

음향여기에 의한 2차원 후방계단과 공동 내의 유동 및 열전달 특성 변화

강승구*, 이동호**, 조형희†

(2001년 4월 2일 접수, 2001년 7월 10일 심사완료)

Flow and Heat Transfer Characteristics in a Separated Flow over Backward-facing Step and Cavity Controlled by Acoustic Excitation

Seung-Goo Kang, Dong Ho Rhee and Hyung Hee Cho

Key Words: Backward-Facing Step(후방계단), Cavity(공동), Separation and Reattachment(박리 및 재부착), Acoustic Excitation(음향여기), Heat/Mass Transfer(열/물질전달), LDV Measurement(광학속도측정)

Abstract

Experimental study is conducted to investigate the heat/mass transfer and flow characteristics for the flow over backward-facing step and cavities. A naphthalene sublimation method has been employed to measure the mass transfer coefficients on the duct wall and LDV system has been used to obtain mean velocity profiles and turbulence intensities. Reynolds number based on the step height and free stream velocity is 20,000 and St numbers of acoustic excitations given to separated flow are 0.2 to 0.4. The spectra of streamwise velocity fluctuation show a sharp peak at forcing frequency for an acoustically excited flow. The results reveal that the vortex pairing and overall turbulence level are enhanced by the acoustic excitation and a significant decrease in the reattachment length and the increased turbulence intensity are observed with the excitation. A certain acoustic excitation increases considerably the heat/mass transfer coefficient at the reattachment point and in the recirculation region. For the cavities, heat/mass transfer is enhanced by the acoustic excitation due to the elevated turbulence intensity. For the 10H cavity, the flow pattern is significantly changed with the acoustic excitation. However, for the 5H cavity, the acoustic excitation has little effect on the flow pattern in the cavity.

기호설명

dy : 나프탈렌의 승화 두께

D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌 물질확산계수

f : 주파수 (Hz)

H : 후방계단 높이

h_m : 국소물질전달계수

* (주)삼성전자 종합기술원

** 연세대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

m : 나프탈렌 승화에 대한 질량유속

Re_H : Reynolds 수, $U_{\infty}H/\nu$

Sh : 국소 Sherwood수, $h_m H/D_{naph}$

St : Strouhal 수, fH/U_{∞}

T.I. : 주유동방향 난류 강도, $\sqrt{u'^2}/U_{\infty}$

u : 주유동방향 속도

U_{&infty} : 주유동 속도

x : 주유동방향 좌표

y : 높이방향 좌표

z : 폭방향 좌표

그리스문자

δ : 박리되는 지점에서의 경계층의 두께

- δ^* : 박리되는 지점에서의 경계층의 배제두께
 θ : 박리되는 지점에서의 경계층의 운동량두께
 ρ_s : 고체 나프탈렌 밀도
 $\rho_{v,w}$: 나프탈렌벽면에서 나프탈렌 증기밀도
 $\rho_{v,\infty}$: 주유동에서 나프탈렌 증기밀도
 $d\tau$: 나프탈렌 표면의 유동장 노출 시간

1. 서 론

유동의 박리(separation) 및 재부착(reattachment) 현상은 열교환기, 가스터빈, 연소기, 전자회로기판의 냉각시스템, 디퓨저, 핵반응기 등 공학의 여러분야에서 다양하게 나타난다. 열전달 측면에서 박리 및 재부착 유동은 하류 영역의 국소열전달 계수 분포에 큰 변화를 주고 전체적인 평균열전달계수의 증가를 가져오기 때문에 시스템설계 단계에서 그 현상의 이해와 예측이 매우 중요하다.

2차원 후방계단(two dimensional backward-facing step) 및 공동(cavity)은 유동의 박리, 재부착 및 재순환을 일으키는 가장 간단한 형상 중의 하나이다. 2차원 후방계단의 경우 상류평판을 따라 형성된 유동경계층은 계단 모서리에서 박리되면서 자유전단층(free shear layer)을 형성하며, 계단 하류에 하나의 박리영역을 형성한다.

박리된 자유전단층 내에는 큰 와류 구조(large scale vortex)가 존재하고 이러한 와류구조가 하류로 진행하며 발달, 병합(vortex pairing)하는 과정이 박리 및 재부착 유동의 전반적인 특징을 결정 짓게된다. 이와 같은 와류의 생성, 병합과정은 일정한 주파수 특성을 갖게되는데 와류생성의 기본주파수(vortex shedding frequency)를 이용하여 박리 및 재부착유동을 제어하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.

Troutt 등⁽¹⁾은 열선유속계를 사용한 2차원 후방계단을 지나는 이러한 박리 및 재부착 유동에 대한 실험을 통해 박리전단층에서 큰 와류구조가 생성되어 발달, 병합해 나가고, 재부착 이전에 일어나는 이러한 와류구조의 병합이 유동전반에 큰 영향을 미침을 보였다. Roos와 Kegelman⁽²⁾은 후방계단모서리에 진동하는 플랩(flap)을 설치하여 박리되는 전단층에 기본주파수와 관계된 주파수 성분을 가함으로써 재부착길이의 감소와 같은 실질적인 박리 및 재부착유동의 변화가 나타남을 보였다. 또한 이러한 변화는 난류 경계층에서

박리된 불규칙적인 와류구조를 규칙화함으로 박리 유동장의 혼합 및 유입(entrainment)을 촉진시킴으로써 나타난다고 설명하고 있다. Bhattacharjee 등⁽³⁾은 2차원 후방계단이 설치된 덕트 상부에 설치된 스피커(speaker)를 통하여 박리 유동장에 음향여기(acoustic excitation)를 가하는 경우, 음향여기 주파수의 무차원수인 St 수 0.2~0.4 범위에서 가장 효과적으로 전단류의 확산 및 재부착길이의 감소가 이루어짐을 보였다. 또한 Chun과 Sung⁽⁴⁾은 음향여기효과에 관한 유동 실험을 넓은 범위의 주파수와 여기진폭(forcing amplitude)에 대하여 수행하였다.

