

2상유동의 실험적 기법



이 상 천
영남대학교 기계공학과 교수

● 1952년생
● 2상유동 및 열전달, 상변화 열전달, 열교환기 설계 및 응용에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

2상유동 현상의 연구에서 실험적 해석은 다른 공학분야와 마찬가지로 매우 중요하다. 일 반유동 현상을 묘사하기 위한 수식화 과정에는 질량, 운동량과 에너지의 세가지 보존법칙을 적용하여 기본 지배방정식을 우선 유도한다. 이 경우 기본방정식에 나타난 미지변수(unknown parameter)의 수가 방정식의 수보다 항상 많기 때문에, 단상유동의 경우, 뉴턴의 점성법칙과 푸리에의 열전도법칙 등과 같은 constitutive law를 이용하여 방정식을 closed form으로 만든다. 그러나 기액 2상유동의 경우 단상유동에 관한 지배 방정식을 적용할 때 계면의 형상과 분포에 관한 정보를 미리 알 수 없기 때문에 현실적으로 지배방정식을 "closed form"으로 만들 수 없으며 따라서 순수 이론적인 해석이 불가능하다는 결론에 도달한다.

이 문제에 관한 간단한 예를 소개하면 평행 평판 사이를 흐르는 수평 2상성층유동이 있다고 생각하자. 이 경우 기액상이 분리되어 흐르므로 각 상에 대한 속도분포를 구하려면 각 상에 대한 Navier-Stokes 방정식과 상 사이 계면에서의 jump condition으로 수학적인 모델을 세울 수 있다. 그러나 이 경우 액상의 두께 또는 기공률(void fraction)에 관한 사전 지식이

주어지지 않으면 이 문제에 대한 해를 이론적으로 구할 수 없다. 기공률이나 interface area concentration 등과 같이 2상유동의 해석에 필수적인 정보를 확립하기 위하여 2상유동 분야의 연구자들이 끊임없이 노력하여 왔다. 한편 2상유동 모델링에서 일반적으로 많이 사용하고 있는 1차원 해석에는 기공률, 계면마찰 계수, 압력강하, 벽면전단응력, entrainment rate 등 유동변수에 대한 지식이 필요하다. 그러나 이러한 정보나 지식은 이론적으로 구할 수 없고 경험 또는 실험에 근거한 closure law 또는 실험식(empirical correlation)으로 제공 되어야 한다.

이러한 예에서 알 수 있듯이 2상유동의 이론 해석을 위한 closed law가 아직까지 확립되어 있지 않기 때문에 실험에 의존하는 방법밖에 없으며 따라서 2상유동변수에 대한 실험적 연구는 끊임없이 진행되어 왔다. 2상유동에서 다루어지는 주요 유동 변수로는 유동양식, 압력강하, 유량, 기공률, 액막두께, 계면응력, 계면파구조, 난류강도, entrainment량과 열 및 물질전달계수 등으로 매우 다양하다. 이 가운데는 압력강하, 유량, 속도분포, 난류강도 등 단상유동에서도 취급되는 물리량이 있는 반면 기공률, 계면파구조, 계면응력, entrainment rate 등 2상유동에만 국한된 유동변수들이 있다.

본 글에서는 현재까지 개발된 2상유동의 유

동변수들의 측정기법을 소개하고 이들의 장단점을 토의하고자 한다. 제한된 지면관계로 2상 유동에서 가장 중요한 몇가지 유동인자에 관한 내용만을 소개할 것이며 응축 또는 비등과 같이 상변화를 동반하는 2상유동에 관한 내용은 제외하고자 한다. 상변화 열전달을 수반하는 2상유동에 관한 측정기법은 Hewitt⁽¹⁾을 참고하기 바란다.

2. 실험기법의 소개방법

2상유동에서 다루는 실험기법을 소개할 때 두가지 방안이 있을 수 있다. 즉 측정시 사용하는 방법에 따라 소개하는 방안과 측정대상 변수에 따라 소개하는 방안으로 크게 나눌 수 있다. 전자의 경우 전기적 방법(electrical technique), 광학적 방법(optical technique), 초음파 방법(ultrasonic technique), 전기화학적 방법(electrochemical technique) 등이 포함되며 이들의 응용분야, 기술적인 문제, 사용시의 장단점을 소개하는 방안이다. 한편 측정대상 변수에 따라 소개하면, 압력강하, 유량, 기공률, 액막두께, 계면응력 등 2상유동의 주요 유동변수의 측정기법과 그들의 장단점을 서술하는 것이다. 이 두가지 방식은 각각 나름대로 이점이 있으나 본 글에서는 후자의 방식을 택하였다. 그 이유는 이 분야에 익숙하지 않는 독자들이 비교적 쉽게 이해하도록 배려한 것이며 또 2상유동과 관련된 장치나 기구를 설계할 때 유동변수에 관한 지식이 주로 필요하기 때문이다.

2상유동에서 다루는 유동변수는 매우 다양하나 본 글에서는 가장 기본적이고 널리 활용되는 몇 가지만 다루려고 한다. 여기에는 유동양식판별, 건도 및 질량유량 측정법, 기공률 측정법, 압력강하 측정법이 포함된다. 이 외의 부차적인 유동변수들은 지면관계로 다음에 소개할 기회를 가질 것이다.

