

〈論 文〉

조도가 2차원 벽부착 제트유동에 미치는 영향에 관한 연구

윤순현* · 김대성** · 송흥복** · 박승철***

(1994년 2월 7일 접수)

An Investigation of Roughness Effects on 2-Dimensional Wall Attaching Offset Jet Flow

Soon Hyun Yoon, Dae Seong Kim, Heung Bok Song and Seung Cheol Park

Key Words : Wall Roughness(벽면조도), Jet Half Width(제트반폭), Virtual Origin(가상원점), Forward-Flow Fraction(순방향 흐름비), Wall Jet(벽제트), Recirculation(재순환 유동), Similarity(상사성), Wall Attaching Region(벽부착영역), Corner Eddy(구석와동)

Abstract

The flow characteristics of a two-dimensional offset jet issuing parallel to a rough wall is experimentally investigated by using a split film probe with the modified Stock's calibration method. The mean velocity and turbulent stresses profiles in the up and down-stream locations of the wall-attachment regions are measured and compared with those of the smooth wall attaching offset jet cases. It is found that the wall-attachment region on the rough wall is wider than on the smooth wall for the same offset height and the jet speed. The position of the maximum velocity point is farther away from the wall than that for the smooth wall case because of the thick wall boundary layer established by the surface roughness. It is concluded that the roughness of the wall accelerates the relaxation process to a redeveloped plane wall jet and produces a quite different turbulent diffusion behavior especially near the wall from comparing with the smooth plane wall jet turbulence.

기 호 설 명

D : 노즐의 폭 ($D=20$ mm)
 H : 벽높이(노즐의 벽방향 끝에서 벽까지의 거리)
 Re : 레이놀즈 수
 U : 축방향 평균속도
 U_j : 노즐 출구 평균속도
 U_m : 축방향 최대 평균속도
 u, v : X, Y 방향의 난류속도성분

u', v' : u, v 의 $r. m. s.$
 $-\overline{uv}$: 레이놀즈 전단응력
 X : 노즐 출구에서 유동 방향으로의 좌표
 X_c : 포텐셜 코어의 길이
 X_o : 가상원점의 길이
 X_R : 시간 평균 벽부착길이
 Y : 벽면에서 노즐쪽으로 향하는 X 축에 수직인 좌표
 $Y_{1/2m}$: Upper jet spread
 Y_m : 국소 최대속도 지점의 Y 값
 $Y_{w=0}$: 레이놀즈 전단응력이 0이 되는 곳까지의 Y

*정회원, 부산대학교 기계설계공학과

**부산대학교 대학원

***한국전력(주) 고리원자력발전소

값

- Z : XY평면에 수직한 노즐의 높이방향 좌표
- θ_c : 교정상수를 이용하여 계산된 피치각
- θ_m : 교정작업시 알려진 피치각
- r : 순방향 흐름비 (forward flow fraction)
- r_w : 벽면에서 측정되는 순방향 흐름비
- : 시간 평균의 의미

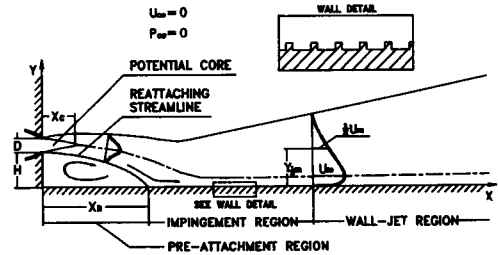


Fig. 1 Definition sketch of the wall attaching offset jet

1. 서 론

난류경계층이나 혼합층 등은 그 폭이 그리 넓지 않은 전단층으로서 간단한 난류모델에 의한 예측으로도 좋은 결과를 얻을 수 있으므로 난류유동에 대한 기초적인 연구로서 많은 주목을 받고 있다. 그러나, 그러한 유동은 흐름의 수직방향에 대한 난류 특성치의 변화가 지배적으로 나타나는 단순한 경우이므로 우리가 흔히 접하게 되는 실제 현상과는 차이가 크다. 즉, 실제의 경우에서는 상이하게 발달된 경계층의 겹침이나 경계층내에서의 또 다른 경계층 성장, 압력구배의 변화나 장애물의 급격한 형상변화 등으로 인해 유동이 휘거나 전단층이 형성되게 된다. 그로 인하여 매우 복잡한 유동장이 형성되므로 고전적인 해석방법으로는 만족할 만한 결과를 얻기 힘들게 된다. 따라서 물리적으로 보다 타당성 있는 난류모델의 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이를 위한 자세한 실험자료의 제시가 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이와 같은 필요성으로 인하여 여러가지 형태의 난류 전단류에 관한 실험연구가 수행되고 있으며 특히 최근에는 박리 및 재부착과 같은 교란 인자에 대한 일반적인 연구 외에 이들의 재발달에 의한 난류구조의 변화에 관하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구 추세에서 다양한 유동현상을 관찰할 수 있는 한 예로 벽부착 제트 유동장을 들 수 있다.

단인 진 2차원 벽부착제트(two-dimensional wall attaching offset jet; 이하 WAOJ라 칭함)은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 노즐 끝부분에서의 박리와 벽으로의 재부착, 급격한 압력변화와 재순환, 재발달 유동 등이 복합적으로 작용되고 있는 복잡한 난류 유동장의 하나이다.

WAOJ에 대한 연구로 Borque and Newmann⁽¹⁾이 속도장 및 벽부착길이에 대해 최초로 보고한 후 Sawyer⁽²⁾는 유입인자 E의 정의를 통해 유선의 곡

률과 제트 유입 특성의 관계를 발표하였다. 이들이 재순환영역의 압력을 균일하다고 가정한다 반하여 Rajaratnam and Subramanya⁽³⁾은 실험을 통하여 재순환영역 내의 압력이 균일하지 않음을 밝혔다. Pelfray and Liburdy⁽⁴⁾는 레이저 유속계를 이용하여 벽부착 이전영역과 충돌영역에서의 평균 속도장을 측정해서 제트확산에 미치는 곡률 변형률의 효과, 최대속도 감소경향, 유입현상 등에 대해서 고찰했다. 또 Yoon et al.⁽⁵⁾는 스플릿 필름 프로브를 이용한 실험에서 벽단비에 따른 벽부착제트의 난류 특성 및 평면제트로의 이완 과정에 대하여 조사하였다. 그러나 선행연구 중 노즐에서 박리된 흐름이 재부착하게 되는 벽면의 여러가지 조건 변화에 따른 유동장의 변화에 대한 결과는 거의 찾아볼 수 없다. 또한 실험 내용에 있어서도 주로 벽 부착점이나 자체유사성 및 속도와 압력분포에 치중하여 교란 인자에 의한 제트 발달 과정의 난류구조에 관한 연구 사례는 드문 실정이다.