박리 및 재부착 유동내 바닥면에서의 열전달특성과 음향여기에 의한 그 특성 변화에 대한 연구는 박리 및 재부착하는 고온의 유동장의 제어와 외부로부터 불가피하게 일정 주파수 성분이 유입되는 경우의 유동 및 열전달특성에 대한 예측을 위해 필요하다. 하지만, 이와 같은 연구는 매우 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 2차원 후방계단과 공동을 지나 박리 및 재부착하는 유동내 바닥면에서의 열전달 특성과 함께 덕트상부에 설치된 스피커를 통해 음향여기했을 때 유동장의 변화와 바닥면에서의 열/물질전달계수의 변화에 대해 고찰하고자 하였으며, 유동에 가해지는 음향의 주파수는 St 수 0.2~0.4인 범위 내에서 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 바닥면의 열/물질전달특성을 파악하기 위해 나프탈렌 승화법(naphthaelen sublimation method)을 이용한 물질전달 실험을 수행하였다. 이를 통해 열전달 실험에서 발생할 수 있는 전도 및 복사 오차를 제거할 수 있으며 경계조건은 열전달실험의 등온조건에 해당한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 풍동

실험에 사용된 풍동은 개방송출형(open blowing type)으로 펜(fan), 확산부(diffuser), 수축부(contraction), 시험부(test section)로 구성되며 수축부의 면적 축소비는 9:1이다.

시험부에서 후방계단의 높이(H)는 25 mm, 계단 상류단면은 300 mm × 195 mm, 하류단면은

300 mm × 220 mm이고 총길이는 985 mm이며 아크릴로 제작되었다. 횡방향길이의 계단높이에 대한 비(aspect ratio)는 12로서 de Brederode 등⁽⁵⁾이 제안한 2차원 박리 및 재부착유동 조건을 만족한다. 2차원 후방계단과 함께 공동에 대한 실험을 위해 같은 높이의 전방계단을 제작하여 하류 방향 길이가 각각 10H, 5H인 공동을 형성하였으며, 그 개략도가 Fig. 2에 제시되어 있다. 10H-, 5H-공동은 각각 후방계단에서 박리된 유동이 바닥면에 재부착하는 경우와 재부착하지 않고 통과하는 경우이므로, 이로부터 공동을 지나는 박리 유동에 대한 음향여기의 효과를 고찰하고자 하였다.

실험조건으로 사용된 주유동 속도는 12 m/s로 고정하였으며, 이 경우 후방계단 높이를 특성길이로 한 Re 수는 $Re_f=20,000$ 이다. 수축부와 연결되는 시험부 시작지점에는 하류에서 난류경계층의 발달을 촉진하기 위해 직경 2.5 mm의 트립와이어(trip wire)를 설치하였다. 계단모서리에서 측정한 경계층의 두께는 약 15 mm이고 박리되는 경계층의 자세한 유동조건은 Table 1에 나타내었다. 이와 더불어 실험중 주유동의 온도를 정확하게 측정하기 위해 계단 상류부분에 T-type (copper-constantan) 열전대를 부착하였다.

2.1.2 음향여기장치

후방계단 모서리에서 박리된 전단층(free shear layer)에 대한 음향여기의 영향을 알아보기 위하여 시험부의 후방계단 상부 위치에 스피커를 설치하였다. 일정 주파수를 갖는 정현파(sine wave)를 갖는 음향장으로 박리 유동장을 여기하였으며 그에 따른 후방계단 하류에서의 유동 및 열전달의 변화를 관찰하였다.

박리전단층에 가해지는 정현파는 주파수 발생프로그램(CoolEdit)을 이용하여 생성하고 이 생성

된 파형을 증폭기(amplifier, Crest LA901)를 통해 원하는 음압으로 증폭시킨 후 200 W 용량의 저음역용 스피커(woofer speaker)로 출력하였다.

시험부에 가해지는 음향의 주파수는 St 수로 무차원화 하였으며 음압은 후방계단 모서리 부근에서 음압측정기(TES1350)로 측정하여 모든 실험 조건에 대해 약 130dB을 유지하도록 하였다. 또한 오실로스코프(oscilloscope)를 사용하여 시험부 내에서 음향의 파형과 주파수가 유지되는지 확인하였다.

2.2 시험시편

Fig. 1에 시험부의 좌표계와 시험시편 설치시의 개략도가 제시되어 있다. 본 연구에서는 물질전달실험을 수행하기 위해 나프탈렌 표면을 형성한 시험시편을 사용하였다. 시험시편은 주조를 통해 나프탈렌면을 형성한 후 후방계단 하류 바닥면 및 공동 바닥면에 설치하였다.

열/물질전달계수는 실험 중 승화된 나프탈렌의 깊이측정을 통하여 구하였다. 승화량 측정을 위해 2차원 자동이송장치로 이송되는 선형가변차동 변환기(LVDT; linear variable differential transformer)를 이용하였다. 또한 시편에는 나프탈렌표면 가까이에 비드(bead)가 위치하도록 T-type 열전대를 부착하여 실험중 나프탈렌표면온도를 측정함으로써 나프탈렌표면에서의 포화증기압을 구할 수 있도록 하였다.

