

3-ring 임피던스미터를 이용한 슬러그류 및 기포류의 기공률 측정

김종록* · 안예찬** · 김무환***†

* 포항공과대학교 기계공학과, ** 부경대학교 의공학과, *** 포항공과대학교 첨단원자력공학부

Measurement of the Void Fraction of Slug and Bubbly Flows Using Three-Ring Impedance Meters

Jongrok Kim*, Yeh-Chan Ahn** and Moo Hwan Kim***†

* Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH,

** Dept. of Biomedical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

*** Division of Advanced of Nuclear Engineering, POSTECH

(Received August 17, 2011 ; Revised October 14, 2011 ; Accepted October 18, 2011)

Key Words: 2-Phase Flow(2상유동), Void Fraction(기공률), Impedance Meter(임피던스미터), Slug Flow(슬러그류), Bubbly Flow(기포류)

초록: 관내 2상 유동의 기공률을 효과적으로 측정할 수 있는 3-ring 임피던스미터를 이용하여 실제 슬러그류 및 기포류를 측정하였다. 먼저, 임피던스미터의 신호와 기공률 사이의 보정곡선을 구하였다. 임피던스미터는 동일한 기공률을 갖는 슬러그류와 기포류에 대해 각각 다른 보정곡선을 나타내는 특성을 보였다. 임피던스미터는 유동패턴에 따라 두 보정 곡선 중 하나를 선택해야 하며, 기공률 측정 결과로부터 유동 패턴을 판단할 수 있었다. 두 개의 임피던스미터를 통해 측정된 기공률 변화 곡선으로부터 기포의 이동 속도, 크기를 효과적으로 측정할 수 있었다.

Abstract: Real slug and bubbly flows were measured using a three-ring impedance meter that can efficiently measure the void fraction of two-phase flows in a tube. First, the fitting curves between the signal from the impedance meters and the void fraction were found. The impedance meter had different fitting curves for slug and bubbly flows that had the same void fraction. An impedance meter should choose one of the two fitting curves according to the flow pattern, and the flow patterns can be recognized using the measured void fraction. The velocities and sizes of the bubbles were calculated using the void fraction curves measured by two impedance meters.

- 기호설명 -

- E : 유클리디안 거리(euclidean distance)
- t : 시간(s)
- α : 기공률

1. 서론

기체와 액체가 동시에 흐르는 2상유동 현상은 전자기 발전, 원자력 발전, 철강 산업 등 유체 시스템에 자주 나타나는 현상으로, 2상유동의 특성을 파악하는 것은 유체 시스템의 안정성 확보 및 성능 향

상을 위해 필수 조건이다. 2상유동 특성 중 기공률은 압력강하와 열전달 성능을 결정하는 주요 인자로서 이를 측정·제어하는 기술은 시스템 운전에 있어서 중요한 요소이다. 기공률을 측정하기 위한 기술에는 급폐법(quick-closing method), 방사선감쇠법(radiation attenuation method), 초음파법(ultrasonic method), 임피던스법(impedance method) 등이 있다. 급폐법은 측정하고자 하는 유동을 측정용 챔버(Chamber) 등에 모아 부피나 질량을 측정하여 기공률을 산정하는 방법으로, 이 방법은 측정하는 동안 관내 유동을 측정용 챔버에 흘려야 하기 때문에 연속적으로 작동하는 시스템에 적용할 수 없으며, 시간 평균된 기공률이 측정되기 때문에 슬러그류와 같이 기공률이 변하는 유동에서는 적용할 수 없다.

