

사각관로의 축대칭 공동부에서의 열전달

박 용 일

대림공업전문대학 기계과

Heat Transfer in an Axisymmetric Cavity of a Rectangular Tube

Yong-II Park

Daelim Institute of Technology

요 약

사각관로의 축대칭 공동부내의 흐름에 대하여 실험적으로 연구를 하였다. 공동부의 측벽과 대항벽에서 압력과 열전달계수를 측정하였다. 공동부의 길이는 80mm에서 ∞ 로 변화시켰을 때 재부착점을 지나서 공동부의 길이를 증가시킨 경우 열전달계수는 감소하였고, 재부착점 근방에서 평균열전달계수가 최대치가 됨을 얻었다.

ABSTRACT

An experimental study for the flow in an axisymmetric cavity of rectangular tube was performed. The pressure and heat transfer coefficient along the side and opposite-walls of the cavity were measured. The cavity length was varied from 80mm to infinity during the experiment.

As the result of this study, it was found that as the length of cavity increased beyond the reattachment point, the heat transfer coefficient decreased. It was also found that the mean heat transfer coefficient became maximum near the reattachment point.

Nomenclature

B : width of nozzle, mm

Cp1 : pressure coefficient on the side-wall

Cp2 : pressure coefficient on the opposite wall

Cp : difference of pressure coefficient

D : width of cavity, mm

d : hydraulic diameter, mm

H : depth of cavity, ($\frac{D+B}{2}$), mm

h : heat transfer coefficient, W / m²·°C

k : thermal conductivity of air, W / m·°C

L : length of the cavity, mm

Nu : local Nusselt number, hd / k

\bar{Nu} : mean Nusselt number

- q heat transfer rate per unit area,
 $q=h(T_w-T_\infty)$, W / m²
- T_w local side-wall temperature, °C
- T_∞ free stream temperature, °C
- V average velocity at jet nozzle exit, m / s

I. 서론

박리현상을 동반하는 분류의 재부착점 부근에서는 열전달율이 극대치를 갖는다고 일반적으로 연구되어 있고 이러한 현상은 관속의 유체 유동에 있어서 부가적인 동력을 사용하지 않고 열전달을 증진시킬 수 있다는 관점에서 중요한 연구과제로 연구되어 왔다.

재부착점이 나타나고 있는 급히확대된 사각형 관로에 대하여 연구된 결과를 살펴보면 Filetti 등¹⁾ 은 축대칭 급히확대된 관로의 양쪽 벽면에서 온도를 측정하여 관로의 확대비에 따른 대류열전달계수를 구하였으며 양쪽벽면에서 거리가 다른 2개의 부착점이 나타나고 있음을 밝혔다. 이러한 현상은 축대칭 급히확대된 관로에서 수치 해석한 光永昭治²⁾의 연구결과에 의해서도 관로내부의 유동이 비대칭의 형태로 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

Wakisaka³⁾는 한쪽방향으로만 급히확대된 관로에서 대류열전달계수를 유로의 벽면에서 측정된 정압분포와의 관계로서 설명하고 급히확대된 사각관로에서 확대비 등을 변수로 하는 강제 대류열전달을 구하는 실험식을 제안하고 있다.

Yamamoto 등⁴⁾은 분류를 한쪽 방향으로만 편향되어 흐르게 하기 위하여 관로의 중앙에 한쪽 방향으로만 급히확대된 공동부를 가지는 경우에 공동부의 길이는 일정하게 하고 높이를 변화시켰을 때 공동부의 벽면에서 대류열전달계수를 구하였다.

그러나 실제 사용되고 있는 관로에는 사각관로의 가운데에 급히확대된 공동부를 가지는 관로를 사용하고 있음에도 불구하고 연구된 결과는 찾아 보기 힘들다.

