2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

비선형 위상공간에서의 기포 분율 신호의 회귀지도(Return Map)분석을 이용한 수직 상향 이상유동의 유동패턴분류

Flow Identification of Vertical Upward Two-Phase Flow using the Return Map of the Void Fraction Signal in the Nonlinear Phase Space

김남석, 이재영
한동대학교
경북 포항시 북구 흥해읍

요 약

이상유동의 기포 분율에 대한 임피던스 신호는 매우 비선형적인 특성을 가진다. 본 연구에서는 유동양식선도 구성을 위한 지표로서, 기존의 확률밀도함수(PDF)보다 비선형성이 더 고려되는 확장된 지표를 개발하였다. 이를 위해 평균상호정보량(average mutual information) 기법 및 민감도분석법을 적용하여 지연시간과 매립차원을 계산하였으며, 이를 환경변수로 하여 2차원 위상공간에서 비선형 신호의 끌개를 구성하였다. 구성된 끌개를 2차원 위상공간에서의 회귀지도(return map) 및 3D PDF에 의하여 분석한 결과 다양한 분기(bifurcation)를 나타내는 유동패턴들 간의 특징을 확인하였다. 이렇게 구성된 새로운 지표를 내경 25.3mm와 50.8mm의 수직관 유동의 실험자료에 적용한 후 유동양식선도를 구성하였으며, 그 결과 기포류, 캡 기포류, 슬러그류, 처언류, 환형류의 5가지 유동패턴을 명확히 구분 지었다. 이를 통해 본 연구는 비선형 카오스 분석에서 얻어진 새로운 지표가 수직 이상유동 패턴을 분류하는 객관적 지표임을 입증하였다.

ABSTRACT

The impedance signals of the void fraction in two-phase flow have nonlinear characteristics. In the present paper, a new index considering the nonlinear chaotic character is developed to extend the conventional probability density function(PDF) method. The average mutual information method and sensitivity study have been employed to construct the portrait of attractor in the 2 dimensional phase space. The specific bifurcations of each flow patterns were attained by return map and 3D PDF of reconstructed attractor. Applying the new index to the data from the vertical two-phase flow in the 25.3 mm and 50.8 mm ID pipes gave a good performance in identification of the discrete bubbly flow, the cap-bubbly flow, the slug flow, the churn flow and the annular flow. The present results showed that the nonlinear chaos analysis is capable of providing more objective index in flow pattern identification.

1. 서 론

이상유동은 원자력 발전소나 화학 플랜트 등의 대형 시설에서부터 마이크로 유체기계와 같은 정밀한 규모의 장치에까지 넓게 적용되고 있다. 기체와 액체가 함께 공존하여 흐르는 이상유동은 물리적인 상태에 따라 여러 패턴을 가지게 된다. 각각의 유동 패턴에 따라 내부의 열수력적 거동과 경계면 전달현상이 크게 달라지기 때문에, 유동 패턴의 정확한 분류 판정이 중요하다.

이상유동 패턴 판정을 위한 초기 연구는 육안 관찰이나 사진판별에 의존했다. 이 방식은 우선 간단하다는 장점과 함께 유속이 낮고 천이과정이 서서히 이루어지는 경우에는 효과적으로 적용되었지만, 유속이 아주 빠르거나 상분포의 변화가 활발한 경우에는 판별의 객관성을 확보할 수 없었다. 이 방법의 주관성을 극복하기 위해 이후의 연구는 각 유동 영역의 물리적 특성을 파악하여 객관적으로 유동 패턴을 분류하기 위해 수행되었다.

Jones와 Zuber(1975)는 단일 X선을 2상 유동관에 투사하여 기포 분율(void fraction)의 순간 변화치를 측정하여 유동양식을 판별하였다. X선의 투과 강도는 순간 기포 분율과 밀접한 연관이 있으며 이를 유동양식의 판별을 위한 척도로 삼을 수 있다는 사실에 근거하여, 투과강도 또는 기포 분율의 PDF(probability density function)를 구하여 유동을 판별하였다. Hubbard와 Dukler(1966)는 정압 변동치의 파워 스펙트럼 밀도함수(power spectral density function)를 분석하여 유동양식을 예측하는데 사용했다. 또한 다른 방법으로는 압력강하 측정법(Tutu, 1982; Matsui, 1984), 전기 전도도 측정법(Solomon, 1962; Haberstrah, 1965; Barnea, 1980) 등이 연구되어왔다. 최근에는 판정의 주관성을 극복하기 위해 인공신경망을 훈련시켜 객관성을 크게 향상시키는 방법이 제시되었다. Mi(2001) 등은 측정신호의 PDF를 근거로 객관적 판정이 가능함을 보였고, Lee(2003)등은 PDF가 갖는 통계적 제약을 극복하며, 순간 판정이 가능한 기법을 제시하였다.

이러한 객관적 판정과 고속 판정 기법의 진보와 연계하여 한가지 검토할 사항은 임피던스 신호가 그 특성상 매우 비선형적이며, 경우에 따라 카오스적인 특성을 보여주는 것이다. 카오스적 프랙탈 차원에 대한 연구는 Drahos(1996) 등에 의하여 수평관에 대하여 실험적으로 수행된 바 있으나, 유동 패턴의 명확한 구분에는 미치지 못하였다.

본 연구는 기본적으로 카오스적 특성에서 유동패턴의 객관적 정보를 뽑아내는 것을 목표로 수행되었다. 프랙탈 차원 분석에 앞서, 일단 위상공간에서의 끌개의 회귀지도(return map)을 구성하여, 이로부터 유동패턴의 인덱스를 구하였다. 2절에서는 이러한 방법에 대한 설명을 하고, 사용된 실험 자료의 장치 설명을 3절에 하였으며, 4절에는 다양한 결과 검토와 유동 패턴 분류의 결과를 제시, 토의하였다.