2상유동에서 기액상의 밀도차이 때문에 유동변수가 시간에 따라 항상 변동한다. 정상상태

의 경우 유동변수는 변동치의 시간에 대한 평균치로 나타내나 유동상태를 정확하게 서술하기 위하여 변동치의 통계적 처리가 필요한 경우가 있으며 최근에 들어 와서는 이러한 방법의 가치가 더욱 중요하게 인식되고 있다. 그 이유는 물리량의 평균화과정에서 유동현상에 관한 중요한 정보가 상실될 수 있기 때문이다. 본 글에서는 평균화된 변수 뿐 아니라 변동치의 특성을 통계적으로 처리하여 판독하는 유동변수도 함께 다루려고 한다.

3. 유동양식의 판별법

2상유동양식을 정확하게 판별하는 것은 매우 어려운 과제이나 많은 연구가 진행됨에 따라 신뢰할 만한 방법들이 개발되고 있다. 초기에는 육안관찰이나 사진판별에 의하여 유동양식을 결정하였다. 이 방식은 유동속도가 낮고 천이과정이 서서히 이루어 지는 경우에는 효과적이거나 유동속도가 빠르거나 상분포의 변화가 활발한 경우에는 판별의 객관성을 신뢰할 수 없는 문제점이 있으며 특히, 관이 투명하지 않을 경우에는 전혀 사용할 수가 없다. 이에 따라 유동의 물리적 특성을 파악하여 유동양식을 판별하기 위한 노력이 시도되었다. 이 가운데 정압측정법, 압력강하측정법, X선감쇠법(x-ray attenuation method), 전기전도도측정법 등을 소개하고자 한다. 이 방법들은 근본적으로 과도신호의 통계적인 해석을 통하여 이루어진 것으로 주로 진폭특성을 나타내는 확률밀도함수와 주파수특성을 표시하는 power spectral density function을 분석하여 유동양식을 판별하였다.

3.1 정압측정법

2상유동의 정압은 관내 기액상의 분포상태, 속도에 따라 변동하며 이 값의 교란성분의 특성은 유동양식과 밀접한 연관이 있는 것으로 믿어진다. 이를 바탕으로 Hubbard 와 Dukler⁽²⁾는 수평 2상유동에서 정압교란치의 power

spectral density function을 분석하여 유동양식을 예측하였다. 이 방식에 의한 측정결과에 따르면 정압치의 power spectral density function이 유동양식에 따라 세가지의 기본형태를 가지는 사실을 알 수 있다. 즉, 성층 또는 환상유동과 같은 분리유동에서는 $f=0$ 에서 최대 밀도를 가지며 주파수가 증가함에 따라 밀도함수가 급격히 감소한다. 반면에 플러그 또는 슬러그유동으로 대표되는 간헐유동(intermittent flow)에 대한 분포도에서는 최대치가 액체슬러그가 지나가는 평균 주파수의 값을 가지며 좌우대칭의 형상을 가진다. 그리고 분산유동의 경우 밀도함수가 band-limited white noise의 형상과 유사한 경향을 보이고 있다. 이들은 환상분산유동(annular dispersed flow)과 파상환상유동(wavy annular flow)의 경우에는 앞서 언급한 기본 분포형태가 중첩되는 형상을 가지는 사실을 밝혀냈다. 그러나 이 방식을 환상유동과 성층유동, 플러그유동과 슬러그유동을 구체적으로 명시하기에는 미흡한 것으로 판단된다. 정압측정에 의한 유동양식의 판별법은 외란(external perturbation)에 의한 잡신호(noise)가 존재할 때 취약점이 있다. 즉 펌프나 압축기 등 유동을 야기시키는 외부 원동력에 잡신호가 존재할 때 압력변화기를 거쳐 나오는 출력에 중첩되어 나타나므로 참신호(true signal)를 검출하는 문제가 어려운 과제이다.

3.2 압력강하 측정법

압력강하 측정을 통한 유동양식의 판별은 Tutu⁽³⁾, Matsui⁽⁴⁾, 그리고 이 등^(5,6)에 의하여 이루어졌다. 이 방식은 유동에 가하여 지는 외란에 의한 잡신호가 상쇄되므로 정압측정에 의한 판별법의 문제점을 보완하고 있다. Tutu와 Matsui는 수직관내 두 지점에서의 순간압력강하치의 진폭특성을 통계적으로 분석하여 유동양식을 판별하였는데 이 경우 압력강하치는 마찰성분, 운동량 변화성분 및 중력성분을 포함하는 값이다. 반면 이 등은 수평관내 오리피스를 설치하여 관의 단면적의 갑작스런 축소를

통한 압력강하치의 통계적 해석을 통하여 유동양식을 구명하였다.

