

〈論 文〉

## 국소교란에 의한 난류 재순환유동의 제어

전경빈\* · 성형진\*

(1993년 8월 23일 접수)

### Control of Turbulent Recirculating Flow by Local Forcing

Kyung Bin Chun\* and Hyung Jin Sung\*

**Key Words :** Recirculating Flow(재순환유동), Forcing Frequency(교란주파수), Forcing Amplitude(교란의 크기), Reattachment Length(재부착길이), Momentum Thickness(운동량두께)

#### Abstract

An experimental study is conducted for the turbulent recirculating flow behind a backward-facing step when the oscillating jet is issued sinusoidally through a thin slit at the separation edge. Two key parameters are dealt with in the present experiment, i.e., the amplitude of forcing and the forcing frequency. The Reynolds number based on the step height is varied from 25,000 to 35,000. In order to investigate the effect of local forcing, turbulent structures are scrutinized for both the flow of forcing and the flow of no forcing. The growth of shear layer with a local forcing is larger than that of no forcing. The influence of a local forcing brings forth the decrease of reattachment length and the particular frequency gives a minimum reattachment length. The most effective frequency depends on the non-dimensional frequency,  $St_\theta$ , based on the momentum thickness at the separation point. A comparative study leads to the conclusion that the large-scale vortical structure is strongly associated with the forcing frequency and the natural flow instability.

#### 기 호 설 명

$f$  : 교란주파수

$H$  : 계단의 높이, 50 mm

$\theta$  : 운동량 두께

$Re_H$  : 계단높이 기준 레이놀즈수

$Re_\theta$  : 박리점의 운동량두께 기준 레이놀즈수

$St_H$  : 계단높이 기준 무차원 주파수

$St_\theta$  : 박리점의 운동량두께 기준 무차원 주파수

$U$  : 유선방향속도

$U_0$  : 기준점의 자유흐름속도

$U_p$  : 교란의 크기

$X$  : 유선방향 좌표 edge

$Y$  : 수직방향 좌표

$Z$  : 횡방향 좌표

$X_{R0}$  : 교란이 없는 상태의 시간평균 재부착길이

$X_R$  : 교란이 있는 상태의 시간평균 재부착길이

$\gamma_p$  : 정방향 흐름정도

$\gamma_{pw}$  : 바닥면의 정방향 흐름정도

#### 1. 서 론

공학적 기계들의 설계요소중 하나는 그 기계의 유체역학적인 측면으로 고속열차, 항공기, 연소기,

\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

자동차 등에서 발생하는 유동구조는 그 기계요소의 저항, 열전달 및 그 기계의 핵심적인 성능을 좌우하므로 효율적인 기계를 설계하기 위해서는 위 유동구조에 대한 연구가 필수적이다. 특히, 고속항공기 및 자기부상열차 등 고속 운송체의 설계시 가장 문제시되는 운송체의 저항은 기존의 공기역학적인 방법으로는 그 문제의 해결에 한계가 있으므로, 보다 새로운 공학적 접근이 필요하다. 즉 유동장을 그 기계요소의 효율이 최대가 되도록 능동적으로 조절하는 것으로서 예를 들면, 고속의 운송체의 저항감소, 혹은 터보기계 및 연소기 등의 효율을 극대화시킴으로서 좀 더 발전된 공기역학적 설계를 위한 노력들이 시작되었다.

이러한 유동의 능동적 설계중 하나가 유동구조에 외부로부터의 주기적인 교란을 가하여 유동구조를 원하는 형태로 바꾸는 방법으로 다른 제어방법 보다 간단하면서도 유동구조의 변화가 크고, 유동을 원하는 형태로 손쉽게 능동제어할 수 있다는 점에서 많은 연구가 진행되고 있다. 이 방법을 이용하여 유동장내에서 발생하는 원하지 않는 현상을 제거 또는 감소시킴으로서 기계요소의 성능향상과 에너지의 효율적 이용이 가능하다.

그러므로 외부로부터의 주기적인 교란이 기계요소가 갖는 유동장에 미치는 영향을 체계적으로 연구하여 이들 사이의 특성관계를 얻는다면, 이는 현재의 기계요소의 설계기술을 보다 발전된 형태로 바꿀수 있을 것이다. 주기적 교란에 의한 유동의 변화를 체계적으로 연구하는데 있어서 후방계단(backward-facing step)하류의 흐름은 매우 유용하다. 우선 그 기하학적 형태가 단순하고, 박리선이 거의 직선이며, 박리점이 모서리에 고정되어 있어 박리점의 비정상유동으로 야기되는 문제점을 제거하여 유동이 비교적 정상상태를 유지한다. 또한 담(fence), 공동(cavity), 전방계단(forward-facing step)등과는 달리 한 개의 박리영역만을 가지므로, 대부분의 박리-재부착유동에 비해 아주 간단한 형태를 갖는다. 그럼에도 불구하고 후방계단 하류의 유동도 경계층유동, 박리전단유동, 재순환유동 및 재발달 경계층유동 등 여러 형태의 유동으로 구분되어 복잡한 유동형태를 갖는다. 하지만 각각의 유동구간들은 다른 구간과는 구별되는 유동특성을 가지고 있기 때문에, 이러한 각각의 구간에서 얻어지는 결과들은 다른 기하학적 형태를 갖는 유동장에 응용할 수 있다.