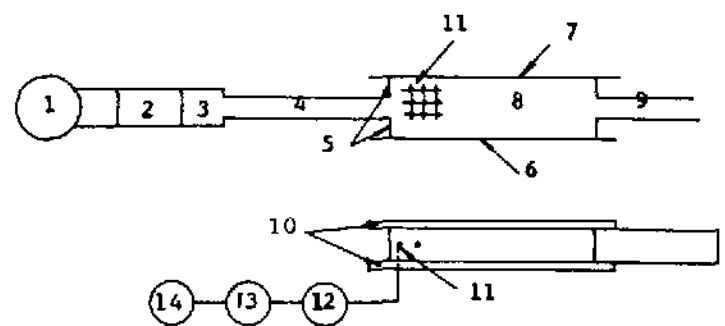
따라서 본 논문에서는 사각관로의 가운데에 공동부를 설치 하였을 때 공동부의 길이가 분류

의 부착점 및 대류열전달계수에 미치는 영향에 대하여 연구하는 것이 목적이기 때문에 공동부의 길이를 일정하게 하여 측벽에 부착되는 분류의 부착점을 일정하게 하였을 때 공동부의 상면 및 양쪽벽면에서의 정압을 측정하여 공동부의 길이가 대류열전달계수와 정압 분포에 미치는 영향에 대하여 연구하고자 한다. 이때 공동부의 길이는 6가지로 변화시켰다.

II. 실험장치 및 방법

1. 압력측정 장치 및 측정 방법

Fig.1은 실험에 사용한 장치의 개략도이다. 실험장치는 두께가 10mm인 아크릴판으로 제작하였다. 급히확대된 유로의 입구에서 발달된 유동상태와 2차원 분류를 얻기 위해 폭 10mm 높이가 50mm 길이는 노즐의 수력 반지름의 36배로 길이가 600mm인 내면이 매끄러운 직사각형 노즐을 사용하였다. 출구노즐의 폭은 입구와 같게 하였다. 노즐의 벽면에서 급히확대된 공동부의 양쪽벽면인 측벽과 대향벽까지의 거리는 20mm이다.



- 1. centrifugal blower 2. honeycomb 3. free stream temperature prove
- 4. inlet nozzle 5. step-wall 6. side-wall
- 7. opposite-wall 8. cavity 9. outlet nozzle
- 10. upper-plate 11. pitot tube
- 12. micro manometer 13. A/D 14. PC

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

1마력 3상 원심송풍기로 공동부에 공기를 유입시켰으며 관로의 접축부에서 공기가 누설되지 않도록 클램프를 사용해서 시일을 하였다.

입구 노즐의 출구에서 분출된 공기가 부착되는 벽을 측벽이라 하고, 측벽을 마주보고 있는 또하나의 벽을 대향벽이라 한다.

공동부의 길이는 Fig.3-3에서 출구노즐을 제거하여 공동부를 가지지 않고 축대칭 급히 확대된 유로만을 가지는 L 가 ∞ 인 경우의 결과를 사용해서 결정하였으며, 입구노즐로부터 출구노즐이 설치된 공동부의 길이는 분류가 부착되고 있는 부착점 근방인 80mm, 부착영역인 100mm, 부착영역이 끝나는 위치인 120mm, 부착영역이 끝나고 벽분류영역으로 된 위치인 160mm, 출구노즐의 위치가 측벽에 부착된 분류에 전혀 영향을 미치지 않도록 입구노즐 출구에서 충분히 떨어진 265mm 및 출구노즐을 제거하여 L 가 ∞ 인 위치등 6가지로 변화시킬수 있도록 하였다.

출구노즐을 설치하지 않았을때 측벽의 길이는 측벽단의 영향을 받지 않도록 600mm로 하였다.⁵⁾ 측벽, 대향벽 및 공동부의 상면에서 정압을 측정하기 위하여 내경이 0.5mm인 스테인레스관을 사용한 압력 측정 피토포를 측벽및 대향벽에서는 5mm간격으로 중앙에 50개소에 설치하고 공동부의 상면에는 사방 6mm간격으로 300개소에 설치하였다.

공동부의 상면, 측벽및 대향벽에 피토포를 설치하기 위하여 벽면에 수직으로 구멍을 뚫어 스테인레스관을 에폭시 접착제를 사용하여 접착시켰다.

벽의 표면에 스테인레스관이 튀어나와 공기의 흐름에 영향을 미치는 것을 제거하기 위하여 벽의 표면을 매끄럽게 연마하였다.

