되었고 유로내 압력은 대기압이며 유동양식은 미포화 비동에 국한되었다. 측정된 이상유동 변수의 분포를 이용하여 경사유로에 적용할 수 있는 distribution parameter와 drift velocity 같은 drift flux parameter에 대한 상관식이 개발되었다.

1. 서 론

이상유동은 두상간의 상호작용으로 인해 경계면에서의 형상 변화 및 전달현상이 매우 복잡하여 한정된 몇몇 경우를 제외하면 지배방정식을 기반으로 한 순수한 수식만으로 전반적인 이상유동 관련 변수를 정량화하기는 불가능하다. 그러므로 좀더 정확한 해석을 위해서는 이론적 해석과 더불어 많은 실험 연구를 통한 고찰이 병행되어야 한다. 그러나 실험적 이상유동 연구는 현재까지 대부분이 수직관에서 수행되어 왔으며 수평관이나 경사유로에서 수행된 몇몇 실험의^{[1],[2],[3]}경우에도 물/공기 이상유동으로 한정되어 왔다. Spindler^[1]는 원형관내를 흐르는 물/공기 이상유동에 대해 수평에서 수직까지 경사도를 변화시켜 가며 기포율과 기포빈도를 측정하고 기포가 구형이라고 가정하여 기포크기를 측정하였다. 수평관이나 경사유로에서의 유로내 기포 분포 및 각 상들의 속도 분포는 두 상간의 부력차이에 의해 수직관에서와 달리 비대칭 분포를 보이는데 이러한 비대칭 분포 현상은 유동양식의 변화를 초래할 수 있으며 특히 비동이 발생하는 열전달 시스템의 경우에는 열전달 현상에 커다란 영향을 미치게 된다. 따라서 물/공기 이상유동 실험 결과나 수직관에서의 유동비동 실험 결과를 수평관 형태의 CANDU형 원자로, 선박탑재형 원자로와 같은 경사형 원자로의 열전달 시스템이나 집전기의 흡수관(absorber tube)같은 경우에 적용하기에 많은

불확실성이 존재한다. 그러므로 경사유로에서 이상유동의 해석을 위해서는 국부 기포율 및 각 상의 국부 속도 분포등과 같은 국부 유동조건에 측정의 수반되어야 좀더 정확한 이상유동의 열수력학적인 거동분석이 이루어질 수 있다.

2. 경사유로내 이상유동 실험

2.1 실험장치

유동조건 및 유로의 경사도에 따른 이상유동 특성을 실험적으로 관찰하기 위해 냉각수 저장탱크, 열교환기, 펌프, 예열용 전열기, 유량계 및 원형관 중앙에 하나의 전열봉이 삽입된 환형 형태의 주유로등으로 구성된 실험장치가 제작되었다. 실험장치의 계통도를 그림 1에 나타내었다.

2.2 기포율 측정

전기전도도 탐침법은 탐침의 기포 감지부에서 측정된 액상과 기상의 저항의 변화를 전기회로를 이용하여 전압의 신호로 바꾸어 기상과 액상의 통과에 따른 파형의 변화를 연속적으로 얻는 방법이다. 그러나 기포율 및 기포속도를 측정하기 위해서는 이러한 파형을 처리하여 기상과 액상을 구분하여주는 경계를 결정하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 상분리의 기준이 되는 경계의 결정에 Yun et. al^[4]이 수직 유동비등에서 국부 기포율 계산을 위해 개발한 상분리 알고리즘을 적용하였다. 그러나 이러한 알고리즘을 적용하기 위해서는 보조실험을 통해 상분리 기준의 결정에 이용되는 상수(cutoff level)를 결정해 주어야하며 이러한 cutoff level의 결정 및 측정된 기포율의 검증은 위하여 2개의 quick closing valve가 부착된 높이 2,100mm, 내경 23mm의 투명 원형관에서 물/공기 이상유동실험을 수행하였다. Cutoff level은 측정된 국부 기포율로부터 측정단면에 대해 평균된 평균기포율을 산출한 후 이를 quick closing에 의해 측정된 평균기포율과의 비교를 통해 결정하였다. 실험결과 cutoff level은 경사도에 거의 무관하게 0.325-0.35가 적합한 것으로 나타났으며 본 연구에서는 최대 상대 오차 5.6%, 표준 편차 0.7%인 0.35를 cutoff level로 결정하였다.

