

일정 열유속의 하부 가열면을 갖는 채널캐비티 내부유동의 PIV계측

조 대 환* · 김 진 구*

PIV Measurement of Channel Cavity Flow with Bottom Heat surface of
Constant Heat Flux

D. H. Cho* · J. G. Kim*

Key words : Room Air Convection(실내공기유동), Constant Heat Flux(균일 열유속), PIV(입자영상유속계), Mach Zehnder Interferometer(마하젠더 간섭계), Unsteady Flow(비정상유동), Sheared Mixing Phenomena(전단혼합현상), Grey-Level Cross Correlation(계조치상호상관법)

Abstract

An experimental study was carried out in a channel cavity with square heat surface by visualization equipment with Mach - Zehnder interferometer and laser apparatus. The image processing system consists of one commercial image board slit into a personal computer and 2-dimensional sheet light by Argon-Ion Laser with cylindrical lens and flow picture recording system. Instant simultaneous velocity vectors at whole field were measured by 2-D PIV system which adopted two-frame grey-level cross correlation algorithm. Heat source was uniform heat flux($0.4\text{W}/\text{cm}^2$, $0.8\text{W}/\text{cm}^2$, $1.2\text{W}/\text{cm}^2$).

Obtained result showed various flow patterns such as kinetic energy distribution. Severe unsteady flow fluctuation within the cavity are remarkable and sheared mixing layer phenomena are also found at the region where inlet flow is collided with the counter-clockwise rotating main primary vortex. Photographs of Mach - Zehnder are also compared in terms of constant heat flux.

1. 서 론

채널캐비티^{1,2)}는 그 형상이 캐비티의 한쪽 면이

개방되어 있고 이 부분에 채널흐름을 갖는 형식이며 엄밀하게 표현하면 채널흐름과 이 채널흐름에 의해서 전단응력을 공급받는 캐비티의 복합유동장

* 한국해양대학교 대학원 (원고접수일 : 97년 9월)

으로 정의 할 수 있으며 이러한 유동장은 건축물의 내부공간에 대한 환기구조⁴⁻⁵⁾와 유사하다. 환기설비는 실외와 구별되는 쾌적한 환경을 제공하기 위해 실내의 먼지나 유해가스 등의 오염공기를 신선하고 깨끗한 공기와 교환하여 보다 맑은 공기가 공급하는 것으로서 주기적으로 일정량의 급기와 배기가 될 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 내부공간의 온도분포와 공기흐름을 제어하여 적절한 온도로 실내부가 유지되도록 하여야 한다. 우리나라에서 널리 이용되는 온수온돌은 온수를 이용하여 가열면의 온도를 높여서 난방을 하는 것으로서 쾌적도가 좋은 난방방식으로 평가되고 있으나 열효율은 낮은 편에 속한다. 따라서 이러한 구조에 관련된 환기구조에 관한 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 컴퓨터를 이용한 유동장 가시화 기법을 적용하여 유입 및 유출구와 가열 바닥 면을 가진 2차원 사각공간에서 작동유체를 공기로 하는 채널캐비터를 대상으로 바닥 면의 발열에 따른 전 유동장의 속도 및 온도분포를 구하여 내부유동특성을 고찰하고자 하였다.

유동장의 속도는 가시화 실험의 영상데이터에 대한 디지털 영상 처리(digital image processing)를 이용한 2차원 PIV⁶⁻⁷⁾에 의하여 측정하였고 Mach Zehnder간섭계⁸⁾에 의하여 간섭사진을 촬영하여 밀도 차에 따른 간섭사진으로부터 사각공간 내부의 온도분포를 추정하였다. 측정결과 캐비터 내부에서는 상부의 구동류로부터 전단응력을 공급받아 발생한 U자 형태를 갖춘 주 와류(primary vortex)가 캐비터 내부를 재 순환하고 있다. 또한 주 유동의 경로 중 중간근방에서 주 유동과 재순환 흐름이 충돌하는 부위에서 전단혼합영역이 관찰되었다. 그리고 캐비터의 우측하부와 출구 측의 벽면에는 주 와류의 영향으로 2차 와류가 발생하였으며 시간에 따라 와류의 형태가 현저한 변화를 보였다.