Table 1 Flow boundary layer conditions at the step edge

U_∞	H	δ	δ^*	θ	δ^*/θ
12.0 m/s	25 mm	14.9 mm	1.74 mm	1.41 mm	1.23

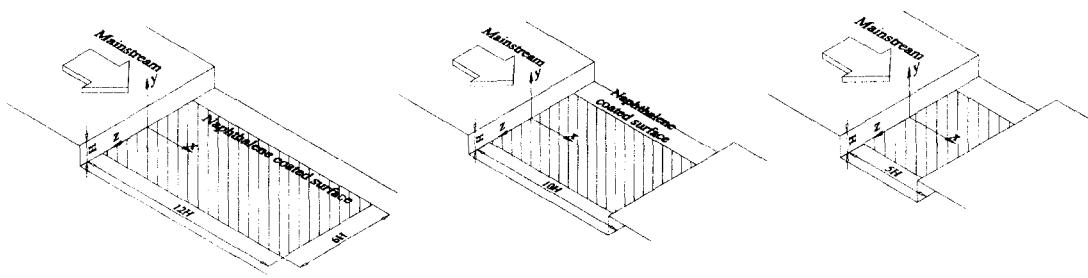


Fig. 1 Coordinate system and test plates

2.3 열/물질전달계수 측정

본 연구에서는 나프탈렌 승화법에 의한 물질전달실험을 수행하였다.

물질전달계수 h_m 은 다음과 같이 정의된다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s(dy/dt)}{\rho_{v,w}} \quad (1)$$

여기서 \dot{m} 은 나프탈렌 표면에서의 단위시간당 승화량이고, $\rho_{v,w}$ 는 나프탈렌 벽면에서의 증기밀도이다. 본 실험에서 주유동은 나프탈렌을 포함하고 있지 않으므로 $\rho_{v,\infty} = 0$ 이다. 이와 같이 물질전달계수는 나프탈렌의 승화깊이(dy), 실험시간($d\tau$), 고체나프탈렌의 밀도(ρ_s)와 표면에서의 나프탈렌 증기밀도($\rho_{v,w}$)로부터 구할 수 있다. 벽면에서의 나프탈렌 증기밀도, $\rho_{v,w}$ 는 Ambrose 등⁽⁶⁾이 제안한 실험식으로부터 얻은 나프탈렌의 포화증기압을 이상기체 방정식에 대입하여 구하였다.

물질전달계수의 무차원형태인 Sherwood 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Sh = \frac{h_m H}{D_{naph}} \quad (2)$$

D_{naph} 는 Goldstein과 Cho⁽⁷⁾가 제시한 나프탈렌의 물성치를 근거로 하였다.

이와 같은 계산과정을 통하여 얻어진 물질전달계수(Sh 수)는 물질전달과 열전달 사이의 상사성에 의하여 열전달계수(Nu 수)로 변환할 수 있는데 상관 관계식은 난류의 경우 아래와 같다.

$$Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4} \quad (3)$$

실험결과에 대한 불확실성(uncertainty)은 Kline과 McClintock⁽⁸⁾이 제시한 방법을 이용하여 수행하였으며, 95% 신뢰수준(confidence level)에서 전달계수의 무차원수인 Sherwood 수의 오차는 7.9% 이내였다. 이러한 오차는 주로 나프탈렌의 증기밀도나 공기중에서의 나프탈렌의 확산계수와 같은 불확실한 물성치에 기인하였다.

2.4 유동장측정 및 주파수 특성 분석

본 연구에서는 LDV(laser Doppler velocimeter)를 이용하여 유동장의 평균속도 및 난류속도성분을 측정하였다. 난반사로 인한 잡음을 최소화하기 위하여 입사광이 투과되는 투명의 플렉시 글라스(Plexiglas)를 제외한 모든 실험 장치는 무광의 검은색 도료로 착색하여 신호대 잡음비(S/N ratio)를 향상시켰다. 또한 데이터 획득율은 500 Hz 이상을 유지하여 주유동속도에 대해 충분한 수의 산란입자를 검출하도록 하였으며 본 실험에서 산란입자는 하이드로졸(hydrosol)을 사용하였다. LDV 장치는 3차원 이송장치와 58G130 FVA, 58/N40 FVA처리장치를 가진 후방 산란형(back scatter type) DANTEC LDV로 아르곤이온 레이저의 최대 출력은 5 W이다. 본 실험의 LDV를 이용한 속도측정에서 주유동방향 속도성분은 0.4%, 섭동속도(RMS velocity)와 난류강도(T.I.)는 0.5% 이내의 오차를 갖는다.⁽⁹⁾

박리된 전단층에 존재하는 와류의 생성, 발달, 병합과 관련된 주파수 특성을 파악하고 음향여기를 통하여 그 특성의 변화를 고찰하기 위해서 열선유속계(TSI IFA-300)를 이용하여 후방계단 하류 및 공동 내에서의 속도를 측정하고 그 결과를 FFT(Fast Fourier Transform) 처리하였다. 이때 속도측정 및 FFT에서의 검출속도는 (sampling rate)은 4,000Hz로 하였고, 2,000Hz의 LPT(low pass filter)를 사용하였으며 한 지점에서 4,096개의 데이터를 획득하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 유동가시화

2차원 후방계단의 경우에 대해 유막법(oil and lampblack method)을 이용한 유동가시화를 통하여 박리유동의 재부착지점을 파악하였다. 재부착 이후 재순환영역과 재발달영역으로 나뉘어 흐르는 유동의 바닥면에서 전단력에 의해 남겨지는 탄소가루 궤적으로 재부착지점을 확인할 수 있다.

