

# 2 상유동의 연구개요



이 상 용  
한국과학기술원 기계공학과 교수

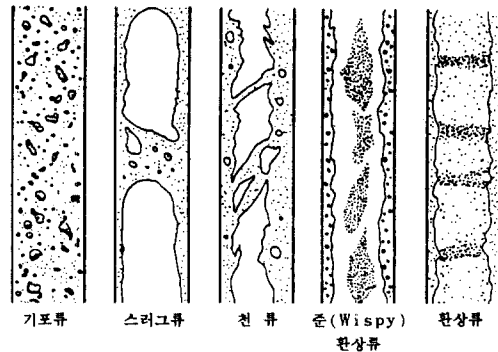
● 1951년 생  
● 열전달 및 2 상유동을 전공하였으며 특히 액체 분무에 관련된 실험 및 해석에 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리말

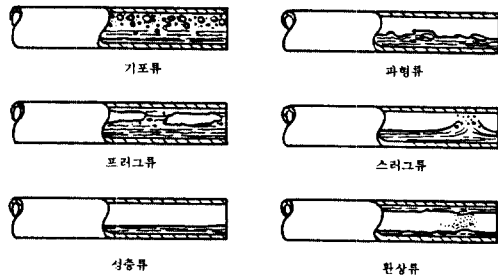
기체, 액체 고체상(相)이 섞여서 함께 흐르는 유동을 다상유동(multiphase flow)이라고 하며, 그 중 2 개의 상이 섞여서 흐르는 경우를 2상유동(two-phase flow)이라고 일컫는다. 다상유동의 현상은 일상적인 생활에서도 많이 접하며(예컨대, 눈, 비가 내리는 현상, 안개, 황사, 스모그 현상 등) 특히 열전달과 관련하여 비등 및 응축을 수반하기도 한다. 특히 기계공학적인 시스템에의 응용측면에서는 다상유동의 전문지식이 증발기, 응축기 등 각종 열교환기기의 설계에 적용되므로 본 해설에서는 기체-액체(gas-liquid) 2 상유동으로 그 내용을 한정하기로 한다. 2상(two-phase)유동은 동일한 화학적성분을 가진 물질이 서로 다른 상을 유지하면서 공존하여 흐른다는 점에서 2개의 다른 화학성분으로 구성된 2성분(two-component)유동(예컨대 공기-물의 혼합유동)과는 엄밀하게는 다르나, 두 유동은 제반 형상이 유사하고, 해석 및 실험방법면에서도 많은 유사성이 있어서 총괄적으로 두 유동을 모두 2상유동이라고 칭하고 있다<sup>(1)</sup>. 본 해설에서는 이러한 기체-액체 2상유동분야에서 다루는 연구내용을 개괄적으로 소개하고자 한다.

## 2. 2상유동의 유동양식

2상유동은 기본적으로 2개의 서로 다른 상이 섞여 흐르므로, 2상간의 밀도차이, 속도차이, 그리고 표면장력등에 의하여 여러가지의 유동

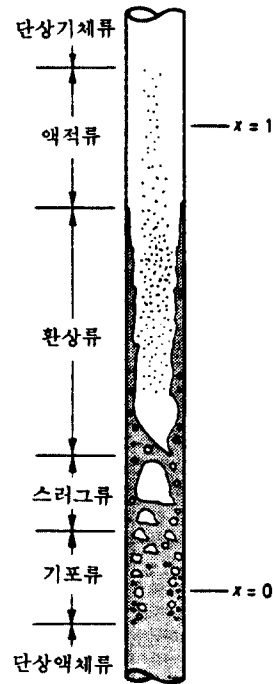


(a) 수직유동

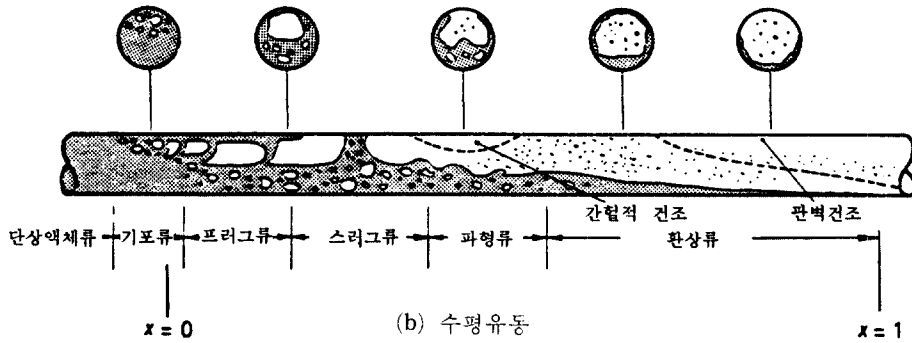


(b) 수평유동

그림 1 유동양식(단열)



(a) 수직유동



(b) 수평유동

그림 2 유동양식(중발)

양식(flow pattern)이 나타난다. 이 유동양식은 수직관과 수평관, 가열 및 단열상태에 따라서 크게 좌우되며, 그 개략도가 그림 1과 2에 소개되어 있다<sup>(2)</sup>. 수직유동양식은 대체로 기포류(bubbly flow), 슬러그류(slug flow), 천류(churn flow), 환상류(annular flow), 액적류(drop flow) 등으로 대별되며, 수평유동양식은 기포류, 슬러그류, 플러그류(plug flow),

성층류(stratified flow), 파형류(wavy flow) 및 환상류, 액적류 등으로 대별된다. 그 이외에 각 유동양식의 경계부근에서 위의 유동양식이 혼합되어 나타나는 경우도 있는데, 예를 들어 기포류와 슬러그류가 섞여 흐를 때에는 기포-슬러그류(bubbly-slug flow) 등과 같이 2개의 기본유동 양식을 연결하여 부른다. 이러한 유동양식의 판별은 2상유동현상의 파악과 모델

표 1 주요 무차원 상사 변수 (similarity parameters)