2. 실험

그림 1은 본 연구에서 사용된 실험장치를 보이고 있다. 대상 유동장은 바닥으로부터 1m 전후의 높이에 두고 스모크제너레이터는 채널의 입구 측에 설치하였다. 여기에서 발생된 연기는 주위공기

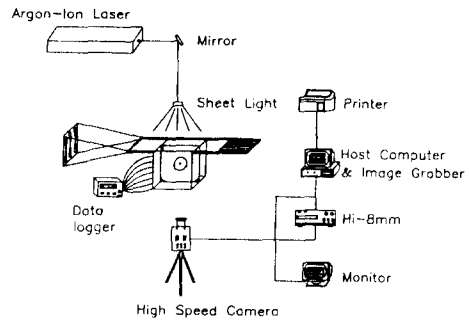


Fig.1 Experimental Apparatus

와 함께 내경 5mm 길이 80 mm의 정유기를 거친 후 채널내부로 유입되어 시험 부의 상부에 부착된 길이 400mm의 소형 풍동에 의해 강제배출 된다. 이때의 공기유속은 열선유속계(Kanomax 7224, Japan)로 측정하였고 풍동에 장비된 3개의 팬의 공급전원은 직류전원장치를 이용하여 균일한 속도를 유지하였다.

그림 2와 그림 3은 실험에 사용된 유동장의 개략도와 발열체의 내부구조이다. 유동장의 길이는 300mm이며 폭은 250mm이다. 실험 대상 유동장은 바닥면에 발열체를 부착하고 하부에 베크라이트를 접착하여 단열이 되도록 하고 실험장치의 측정면은 5mm의 유리를 부착하여 가시화에 적합하도록 하였다. 발열 면은 가로와 세로가 각각 50mm 및 250mm의 크기이며 열전도율을 고려하여 황동을 허용공차 3/1000mm이내가 되도록 밀링으로 표면을 정밀 가공하여 사용하였다. 내부에는 니크롬선을 열원으로 하고 내부의 열전도가 원활하게 하기 위하여 열원과 황동판 사이에 열 용량이 큰 마그네슘 옥사이드(Magnesium oxide)분말을 넣은 후 양단을 실리콘으로 밀봉하였다. 또한 내부의 공기를 일정하게 배출하기 위하여 별도의 풍동을 제작하고 유동장의 좌측에 길이 225mm, 높이 100mm의 서랍식 개폐구를 양쪽에 장착하여 개폐정도를 조절하여 유속이 0.1m/sec로 일정 조건에서 열유속을 각각 0.4W/cm², 0.8W/cm², 1.2W/cm²으로 변화시키면서 발열량에 따른 캐비터 내부 유동특성의 변화를 고찰하고자 하였다.

유동의 가시화실험은 내부유동이 충분히 발달한 상태에서 수직채널의 좌측에서 5W의 수냉식

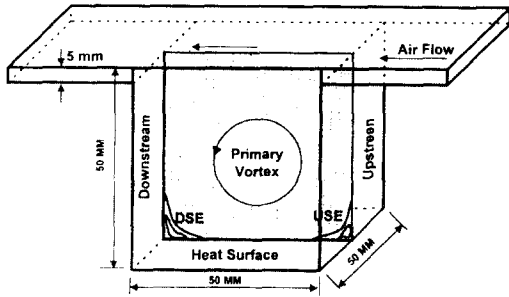


Fig.2 Channel Cavity Dimension

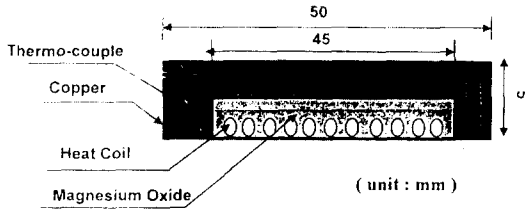


Fig.3 Dimension of Heat Source

아르곤 이온 레이저에 원통형 렌즈를 부착하고 약 1.5mm 전후의 두께를 갖는 2차원 시이트라이트를 계측단면에 조사시켰으며 계측 영역은 스펀방향의 중앙 단면($z=0.5$)이다.