Fig. 2(a)는 음향여기 하지 않았을 경우($St=0.0$)의 가시화 결과를 보이고 있다. 재부착지점은 중앙부근에서 $7H$ 로 가장 크며, 벽면쪽으로 가면서 $6.5H$ 까지 변화하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 시험부의 큰 종횡비에도 불구하고 3 차원적인 재순환영역이 형성되기 때문인데 이는

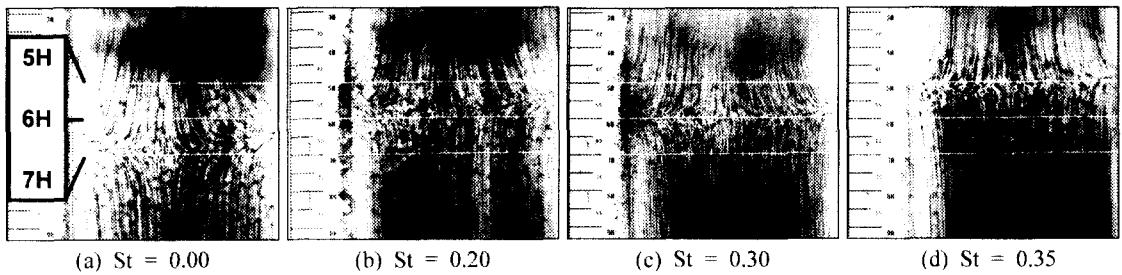
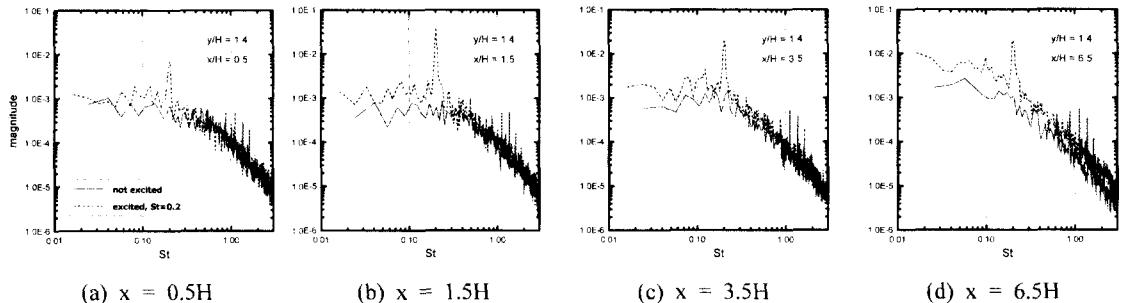


Fig. 2 Surface flow visualizations using oil and lampblack method

Fig. 3 Velocity spectra along the streamwise position for $St = 0.0$ and 0.2 for backward-facing step

수치해석으로도 확인할 수 있다. Figs. 2(b)~(d)는 $St=0.20$, 0.30 및 0.35 로 각각 음향여기를 하였을 때의 가시화 결과를 보이고 있다. 각 경우에 있어 재부착길이는 $5H$ 에서 $6H$ 사이에 분포하고 있다. $St=0.35$ 로 음향여기 하였을 때 재부착길이의 감소효과가 가장 크게 나타났지만 St 수 변화에 따른 일정한 경향은 발견할 수 없었다. 위 유동가시화 결과로부터 본 실험에서 관심을 갖은 $St=0.2\sim0.4$ 범위에서 음향여기에 의해 $2H$ 까지 재부착길이가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 더불어 재부착지점의 궤적이 좀 더 직선에 가까운 것을 볼 수 있는데 이로부터 재순환유동의 2차원성이 증진됨을 추정할 수 있다. 유동가시화로부터 확인된 이러한 재부착길이의 감소와 유동의 2차원성 증진은 이전의 연구결과들과 정성적으로 일치한다.

3.2 박리유동내의 주파수 특성

후방계단과 $10H$ -, $5H$ -공동에서 속도값은 폭방향 중심면($z=0$)에서 $y=1.4H$ 높이와 $x=0.5H$ 위치부터 하류방향으로 $1H$ 간격으로 측정하였다. $y=1.4H$ 지점은 계단모서리에서 박리되는 경계층의 높이에 해당된다.

따라서 이러한 경계층이 박리되는 경우 와류의

가장자리가 이 위치를 통과하게 되어 주파수 특성이 강하게 나타날 것으로 예상할 수 있다. $St=0.20$ 으로 음향여기한 경우 $y=1.0H$ 와 $1.4H$ 사이를 $0.08H$ 간격으로 측정한 결과 각 경우에 있어 경향은 모두 유사하나 $y=1.4H$ 에서 음향여기의 효과가 가장 두드러지게 나타남을 볼 수 있었다.

Fig. 3은 후방계단에서 $St=0.20$ 으로 음향여기한 경우와 음향여기하지 않은 경우 하류방향으로 진행하면서 나타나는 주파수 특성의 차이를 보이고 있다. $St=0.20$ 인 경우에 나타나는 가장 두드러진 특징은 유동에 가해지는 음향의 주파수에 해당되는 유동의 섭동에너지(fluctuation energy) 주파수 성분이 크게 증가되는 것이다. 이러한 극대값은 하류로 진행하면서 계속 유지되고 유동가시화로 추정된 재부착지점 이후인 $x=6.5H$ 까지 유지되고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 극대값의 형성과 더불어 $St=0.0$ 과 $St=0.20$ 인 경우 음향여기 주파수 이하의 범위에서 섭동에너지의 큰 차이를 나타나고 있다. 또한 $St=0.10$, 0.05 에서 부수적인 극대값들이 나타나고 있는데 이는 음향여기에 의해 음향여기 주파수를 중심으로 박리전단층내의 와류구조가 규칙화(regularization)된 결과라 할 수 있을 것이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 같은 조건에서 $10H$ -, $5H$ -공동