Phase Change No.:	$N_{pch} \equiv \left( \frac{4\epsilon q_o''' a_o}{du_o \Delta H_{fg} \rho_f} \right) \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_g} \right)$
Drift Flux No.:	$N_d \equiv V_{gj} / u_o$
Density Ratio No.:	$N_\rho \equiv \rho_g / \rho_f$
Froude No.:	$N_{Fr} \equiv \frac{u_o^2}{g \lambda} \frac{\rho_f}{\Delta \rho}$
Friction No.:	$N_f \equiv \frac{f(1+\epsilon)}{d} \left( \frac{1 + X(\Delta \rho / \rho_g)}{[1 + X(\Delta u / u_o)]^{1/4}} \right) \left( \frac{a_o}{a_i} \right)^2$
Orifice No.:	$N_o \equiv K [1 + X^{3/2} (\Delta \rho / \rho_g)] \left( \frac{a_o}{a_i} \right)^2$
Subcooling No.:	$N_{sub} \equiv \left( \frac{\Delta H_{sub}}{\Delta H_{fg}} \right) \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_g} \right)$
CHF No.:	$N_q \equiv q_c''' / \epsilon q_o'''$
Time Ratio No.:	$T_1^* \equiv (\alpha_{s1} \epsilon / u_o \delta^2)_1$
Heat Source No.:	$Q_{si} \equiv \frac{q_{s1}''' C_{pf}}{\rho_{s1} C_{ps1} u_o \Delta H_{sub}}$

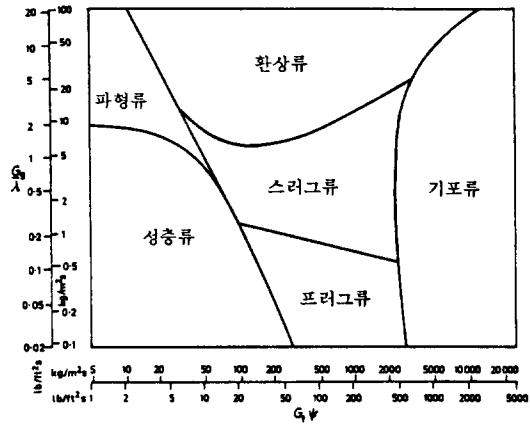


그림 3 Baker 유동양식 도표 (수평유동)

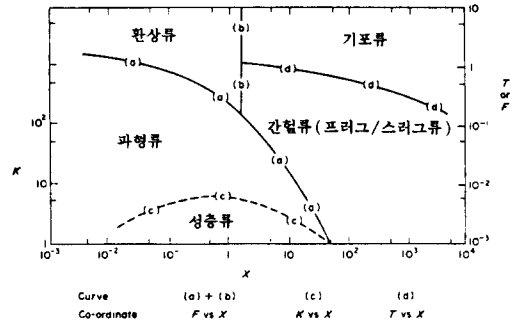


그림 4 Taitel 과 Dukler의 유동양식 도표 (수평 유동)

링의 측면에서 매우 중요하므로, 그간 많은 연구가 시도되었다. 전술하였듯이 유동양식은 2상의 물성치와 함께 유로(flow channel)의 기하학적 형상이나 배열에 따라서 크게 지배되므로 한두개의 변수로 간단히 예측하기는 어려우나, 몇가지의 경우로 나누어 주요한 지배변수들의 조합으로 2차원 도표를 만들수 있으며 이를 유동양식 도표(flow pattern map)라고 한다. 유동양식 도표의 대표적인 것으로는 수평 유동의 경우 Baker 도표(그림 3), Taitel과 Dukler 도표(그림 4) 및 Mandhane 도표(그림 5) 등이 있으며 수직유동의 경우에는 Hewitt와 Roberts 도표(그림 6)등이 소개되어 있다. 이러한 각 도표상의 유동양식의 경계는 확인한 것이라기 보다는 한 유동양식에서 다른 유동양식으로 천이되어 가는 구간이라는 개념에서 이해되어야 하며, 따라서 유동양식 도표는 유동

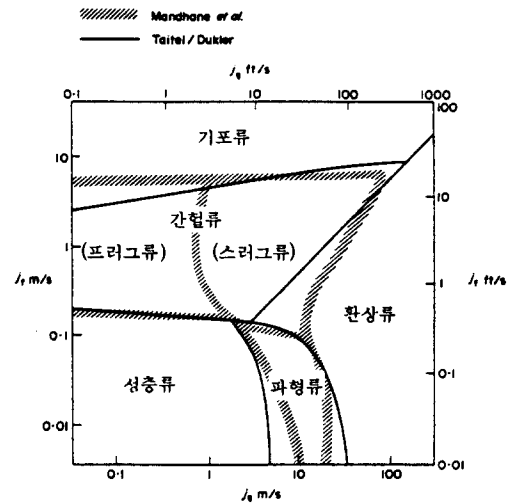


그림 5 Taitel/Dukler의 유동양식 도표와 Mandhane 유동양식 도표비교 (수평유동)

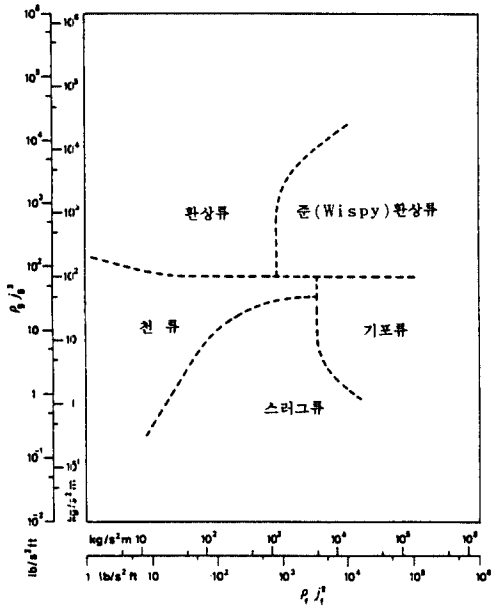


그림 6 Hewitt와 Roberts의 유동양식 도표(수직 유동)

양식을 주요 지배변수들로부터 추정하는데 개략적인 지표(guideline)로 사용되어야 한다. 따라서 정확한 유동양식의 판별은 적용에 따라서 그때 그때 측정에 의존하며, 이러한 의미에서 정확한 2상유동 측정기술이 필요하게 되는 것이다. 2상유동 양식에 대한 연구는 각 경우에 대해서 여러가지가 소개되어 있으나, 그중 Dukler와 Taitel<sup>(3)</sup>에 의해서 비교적 상세히 정리되어 있다.