본 실험에 앞선 후방계단의 하류의 유동구조에 관한 문헌조사는 크게 두가지로 나누어 볼 수 있다. 하나는 박리-재부착흐름에 영향을 미치는 기본적인 인자들에 대한 문헌조사이고, 다른 하나는 박리-재부착흐름에 주기적인 교란이 미치는 영향에 대한 문헌조사이다. 그중 전자에 대한 체계적인 문헌조사의 예는 Eaton과 Johnston<sup>(1)</sup>의 논문에서 찾아볼 수 있다. 후자에 대한 연구는 주기적인 교란을 주는 방법에 따라 다시 음향스피커를 가진하여 음파에 의한 교란을 주는 방법과 주기적으로 진동을 하는 얇은 보조익(flap)을 이용하여 유동에 교란을 주는 방법등으로 구분된다. 먼저 Fiedler과 Mensing<sup>(2)</sup>는 풍동 수축부의 출구위면의 얇은 슬릿으로 스피커에 의한 주기적 교란을 주는 방식을 이용하여 유동장의 변화를 측정하였다. 그들은 열선 풍속계를 이용하여 구한 난류량 및 스펙트럼분석을 통해, 매우 강한 교란을 준 경우를 제외하고 일반적인 교란은 평균유속에 영향을 주지 않으며, 교란을 준 경우 전단층의 확산비(spreading rate)가 더 커짐을 발견하였다. Roos과 Kegelmann<sup>(3)</sup>는 후방계단의 박리점에 주기적으로 진동하는 얇은 보조익을 설치하여 박리전단층에 교란을 가하였다. 특히 연기에 의한 유동가시화를 통해 거대와구조의 형성과 융합을 보였고, 난류전단층이 증가할수록 거대와(large scale vortex) 구조가 더욱 불규칙해지며, 교란을 가한 경우 와구조의 형성이 증가하고 융합이 촉진된다고 하였다. Pitot관, 열선풍속계, LDV모두를 사용하여 평균속도를 측정하였지만, 박리전단층에 교란을 가한 경우에도 평균유속은 가하지 않은 경우와 유사하며, 박리상태가 난류인 경우 재부착길이가 감소한다는 것을 발견하였다. Bhattacharjee 등<sup>(4)</sup>은 후방계단의 박리점 위부분의 시험부벽에 스피커를 설치하여 박리전단층에 음파에 의한 주기적인 교란을 주었다. 교란을 가한 경우 박리전단층의 확산비가 증가되고, 이는 계단높이를 기준한 무차원화된 교란주파수(Strouhal number,  $St_H = fH/U_0$ )가 0.2에서 0.4 사이가 가장 효과적이며, 계단높이 기준 레이놀즈수( $Re_H$ )에 연관있음을 찾았다. 또한 교란을 가한 경우 박리된 전단층의 성장이 재부착길이를 감소시킨다고 보았고, 교란은 난류에너지와 레이놀즈 전단응력에 변화를 일으킨다고 설명하였다. Kiya 등<sup>(5)</sup>은 유동장 속에 축방향의 원봉을 넣어, 원봉선단을 따라 뚫려있는 얇은 슬릿으로 원봉내의 음향스피커에 의한 삼각함

수파형의 주기적 교란을 가하였다. 그들은 원봉의 선단에서 발생한 박리기포(separation bubble)의 최소 재부착길이를 만드는 교란 주파수를 찾았으며, 그 결과 가장 효과적인 주파수는 초기 Kelvin Helmholtz 주파수의 6분의 1정도이며, 재부착영역에서 발생하는 거대와의 흘림 주파수(shedding frequency)의 8배 정도가 된다는 것을 발견하였다. Sigurdson과 Roshko<sup>(6)</sup>는 Kiya 등<sup>(5)</sup>과 마찬가지로 원봉선단의 슬릿을 통해 교란을 가하였다. 그들은 전단층의 초기부분이 교란의 영향을 받게 되면 재부착길이, 박리기포의 높이, 박리점의 압력, 표면의 항력 등이 모두 감소함을 보였다. 위 실험들은 교란에 의해 전단층의 확산이 증가되고, 그에 의해 재부착길이가 짧아지지만, 평균속도에는 큰 영향이 없다는 공통점이 있다. 하지만 이들 실험들은 교란주파수와 박리-재부착흐름과의 관계를 체계적으로 밝히기에는 미흡한 점이 있다.

그러므로, 본 실험에서는 후방계단 상류의 초기 조건 및 후방계단 하류의 압력구배 등을 일정하게 유지시켜 위 인자들에 의한 박리-재부착유동의 변화를 없게하고, 박리-재부착흐름에 가장 효과적으로 영향을 줄 수 있는 박리점에서 음파에 의한 주기적인 교란을 가함으로써 발생하는 흐름의 변화, 구체적으로 재순환영역의 유동구조 및 재부착길이의 변화에 대해 체계적으로 연구함으로써 이에 대한 이해를 증진시키고, 이러한 이해를 바탕으로 유동구조를 가장 효과적으로 제어할 수 있는 방법을 개발하는 것이다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 풍동은 개방 송출형으로, 송풍기는 폭 330 mm의 다익-원심형팬으로, 220 volt 교류 3상 유도전동기(5HP)에 의해 구동되며, 광각확산부는 길이 1000 mm, 확산비가 1:2이며, 수축부는 길이가 750 mm, 수축비가 6:1로 되어있다. 풍동은 범용 속도조절기에 의해 시험부입구의 자유흐름속도를 최대 24 m/sec까지 가변하여 조절할 수 있다. 또한 시험부입구에서 자유흐름의 난류강도는 1~17 m/sec에는 1%이하이며, 실험에 사용하고자 하는 8~14 m/sec에서는 0.6%이하 수준을 유지하고 있다.

시험부는 두께 10 mm의 아크릴로 길이 2250 mm, 폭 630 mm, 높이 155 mm로 제작되었고, 한 쪽 끝

에는 높이 50 mm인 계단이 설치되어 있다. 시험부의 종횡비(aspect ratio)는 12.6으로 deBrederode과 Bradshaw<sup>(7)</sup>의 종횡비가 10보다 크면 시험부의 중심선상에서는 유동이 이차원성을 유지한다는 실험결과를 만족하며, 팽창비(expansion ratio)는 1.48이다. 계단이 모서리에는 Fig. 1과 같이 박리되는 유동에 45° 방향으로 음파에 의한 주기적인 교란이 전단될 수 있도록, 간격  $1.0 \pm 0.1$  mm의 슬릿이 위치하였다. 이 모서리는 한 쪽 끝에 보통 60 Watt, 최대 120 Watt의 출력을 내며, 가용주파수 범위가 25.5 Hz~4000 Hz, impedance는 8ohm이고, 직경은 300 mm인 저음스피커(woofer speaker, CW300B 60A)가 부착되어 있는 음향실(acoustic chamber)에 연결되어 이 통로를 통해 박리-재부착 흐름에 음파에 의한 주기적인 교란을 가하게 된다.