유동장의 촬영은 고속카메라를 이용하였으며 이를 저속으로 재생하여 8mm카메라(Sony, Model : Pro 5000)에 영상을 NTSC방식으로 기록하였다. 이 영상은 컴퓨터에서 처리할 수 있는 디지털 영상으로 변환시켜 주는 PC용 이미지보오드(Data Translation사 DT3155, 640 480 픽셀, B&W)에 입력하여 원시영상으로 변환된다. 화상을 입력할 때에 60Hz의 수직동기신호 보정필터(DT3155제공 소프트웨어)를 사용하여 화질을 개선하였다. 이 영상에서 유동장의 영역은 390 390 픽셀 전후이다. 촬영시의 수평면에 대한 회전각은 약 -0.3° 이며 아편변환에 의해 우측상부를 중심으로 회전시켜 보정하였다. 그리고 유동정보만을 분리하기 위하여 배경영상을 계측하고자하는 영상에 대하여 감산한 후 동일입자 추적을 행하였다.

속도벡터의 추출 알고리즘으로서는 두 프레임의 연속된 비디오영상의 계조치를 이용하여 최대 상호상관계수를 탐색하는 기법을 이용하였으며 속도벡터의 격자 수는 40×40 이다. 그리고 상관계수

를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 7픽셀이며 상관영역의 크기는 40픽셀이다. 한가지의 순시 유동장에 대하여 처리 시간은 펜티엄기종(CPU 90MHz)에서 약 4분이 소요되었다. 시간평균의 속도벡터를 얻기 위해서는 일정 시간간격으로 저장된 연속된 100개의 영상을 순차 일괄 처리하여 산술 평균하였다.

바닥면의 발열에 따른 영향을 고려하기 위하여 Mach Zehnder간섭계로서 등온영상을 얻고 온도 측정을 위하여 벽면과 발열면에 열전대를 설치하였다. 간섭영상의 기록을 위해 광원으로는 헬륨-네온 레이저(He-Ne laser : 5mW)를 사용하였다. 레이저 광은 광 확산 렌즈(beam expander lens)에 의해 확산되어 핀홀(pin hole)을 통과한 후, 볼록렌즈(convex lens)에 의해 평행 광으로 된다. 이 평행 광은 반투과 거울(half reflection mirror)에 의해 목적 광과 기준 광으로 분리되어, 목적 광은 시험부분을 통과한 후 주위 공기를 통과한 기준 광과 만나 간섭무늬를 형성한다. 무늬의 촬영은 간섭계를 수평으로 놓고 광원인 레이저 광속을 사용하여 무한대 간섭무늬가 얻어지도록 조정을 한 후 시험부분을 광축에 평행하게 위치시켰고 셔터스피드 1/2000으로 하여 광축 방향에서 기록하였다.

발열체의 가열은 직류 정전압 정전류장치에 의해 일정한 열유속이 유지될 수 있도록 하였으며 온도를 정상상태로 취하는데 요하는 시간은 30분 전후가 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 상부의 구동류의 속도가 0.1m/sec이며 하부 발열면의 발열량이 $1.2W/cm^2$ 일 경우에 1/30초 간격으로 4프레임의 영상을 보여주고 있다. 상부의 구동류는 거의 균일하게 입구에서 출구 측으로 빠져나가며 일부는 포물선의 형태로 진행하다가 좌측벽면의 상부에 충돌하여 내부순환류에 혼합되며 이곳에서부터 타원형의 와류로서 주기적으로 발달과 소멸을 하고 있다. 시간진행에 따라 좌측상부에서 발달한 와류는 전체적인 내부순환류에 큰 영향을 주고 있으며 이로 인하여 일정한 주기를 갖는 비정상성을 보이고 있으며 이와 같은 현