### 3. 2상유동의 해석적 접근방식

2상유동 연구의 궁극적인 목표는 다른 유체 역학 및 열전달의 경우와 같이 2상유체의 유동에 따른 압력의 강하, 열 및 물질의 전달, 화학반응을 수반하는 연소현상등을 예측하고 제어할 수 있도록 하는 것이며, 이를 위하여 주어진 지배변수 또는 조건들에 따른 속도, 온도, 압력 및 농도분포 등을 구체적으로 구하는 것이다. 2상유동을 일단 수식화하는데 가장 문

제가 되는 것은 2상간에 속도와 밀도가 큰 차이를 가진다는 사실이다. 이에 따라서 기체상과 액체상 각각에 대해서 국소순간 상 방정식(local instantaneous phase equations)(즉, 질량보존 방정식, 운동량보존 방정식, 에너지보존 방정식)과 상태방정식등을 세우고, 2상간의 상호작용을 나타내는 순간 도약조건(instantaneous jump conditions)을 도입하여 이들을 모두 동시에 풀어야 한다<sup>(4,5)</sup>. 이러한 방정식들을 풀기 위해서는 2상의 공간적인 분포상태 및 경계면의 형태가 알려져야 하는데 극히 단순화된 경우(예컨대 단일기포의 성장이나 운동, 완전히 성층화된 2상유동 등)를 제외하고는 이들을 직접 푼다는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서 실제적인 접근으로는 이를 적절히 평균하는 작업(averaging process)이 필요하게 된다. 우선 질량보존 방정식, 운동량보존 방정식 및 에너지보존 방정식에 대해서 시간적인 평균작업을 통하여 각 상의 시간평균(time-averaged) 방정식을 세울 수 있다. 평균작업시의 시간 구간(time interval)은 난류변동(turbulence fluctuation) 시간 스케일 보다는 훨씬 길고, 전반적인 유동변화(overall flow variation) 시간 스케일 보다는 짧도록 선택해야 한다. 이 평균개념은 난류운동을 평균함과 동시에 한 공간을 번갈아 가면서 차지하는 실제의 2상유체를 적절히 정의된 기대치(또는 확률)를 가지면서 한 공간에 존재하는 2개의 연속유체로서 표현하는 것이다. 보통의 2상유동 모델링에서 언급하는 2-유체모델(two-fluid model)은 이에 해당한다. 또 다른 평균방정식으로는 공간평균(space-averaged) 방정식을 얻을 수 있는데, 이는 주어진 공간(또는 미소체적)내에서 각 상에 대해서 속도, 온도, 밀도, 농도등을 평균하는 작업이다. 예컨대, 관(pipe) 단면상에서 단면평균(area-averaged)을 한 경우에는 해당단면상에서 기체와 액체가 각기 서로 다른 평균 속도를 가진 상태로 흘러가는 것으로 보는 것이다. 또한 위의 시간평균방정식을 공간평균한(또는 공간평균방정식을 시간평균한) 혼합평균

(composite-averaged) 방정식을 구할 수 있다. 이러한 평균방정식들은 간단하기는 하나, 평균 과정을 통하여 많은 국부적인 유동정보(local flow informations)들이 사라져 버리며, 이를 보완하기 위하여 수많은 보조관계식(constitutive relations)와 모델들이 필요하게 된다. 이와 관련하여 최근에는 Kataoka와 Serizawa<sup>(6)</sup>가 기-액 2상유동의 난류방정식을 정리하여 발표한 바 있다. 액체상과 기체상의 서로 다른 속도를 고려한 해석적 모델을 분리 유동모델(separated flow model)이라고 부르는 데<sup>(1,2)</sup> 이 모델은 보통의 2상유동 교재에서는 협의의 의미로서 혼합평균 방정식만을 지칭한다. 혼합평균방정식에서 액체상과 기체상의 속도를 같게 놓는 경우를 균질유동모델(homogeneous flow model)이라고 부른다. 이 경우 액체와 기체의 혼합비율에 따라 평균밀도 및 평균점도가 정의된다. 균질유동 모델은 간단하면서도 실제 유동을 부정확하게 예측할 수 있으므로 앞서의 분리유동모델(좀더 정확히는 혼합평균모델)과 절충한 드리프트 플럭스(drift-flux) 모델이 Wallis<sup>(1)</sup> 및 Zuber와 Findlay<sup>(7)</sup> 등에 의해 제안되고 있다. 이 모델은 균질유동모델의 경우와 유사하게 평균적인 물성치와 속도, 엔탈피 등을 정의하여 다루되 기체상의 액체상간의 상대속도의 영향은 드리프트 속도(drift velocity)로 표시하여 각 보존방정식에 도입하였다. 이 경우에도 드리프트 속도에 대한 보조관계식이 필요함은 물론이다<sup>(8)</sup>.

분류유동모델로서 2-유체모델이 아닌 접근방법으로는 궤적모델(trajecory model)이 있다<sup>(9-14)</sup>. 이는 기본적으로 2상 중에서 연속된 상(continuous phase)은 Eulerian 관점에서 접근하고, 분산된 상(dispersed phase)은 Lagrangian 관점에서 접근하는 것이다. 기포류의 경우를 예로 들면, 액체는 Eulerian 관점에서 풀고, 기포는 Lagrangian 관점에서 풀되 2상간의 상호작용을 고려해 주는 것이다. 이 방법은 기포류나 액적류 등에서 유효하게 쓰이나, 개

개의 기포를 따라가면서 계산을 수행하고, 적절한 과정을 통하여 그 효과를 모두 합쳐야하므로 기포의 수가 많아지는 경우에는 계산이 복잡하고 시간이 많이 걸린다. 최근에는 고속대용량의 전산기가 개발됨에 따라서 상당히 많은 경우의 2상유동을 이 모델로서 다룰 수 있으며, PSI-Cell(particle source in cell) 모델, DSF(deterministic separated flow) 모델, SSF(stochastic separated flow) 모델등이 모두 이에 속한다. 여기서 DSF 모델이란 분산된 상(기포 또는 액적)의 운동방정식에 대해 각 상의 평균속도를 사용하고, 난류의 영향을 고려하지 않은 모델이며, 이에 반하여 SSF 모델은 분산된 상의 운동방정식을 풀기 위하여 연속된 상의 순간 속도를 사용하는 것으로 연속된 상의 난류특성에 의해 분산된 상의 운동이 영향을 받는 것을 고려한 것이다. 또한 PSI-Cell 모델은 증발 또는 응축등에 의해서 연속된 상에 질량, 운동량 및 에너지의 생성이 있다고 보고 모델링을 하는 방식이다.