본 실험에서 가장 중요한 인자인 음파에 의한 주기적 교란은 함수발생기(HP3310B)에서 만들어진 삼각함수파형을 스피커로 입력시킴으로 얻어졌다. 하지만 함수발생기에서 얻어진 삼각함수파형의 출력은 최대 2 Watt이기 때문에 실험시 그 이상의 출력이 필요한 경우에는 음향앰프(acoustic amplifier)를 사용하여 신호를 증폭하여 사용하였다. 이렇게 발생된 삼각함수파형은 오실로스코프와 주파수계기(frequency counter)를 거쳐 그 파형과 주파수를 확인한 후 스피커로 전해졌으며, 실험중 수시로 그 파형과 주파수를 점검하였다.

후방계단 상류에 위치한 기준점의 평균속도는 측정부의 직경이 3/32인치인 표준 피토관(United Sensor Co., PAB-12-KL)과 압력변환기(Dewyer Co., FC 012)를 사용하여 측정하였다. 평균속도의 신호처리계는 피토관을 통해 측정된 압력신호가 압력변환기를 통해 전압신호를 변환된 뒤, 이 전압신호를 디지털전압계(HP, HP3456A)와 IEEE-488/GPIB(National Instrument Co.)를 사용하여 컴퓨터로 연결하여 측정결과를 처리하였다. 또한 실험중의 온도변화는 K형의 열전대가 부착된 디지털 온도계(Fluke 2190A)로 측정하여, 이를 신호와 같이 처리함으로써 실험 중 온도변화에 따른 변화를 보상하여 주었다.

I형 프로브(TSI, model 1250-Ti5)는 기준점의 난류강도 측정 및 후방계단 모서리의 슬릿에서 나오는 음파의 교란의 크기를 측정하기 위해 사용하였다. 본 실험에 사용된 열선풍속계는 TSI의 IFA-100과 IFA-200으로, I형 프로브 사용시 IFA-100

의 과열비는 1.6으로 맞춘 후, 5 kHz의 절단주파수로 저역통과를 시켜, 그 출력전압을 IFA-200을 통해 A/D변환하여 컴퓨터에 저장하였다. 이때 추출주파수는 10 kHz로서 매 측정점마다 4096개씩의 측정결과를 10번 총합평균하여 처리하였고, 또한 실험시 디지털온도계를 이용하여 적절한 온도보상을 하였다.

한편 후방계단 하류의 박리-재부착흐름은 난류강도가 크고, 빈번한 역흐름이 존재하는 재순환흐름을 동반하여, 기존의 I형, X형 프로브로는 측정이 힘들다. 그러므로 역흐름을 측정할 수 있는 측정기기를 사용하여야 하는데 그중 대표적인 기기로는 PWA(pulsed wire anemometer), LDA(laser doppler anemometer), Split film 센서 등이 있다. PWA는 가는 열선을 짧은 순간 구형파의 전류로 가열하여 이때 생긴 열후류가 저항온도계 역할을 하는 감지선에 도달하기까지의 시간을 측정하여 흐름의 속도를 얻으며, 열선의 전방에 감지선이 하나 더 설치되어 역흐름이 있는 경우에도 흐름의 방향을 감지할 수 있다. 그러나 PWA는 크기가 커서 흐름을 방해하기 쉽고, 입자가 섞인 흐름등의 험한 실험조건에서는 사용할 수 없는 단점이 있다. 주파수 천이된 LDA는 넓은 범위의 속도에 대하여 특별한 속도검정을 하지 않고도 속도의 크기와 방향등을 측정할 수 있다. 그러나 입자의 유입이 반드시 필요하고 벽면부분과 재순환 영역내에서는 흐름의 속도가 작아 입자의 검출이 곤란하다는 단점이 있다. Split film 센서는 하나의 몸체로 된 일체형 프로브이면서, X형 프로브처럼 2차원 흐름을 측정할 수 있도록 고안된 것이다. 이는 비교적 난류강도가 큰 곳에서도 사용할 수 있는 I형 프로브의 장점과 흐름의 방향과 수직방향의 속도성분을 얻을 수 있는 X형 프로브의 장점을 같이 얻을 수 있다. Split film 센서는 수정봉의 표면에 부착된 분리된 백금막을 가열하여 봉주위의 열전달 변화를 측정하여 속도를 측정하게 되는데, Split film 센서는 크기가 작아 X형 프로브나 PWA 보다 좋은 공간분해능을 얻을 수 있고 흐름에 적은 영향을 미치므로 벽면에 가까이 접근시킬 수 있어 경계층흐름의 측정에 용이하지만 번거로운 속도검정이 필요하다는 단점이 있다.

본 실험에서는 후방계단 하류의 속도, 난류량 및 재부착점을 알기위한 정방향 흐름정도( $\gamma_p$ )를 측정하기 위해 이에 알맞은 Split film 센서(TSI,

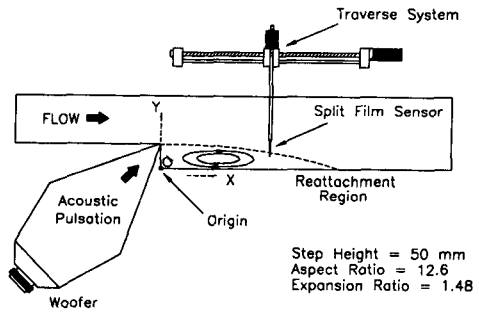


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental configuration

model 1288)를 사용하였으며, Ra 등<sup>(8)</sup>에 의해 제안된 속도검정방법을 사용하였다. 이는 비교적 큰 피치각에서도 사용할 수 있는 Stock 등<sup>(9)</sup>의 방법을 개선하여 보다 정확한 피치각을 얻을 수 있다. Split film 센서에 사용된 열선풍속계는 I형 프로브의 사용시와 같으며, 단지 과열비만 1.4로 맞춘 후 측정에 사용하였다.

본 실험시 위치를 표시하기 위해 사용된 좌표계는 Fig. 1에 표시된 X, Y, Z좌표계를 사용하였으며, 이들 좌표축은 계단의 아래 모서리를 원점으로 한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 시험부입구의 조건

후방계단 상류의 경계층상태는 자유흐름의 평균속도가 10.0 m/sec인 경우 경계층두께는 23.438 mm, 배제두께는 3.371 mm, 운동량두께는 2.645 mm, 경계층 형상치(shape factor,  $H$ )는 1.278, 운동량두께 기준,  $Re_\theta$ 는 1,760, 계단높이 기준,  $Re_H$ 는 33,300으로 나타났다.