Tutu의 실험결과에 따르면 기포유동의 경우 순간압력강하치의 확률밀도함수는 $1-\alpha$ (α 는 평균기공률) 부근에 단일정점을 가지는 형상을 나타내고 있으며 슬러그 유동의 경우, 두개의 정점을 가진다. 압력강하치가 큰 값에서 더 높은 정점치를 가지는데 이것은 액체슬러그가 지나가는 빈도가 Taylor기포가 통과하는 빈도보다 많기 때문이다. 또 환상유동에서는 기포유동과 마찬가지로 단일정점은 지나 정점에서 압력강하치는 기포유동의 값보다 작다. 반면 처연유동에서의 확률밀도함수는 기상속도가 큰 경우에는 오히려 환상유동의 분포형상과 유사하여 일관된 경향을 가지지 못하는 사실을 보여주고 있다. 한편 Matsui는 압력강하의 측정위치와 측정점 간격에 대한 영향을 고찰하여 흥미있는 사실을 제시하고 있다. 그는 입구에서 1.115(m), 1.126(m), 1.326(m)와 1.337(m)의 네 지점 사이의 순간압력강하를 측정하여 유동양식에 따른 확률밀도함수를 구하였다. 이 결과는 동일 유동양식에서 압력강하의 측정위치와 측정간격에 따라 확률밀도함수가 달라지는 사실을 보여주고 있는데 불행하게도 이 방식의 신뢰성에 문제점이 제기되고 있다. 이 사실은 기포, 슬러그, 거품(froth), 환산유동, 분무(mist)유동에 대한 실험결과에 대하여 모두 동일하게 나타났다. 따라서 압력강하교란치의 통계적 해석을 통하여 유동양식을 판별하는데 압력차를 측정하는 두 지점의 간격도 중요한 인자가 될 것으로 판단된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 2상유동에서 단면적의 갑작스런 축소에 의한 국소압력강하치를 측정하여 유동양식을 판별하기 위한 시도가 이루어졌다^(5,6). 관내 유로의 단면적을 갑작스럽게 축소시킬 때 유동양식의 변화가 초래되거나 압력강하치의 특성은 유동양식과 독자적인 상관관계를 가질 것으로 판단하는데 기포유동의 경우 이러한 사실이 실험으로 확인되었다⁽⁵⁾. 이상천 등⁽⁶⁾은 이러한 개념을 바탕으로 오리피스

스내의 국소압력강하치의 통계적 해석을 통한 유동양식의 판별을 시도하였다. 수평관내 물과 공기를 매질로 2상유동을 형성하여 각 유동양식에 따른 압력강하치의 확률밀도 함수를 구하였다. 사용한 오리피스는 ASME 표준규격에 의하여 아크릴로 제작되었는데 관직경 26mm, 판직경 14.2mm, 판두께 3.2mm, 직경비 0.546, 판경사각 45°인 칼날(sharp-edged) 형식이다. 이들의 실험결과에 따르면 기포유동의 경우 확률밀도가 높은 단일정점을 가지며 분포폭이 매우 좁은 사실을 알 수 있다. 기포유동에서는 기공률이 매우 작으며 비교적 연속적으로 기포들이 유동함으로 교란성분이 크지 않는데 이 사실이 반영되고 있다. 플러그유동의 확률밀도함수는 단일정점을 가지며 정점에서의 압력강하치보다 작은 영역에서는 완만하게 증가하나 큰 영역에서는 급격히 감소하는 비대칭성의 모양을 가진다. 플러그 유동은 비교적 길이가 긴 기포와 이것을 둘러싼 액체덩어리가 교대로 나타나는 유동이며 기포간의 결합과 이산이 비교적 활발하므로 순간압력강하치의 진폭이 커지며, 따라서 확률밀도함수의 분포폭이 비교적 넓다. 이 유동에서 액체덩어리가 지나갈 때는 교란성분이 거의없는 높은 압력강하치를 가지므로 정점을 중심으로 비대칭성의 모양을 나타낸다. 슬러그유동은 액체덩어리와 기포간의 상호작용이 활발하므로 진폭이 크고 비교적 규칙적인 순간압력강하곡선을 가진다. 따라서 확률밀도함수의 분포폭은 매우 넓으며 밀도의 변화는 비교적 완만하다. 그리고 성층유동의 확률밀도함수는 기포유동의 그것과 매우 비슷한 형태를 갖고 있으나 정점에서의 압력강하치가 영 부근의 값을 가진다. 성층유동은 일반적으로 액체 겹보기속도가 0.15(m/s)이하인 영역에서 관찰되므로 평균압력강하치가 매우 낮으며, 또 액상과 기상사이의 계면이 비교적 매끈하므로 시간 및 공간에 대한 기공률의 변화가 미미하며 압력강하교란치의 크기가 매우 작다. 이들의 실험결과에 따르면 기본 유동양식의 경우, 순간압력강하치의 확률밀도함수로

판별이 가능하다는 사실을 알 수 있다.

3.3 전기전도도 측정법

기상과 액상의 전도도가 상이하다는 사실을 이용하여 유동양식을 판별하려는 시도가 이루어졌다. 이 방법은 Solomon⁽⁷⁾과 Griffith⁽⁸⁾에 의하여 처음 사용되었으나 Barnea 등⁽⁹⁾에 의하여 개량된 방법이 제안되었다. 이 장치는 세 개의 탐침으로 구성되어 있으며 탐침 A는 벽면과 동일면을 이루는 electrode로 환상유동의 액막을 탐지하며 탐침 B는 그 끝을 제외하고는 테프론으로 절연된 탐침으로 기포를 검출하는 기구이다. 반면 탐침 C는 절연되지 않은 탐침으로 성층유동을 탐지하기 위하여 수평관의 바닥 부근에 위치하고 있다. 성층유동의 경우 A와 B에서의 출력은 0이며 C에서는 0이 아닌 출력치를 갖는다. 평활한 계면을 가지는 경우 비교적 균일한 출력치를 나타내나 파상성층유동의 경우 시간에 따라 변하는 교란성분치가 존재한다. 플러그와 슬러그유동의 경우 액상과 기상이 뚜렷이 구분되는 출력치를 보이거나 슬러그유동의 경우에는 액체슬러그에 포함된 기포 때문에 심한 변동을 수반하고 있다. 반면 환상유동과 파상환상유동에서는 거의 액상과 접촉하고 있는 상태를 나타내고 있다. 분산기포유동에서는 순간적으로 액상과 기상의 접촉이 교차됨으로 매우 떨리는 출력치를 보여 주고 있다. 이 방식은 장치제작비용이 저렴하고 조작성이 간편하나 성층 또는 기포유동을 탐지하는 탐침들의 적합한 위치선정을 위하여 사전에 유동특성에 관한 조사가 이루어져야 하는 번거로움이 있다.