이러한 궤적모델의 사용에도 물론 많은 보조관계식이 필요하며 그 중에서도 저항계수(drag coefficient)에 대한 관계식의 선정은 매우 중요하다<sup>(15,16)</sup>.

마지막의 해석적 접근방식은 유동양식 모델(flow pattern model)<sup>(1,2)</sup>을 사용하는 것이다. 이는 각 유동양식의 범위내에서만 유효한 계산 모델을 생각하는 것으로, 예컨대 Nusselt에 의한 층류응축(laminar condensation) 해석이나 스러그기포 주위의 유동해석, 또는 환상류에서의 마찰압력 손실의 해석 등이 이에 해당된다. 물론 이러한 개개의 유동양식에 따른 모델 해석시에는 모델의 적용범위(즉 유동양식의 경계)를 잘 설정해야 한다.

#### 4. 2상유동의 실험적 접근방식

2상유동에서의 실험은 다른 열, 유체실험의 경우와 같이 크게 두 부류로 나누어 볼 수 있다. 그 중 하나는 2상유동시스템(예컨대, 냉동

기나 공조시스템, 냉·난방 시스템, 원자력 발전소의 1차계통 및 2차계통 등) 전반의 현상을 살펴보기 위한 실험(소위 *integrated experiments*)이며, 이는 시스템 전반에 대해서 운전 조건(또는 지배변수)에 따른 열전달 성능이나 유동불안정(*flow instability*) 등을 알아보는 실험 등이 이에 해당된다. 다른 한 가지는 앞서 언급한 해석적 모델에서의 보조관계식(*constitutive relations*)들을 얻는 작업으로서 2상유동 시스템의 각 구성요소에서의 기공률 분포, 속도분포, 온도분포, 압력분포, 농도분포 등을 직접 측정하고 그 결과를 정리, 해석하는 것이다. 실제로 2상유동에서는 공간내의 한 지점에서 2상이 번갈아 가면서 나타나고 또 2상의 경계면에서 급격한 속도 및 물성치 변화가 나타나므로 측정상의 여러가지 난점이 많다. 단상유동과는 유일하게 다른 변수인 기공률의 측정에는 가장 원시적인 *quick-closing valve* 사용을 비롯해서 저항측정법(*impedance measurement*)<sup>(17)</sup>, 전기검침법(*electrical probes*)<sup>(18)</sup>, 레이저를 이용한 광산란법(*light scattering method*)<sup>(19,20)</sup>, 위상/도플러(*phase/doppler*) 방법<sup>(21~23)</sup>, 그리고 *Gamma-ray densitometer*<sup>(24)</sup> 등 수많은 방법이 소개되어 있으며, 분무입경분포의 측정에는 기공률 측정의 경우에서 언급한 광산란법, 위상/도플러 방법 외에도 액침법(*immersion sampling method*)<sup>(25)</sup> 등이 있다. 이들은 모든 경우의 2상유동에 공통적으로 적용되는 것이 아니며 각 경우에 따라서 적절한 측정방법을 선택해야 한다. 속도의 측정에는 오리피스, 벤투리 메타, 그리고 피토크 등의 사용도 경우에 따라 가능하다. 적절한 개조나 측정결과의 보정이 필요하며, 국부적인 위치에서의 속도측정을 위해서는 *hot-film*, 레이저 도플러 유속계 등의 사용이 가능하다. 온도의 측정을 위해서는 열전대의 사용이 일반적이나, 상변화시의 작은 온도차 측정을 위해서는 *thermistor probe*<sup>(26)</sup>도 사용되고 있다. 모델링을 보조하기 위한 실험에서는 기체와 액체의 경계면의 형상(또는 면적)

측정<sup>(27)</sup>과 각 상내부의 난류량의 측정, 그리고 비평형 상태하에서의 측정등은 2상유동에서는 가장 어려운 실험에 속한다. 2상유동측정에 대한 여러가지 방법은 참고문헌 (28)에 비교적 상세히 소개되어 있다.

## 5. 2상유동의 상사성

축소된 2상유동 시스템에 대한 실험결과를 실제 크기의 2상유동시스템에 공학적으로 적용하려고 할 때 이의 적합성 여부를 판정하는 것은 대단히 중요하다. 바꾸어 말하면, 실제로 대형보일러나 냉·난방시스템, 열교환기, 원자력 발전소나 대형플랜트의 공정시스템내의 2상유동현상을 실험적으로 접근하기 위하여 해당 시스템을 실험실의 규모(*scale*)로 바꾸어 놓을 때는 어떠한 기준을 가지고 소형화해야 한다. 이는 실험실내의 2상유동 실험이, 관(*pipe*)의 예를 들면, 대체로 직경 5cm 이내에서 이루어 지는데 반해 실제 대형시스템의 경우는 직경이 1m에 가까운 것도 있어서 실험결과의 실제 적용에 따른 문제점을 고려하여야 한다. 특히 시스템전반의 시뮬레이션을 위해서는 많은 조건들을 함께 맞추어 주어야 한다. 표 1에서는 이와 같은 2상유동에서의 상사법칙을 만족하기 위하여 고려되어야 하는 대표적인 무차원 수를 열거하고 있다. 여기서 Froude number, friction number, orifice number, time ratio number 및 heat source number는 단상유동에서도 고려되는 무차원수이나, *subcooling number*, *phase-change number*, *drift flux number*, *density ratio number*, 그리고 *CHF number* 등은 2상유동(및 열전달)에 관련되는 수이다. 원칙적으로 크기가 다른 두 시스템이 동일한 시스템적인 유동현상을 나타내기 위하여는 이러한 무차원수가 같도록 하는 것이 관건이다. 그러나 물성치의 영향을 포함한 모든 무차원 수가 같도록 하는 경우에는 축소(또는 확대)된 모델 시스템의 설계가 실제로 불가능하기 때문에(즉 1:1의 스케일링만 가능하다는 무의미한 설계

결과를 얻을 수 있으므로) 모델 실험에서 집중적으로 살펴 보려고 하는 현상을 중심으로 무차원 수들을 단순화하는 것이 필요하다. 예컨대 실제시스템과 동일한 유체를 사용하거나 동일한 압력조건에서 실험하도록 설계하는 일 등이 그것이다. 이에 관한 내용은 참고문헌 (29)부터 (31)까지에 자세히 소개되어 있다.