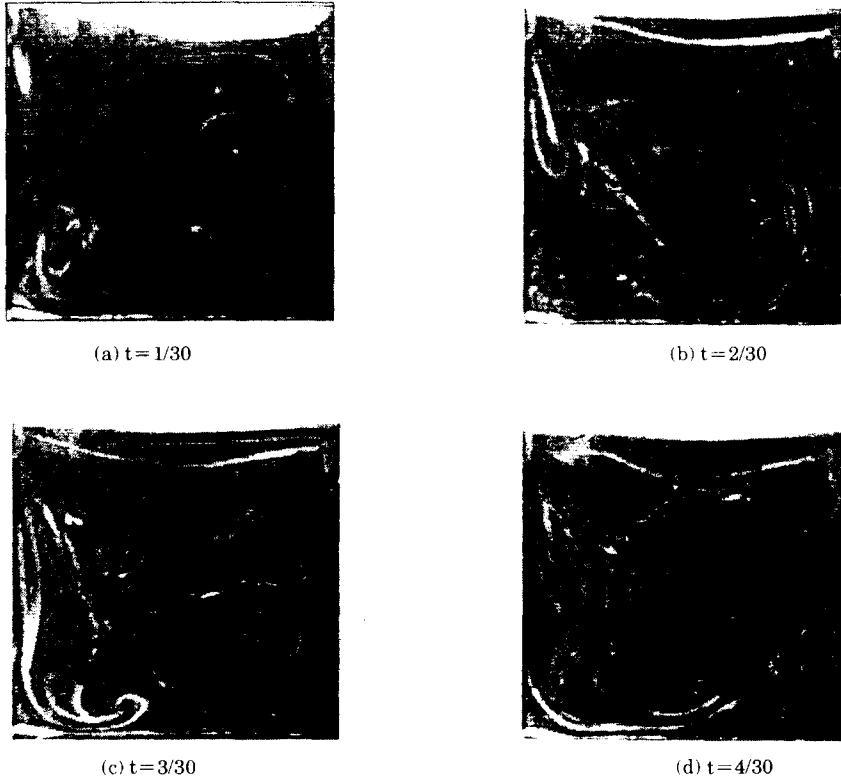


Fig.4 Instantaneous flow image at $Re=300$, $Pr=0.71$

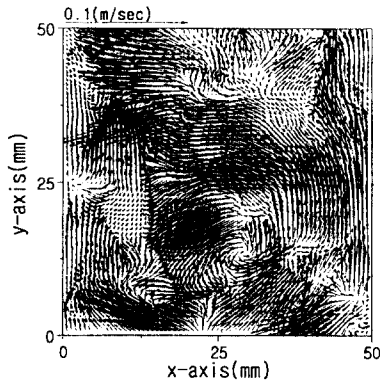
상은 발열량이 증가할수록 내부의 유동패턴이 복잡하며 등밀도선의 변화가 크게 나타났다. 또한 하부바닥면의 근방에서는 발열의 증가에 따라 부력의 영향에 기인한 혼합대류의 매우 복잡한 유동패턴을 보이고 있다.

그림 5는 $Re=300$ 의 경우에 유동장의 전체를 임의의 순간에 동시다점 계측한 전체유동장의 순시속도벡터의 분포중 $0.4W/cm^2$ 와 $1.2W/cm^2$ 의 경우를 보이고 있다. 상부의 기준속도의 크기는 실제 속도 값이고 유차원의 영역에 대하여 기준속도에 비례하여 속도벡터를 도시하였다. 하부의 발열면의 영향이 유동장의 하부에 잘 나타나 있으며 순시의 속도분포인 만큼 3차원성의 경향이 일부 나타나고 있다. 열유속의 차이에 따라 $1.2W/cm^2$ 의 경우 위로 상승하는 속도벡터의 크기가 전반적으로 증가하고 있으며 $0.4W/cm^2$ 에 비하여 매우 복잡한 유동특성을 보이고 있다.

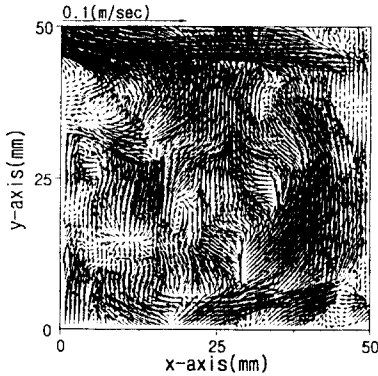
그림 6은 시간 평균의 유동 특성을 알아보기 위

하여 일정한 시간 간격으로 샘플링한 100회의 순시 속도 벡터를 산술 평균하여 나타낸 결과이다. 내부 순환류는 전체적으로 볼 때에 U자 형태의 유동패턴을 보이고 있으며 우측 하부에는 주 순환류에 의한 2차와류가 발생하고 있다. 바닥면의 발열에 따른 경향이 뚜렷한 층으로 보이고 있으며 상부의 중앙부에서 전단혼합현상도 잘 나타나 있다. 내부속도벡터의 평균속도는 $0.02m/sec$ 로 입구유속의 20%전후이나 좌측상부의 속도는 0.07 에서 $0.09m/sec$ 전후이다. 이것은 열선유속계로 측정한 상부의 평균 유입속도에 근접한 것으로서 상부의 구동류의 일부가 캐비티내부로 포물선 형태로 진행하면서 출구로 빠져나가기 때문으로 보여진다. 이에 관하여는 차후에 구동류의 속도변화에 따라 여러 측면의 일관된 연구가 필요하다.