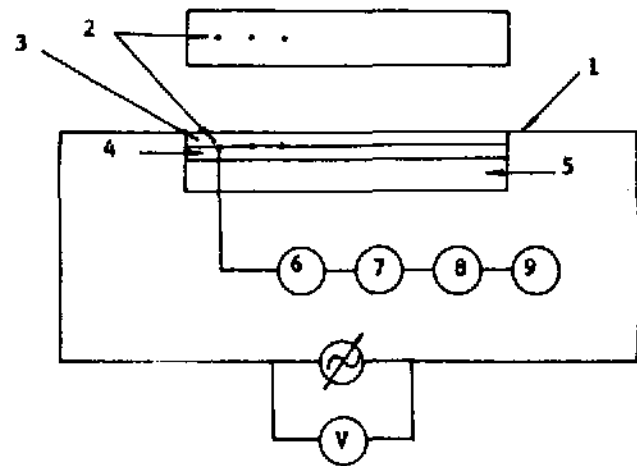
양쪽 벽면및 공동부의 상면에서 정압을 측정하기 위하여 설치된 피토포에 0.1mm Aq까지 측정가능한 마이크로마노메타를 연결하고, A/D 변환기를 이용하여 16비트 퍼스널 컴퓨터에서 시간 평균에 대한 정압을 측정하여 입구노즐출구에서 측정된 속도를 사용해서 압력계수로 나타내었다.

2. 온도측정장치 및 측정방법

실험에 사용한 장치는 Fig.2와 같은 온도 측정

용 측벽을 제외하고는 정압분포를 구하기 위해 사용된 장치와 같다.

Fig.2는 열전달 실험에 사용한 측벽의 단면을 나타내고 있다. 두께 0.03mm, 폭 50mm, 길이 2188mm인 스테인레스판을 아크릴판에 접착시켰고, 스테인레스판에 교류전원을 통과시켜 열이 발생되도록 하였다.



- 1. stainless plate 2. thermocouple
- 3. double-face adhesive tape
- 4. acrylic palte 5. styrofoam
- 6. scanning box 7. amplifier
- 8. AD 9. PC

Fig.2 Cross-sectional diagram of the side-wall for heat heat transfer experiment

실험중 일정한 전압을 유지하기 위하여 자동 전압 조정기를 사용하였고 슬라이 닥스를 사용해서 필요한 전압으로 낮추어서 사용하였다.

스테인레스판의 양쪽 끝에서 교류전원과 연결시 접촉 저항에 따른 열발생을 줄이기 위하여 스테인레스판과 전원케이블을 동판을 이용 리벳팅하였다.

스테인레스판과 아크릴판은 양면 테이프를 사용해서 접착시켰다. 양면 테이프뒤에 $\phi 0.3$ mm인 크로멜-알류멘 열전대를 부착시켰기 때문에 스테인레스판과 열전대와는 전기적으로 절연이되었다.

열전대 끝은 아르곤 가스 용접을 하여 용접기 불순물의 침투를 방지하였다.

아크릴판의 후면을 통하는 열손실을 감소시키기 위하여 열전도 계수가 0.016이고 두께가

50mm인 스티로폼을 사용해서 단열을 하였다. 실험 장치의 상·하면 및 측벽의 양끝에서 발생되는 손실도 방지하기 위하여 스티로폼으로 충분히 단열시켰다.

측벽 및 대향벽의 중앙에 8mm간격으로 70개의 열전대를 부착하였고 열전대를 스티로폼을 통하여 스캐닝장치에 연결 증폭기와 A/D 변환기를 거쳐 16비트 퍼스널 컴퓨터에서 시간 평균에 대한 온도를 측정하였다.

스티로폼을 통해서 스캐닝장치에 연결한 때에 생긴 틈은 실리콘 접착제를 사용해서 밀봉하였고 열전대는 에폭시 접착제에 의하여 아크릴판에 움직이지 않도록 고정되었다.

측벽 및 대향벽에서의 대류열전달계수는 Newton의 냉각법칙을 이용해서 구했다.

실험에서 사용한 전압은 8.66Volt이었고, 스테인레스판의 저항은 1.8 Ohm이다. 판의 표면적은 0.1094m²이었다.

열손실은 단열재 두께를 통한 온도 분포를 측정하여본 결과 선형적으로 나타났기 때문에 Fourier의 열전도법칙에 의해서 계산하였다. 열손실을 3개의 위치에서 측정하였고 전체실험을 하는 동안 약 1%이내임을 확인하였다.

정상상태에서 온도를 측정하기 위하여 스테인레스판에 전원을 연결한후 송풍기에서 공기를 분출시켜 공동부의 양쪽벽면을 냉각 시켰으며, 약 120분후 온도를 확인한 결과 변화가 없을때 온도를 측정하였다. 측정시 이 길어짐에 따른 변화를 없게하기 위해서 빠른시간에 측정하였고 측정후 몇개의 점을 선택하여 측정 전후의 온도를 확인한후 온도차이가 없을때 온도를 기록하였다.