† Corresponding Author, mhkim@postech.ac.kr

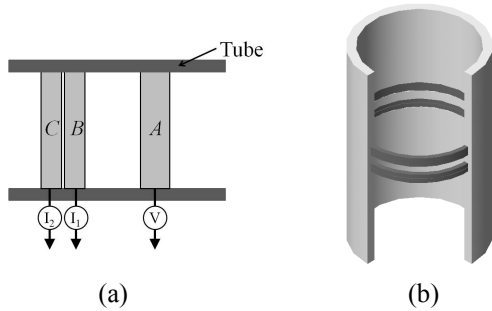


Fig. 1 Scheme of 3-ring-type conductance meter

방사선 감쇠법은 중성자나 X-ray 등을 측정하고자 하는 부분에 방사시키고 투과된 방사선을 반대쪽에서 측정하여 기공률을 산정하는 방법이다. 방사선 감쇠법은 방사선을 생성하기 위한 부대장치와 이를 설치하기 위한 많은 공간이 필요하기 때문에 공간적으로 복잡한 산업현장에서 쓰기에는 적합하지 않다. 초음파법은 관 외벽에 초음파원과 초음파센서를 부착하고, 초음파원에서 발생한 초음파가 관을 통과하는 동안 반사되는 신호를 측정하여 기공률을 산정하는 방법이다. 초음파법은 관의 절단 등과 같은 시스템의 수정 없이 기공률을 측정할 수 있는 장점이 있지만, 기포류와 같이 기-액 경계면이 복잡한 유동에 적용할 수 없는 단점이 있다. 임피던스법은 2상유동에서 유동의 임피던스를 측정하여 기공률을 산정하는 방법이다. 이 방법은 전기적 특성을 이용하기 때문에 반응속도가 빨라 실시간 측정이 가능하며, 유동관 벽에 전극을 설치할 경우 유동 교란없이 측정할 수 있는 장점이 있다. 임피던스법은 유체 온도 등의 조건에 따라 전기전도도가 변화하는 경우 측정값이 달라지는 단점이 있으나 3개의 전극을 이용한 임피던스미터를 적용하게 되면 이 단점을 극복할 수 있다.

3개의 ring형 전극을 이용하는 3-ring 임피던스미터는 Fig. 1과 같이 전압 인가용 전극(A)과 전류 측정용 전극(B, C)으로 구성된다. B, C 전극은 매우 얇은 절연막을 이용하여 전기적으로 절연된다. B, C 전극을 통하여 각각 전류 I_1 과 I_2 가 측정되며, 두 전류(I_1, I_2)의 비는 관내 기공률에 따라 변하고 온도에는 영향을 받지 않는다. 전류의 비가 온도의 영향을 받지 않는 이유는 전극 A-B, A-C 사이에는 동일한 전압이 인가되므로, 옴의 법칙에 따라 전류의 비는 곧 A-B와 A-C의 전기저항비의 역수가 되어 전기전도율의 변화에 의한 영향이 상쇄되기 때문이다. 자세히 설명하면, A-B

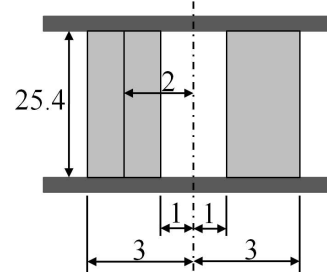


Fig. 2 Scheme of conductance meter(unit:mm)

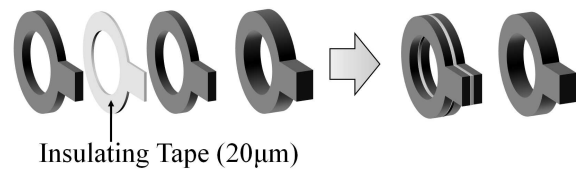


Fig. 3 A set of conductance meter

와 A-C의 각 저항은 전류가 흐르는 경로와 전류가 흐르는 물질(물)의 전기전도율에 의해 결정된다. 온도가 변화에 의해 물의 전기전도율이 변하지만, A-B와 A-C의 전기전도율이 함께 변하므로 저항비에서 전기전도율의 변화가 상쇄되어 온도에 영향을 받지 않게 되는 것이다.