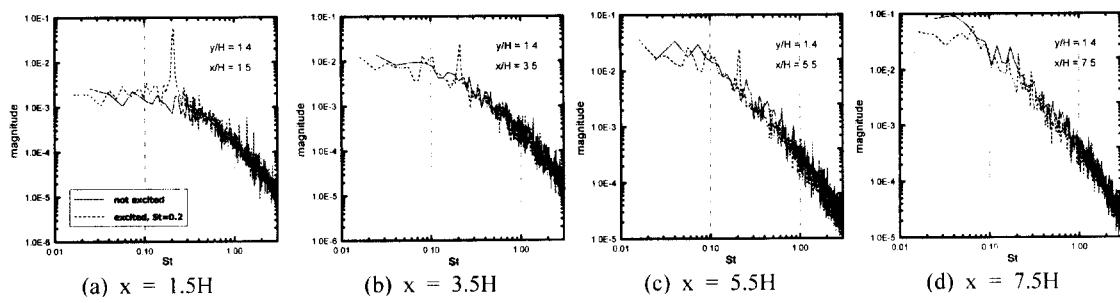


Fig. 4 Velocity spectra along the streamwise position at $St = 0.0$ and 0.2 for $10H$ -cavity

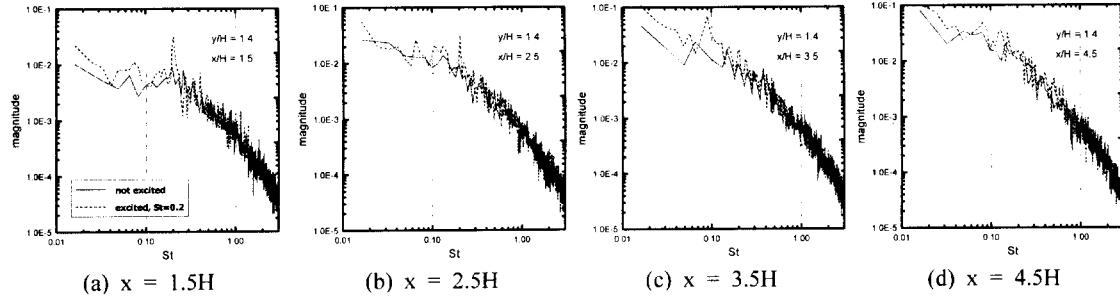


Fig. 5 Velocity spectra along the streamwise position at $St = 0.0$ and 0.2 for $5H$ -cavity

에 대한 결과이다. 박리 직후에 음향여기 주파수에서 극대값이 나타나는 것은 후방계단의 경우와 동일하지만 일정 하류를 진행한 이후에는 극대값이 사라지고 있다. 또한 음향여기의 의한 섭동에너지의 상대적 증가 역시 후방계단에 비해 매우 약하거나 거의 차이가 없게 나타나고 있다. 이러한 결과는 공동에 있어서도 $St=0.20$ 로 음향여기함으로써 와류생성이 촉진되는 것은 분명하지만 그 발달과정이 하류에 존재하는 전방계단에 의해 제한되고 있기 때문으로 볼 수 있다. 그리고 하류로 진행하면서 저주파영역이 앞서 후방계단의 경우보다 훨씬 발달되어 나타나고 있는데 이 역시 전방계단에 의해 박리유동장내 주파수 특성이 변화한 때문으로 생각된다.

3.3 음향여기에 의한 열/물질전달계수의 변화

본 연구에서는 물질전달 실험방법중의 하나인 나프탈렌 승화법을 이용하여 후방계단과 $10H$, $5H$ -공동의 하류 바닥면에서의 열/물질전달 특성과 이러한 특성이 음향여기에 의해 어떻게 변화하는지에 대해 고찰하였다.

Fig. 6은 음향여기를 하지 않은 경우, 후방계단 및 $10H$, $5H$ -공동의 하류 바닥면에서의 Sh수의 분포를 보이고 있다. 후방계단의 경우 계단모서리에서 박리된 유동은 일정거리 이동한 후

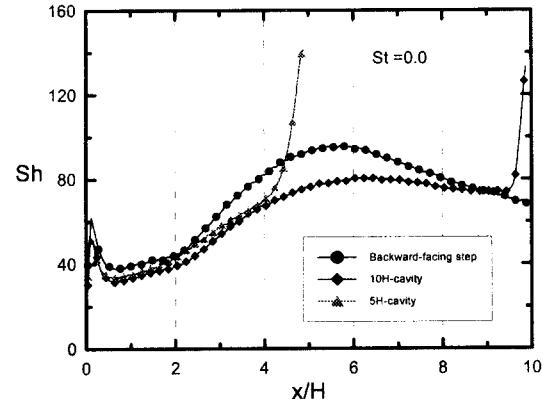


Fig. 6 Streamwise distributions of Sh for backward-facing step, $10H$ and $5H$ cavities at $St = 0.0$

바닥면에 재부착하고 재순환영역과 재발달영역으로 나뉘어 흐르게 된다. 유동가시화 결과와 위의 Sh수 분포로부터 열/물질전달계수는 재부착지점 약 $1H$ 상류부근에서 극대값을 갖고 재순환영역과 재발달영역의 각 방향으로 감소하는 경향을 가짐을 알 수 있다.⁽¹⁰⁾ 또한 재순환영역에서는 재부착 이후 후방계단으로 접근하던 유동이 계단을 만나 상승하면서 계단하부 모서리에 2차와류가 형성되게 되는데 이로 인해 모서리에서의 전달계수가 급격히 증가하는 모습을 보이고 있다.⁽¹¹⁾

10H-공동에서는 전달계수의 극대값이 후방계단에 비해 상대적으로 낮고 약간 하류로 내려간 모습을 보이고 있다. 또한 후방계단 하부 모서리에서처럼 전방계단 앞에 재순환영역과 2차와류가 존재함으로써 모서리에서 전달계수가 매우 급격히 증가함을 볼 수 있다. 5H-공동의 경우 박리된 유동이 바닥면에 재부착하지 않고 공동 내에 하나의 큰 와류구조가 형성된다. 이 와류구조가 바닥면의 열/물질 전달계수 분포를 결정하여 전체적으로 하류 전방계단에서부터 상류 후방계단으로 감소하는 경향을 보이게 된다.