이와같은 방법에 의해 측정된 온도를 무차원으로 나타내기 위해서 대류 열전달계수를 구한 Nusselt수로 환산하였다.

Ⅲ. 실험결과 및 고찰

입구노즐 출구에서 전압과 정압을 측정하여 평균속도 V를 구해서 Reynolds수를 구하였고 실험에 사용한 Reynolds수는 26000이었다.

Fig.3-1,2,3은 측벽 및 대향벽에서 측정된 정

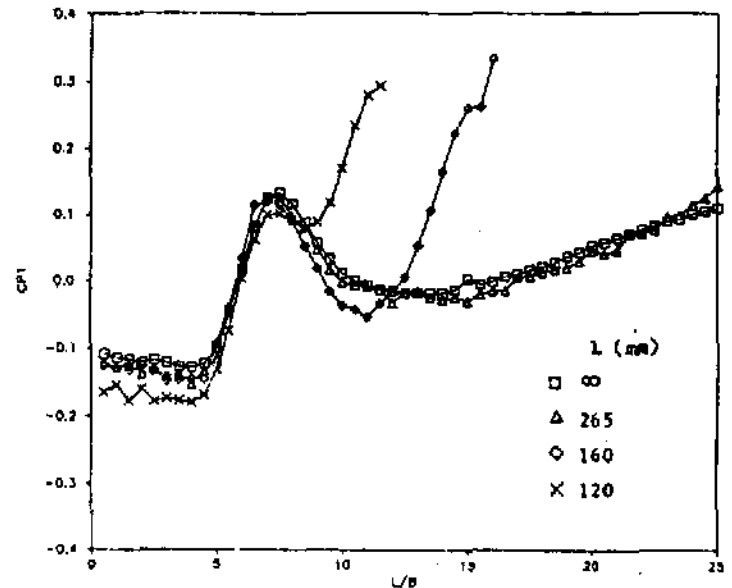


Fig.3-1 Pressure coefficient on the side-wall at the various cavity lengths

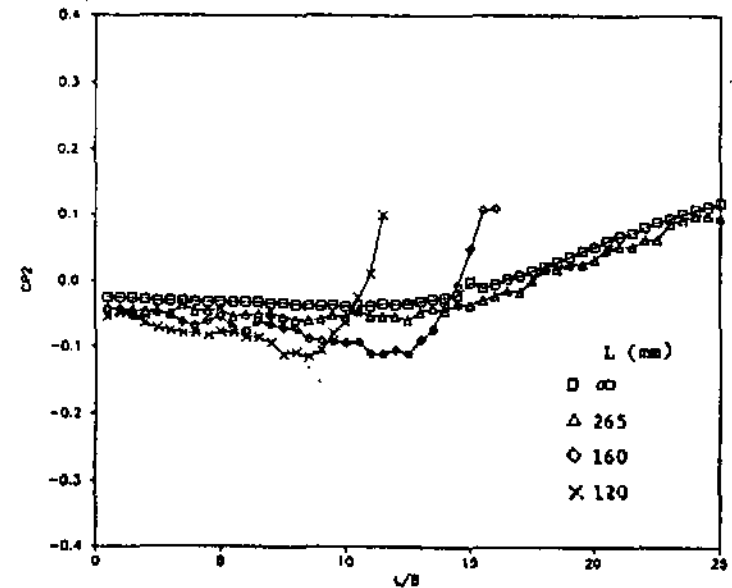


Fig.3-2 Pressure coefficient on the opposite-wall at the various cavity lengths

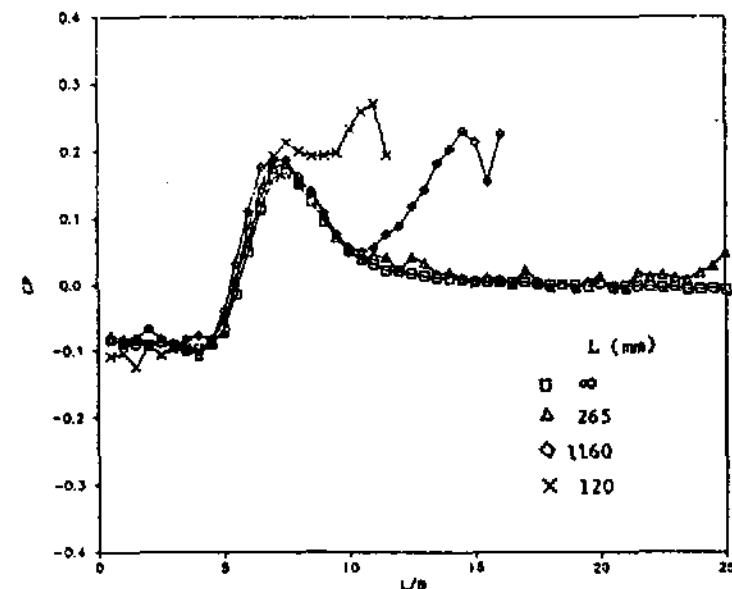


Fig.3-3 Difference of pressure coefficient on the side-wall and opposite-wall at the various cavity lengths

압을 입구노즐 출구에서 정압 및 전압을 측정해서 노즐에서의 평균속도 V 를 구하여 무차원시킨 압력계수의 분포이다.

관로의 중앙에 공동부를 가지는 경우에 있어서도 비대칭 급히 확대된 사각형 관로에서 압력계수분포를 구한 방식³⁾으로 측벽 및 대향벽에서의 압력계수 C_{p1} 및 C_{p2} 를 구하여 그 차 C_p 를 구하는 것이 타당하다고 생각된다.

Fig.3-3의 L 가 ∞ 인 경우에 있어서 입구노즐 출구에서 압력계수가 0으로 되는 L/B 가 5.5까지를 역류영역, 0에서 최대압력계수를 지나 다시 0에 가까와 지는 L/B 가 12까지를 부착영역, 그 이후의 영역을 벽분류영역이라 하였고 최대 압력계수가 나타내는 점을 분류가 벽면에 부착되는 부착점⁶⁾으로 하였다.