임피던스법과 관련하여 Coney⁽¹⁾는 2개의 평판형 전극을 적용한 임피던스미터의 기초 이론을 발전시키고 실험적으로 검증하였다. 또한, 원형관에 적용할 수 있는 ring 임피던스미터의 이론을 발전시켰다. 2개의 전극을 적용한 임피던스미터의 경우, 온도에 따라 변하는 액체의 전기전도도의 영향을 받기 때문에 이를 피할 수 있는 3개의 전극을 이용한 임피던스미터를 제안하고 이론해를 구하였다. Asali 등⁽²⁾은 처음으로 2-ring 임피던스미터를 적용하여, 수직관내 환상류를 측정하였다. Andreussi 등⁽³⁾은 수평관을 흐르는 환상류, 성층류, 기포류에서 2-ring 임피던스미터를 적용하여, 전극 사이의 간격이 신호에 미치는 영향을 실험적으로 확인하였다. Tshochatzidis 등⁽⁴⁾은 전극 간격이 2-ring 임피던스미터에 미치는 영향을 이론치와 실험결과의 비교를 통해 분석하였고, 전극 간격에 관계없이 이론치와 실험결과가 잘 일치함을 보였다. 그리고 성층류에서 액막의 불균일성이 임피던스미터의 신호에 미치는 영향을 실험적으로 보였다. Fossa⁽⁵⁾는 환상류와 기포류에서 전극 간격과 직경이 2-ring 임피던스미터에 미치는 영향을 실험적으로 측정하고, Coney⁽¹⁾의 이론

치와 실험결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다. Kim 등⁽⁶⁾은 Coney⁽¹⁾에 의해 제안된 3-ring 임피던스미터를 실험적으로 검증하였다.

본 연구에서는 3-ring 임피던스 미터의 유동 패턴에 따른 신호 특성을 실험적으로 분석하였다. 이를 위해 대표적인 2상유동인 슬러그류와 기포류의 기공률-신호 관계를 측정하고 유동 패턴에 따른 측정 신호를 비교하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치

2.1.1 측정부

Kim 등⁽⁶⁾의 결과를 바탕으로 측정부는 Fig. 2와 같이 설계되었다. Fig. 3은 SUS316으로 제작된 전극의 개략도이다. 내경은 1 inch (25.4mm)이고 신호선 연결부를 포함시켰다. 3-ring 임피던스미터 이론은 전류 측정용 두 전극이 간격 없이 절연된다고 가정하지만 현실적으로 구현하는 것은 불가능하다. 그래서 본 실험에서는 20 μ m 두께의 절연 테이프를 사용하여 Fig. 3과 같이 두 전극을 절연시켰다. 전압 인가용 전극과 전류 측정용 전극 사이에 두께 2mm의 아크릴(acryl) 링을 삽입하였다. 제작된 임피던스미터는 직경 1 inch의 아크릴 관에 조립되었고, 기포의 이동 속도를 측정하기 위해서 두 개의 임피던스미터가 25mm의 간격을 갖도록 설치되었다. 전극의 부식을 방지하기 위하여 아크릴 관과 플랜지 사이에 알루미늄 링을 삽입하였다. 3-ring 임피던스미터의 신호를 분석하기 위하여 Fig. 4와 같이 전기회로를 구성하여 테스트부의 전극과 연결하였다.

2.1.2 기포발생기

실제 슬러그류 및 기포류를 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 기포 발생기를 설계하였다. 관 내부는 물로 채워지고, 원형관 하단부에 설치된 노즐부를 통해 압축공기가 주입되어 기포를 발생시킨다. 유동의 충분한 발달을 위해 노즐부에서 측정부까지 45 inch의 거리를 두었다.