### 6. 상변화 열전달 관련 2상유동현상

공학적 측면에서의 2상유동은 일부를 제외하고는 상변화를 수반하기 때문에 2상유동과 비등/응축은 항상 동반관계에 있다고 볼 수 있다. 본 절에서는 2상유동에 관련된 열전달 현상을 개괄적으로 논의하고자 한다.

비등현상은 크게 푸울(pool)비등과 대류(convective) 비등으로 나뉘는데 유동자체의 측면에서 볼 때 2상유동은 대류비등과 크게 관련이 있다고 볼 수 있다. 즉, 유동양식 판별에서도 언급했듯이 수직관 또는 수평관내에서 대

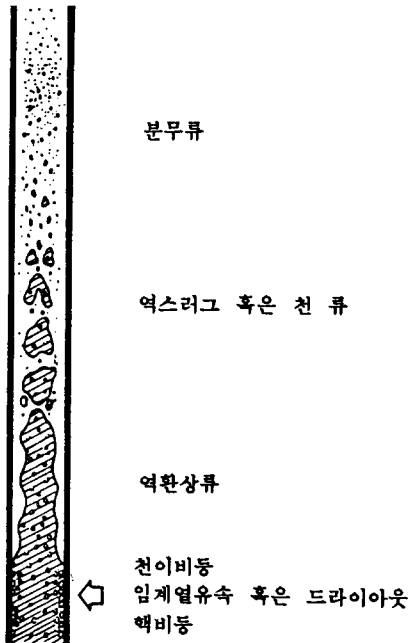


그림 7 드라이 아웃 이후의 유동양식

류비등이 일어날 때(그림 2) 여러가지 유동양식이 나타나며 가열조건에 따라 열전달 및 압력강하가 다르게 나타나게 된다. 반면에 푸울비등은 평균적인 유동(bulk flow) 속도가 작은 대류비등에 해당되므로 비등의 기본현상이나 열전달 측면에서는 대류비등이나 푸울비등 모두 동일하다고 볼 수 있다. 비등현상은 오히려 핵비등(nucleate boiling)과 막비등(film boiling)으로 나누는 것이 더 타당하며 핵비등의 경우에는 유동이 기포류 → 스러그류 → 환상류 → 액적류로 변화해 가는데 반하여 (그림 2(a))막비등의 경우에는 기포류 → 역 환상류(inverted annular flow) → 역스러그류(inverted slug flow) → 액적류(drop flow)로 변화할 수 있기 때문이다(그림 7)<sup>(32,33)</sup>. 핵비등에서는 기포핵의 생성(nucleation) 및 성장(growth)에 대한 연구가 열역학적인 관점에서 많은 관심의 대상이다<sup>(34~36)</sup>. 이와 아울러 포화핵비등 상태의 유동에서의 열전달 관계식으로는 Chen<sup>(37)</sup>의 연구결과가 가장 대표적으로 쓰이는데, 이는 비등과 대류가 열전달에 기여하는 정도를 고려하여 만들어진 관계식이며, 뒤에 Edelman 등<sup>(38)</sup>에 의해 개선되었다. 반면에 과냉상태에서의 핵비등 및 기포생성의 영향에 대해서는 Saha와 Zuber<sup>(39)</sup>의 연구결과가 많이 인용되고 있다. 핵비등은 가열을 시작한 후 비교적 낮은 열 유속조건(그림 8의 B-C 영역 또는 그림 9의 (i)의 조건)에서 나타나나, 열유속이 어느 이상이 되면(그림 8의 D'-F 또는 그림 9의 (ii)의 조건) 벽면부근에서의 활발한 기포의 생성등으로 인하여 고체면에 액체가 직접 접촉할 수 없게 되며 막비등으로 천이한다. 그림 8의 푸울비등에서 볼 수 있듯이 일단 막비등이 발생하면 열유속을 줄이더라도 E점까지는 막비등의 형태를 유지하다가 다시 핵비등으로 바뀌는 (E'점) 히스테리시스(hysteresis) 현상이 나타난다. 막비등 자체에 대한 현상은 고체면과 액체가 직접 접촉하지 않고 기체막이 경계층과 같은 형태로 존재하므로 기포(또는 기체)는 기체막과 액체 경계면에서 발생하는

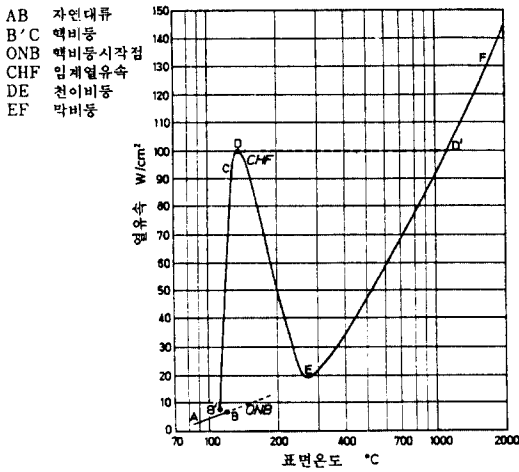


그림 8 푸울 비등곡선

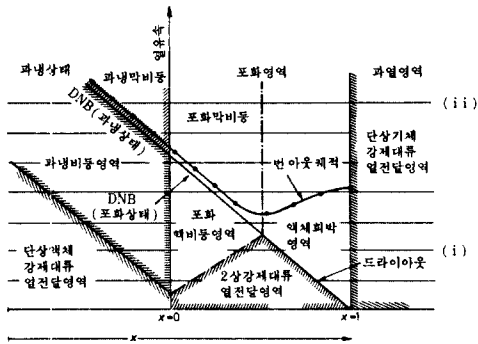


그림 9 유동비등도표

데, 이 때 경계면의 형태와 열 및 물질전달 현상등이 관심의 대상이 된다. 막비등이 일어날 경우에는 고체면과 액체간의 전열효과가 크게 떨어지고 고체면이 과열되어 손상을 입게 되는 소위 번 아웃(burn-out)이 일어날 수 있으므로 보일러 등 비등 열전달 현상을 이용하는 장치에서는 막비등의 영역에서 시스템이 운전되지 않도록 주의해서 설계하고 있다. 따라서 주어진 유동조건에서 막비등과 핵비등의 경계를 결정짓는 임계 열유속(critical heat flux)을 정확히 예측하기 위한 실험과 모델이 특히 원자로 연료봉 주위의 비등현상과 관련하여 많이 연구되고 있다. 대류비등에서의 임계열유속의

예측을 위하여 Bowring<sup>(40)</sup>, Groeneveld<sup>(41)</sup>, Katto와 Ohno<sup>(42)</sup> 등의 연구결과가 자주 인용되며, 최근의 이 분야에 대한 연구결과들은 국내에서도 Chang<sup>(43)</sup>에 의해 정리, 발표된 바 있고, 실험결과도 어느 정도 상당한 수준으로 데이터뱅크화되어 있다. 또한 압력의 급격한 강하에 따른 후래시 현상 및 임계2상유동(critical two-phase flow)에 대한 연구도 진행되어오고 있다<sup>(44)</sup>.

