

비선형 위상공간에서의 기포 분율 신호의 끌개밀도분석을 이용한 수직 상향 이상유동의 유동패턴분류

김 남 석* · 이 재 영†

(2004 년 5 월 10 일 접수, 2004 년 9 월 8 일 심사완료)

Flow Pattern Identification of Vertical Upward Two-Phase Flow Using the Attractor-Density-Map Analysis of the Void Fraction Signal in the Nonlinear Phase Space

Nam Seok Kim and Jae Young Lee

Key Words : Two-Phase Flow (이상유동), Nonlinear Analysis (비선형 분석), Flow Identification (유동패턴분류), Impedance Signal (임피던스신호), Void Fraction (기포분율)

Abstract

The nonlinear signals from an impedance meter for the area average void fraction in two-phase flow have been analyzed to construct a phase space trajectory. The pseudo phase space was constructed with the time delay and proper dimensions. The time delay and the embedding dimension were chosen by the average mutual information and by the false nearest neighborhood, respectively. The attractor-density-map of projected states was used to produce the two dimensional probability distribution functions (2D-PDF). Since the developed 2D-PDF showed clear distinction of the flow patterns, the flow regime identification was made with three rules and with the 2D-PDF. Also, the transition criteria of Mishima-Ishii agree well with the present results.

기호설명

- J : 겉보기속도
- τ : 지연시간
- d : 매립차원
- G : 임피던스
- U : 전위
- σ : 전기 전도율
- V : 전위차이
- n : 관벽면의 수직방향
- l : 곡면좌표계
- l_e : 유체와 닿아있는 전극표면의 길이

하첨자

- f : 액체
- g : 기체

1. 서론

이상유동은 원자력 발전소나 화학 플랜트 등의 대형 시설에서부터 마이크로 유체기계와 같은 정밀한 규모의 장치에까지 넓게 적용되고 있다. 기체와 액체를 동시에 흐르게 할 경우, 그 유관의 직경과 방향, 그리고 기체 액체 유량에 따라 다양한 형태의 유동패턴이 나타난다. 이러한 유동 패턴에 따라 이상유동의 경계면 전달항의 규모가 달라져서, 이의 모델과 함께 유동패턴의 분류는 매우 중요한 연구주제로 많은 연구가 이루어져왔다.⁽¹⁻²⁾ 이러한 유동패턴은 기체의 기하학적 형태에 따라 구분되어 왔는데, 이는 기포 분율 신호와 직접 연관되어 있다. 과거의 육안관측의 임의성과 주관성을 제거하고 객관적 판정을 위해, 센서로부터의 신호특성을 이용하는 방법이 최근 표준적 방법으로 자리잡고 있고, 이는 주로 기포분율(void fraction)의 신호를 활용한다. 본 연구에서는 기포 분율의 시간 신호로서 유관 단면적의 임피던스 신호를 사용하고, 이의 비선형성의 정보를 이용하여 이상유동의 패턴 분류의 방법을 제안하고 타당성을 입증하고자 한다.

그간의 이상유동의 패턴 분류의 방법에 대해 이루어진 연구는 주관성에서 객관성을 지향하면서

† 책임저자, 회원, 한동대학교 기계제어시스템공학부
E-mail : jylee7@handong.edu
TEL : (054)260-1392 FAX : (054)260-1392

* 한동대학교 대학원 기계제어시스템공학부

다음과 같이 전개되었다. Jones 와 Zuber⁽³⁾는 단일 X 선을 2 상 유동관에 투사하여 기포 분율(void fraction)의 순간 변화치를 측정하여 유동양식을 판별하였다. X 선의 투과 강도는 순간 기포 분율과 밀접한 연관이 있으며 이를 유동양식의 판별을 위한 척도로 삼을 수 있다는 사실에 근거하여, 투과 강도 또는 기포 분율의 PDF (probability density function)를 구하여 유동을 판별하였다. Hubbard 와 Dukler⁽⁴⁾는 정압 변동치의 파워 스펙트럼 밀도함수(power spectral density function)를 분석하여 유동양식을 예측하는데 사용했다. 또한 다른 방법으로는 전기 전도도 측정법 [Solomon,⁽⁵⁾ Haberstrah,⁽⁶⁾ Barnea⁽⁷⁾], 압력강하 측정법 [Tutu,⁽⁸⁾ Matsui⁽⁹⁾] 등이 연구되어왔다. 최근에는 판정의 주관성을 극복하기 위해 인공 신경망을 훈련시켜 객관성을 크게 향상시키는 방법이 제시되었다. Mi⁽¹⁰⁾ 등은 임피던스 측정신호의 PDF 를 근거로 객관적 판정이 가능함을 보였고, Lee⁽¹¹⁾ 등은 이러한 PDF 가 갖는 통계적 제약을 극복하며, 순간 판정이 가능한 기법을 제시하였다.

이러한 객관적 판정과 고속 판정 기법의 진보와 연계하여 본 연구에서는 이에 사용되는 임피던스 신호, 즉 기포분율 신호, 가 보여주는 비선형성을 최근 발전하는 카오스 분석 연구의 진보에 힘입어 이상유동 패턴 분류와 더 나아가 이상유동 패턴 제어의 가능성에 대한 분석을 하고자 하는 연구의 필요성을 인식하고, 이의 첫 단계로 카오스 비선형 분석을 통한 이상유동 패턴분류기법을 제시함을 목표로 하였다. 따라서 본 연구에서 사용되는 임피던스 신호는 카오스 분석공간을 만들기 위한 다양한 개념들이, 즉 매립차원(embedding dimension), 지연 시간(time delay)의 추출을 통해, 그 신호가 위상공간(phase space)에서 만들어 내는 끌개(attractor)의 구성을 위해 사용된다. 구성된 끌개에서 2 차원 확률 밀도함수를 도출하여 이로부터 패턴 분류의 규칙을 생성하고 검증하는 것이 본 연구에서 선택한 연구방법이다.