2. 임피던스 신호를 이용한 위상공간의 구성

임피던스 신호는 시간차원에 대하여 비선형적인 자료이다. 이로부터 다차원 위상공간을 구성하기 위해서는 Ruelle-Takens 에 의해 증명된 시간지연좌표를 이용한 매립 과정

을 거쳐야 한다. 만일 N개의 1차원 시계열이 다음과 같이 정의되었다면,

$$x = \{x_1, x_2, \cdots x_n\}, \quad n = 1 \ldots N \tag{1}$$

이를 지연시간 τ 와 매립차원 d 로 매립하여 다음과 같은 다차원 위상공간의 벡터를 구성할 수 있다.

$$\overrightarrow{x_n} = \left[x_n \quad x_{n+\tau} \quad \cdots \quad x_{n+(d-1)\tau} \right] \tag{2}$$

식(2)의 벡터 시계열을 2차원 혹은 3차원 공간에 나타내면 원래 계의 운동 성질을 보이는 끌개(attractor)를 얻게 된다. 위상공간상에 재구성된 끌개를 분석함으로 기존의 불규칙하며 잡음처럼 보이는 1차원 측정 시계열의 위상궤적구조를 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_n 과 시간 지연된 시계열 $x_{n+\tau}$ 의 상호관련성이 커져서 서로간에 독립적인 좌표가 구성되지 못한다. 따라서 끌개는 대각방향으로만 분포하게 되며, 반대로 지연시간을 너무 크게 설정하면 x_n 과 $x_{n+\tau}$ 간의 관련성이 전혀 없어져서 끌개가 전체 위상공간에 퍼지게 된다. 이러한 관련성을 측정하는 지표로 다음의 평균상호정보량(average mutual information)을 활용하였다.

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

여기서 p_i 는 시계열 x_n 과 시간 지연된 시계열 $x_{n+\tau}$ 사이의 분포에서 i 번째의 장소에 시계열의 한점이 있을 확률을, $p_{ij}(\tau)$ 는 이들 사이의 결합확률분포를 의미한다. 따라서, 이는 시계열 x_n 과 $x_{n+\tau}$ 사이의 엔트로피 값의 측정을 의미하며, 이 값이 첫번째로 최소가 되는 순간의 τ 를 지연시간으로 결정한다.

임피던스 신호로부터 동특성을 파악하기 위해서는 위상공간의 차원을 결정하여 끌개의 궤적을 확인해야 한다. Takens의 매립이론에 의하면 매립차원이 위상공간 내의 끌개차원의 두배보다 크면 동특성을 나타낼 수 있다. 이 조건을 만족하면서 체계적인 차원 판정법으로 본 연구에서는 FNN(false nearest neighbor)방법을 이용하였다. 이는 끌개차원 이하에서는 위상공간상의 가장 가까운 이웃점들이 대부분 거짓이웃이 되지만, 끌개차원에 접근함에 따라 거짓이웃의 수가 줄어드는 성질을 이용하여 매립차원을 결정한다.

3. 임피던스 신호획득과 PDF(probability density function) 특성

3.1 실험장치의 구성

실험장치를 흐르는 작업유체는 물과 공기이며, 실험장치의 개략도는 그림 1과 같다.

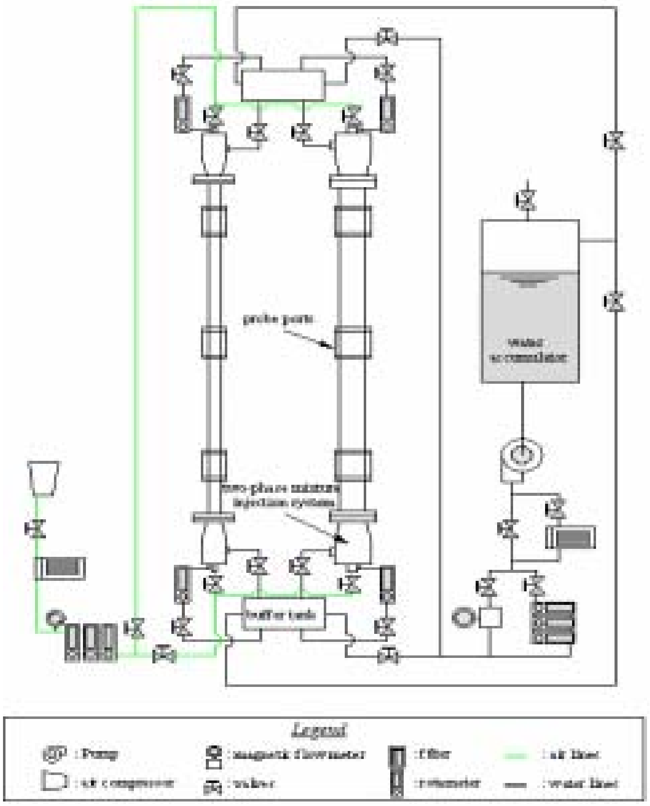

그림 1. 실험장치의 개략도

관찰 영역은 내경 25.4mm, 50.8mm의 원형 아크릴 파이프로 제작하였으며, 관찰영역의 길이와 내경의 비(L/D)는 150이다. 물은 25마력의 원심펌프를 진폭제어기법과 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 공기압축기를 이용하여 공급하며, 공기량의 측정은 ±8% 정확도의 로타미터(rotameter)를 사용하였다.

3.2 임피던스 신호와 PDF 특성

기포 분율(void fraction)은 이상유동에서 유동 영역을 나타내는 중요한 지표로서 활용된다. 공간상에서 공기의 분포와 진동에 대한 정보는 물과 공기가 혼합된 이상유체의 임피던스 값을 측정함으로 얻어진다. 두 임피던스 측정 전극 사이의 임피던스값은 식(4)와 같이 정의된다.

$$G = \frac{\sigma}{V}\int_{l_e} \frac{\partial U}{\partial n} dl \qquad (4)$$

여기서 σ는 유체의 전도율을, U는 전위값을, V는 전극사이에 가해진 전위값의 차이를, n은 관벽면의 수직방향을, l은 유체접촉면적의 표면곡률(curvilinear surface)를 각각 의미한다.

수직 상향 이상유동은 일반적으로 기포류(bubbly flow), 슬러그류(slug flow),

처언류(churn flow), 환형류(annular flow)의 4 가지 패턴으로 구분된다. 각 유동양식의 경계는 육안으로 확연히 구분되지는 않지만, 임피던스 측정신호는 각각의 유동영역에 대한 정보가 된다. 측정된 임피던스 값은 (0, 1)의 범위로 켈리브레이션 하였다.

그림 2(a)는 기포류의 전형적인 임피던스 신호의 개형이다. 기포류는 기체상이 분산된 작은 기포들의 형태로 연속적인 액체상 내에 무작위로 분포한다. 기포류는 일반적으로 기포 분율 0.3 이하에서 나타나는 유동패턴으로, 임피던스 신호는 0.8~0.9 이상의 값에서 평균적으로 분포한다. 그림 2(b)는 기포류의 임피던스 신호가 보이는 PDF 개형으로 0.8이상의 영역에서 일반적인 가우스 분포를 보인다.