3.4 X선 감쇠법

Jones와 Zuber⁽¹⁰⁾는 단일빔의 X선을 2상유동관에 투사하여 기공률의 순간변화치를 측정하여 유동양식을 판별하였다. 즉, X선을 2상유동에 통과시키면 기상과 액상의 분포상태에 따라 X선의 투과강도가 달라지는 사실을 이용하였다. 기공률이 크면 기상의 분포가 넓기 때

문에 투과강도가 높으며 이 값이 낮으면 액상에 흡수되는 광량이 증가하며 투과강도가 낮아진다. 따라서 투과선의 강도는 순간기공률과 밀접한 연관이 있으며 유동양식의 판별을 위한 척도로 삼을 수 있을 것이다. 이 사실을 이용하여 순간투과강도 또는 순간기공률의 확률밀도함수를 구하여 기포, 환상, 슬러그유동을 구분하였다. 기포유동은 기공률이 낮은 범위에서 단일정점을 가지는 형상을 보이며 환상유동은 비교적 기공률이 큰 범위에서 단일정점을 가진다. 또 슬러그유동에서는 두개의 정점을 가지는 분포를 갖는다. 이들이 투과강도에서 환산한 기공률이 0과 1사이의 범위를 벗어나는 경우가 있는데 이들은 그 이유를 X선방사 시스템장치에 고유하게 존재하는 잡신호 때문이라고 설명하였다. 이 방식은 장치가 복잡하고 고가이며 조작에 고도의 숙련이 필요하기 때문에 널리 활용화되지 못하고 있다.

4. 건도 및 질량유량 측정법

2상유동에서 액상과 기상의 질량유량을 아는 것은 유동해석에 필수적이다. 이를 위하여 기액상의 총질량유량과 건도(quality)를 측정하는 방법이 보편적이다. 만약 상변화를 수반하는 2상유동과 같이 총질량유량을 사전에 알고 있다면 건도만을 측정하여 기액상의 유량을 각각 계산할 수 있는데 이 경우 차압기구(differential pressure device)를 사용하여 측정할 수 있다. 총질량유량과 건도를 동시에 측정하기 위한 기법으로는 다중감지기 측정법(multiple-sensor method), 트레이서기법 그리고 Karlsruhe에서 개발한 진질량유량계(true-mass flowmeter) 등이 있다.

4.1 차압기구 측정법

오리피스 또는 벤추리관과 같이 유로의 단면을 축소 또는 확대할 때 발생하는 압력강하치는 총질량유량과 건도의 함수로 나타나는데 이 결과를 이용하여 총질량이 주어질 때 건도를

측정한다. 이 경우 2상유동의 압력강하치는 다음과 같이 주어진다⁽¹¹⁾.

$$\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_L} = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (1)$$

여기서 ΔP_L 은 액상이 차압기구를 통과할 때 갖는 압력강하치이며, X 는 Martinelli parameter이다. Chisholm⁽¹¹⁾은 변수 C 를 다음의 관계식으로 구하였는데

$$C = \frac{1}{S} \left[\frac{\rho_L}{\rho_G} \right]^{1/2} + S \left[\frac{\rho_G}{\rho_L} \right]^{1/2} \quad (2)$$

이 식에서 S 는 기액상 속도비(slip ratio)이며 균질유동(homogeneous flow)으로 가정할 때 $S=1$ 이다. 따라서 식 (1)과 식 (2)에서 2상유동의 압력강하 ΔP_{TP} 를 측정하여 총유량과 건도 가운데 하나를 알 경우 나머지를 계산할 수 있다. 이 방법은 기구가 간편하고 측정이 용이하다는 장점이 있으나 과도유동이나 상변화를 수반하는 2상유동에 적용하기에는 문제점이 있다. 특히 압력강하치가 심한 교란치를 수반하면 측정장치의 높은 정밀도가 요구된다. 이 방법을 이용하여 총유량 또는 건도를 측정한 연구결과는 Harris⁽¹²⁾, Frank 등⁽¹³⁾, Ishigai 등⁽¹⁴⁾에서 찾을 수 있다.