이상유동의 카오스 분석과 관련하여, 이 기법을 사용한 연구를 문헌상 찾아보기 힘들다. Drahos⁽¹²⁾ 등은 수평관에 대하여, Wang⁽¹³⁾ 등은 T 연결관에 대하여 압력강하신호의 비선형성 분석을 수행하였고, Jin⁽¹⁴⁾ 등은 수직관에서의 오일/물의 이상유동에 대하여 엔트로피와 프랙탈 차원 분석 등을 수행하였지만, 이를 이용하여 유동패턴을 분류하지는 못했다.

2. 기포분율 신호를 이용한 위상공간의 재구성

이상유동에서 기포 분율의 시간 변화 정보는 유동 패턴을 나타낸다. 본 연구에서는 임피던스 를 측정하는 기포분율 센서의 신호의 시계열 정보를 활용하여, 기포분율의 동적 위상공간을 재구성하였다. 이것은 일차원시계열이므로, 동특성을 충분히 묘사하기 위해서, 직교성을 보여줄 수 있도록

일차원 시계열에 시간 지연(time delay)을 두어 구성하는 매립 차원(embedding dimension)을 통해 위상공간을 구성한다[Takens⁽¹⁵⁾].

기포분율 센서에서 다음과 같은 임피던스 신호, $x(t)$, 를 N 개 얻었다고 가정하자,

$$x(t) = x(t_1), x(t_2), x(t_3), \dots, x(t_N). \quad (1)$$

이를 지연시간 τ 와 차원 d 로 매립하여 다음과 같은 다차원 위상공간의 벡터를 구성할 수 있다. 여기서, 지연시간은 시간지연좌표계를 구성하기 위하여, 원래의 신호를 τ 만큼 지연(delay)하는 것을 의미하며, 매립차원은 위상공간을 재구성하기 위한 좌표수를 의미한다.

$$y(t) = x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(d-1)\tau) \quad (2)$$

식 (2)의 벡터 시계열을 2차원 혹은 3차원 공간에 나타내면 원래 계의 운동 성질을 보이는 끌개(attractor)를 얻게 된다. 위상공간상에 재구성된 끌개를 분석함으로써 기존의 불규칙하며 잡음처럼 보이는 1차원 측정 시계열의 위상론적구조를 이해할 수 있게 된다.

매립과정에 있어서 지연시간과 매립차원의 결정은 매우 중요한 문제이다. 일반적으로 지연시간은 매립을 통해 구성되는 벡터 시계열 간에 상호 독립적인 좌표가 설정되도록 결정되어야 한다. 만약 지연시간을 너무 작게 설정하면 원래 시계열 $x(t)$ 와 시간 지연된 시계열 $x(t+\tau)$ 의 상호관련성이 커져서 서로간에 독립적인 좌표가 구성되지 못한다. 따라서 끌개는 대각방향으로만 분포하게 되며, 반대로 지연시간을 너무 크게 설정하면 $x(t)$ 와 $x(t+\tau)$ 간의 관련성이 전혀 없어져서 끌개가 전체 위상공간에 퍼지게 된다. 이러한 관련성을 측정하는 지표로 다음의 평균상호정보량(average mutual information, Fraser⁽¹⁶⁾)을 활용하였다. 평균상호정보량의 수식은 식 (3)과 같다.

$$I(\tau) = -\sum_{ij} p_{ij}(\tau) \ln \frac{p_{ij}(\tau)}{p_i(\tau)p_j(\tau)} \quad (3)$$

여기서 p_i 는 Fig. 1과 같이 원래의 시계열 $x(t)$ 와 시간지연된 시계열 $x(t+\tau)$ 의 분포로 구성되는 히스토그램상에서의 i 번째 열에 시계열의 한점이 있을 확률을, p_{ij} 는 i, j 번째의 장소에 분포할 확률을 각각 의미한다.

따라서, 이는 시계열 $x(t)$ 와 $x(t+\tau)$ 사이의 엔트로피 값의 측정을 의미하며, 이 값이 첫번째로 최소가 되는 순간이 두 시계열 사이의 엔트로피를 최소화하게 된다. 정보이론의 관점에서 엔트로피의 최소는 두 시계열간의 상관성의 최소를 의미하므로, 이때의 τ 를 지연시간으로 결정하면 $x(t)$ 와 $x(t+\tau)$ 간에 상호 독립적인 좌표를 구성하게 된다.

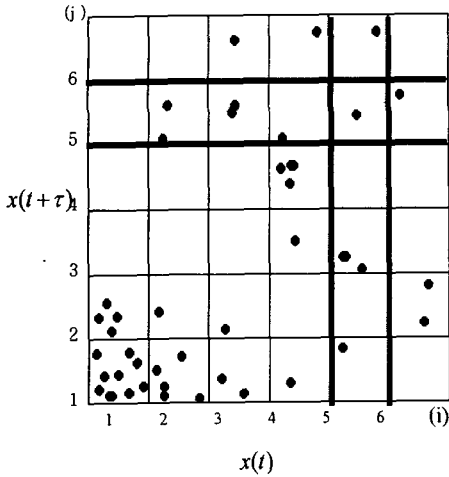


Fig. 1 The histogram for calculating average mutual information

임피던스 신호로부터 동특성을 파악하기 위해서는 위상공간의 차원을 결정하여 끌개의 궤적을 확인해야 한다. Takens의 매립이론에 의하면 매립차원이 위상공간 내의 끌개차원의 두배보다 크면 동특성을 나타낼 수 있음이 증명되어있다. 이 조건을 만족하면서 체계적인 차원 판정법으로 FNN [false nearest neighbor, Kenne⁽¹⁷⁾] 방법이 보편화되어있다. 이는 끌개차원 이하에서는 위상공간상의 가장 가까운 이웃점들이 대부분 거짓이웃이 되지만, 끌개차원에 접근함에 따라 거짓이웃의 수가 줄어드는 성질을 이용하여 매립차원을 결정하는 방법이다.