기포 분율이 0.25의 범위를 넘어감에 따라, 기포의 양이 많아지며 기포간의 충돌 및 합착에 의해서 좀 더 큰 기포가 형성되는 캡 기포류(cap-bubbly flow)의 개형이 나타난다. 이는 기포류에서 슬러그류로 천이하는 영역의 패턴으로 보통 인식된다. 그림 3은 캡 기포류의 임피던스 신호와 PDF의 개형이다.

슬러그류에서는 관 직경과 거의 같은 직경의 테일러 기포가 상향으로 흐르며, 이 기포와 관 벽면 사이에서는 기체가 얇은 막의 형태로 하향 유동을 한다. 그림 4는 슬러그류의 임피던스 신호와 PDF 개형이다. 이를 보면, 테일러 기포가 임피던스 전극을 통과할 때마다 측정신호가 0.2이하의 값으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 슬러그류의 PDF는 기포량이 점차적으로 증가함에 따라, 0.8과 0.2 주변에서 두개의 봉우리를 형성한다.

처언류는 슬러그류와 어느 정도 유사하나 둥근 탄환 형태의 슬러그 기포와는 달리 기포의 형태가 많이 변형되어 불규칙적인 상을 나타낸다. 기포와 기포 사이의 액체 슬러그가 과다한 양의 기체 유동에 의해 일시적으로 파괴되었다가 다시 복원되는 등 유동 전체가 진동을 하며, 임피던스 신호는 그림 5 와 같이 불규칙적으로 진동하는 것을 확인할 수 있다. 처언류의 PDF는 기포류의 PDF성분이 사라지고 0.2의 영역에서 넓게 분포한다.

환형류는 기체의 흐름이 클 때 나타나는 패턴으로, 액체가 관벽을 따라서 액막의 형태로 흐르고, 기체는 관 중심 부분을 따라서 흐르는 유동을 말한다. 그림 6 은 환형류의 임피던스 신호와 PDF의 개형이다. 신호가 0.2를 중심으로 작게 흔들리고 있으며, 이는 작은 액적과 분무가 만들어내는 성분임을 알 수 있다. PDF의 개형은 이러한 임피던스 신호의 특징을 반영하며 0.2의 주변에서 분포하고 있다.