4.2 다중감지기 측정법

이 방식은 총질량유량과 건도의 동시 측정을 위하여 2개 이상의 감지기를 사용하는 것으로 원자력 발전시스템의 안전성 연구와 관련하여 널리 사용되고 있다. 이 측정법은 spool piece라 불리는 장치내에 몇개의 기구로 구성된 것으로 보통 gamma densitometer, drag body, turbine meter 등으로 이루어져 있다. 이 가운데 gamma densitometer는 기공률에 관한 자료를 제공하며, drag body를 통하여 발생하는 유동의 운동량플럭스와 터빈 미터를 이용하여 측정하는 유동속도(또는 체적플럭스)에서 총유량과 건도를 결정한다. 터빈 미터에서의 유동속도는 총질량유량과 건도의 함수로 나타나는데 이들의 상관관계를 표시하는 모델로는

Silverman & Goodrich 모델⁽¹⁵⁾, Aya 모델⁽¹⁶⁾, 그리고 Rouhani 모델⁽¹⁷⁾이 있다. Oak Ridge National Laboratory에서 정상상태유동하에 이 모델들을 비교실험한 결과, 수평유동의 경우에는 Aya 와 Rouhani 모델이 비교적 정확하며, 하향유동의 경우, 기액상 속도비가 1보다 작을 때 ($U_c < U_L$)는 Silverman & Goodrich 모델, 1보다 큰 경우는 Aya와 Rouhani 모델이 더 나은 결과를 나타내었다.

이 방법에서 가장 중요한 문제는 감지기에서 검출된 신호와 질량유량 및 건도의 정확한 상관관계를 구하는 것이다. 앞에서 언급한 모델들은 이론적인 방법에 의하여 얻어진 식으로 실제로 측정시에는 정밀한 검증이 필요하다. 또 하나의 문제점으로는 유로에 설치된 기구나 감지기에 의하여 유동에 방해가 야기시키는 점을 들 수 있다. 이러한 점을 고려하여 기구 또는 감지기의 설치위치 사이에 충분한 간격을 유지하는 것이 바람직하다.

4.3 트레이서 기법

총유량 및 건도측정을 위하여 2상유동내에 트레이서를 삽입하는 방법이 있다. 이 방법은 단상유동의 경우 널리 이용되어 왔으나 James⁽¹⁸⁾, Stothart⁽¹⁹⁾ 그리고 Brown⁽²⁰⁾ 등에 의하여 2상유동에 응용되었다. 이 방법은 잠재성이 큰 것으로 평가되고 있으나 2상유동의 완전한 응용을 위하여 몇 가지 난점이 있다. 즉, 유동영역을 통하여 트레이서의 균일한 분포를 이루도록 해야 하며 트레이서를 주입하는 지점과 측정지점 사이에서 유동양식과 유동속도의 변화를 초래할 수 있다는 점이다. 최근에 이러한 문제점을 해결하기 위하여 PNA(Pulsed Neutron Activation)를 이용한 방법이 개발되었다^(21,22) 이 방법에서는 중성자 발생장치에서 생성된 14MeV 중성자 펄스를 유동관내로 방사시킨다. 이 중성자는 유체(물)내에 존재하는 O¹⁶과 반응하여 N¹⁶의 방사성 동위원소를 생성하는데 이 원소의 반감기는 7.24 초이다. 이 붕괴과정중에 6.1MeV의 감마선을 방출하는데

이것을 검출하여 질량유량을 결정하는 방식이다. Kehler⁽²²⁾에 의한 실험결과, 속도측정오차가 4% 이내인 것으로 확인되었다. 이 방식은 정확도와 용통성에서 장점이 있으나 중성자 발생장치, 검출장치 그리고 차폐장치의 가격이 비싸며 설치 및 사용시 고난도의 기술이 필요하다는 단점이 있다.

4.4 진질량유량계

이 유량계는 2상유량을 측정하기 위하여 Karlsruhe에서 개발한 것으로 터빈식유량계의 원리를 응용한 것이다⁽²³⁾. 질량유량이 \dot{M} 인 2상유체가 반지름 r , 회전수 w 인 회전자를 가진 다중날개를 통과할 때 고정자의 토크 T 는

$$T = \dot{M} r^2 w \quad (3)$$

으로 나타난다. 따라서 고정자의 토크를 측정하면 질량유량을 결정할 수 있는데 고정자와 회전자의 기계효율을 고려하면 측정된 토크는 $\dot{M}r^2w$ 보다 약 6%정도 낮은 것으로 보고되었다. 이 유량계의 구조는 복잡하나 유량측정원리는 매우 간단하기 때문에 원자력 발전시스템의 블로우다운 실험에 응용되었다. 현재까지 개발된 이 유량계의 용량은 5(kg/s)가 최대인데 앞으로 실제로 응용하기 위하여 더 큰 용량의 개발이 필요하다. 이 방법은 2상유동이 유량계를 통과할 때 유동의 특성이 바뀌기 때문에 블로우다운 실험과 같이 관측구에 설치하여 측정하여야 한다.

5. 압력강하 측정법

2상유동에서의 압력강하는 시스템내의 펌프 동력을 결정하는 주요인자로 측정기구로는 단상유동과 마찬가지로 마노미터 또는 압력변환기를 주로 이용한다. 일반적으로 관내 두 지점에 압력공을 뚫어 압력차를 측정하는데 단상유동에서 경험하지 못하는 몇가지 점에 유의하여야 한다. 첫째, 기액상 성분이 혼합하여 흐르기 때문에 압력공의 위치선정에 주의를 기울여야 하며 둘째로는 기액상의 큰 밀도차 때문에

압력강하교란치가 매우 심하다는 점을 고려하여야 한다. 특히 응축이나 비등을 동반하는 2상유동의 압력강하 측정시에는 연결관내 유체의 상변화에 따른 영향을 피해야 하는 문제가 발생할 수 있다.