2.2 기공률과 출력 신호의 관계

기공률과 3-ring 임피던스미터 신호의 관계를 파악하고, 이후 실제 슬러그류 및 기포류 측정실

험에서 기공률을 계산하기 위한 보정곡선을 구하였다. 슬러그류는 기포 전단부와 후단부를 제외하면 환상류와 동일한 유동패턴을 갖고 있으므로, 유체의 액막 두께가 일정한 환상류를 모사한 모사기포를 이용하여 기공률과 신호사이의 관계를 측정하였다. Fig. 6은 실험에 사용된 모사기포의 사진이다. 모사기포는 아크릴로 제작하고, 모사기포는 실험부와 동축상에 고정할 수 있도록 지지부가 있고, 그 아래는 각각 다른 기공률을 갖도록 하였다.

기포류는 기포 발생기의 노즐부를 통해 주입되는 공기의 양을 통해 기공률을 조절하였고, 측정부 상하단에 연결된 차압계를 통해 측정부를 통과하는 기포류의 기준 기공률을 계산하였다. 기

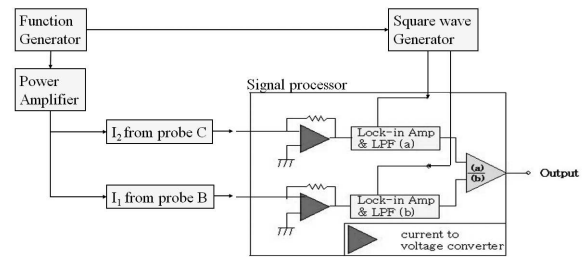


Fig. 4 Scheme of electric circuit for conductance meters

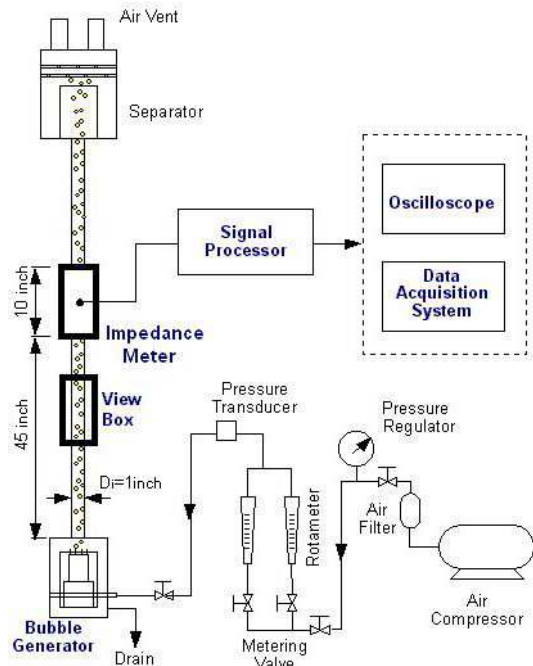


Fig. 5 Bubble generation system

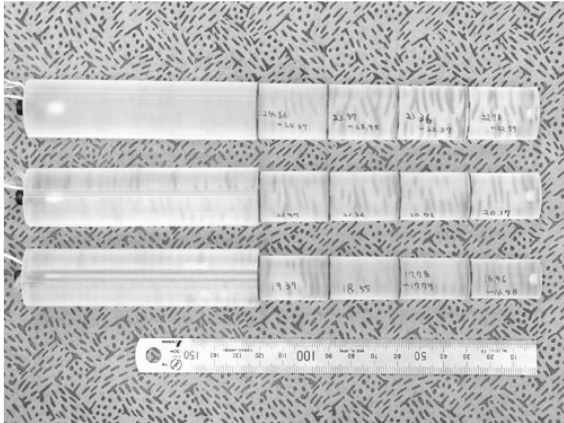


Fig. 6 Cylinder rod for calibration

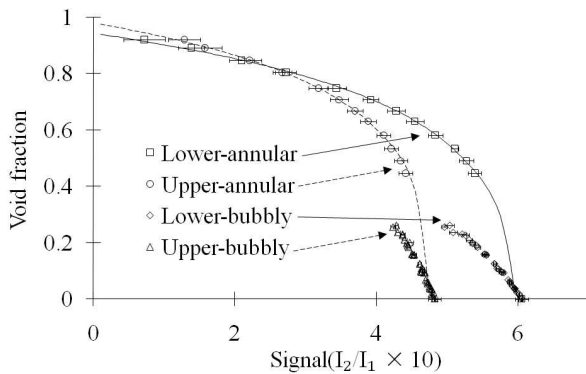


Fig. 7 Fitting curves for annular and bubbly flow for impedance meters (Upper and Lower)