본 연구에서는 다른 실험조건은 일정하게 유지하고 평판에 거칠기를 변화시키면서 2차원 벽부착 제트 흐름의 순간 유속을 측정하고 표면거칠기가 재부착현상과 평균 유동장 및 제트의 확산등에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 풍동

본 실험에 사용된 풍동은 개회로의 저속용으로 길이는 시험부를 포함하여 약 8m이고, 폭은 6m이며 높이는 0.8m로서 Fig. 2에 그 개략도와 좌표계가 나타나 있다. 송풍기는 5 마력의 삼상 교류 전동기로 구동되며 송풍기 입구에서 흡입된 공기는 확대부(diffuser)와 정류실(plenum chamber) 및 축소노즐(contracting nozzle)을 통하여 시험부로

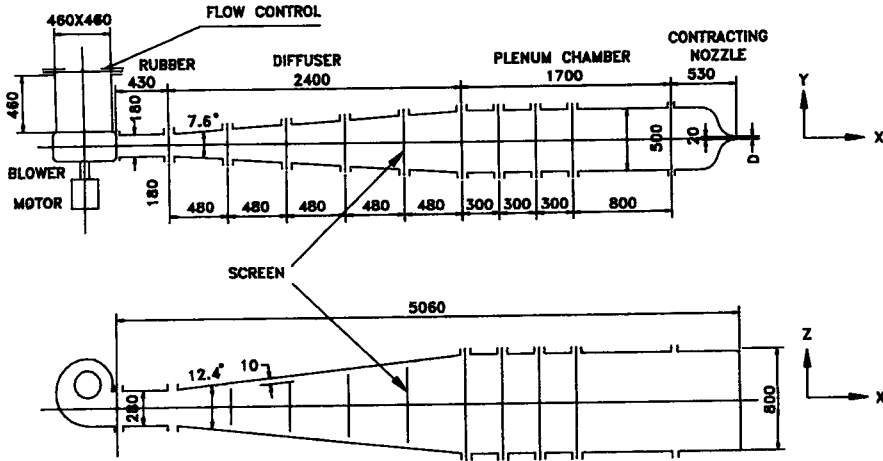


Fig. 2 Schematic diagram of wind tunnel (unit : mm)

분사된다. 송풍기의 공기 유입부에는 먼지와 이물질의 유입을 방지하는 250 mesh의 철망이 설치된 안내관(guiding duct)와 함께 막음판을 설치하여 유입구 단면적을 변화시켜 유량을 조절함으로써 원하는 평균 유속을 얻을 수 있도록 하였다. 송풍기와 확대부는 전동기의 진동이 전달되지 못하도록 고무관으로 연결하였고, 확대부와 정류실에는 각각 4군데씩 철망을 설치하여 난류도(turbulent level)를 낮추어 균일한 평균속도 분포를 얻을 수 있게 하였다.

노즐 출구에서의 속도장을 균일하게 유지하고 노즐 표면에서의 경계층 두께를 줄이기 위해서는 노즐의 축소에 상당한 역학적인 고려가 필요하다. Ramjee and Hussain⁽⁶⁾은 축소 노즐에 대한 종합적인 연구를 통해 3차식 노즐이 가장 좋은 축소 곡선이 됨을 밝혔고, Morel^(7,8)은 2개의 3차 곡선에 의한 최적 노즐설계방법을 제시하였다. 본 연구에서 사용된 풍동의 축소 노즐은 Morel의 방법에 따라 1.5 mm 두께의 철판으로 제작되었으며 속도 분포의 불균일을 개선하기 위하여 노즐의 입출구에 각각 5 mm의 평형부를 두었다. 노즐 출구의 경계 조건을 균일하게 하고 출구 단면 모양의 유지를 위한 두 개의 아크릴 평판을 800 mm×900 mm의 크기로 노즐단면과 나란히 설치 하였다. 노즐의 출구폭 D 는 20 mm이고 높이 W 는 800 mm로서 형상비 W/D 는 40이며 면적 축소비는 25이다.

2.2 시험구간과 표면조도 벽

노즐로부터 분사된 제트가 부착될 수직 벽면은

800 mm×1770 mm 크기인 10 mm 두께의 아크릴로 제작되어 시험 구간에 설치되었다. 시험구간의 위아래를 1820 mm×2400 mm 크기의 합판으로 평평하게 만들어 제트의 2차원성을 보존하였다. 시험구간에서의 기준 좌표는 제트 하류로 X 축, 수직벽으로부터 바깥쪽 방향을 Y 축, 노즐의 높이 방향을 Z 축으로 정의하였다.

표면조도에 관한 연구의 토대는 Nikuradse⁽⁹⁾에 의해 이루어졌는데 그는 거친 관유동에서의 속도분포를 측정하여 레이놀즈수가 일정 수준 이상으로 증가하면 속도 분포는 표면 조도만의 영향을 받아 매끈한 벽면에서 볼 수 있는 대수법칙 분포가 횡축으로 이동됨을 밝혔다. 조도가 유동특성에 미치는 영향에 대한 그동안의 연구는 주로 매끈한 벽면에서의 속도 분포식에 조도 영향항을 첨가하는 방식으로 실험식을 유도하고 수치적으로 해석되어왔다. 그런데 그와 같은 연구에 사용된 조도의 기하학적 형상에는 특별한 기준이 없으며 그 중 가장 일반적으로 정의되는 조도의 형태는 Fig. 3에서의 조도사이 간격 W 와 조도 높이 K 의 비로 정의되는 무차원 수로 구분된다. 본 실험에서는 선행 연구자들의 정의에 따라 W/K 가 1보다 크면 k-type, 1 이하이면 d-type으로 분류하였고, 조도간의 차이를 알아보기 위하여 Table 1에 나타나 있는 세가지 2차원 횡홈(spanwise groove) 조도 벽면을 제작하여 사용하였다. 인공 조도벽은 800 mm 1900 mm 10 mm 크기의 아크릴로 가공하여 실험구간에 수직으로 설치하였고 벽단비(offset jet ratio; H/D)의 변화를 위하여 Y 방향으로 움직일 수 있는 구조로 되

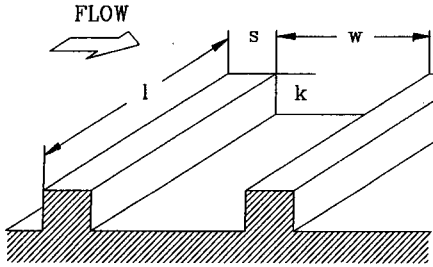


Fig. 3 Wall roughness geometry

Table 1 Roughness wall dimension

Wall No.	K (mm)	W (mm)	S (mm)	L (mm)	Type
I	2	2	2	800	d
II	2	4	2	800	k
III	2	6	2	800	k

어 있다.