5.1 마노미터 이용법

마노미터를 이용한 차압측정법은 가장 편리하고 보편적인 방법이다. 이 방법은 단상유동에서 주로 사용되고 있으나 2상유동에서도 널리 응용되고 있다. 그러나 2상유동에서는 단상유동과는 달리 몇가지 문제점에 유의하여야 한다. 압력공의 위치가 하나의 상과 접촉되도록 선정하여야 하며 압력공과 마노미터 사이의 연결관내 매질유체가 기액상이 혼합되는 일이 없도록 하여야 한다. 또 상당한 교란성분을 수반하는 2상유동에서는 마노미터의 측정유체의 높이에 큰 변동을 야기시키므로 정확한 측정이 이루어질 수 없다. 따라서 마노미터법은 성층 또는 기포유동과 같이 압력강하의 교란성분치가 비교적 작은 경우에만 활용되고 있다. 특히 상변화를 동반하는 2상유동의 경우 연결관내 증기가 유입되어 응축되는 경우가 흔히 발생되므로 세심한 주의가 필요하다.

5.2 압력변환기 이용법

압력강하의 측정시 상당한 변동치를 수반하는 경우에는 차압압력변환기를 이용하면 정확한 측정이 가능하다. 2상유동의 압력강하 측정시 주로 사용되는 차압압력변환기로는 응답성이 좋은 reluctance-type transducer와 strain-gauge type transducer가 있다. 이들의 감도(sensitivity)는 full scale의 0.3% 이내이며 최대 작동온도는 비등을 수반하는 2상유동에게 사용될 수 있는 300°C 이상이다. 그러나 압력변환기를 이용하여 측정하는 경우에도, 마노미터 이용법과 마찬가지로 압력공과 압력변환기의 연결관의 유체를 가능한 한 단일상(single-phase)으로 유지하여야 한다. 압력변환기를 이용할 때 주의하여야 할 점은 연결관

이 긴 경우, 연결관이 응답성에 영향을 주기 때문에 독립된 두 개의 압력변환기를 압력공 가까이 설치하여 두 출력신호의 차이로 압력강하를 측정하는 것이 바람직하다.

6. 기공률 측정법

기공률은 2상유동의 고유한 유동인자로 유동 해석에 필수적으로 나타나는 변수이다. 이것은 기액상 2상유동의 상분포를 나타내는 것으로 압력강하의 계산을 위하여 매우 중요하다. 기공률은 유로전체의 단면적에 대한 기상이 차지하는 단면적의 비로 정의되는데 2상유동에서는 공간 및 시간에 따라 이 값이 항상 변하므로 평균치로 보통 표시한다. 유동해석에 사용하는 기공률은 기술 및 장치상의 한계로 인하여 다음과 같은 몇가지로 나누어 측정되고 있다.

- (a) 관 평균기공률(channel-average fraction)
- (b) 단면적 평균기공률(cross-sectional area averaged void fraction)
- (c) 현 평균기공률(chordal-average void fraction)
- (d) 국소기공률(local void fraction)

기공률의 측정은 2상유동 연구자의 주요 목표 가운데 하나였으며 그동안 이에 관하여 많은 논문들이 발표되었다. 이 가운데 대표적인 방법으로 quick-closing valve 기법, radioactive absorption 기법, impedance gauge 기법, conductivity probe 측정법등인데 본 글에서는 이들에 관하여 간략하게 소개하고자 한다.

6.1 Quick-Closing Valve 기법

2상유동관의 출입구에 밸브를 설치하여 한 순간에 양쪽 밸브를 잠금으로서 관내에 잔류한 기액상의 체적비로 기공률을 결정하는 방법이다. 이 방법으로 측정된 기공률은 관 평균기공률로 관 전체의 공간 및 시간의 평균기공률을 의미한다. 이 방식으로 측정된 기공률에 대한 보고는 Serizawa⁽²⁴⁾와 Agostini와 Premoli⁽²⁵⁾에서 찾을 수 있다. 저압의 경우, 기계적으로

연결된 밸브들을 수동작동시키며, 고압의 경우 슬레노이드 밸브를 보통 사용한다. 이 방식은 밸브가 닫히는 시간동안 관내 유동양식의 변화 때문에 측정오차를 유발할 수 있으며 밸브를 잠그는 순간 갑작스런 압력과도현상 때문에 장치에 손상이 가해질 위험이 있는 것이 문제점으로 지적되고 있다.

6.2 Radioactive Absorption 기법

감마선이나 X선과 같은 방사선이 물질을 통과할 때 광전지 효과나 Compton 산란효과 등에 의하여 그 강도가 감소된다. 초기강도가 I_0 인 방사선이 물질에 흡수되는 과정은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$I = I_0 \exp(-\mu z) \quad (4)$$

여기에서 μ 는 선형흡수계수, z 는 방사선이 통과한 거리를 의미한다. 따라서 방사선이 통과할 때 기액상의 분포율에 따라 강도가 달라지므로 이 사실을 이용하여 현 평균기공률을 구할 수 있다. 즉 관내에 액체와 기체가 완전히 채워져 있을 때 출력강도를 I_L 과 I_G 라 하면 2상유동시의 현 평균기공률, α 는 다음의 관계식으로 나타낸다.

$$\alpha = \frac{\ln I - \ln I_L}{\ln I_G - \ln I_L} \quad (5)$$

이 상관식을 이용하여 기공률을 측정하는 논문들이 많이 발표되었다. 그 가운데 감마선을 이용한 실험으로는 Thomas 등.⁽²⁶⁾, X선을 이용한 실험은 Martin⁽²⁷⁾과 Lahey⁽²⁸⁾에서 찾을 수 있다. 이 측정법은 장치가 고가이고 방사선을 취급할 때의 안전문제가 난제로 제기되고 있다. 또 방사선이 통과할 때 계면이 방사선의 진행 방향에 수직일 경우에만 식 (4)이 적용될 수 있는데 일반적으로 기포와 접한 액상의 계면이 수직면을 이루지 못할 경우가 많기 때문에 산란효과로 인한 구조적인 측정오차를 수반할 수 있다.