박리점 전방흐름의 2차원성은 박리점( $X/H=0.0$ ,  $Y/H=1.0$ )에서 중심선( $Z/H=0.0$ )상과 좌우로  $Z/H=2.0$ ,  $Z/H=-2.0$ 에 해당하는 2점의 Y축방향의 평균 속도분포를 측정하여 비교하였다. 그 결과는 배제두께는 3% 이내로, 운동량두께는 4% 이내로 균일하여, 박리점 전방의 흐름은 2차원성을 잘 유지하고 있다.

교란에 의한 박리-재부착흐름의 변화를 연구하기 위해 사용한 자유흐름의 속도는 8.0, 10.0, 14.0 m/sec로 각 경우 실험 중에는  $U/U_0=1\pm 0.003$ 을 유지하였으며, 난류강도는 0.6% 이하를 유지하였다.

### 3.2 음파의 주기적 교란조건

음파의 주기적 교란조건은 교란 주파수( $f$ )와 교란의 크기( $U_t$ )로 정의된다. 교란 주파수는 함수발생기의 발생되는 삼각함수파형의 주파수이며, 교란의 크기는 자유흐름이 없는 상태에서 박리점에 위치된 얇은 슬릿으로 방출되는 유동을 박리점에서 X축으로  $+0.5$  mm, Y축으로  $+0.5$  mm되는 지점( $X/H=0.01$ ,  $Y/H=1.01$ ,  $Z/H=0$ )에서 I형 프로브를 사용하여 측정된 속도중 최대속도로 정의된다.

실험에서 사용된 교란의 크기는 세가지 자유흐름속에 상관없이 각 교란주파수에 대해 1.0, 2.0, 4.0 m/sec가 사용되었고, 사용된 교란주파수의 범위는 25 Hz부터 200 Hz까지이다.

교란의 크기가 4.0 m/sec이고 교란 주파수 70 Hz인 경우의 시간에 대한 국소교란의 변화를 Fig. 2에서 볼 수 있으며, Fig. 2내의 작은 그림에서는 국소교란에 대한 스펙트럼을 볼 수 있다. Fig. 2에서 교란의 분포가 스피커의 입력신호와 같은 완벽한 삼각함수파형을 갖지 못하는데 이는 교란을 방출하는 계단모서리의 슬릿이 좁아서 슬릿으로 역유입이 힘들고, 교란의 크기 측정에 사용한 I형 프로브가 역방향의 속도성분을 측정하지 못하기 때문이다. 이때 역방향의 속도성분을 측정하기 위해 Split film 센서를 사용하지 못한 이유는 모서리 슬릿의 간격에 비해 Split film 센서의 감지부의 직경이 상대적으로 커서 교란의 방출을 방해할 수 있기 때문이다. 그러나 Fig. 2의 국소교란 성분에 대한 스펙트럼결과로 국소교란이 원하는 70 Hz의 주파수와 그의 하모닉(harmonics)으로만 가해지고 있음을 확인할 수 있다.

### 3.3 정방향 흐름정도( $\gamma_p$ )

본 실험에서 재부착길이를 측정하기 위해 사용한 물리량인 정방향 흐름정도(forward flow fraction,  $\gamma_p$ )는 총 측정시간의 흐름 중에서 역흐름을 제외한 하류방향의 정흐름이 차지하는 시간의 비율로 정의된다. 즉,  $\gamma_p=1.0$ 이면 측정 시간내의 모든 흐름이 하류방향으로 흐르는 정흐름이고,  $\gamma_p=0.0$ 이면 모든 흐름의 상류방향으로 흐르는 역흐름임을 의미한다.

Eaton과 Johnston,<sup>(10)</sup> Westphal과 Johnston<sup>(11)</sup> 등은  $\gamma_p$ 를 이용하여 벽면에서의  $\gamma_p$ 값, 즉  $\gamma_{pw}$ 이 0.5되는 지점이 통상의 재부착점과 잘 일치함을 보

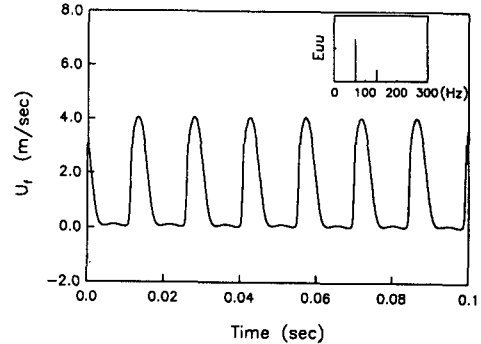


Fig. 2 Representative plot of the local forcing and its spectrum

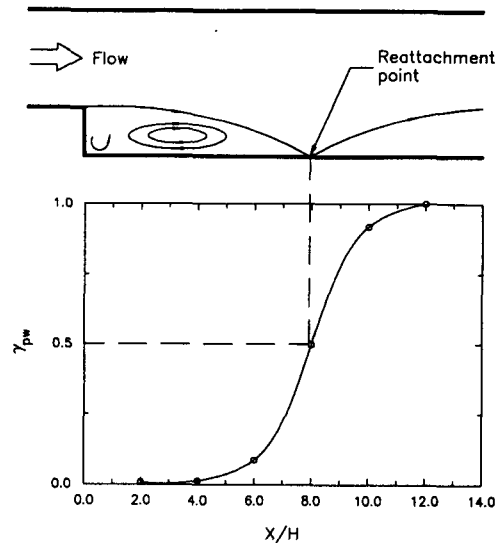


Fig. 3 Typical plot of the forward flow fraction,  $\gamma_{pw}$

였다. 따라서 X축 방향으로 벽면에서의  $\gamma_{pw}$ 분포를 측정하여 Fig. 3와 같은  $\gamma_{pw}$ 분포곡선을 구하여  $\gamma_{pw}=0.5$ 가 되는 지점을 찾아 재부착길이를 구할 수 있다.