2.3 기포속도 및 기포크기 측정

국부 기포속도는 전기 전도도 탐침을 유동방향으로 일렬로 배열한 이중 전기전도도 탐침법에 의해 측정하였다. 이때 가장 중요한 인자는 탐침간격이다. 즉 탐침간격이 너무 작을 경우에는 A/D board의 sampling rate가 작으면 기포가 두 탐침 사이를 통과하는 시간측정에 부정확성을 초래할 수 있으며 탐침간격이 너무 크면 front probe를 통과한 기포가 rear probe를 통과할 확률이 줄어들 뿐 아니라 한 기포가 두 탐침 사이를 통과하는 동안 주위의 인접한 기포가 유입될 가능성이 증가된다. 특히 경사진 유로에서 비등이 발생하는 경우에는 이외에도 유로 경사가 기포의 운동에 미치는 영향 그리고 두 탐침 사이의 벽면에서 기포 생성 가능성을 고려하여 탐침 간격이 결정되어야 한다. 본 연구에서는 물/공기 이상유동시 투명원형관에 삽입된 다공성 봉을 통해 생성되는 기포의 거동을 고속 촬영한 결과와 간격이 다른 탐침을 실제 비등 경사로에 적용해 얻은 결과를 토대로 탐침간격을 결정하였다. 실험 결과 탐침간격은 1.5mm가 적합한 것으로 판명되었다. 탐침간격 1.5 mm의 이중 전기전도도 탐침을 이용하여 측정된 기포속도의 검증은 고속촬영에 의해 수행되었으며 이때 최대 상대 오차는 5.66%로 간격이 1.5mm인 탐침은 본 연구에서 기포속도 측정에 적합한 것으로 판단된다. 기포속도와 기포가 탐침을 통과하는 시간의 측정을 통해 chord length라 불리는 탐침과 기포가 교차하는 길이를 계산할 수 있다. 이러한 chord length는 기포크기의 척도로 볼 수 있으므로 본 연구에서는 측정된 기포속도와 각 기포가 탐침을 통과하는 시간의 스펙트럼으로 계산된 chord length의 평균값을 기포 크기

로 간주하였다.

2.4 액상속도 측정

Pitot tube는 과거 여러 연구자들에 의해 이상유동시 국부적 액상속도 측정에 이용되어왔다. 이들은 국부적 액상속도 측정을 위해 측정된 데이터를 기반으로 여러 가지 계산 모델을 제안하였으며 이들 계산 모델을 표1^[5]에 나타내었다. 본 연구에서는 이들 모델중 가장 적합한 액상속도 계산 모델을 선정하기 위해 원형유로에서 물/공기 이상유동 실험을 수행하였다. 유로 단면에서의 액상속도 분포를 표 1에 제시된 모델들에 의해 측정된 후 이를 유동 단면적에 대해 평균한 평균속도와 유로내를 흐르는 물 유량을 실측하여 구한 평균속도를 비교, 검토한 후 이를 바탕으로 계산 모델을 선정하였다. 본 연구에서는 최대 상대오차가 4.8%로 가장 적은 Delhay & Chevrier 모델을 액상속도 계산 모델로 선정하였다.