6.3 임피던스 게이지 기법

2상유동의 임피던스는 상의 분포와 농도에

따라 달라진다는 사실을 이용하여 기공률을 측정하려는 시도가 이루어졌다. 균질분산기포유동의 경우 기공률, α 는 Maxwell⁽²⁹⁾의 상관식에서 계산할 수 있다.

$$\alpha = \left[\frac{A - A_c}{A + 2A_c} \right] \left[\frac{C_G + 2C_L}{C_G - C_L} \right] \quad (6)$$

여기에서 A 는 임피던스의 역수인 어드미턴스(admittance)이며 A_c 는 게이지가 액체상태에 잠겨 있을 때의 어드미턴스이다. 또 C_G 와 C_L 은 기액상의 전도율을 나타낸다. 만약 기상속에 액적이 분산되어 흐를 경우, 기공률은 다음의 관계식으로 주어진다.

$$\alpha = 1 - \left[\frac{AC_L - A_c C_G}{AC_L + 2A_c C_G} \right] \left[\frac{C_L + 2C_G}{C_L - C_G} \right] \quad (7)$$

이 임피던스 측정법은 Spigt⁽³⁰⁾, Merilo 등.⁽³¹⁾에 의하여 널리 사용되었으며 이의 측정을 위하여 여러가지 형태의 전극판이 개발되었다. 임피던스 측정법에 관하여 상세한 설명은 Olsen⁽³²⁾에 나타나 있다.

이 방법의 가장 큰 문제점은 유동양식에 따라 출력의 감도가 너무 예민하다는 데 있다. 즉, 유동양식이 바뀔 때는 동일한 기공률일지라도 임피던스 값의 분산이 심할 수 있다는 실험결과가 보고되어 있다⁽³³⁾. 그리고 관의 경사도에 따라 이러한 분산이 나타나는 문제점도 지적되었기 때문에 세심한 검증실험이 사전에 필요하다.

6.4 전도율 탐침 측정법

국소기공률을 측정하기에 가장 적합한 측정법이 전도율 탐침을 이용하는 방법이다⁽³⁴⁾. 이 방법은 끝부분만 제외하고 나머지는 절연된 탐침을 2상유동내에 삽입하고 관내에 다른 전극판을 부착하여 두 부분의 전도여부를 검사하여 기공률을 측정하는 방식이다. 이 경우 액상은 물과 같이 전도성이어야 한다. 탐침과 전극판 사이에 전압을 걸어 줄 때 탐침의 끝이 전도성 액상과 접촉하는 경우에만 전류가 통하므로 이를 검사하여 기공률을 결정한다. 즉, 총시험 시간에 대한 기상과 접촉한 시간의 비가 그 지

점에서의 국소기공률로 나타난다. 이 방법은 싱층 또는 환상유동과 같이 분리유동에서 액막의 두께를 측정할 때 주로 많이 이용되었다. 이 방식은 장치가 간단하고 조작성이 간편한 장점이 있으나 탐침이 2상유동내에 삽입되므로 유동에 교란을 야기시킬 수 있는 단점이 있다. 또 이 방법에서 가장 큰 문제점은 탐침끝이 액체 또는 기체와 떨어질 때 발생할 수 있는 hysteresis effect인데 이를 제거하기 위한 trigger circuit가 개발되어 큰 효과를 거두기도 하였다⁽³⁵⁾. 2상유동내에 원하는 위치에서 국소 기공률을 구할 수 있으며 탐침이송장치를 이용하면 현 평균기공률, 단면적 평균기공률까지 구할 수 있는 이점이 있다.

7. 맺음말

본 글에서는 2상유동의 주요 인자들에 대한 측정기법을 소개하였다. 이를 위하여 가장 중요한 기본인자인 유동양식 판별법, 건도 및 질량유량 측정법, 압력강하 측정법과 기공률 측정법을 다루었다. 이 외에도 2상유동의 실험인자는 다양하나 본 글에서는 지면관계로 열전달 계수, 계면파구조, entrainment rate, 계면 및 벽면전단응력과 액적 및 기포의 크기 등 부차적인 유동변수의 측정법을 다루지 못한 것을 아쉽게 생각하며 다음에 소개할 기회를 기대한다.