Fig. 7은 후방계단에서 $St=0.0$ 인 경우와 $St=0.20$ 및 0.30 으로 음향여기한 경우의 후방계단 하류 바닥면에서의 열/물질 전달계수의 분포이다. 앞서 유동가시화 결과에서 예상되었듯이 재부착지점과 관계된 전달계수의 극대값 위치가 음향여기에 의해 상류쪽으로 이동했으며 그 폭이 $1\sim1.5H$ 정도인 것을 볼 수 있다. 이와 함께 재순환영역에서의 전달계수가 전체적으로 증가했음을 볼 수 있는데 이는 앞서 음향여기에 의한 주파수특성 변화에서 설명되었듯이 박리된 전단층에 존재하는 큰 와류구조의 생성, 병합이 음향여기에 의해 규칙화되고 유동에서 큰 스케일을 갖는 이러한 와류구조가 주도하는 재순환영역과 주유동간의 전달현상의 촉진으로 나타난 결과로 이해할 수 있다. 또한 음향여기로 짧아진 재부착길이는 박리 유동이 바닥면에 충돌(impingement)하는 각도를 크게 하여 재부착지점 부근에서 특히 큰 전달계수가 나타난 것으로 보인다.⁽¹²⁾

Fig. 8과 Fig. 9는 10H- 및 5H-공동에서 $St=0.20$, 0.30 , 0.40 인 경우와 $St=0.0$ 인 경우의 차이를 보이는 그림이다. 10H-공동에서 음향여기하지 않은 경우 상대적으로 낮고 하류에 위치하던 극대값이 음향여기에 의해 상당히 증가하여 상류로 이동했음을 볼 수 있다. 후방계단에서 극대값이 재부착과 밀접한 관계를 가짐을 볼 때 $St=0.0$ 인 10H-공동의 경우 전방계단의 존재로 인해 재부착이 불분명하지만 음향여기를 통해 재부착이 명확하게 형성되고 후방계단에서와 같은 재순환영역에서의 전달현상 촉진으로 전체적으로 높은 Sh수 분포를 보임을 알 수 있다.

5H-공동의 경우 음향여기에 의해서도 재부착이 일어나지 않아 모든 경우에서 비슷한 경향을 보이고 있으나 $St=0.0$ 인 경우가 전달계수의 분포가

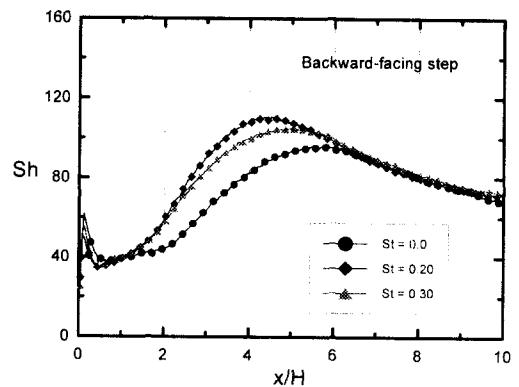


Fig. 7 Streamwise distribution of Sh for backward-facing step at $St = 0.0$, 0.2 , and 0.3

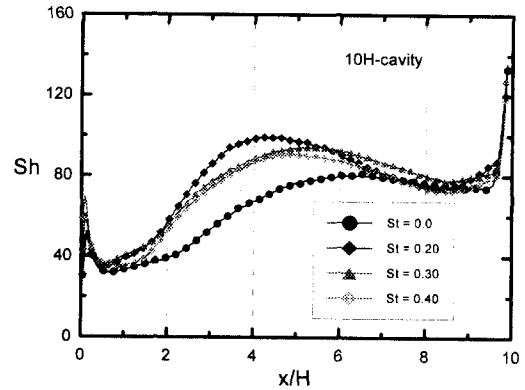


Fig. 8 Streamwise distribution of Sh for 10H-cavity at $St = 0.0$, 0.2 , 0.3 and 0.4

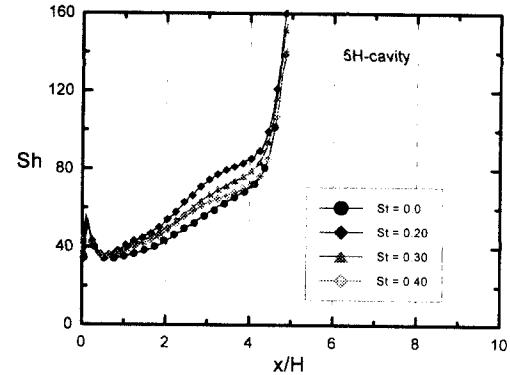


Fig. 9 Streamwise distribution of Sh for 5H-cavity at $St = 0.0$, 0.2 , 0.3 and 0.4

가장 낮게 나타나고 있다. 결과적으로 후방계단, 10H- 및 5H-공동, 모든 경우에 있어 실험한 범위 내에서는 $St=0.20$ 인 경우가 전달현상의 촉진이 가장 강하게 나타났음을 알 수 있었다.