2.3 Split Film Probe와 교정방법

스플릿 필름 프로브(split film probe; 이하 SFP라 칭함)은 그 출력 전압이 유체의 속도 뿐만 아니라 유입각에도 지배되므로 순간 유입각이 큰 흐름의 측정에 있어서 열선에 비하여 신뢰성 높은 자료를 얻을 수 있다.⁽¹⁰⁾ 본 실험에서 사용된 SFP는 TSI사 model 1288로서 수정봉의 직경은 0.15 mm, 감지부의 길이는 2 mm이며 다음과 같이 교정되었다. 먼저 SFP를 교정기(calibrator)에 장착하고 프로우브의 축과 분리면을 유동장 내의 평균 속도 벡터와 일치하도록 설치한다. 초기 과열비(over heat ratio)를 1.4로 하였다가 두 채널의 브릿지 출력 전압이 일치되도록 과열비를 미세 조정해 준다. 교정실험에서는 실제 실험에서의 속도 조건을 근거로 하여 속도 구간을 1.5 m/s에서 35 m/s까지 14구간으로 나누고 피치각은 +90° ~ -90°까지 중에서 17군데를 정하였다. 마지막으로 속도와 피치각에서의 출력전압 응답곡선을 얻어 유속 피치각과 전압간의 상관관계를 구하면 되는데, 본 연구에서는 피치각 교정오차를 줄이기 위해 Stock의 법칙을 수정하여 교정실험에서 선정된 각각의 속도 구간에 대한 무차원 함수를 따로 정의하는 방법을 택하였다.⁽⁵⁾

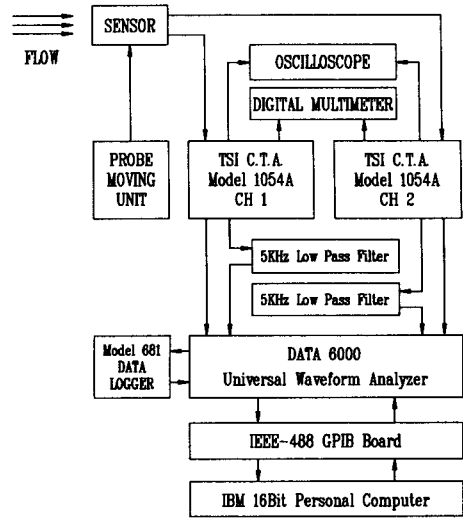


Fig. 4 Block diagram of measuring and data processing system

2.4 실험방법

노즐 출구의 평균속도를 30 m/s로 고정시킴으로써 노즐 출구 폭 20 mm를 특성 길이로 한 레이놀즈수는 약 39,000이었다. 노즐 출구에서의 속도 균일성은 디지털 마이크로마노미터(Furness사 MCD-FC004) 및 X형 열선풍속계를 이용하여 검정하였다. 노즐의 위와 아래 각 100 mm를 제외하고는 평균 속도 변동분이 폭방향으로 1.5%, 길이 방향으로 2.3% 이내에 들었고, 초기출구 난류강도는 X, Y, Z방향으로 각각 0.001, 0.002, 0.015로 균일한 제트흐름임을 확인하였다.

센서로부터 검출된 속도 성분들의 신호는 Fig. 4의 측정시스템을 통해 다음과 같이 처리 분석되었다. 2채널의 정온형 열선풍속계(TSI Model 1054A)로부터 감지된 출력신호는 직류와 교류 성분으로 나누어지고 직류성분은 과형분석기인 D6000(Data Precision 601)내의 연산기를 통하여 바로 평균값으로 취해진다. 또, 교류성분은 5 KHz의 저역통과필터를 거쳐 D6000에서 디지털 신호로 전환된 뒤 D6000과 연결된 퍼스널컴퓨터의 하드디스크나 D6000 전용 자료저장장치(Model 681 Data logger)에 저장된다. 분석 과정에서는 교정 작업에서 얻은 상수들을 이용하여 직류 성분의 평균값에 교류 성분을 더한 출력 전압값을 실제의 속도값으로 변환시키고 이로부터 얻어진 속도변동 성분으로 각종 난류 통계치를 얻게 된다.

자료의 추출 간격은 100 μ s이고 4096개의 자료를 20번씩 측정하여 앙상블 평균하였으므로 한 측정점에 대하여 총 81,920개의 자료가 통계처리 되었다. 단, 벽면 순방향 흐름비의 측정에 있어서는 추출해야 할 신호가 매우 낮은 주파수로 준주기 형태를 보이므로 100 Hz의 절단주파수를 가진 저역 통과 필터를 거친 후 추출 간격 5 ms로 81.92초에 해당하는 자료를 획득하여 이를 앙상블 평균하였다. 분석된 자료의 오차한계는 Kline and McClintocks⁽²⁵⁾의 방법에 의하면 불확실성이 유입각에 있어 최대 피치각 70에서 5%, 30 m/s의 평균속도에 있어 2%, 난류강도에 대하여는 9% 이내에 드는 것으로 계산되었다.

벽단비의 변화에 따른 벽부착영역 측정 이외의 실험에서는 주로 벽단비를 $H/D=5.0$ 에 고정하였다. 전체 유동장의 측정에 앞서 벽면 순방향 흐름비를 우선 측정하여 벽부착영역을 결정하고 X축을 따라 부착이전 영역(pre-attachment region)에서 8군데, 벽부착영역과 벽제트영역(wall-jet region)에서 10군데 등 총 18지점을 선정하여 각각의 지점에 대해 Y 방향으로 5 mm씩 SFP를 옮겨가면서 속도를 측정하였다. 스플릿 필름은 수직벽의 중심선상에 놓이도록 지지대로 고정시켰고 센서의 이송에는 X와 Y방향으로 피치가 각각 5 mm, 0.5 mm인 수동식 이송 장치와 독립현미경을 사용하여 위치오차를 최대한 줄였다.