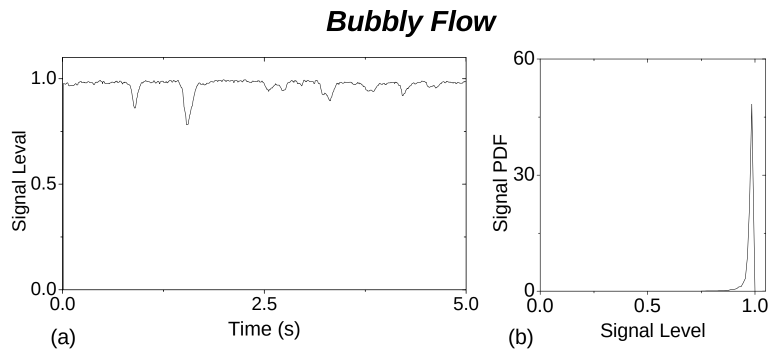

그림 2. 기포류의 (a) 5 초동안의 임피던스 측정신호와 (b) PDF 개형

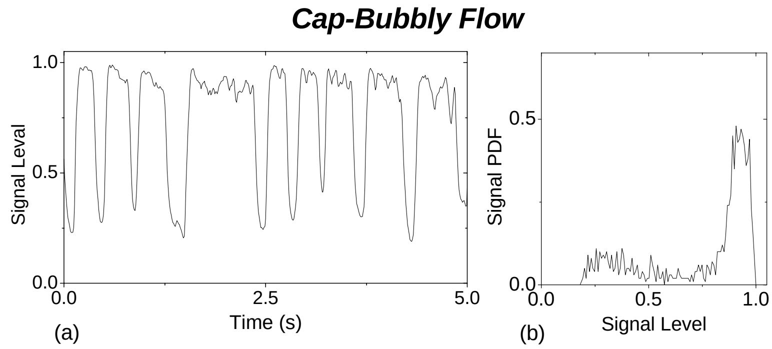

그림 3. 캡 기포류의 (a) 5 초동안의 임피던스 측정신호와 (b) PDF 개형

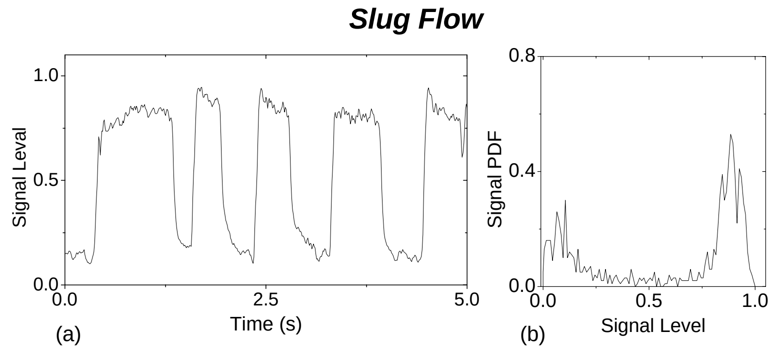

그림 4. 슬러그류의 (a) 5 초동안의 임피던스 측정신호와 (b) PDF 개형

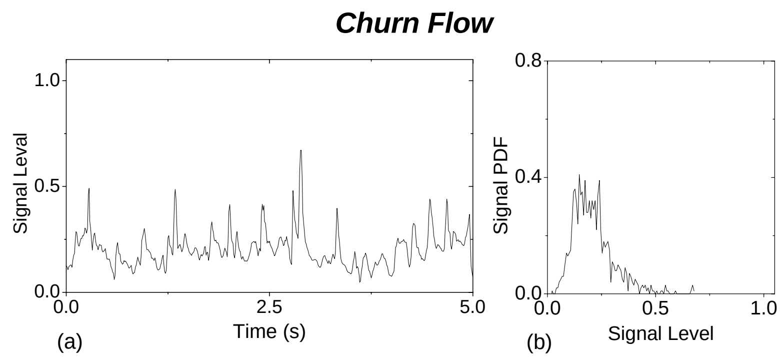

그림 5. 처언류의 (a) 5 초동안의 임피던스 측정신호와 (b) PDF 개형

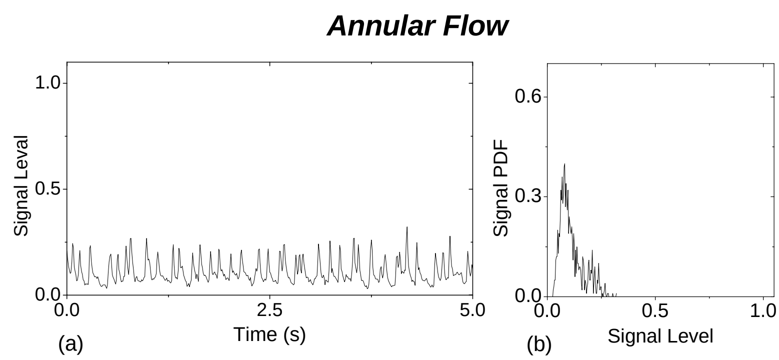

그림 6. 환형류의 (a) 5 초동안의 임피던스 측정신호와 (b) PDF 개형

4. 결과 및 토의

본 토의는 먼저 위상공간 구성시에 본 연구에서 사용한 지연시간과 매립차원이 끌개 궤적에 어떤 영향을 미치는가를 분석하여 이를 최적화 하고, 이후에는 실재 신호의 처리를 통한 유동 패턴 분류의 인덱스 설정과 분류에 대해 논의하고자 한다.

4.1 위상공간 구성의 최적화

먼저 지연시간은 그림 7에 나타난 바와 같이 평균상호정보량(average mutual information)에 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 상관성이 기포류와 환형류에 비하여 증가함을 의미한다. 따라서, 슬러그류에서는 독립좌표계 구성을 위해 큰 지연시간이 필요하며 캡 기포류와 처언류는 각각 기포류에서 슬러그류로, 슬러그류에서 환형류로 천이하는 영역의 특징을 보이게 된다.

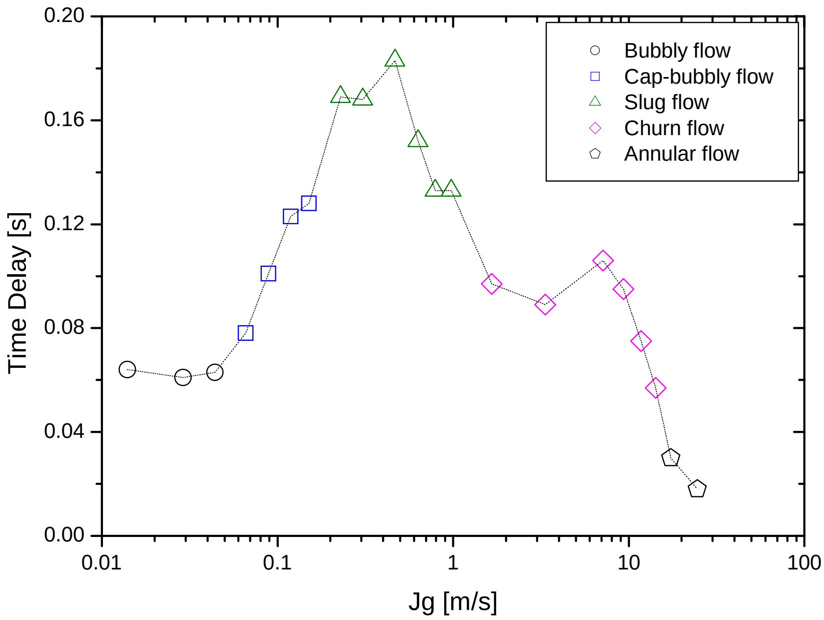

그림 7. 평균상호정보량에 의하여 계산된 지연시간 (J_f = 0.13 m/s)

매립차원의 최적화를 위해 상기 결정된 지연시간에 의거, 차원을 증가시켜가며 민감도 분석을 수행하였다. 그림 8에 나타난 바와 같이 매립차원 3차원, 4차원 20차원, 25차원에 대하여 끌개를 구성하였다. (a)-(d)의 4가지 경우에서 끌개의 개형이 큰 차이가 없음을 알 수 있으며, Takens의 매립차원 이론에 의하여 끌개의 차원이 1.5차원 미만이며, 3차원 만으로도 충분히 위상공간을 구성할 수 있음을 알 수 있다.

그러나 지연시간의 민감도 분석은 그림 9에 나타난 바와 같이 매우 민감함을 알 수 있다. 그림 9는 J_g = 0.63 m/s, J_f = 0.13 m/s인 경우에 평균상호정보량으로 판정한 지연시간이 0.14초임을 감안하여, 다른 지연시간을 임의로 부여하여 테스트 하여 얻은 결과이다. 이를 보면 고정점(fixed point)이 확연히 나타나는 것은 평균상호정보량이 결정한 값 근처이고 이를 벗어날 경우 대각선상에 모두 머무르게 되거나, 전체영역으로 확대됨을 알 수 있다.

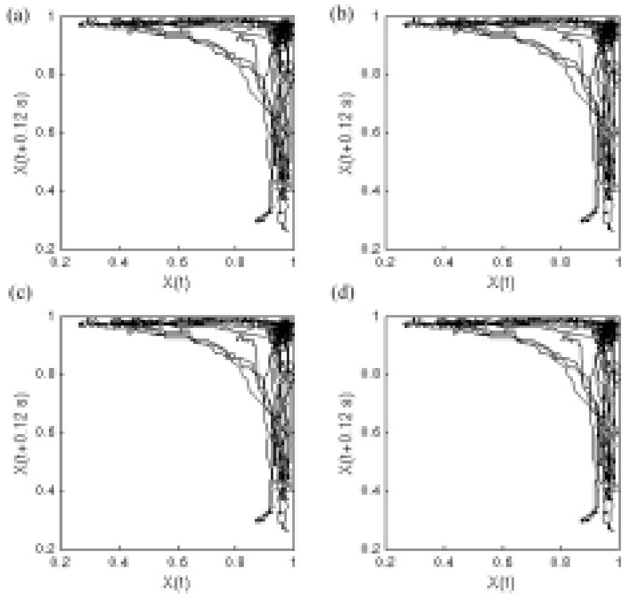

그림 8. 매립차원의 변화에 따른 끌개 개형의 변화(J_g = 0.06 m/s, J_f = 0.25 m/s); (a) d = 3; (b) d = 4; (c) d = 20 (FNN에 의해 계산된 매립차원); (d) d = 25