3.4 음향여기에 의한 유동장의 변화

박리유동장내에서 음향여기에 의한 열/물질전달 특성을 자세히 알아보기 위해 $St=0.20$ 으로 음향여기한 경우 유동장의 변화를 LDV를 이용하여 시험부의 폭방향 중심면($z=0.0H$ 평면)에서 $x=0.5H$ 지점부터 주유동 방향으로는 $1.0H$ 간격, 바닥으로부터 높이방향으로 $0.04H$ 간격으로 측정하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 $St=0.0$ 와 0.20 인 경우의 후방계단하류에서 주유동방향 속도분포와 주유동방향 난류강도에 대한 측정 결과이다. 재부착지점결정을 위해 폭방향 중심면($z=0.0H$ 평면), $y=0.02H$ 높이에서 $x=4.5H \sim 7.5H$ 영역을 하류방향으로 따로 측정하였는데 $St=0.0$ 인 경우는 $x=6.6H$, $St=0.20$ 인 경우는 $x=5.6H$ 에서 주유동 방향 평균속도가 0으로 나타났다. 이러한 결과는 유동가시화 결과와 대략 일치하는 것이고 열/물질전달 결과와 비교했을 때 재부착지점은 열/물질전달계수의 극대점보다는 약 $1H$ 하류에 위치하고 있음을 볼 수 있다.⁽¹⁰⁾ 평균속도장을 보면 $St=0.20$ 인 경우에 있어서 재부착지점의 감소와 이에 따른 전단류의 확산이 좀더 빠른 것을 제외하고는 $St=0.0$ 경우와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 난류강도에 있어 음향여기에

의해 재발달영역과 분리유선(dividing streamline) 위쪽은 차이가 없으나 재순환영역에서 증가된 양상이 나타났다. 음향여기에 의한 재순환영역에서의 열/물질전달계수 증가는 상대적으로 정체영역인 재순환영역에서의 난류강도 증가와 관계있는 것으로 보인다. $x=0.5H$ 에서 바닥면 가까이에 약한 주유동 방향속도를 볼 수 있는데 이로부터 하부 모서리에 더 가까운 쪽에 2차 와류가 존재함을 알 수 있으며 이는 계단하부모서리에서 열/물질전달계수분포의 급격한 증가의 원인이 되는 것이다.

10H- 및 5H-공동에서 $St=0.0$, 0.20 인 경우의 유동장이 Fig. 12와 Fig. 13에 제시되어 있다. 10H-공동에서 $St=0.0$ 인 경우 재부착지점을 확인 할 수 없었는데 전방계단의 존재로 전단류의 바닥면 충돌이 방해 받는 것으로 보이며 이에 따라 후방계단과 전방계단에 존재하는 재순환영역의 경계가 불분명해졌기 때문으로 사려된다. 반면 $St=0.20$ 로 음향여기한 경우 $x=6.0H$ 부근에서 재부착이 이루어지며 전체적으로 평균유동장과 난류강도 변화가 후방계단의 경우에 비해 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이러한 음향여기에 의한 재부착의 형성과 재순환영역의 난류강도 발달은 앞의 Sh수 분포와 일치하는 결과이다.

5H-공동에서는 $St=0.0$ 인 경우와 $St=0.20$ 인 경우의 평균유동장이 거의 일치하고 있다. 즉 바닥면에 박리유동이 재부착하지 못하고 음향여기에 의해 평균유동장에는 거의 변화가 없다. 반면

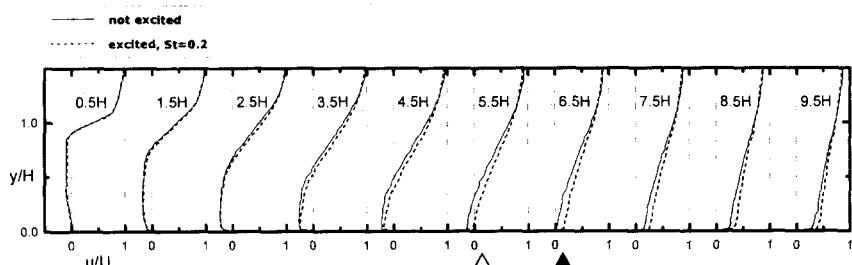


Fig. 10 Streamwise velocity over backward-facing step for $St=0.0$ and 0.2

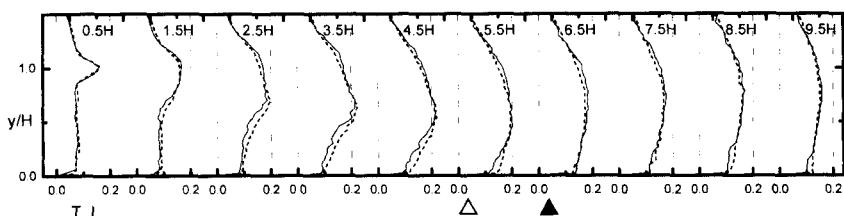
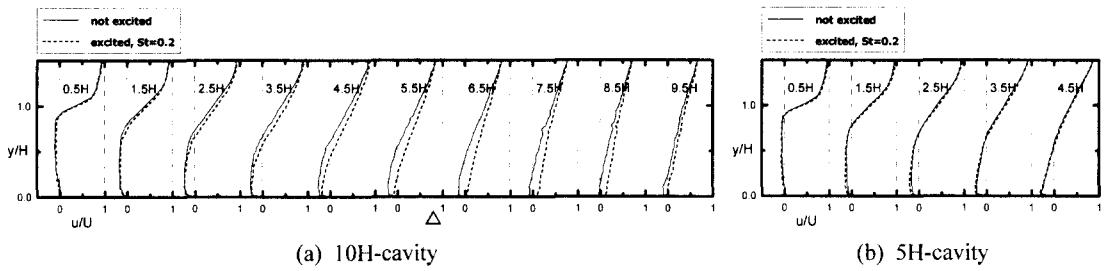
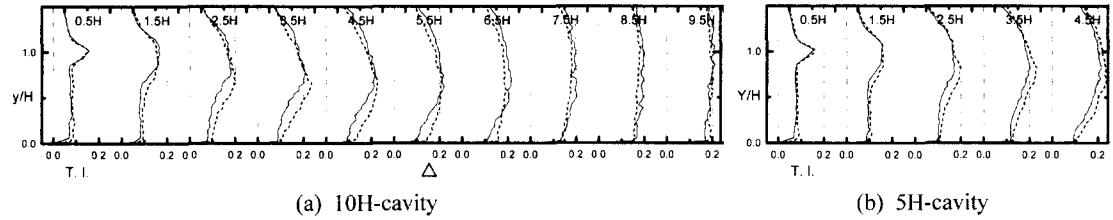