3. 실험결과와 고찰

3.1 벽부착영역과 벽부착길이

WAOJ 유동장에 있어서 노즐 출구로부터 출발된 분리유선(dividing stream line)이 제트 양쪽의 압력차이로 인하여 휘어져서 벽면에 부착되는 지점을 벽부착점이라 한다. 그런데 제트흐름이 휘는 원인인 유입의 불균형이 지속적으로 일정하게 유지되지 않으므로 벽부착점은 간헐적으로 산재하여 나타나는 특징구간을 형성하게 된다.⁽⁵⁾ 종래에 사용되었던 가시화기법이나 Bergeles and Athanasiadis⁽²³⁾와 같은 열선기법으로는 이러한 벽부착 영역의 특성을 측정해낼 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 순방향 흐름비(forward flow fraction)를 조사하여 벽부착현상을 조사하였다. 순방향흐름비 γ 는 유동성분중 하류방향의 흐름이 차지하는 비율로 정의되며 통상 백분율로 표시된다. Westphal

and Johnston⁽¹¹⁾은 벽면에서의 순방향 흐름비가 50%인 지점이 비정상 벽부착흐름의 시간평균 벽부착점 혹은 박리점이라고 평가하였다. 본 연구에서는 선행 연구를 토대로 SFP를 벽면에 수직으로 최대한 접근시켜 벽면 순방향 흐름비 γ_w 를 측정하고 벽부착영역과 시간평균 벽부착점 및 표면 박리점의 판단 기준으로 적용하였다.

시험부 벽의 표면 조도가 벽부착길이와 벽부착영역, 벽제트영역의 유동장에 미치는 영향을 조사하기 위해 동일한 조건에서의 매끈한 벽에 대한 실험치와 비교 평가하였다. Table 1의 벽Ⅱ와 Ⅲ에 대해서 여러 경우의 벽단비에 대하여 벽면 순방향 흐름비 γ_w 를 측정하였고 벽Ⅰ에 대해서는 벽단비가 5.0인 경우에 측정을 하였다. 시간평균 벽부착점의 위치는 벽부착영역 내에서의 순방향 흐름비를 X방향에 따라 5차 다항식으로 근사하여 50%가 되는 지점으로 결정하였다.

시간평균 벽부착길이는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 전체적으로 매끈한 벽면의 경우와 거의 같은 경향을 보이는데 특히 벽단비가 5.0인 경우에는 대략 $XR=12.5$ 의 값을 보였다. 벽부착길이와 전반적으로 벽단비의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하는 현상은 분출된 제트가 코안다 효과에 의해 단이진 벽면에 부착되는 과정에서 제트의 중심선을 기준으로 벽쪽에서 유입이 제한되기 때문이다. 즉, 단의 높이가 작은 경우에 분출 제트의 유선방향으로 일정 거리까지 포텐셜 코어의 존재로 인한 제한을 받다가 하류의 혼합층에 와서야 유입이 일어나지만 단의 높이가 큰 경우에는 벽부착 되기 전에 자체 유사 영역으로 발전되며 벽으로 인한 제한이 줄어들어 유입이 많아지는 것이다. 더구나 재순환

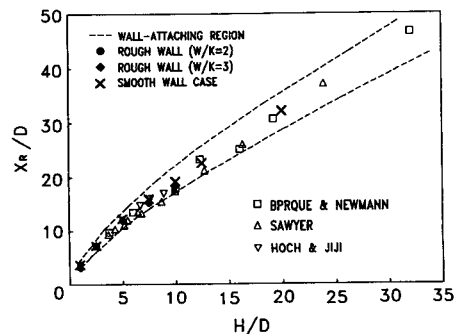


Fig. 5 Variations of the wall-attaching length with various offset ratios

영역으로 유입되는 유량은 제트의 폭에 비례하므로 벽단비가 커질수록 두꺼워진 제트가 벽부착되어 상류로 더 많은 유체가 유입되고 이로 인하여 벽부착 길이가 길어지게 되는 것이다. 그러므로 Fig. 5에서와 같이 표면조도에 따른 시간평균 벽부착길이에 별다른 변화가 없다는 것은 노즐에서 출발한 유동이 벽에 재부착되기까지는 시간 평균적인 표면조도의 영향이 별로 없음을 의미한다. 그러나 Fig. 6의 간헐적인 홀어짐에 의한 벽부착점 영역을 보면 표면조도의 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 이는 벽에 부착된 후 재순환영역으로 역류해 들어가는 유동이 매끈한 벽에 비해 거친 벽에서 더 큰 마찰저항을 받으므로 유동 방향으로의 운동에너지를 많이 잃게 되어 재순환 유동장이 매우 불균일하게 형성되기 때문이다. 결과적으로 거친 벽일수록 재순환영역의 비정상성은 크게 증가하고 벽부착 점의 순간 분포가 넓은 지역에 걸쳐 일어나지만 시간 평균적으로 볼 때 지속적인 재순환영역의 크기 변화는 발생하지 않는다는 것이다.

3.2 평균속도 분포

SFP로 측정된 전속도값과 유입각을 이용하면 Fig. 7과 같은 속도벡터 선도를 그릴 수 있다. Fig. 7은 벽 I이 설치되고 벽단비가 5.0인 WAOJ의 충돌 영역까지의 속도벡터를 나타낸 것인데 WAOJ 유동장의 평균 유동현상을 잘 보여주고 있다. Fig. 8은 세가지의 조도벽이 설치된 각각의 경우 벽에서 수직방향으로 2.5mm 떨어진 위치에서 측정된 속도 U 를 나타낸 것인데 최대 역흐름 속도는 3가지 경우 모두 대략 $X/D=8$ 근방에서 출구 속도의 -0.27 배인 약 -8.0 m/s 이었다. 벽 II와 III의 속도 분포는 벽 I의 경우와 대략적으로 유사한 형태를 보이지만 재순환 영역내에서의 구석와동 (corner eddy)의 발달 정도가 약간 다르게 나타났다. 즉, Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 벽 I에서는 $X/D=1.5$ 근방에서 박리가 일어나 구석 와동이 형성되었는데 비해 벽 II와 III에서는 $X/D=3.5$ 근방까지 박리점이 앞당겨지면서 구석 와동의 크기가 커졌다. 또한 벽 III에서는 $X/D=1.0$ 근방에서 두번째의 구석 와동이 간헐적으로 측정되기도 하였으나 센서를 설치하기 어렵고 센서 자체의 유동 간섭이 우려되어 정교한 자료 획득은 불가능하였다. 이와 같이 거친 벽의 경우 재순환 유동장내에서 소규모 와동이 쉽게 발생하는 것은 벽부착된 유동의

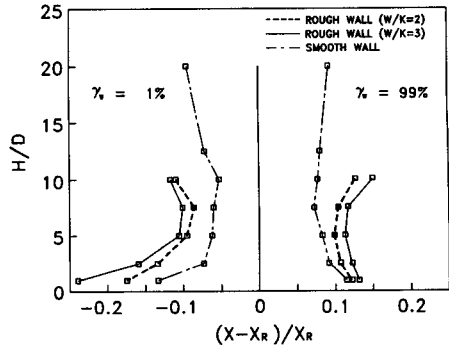


Fig. 6 Variation of the width of wall attaching region with various offset ratios