그림7은 시간평균의 속도벡터로부터 각 위치에서의 운동에너지를 구하여 3차원적으로 도시한 것이다. 바닥면의 균일한 발열의 영향과 내부유동에



(a) 0.4W/cm²



(b) 1.2W/cm²

Fig.5 Instantaneous velocity distribution

다른 혼합대류의 특징이 잘 나타나 있으며 좌측벽면에 충돌한 구동류가 캐비티의 내부순환류와 혼합되는 영역에서 운동에너지의 분배구조를 잘 보여주고 있다. 우측상부의 굴곡이 심한 부분은 전단 혼합 영역으로서 진행방향으로의 운동에너지는 많이 감소되어 있다.

그림8은 캐비티의 좌측벽면의 온도를 가시화 실험 시에 측정된 결과이다. 계측 점은 6mm간격의 7개소이며 상부로부터 벽면에 지름 1.5mm의 계측홀을 뚫고 “K”형 열전대를 고정하였다. 그림에서 보면 바닥면의 열유속이 증가함에 따라 거의 균일하게 상승하며 바닥면에 근접한 면을 제외하고는 좌측벽면의 온도분포는 거의 일정함을 알 수 있다. 이것은 주 순환류의 영향으로 좌측벽면의 경우 상부에서 하강하는 흐름의 영향으로 온도구배가

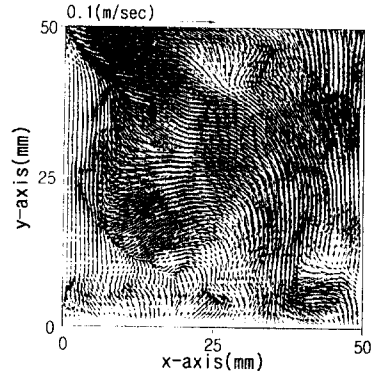


Fig.6 Time-mean velocity distribution

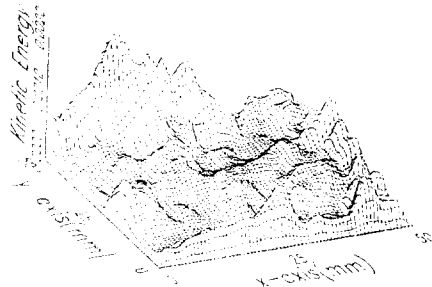


Fig.7 Time-mean kinetic energy distribution

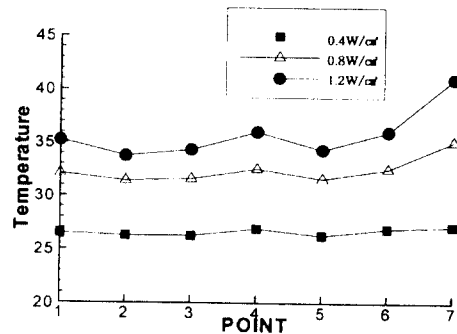


Fig.8 Surface temperature distribution

크지 않음을 나타낸다.

그림 9는 사각공간 내에서의 바닥의 고온 부로부터의 발열이 내부유동에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Mach Zehnder간섭계를 사용하여 $Pr=0.71$, $Re=300$ 의 경우에 대하여 하부 바닥 열유속이 변화할 때의 간섭무늬를 보여주고 있다. 발열량이 증가함에 따라 우측하부 모서리의 간섭무늬의 수는 증가하고 있으며 열유속에 따른 사각공간 내