3. 기포분을 신호획득장치와 신호특성

3.1 실험장치의 구성

이상유동의 유동패턴에 대한 임피던스 시계열 신호를 얻기위하여 Purdue 대학의 실험장치가 사용되었다. 실험장치를 흐르는 작업유체는 물과 공기이며, 실험장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 관찰영역은 내경 25.4mm, 50.8mm의 원형 아크릴 파이프로 제작하였으며, 관찰영역의 길이와 내경의 비(L/D)는 150이다. 물은 25마력의 원심펌프를 진폭 제어기법과 밸브조정을 통하여 공급하며, 물의 유량은 ±3%의 오차범위를 가지는 전자기 유량계(electro-magnetic flow meter)를 통해 측정된다. 공기는 690 kPa (100psia)의 동작범위를 가지는 공기 압축기를 이용하여 공급하며, 공기량의 측정은 ±8% 정확도의 로타미터(rotameter)를 사용하였다.

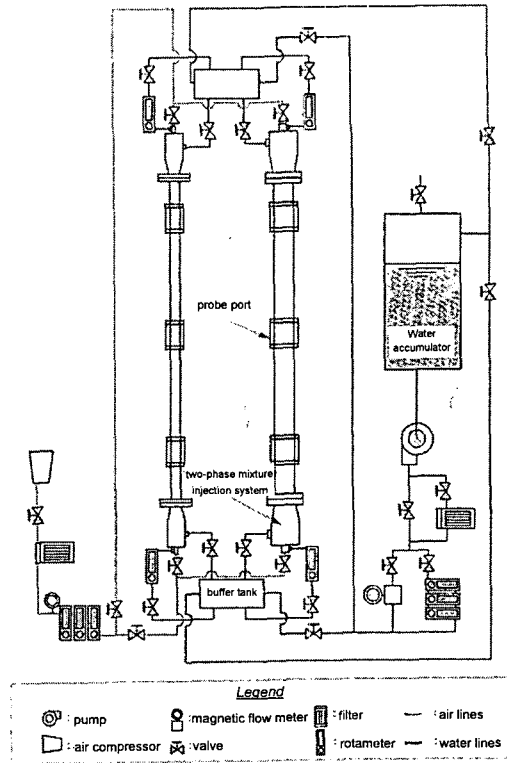


Fig. 2 Schematic diagram of experimental loops

3.2 기포분을 측정신호

기포분(void fraction)은 이상유동에서 유동 영역을 나타내는 중요한 지표로서 활용된다. 공간상에서 공기의 분포와 진동에 대한 정보는 물과 공기가 혼합된 이상유체의 임피던스 값을 측정함으로써 얻어진다. 임피던스 측정은 물과 공기의 전도율 차이를 통하여 얻어진다. 물의 전도율이 공기의 전도율에 비하여 매우 높으므로, 임피던스 측정 전극에서의 측정전압이 물이 지나갈때는 높게, 공기가 지나갈때는 낮게 측정된다. 측정 전극사이의 임피던스는 다음과 같은 과정을 통하여 유도된다.

두 임피던스 측정 전극 사이의 전위값은 다음과 같은 방정식을 만족해야한다.

$$\nabla \sigma \nabla U = 0 \tag{4}$$

여기서 σ 는 전기 전도율, U 는 전위값이다.

유동패턴이 달라지면 단면적의 σ 값이 변하게 된다. 이는 물의 σ 와 공기의 σ 가 다르기 때문이며, 따라서 그 분율(fraction)에 따라 전체의 σ 값이 변함을 의미한다. 이러한 전체의 σ 의 변화는 식 (4)에 의하여 전위값 U 를 변화 시키며, 이는 전극 사이의 임피던스가 다르게 측정되는 결과를 가져오게 된다.

즉, 식 (4)의 방정식에 경계조건을 적용하여 풀게 되면, 유동장에서의 전위분포가 결정되어지며, 전극사이의 임피던스 값 또한 다음과 같이 정의 된다[Lemonnier⁽¹⁸⁾].

$$G = \frac{\sigma}{V} \int \frac{\partial U}{\partial n} dl \quad (5)$$

여기서 V는 전극에 가해진 전위값의 차이를, n은 관벽면의 수직방향을, l은 곡면좌표계를, l_e는 유체와 닿아있는 전극면적의 길이를 각각 의미 한다.

수직 상향 이상유동은 일반적으로 기포류 (bubbly flow), 캡기포류 (cap-bubbly flow), 슬러그류 (slug flow), 처언류 (churn flow), 환형류 (annular flow)의 5가지 패턴으로 구분된다. 각 패턴에 대하여 실험을 통해 측정된 임피던스 신호를 Fig. 3에 나타냈다.

기포류는 분산된 작은 기포들이 관내부에 연속적으로 나타날때의 패턴으로 임피던스 신호의 개형은 Fig. 3(a)와 같다. 이를 보면, 신호의 개형이 0.9 근방의 대역에서 분포함이 확인된다. 캡기포류는 기포의 양이 많아지면서 기포간의 충돌 및 합착에 의해서 좀 더 큰 기포가 형성되는 때의 패턴으로 합착에 의한 기포가 지나갈때마다 피크가 생성이 되는 것이 Fig. 3(b)의 개형에서 나타난다. 슬러그류는 관 직경과 거의 같은 직경의 테일러 기포가 상향으로 흐를때의 패턴이며, Fig. 3(c)의 임피던스 신호를 보면, 테일러 기포가 지나갈때마다, 주기적인 펄스 형태의 신호가 나타나는 것이 확인 된다.