Fig. 11 Streamwise turbulence intensity over backward-facing step for $St=0.0$ and 0.2

Fig. 12 Streamwise velocity profiles for $St=0.0$ and 0.2 Fig. 13 Streamwise turbulence intensity for $St=0.0$ and 0.2

$St=0.20$ 으로 음향여기함으로써 공동내 난류강도는 증가된 모습을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 음향여기된 박리유동장의 주파수 특성으로부터 확인된 박리 직후 와류생성의 촉진과 관련이 있으며 $5H$ -공동내 열/물질전달계수의 전체적 증가와 일치하는 결과이다.

4. 결 론

본 연구에서 후방계단과 $10H$ -, $5H$ -공동에서 박리 및 재부착하는 유동에 대한 유동장 및 물질전달 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

2차원 후방계단에서 박리 및 재부착하는 유동을 St 수 $0.2\sim0.4$ 의 범위 내에서 음향여기하는 경우, 박리 유동의 재부착길이가 감소하며, 재순환 영역을 중심으로 유동의 난류강도가 증가하는 등 유동장의 변화가 나타났다. 박리된 유동의 주파수 특성에 있어 음향여기에 의해 음향여기 주파수 성분의 급격한 증가를 보였으며 하류로 진행하며 부조화주파수를 중심으로 한 저주파영역으로 섭동에너지의 이동이 음향여기하지 않은 경우에 비해 빠르게 일어났다. 이는 난류 경계층의 박리로 인해 불규칙하게 형성된 와류구조가 음향여기에 의해 조직화되고 이로부터 와류의 발달 및 병합이 빠르게 일어났기 때문이다. 이렇

게 음향여기에 의해 조직화된 와류구조는 음향여기 하지 않은 경우에 비해 재순환영역과 주유동 영역간의 전달현상을 촉진시켜 재순환영역과 재부착지점 부근에서 열/물질전달계수의 증가를 가져왔으며 이러한 와류구조가 전달현상을 주도하지 않는 재발달영역과 계단 하부모서리영역에서는 음향여기에 의한 차이가 나타나지 않았다.

$10H$ -공동의 경우 음향여기에 의해 불분명하던 재부착현상이 확실히 일어남으로써 유동장과 열/물질전달특성에서 가장 두드러진 변화를 보였다. $5H$ -공동의 경우 음향여기에 의한 평균유동장의 변화는 거의 없었는데 이는 음향여기률을 하는 경우와 하지 않는 경우 모두 재부착이 이루어지지 않기 때문이다. 그러나 음향여기에 의해 난류강도가 증가함으로써 열/물질전달계수는 전체적으로 증가된 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원에 의한 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Troutt, T. R., Scheelke, B., and Norman, T. R., "Organized Structure in a Reattaching Separated

- Flow Filed," *J. Fluid Mech.*, Vol. 143, 1984, pp. 413~427.
- (2) Roos, F. W., and Kegelman, J. T., "Control of Coherent Structures in Reattaching Laminar and Turbulent shear Layers," *AIAA Journal*, Vol. 24, No. 12, 1986, pp. 1956~1963.
- (3) Bhattacharjee, S., Sheelke, B., and Troutt, T. R., "Modification of Vortex Interactions in a Reattaching Separated Flow," *AIAA Journal*, Vol. 24, No. 4, 1986, pp. 623~629.
- (4) Chun, K. B., and Sung, H. J., "Control of Turbulent Separated Flow over a Backward-facing Step by Local Forcing," *Experiments in Fluids* 21, 1996, pp. 417~426.
- (5) de Brederode, V., and Bradshaw, P., 1972 "Three-Dimensional Flow in Nominally Two-Dimensional Separation Bubbles: I. Flow Behind a Rearward-Facing Step," *Imperial College of Science and Technology, England, Dept. of Aeronautics*, Rept. No. 72-19.
- (6) Ambrose, D., Lawrenson, I. J., and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynam.*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (7) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (8) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (9) Dantec, 1996, "Fiber Flow : Installation and User Guide".
- (10) Vogel, J. C., and Eaton, J. K., "Combined Heat Transfer and Fluid Dynamic Measurements Downstream of a Backward-facing Step," *J. Heat Transfer*, Vol. 107, 1985, pp. 922~929.
- (11) Yamamoto, H., Seki, N., and Fukusako, S., 1979, "Forced Convection Heat Transfer on Heated Bottom Surface of a Cavity," *J. Heat Transfer*, Vol. 101, pp. 475~479.
- (12) Leonet'ev, A. I., Shishov, E. V., and Vechkanov, S. Yu., "Influence of Coherent Vortex Structures on Turbulent Heat and Momentum Transfer in a Separated Flow behind a Backward Step under Acoustic Excitation," *Physics-Doklady*, Vol. 39, No. 6, 1994, pp. 450~451.