Fig.3-1에서 공동부의 길이 L 를 265mm로 하였을 때는 출구노즐을 제거하였을 때와 C_{p1} 은 변화가 없이 나타나고 있으나 공동부의 길이 L 가 160mm 및 120mm로 짧아 짐에 따라 최대 압력계수를 지난이후의 영역에서는 압력계수가 음의 기울기를 가지다가 급격하게 상승하는 것을 볼 수가 있다. Fig.3-2의 대향벽 압력계수에서도 공동부의 길이가 짧아짐에 따라 음의 압력계수가 측벽에서의 최고압력계수가 나타나는 점 이후에서는 급격하게 양의 기울기를 가지고 상승되고 있다.

양쪽벽면의 압력계수의 차이 Fig.3-3에서 공동부의 길이 L 가 160mm일 때에는 출구노즐 근방의 압력계수가 L 이 265mm인 경우에 비해서 높아지고 있으나 입구노즐의 출구에서부터 L/B 가 10인 곳까지의 압력계수가 L 가 ∞ 및 265mm인 경우와 거의 같게 나타나고 있는 것으로 보아 출구노즐근방의 압력상승은 분류의 부착점 또는 부착영역에서의 압력계수에는 영향을 미치지 못하고 있다. 그러나 L 가 부착영역 직후인 120mm일 때에는 출구노즐이 분류의 부착점 및 부착영역에서의 압력계수에 영향을 미치어 최대압력계수 이후의 값이 음의 기울기를 가지다가 양의 기울기로 변화하는 것을 볼 수가 있으며 높아진 압력은 부착점에서 나타나고 있는 최대압력계수의 상승과 입구노즐 출구근방의 저압부에 영향을 주어 저압부가 파괴되어

측벽에 부착된 분류는 안정되게 흐르지를 못하고 대향벽으로 휘어져 흐를수 있음을 암시하고 있다.

그리고 공동부의 길이를 분류의 부착점 부근인 L 가 100mm 및 80mm로 하였을 때는 분류는 출구노즐의 영향을 받기 때문에 명확하게 분류가 한쪽 벽면으로 부착되지 않고 거의 축대칭 흐름을 가지고 있음을 가시화 방법을 통하여 확인할 수 있었다.

Fig.4-1,2는 유로의 상면에 설치된 300개의 피토관에서 측정된 정압을 사용하여 구한 등압선도이다.