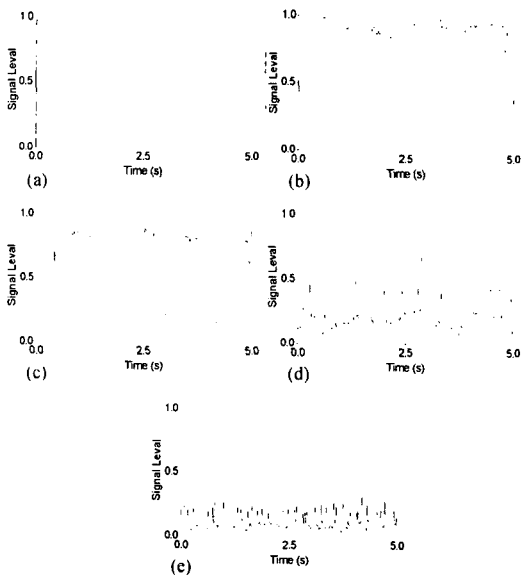


Fig. 3 Impedance void signal; (a) bubbly flow; (b) cap-bubbly flow; (c) slug flow; (d) churn flow; (e) annular flow

처언류는 테일러 기포의 파괴, 변형에 따른 불규칙적인 상을 나타내며, 이때의 임피던스 신호는 Fig. 3(d)와 같다. 환형류는 기체의 흐름이 클 때 나타나는 패턴으로, 액체가 관벽을 따라서 액막의 형태로 흐르고, 기체는 관 중심 부분을 따라서 흐르는 유동이며, Fig. 3(e)와 같이 0.2정도의 대역에서 임피던스 신호가 분포함이 확인된다.

4. 결과 및 토의

본 절에서는 먼저 위상공간 구성시에 평균상호 정보량에 의해 결정되는 지연시간의 패턴별 특징을 확인하였으며, 결정된 지연시간과 매립 차원을 이용하여 실제 측정 신호의 위상공간 끝개를 구성, 분석하였다. 이후에는 이를 통한 유동패턴의 인덱스 설정과 실제 분류과정에 대해 논의하였다.

4.1 최적 위상공간 구성

먼저 지연시간은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 평균상호정보량에 의하여 결정되었다. 지연시간은 기포류와 환형류에서 0.06초 이하의 작은 값을 가지며, 캡 기포류에서 증가하다가 슬러그류에서 최대값을 가지며 처언류로 진행함에 따라 다시 감소하는 개형을 보인다. 이는 기포류와 환형류의 경우, 임피던스 신호가 일정한 영역안에서 무작위로 분포하는 신호이므로 서로간의 상관성이 미약하여 작은 지연시간으로 독립좌표계가 구성이 되어지는 것을 의미한다. 그러나 슬러그류의 경우 테일러 기포가 주기적으로 지나감에 따라 임피던스 신호가 주기적인 성향을 나타내며, 이는 서로간의 상관성을 증가시킴을 의미한다. 따라서, 슬러그류에서는 독립좌표계 구성을 위해 큰 지연시간이 필요하며, 캡 기포류와 처언류는 각각 기포류에서 슬러그류로, 슬러그류에서 환형류로 천이하는 영역의 특징을 보이게 된다.

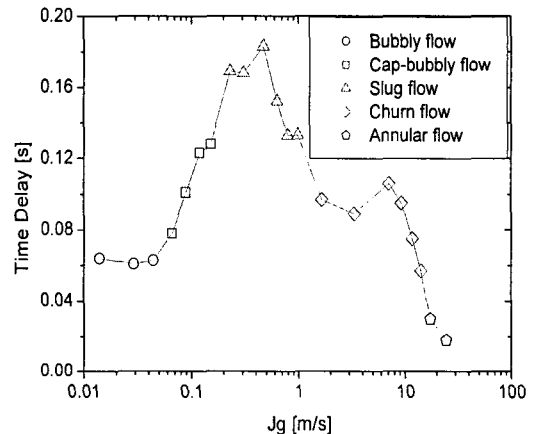


Fig. 4 The calculated time delay values (J_f = 0.13 m/s)

매립차원의 경우는 프랙탈 차원분석, 리아푸노브 지수분석 등의 비선형 분석기법에 있어서 중요하게 작용하는 파라미터이다. 하지만, 위상공간에서의 끌개 재구성에 있어서는 3 차원 이상의 매립차원이 주는 의미가 크지 않으며, 본 연구의 연구범위가 위상공간에서의 끌개구성 및 분석에 국한되므로 매립차원은 3 차원으로 결정하였다.

4.2 위상공간의 끌개 궤적과 유동패턴

상기의 방법으로 지연시간과 매립공간의 최적화를 이룬 후, 유동패턴에 따른 위상공간상의 끌개 궤적의 특징을 보기 위한 작업을 수행하였다. 대표패턴에 따른 특징을 보기 위해 Fig. 5 에 나타난

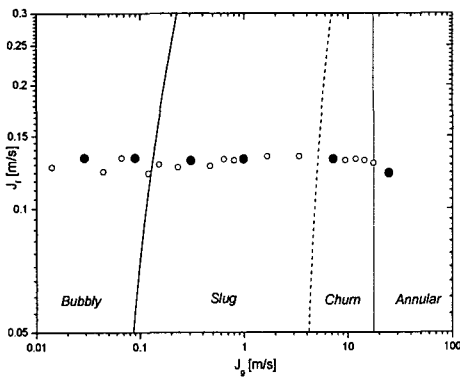


Fig. 5 Test flow conditions in flow regime map (25.4mm ID pipe)

유동지도상에서 J_g 를 0.13 m/s 로 일정하게 하고 기체의 속도를 서서히 변화시키면서 나타나는 측정 신호를 가지고 각 조건에 해당하는 위상공간 궤적을 검토하였다. 그림에서 J_f, J_g 는 액체, 기체의 겉보기 속도로 다음과 같이 정의된다.

$$j_f = Q_f / A \quad [\text{m/s}] \quad (6)$$

$$j_g = Q_g / A \quad [\text{m/s}] \quad (7)$$

여기서 Q_g 는 기체의 체적유량을, Q_f 는 액체의 체적유량을, A 는 단면적을 각각 의미한다. 또한, 그림의 유동지도상에서 대표 조건 점은 검은 동그라미로 표현하였으며, 유동영역상의 패턴천이의 구분선은 Mishima 와 Ishii(1984)에 의하여 제안된 천이모델에 근거하였다.