3. 결과 및 논의

유로내의 유동조건에 따른 에너지 분포에 의해 상분포가 결정되는 수직유로와는 달리 경사유로에서는 유로의 축방향과는 다른 방향으로 작용하는 부력의 영향이 상분포를 결정하는 가장 중요한 인자이다. 그림 2는 원형유로에서의 기포를 분포를 나타내는데 경사도가 증가할수록 상분포의 비대칭 현상이 더 심해짐을 보여준다. 경사유로에서의 기포빈도 분포는 전체적으로 수직유로에서의 기포빈도 분포와 같은 경향을 보였으며 기포크기는 경사도가 증가함에 따라 유로 단면 상단에서 기포의 합체에 의해 그 크기가 커지고 높은 평균 기포율에서는 유동양식의 변화를 관찰할 수 있었다. 이를 그림 3과 4에서 보여주고 있다. 또한 수직유로에서 국부 기포율이 국부 기포빈도에 의해 결정되는 것과는 달리 경사유로에서는 기포크기 분포가 국부 기포율 분포에 커다란 영향을 미치는 것으로 나타났다. 기포 속도 분포는 경사도의 영향보다는 유동조건에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 액상속도는 경사도에 증가에 따라 비대칭적으로 분포하는 기포크기 분포에 큰 영향을 받는 것으로 드러났다. 대표적인 기포율, 기포속도, 기포빈도, 기포 및 액상 속도의 분포를 그림2-6에 나타내었다. Distribution parameter, C_0 는 모든 경사도에서 평균 액상 겉보기 속도($\langle j \rangle$)가 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났으며 유로가 경사진 경우에는 평균 기포율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 발견할 수 있었다. 그러나 수직 유로의 경우에는 전체적으로 평탄한 분포를 보이고 있어 기포율에 대한 의존성이 크게 나타나지 않았으며 주어진 평균 기포율에서 C_0 의 경사도에 대한 의존성 또한 크지 않은 것으로 드러났다. 이러한 관찰을 통하여 본 연구에서는 C_0 를 다음과 같이 상관식화 하였다.

$$C_0 = 0.94 (1 - \langle \alpha \rangle) Re_l^{0.0243} \quad \text{①}$$

$$Re_l = \frac{j_l D_h \rho_l}{\mu_l} \quad \text{②}$$

Drift velocity, $\overline{V_{dr}}$ 의 경우는 $\langle j \rangle$ 이 증가함에 따라 감소하는 경향이 발견되었으며 평균 기포율이 증가함에 따라 증가함을 볼 수 있었다. 또한 $\overline{V_{dr}}$ 의 경사도에 대한 의존성을 어느 정도 관찰할 수 있었으며 이러한 경향을 아래와 같이 상관식화 하였다.

$$V_{gio} = 140 \langle \alpha \rangle Re_T^{-0.239} \left(\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right)^{0.25} (1 - \sqrt{\sin \theta} (1 - \cos \theta)^{5.5}) \quad \text{for } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \overline{V}_{gj} &= V_{gio} & \text{for } \frac{\langle j_l \rangle}{\langle j_g \rangle} &\leq 30 \\ &= -V_{gio} \left(\frac{\langle j_l \rangle}{\langle j_g \rangle} - 30 \right)^{0.575} & \text{for } \frac{\langle j_l \rangle}{\langle j_g \rangle} &> 30 \end{aligned} \quad (4)$$