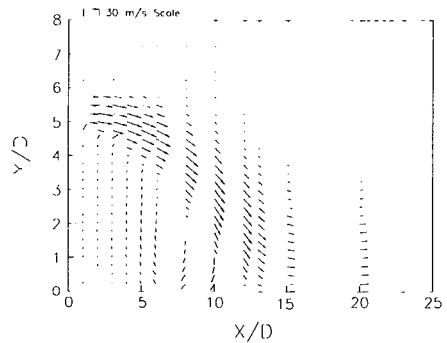


Fig. 7 Distribution of the velocity vectors (W/K=2)

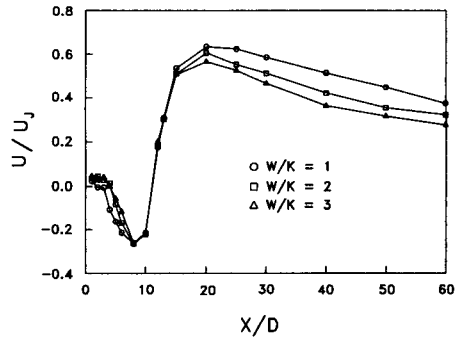


Fig. 8 Distribution of the near wall velocity decays

일부가 역류되어 흐르면서 표면 조도에 따라 서로 다른 마찰 저항을 받게 되는데, 거친 벽일수록 마찰저항이 심하여 최대 역류점을 지난 후부터 역방향 운동량 손실이 커지고 압력이 떨어지므로 구석 와동을 발생시키는 박리점이 빨리 형성되기 때문이다.

벽단비가 5.0인 경우 최대 평균속도값 U_m 이 감소되는 경향을 Fig. 9에 보였다. 벽부착이 발생하

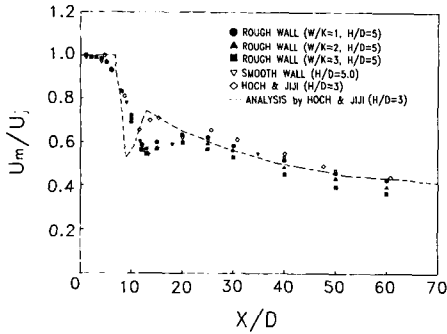


Fig. 9 Maximum axial velocity decays of the wall attaching offset jets

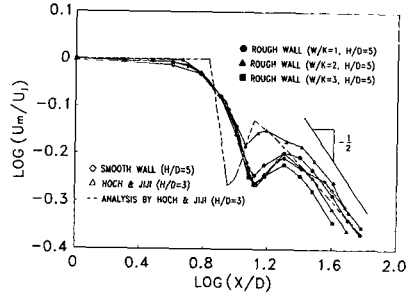


Fig. 10 Logarithmic plots of the maximum velocity variations

기 전인 $X/D=8$ 이전 영역에서는 표면조도에 따른 차이가 거의 없으나 부착영역 이후에서는 거친 벽면의 경우 유동방향 표면 마찰저항과 조도 흡에서 생성된 소규모 와류에 의한 운동량 소모 등으로 인하여 최대 속도의 감소가 촉진된다. 때문에 벽 I의 경우는 매끈한 벽면의 경향과 비슷하나 벽 II, III의 순서로 감소 정도가 커지게 된다. 이와 같은 최대속도의 감소경향을 정성적으로 관찰하기 위하여 X 와 U_m 을 무차원화하고 각각 \log 를 취해서 Fig. 10과 같이 나타내었다. 벽부착 과정에서 최대 평균속도가 급격히 감소하는 것은 재순환 유동장으로 유동의 상당부분이 빠져나가기 때문이다. 급감한 최대속도는 충돌영역을 벗어나면서 제트로부터 공급된 운동량으로 인하여 회복되다가 벽제트 영역에서 확산되면서 다시 감소하게 된다. 이때 완전 발달된 평면 벽제트의 경우 $-1/2$ 의 기울기를 갖는데⁽¹²⁾ Fig. 10의 WAOJ중 벽제트 영역에서도 이를 확인할 수 있다. 즉, 충돌영역을 지나서 벽제트로 발전되다가 상사구조를 이루면서 평면벽제트의 특성인 $-1/2$ 역법칙을 만족시키는 것이다. 매끈한 벽의 경우보다는 거친 벽의 경우가 먼저 상사구조에 이르는 것을 알 수 있으며 W/K 가 클수록 역법칙을 빨리 보이는 것으로 보아 표면조도가 벽제트로의 상사를 촉진시킴을 알 수 있다.

Fig. 11은 노즐 출구 쪽으로 무차원화시킨 upper jet spread의 분포를 보인 것인데 여기서 upper jet spread란 벽면으로부터 축방향 최대 평균 속도 U_m 의 반이 되는 지점까지의 의미한다. 가상원점(virtual origin)은 원래 평면 벽제트유동에서의 제트 반쪽을 이은 선이 벽면과 만나는 점으로 평가되는데 WAOJ에서는 충돌영역 이후의 벽제트 발달

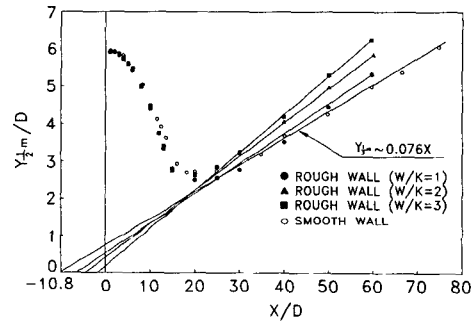


Fig. 11 Upper jet spread of the wall attaching offset jets

구간에서 upper jet spread의 값으로 그 경향을 유추하게 된다. Rajaratnam⁽¹²⁾에 의하면 상사가 잘 이루어진 평면 벽제트의 경우 가상원점이 대략 $X/D=-10$ 위치에 존재하는데 본 연구의 매끈한 벽면의 경우에는 $X/D=-10.8$ 로 잘 일치하고 있다. 거친벽면의 경우에는 W/K 가 증가함에 따라 조도의 영향으로 인해 수직방향의 흐름성분이 커지면서 매끈한 벽에 비해 상사구조에 일찍 도달되므로 Fig. 11과 같이 가상원점의 위치가 노즐 출구쪽으로 당겨지는 경향을 보인다. 본 실험범위내에서 각 경우의 가상원점을 노즐쪽으로 무차원화하여 W/K 의 함수로 나타내면 Fig. 12와 같고 이를 다음과 같은 2차 함수관계로 근사할 수 있다.