포류의 경우, 기공률 0.3이상에서 슬러그류로 천이되어 기포류의 형태에서 벗어나므로 기공률 0.3 이하 영역에서 측정하였다.

Fig. 7은 설치된 두 측정부에서 출력된 신호(전류의 비)와 기준 기공률과의 관계를 나타낸 그래프이다. 동일 기공률에서 각각의 임피던스미터가 다른 신호를 나타내는 것은 제작과정에 있어서 전극의 간격이 일치하지 않아 나타나는 현상으로 보이며, 미세한 간격 차이로 인해 신호가 다르게 출력되므로 3-ring 임피던스 미터는 각각 고유의 보정곡선이 필요함을 알 수 있다.

동일 기공률의 환상류와 기포류 실험에서 임피던스미터는 서로 다른 출력 신호를 나타냈다. 이는 동일한 기공률이라도, 환상류는 유동 가운데가 비어있고 관벽을 따라 액상이 분포하는 반면 기포류는 작은 기포가 단면에 대해 균일하게 분포되어 있는 유동 구조의 차이 때문이다. 따라서 실제 유동 계측에 적용될 경우 하나의 임피던스미터는 환상류와 기포류를 위한 두 개의 보정곡

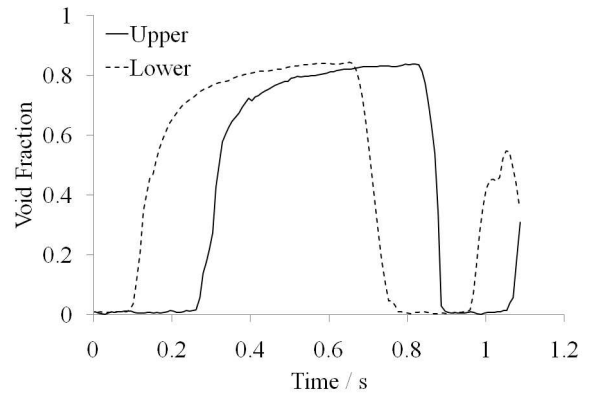


Fig. 8 Void fraction of slug flow

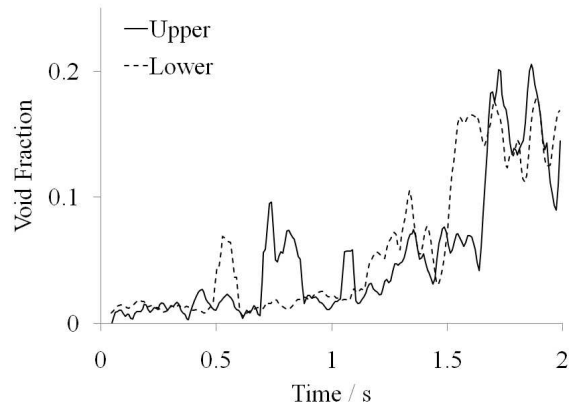


Fig. 9 Void fraction of bubbly flow

선을 필요로 하며, 측정되는 신호패턴을 통해 환상류(슬러그류)인지 기포류인지 판단하고 적절한 보정곡선을 선택하는 과정이 필요하다.