### 7. 2상유동 불안정 현상

기체와 액체가 혼합해서 흐르는 2상유동시스템에서는 수력학적인 불안정이 기본적으로 존재하며, 이것은 국부적인 열전달 특성을 변화시키거나 기계적인 진동을 유발하므로써 시스템의 원활한 작동 및 운전에 좋지 않은 영향을 미친다. 이러한 2상유동 불안정은 유동이 외부로부터 펌프 등에 의해서 이루어지는가 또는 단지 시스템 내부의 부력에 의해서 유발되는가에 따라 다르게 나타난다. 2상유동의 불안정은 크게 정적 불안정(static instability)과 동적 불안정(dynamic instability)으로 나눌 수 있다. 정적 불안정은 미소한 교란에 의하여 한 정상(평형)상태에서 다른 정상(평형)상태로 유동조건이 바뀌는 현상으로 excursive(또는 Ledinegg) 불안정, 유동양식의 변화에 의한 불안정(flow regime relaxation instabilities), 그리고 기포핵 생성에 의한 불안정(nucleation instabilities)등이 이에 속한다. 반면에 동적 불안정은 관성이나 피이드백 효과 등으로 인해 유량(또는 압력)이 정상 작동상태를 기준으로 주기성을 가지고 변동하는 현상을 말하며 여기에는 밀도파 진동(density wave oscillations), 압력강하진동(pressure drop oscillations), 유동양식이 유발하는 진동(flow regime excited instabilities), 음향학적 진동(acoustic instabilities), 그리고 응축에 기인하는 불안정(condensation-induced instabilities) 등이 포함된다. 이러한 불안정현상중 excur-



sive 불안정 현상과 밀도파진동 불안정 현상에 관한 연구가 가장 활발하다. 그러나 실제 유동에서는 앞서 언급한 여러 불안정현상이 개별적으로 일어나기 보다는 복합적으로 나타나므로 이에 관한 실험 및 해석이 계속 요구되고 있다. 2상유동 불안정에 관한 여러 연구내용은 Boure 등<sup>(45)</sup>, Yadigaroglu<sup>(46)</sup>, Hsu와 Graham<sup>(47)</sup>, 그리고 Lahey와 Podowski<sup>(48)</sup> 등에 의해서 전반적으로 정리, 요약되어 있다.

### 8. 맺음말

이상에서 언급한 2상유동의 여러 연구분야의 예도 유체기계 등에서 볼 수 있는 공동(cavitation) 현상은 본 해설에서 지면 관계상 다루지 않았으나, 이에 관한 연구도 상당히 활발하게 진행되고 있다. 교육의 측면에서 살펴보면 2상유동에 관한 내용은 근래에 주요 선진국의 대학원과정에서 자주 강의되고 있으며, 그간 주로 Tong<sup>(49)</sup>, Wallis<sup>(1)</sup>, Collier<sup>(2)</sup>, Hsu와 Graham<sup>(47)</sup>, 植田辰洋<sup>(50)</sup> 등의 책들이 교재로 쓰여 왔고, Whalley<sup>(51)</sup>에 의해 최근의 연구 동향이 추가 되었으나 내용면에서는 아직까지 정규 교과목으로 완전한 틀을 잡고 있는 것은 아니다. 그러나 응용의 측면을 고려하여 각 주제별로 많은 책들이 출판되어 있다.<sup>(5,52~57)</sup>

이와 관련하여 2상유동분야의 당면 연구과제는 다음과 같이 요약된 바 있다.<sup>(58)</sup>.

- ◎2상유동의 수식화 문제
  - 2-유체모델과 기체-액체 간의 적절한 경계 조건 설정
- ◎2상유동의 모델링과 실험
  - 2상유동 양식
  - 단위체적당의 기-액 경계면적(interfacial area concentration)
  - 기-액 경계면에 작용하는 힘과 응력분포
  - 2상유도의 상사성
  - 수력학적 변화에 의한 임계열유속(hydrodynamically induced critical heat flux)
  - 2성분혼합유체(binary mixtures)의 2상 유

동

이상에서 소개한 2상유동의 연구결과는 각종 플랜트 공정(예컨대 정유장치, 제철냉각공정<sup>(54)</sup>, 담수화장치<sup>(59)</sup>, 식품가공 공정<sup>(55)</sup>등), 발전소의 터빈, 보일러 등의 설계, 원자로 안전설계, 냉동기 및 공기조화 장치설계, 극저온 냉동기술<sup>(60,61)</sup> 뿐만 아니라 각종 분무연소장치 설계 등에 광범위하게 응용되며, 그 외에도 응용에는 열거할 수 없을 정도로 많다.

따라서 이 분야에 대하여 국내에서도 많은 관심을 기울여야 할 단계에 있으며, 많은 연구 성과가 나오기를 기대하고 있다. 이에 대한 일환으로 1988년 11월에 국내에서도 최초로 2상유동연구회가 결성되어 매년 2회의 정기학술모임을 개최하고 있음을 이 기회에 알려 두고자 한다.