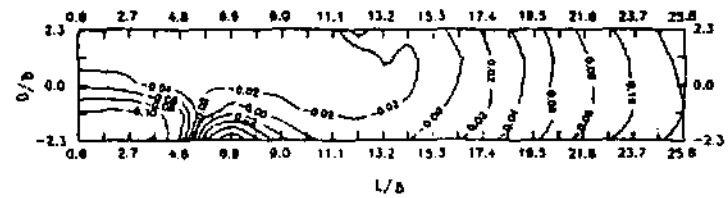


Fig.4-1 Approximate contours of constant pressure on the upper-plate surface for $L=\infty$

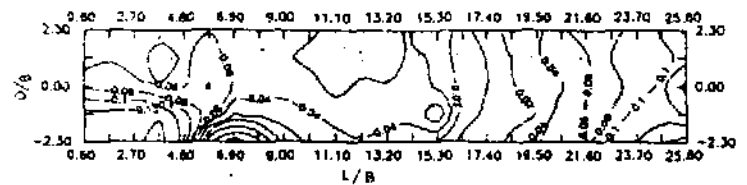


Fig.4-2 Approximate contours of constant pressure on the upper-plate surface for $L=265\text{mm}$

출구노즐이 설치되지 않았을 때 분류는 Fig.3-3의 L 가 ∞ 일때의 결과와 마찬가지로 L/B 가 7인 점에서 부착이 되고 있었으며 L/B 가 5.5인 곳에서 압력계수가 음에서 양으로 변하는 압력골이 나타나고 있다. 이러한 결과는 대향벽을 제거하여 측벽만 가지는 경우에 유로의 상면에서 등압선도를 구한 Borque 등의 연구 결과⁷⁾에서도 찾아볼 수 있다.

출구노즐을 설치한 L 가 265mm인 경우를 Fig.4-2에 나타내고 있으며 출구노즐의 분류의 부착점에 영향을 미치는 위치에 있지 않기 때문에 공동부의 상면에서의 등압선도는 큰 변화가 없이 나타나고 있었다.

공동부의 길이 L 가 80mm 및 100mm의 경우를

제외하고는 입구노즐에서 분출된 공기는 코안다현상²⁾에 의하여 축대칭의 흐름을 가지지 않고 한쪽방향으로 휘어져 측벽에 부착되어 흐르고 있음을 알수있었다.

Fig.5-1,2 는 측벽및 대향벽에서 온도를 측정하여 열전달계수를 구해서 Nusselt수로 나타낸 것이다.