기포류, 캡기포류, 슬러그류, 불안정한 슬러그류 (unstable slug flow), 처연류, 환형류의 대표패턴에 대한 측정 임피던스 신호를 계산된 지연시간으로 시간지연하여 끌개를 구성하였다. 위상공간상에서의 각 축은 원신호, τ 만큼 시간지연된 신호, 2τ 만큼 시간지연된 신호를 의미한다.

3 차원 위상공간상의 각각의 패턴에 대한 끌개의 모습을 Fig. 6 에 나타내었다. 기포류의 경우 0.8 이상의 높은 임피던스 영역에 고정점(fixed point)이 형성되고, 끌개의 궤적이 고정점 주변에 집중적으로 분포하는 것이 확인된다. 이는 물리적으로 기포분출의 시간에 대한 변동이 작으나 매우 혼돈적(chaotic)임을 의미한다[Fig. 6(a)].

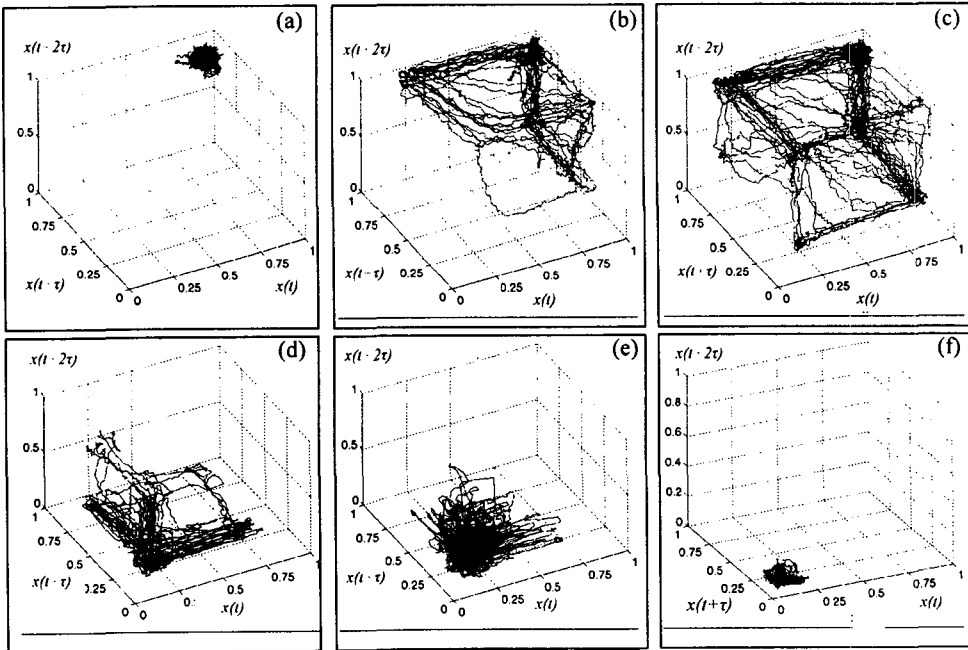


Fig. 6 Attractor portrait in 3-dimensional phase-space for (a) bubbly flow; (b) cap-bubbly flow; (c) slug flow; (d) slug (unstable slug flow); (e) churn flow; (f) annular flow

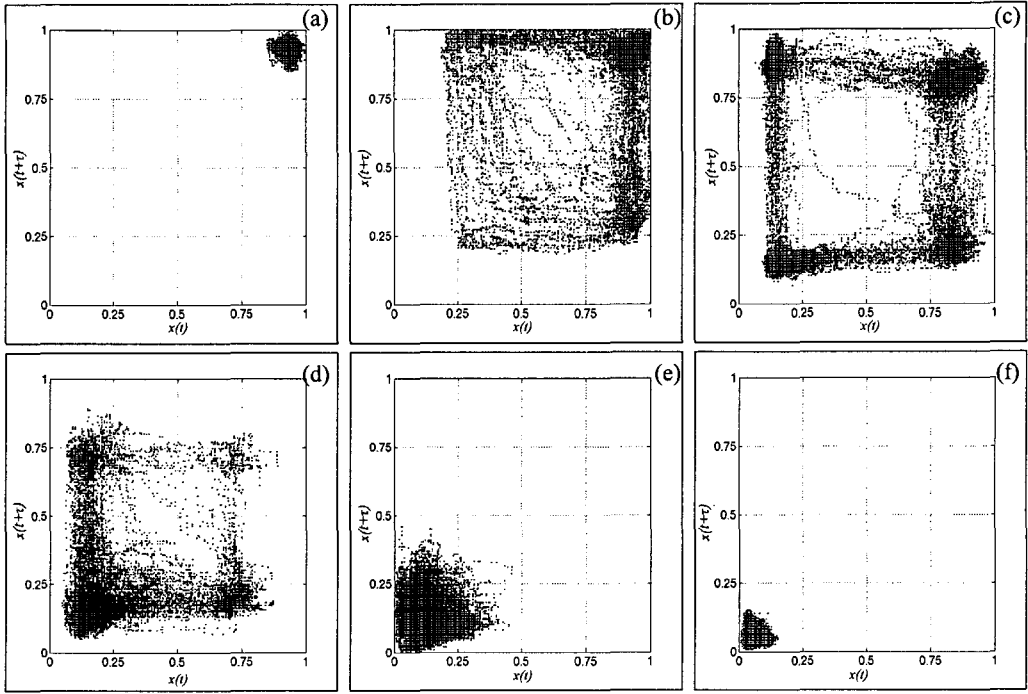


Fig. 7 Reconstructed phase-space of each flow pattern illustrating density; (a) bubbly flow; (b) cap-bubbly flow; (c) slug flow; (d) slug(unstable slug flow); (e) churn flow; (f) annular flow