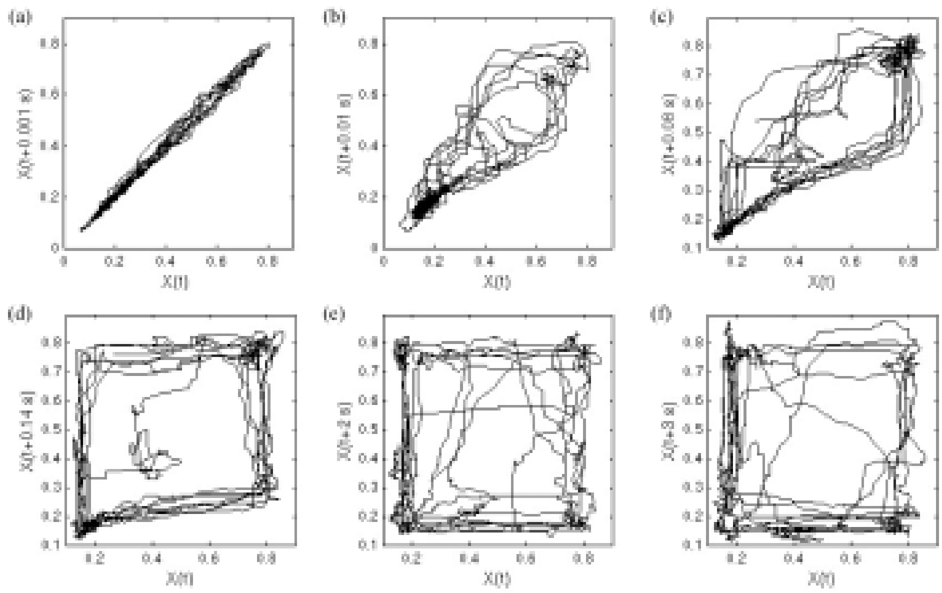

그림 9. 지연시간의 변화에 따른 끌개 개형의 변화(J_g = 0.63 m/s, J_f = 0.13 m/s); (a) τ =0.001 초; (b) τ =0.01 초; (c) τ =0.08 초; (d) τ =0.14 초(평균상호정보량에 의해 계산된 지연시간); (e) τ =2 초; (f) τ =3 초

4.2 위상공간상의 끌개 궤적의 유동패턴에 따른 특성 분석

상기의 방법으로 지연시간과 매립공간의 최적화를 이룬 후, 유동패턴에 따른 위상공간상의 끌개 궤적의 특징을 보기 위한 작업을 수행하였다. 대표적인 특징을 보기 위해 그림 10에 나타난 유동지도상에서 액체의 속도를 0.13 m/s로 일정하게 하고 기체의 속도를 서서히 변화시키면서 나타나는 대표패턴의 신호를 가지고 각 대표 조건에 해당하는 위상공간 궤적을 검토하였다. 그림에서 대표 조건 점은 검은 동그라미로 표현하였다.

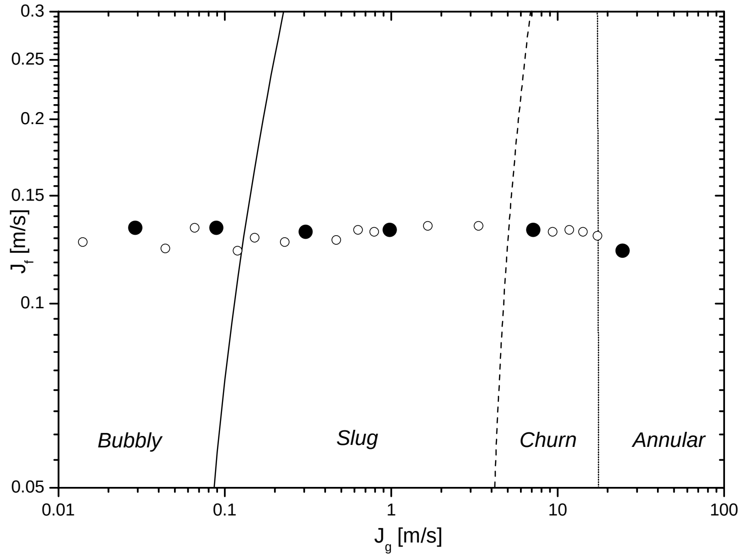

그림 10. 유동지도상의 대표패턴 분포

기포류 2개, 슬러그류 2개, 처언류 1개, 환형류 1개의 대표패턴에 대한 2차원 위상공간상의 끌개의 모습을 그림 11에 나타내었다. 기포류의 경우 2차원 공간상에 (0.8, 0.8)의 주변 영역에서 특이점 끌개가 나타난다.(그림 11(a)) 이러한 특이점 끌개는 캡 기포류로 천이함에 따라 2방향으로 퍼져나가며(b), 슬러그류로 진행함에 따라 대칭형의 준주기 끌개가 구성된다(c). 이러한 준주기 끌개는 처언류로 천이해가는 경계영역에서 기포류에서 나타난 특이점 끌개를 서서히 상실한 후, 공간상의 (0.2, 0.2)의 주변 영역으로 모여가기 시작한다(d). 처언류로 천이함에 따라 이러한 특성은 점차 강해지며(e), 환형류로 가서는 기포류와 정 반대 영역에 특이점 끌개가 나타난다(f). 환형류에서 구성되는 끌개는 기포류에서의 끌개가 원형으로 구성되는 것과는 다르게 2방향으로 뻗어나가는 작은 날개를 가지고 있음이 확인된다. 이는 환형류에서 나타나는 작은 액적과 분무의 거동이 만들어내는 특성으로 판단된다.

이러한 끌개의 특성을 끌개를 구성하는 점의 분포로 표현하면, 그림 12와 같은 회기지도(return map)로 나타난다. 이를 보면, 회기지도에서의 밀도가 유동패턴의 변화에 따라 위상공간상에 다르게 나타나는데, 그림 12에서는 이를 2차원 공간상의 점의 분포로 표현하였고, 그림 13에서는 밀도를 축으로 도입하여 3차원 PDF의 모양으로 나타내었다. 그림 13을 보면, 기포류의 경우 기포류 지역에 단일 첨두가 나타나며, 캡 기포류에서 2차

원의 사각구조를 형성하기 시작하여, 슬러그류에서는 첨두가 환형류 지역에 돌출이 되고, 마침내 환형류에서는 환형류 지역의 단일 첨두가 나타나는 것을 알 수 있다.