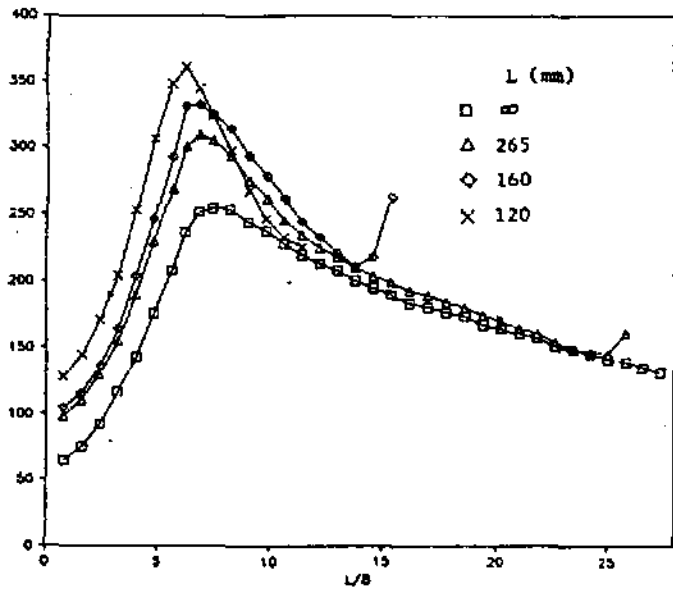


Fig.5-1 Nusselt number on the side-wall at the various cavity lengths

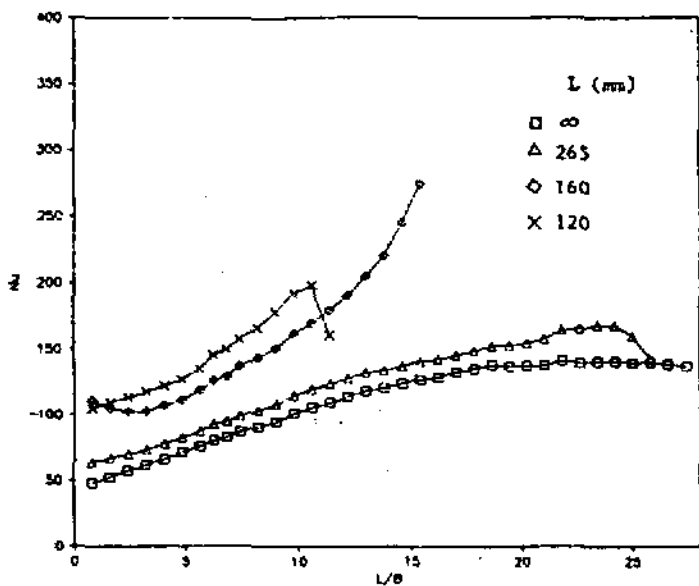


Fig.5-2 Nusselt number on the opposite-wall at the various cavity lengths

측벽에서의 Nusselt수를 나타내고 있는 Fig.5-1에서 보면 출구노즐을 제거하였을 때 보다 출구노즐을 설치하여 공동부의 길이 L가 짧아짐에 따라서 분류의 부착강도는 커지기 때문

에 측벽의 전체영역에 대하여 Nusselt수가 증가되고 있다.

Fig.3-3의 L가 120mm의 경우처럼 출구노즐이 분류의 부착점에 영향을 미치는 L가 120mm인 경우에는 최대 Nusselt수가 나타나고 있는 위치는 약간 입구노즐 출구쪽으로 이동하고 있고, 측벽에 부착된 분류가 안정된 부착영역을 가지지 못하기 때문에 최대 Nusselt수를 가지는 부착점 이후에서는 공동부의 길이가 160mm 및 265mm인 경우에 비해서 Nusselt수가 떨어지고 있다.

공동부의 길이가 265mm 및 160mm인 경우에 있어서는 출구노즐의 모서리 근방에서 국소 Nusselt수가 상승되고 있으며 이것은 출구노즐 모서리부근에 또 하나의 소용돌이 흐름이 발생되어 열전달을 촉진시키는 것으로 생각된다.

대향벽에서의 Nusselt수 분포를 나타내고 있는 Fig.5-2에 의하면 공동부의 길이가 짧아짐에 대하여 Nusselt수는 공동부의 전체영역에 대하여 증가되고 있다. 특히 측벽에서는 분류의 부착점 이후 Nusselt수는 감소되고 있으나 대향벽에서는 반대로 증가되고 있다. 이러한 현상은 측벽에 부착되었던 분류가 대향벽의 영향을 받아 대향벽에 재부착되어 입구노즐 출구쪽으로 역류되고 있기 때문이다. 이것은 대향벽에서의 압력계수를 나타내고 있는 Fig.3-2에서 확인할 수 있으며 출구노즐의 근방에서 압력계수가 양의 기울기를 가지고 급격히 상승되는 것은 측벽에 부착되었던 분류가 출구노즐의 영향을 받아 대향벽으로 재부착되는 것을 나타내고 있다.

이러한 경향은 출구노즐을 가지지 않는 급히 확대된 관로에서 대류열전달계수를 구한 Filetti 등¹⁾의 연구결과에서도 2개의 부착점이 나타났고 대향벽의 재부착점에서 다시 대류열전달계수가 증가되고 있는 것으로 설명하고 있다.

본 논문에서도 공동부의 길이 L가 ∞ 일때 대향벽의 L/B가 25인 근방에서 또 하나의 대류열전달계수의 최대치를 찾아내었으며 그 위치는 社河内敏彦의 결과⁶⁾와도 잘 일치되고 있었다. 또한 공동부의 길이 L가 짧아짐에 따라서 출구노즐의 영향을 받아 대향벽에서의 최대

Nusselt수가 나타나는 위치도 입구노즐 출구 근방쪽으로 이동하고 있었다.

측벽 및 대향벽에서 측정된 대류열전달 계수를 공동부 길이에 대한 평균 Nusselt수로 환산하여 같은 길이의 공동부에 대해 측벽과 대향벽의 평균 Nusselt수를 합산하여 평균치를 구한 결과를 Fig.6에 나타내고 있다.