2.3 실제 슬러그류와 기포류의 측정

Fig. 5의 기포 발생기를 이용하여 슬러그류와 기포류를 각각 발생시켜 측정 실험을 수행하였다. 고속카메라를 이용해 기포가 상승하는 장면을 촬영하고, 촬영된 이미지를 통해 기준 속도와 기포 크기를 계산하였다. 임피던스미터를 이용하여 측정된 기공률을 Fig. 8 (슬러그류), Fig. 9 (기포류)에 나타냈다. 측정 초기 기공률 변화를 통해 각 유동 패턴을 구분할 수 있었는데, 슬러그류의 경우 기공률이 급격히 상승하는 반면 기포류는 상대적으로 천천히 상승하는 특성을 보였다. 또한 기포류의 경우 정상상태에서도 기공률이 Fig. 10과 같이 지속적으로 흔들리는 특성을 보였다. 이 흔들림은 기포류의 작은 기포들이 균일하게 흐르지 않고 상하좌우로 흔들리면서 흐르는 특성

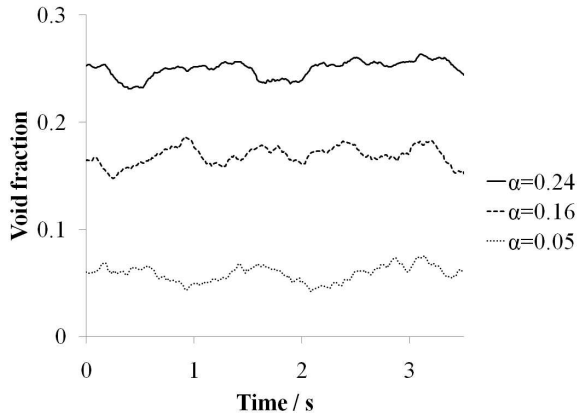


Fig. 10 Void fraction of steady bubbly flow

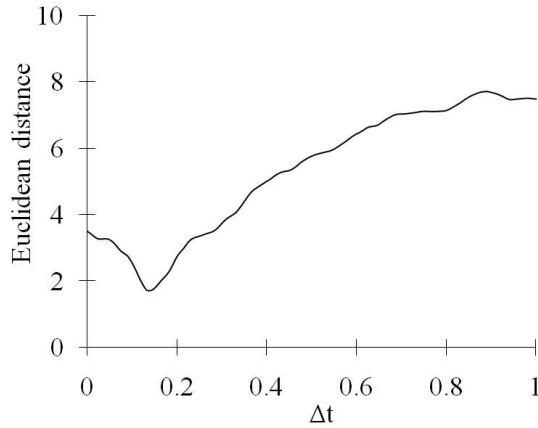


Fig. 11 Euclidean distance between void fractions of bubbly flow

에 기인한다. 이 특성들은 앞서 언급했던 환상류(슬러그류)와 기포류 보정곡선의 선택 기준이 될 수 있다.

측정된 그래프로부터 기포의 속도 및 길이를 계산하였다. 슬러그류의 경우, 두 임피던스미터의 거리 25mm를 두 임피던스미터 신호의 시간 차이 0.134초로 나누면 기포 속도가 186.3mm/s로 계산된다. 고속카메라로 촬영한 기포 속도 182.4mm/s에 대해 약 2%의 오차를 갖는 결과이다. 계산된 속도와 슬러그 기포가 임피던스미터를 지나가는데 소요된 시간을 곱하면 기포의 길이를 계산할 수 있는데, 계산된 기포의 길이는 95mm로 촬영 이미지로부터 계산한 105mm에 대해 약 10%의 오차를 보였다. 기포류의 경우, 기포들이 수직상승하지 않고 좌우로 흔들리면서 상승하여 두 임피던스미터 신호가 정확하게 일치하지 않는 특성을 보였다. 그래서 두 신호 사이의 시간차를 구하는 방법으로 유클리디안 거리