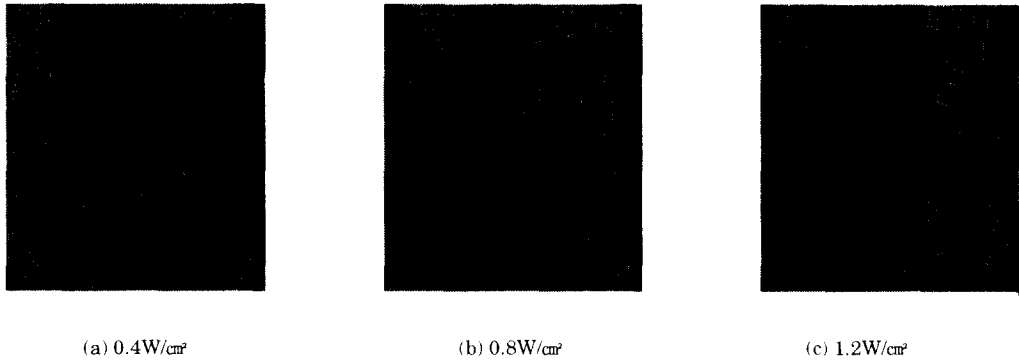


Fig.9 Photographs of Mach zehnder

부의 온도분포를 잘 보여주고 있다. 이것은 발열량의 증가에 따라 우측하부에서 가열면의 영향으로 온도구배가 커짐을 나타내고 있다. 특히 1.2W/cm²의 경우 좌측 중앙부에 치우친 셀이 나타나고 있으며 이 부분에서 내부순환 특성에 의한 전체영역이 변화하기 때문이다.

4. 결 론

바닥면이 가열되는 사각공간 내부의 공기유동에 대하여 Re=300에서 열유속의 변화 따른 가시화 실험을 행하고 PIV에 의해 전 유동장에 걸친 유차원의 속도를 동시에 계측하였다. 또한 내부의 발열이 내부유동에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Mach Zehnder간섭계를 사용하여 간섭무늬를 얻었다. 그 결과 캐비티 상부에서 구동류의 흐름의 일부가 직진성을 상실하고 내부 주순환 흐름과 혼합되는 흐름특성을 보였으며 열유속이 증가함에 따라 자연대류의 영향이 크게 나타났다. 또한 구동류와 내부의 순환류가 충돌하는 영역에서 전단혼합현상이 발견되었으며 발열량이 증가할 수록 시간에 따른 등밀도선의 변화가 커지는 비정상성을 보였다. 이러한 현상에 대해서는 차후에 구동류의 속도변화에 따른 정량적인 연구가 필요하다.

후 기 : 온도장 가시화실험에 도움을 주신 동아대학교 기계공학과 열공학실험실의 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

참고문헌

1. C.K.Aidun, N.G.Triantafillopoulos, J.D.Benson, "Global Stability of a Lid Driven Cavity with through Flow Visualization Studies", *Phys. Fluids A* 3 (9), pp.141-151, 1991.
2. Y.H.Lee, C.S.Kim, D.H.Cho, J. W.Choi, "PIV Measurement of Cubic Cavity Driven 2-D Plane Poiseuille Flow", *Proc. of the Third JSME-KSME Fluids Eng. Conf.*, pp.335-340, 1994.
3. F.Penot and M.Parvolic, "Heat Transfer Analysis of Mixed Convection in a Heated Cavity", *Proceeding of the 8th International Heat Transfer Conference*, vol.3, pp. 1419-1424, 1986.
4. H.Han, T.H.Kuehn, J.W.Ramsey, H.Liang and K.Elayed, "Turbulent Modeling of Airflow Patterns and Ventilation Effectiveness in a Half Scale Office Building", *Proceedings of 12th AIVC Conference*, vol. 3, pp. 1-8, 1991.
5. M.A.Joffe, "Chemical Filtration of Indoor Air an Application Primer," *ASHRAE Journal*, pp. 42-49, 1996.
6. 최장운, 이영호, "PIV에서의 계조치 상호 상관법 개발", *대한기계학회 춘계학술대회논문집(II)*, pp.396-400, 1995.
7. 최장운, 이영호, "PIV에서의 보간 방법의 적용", *대한기계학회 추계학술대회 논문집(II)*, pp.49-56, 1995.
8. U. Grigull and W. Hauf, "Advances in Heat Transfer Optical Method in Heat Transfer", *Academic Press, New York, London*, Vol.6, pp.134-312, 1970.