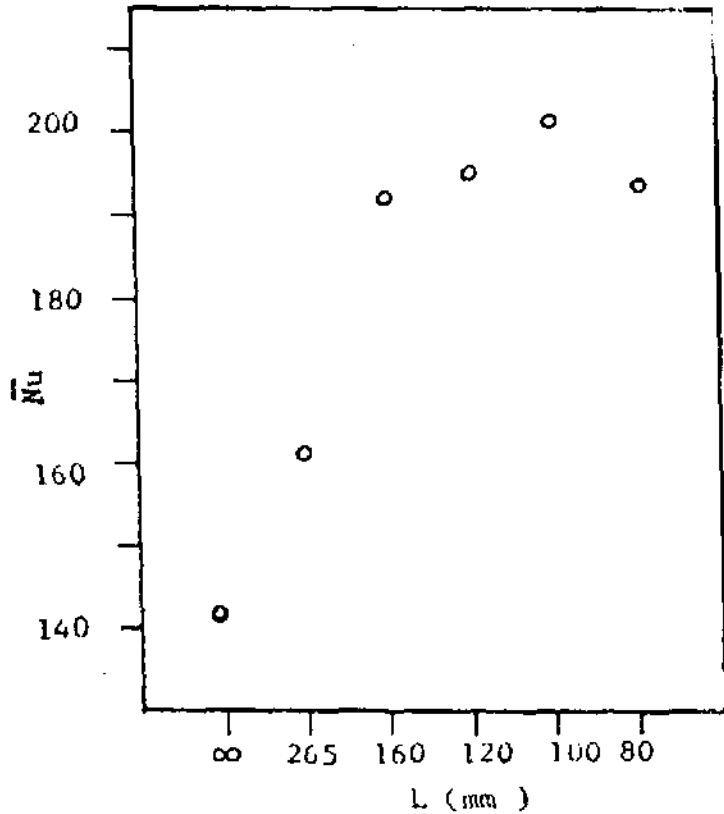


Fig.6 Average Nusselt number at the various cavity lengths

공동부의 길이가 짧아짐에 따라 평균 Nusselt수가 증가되지만 공동부의 길이가 분류의 부착점 근방인 L가 80mm에서는 감소되고 있다. 이것은 분류가 출구노즐의 영향을 받아 측벽에 부착되지 못하고 공동부내에 거의 일정한 압력 계수를 가지는 하나의 소용돌이 흐름으로 바뀌는 현상때문인 것으로 생각되어진다.

IV. 결 론

사각관로의 축대칭 공동부에서 공동부의 길이 L를 ∞, 265mm, 160mm, 120mm, 100mm, 및 80mm로 변화시켰을때 공동부의 양쪽벽면에서 온도와 압력을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 출구노즐이 분류의 재부착 영역을 지나 설치되었을때 측벽, 대향벽에서의 최대 및 평균 Nusselt수는 출구노즐의 위치가 바깥쪽으로 갈수록 감소한다.
2. 공동부가 분류의 재부착 영역을 지나 설치되면 공동부내의 흐름은 비대칭이 되고 측벽과 대향벽에서 Nusselt수는 서로 다르다.
3. 출구노즐이 재부착영역인 L가 100mm에 설치될때 평균 Nusselt수는 최대값을 가진다.

후기 : 이 논문은 1989년도 학교법인 대림학원 학술연구비지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. E.G. Filetti & W.M. Kays, "Heat Transfer in Separated, Reattached, and Redevelopment Regions Behind a Double Step at Entrance to a Flat Duct", Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, vol. 89, 1967, pp. 163-168.
2. 光永昭治, "コアソダ現象についての一考察," 日本機械學會論文集, 42卷 364號(昭 51-12), pp. 3899-3905.
3. N.Wakisaka, "Heat Transfer of Reattachment Region of Sudden Expansion Flow in Ducts," JSME, vol.51, no.461, 1985, pp. 345-349.
4. H.Yamamoto & N.Seki, "Forced Convection Heat Transfer on Heated Bottom Surface of a Cavity," Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, vol. 101, 1979, pp. 475-479.
5. 熊田雅弥 "側壁を有する噴流による熱傳達の研究," 日本機械學會論文集, 39卷 319號 (昭 48-3), pp. 920-929
6. 社河内敏彦, "側壁付着噴流に關する研究," 日本機械學會論文集, 39卷 310號 (昭 56-9), pp. 1726-1735
7. C. Bourque & B.C. Newman, "Reattachment of a Two-Dimensional Incompressible Jet to an Adjacent Flat Plate," AERON. Quarterly, vol.11, 1960, pp.201-232.