법(euclidean distance method)을 적용하였다. 유클리디안 거리법은 식 (1)과 같이 계산되며,

$$E = \sum_{t=0}^t \sqrt{(\alpha_1(t) - \alpha_2(t + \Delta t))^2} \quad (1)$$

여기에서 E는 euclidean distance, α_1 와 α_2 는 각각 임피던스미터의 기공률이다. Fig. 11에 시간차 Δt 에 따른 유클리디안 거리를 나타냈다. 두 임피던스미터 신호의 시간차이는 유클리디안 거리가 가장 낮은 값을 갖는 Δt 로 얻었고, 이를 바탕으로 계산된 기포류의 속도는 215.5mm/s, 고속카메라를 통해 측정된 속도는 292.8mm/s였고, 오차는 약 26%였다. 기포류의 경우 구조적으로 복잡하고 기포가 지속적으로 흔들리는 현상으로 인해 상대적으로 정확도가 낮은 특성을 보였다.

3. 결론

본 연구에서는 두 개의 3-ring 임피던스미터를 이용해 원형관내 슬러그류와 기포류의 기공률을 실험적으로 측정하고, 이를 바탕으로 기포의 속도 및 길이를 계산하였다.

동일한 기공률의 슬러그류와 기포류에 대해 3-ring 임피던스미터는 각각 다른 신호값을 보였다. 이는 슬러그류는 가운데가 비어 있고 관벽을 따라 유체가 있는 반면, 기포류는 작은 기포가 관 단면에 대해 균일하게 분포하는 구조적 특성 차이로 나타나는 현상이다. 실제 슬러그류 및 기포류를 측정된 결과, 슬러그류의 경우 기공률이 급격히 상승하지만 기포류의 경우 기공률이 상대적으로 서서히 상승하고 정상상태에서 기공률이 지속적으로 흔들리는 특성을 보였다. 기공률 변화 특성을 통해 관내의 이상유동의 패턴이 슬러그류인지 기포류인지 판단할 수 있었다.

실제 슬러그류에서 기포의 속도, 길이를 측정된 결과 각각 2%, 10%의 오차를 보였다. 기포류의 경우, 약 26%의 오차로 기포의 속도를 측정하였다. 기포류가 상대적으로 큰 오차를 갖는 이유는 작은 기포들이 상승하면서 흔들리는 현상으로 인해 두 임피던스의 신호가 정확하기 일치하지 않기 때문이다.

후기

이 논문은 2011년도 한국연구재단을 통해 교육

과학기술부의 세계수준의 연구중심대학육성사업 (WCU) (R31 - 30005)으로부터 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Coney, M.W.E., 1973, "The Theory and Application of Conductance Probes for the Measurement of Liquid Film Thickness in Two Phase Flow," *J. Phys. E: Scient. Instrum.* 6, pp. 903~910.
- (2) Asali, J.C., Hanratty, T.J. and Andreussi, P., 1985, "Interfacial Drag and Film Height for Vertical Annular Flow," *AIChE J.* 31, pp. 895~902.
- (3) Andreussi, P., Di Donfrancesco, A. and Messia, M., 1988, "An Impedance Method for the Measurement of Liquid Hold-up in Two Phase Flow," *Int. J. Multiphase Flow* 14, pp. 777~785.
- (4) Tsochatzidis, N.A., Karapantios, T.D., Kostoglou, M.V. and Karabelas, A.J., 1992, "A Conductance Method for Measuring Liquid Fraction in Pipes and Packed Beds," *Int. J. Multiphase Flow* 5, pp. 653~667.
- (5) Fossa, M., 1998, "Design and Performance of a Conductance Probe for Measuring the Liquid Fraction in Two-Phase Gas-Liquid Flows," *Flow Measurement and Instrumentation* 9, pp. 103~109.
- (6) Kim, J. Ahn Y.-C., Kim M.H., "Measurement of Void Fraction and Bubble Speed of Slug Flow with Three-Ring Conductance Probes," *Flow Measurement and Instrumentation* 20, pp. 103~109.