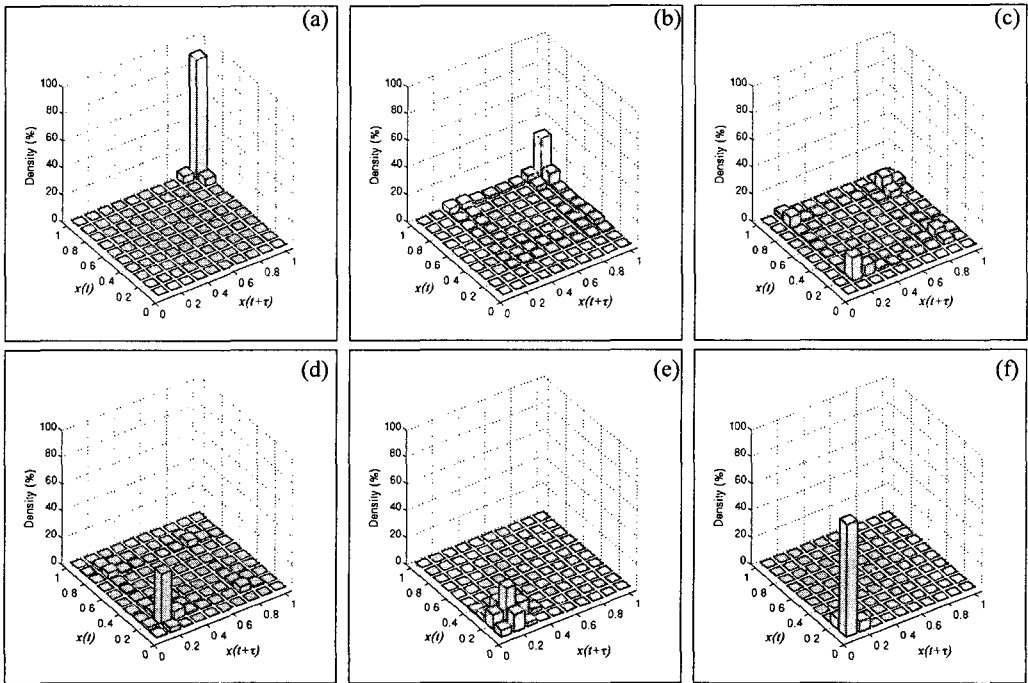


Fig. 8 2D probability density function plot for (a) bubbly flow; (b) cap-bubbly flow; (c) slug flow; (d) slug(unstable slug flow); (e) churn flow; (f) annular flow

기포류에서의 고정점 주변에서 분포하던 끌개는 캡기포류로 천이함에 따라 낮은 임피던스 영역으로 퍼져나가게 된다. 이는 수학적으로 호모클리닉 분기점 (homoclinic bifurcation)의 형태이며, 캡기포 (cap-bubble)가 지나갈 때 나타나는 신호의 변동 및 회복을 의미한다[Fig. 6(b)].

슬러그류로 진행함에 따라 캡기포류에서 나타나기 시작하였던 호모클리닉 분기가 활발히 진행되며, 이에 따라 낮은 임피던스 영역에서의 고정점을 인지하기 시작한다. 이는 안정된 테일러 기포 (Taylor bubble)의 주기적 생성 및 진행을 나타낸다[Fig. 6(c)]. 슬러그류에서 처언류로 진행함에 따라, 기포류에서 나타났던 고정점이 상실되기 시작하며, 끌개의 궤적이 낮은 임피던스 영역의 고정점 주변으로 모여들기 시작한다. 불안정한 형상의 테일러 기포들이 존재하는 불안정한 슬러그류 (unstable slug)에서는 낮은 임피던스 영역의 고정점 주변에 비교적 넓게[Fig. 6(d)] 처언류에 와서는 좀더 집중되고 혼돈적인 형태로 끌개가 분포하게 된다[Fig. 6(e)].

이러한 양상은 환형류로 가서는 좀더 확연하게 나타나게 된다. 환형류에서는 끌개의 궤적이 낮은 임피던스 영역의 고정점에 매우 집중적으로 분포하게 되며, 기포류에서의 끌개 궤적과는 다르게 혼돈적인 개형이 아닌 3방향으로 뻗어나가는 작은 날개를 가지고 있음이 확인된다. 이는 환형류에서 나타나는 작은 액적과 분무의 거동이 만들어내는 끌개 특성으로 판단된다.

이러한 끌개의 특성을 2차원 공간으로 사영하여 표현하면, 끌개 구성점에 대한 밀도분포의 형태인 끌개밀도지도 (attractor-density-map)가 그려진다. 끌개의 밀도는 유동패턴의 변화에 따라 위상공간상에 다르게 분포하는데, Fig. 7에서는 이를 2차원 공간상의 점의 분포로 표현하였고, Fig. 8에서는 밀도를 축으로 도입하여 2차원 확률밀도함수 (probability density function)의 모양으로 나타내었다.

결과를 보면, 기포류의 경우 낮은 임피던스 영역에 끌개의 궤적이 매우 집중적으로 분포하며, 캡 기포류에서 2차원의 사각구조를 형성하기 시작하여, 슬러그류에서는 환형류 지역의 낮은 임피던스 영역에서 서서히 분포가 시작되고, 마침내 환형류에서는 환형류 지역에서 크게 집중되어 나타나는 것을 알 수 있다.