$$X/D = -10.735 + 3.865(W/K) - 0.325(W/K)^2$$

WAOJ 유동에서 충돌영역을 형성한 제트는 벽제트로 발전하게 되는데 이를 확인하기 위하여 Fig. 13과 같이 충돌영역 이후의 평균속도 분포를 국소 최고 평균속도로 무차원화하여 나타내었다. 여기서 보면, 매끈한 벽면의 경우에는 $X/D=40$ 이후에서

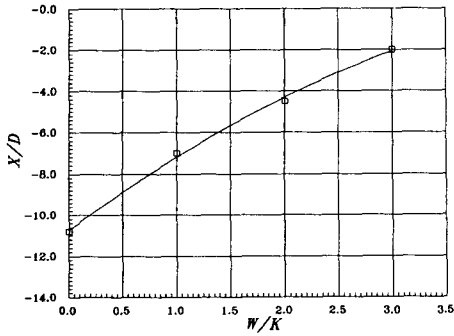
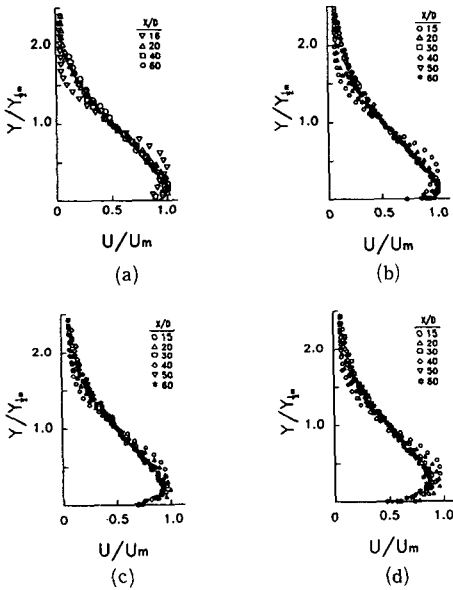


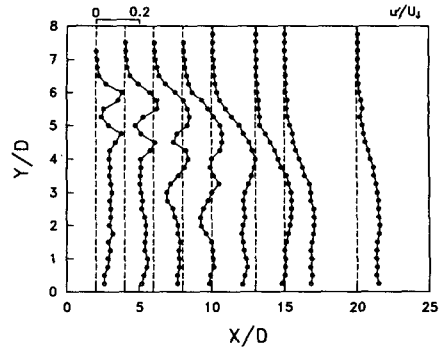
Fig. 12 Locations of virtual origins at various W/K



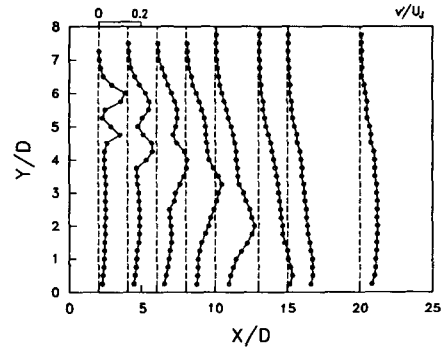
- (a) Smooth wall
- (b) Rough wall (W/K=1)
- (c) Rough wall (W/K=2)
- (d) Rough wall (W/K=3)

Fig. 13 Non-dimensional mean velocity distributions

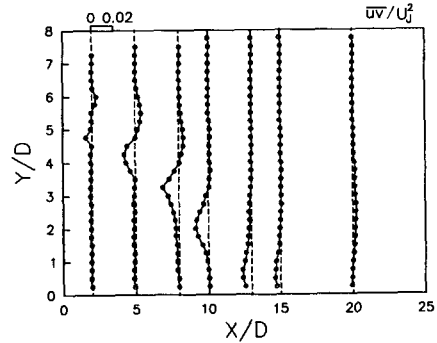
야 어느정도 상사성을 보이는데 비하여 거친 벽면의 경우 $X/D=30$ 직후부터 상사성을 보이고 있다. 또한 상사성이 나타나기 시작하는 영역이후에서 최대 속도점의 수직방향 위치를 보면 매끈한 벽과 벽 I의 경우는 $Y/Y_{1/2m}=0.13$ 정도인데 비하여 벽 II·III의 경우는 각각 $Y/Y_{1/2m}=0.23, 0.26$ 으로 증가함을 알 수 있다. 또한, 조도가 재발달 제트에서 최고 속도점 상부의 자유 혼합층의 평균 속도 상사성에는 별 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있는데 이러한 경향은 평면제트에서와 마찬가지로



(a) Axial turbulent intensities (W/K=2)



(b) Normal turbulent intensities (W/K=2)



(c) Reynolds shear stress (W/K=2)

Fig. 14 Turbulent intensities and Reynolds shear stress

이다.⁽¹²⁾ 이처럼 표면조도가 벽제트의 이완을 촉진하는 이유는 Fig. 8에서 확인되었듯이 표면조도로 인하여 벽에 인접한 위치에서의 유동이 저항을 받아 속도가 감소되면서 운동량을 잃게 되고 벽 근처에서의 운동량이 수직방향으로 급속히 전파되어 제트확산이 빨리 일어나기 때문이다.

3.3 속도섭동의 2차 상관관계

Fig. 14는 벽단비가 5.0인 경우 벽 II의 난류 변동속도 성분의 2차 상관관계들을 나타낸 것인데 난류 섭동성분의 *r.m.s.* 값 u' , v' 는 각각 난류 강도로서 제공하면 난류 운동 에너지의 성분이 되므로 이의 분포로 에너지의 분포를 알 수 있으며 $-\overline{uv}$ 는 레이놀즈 전단응력으로 난류 운동에너지의 생성에 관계되는 양이다. Fig. 15와 Fig. 16은 난류 강도를 최대 국소 평균속도와 upper jet spread로 각각 무차원화하여 나타낸 것으로 매끄러운 벽에서는 뚜렷한 상사성을 볼 수 없으나 조도가 있는 벽에서는 $X/D=50$ 이후 상사구조를 보여주고 있다. 레이놀즈 전단응력을 같은 방법으로 무차원화 시켜서 나타낸 Fig. 17을 보면 역시 표면조도의 영향으로 난류확산이 촉진되어 매끈한 벽보다 상사 구조에 빨리 도달함을 볼 수 있다.