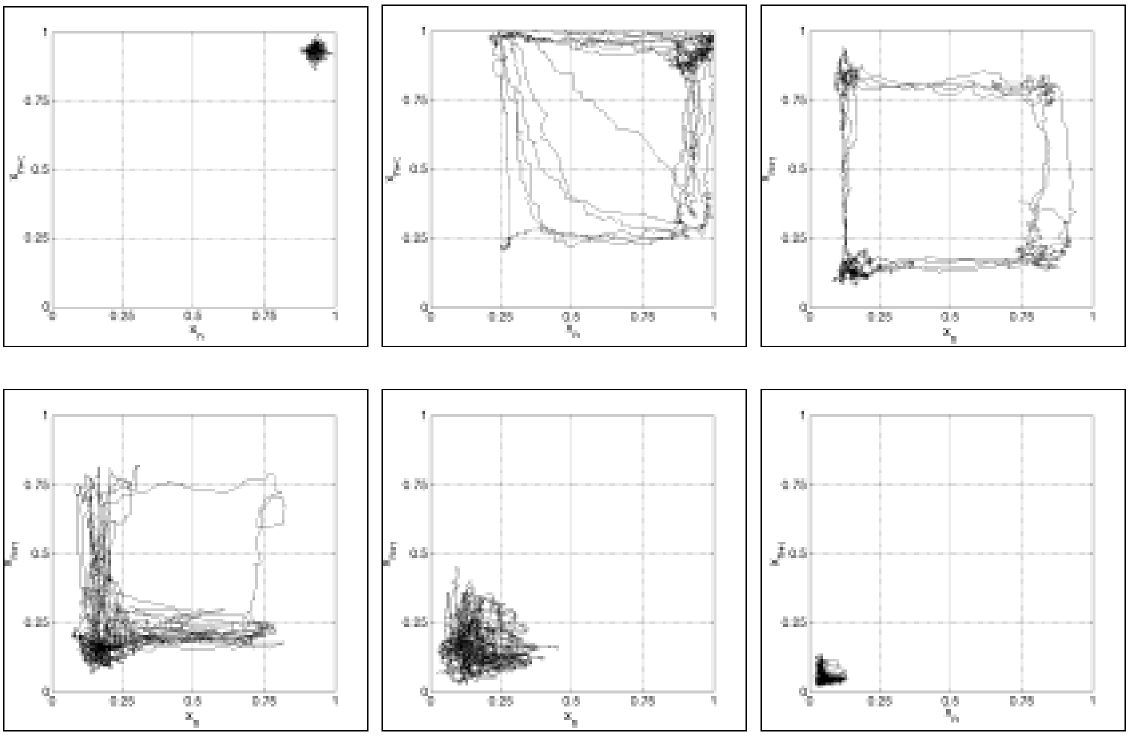

그림 11. 2차원 위상공간상에 나타내어진 끌개의 형상 (a) 기포류; (b) 캡 기포류; (c) 슬러그류; (d) 슬러그류(처언류로 천이하는 과정의 슬러그류); (e) 처언류; (f) 환형류

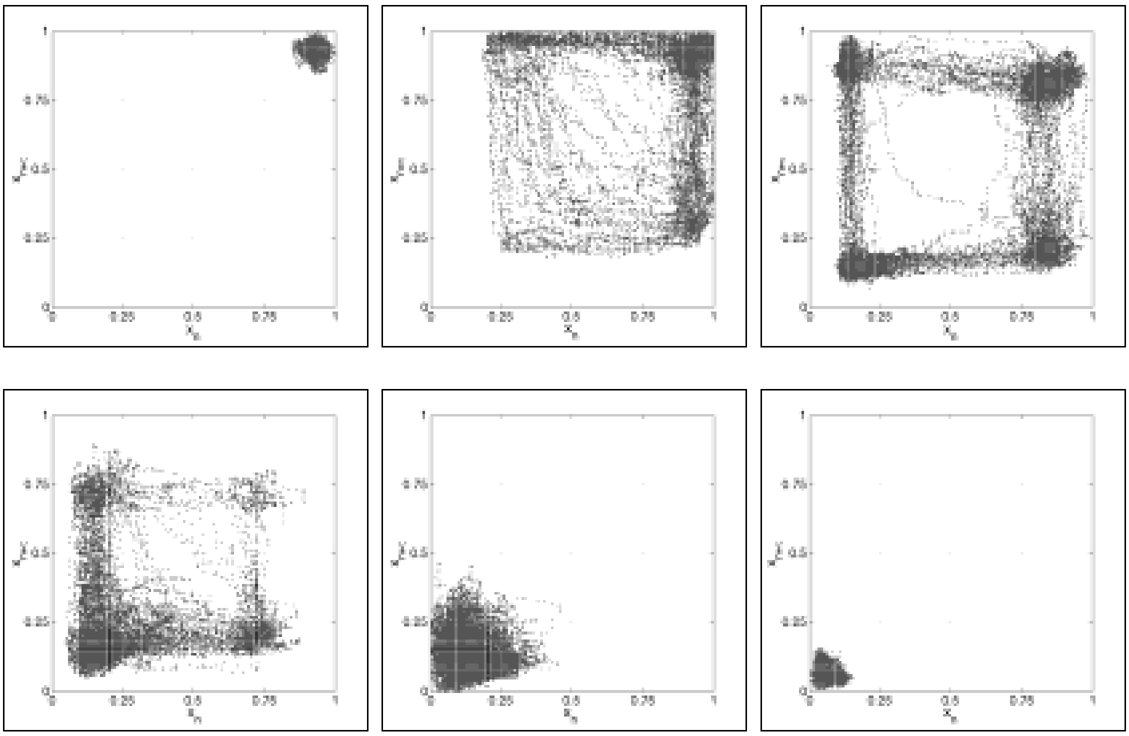

그림 12. 구성된 끌개의 위상공간에 대한 밀도 (a) 기포류; (b) 캡 기포류; (c) 슬러그류; (d) 슬러그류(처언류로 천이하는 과정의 슬러그류); (e) 처언류; (f) 환형류