본 실험에서는 Split film 센서를 이용하여  $\gamma_p$  및  $\gamma_{pw}$ 를 측정하였다. Split film 센서는 흐름이 직접 닿는 쪽의 채널에서 얻어지는 출력전압이 다른 쪽 채널에서 얻어지는 출력전압보다 항상 크므로 두 출력전압을 비교하면 흐름의 방향을 구할 수 있다. 그러므로 Split film 센서를 사용하면 별도의 속도 검정과정을 거치지 않고도 원하는  $\gamma_p$ ,  $\gamma_{pw}$ 를 쉽게 구할 수 있다. 이때  $\gamma_p$ 를 측정하기 위한 신호처리 계는 Ra 등<sup>(12)</sup>의 실험에 근거하여 출력전압을 100

Hz로 저역통과시키고, 시간에 따라 균일한  $\gamma_p$ 를 측정할 수 있는 추출주파수인 200 Hz로 신호를 얻은 후 A/D 변환시켜  $\gamma_p$ 를 측정하였다. 하지만 재부착 자유전단층이 낮은 주파수로 준 주기운동을 하기 때문에 이를 측정하기 위해서는 긴 측정시간이 필요하며, 이때 측정시간이 204.8 sec 이상이 되면  $\gamma_p$ 값이 비교적 일정하게 유지됨을 확인하였다. 또한 벽면에서의  $\gamma_p$ , 즉  $\gamma_{pw}$ 값은 시험부의 중앙선상에서 Split film 센서를 벽면에 1 mm 떨어진 곳으로 근접시켜 측정하였는데 벽면에 더 가까이 하지 않은 이유는 벽면에서 흐름의 크기가 작아 센서가 유동을 방해할 수 있기 때문이었다.

3.4 주기적 교란에 의한 유동의 변화

후방계단 상류의 자유흐름속도가 10.0 m/sec인 경우 교란을 받지 않는 유동의 평균속도와,  $U_r = 4.0$  m/sec,  $St_H = 0.175$ 로 교란을 받는 상태의 평균속도분포를 Fig. 4에서 비교하였다. 여기서 선택한 교란조건은 뒤에서 설명한 Fig. 10에서 유동을 가장 효과적으로 변화시키는 경우를 선택하였다.

교란이 없는 경우 재순환구역내에서 역흐름은  $X/H = 2.0$ 인 곳에서  $U/U_0 = -0.085$ 이고,  $X/H = 4.0$ 인 곳에서는  $U/U_0 = -0.184$ 로 증가하였다가,  $X/H = 6.0$ 인 곳에서는  $U/U_0 = -0.105$ 로 다시 감소한다. 이때 최대 역흐름은 자유흐름의 속도,  $U_0$ 의 약 0.18배 정도이며, 이는 다른 실험의 최대 역흐름속도비인 Eaton과 Johnston<sup>(10)</sup>의 0.21, Ethendge과 Kemp<sup>(13)</sup>의 0.18, Kim 등<sup>(14)</sup>의 0.25 정도와 어느 정도 잘 일치한다. 그러나 교란이 있는 경우 최대 역흐름은  $X/H = 2.0$ 인 곳에서  $U/U_0 = -0.151$ 로 정상유동보다 크게 나타났는데, 이는 교란을 받은 유동경우 정상유동보다 빨리 대형화가 나타났음을 보여준다. 또한 교란이 있는 경우 역흐름은  $X/H = 4.0$ 에서는  $U/U_0 = -0.115$ 로 감소하다가,  $X/H = 6.0$ 부터는 역흐름이 존재하지 않는다. 이는 교란을 받는 박리-재부착흐름의 경우 유동이 정상유동보다 빨리 재부착하여 재순환영역이 작아짐을 보여 준다.

박리전단층내의 흐름은 박리점에 가까운  $X/H = 2.0$ 인 곳에서는 정상유동과 거의 비슷하며,  $X/H = 4.0$ 부터 하류로는 흐름이 정상유동보다 빨라지는데, 이 결과에서 교란을 받는 유동이 재순환영역 안에서 더 빨리 확산되며, 이로 인하여 재순환영역이 감소됨을 알수있다. 한편 교란을 받은 박리전단

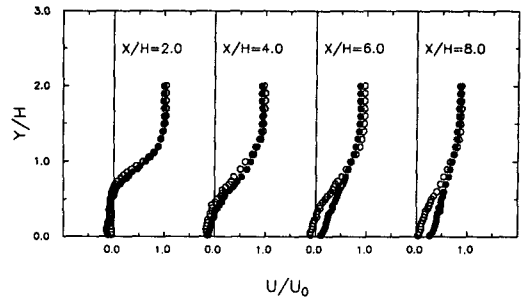


Fig. 4 Comparison of mean velocity profiles. ○ : no forcing, ● : forcing ( $St_H = 0.175$ ,  $U_r = 4.0$  m/sec)

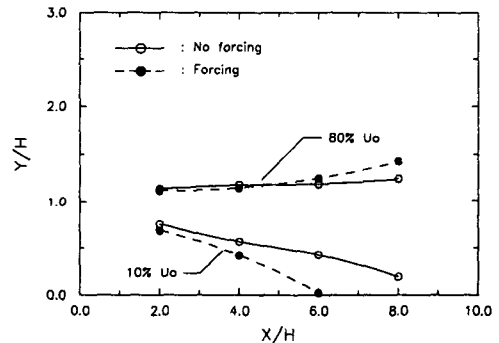


Fig. 5 Comparison of the growth of shear layer. ⊕ : no forcing, ● : forcing ( $St_H = 0.175$ ,  $U_r = 4.0$  m/sec)

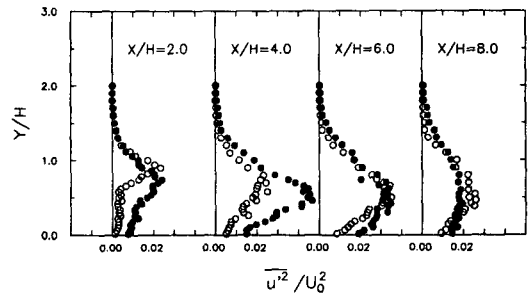


Fig. 6 Comparison of turbulent intensity profiles. ○ : no forcing, ● : forcing ( $St_H = 0.175$ ,  $U_r = 4.0$  m/sec)

층 외부의 자유흐름은 하류로 갈수록 정상유동보다 작아지다가 재부착된 후( $X/H = 6.0$ )부터는 다시 정상유동과 거의 같아진다.

위 결과로 박리-재부착흐름에 가해진 주기적 교란은 대형화의 생성을 촉진시켜 박리전단층의 확산

을 빠르게 하고 재순환영역으로 역유입되는 유동량을 감소시킴으로서 재순환영역이 작아지며, 그로 인해 재부착길이가 감소하게 된다. 이를 Fig. 5에서 자유흐름의 10%와 80%되는 지점을 연결하여 박리전단층의 성장률을 비교해 보면 교란을 받는 유동의 경우 정상유동보다 전단층의 성장이 빠름을 알 수 있다. 이는 Eaton과 Johnston<sup>(10)</sup>의 전단층성장률의 증가가 재부착길이를 감소시키는 주 원인이라는 제안과 잘 일치하고 있다.