### 기호 설명

$D$	: 관직경
$F$	: $\left(\frac{\rho_g}{\rho_f - \rho_g}\right)^{0.5} \frac{j_g}{(Dg \cos \theta)^{0.5}}$
$g$	: 중력가속도
$G$	: 질량유속
$j$	: 절보기속도
$K$	: $[\rho_g^2 k_j^2 / (\rho_f - \rho_g) g v_f \cos \theta]^{0.5}$
$T$	: $\left[\left(\frac{dp}{dz} F\right)_f / (\rho_f - \rho_g) g \cos \theta\right]^{0.5}$
$X$	: Martinelli 변수
$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_f$	: 관 내에 흐르는 액체만을 고려할 때의 축방향 마찰 압력강하율
$\lambda$	: $[(\rho_g / \rho_\lambda) (\rho_f / \rho_w)]^{1/2}$
$\mu$	: 점성계수
$\nu$	: 동점성계수
$\phi$	: $(\sigma_w / \sigma) [\mu_f / \mu_w] (\rho_w / \rho_f)^2]^{1/3}$
$\rho$	: 밀도
$\sigma$	: 표면장력
첨자	
$A$	: 공기
$f$	: 액체

$g$  : 기체  
 $w$  : 물

## 참 고 문 헌

- (1) Wallis, G.B., 1969, "One-Dimensional Two-Phase Flow", McGraw-Hill.
- (2) Collier, J.G., 1981, "Convective Boiling and Condensation", 2nd Ed., McGraw-Hill.
- (3) Dukler, A.E. and Taitel, Y., 1982, "Flow Pattern Transitions in Gas-Liquid Systems : Measurement and Modelling", Multiphase Science and Technology, Vol.2, pp. 1~94, Hemisphere.
- (4) Ishii, M., 1975, "Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow", Eyrolles.
- (5) Delhaye, J.M., Giot, M. and Riethmuller, M.L., 1981, "Thermohydraulics of Two-phase Systems for Industrial Design and Nuclear Engineering", Hemisphere.
- (6) Kataoka, I. and Serizwawa, A., 1989, "Basic Equations of Turbulence in Gas-Liquid Two-Phase Flow", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 15, No. 5, pp. 843~855
- (7) Zuber, N. and Findlay, J.A., 1965, "Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems", Trans, ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 87, pp. 453~468.
- (8) Ishii, M., 1977, "One-dimensional Drift-flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion Between Phases in Various Two-phase Flow Regimes", Argonne National Laboratory Report, ANL-77-47.
- (9) Crowe, C.T., 1978, "A Numerical Model for the Gas-Droplet Flow Field Near an Atomizer", Proc. of ICLAS-'78, pp. 377~383.
- (10) Crowe, C.T., 1982, "Review-Numerical Models for Dilute Gas-Particle Flows", Trans. ASME, J. of Fluids Eng., Vol. 104, pp. 297~303.
- (11) Dukowicz, J.K., 1980, "A Particle-Fluid Numerical Model for Liquid Sprays", J. of Computational Physics, Vol. 35, pp. 229~253.
- (12) Mostafa, A.A., Mongia, H.C., McDonell, V.G., and Samuelsen, G.S., 1989, "Evolution of Particle-Laden Jet Flows : A Theoretical and Experimental Study", AIAA J., Vol. 27, No. 2, pp. 167~183.
- (13) Mostafa, A.A. and Mongia, H.C., 1987, "On the Modelling of Turbulent Evaporating Sprays : Eulerian Versus Lagrangian Approach", Int. J. Heat Mass Trans., Vol. 30, No.2, pp. 2583~2593.
- (14) Solomon, A.S.P., 1984, "A Theoretical and Experimental Investigation of Turbulent Sprays", Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State University.
- (15) Ishii, M. and Zuber, N., 1979, "Drag Coefficient and Relative Velocity in Bubbly, Droplet or Particle Flows", AIChE J., Vol. 25, No.5, pp. 843~855.
- (16) Clift, R., Grace, J.R. and Weber, M.E., 1978, "Bubbles, Drops and Particles", Academic Press.
- (17) Delhaye, J.M., Favreau, C., Saiz Jabardo, J.M., and Tournaire, A., 1987, "Experimental Investigation on the Performance of Impedance Sensors with Two and Six Electrodes for Area-Averaged Void Fraction Measurements", ANS-Proceedings, 1987 National Heat Transfer Conference, Pittsburgh, PA, pp. 234~239.
- (18) Neal, L.G. and Bankoff, S.G., 1963, "A High Resolution Resistivity Probe for Determination of Local Void Properties in Gas-Liquid Flow", AIChE J., Vol.9, No.4, pp. 490~494.
- (19) Swithenbank, J., Beer, J.M., Taylor, D.S., Abbot, D. and McCreath, C.C., 1976, "A Laser Diagnostic Technique for Measurement of Droplet and Particle Size Distribution", Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 53, pp. 421~447.
- (20) Hirleman, E.D., Oechsle, V. and Chigier, N., 1984, "Response Characteristics of Laser Diffraction Particle Size Analyzer : Optical Sample Volume Extent and Lens Effects", Optical Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 610~619.
- (21) Durst, F., 1982, "Review—Combined Measurements of Particle Velocities, Size Distributions, and Concentrations", Trans. ASME, J. of Fluids Eng., Vol. 104, pp. 284~296.
- (22) Bachalo, W.D. and Houser, M.J., 1984, "Phase/Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions", Optical Engineering, Vol.23, No.5, pp. 583~590.
- (23) Ohba, K., Yuhara, T. and Matsuyama, H., 1986, "Simultaneous Measurements of Bubble and Liquid Velocities", Bull. JSME, Vol.29, No.254, pp. 2487~2493.
- (24) Banerjee, S., Heidrick, T.R. and Saltvold, J.R., 1978, "Measurement of Void Fraction and Mass