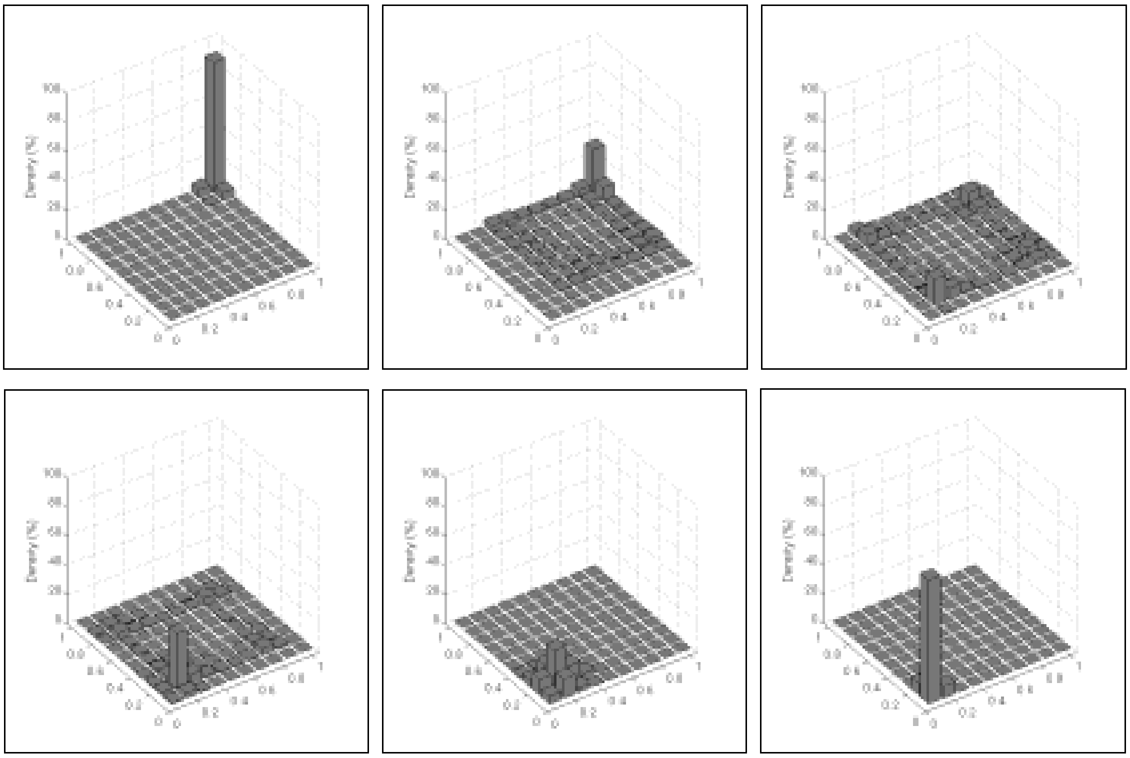

그림 13. 3D PDF 형상 (a) 기포류; (b) 캡 기포류; (c) 슬러그류; (d) 슬러그류(처언류로 천이하는 과정의 슬러그류); (e) 처언류; (f) 환형류

4.3 수직 이상유동의 패턴분류

이상의 회기지도(return map)상의 분포에 대하여 대표 패턴의 분석을 통해 다음의 패턴 인식 규칙을 생성하였다. 그림 14와 같이 정의된 영역에 대하여 2차원 사영평면의 궤적 농도를 검토하였다.

조건 1: Region 1에 90%이상 분포하면 기포류이다.

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

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

그림 15는 본 연구에 의해 구성된 내경 25.4mm 관에서 분류된 유동양식선도이다. 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.