주기적 교란이 있는 유동의 난류강도를 Fig. 6에서 정상유동과 비교하여 보면 그 크기가 전체적으로 정상유동보다 크다. 이는 교란이 박리점에서 발생한 와들의 운동을 촉진시켜 재순환영역내에서 와들의 운동이 활발해짐을 보여준다.  $X/H=2.0$ 에서는 교란에 의한 난류강도의 변화가 적으나,  $X/H=4.0$ 인 곳에서는 교란으로 인한 난류강도가 정상유동보다 2배 정도 커지게 된다. 하지만  $X/H=8.0$ 에서는 교란이 있는 경우에는 난류강도는 교란이 없는 경우와 유사한 분포를 갖고 있다. 이는 교란에 의한 영향이 재순환 영역내에만 한정되고 있음을 보여준다. 또한 최대 난류강도를 갖는 지점이 정상유동보다 벽면에 가깝고, 큰 난류강도를 갖는 부분이 정상유동보다 넓어 이는 주기적 교란이 재순환영역내의 와들의 운동을 활발하게 하고, 박리전단층의 성장을 촉진한다는 것을 다시 확인할 수 있다.

또한 주기적 교란을 가한 상태의  $\gamma_p$  분포를 Fig. 7에 정상유동의 경우와 함께 표시하였다. 유동에 교란이 가해진 경우  $\gamma_p$ 가 정상유동보다 더 빨리 증가하여  $X/H=6.0$ 인 부분에서는  $\gamma_p$ 값이 모두 0.5 이상을 유지하여, 이미 유동이 재부착하였음을 보여주며,  $X/H=8.0$ 부터는 모든 유동이 정흐름을 유지하고 있다. 벽면에서의  $\gamma_{pw}$ 을 비교하여 재부착길이를 구한 결과, 교란이 있는 경우 재부착길이는 정상유동보다 27% 감소하였으며, 이는 재부착길이가 계단높이의 2배 정도 짧아졌음을 의미한다.

위의 평균속도와 난류강도 및 정방향 흐름정도의 비교에서 주기적인 교란은 박리점 가까운 곳에서 막 형성되고 있는 작은 크기의 초기와들에게는 거의 영향을 미치지 않지만, 어느 정도 와들의 융합(vortex pairing)이 진행된 재순환구역의 중앙부( $2.0 < Y/H < 6.0$ )에서는 큰 영향을 미쳐 거대와의 형성과 융합을 촉진하게 된다. 또한 교란의 영향은 재순환 영역내에만 한정되는 것으로 보여진다. 이

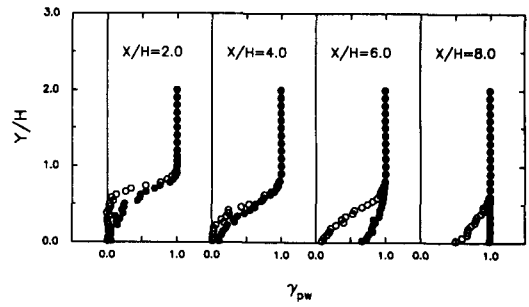


Fig. 7 Comparison of forward flow fraction profiles. ○ : no forcing, ● : forcing ( $St_H=0.175$ ,  $U_r=4.0$  m/sec)

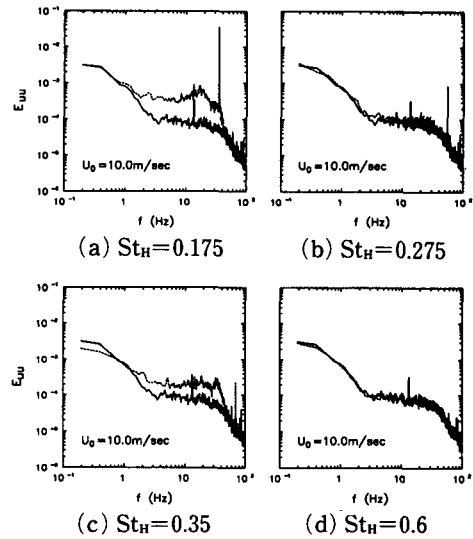


Fig. 8 Spectra of the velocity fluctuation at the outer shear layer. — : no forcing, - - : forcing

렇게 교란에 의해 정상유동보다 빠르게 생성된 거대와들은 박리전단층의 성장을 빠르게 하고, 이는 재부착길이를 감소시키는 주원인인 것으로 알려져 있다.

즉, 난류 재순환유동의 경우에 그 유동이 갖는 불안정성과 비정상성은 그 특성이 갖는 고유의 주파수성분과 유사한 외부로부터의 교란에 효과적으로 증폭됨을 보여준다. 이러한 재부착유동에서는 가장 중요한 요소인 유동내부의 거대와구조의 운동에 따라 그 특성이 결정되므로 위의 교란에 의한 증폭효과는 와구조의 형성에 결정적인 영향을 준다고 보여진다. 이러한 교란에 의해 재순환 영역내의 와들의 융합과 형성이 변화하는 것을 보기위해

Fig. 8에서와 같이 교란에 대한 속도섭동(velocity fluctuation)의 스펙트럼을 각 교란에 대한 재부착점의 박리전단층 바깥쪽 선단(outer edge of shear layer)에서 측정하여 교란이 없는 경우와 비교하였다. 그 결과 자유흐름의 속도가 10.0 m/sec인 경우 특정 교란주파수인  $St_H=0.175$ 와  $0.35$ 에서 저주파수 성분의 에너지가 교란이 없는 경우에 비해 눈에 띄게 증가함을 볼 수 있다. 하지만  $St_H=0.275$ 와  $0.6$ 에서는 교란을 준 경우에도 정상유동의 경우와 거의 같다. 이는 특정 교란주파수의 교란에 의해 저주파수 성분을 갖는 거대 와들의 융합 및 형성이 활발해짐을 보여주는데, 이는 박리-재부착흐름의 불안정성이 갖는 고유의 주파수 성분과 관계 있는 교란주파수에서만 유동이 변화함을 보여준다.