본 연구에서 산출된 drift flux parameter를 이용하여 계산된 평균 기포율과 실측 평균 기포율의 비교 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 본 연구에서 산출된 drift flux parameter는 평균 상대 오차 6.8%로 실측 평균 기포율을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 사진 촬영을 통해 유동구조의 가시적 파악을 수행하였으며 사진 검토를 통해 유동조건과 경사도가 상분포 및 기포크기 분포에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 그림 8은 고정된 입구유량에서 경사도에 따른 대표적인 기포분포 및 형태를 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 비등이 발생하는 경사유로 내에서 제반 이상유동관련 변수 측정 및 유동구조의 가시적 파악을 통해 경사도와 유동조건의 변화에 따른 이상유동 구조의 변화를 실험적으로 고찰하였으며 비등 경사유로에서의 이상유동 해석을 위해 생산된 실험자료를 기반으로 이상유동 해석 모델의 하나로 널리 이용되고 있는 drift flux model의 주요 변수인 C_0 와 \overline{V}_{gj} 에 대한 상관식을 개발하였다. 그러나 경사유로에서 기포의 운동은 다차원적인 양상을 보이고 비대칭적인 상분포에 의해 유로단면 상단에서 기포의 형태가 구형이 아닌 기 때문에 정확한 기포속도 예측을 위해서는 향후 횡방향으로의 속도 측정이 요망되며 또한 구형이 아닌 기포의 크기를 정량화하는 모델의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Spindler, K., 1994, "Void Fraction Distribution in Two Phase Gas Liquid Flow in Inclined Pipes," Proceedings of the Tenth International Heat Transfer Conference, Brighton, UK, Vol. 6, pp. 265-270.
- [2] Kocamustafaogullari, G. and Huang, W. D., 1994, "Internal Structure and Interfacial Velocity Development for Bubbly Two-Phase Flow," Nuclear Engineering and Design, Vol. 151, pp. 79-101.
- [3] Kocamustafaogullari, G., Huang, W. D. and Razi, J., 1994, "Measurement and Modeling of Average Void Fraction, Bubble Size and Interfacial Area," Nuclear Engineering and Design, Vol. 148, pp. 437-453.
- [4] Park, G. C., Yun, B. J., Kang, K. H. and Oh, S. M., 1995, "Experimental Determination of Drift-Flux Parameters in Co-Current Steam-Water Two Phase Flow," KAERI Report, KAERI/CM-045/94.
- [5] Reimann, J., Kusterer, H. and Jhon, H., 1983, "Two Phase Mass Flow Rate Measurements with Pitot Tube and Density Measurements," Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flows, Symposium, Nancy, France, July 5-8.

Adoni (1961)	$v_i = \sqrt{(1-\sigma^2)} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho L}}$
Neal & Bankoff (1965)	$v_i = \sqrt{2(1-\sigma)} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho L}}$
Malnes(1966)	$v_i = \sqrt{(1-\sigma)} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho L}}$
Walmet & Staub (1969)	$v_i = \sqrt{(1-\sigma)(1+a/2)} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho L}}$
Delbey & Chevrier (1969)	$v_i = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho L}}$
Bosio & Malnes (1969)	$v_i = \sqrt{(1-\sigma/2)} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho L}}$