참 고 문 헌

- (1) Hewitt, G. F., 1978, "Measurement of Two Phase Flow Parameters", Academic Press.
- (2) Hubbard, M. G. and Dukler, A.E., 1966, Proceedings of Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, Stanford University.
- (3) Tutu, N. K., 1982, Int. J. Multiphase Flow, 8, 443.
- (4) Matsui, G., 1984, Int. J. Multiphase Flow, 10, 711.
- (5) Lee, S. C. and Bankoff, S.G., 1988, "Particulate Phenomena and Multiphase Transport", 5, 163, Hemisphere, N. Y.
- (6) 이 상천 외 2인., 1987, "오리피스 순간압력강하의 통계해석을 통한 수평 2상유동양식의 결정", 대한기계학회논문집, 제11권, 제5호, pp.810~818.
- (7) Solomon, J.V., 1962, "Construction of a Two-Phase Flow Regime Transition Detector", M. S. Thesis, M.I.T.
- (8) Griffith, P., 1964, ASME Paper 64-WA/HT-43.
- (9) Barnea, D. et al., 1980, Int. J. Multiphase Flow, 6, 387.
- (10) Jones, O. C. and Zuber. N., 1975, Int. J. Multiphase Flow, 2, 273.
- (11) Chisholm, D., 1972, "The Compressible Flow of Two-Phase Mixtures through Orifices, Nozzles and Venturi Meters", NEL Rept. 549, pp.66~79, Natl. Engineering Lab., East Kilbride, Scotland.
- (12) Harris, D. M., 1967, "Calibration of Steam Quality Meter for Channel par Measurement in the Two-Phase Prototype SGHW Reactor", European Two-Phase Flow Group Meet., Bournemouth.
- (13) Frank, R. et al., 1977, "Determination of Mass Flow Rate and Quality Using a Turbine Meter and a Venturi", Proc. Conf. Heat Fluid Flow Water Reactor Safety, Manchester, pp. 63~68.
- (14) Ishigai, S. et al., 1965, "Measurement of Copponent Flows in a Vertical Two Phase Flow by Making Use of the Pressure Fluctuations", Bull. JSME 8, pp. 375~390.
- (15) Silverman, S. and Goodrich, L.D., 1977, "Investigation of Vertical, Two-Phase Steam-Water Flow of Three Turbine Models", Rept. NUREG-0375, U.S. Nuclear

- Regulatory Commission.
- (16) Aya, I., 1975, "A Model to Calculate Mass Flow Rate and Other Quantities of Two-Phase Flow in a Pipe with a Densitometer, a Drag Disk and a Turbine Meter", Rept. ORNL-TM-47591, Oak Ridge Natl. Lab.
- (17) Rouhani, S. Z., 1964, "Application of the Turbine-Type Flow Meters in the Measurement of Steam Quality and Void", Symp. In-Core Instrumentation, Oslo.
- (18) James, R., 1961, "Alternative Methods of Determining Enthalpy and Mass Flow", Proc. United Nations Co. Sources of Energy. Geothermal Energy. 2, pp. 265~267.
- (19) Stohart, P. H., 1972, "The Measurement of Two-Phase Flow Parameters by Salt Tracer Injection", CEGB Rept No CERL/RD/L/N 21/72.
- (20) Brown, D. J. et al., 1975, "Non-Equilibrium Effects in Heated and Unheated Annular Two-Phase Flow", ASME-75-WA/HT 7.
- (21) Kehler, P., 1978, "Two-Phase Flow Measurement by Pulsed Neutron Activation Techniques", Argonne National Laboratory, Report ANL-NUREG-CT-78-17.
- (22) Barschdorff, D. et al., 1978, "Mass Flow Measuring Techniques in Transient Two Phase Flow", In "Transient Two-Phase Flow", 835-867, AECL, Toronto.
- (23) Serizawa, A., 1974, "Fluid Dynamic Characteristics of Two-Phase Flow", Ph.D.thesis, Kyoto Univ., Japan.
- (24) Agostini, G. & Premoli, A., 1971, "Valvola di Intercettazione Rapida per Imprego a Agua-Vapore", Energ. Nucl. Milan 18 : 295~310.
- (25) Thomas. et al., 1977, "Quarterly Progress Report on Blowdown Heat Transfer", Separate Effects.
- (26) Martin, R., 1972, "Measurements of the Local Void Fraction at High Pressure in a Heating Channel", Rept. BT 269-38, Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble, France.
- (27) Lahey, R. T., 1977, "USNRC Sponsored Instrumentation Research at Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), Proc. Meet. Review Group Two-Phase Flow Instrumentation, Rept. NUREG-0375, U.S.Nuclear Regulatory Commission.
- (28) Maxwell, J., 1881, "A Treatise on Electricity and Magnetism," clarendon, Oxford, UK
- (29) Spigt, C. L., 1966, "On the Hydraulic Characteristics of a Boiling Water Channel with Natural Circulation", Technical Univ. of Eindhoven Rept.
- (30) Merilo, M. et al., 1977, "Void Fraction Measurement with a Rotating Electric Field Conductance Gauge", J. Heat Transfer 99 : 330-332.
- (31) Olsen, H. O. 1967, "Theoretical and Experimental Investigation of Impedence Void Meters", Kjeller, Norway, Rept. 118.
- (32) Bouman, H. et al., 1974, "Some Investigations of the Influence of the Heat Flux on the Flow patterns in Vertical Boiler Tubes", European Two-Phase Flow Group Meeting, Harwell, June, Paper A2.
- (33) Danel, F. and Delhaye, J. M., 1971, "Sonde Optique pour Mesure du Taux de Presence Local en Ecoulement Diphasique", Mes. Regulation Autom., pp. 99~101.
- (34) Lee, S.C., 1983, "Stability of Steam-Water Countercurrent Stratified Flow", Ph.D Dissertation, Northwestern University, Evanston, IL.