고유주파수와 교란주파수 사이의 관계를 보다 체계적으로 연구하기 위해 교란에 의해 재부착길이의 감소를 연구하였다. 우선 교란주파수와 교란의 크기를 변화시키면서, 자유흐름속도가 8.0, 10.0, 14.0 m/sec인 세 가지 경우 대하여 실험하여 Fig. 9, Fig. 10와 Fig. 11에 표시하였다. 교란이 있는 경우의 재부착길이( $X_R$ )는 교란이 없는 경우의 재부착길이( $X_{R0}$ )로 무차원화하여, 각 교란조건에 의해 줄어드는 비율을 표시하였다. 그 결과 각 자유흐름에 대해 특정 교란주파수에서 재부착길이가 가장 효과적으로 감소함을 볼 수 있으며, 교란의 크기는 단지 그 상대적 크기에만 영향을 미친다.

자유흐름속도가 8.0 m/sec인 Fig. 9에서는 교란주파수가  $St_H=0.22$ 와  $0.47$ 인 곳에서 재부착길이가 효과적으로 감소하며, 교란의 크기가 1.0, 2.0,

4.0 m/sec로 바뀔 때 따라 재부착길이는 Fig. 12와 같이 선형적으로 변화한다. 또한 자유흐름속도가 10.0 m/sec인 Fig. 10에서 재부착길이는  $St_H=0.175$ 와  $0.35$ 에서 효과적이며, 역시 교란의 크기의 변화에 선형적으로 변화한다. Fig. 11의 자유흐름속도가 14.0 m/sec에서 재부착길이는  $St_H=0.125$ 와  $0.27$ 에서 효과적이며, Fig. 12에서와 같이 교란의 크기의 변화에 선형적으로 변한다. 각 경우 가장 효과적인 교란주파수는  $St_H=0.22, 0.18, 0.27$ 이고, 교란 방출속도가 4.0 m/sec인 경우 재부착길이는 45%, 30%, 25%가 감소하는데 이렇게 감소 비율이 틀린 이유는 교란의 크기가 각각의 자유흐름속도의  $0.50 U_0, 0.40 U_0, 0.29 U_0$ 으로 다르기 때문이다.

위의 교란에 의한 재부착길이의 변화에서 특징적

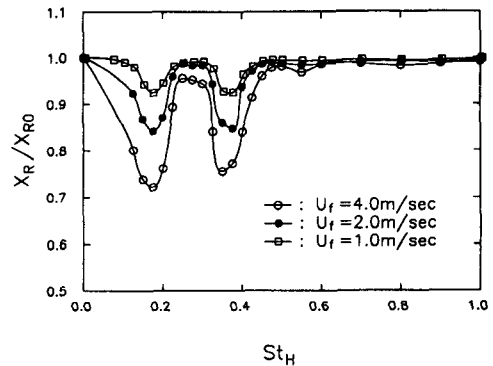


Fig. 10 Reduction of the reattachment length as a function of the forcing frequency for  $U_0=10.0$  m/sec

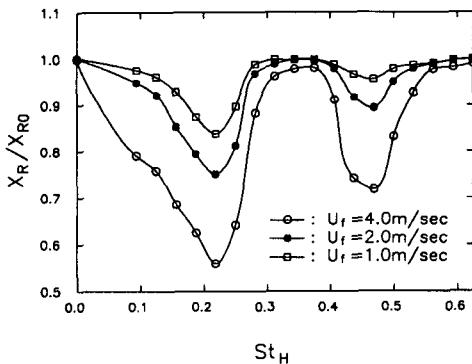


Fig. 9 Reduction of the reattachment length as a function of the forcing frequency for  $U_0=8.0$  m/sec

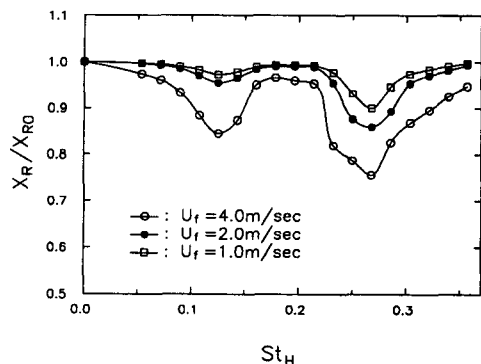


Fig. 11 reduction of the reattachment length as a function of the forcing frequency for  $U_0=14.0$  m/sec



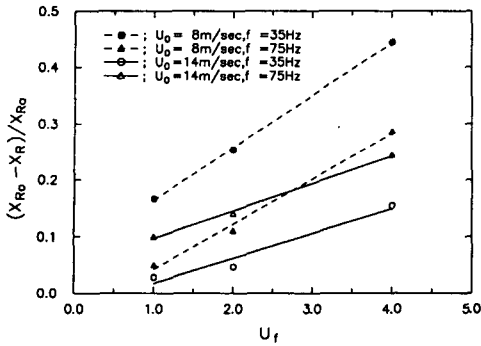


Fig. 12 Reduction of the reattachment length as a function of the forcing amplitude

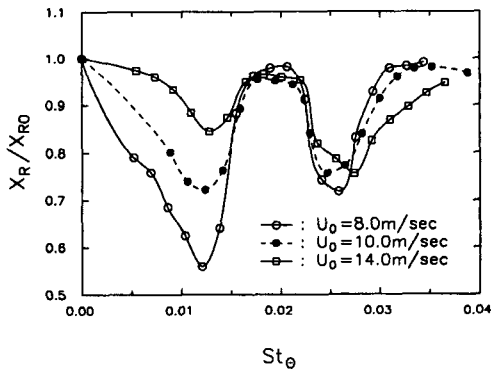


Fig. 13 Reduction of the reattachment length as a function of  $St_\theta$

인 현상은 세 경우 모두 최소 재부착길이를 만드는 교란 주파수가 두 개라는 것이다. Fig. 8의 스펙트럼에서 교란이 없는 경우의 첫번째 정점(peak value)은 거대와의 갖는 홀림주파수(shedding frequency)이고, 교란이 있는 경우의 정점은 교란주파수를 나타낸다. 이 그림에서 자유흐름의 속도가 10.0 m/sec인 경우의 홀림주파수는 무차원주파수로  $St_H = 0.066$ 이다. 또한 이 속도에서 가장 효과적인 교란 주파수는  $St_H = 0.175$ 와  $St_H = 0.35$ 로 이는 홀림주파수가 약 3배와 6배되는 크기이다. 이는 효과적인 교란주파수가 고유의 홀림주파수와 특별한 정수배의 관계에 있음을 보여준다.