표 1 Pitot tube를 이용한 예상속도 계산 모델

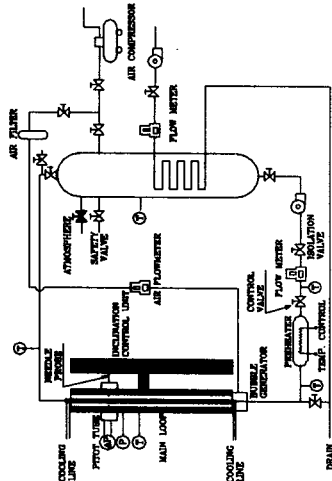


그림 1 실험장치 계통도

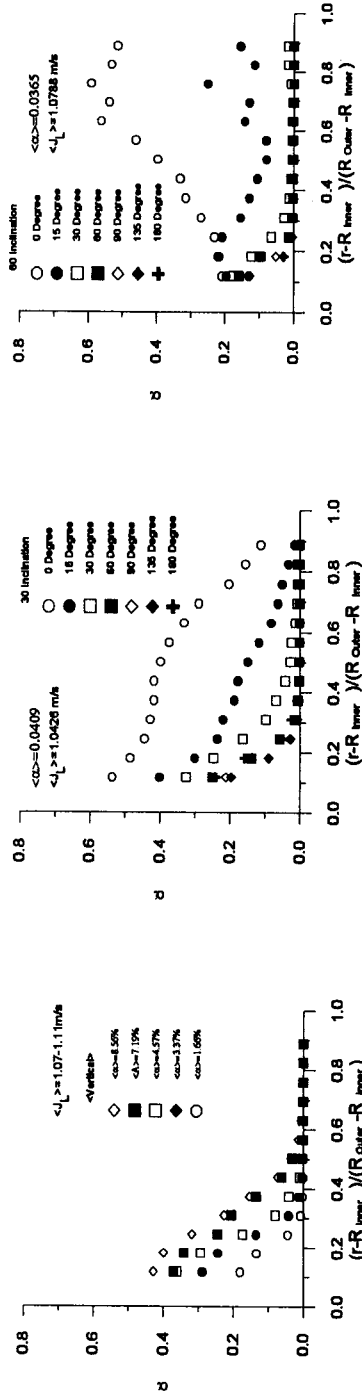


그림 2 기포용 분포

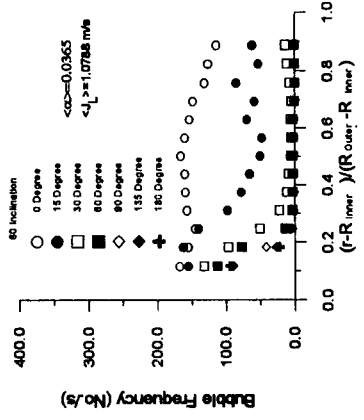
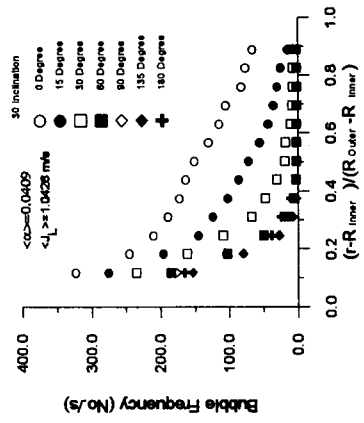
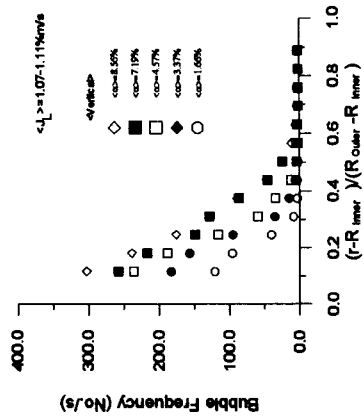


그림 3 기포 빈도 분포

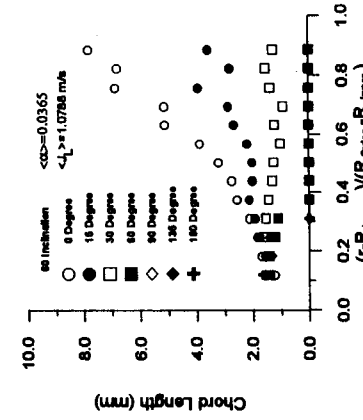
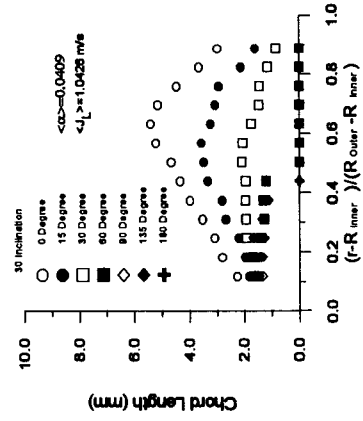
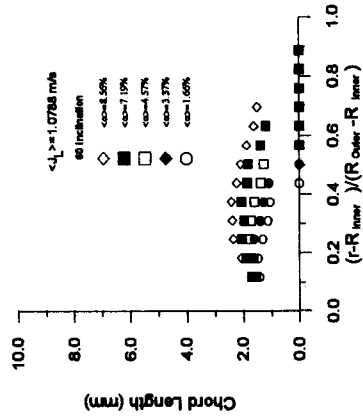