Fig. 15와 Fig. 16에서 실험 범위내에서 W/K 가 증가할수록 벽면 가까이에서의 난류강도가 커지는데, 이는 표면조도를 형성하는 홈 사이의 공간에서 생긴 박리와 부착현상에 기인하여 벽에서 일정한

높이까지 불안정한 유동특성을 보이기 때문이다. 또, Fig. 17에서 전단응력이 영(零)인 수직 방향 위치는 Fig. 13의 국부 최대 속도점 위치와 약간 다른 것을 관찰할 수 있다. 이는 평균 속도 분포가 대칭구조가 아니기 때문이며 최대 속도점 위치를 기준으로 매끈한 벽면에서는 54%, 조도가 $W/K=1$ 일 때 24%, $W/K=2$ 일 때 15%, $W/K=3$ 일 때 7% 만큼 최대속도점보다 벽면에 더 가까운 점에 위치한다. 이 값들을 정량적으로 고찰하기 위하여 Table 2에 국소 최대속도점과 전단응력이 영(零)인 점을 각각 Y_m 과 $Y_{uv=0}$ 로 나타내었다. Y_m 은 실측된 값을 그대로 표시하였으므로 오차범위가 ± 1.25 mm 이내이고 $Y_{uv=0}$ 는 전단응력 부호 변환점 양단의 두 점을 선형 근사하여 구하였다.

난류 속도성분의 2차 상관관계를 종합하여 보면 우선 Fig. 14의 난류강도는 외부 구간의 박리 전단층 내에서 크게 나타나며 재순환영역 내에서는 거의 일정한 값을 보임을 알 수 있다. 이 편평한 구역 아래의 벽면 내부 구간에서는 벽면의 영향으로 인해 난류 운동에너지가 감소하는데 매끈한 표면보

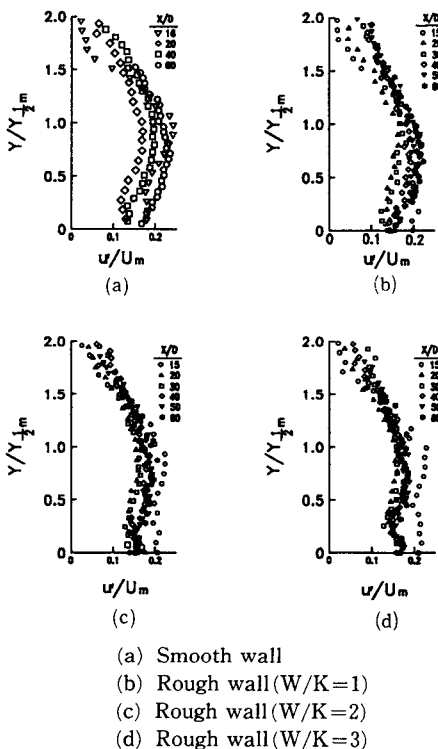


Fig. 15 Non-dimensional axial turbulent intensities (u'/U_m)

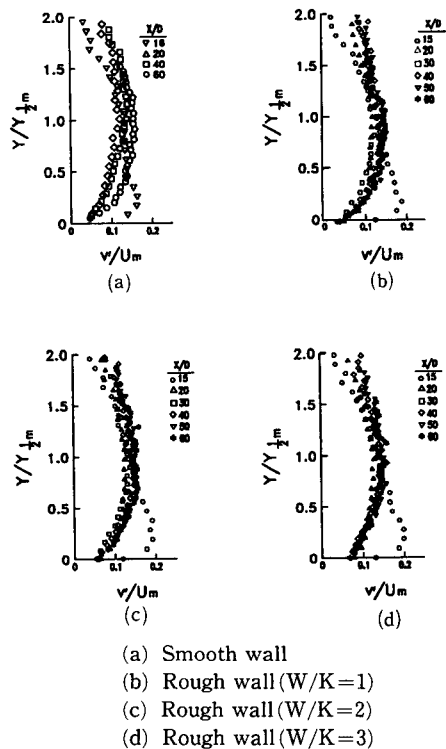


Fig. 16 Non-dimensional normal turbulent intensities (v'/U_m)

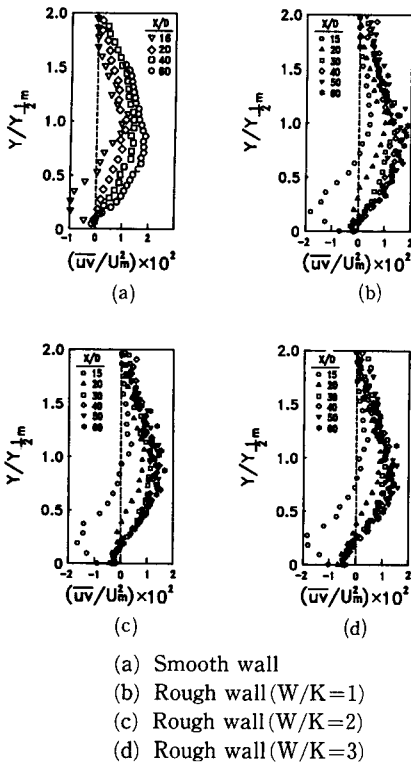


Fig. 17 Non-dimensional Reynolds shear stress distributions

Table 2 Maximum velocity points and zero Reynolds shear stress points in the wall jet regions

Wall No.	X/D	U _m (m/s)	Y _m (mm)	Y _{uvo} (mm)
I	30	17.822	5	3.28
	40	15.786	10	4.24
	50	14.028	15	7.15
	60	13.067	15	8.51
II	30	16.918	10	9.78
	40	14.537	15	13.77
	50	13.115	25	15.42
	60	11.897	25	15.84
III	30	16.237	15	13.00
	40	14.060	20	16.60
	50	12.257	25	23.21
	60	11.416	30	26.47