자유흐름의 속도를 바꾼 위 세 실험의 결과를 함께 표시할 수 있는 상사변수(similarity parameter)를 구하기 위해, 유동이 박리되기전 경계층의 운동량 두께( $\theta$ )를 무차원변수로 한  $St_\theta = f\theta / U_0$ 를 이용하여 Fig. 13에 표시해 보았다. 그 결과 세 경우 모

두  $St_\theta$ 가 0.01과 0.02인 부근에서 재부착길이가 최소로 되었다. 이는 운동량두께가 자유흐름의 속도에 관계없이 교란에 의한 유동의 변화를 표현할 수 있는 대표길이 척도임을 보여준다. 즉, 경계층의 운동량두께가 후방계단의 흐름을 조절할 수 있는 중요한 하나의 인자임과 교란이 주로 경계층에 큰 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다. 그러므로 무차원수  $St_\theta$ 는 교란에 의한 재부착길이의 변화 및 기타 후방계단의 성질을 표현하는 데 아주 효과적이다.

#### 4. 결 론

후방계단의 박리-재부착유동에 박리점에서 음파에 의한 주기적인 국소교란을 가한 결과, 교란은 박리전단층 내부에서 형성되는 거대와들의 운동을 촉진시켜 이들 거대와의 융합을 촉진하여, 박리전단층의 확산을 정상유동보다 빠르게 하며, 이로 인하여 재부착길이는 감소하게 된다. 이러한 교란의 영향은 박리점에 생성된 초기와들에는 영향이 적고, 어느 정도의 와용합이 일어난 재순환영역의 중앙부분에 크게 영향을 미치며, 그 영향은 재순환영역내에만 한정된다. 특히 교란에 의한 유동의 변화는 특정 교란주파수 영역에서 매우 강하게 일어나며, 이 특정 교란주파수대는 계단높이를 기준으로 한 Strouhal수( $St_H$ )가 0.2~0.3 부근에 존재하고, 이는 자유흐름의 속도가 바뀌어도 크게 변화하지 않는다. 이들 특정 교란주파수를 박리전의 경계층의 운동량두께를 기준으로 한 Strouhal수( $St_\theta$ )를 사용하면, 자유흐름의 평균속도나 교란의 크기에 무관하게 0.01과 0.02 부근에 가장 효과적인 주파수가 존재한다. 또한 교란의 방출속도의 크기 변화에는 재부착길이가 선형적으로 변화하여, 교란의 크기도 영향이 있음을 알 수 있다. 이들 결과에서 유동의 변화에 효과적인 교란주파수는 그 유동이 갖는 불안정한 유동특성과 관계가 있으며, 이 유동의 특성 주파수와 교란주파수가 상호작용 또는 공진하여 유동구조를 변화시키며, 유동구조의 능동제어의 가능성을 제시하여 준다.

#### 참고문헌

- (1) Eaton, J.K. and Johnston, J.P., 1981, "A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow

- Reattachment," *AIAA J.*, Vol. 19, No. 9, pp. 1092.
- (2) Fiedler, H.E. and Mensing, P., 1985, "The Plane Turbulent Shear Layer with Periodic Excitation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 150, pp. 281.
- (3) Roos, F.W. and Kegelman, J.T., 1986, "Control of Coherent Structures in Reattaching Laminar and Turbulent Shear Layers," *AIAA J.*, Vol. 24, p. 1956.
- (4) Bhattacharjee, S., Scheelke, B. and Troutt, T. R., 1986, "Modification of Vortex Interactions in a Reattaching Separated Flow," *AIAA J.*, Vol. 24, p. 623.
- (5) Kiya, M., Mochizuki, O., Tanka, H. and Tsukakasa, T., 1987, "Control of Turbulent Leading-edge Separation Bubble," *JSME*, Vol. 53.
- (6) Sigurdson, L.W. and Roshko, A., 1988, "The Structure and Control of a Turbulent Reattaching Flow," *Turbulence Management and Relaminarisation* (eds. H.W. Liepmann and R. Narasimha), Springer-Verlag, pp. 497.
- (7) de Brederode, V. and Bradshaw, P., 1978, "Influence of the Side Walls on the Turbulent Center-Plane Boundary-Layer in a Squareduct," *ASME Journal of Fluids Eng.*, Vol. 100, No. 7, pp. 91.
- (8) Ra, S.H., Chang, P.K. and Park, S.O., 1990, "A Modified Calibration Technique of Split-Film Sensor," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 1, pp. 1156.
- (9) Stock, D. E., Wells, M. R., Barrige, A. and Crowe, C. T., 1977, "Application of Split-Film Anemometry to Low-Speed Flows with High Turbulence Intensity and Recirculation as Found in Electrostatic Precipitators," *Proc. of Fifth Biennial Symp. on Turbulence*, Dept. of Chemical Eng., Univ. of Missouri, Rolla, pp. 117.
- (10) Eaton J.K. and Johnston, J., P., 1980, "Turbulent Flow Reattachment: An Experimental Study of the Flow and Structure Behind a Backward-Facing Step," *Rpt. MD-39, Thermoscience Div.*, Dept. of Mech. Eng., Ph.D. Thesis, Stanford University.
- (11) Westphal, R.V. and Johnston, J.P., 1984, "Effect of Initial Conditions on Turbulent Reattachment Downstream of Backward-Facing Step," *AIAA J.*, Vol.22, No.12, Dec., pp. 1727.
- (12) Ra, S.H., Chang, P.K. and Park, S.O., 1990, "Measurement of the Forward-Flow Fraction Using a Split Film Sensor," *Experiments in Fluids*, Vol. 10, pp. 57.
- (13) Etheridge, D.W. and Kemp, P.H., 1987, "Measurements of Turbulent Flow downstream of a Rearward-Facing Step," *J. Fluid Mech.*, Vol. 86 pp. 545.
- (14) Kim, J., Kline, S.J. and Johnston, J.P., 1980, "Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer: Flow over a Backward-Facing Step," *ASME Journal of Fluids Eng.*, Vol. 102, pp.302.