그림 4 기포 크기 분포

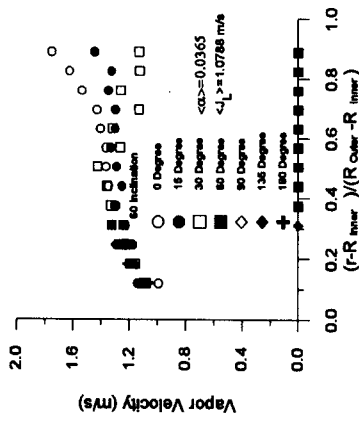
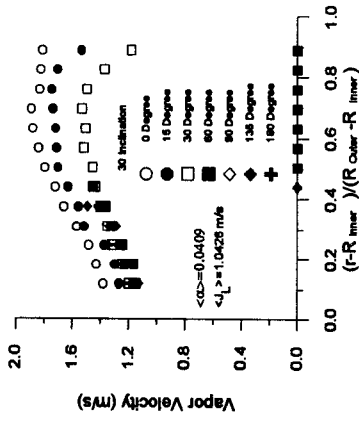
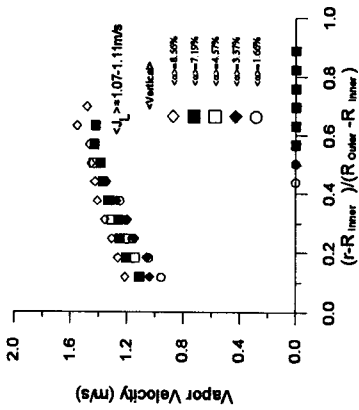


그림 5 기포 속도 분포

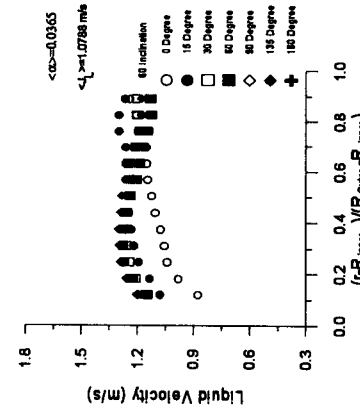
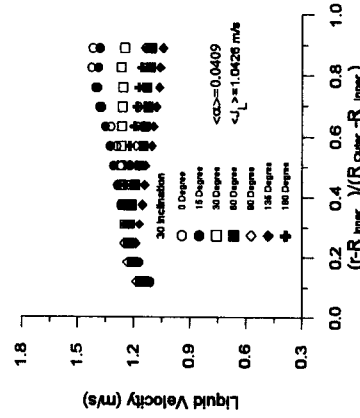
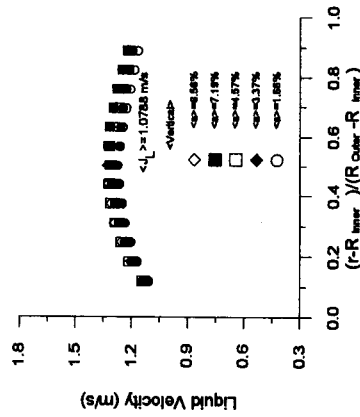


그림 6 액상 속도 분포

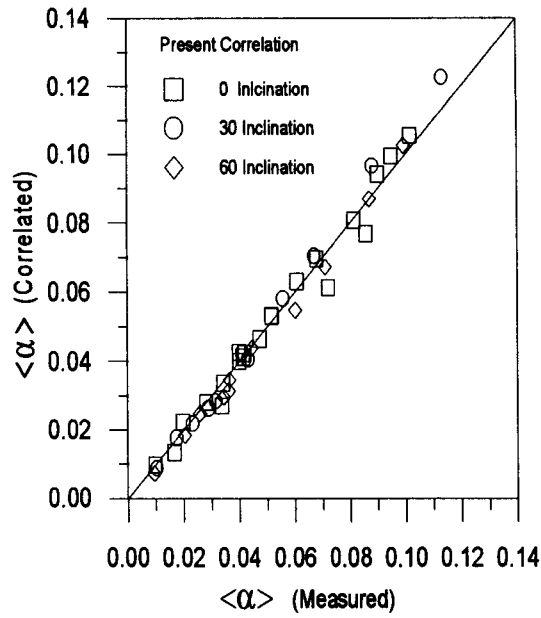


그림 7 실측 평균 기포율과 계산된 평균 기포율의 비교



$\langle \alpha \rangle \approx 8\%$
수직

$\langle \alpha \rangle \approx 8\%$
30° 경사

$\langle \alpha \rangle \approx 7\%$
60° 경사

그림 8. 사진 촬영에 의한 상분포 : $\langle J_L \rangle \approx 1.05 \text{ m/s}$