- Velocity in Transient Two-Phase Flow", Transient Two-Phase Flow, Proc. CSNI Specialist Meeting, 1976, AECL, ed. by S. Banerjee and K.R. Weaver, Vol.2, pp. 789~832.
- (25) Tate, R.W., 1961, "Immersion Sampling of Spray Droplets", AIChE J. Vol.7, No.4, pp. 574~577.
- (26) Lior, N., Leibovitz, J. and Laird, A.D.K., 1974, "A Multiprobe Miniature Thermistor System for the Measurement of Temperature Profiles", Rev. Sci. Instrum. Vol.45, No.11, pp. 1340~1343.
- (27) Kataoka, I., Ishii, M. and Serizawa, A., 1984, "Local Formulation of Interfacial Area Concentration and Its Measurements in Two-Phase Flow", NUREG/CR-4029, ANL-84-68.
- (28) Delhay, J.M. and Cognet, G., 1984, "Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flows", Springer-Verlag.
- (29) Ishii, M. and Kataoka, I., 1983, "Similarity Analysis and Scaling Criteria for LWR's under Single-Phase and Two-Phase Natural Circulation", NUREG/CR-3267, ANL-83-32.
- (30) Kocamustafaogullari, G. and Ishii, M., 1983, "Scaling Criteria for Two-Phase Flow Natural and Forced Convection Loop and Their Application to Conceptual 2x4 Simulation Loop Design", NUREG/CR-3420, ANL-83-61.
- (31) Kocamustafaogullari, G. and Ishii, M., 1986, "Reduced Pressure and Fluid to Fluid Scaling Laws for Two-Phase Flow Loop", NUREG/CR-4584, ANL-86-19.
- (32) De Jarlais, G. and Ishii, M., 1985, "Inverted Annular Flow Experimental Study", NUREG/CR-4277, ANL-85-31.
- (33) Denten, J.G. and Ishii, M., 1988, "Flow Visualization Study of Post Critical Heat Flux Region for Inverted Bubbly, Slug and Annular Flow Regimes", NUREG/CR-5171, ANL-88-27.
- (34) Plesset, M.S. and Zwick, S.A., 1954, "The Growth of Vapor Bubbles in Superheated Liquids", J. of Applied Physics, Vol.25, No.4, pp. 493~500.
- (35) Foster, H.K. and Zuber, N., 1954, "Growth of Vapor Bubble in a Superheated Liquid", J. of Applied Physics, Vol.25, No. 4, pp. 474-478.
- (36) Mikic, B.B., Rohsenow, W.M. and Griffith, P., 1970, "On Bubble Growth Rates" Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.13, pp. 657~666.
- (37) Chen, J.C., 1966, "Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow", I & EC Process Design and Development, Vol.5, No. 3, pp. 322~329.
- (38) Edelstein, S., Perez, A. and Chen, J.C., 1984, "Analytic Representation of Convective Boiling Functions", AIChE J., Vol. 30, No.5, pp. 340~341.
- (39) Saha, P. and Zuber, N., 1974, "Point of Net Vapor Generation and Vapor Void Fraction in Subcooled Boiling", Proc. of the 5th Intl. Heat Transfer Conf., Tokyo, Paper No. B4.7.
- (40) Bowring, R.W., 1972, A Simple but Accurate Round Tube Uniform Heat Flux, Dryout Correlation over the Pressure Range 0.7-17MN/m<sup>2</sup>(100-2500 psia), AEEW-R789.
- (41) Groeneveld, D.C., 1982, "A General CHF Prediction Method for Water Suitable for Reactor Accident Analysis", CENG Rpt., DRE/STT/SETRE/82-2-E/DG.
- (42) Katto, Y. and Ohno, H., 1984, "An Improved Version of the Generalized Correlation of Critical Heat Flux for the Forced Convection Boiling in Uniformly Heated Vertical Tubes", Int. J. Heat Mass Trans., Vol.27, No.9, pp. 1641~1648.
- (43) Chang, Soon Heung, 1990, "Review of Critical Heat Flux", Presented at the Winter Regular Meeting of the Two-Phase Flow Study Group,(Feb. 24, 1990)
- (44) Henry, R.E. and Fauske, H.K., 1971, "The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices and Short Tubes", Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol. 93, pp. 179~187.
- (45) Boure, J.A., Bergles, A.E. and Tong, L.S., 1973, "Review of Two-Phase Flow Instability", Nuclear Engineering and Design, Vol.25, pp. 165~192.
- (46) Yadigaroglu, G. 1981, "Two-Phase Flow Instabilities and Propagation Phenomena", Thermohydraulics of Two-Phase Systems for Industrial Design and Nuclear Engineering (Ed. by J.M. Delhay, M. Giot and M.L. Riethmuller), Hemisphere, pp. 353~403.
- (47) Hsu, Y.Y. and Graham, R.W. 1976, "Transport Processes in Boiling and Two-phase Systems", Hemisphere.
- (48) Lahey, Jr., R.T. and Podowski, M.Z., 1989, "On the Analysis of Various Instabilities in Two-Phase Flows", Multiphase Science and Technology, Vol.4 (Ed. by G.F. Hewitt, J.M. Delhay and N. Zuber),

- Hemisphere, pp. 183~370.
- (49) Tong, L.S., 1967, "Boiling Heat Transfer and Two-phase Flow", John-Wiley & Sons, Inc.
- (50) 植田辰洋, 1981, "氣液二相流", 養賢堂(金京根譯, 太化出版社, 1986).
- (51) Whalley, P.B., 1987, "Boiling, Condensation, and Gas-Liquid Flow", Clarendon Press, Oxford.
- (52) Chisholm, D., 1983, "Two-Phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers", George Godwin.
- (53) Ginoux, J.J., 1978, "Two-Phase Flows and Heat Transfer with Application to Nuclear Reactor Design Problems", Hemisphere.
- (54) Hewitt, G.F., Delhaye, J.M. and Zuber, N., 1982, 1986, 1987, 1989, "Multiphase Science and Technology", Vol. I-IV, Hemisphere.
- (55) Masters, K., 1976, "Spray Drying", George Godwin.
- (56) Lefebvre, A.H., 1989, "Atomization and Sprays", Hemisphere.
- (57) Hewitt, G.F. and Hall-Taylor, N.S., 1970, "Annular Two-phase Flow", Pergamon Press.
- (58) Ishii, M., 1989, "Selected Topics for Future Research in Two-phase Flow", Proceedings of the Fluids Engineering Seminar, Korea-U.S. Progress, Sep. 3-8.
- (59) Porteous, A., 1983, "Desalination Technology — Developments and Practice", Applied Science Pub.
- (60) Van Sciver, S.W., 1986, "Helium Cryogenics", Plenum Press.
- (61) Bougard, J. and Afgan, N.H., 1987, "Heat and Mass Transfer in Refrigeration and Cryogenics", Hemisphere.



국제 학술 대회 참가 안내

The Sixth International Pacific Conference on Automotive Engineering

주관 : 한국자동차공학회

일시 : 1991년 10월 27일~11월 2일

장소 : 서울 (Hotel Inter Continental)

분야 : Powerplants, Powertrains, Components, Passenger cars, Bus & Truck, Materials, Electric & Electronics, Fuel & Lubricants, Vehicle dynamics, Safety, Environments, Manufacturing technology, Motorcycle, Transportation system, education, Special session, — Trade relations and Government policy, — Technology transfer,

일정 : 1990년 9월 30일 : 초록 제출

1991년 2월 15일 : 저자에게 통지

1991년 6월 15일 : 최종원고 제출

연락처 : 한국자동차공학회 전화번호 : 586-9262 FAX : 583-9804