4.3 수직 이상유동의 패턴분류

수직 이상유동의 패턴분류는 대부분 육안 관측이나 확률밀도함수 (PDF)의 형태에 의한 휴리스틱 (heuristic) 판정에 근거하여 이루어졌다. 본 연구에서는 끌개밀도지도 (attractor-density-map)를 구성하여, 이를 새로운 유동패턴 분류의 인덱스로 사용 가능함을 검토하였다. 이를 위해서 Lee 등이 제시한 기존의 인공신경망 [artificial neural network;

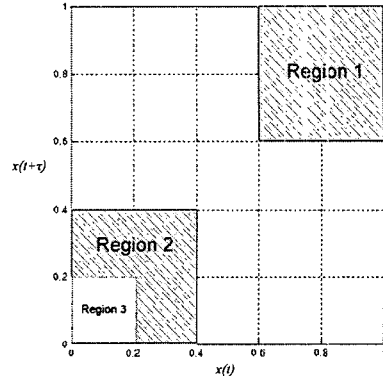


Fig. 9 Definition of regions for flow identification

Lee⁽¹¹⁾에 의한 신뢰적 분류와 동일한 결과를 주는 규칙을 경험적으로 찾아 끌개밀도지도의 결과를 이용한 패턴 인식 규칙을 생성하였다.

끌개밀도지도를 분석한 결과는 다음과 같다. Fig. 9와 같이 2차원 사영평면에서 정의된 영역에 대하여 기포류와 캡기포류는 임피던스 0.6이상 영역 (region 1)에서, 슬러그류는 임피던스 0.6이상 영역 (region 1)과 임피던스 0.4이하 영역 (region 2)에서, 처언류와 환상류는 임피던스 0.4이하 영역 (region 2)과 임피던스 0.2이하 영역 (region 3)에서 각각 집중하는 것이 확인되었으며, 이를 이용하여 다음과 같은 세가지의 규칙을 생성하였다.

규칙 1 : Region 1에 90%이상 분포하면 기포류이다.

규칙 2 : Region 2에 80%이상 분포하고 Region 3에 90%이상 집중하면 환형류고, 집중하지 않았다면 처언류이다.

규칙 3 : Region 1에 30%이상, Region 2에 15%이하로 분포하면, 캡 기포류이고, Region 2에 15%이상 분포하면 슬러그류이다.

제안된 패턴분류의 규칙을 검증하기 위하여 3.1절에서 언급한 실험장치에서의 25.4mm, 50.8 mm관의 수직 상향 이상유동에 대한 유동양식선도를 구성하였다. Fig. 10은 내경 25.4 mm 관에서의 유동양식선도이다. 결과를 보면, 기포류, 캡 기포류, 슬러그류, 처언류, 환형류의 각각의 유동영역이 명확하게 구분되어지고 있음이 확인된다. Mishima-Ishii 모델에서 제안한 기포류에서 슬러그류로의 천이영역은 본 연구에서의 캡 기포류에서 슬러그류로의 천이영역과 일치된다. Mishima-Ishii 모델에서는 기포류와 캡 기포류의 영역에 대하여 동일하게 기포류로 다루었지만, 기포류에서 슬러그류로의 천이가 천천히 이루어짐을 고려할 때 하나의 독립적인 유동패턴으로서 캡 기포류를 고려할 수도 있음이 확인된다. 슬러그류에서 처언류로의 천이영역 및 처언류에서 환형류로의 천이영역 또한 Mishima-Ishii 모델과 일치되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11은 내경 50.8mm 관의 유동양식선도이다. 50.8mm에서의 결과 또한 대체적으로 Mishima-Ishii의 천이영역모델을 만족하고 있음이 확인된다. 그러나 한가지 논의되어야 하는 부분은 Mishima-Ishii 모델의 기포류에서 슬러그류로의 천이 영역이 캡 기포류의 영역의 가운데를 관통하고 있다는 점이다. Mishima-Ishii 모델에서는 기포류에서의 작은 기포들의 분포를, 일정한것으로 이상화하여 천이모델을 제안하였다. 이렇게 구성되는 천이모델은 내경이 작은 관에서는 적용될 수 있지만, 내경이 증가함에 따라 나타나는 직경 효과는 고려되지 않는다. 즉, 현재와 같이 내경이 2배로 증가하면 안정적인 형상의 테일러 기포를 가지는 슬러그류

(stable slug)를 생성하기 위해서 더 많은 기체량이 필요하게 되며, 이로인해 기포류에서 슬러그류로의 천이영역으로 구분되는 캡기포류의 영역이 증가하게 된다. 즉, 기포류에서 슬러그류로의 천이에 대하여, 관직경 증가에 따른 효과의 검증작업이 더 큰 직경의 관에 대한 임피던스 측정 및 유동분류실험을 통하여 추후 수행되어야 함을 알 수 있다.

위의 결과를 통하여, 본 연구에서 제안한 위상공간에서의 끝개밀도분석에 의해 발현된 각 유동패턴분류의 지표는 25.4mm, 50.8mm 내경관에서의 수직이상유동의 유동양식선도구성에 매우 효과적인 임을 확인했다.