다는 거친 표면에서 조도에 의해 더 급격히 감소하였다. 층돌영역에서는 박리전단층이 성장함에 따라 난류 에너지가 벽면과 외부기체쪽으로 퍼져나가 완만한 형태로 되며 벽 근처에서 보다 더 빨리 감소하였다. 부착 이전영역에서는 난류강도의 분포가 두 군데에서 극대값을 가지는 형태를 띄고 있지만 층돌영역의 난류 응력분포는 최대값 부근에서 급격히 변화하지 않고 비교적 편평한 편이다. Fig. 15에서 볼 수 있듯이 벽부착점을 지나면서 난류에너지는 급격히 감소하고 회복구역으로 들어가면 국소 운동에너지는 벽 가까이에서 최대값을 보이며 벽제트로 발전하기 시작한다. 결과적으로 표면조도에 의해 유동저항이 커지면서 상사구조에 빨리 도달하게 되며 제트확산이 촉진되어 벽제트로의 발전이 급속히 전개됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 표면조도가 2차원 벽부착 제트유동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 거친 벽면과 매끈한 벽면에서의 벽부착 제트유동장을 비교 고찰하였다. 벽부착 제트유동은 역흐름이 빈번하고 난류강도가 큰 재순환 흐름을 동반하므로 유입각 검출성능이 좋은 스플릿 필름 프로브를 사용하여 실험하였고 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시간평균 벽부착길이는 조도변화에 따른 큰 변화를 보이지 않았지만 벽부착 영역의 폭은 거친 벽면의 경우가 매끈한 벽면의 경우에 비해 훨씬 넓게 나타났다. 이는 표면조도가 재순환 영역내의 벽 근처 역류유동에 저항으로 작용하여 재순환 흐름의 비정상성을 높이기 때문이다.
- (2) WAOJ의 벽제트영역에서의 최대속도 감소는 거친 벽면의 경우가 훨씬 급격하게 진행된다.
- (3) 거친 벽면에서의 upper jet spread가 더 큰 기울기를 가지고 분포되어 가상 원점이 실험 조도 범위내에서 W/K가 클수록 노즐 출구쪽으로 당겨지며 제트 확산이 더 빨리 진행된다.
- (4) 거친 벽면에 의한 유동 저항으로 인하여 재순환 영역내의 벽 근처 역류가 운동에너지를 쉽게 잃는다. 그러나 최대 역류속도의 정량적인 크기와 발생 위치는 매끈한 벽의 경우와 큰 차이가 없다.
- (5) 재발달 벽제트에서 난류강도 및 전단응력은 표면 조도 영향으로 매끈한 벽면에 비해 빨리 상사구조에 도달하고(X/D=40), 본 실험의 조도 범위

내에서 W/K 가 증가함에 따라 벽면 경계층내에서의 난류강도 값도 증가한다.

후 기

이 논문은 1992년도 한국학술진흥재단의 지방대학 육성과제 학술연구 조성비의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Borque, C. and Newmann, G., 1960, "Reattachment of a Two Dimensional, Incompressible Jet to an Adjacent Plate," *Aerion, Quar.*, Vol. 11, pp. 201~232.
- (2) Sawyer, R. A., 1963, "Two-Dimensional Reattachment Jet Flows Including the Effect of Curvature on Entrainment," *J. Fluid Mech.*, Vol. 17, pp. 481~498.
- (3) Rajaratnam, N. and Subramanya, N., 1968, "Plane Turbulent Reattachment Wall Jet," *Trans. ASCE J. Hydraulic Div.*, Vol. 94, pp. 95~112.
- (4) Pelfray, J. R. R. and Liburdy, J. A., 1986, "Effect of Curvature on the Turbulence of a Two-Dimensional Offset Jet," *Trans. ASME J. Fluids Engr.*, Vol. 4, pp. 143~149.
- (5) Yoon, S. H., Kim, K. C., Kim D. S. and Chung, M. K., 1993, "Comparative Study of a Turbulent Wall-Attaching Offset Jet and a Plane Wall Jet," *KSME J.*, Vol. 7, No. 2, pp. 101~112.
- (6) Ramjee, V. and Hussain, A. K. M. F., 1976, "Influence of the Axisymmetric Wind Tunnel Contractions," *Trans. ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 98, pp. 506~515.
- (7) Morel, T., 1974, "Comprehensive Design of Asymmetric Wind Tunnel Contractions," *Trans. ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 97, pp. 226~233.
- (8) Morel, T., 1977, "Design of Two-Dimensional wind Tunnel Contractions," *Trans. ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 99, pp. 371~378.
- (9) Nikuradse, J., 1933, "Strömungsgesetze in Rauhen Rohren," *VDI Foshungsheft* No. 361. *Translated as NACA TM*, No. 1292(1950)
- (10) Ra, S. H. and Chang, P. K., 1990, "Effects of Pressure Gradient on Reattaching Flow Downstream of a Rearward-Facing Step," *J. Aircraft*, Vol. 27, No. 1, pp. 93~95.
- (11) Westphal, R. V. and Johnston, J. P., 1984, "Effect of Initial Conditions on Turbulent Reattachment Downstream of a Backward Facing Step," *AIAA J.*, Vol. 22, No. 12, pp. 1727~1732.
- (12) Rajaratnam N., 1976, *Turbulent Jets*, Oxford, Newyork.
- (13) 김병남, 정명균, 1991, "조도가 후향계단 주위의 난류유동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제15권, 제6호, pp. 2083~2099.
- (14) Kuhen, D. M., 1980, "Some Effects of Adverse Pressure Gradient on the Incompressible Reattaching Flow over a Rearward-Facing Step," *AIAA J.*, Vol. 18, No. 3, pp. 343~344.
- (15) Ismoto, K. and Honami, S., 1989, "The Effect of Inlet Turbulence Intensity on the Reattachment Process over a Backward-Facing Step," *J. Aircraft*, Vol. 27, No. 1, pp. 93~95.
- (16) Perry, A. E., Schofield, W. H. and Joubert, P. N., 1969, "Rough Wall Turbulent Boundary Layers," *Trans. ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 37, pp. 383~413.
- (17) Grass, A. J., 1971, "Structural Features of Turbulent Flow over Smooth and Rough Boundaries," *J. Fluid Mech.*, Vol. 50, pp. 233~256.
- (18) Phillip, M. L. and Robert, J. M., 1944, "Structure of Transitionally Rough and Fully Rough Turbulent Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 162, pp. 69~98.
- (19) Champagne, F. H., 1978, "The Turbulent Boundary Layer in Advances in Applied Mechanics," *Academic Press*. Newyork, Vol. 4, pp. 1~51.
- (20) Promode, R. and Bandyopadhyay, P. R., 1987, "Structure of Rough Wall Turbulent Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 180, pp. 231~266.
- (21) Coleman, H. W., 1984, "A Re-evaluation of Schlichting's Surface Roughness," *Trans. ASME J. of Fluids Eng.*, Vol. 106, pp. 60~65.

- (22) Dvork, F. A., 1969, "Calculation of Turbulent Boundary Layers on Rough Surfaces in Pressure Gradient," *AIAA J.*, Vol. 7, No. 9, pp. 1752~1759.
- (23) Bergeles, G. and Athanassiadis, N., 1983, "The Flow Past a Surface mounted Obstacle," *Trans. ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 105, pp. 461~463.
- (24) Pronchick, S. W., 1983, "An Experimental Investigation of the Sturcture of a Turbulent Reattaching Flow behind a Backward-Facing Step," Ph. D. Thesis, Dept. of Mech. Eng., Stanford Univ.
- (25) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mech. Eng.*, Vol. 75, pp. 3~8.