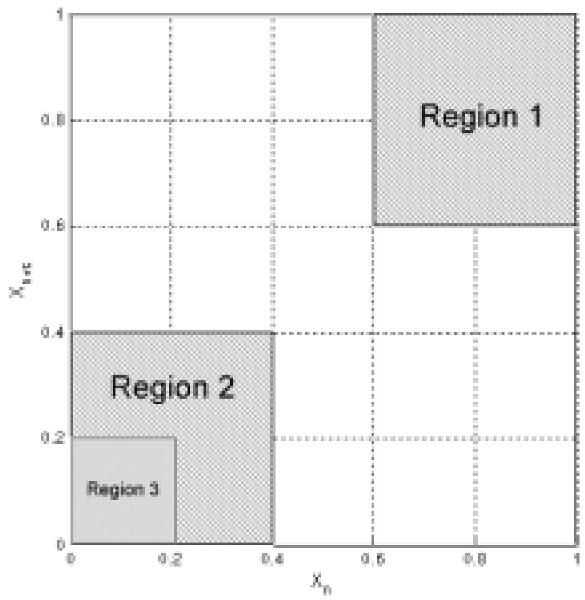

그림 14. 유동패턴분류를 위한 2 차원 사영 위상공간상에서의 특징영역

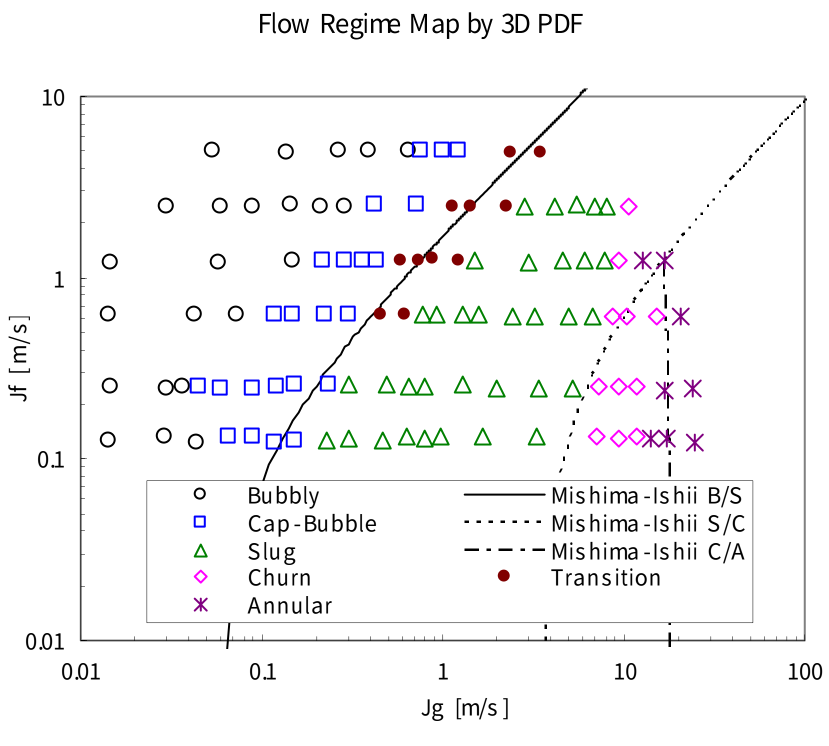

그림 15. 내경 25.4mm 관에서의 유동양식선도

그림 16은 내경 50.8mm 관의 유동양식선도이다. 50.8mm에서의 경우 Mishima-Ishii 모델의 기포류에서 슬러그류로의 천이 영역이 캡 기포류의 영역의 가운데를 관통하고 지나는 것을 볼 수 있다. 이는 내경이 2배로 증가하면서 안정적인 형상의 테일러 기포를

가지는 슬러그류(stable slug)를 생성하기 위해서는 더 많은 기체량이 필요함을 나타낸다. 즉, 내경이 큰 관에 있어서 캡 기포류의 영역은 기포류와 안정적인 테일러 기포를 가지는 슬러그류의 천이 영역으로 고려할 수 있음을 알 수 있다. 슬러그류에서 처언류로의 천이영역 또한, Mishima-Ishii 모델과 일치하고 있으며, Mishima-Ishii 모델에서의 관 내경의 변화에 따른 효과가 동일하게 고려되어지고 있음이 확인된다. 이를 통해, 본 위상공간의 끌개 농도에 의해 발현된 각 유동패턴 지표는 유동 패턴분류에 매우 효과적임을 확인했다.

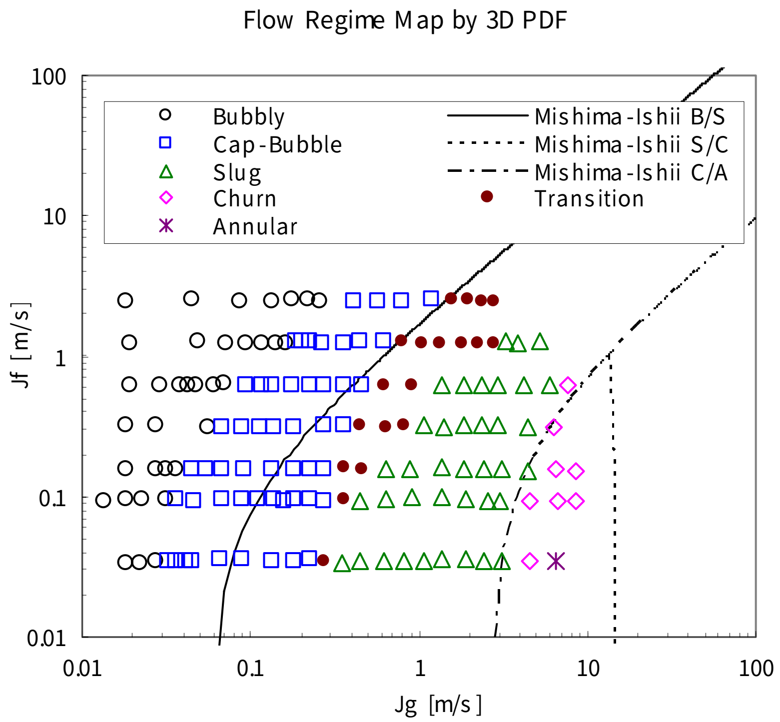

그림 16. 내경 50.8mm 관에서의 유동양식선도

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 위상공간에서의 끌개 구성을 통한 수직 상향 이상유동에서의 유동패턴분류 및 유동영역선도의 구성을 수행하였다. 위상공간의 구성은 기포 분류의 임피던스 시계열을 평균상호정보량 기법에 의한 지연시간설정과 FNN 기법에 의한 매립차원 결정으로 이루어졌다. 이에 대한 민감도 분석을 통해 지연시간이 결과에 영향을 많이 끼침을 확인하였다. 유동패턴 지표를 확인하여 사영공간에서의 궤적밀도를 구하고, 이를 PDF의 인덱스로 환원하여, 각 영역에서의 유동패턴 판정규칙을 제시하였다.

내경 25.4mm, 50.8mm 수직관 유동의 임피던스 신호를 이용하여 유동패턴판정을 하여, 기존의 판정결과와 잘 맞으며 Mishima-Ishii의 천이 조건이 만족됨을 확인하였다. 이를 통해 본 비선형 카오스 분석기법이 유동패턴 판정에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

용어설명

j = 겉보기속도(superficial velocity)
τ = 지연시간(time delay)
d = 매립차원(embedding dimension)
f = 액체(liquid)
g = 기체(gas, air)

감사의글

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

참고문헌

Barnea D., Shoham O., Taitel Y., 1980. Flow pattern characterization in two-phase flow by electrical conductance probe, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 6, pp. 387-397

Drahos J., Tihon J., Serio C., Lubbert A., 1996. Deterministic chaos analysis of pressure fluctuations in a horizontal pipe at intermittent flow regime, The Chemical Engineering Journal Vol. 64, pp. 149-156

Haberstrah R.E., Griffith P., 1965. The slug-annular two-phase flow regime transition, ASME Paper No. 65-HT-52

Hubbard M.G., 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.

Ishii M., 2003. Objective characterization of interfacial structure in two-phase flow, NURETH-10, Seoul, Keynote Lecture, KL-01.

Jones O.C., 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

Lee J.Y., Kim N.S., Ishii M., 2003. An instantaneous flow regime identification using probability distribution function and feed forward neural network, A00309, NURETH-10, Seoul.

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

Mishima K., Ishii M., 1984. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes. Int. J. Heat and Mass Transfer 27, pp.723-737.

Mi Y., Ishii M., Tsoukalas L.H., 2001. Flow regime identification methodology with neural networks and two-phase flow models, Nucl. Eng. Des. 204, pp. 87-100.

Solomon J. V., 1962. Construction of a two-phase flow regime transition detector, M. Sc. Thesis, Mech. Eng. Dept. MIT.

Takens F., 1984. On the numerical determinination of the dimension of an attractor, Phys. Rev., E49, p126

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