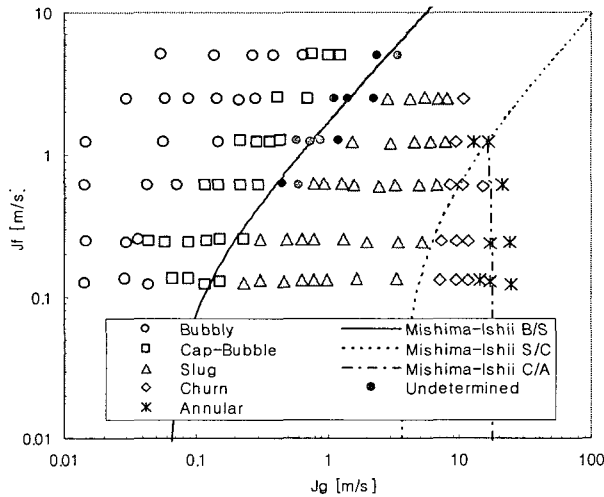


Fig. 10 Flow regime map in 25.4mm ID pipe

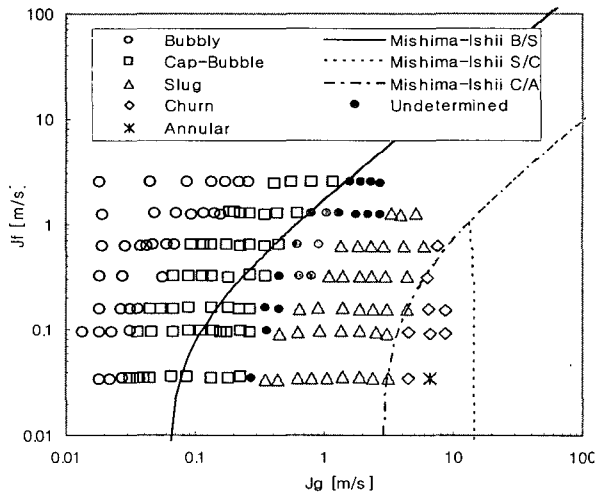


Fig. 11 Flow regime map in 50.8mm ID pipe

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 위상공간에서의 끌개 구성을 통한 수직 상향 이상유동에서의 유동패턴분류 및 유동영역선도의 구성을 수행하였다. 측정되는 기포 분율의 임피던스 시계열에 평균상호정보량 기법을 적용하여 위상공간 구성을 위한 지연시간을 결정하였으며, 이를 이용해 위상공간에서의 끌개를 구성하였다. 구성된 끌개구조를 분석하여, 유동패턴의 지표를 확인하였으며, 위상공간에서의 끌개밀도를 2차원 사영공간에서 표현하여 2D PDF를 구하였다. 또한, 사영공간에서의 끌개밀도를 이용, 유동패턴분류의 인덱스를 찾아 분류를 위한 규칙을 제시, 적용하였다.

제안된 규칙을 내경 25.4mm, 50.8mm 수직관에서 측정된 임피던스 신호에 적용하여 유동패턴판정을 하였다. 판정결과, 기존의 결과와 잘 맞으며, Mishima-Ishii의 친이 모델에 만족됨을 확인하였다. 이를 통해 본 비선형 카오스 분석기법이 유동패턴판정을 위한 분류인덱스의 추출 및 패턴분류에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구에 대하여 비판과 조언을 아끼지 않으신 Purdue 대학의 Ishii 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ishii, M., 2003, "Objective Characterization of Interfacial Structure in Two-Phase Flow," *Proc. 10th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor or Thermal Hydraulics*, Seoul, Keynote Lecture, KL-01.
- (2) Mishima, K. and Ishii, M., 1984, "Flow Regime Transition Criteria for Upward Two-Phase Flow in Vertical Tubes," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 27, pp. 723-737.
- (3) Jones, O.C. and Zuber, N., 1975, "The Interrelation Between Void Fraction Fluctuations and Flow Pattern in Two-Phase Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 2, pp. 273-306.
- (4) Hubbard, M.G. and Dukler, A.G., 1966, "The Characterization of Flow Regimes for Horizontal Two-Phase Flow," *Proc. of the heat transfer and fluid mechanics institute*, Stanford Univ. Press.
- (5) Solomon, J.V., 1962, "Construction of a Two-Phase Flow Regime Transition Detector," M. Sc. Thesis, Mech. Eng. Dept. MIT.
- (6) Haberstrah, R.E. and Griffith, P., 1965, "The Slug-Annular Two-Phase Flow Regime Transition," *ASME Paper*, No. 65-HT-52.
- (7) Barnea, D., Shoham, O. and Taitel, Y., 1980, "Flow Pattern Characterization in Two-Phase Flow by Electrical Conductance Probe," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 6, pp. 387-397.
- (8) Tutu, N.K., 1982, "Pressure Fluctuations and Flow Pattern Recognition in Vertical Two-Phase Gas-Liquid Correlation," *Proc. 5th Int. heat transfer Conf.*, Tokyo, Paper B3.9, Vol. 4, pp. 120-124.
- (9) Matsui, G., 1984, "Identification of Flow Regimes in Vertical Gas-Liquid Two-Phase Flow Using Differential Pressure Fluctuation," *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 10, pp. 711-749.
- (10) Mi, Y., Ishii, M. and Tsoukalas, L.H., 2001, "Flow Regime Identification Methodology with Neural Networks and Two-Phase Flow Models," *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 204, pp. 87-100.
- (11) Lee, J.Y., Kim, N.S. and Ishii, M., 2003, "An Instantaneous Flow Regime Identification Using Probability Distribution Function and Feed Forward Neural Network," *Proc. 10th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor or Thermal Hydraulics*, Seoul, A00309.
- (12) Drahos, J., Tihon, J., Serio, C. and Lubbert, A., 1996, "Deterministic Chaos Analysis of Pressure Fluctuations in a Horizontal Pipe at Intermittent Flow Regime," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 64, pp. 149-156.
- (13) Wang, S.F., Mosdorf, R. and Shoji, M., 2003, "Nonlinear Analysis on Fluctuation Feature of Two-Phase Flow Through a T-junction," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 1519-1528.
- (14) Jin, N.D., Nie, X.B., Ren, Y.Y. and Liu, X.B., 2003, "Characterization of Oil/Water Two-Phase Flow Patterns Based on Nonlinear Time Series Analysis," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 14, pp. 169-175.
- (15) Takens, F., 1984, "On the Numerical Determination of the Dimension of an Attractor," *Lecture Notes in Mathematics*, Vol. 1125, Springer, Berlin.
- (16) Fraser, A.M. and Swinney, H.L., 1986, "Independent Coordinates for Strange Attractors from Mutual Information," *Physical Review A*, Vol. 3, No. 2.
- (17) Kennel, M.B., Brown, R. and Abarbanel, H.D.I., 1992, "Determining Embedding Dimension for Phase-Space Reconstruction Using a Geometrical Construction," *Physical Review A*, Vol. 45, No. 6.
- (18) Lemonnier, H., Nakach, R., Favreau, C. and Selmer-Olsen, S., 1991, "Sensitivity Analysis of an Impedance Void Meter to the Distribution in Annular Flow : a Theoretical Study," *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 126, pp. 105-112.