

〈技術論文〉

## 충돌제트로 인한 회전원판 위의 벽제트유동에 관한 실험적 연구

강형석\* · 유정열\*\*

(1994년 5월 24일 접수)

### Experimental Study on the Wall Jet Flow Induced by Impinging Circular Jet on a Rotating Disk

Hyung Suk Kang and Jung Yul Yoo

**Key Words :** Rotating Disk (회전원판), Impinging Jet (충돌제트), Viscous Pumping (점성펌핑), Schlieren System (슐리렌장치), Wall Jet Flow (벽제트유동)

#### Abstract

An experimental study has been performed on the flow over a rotating disk, where the diameter of the disk is 500 mm and the maximum vertical deviation of the upper surface is 50  $\mu\text{m}$  for the whole range of the angular velocity up to 3400 rpm. The flow visualization experiment for the wall jet flow induced by impinging circular jet is carried out using schlieren system and measurements are made by 3-hole and 5-hole pitot tubes. Schlieren photographs show that as the rotating speed increases the wall jet flow becomes more stable and the size of the largest eddies becomes smaller. Measurements for impinging jet flow on the stationary disk verify the accuracy of the present experiment, and those for free rotating disk flow display the existence of transition region from laminar to turbulent flows. Measurements for impinging jet flow on the rotating disk exhibit the interaction between the wall jet and the viscous pumping effect, which explains the decay in size of turbulent eddies illustrated by the schlieren photographs.

#### 기 호 설 명

$b$  : 속도가 최대속도의 1/2이 되는 점의 위치 (m)  
 $d$  : 노즐출구 직경  
 $f(\alpha) : (p_4 - p_2) / (p_0 - p_m + \sigma)$   
 $f(\psi) : (p_1 - p_3) / (p_0 - p_m + \sigma)$   
 $G$  : 무차원화된 원주방향속도 ( $v_\theta / r\omega$ )  
 $H$  : 노즐 출구와 원판사이의 거리  
 $p_0$  : 5공 피토관의 가운데 압력공에 작용되는 압력  
 $p_i$  : 5공 피토관의 각각의 압력공에 작용되는 압력 ( $i=1, 2, 3, 4$ )

$p_m$  :  $(p_1 + p_2 + p_3 + p_4) / 4$   
 $r$  : 반경방향거리, 반경방향좌표  
 $r_o$  : 원판의 반경  
 $Re_j$  : 제트레이놀즈수 ( $u_j d / \nu$ )  
 $Re_r$  : 반경방향거리를 기준으로 한 회전 레이놀즈수 ( $\omega r^2 / \nu$ )  
 $Re_{r_o}$  : 원판의 반경을 기준으로 한 회전 레이놀즈수 ( $\omega r_o^2 / \nu$ )  
 $U$  : 자유유동속도 (m/s)  
 $u_j$  : 제트출구속도 (m/s)  
 $v_r$  : 반경방향 속도성분  
 $v_{r,max}$  : 반경방향 속도분포 중 최대속도

\*정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

\*\*정회원, 서울대학교 기계공학과

- $v_0$  : 원주방향 속도성분  
 $z$  : 원판면에 수직방향거리, 원판면에 수직방향 좌표  
 $z^*$  : 무차원화된 점성화산거리  
 $\alpha$  : 요우각  
 $\mu$  :  $(p_0 + p_1 + p_2 + p_3 + p_4) / 5$   
 $\nu$  : 동점성계수 ( $m^2/s$ )  
 $\theta$  : 원주방향좌표  
 $\sigma$  :  $\sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (p_i - \mu)^2}$   
 $\omega$  : 회전 각속도  
 $\psi$  : 피치각

## 1. 서 론

회전원판(rotating disk), 회전공동(rotating cavity) 회전통로(rotating passage)에서의 유동 및 열전달현상은 터보기계 설계에 있어서 매우 중요하다. 예를 들면, 가스터빈엔진의 압축기 및 터빈로터의 바퀴공간(wheel-space)에서의 온도분포 및 열응력을 파악하는 것은 운전온도를 결정하는데 필수적이다. 이를 위하여 자유 회전원판(free rotating disk), 회전원판에 충돌하는 제트, 회전-정지 원판(rotor-stator disk) 시스템, 회전공동(소스 및 싱크유동, 또는 축방향 관통유동을 포함하거나 포함하지 않는), 역회전원판(contrarotating disks) 시스템 등은 회전기계의 유동 및 열전달 연구에서 기준으로 흔히 사용된다.<sup>(1)</sup>

자유 회전원판에 대한 유동장(원판만 회전하는 경우 원판 위의 유동장)은 von Karman<sup>(2)</sup>에 의해 최초로 유사해(similarity solution)가 유도되었으며 최근에는 Ong과 Owen 등<sup>(3)</sup>이 경계층 운동량방정식과 에너지방정식의 수치해를 구하였다. Owen 등<sup>(4)</sup>은 역회전원판 사이에서의 유동 속도분포를 저 레이놀즈수  $k-\epsilon$  난류모델을 이용하여 계산하였다. Morse<sup>(5)</sup>는 닫혀진 회전-정지 원판시스템에서 회전 레이놀즈수를  $10^7$ 까지 적용할 수 있는 Reynolds 평균 Navier-Stokes 방정식을 해석하였다. 또한 열전달 특성을 파악하기 위하여 최근에는 액정(liquid-crystal) 방법을 사용하기도 하는데, Staub<sup>(6)</sup>이 방법을 이용하여 항공기 엔진의 회전-정지 원판은 시스템의 실제크기 모델로 열전달실험을 수행하였다. 터빈의 고온의 주유동 유체가 로터(rotor)와 스테이터(stator) 사이의 공동으로 유입되는 인그

레스(ingress)현상을 방지하기 위하여 이 공동으로 냉각공기를 불어넣게 되는데, 이 냉각공기 유량을 최소화하기 위한 연구도 이루어지고 있다. Bhavnani 등<sup>(7)</sup>은 회전레이놀즈수  $Re_r = 2.29 \times 10^6$ 이내에서 냉각공기 유량, 회전속도, 공동의 기하학적 형상, 실(seal) 형상 등의 인자가 공동내의 속도장과 압력장에 미치는 영향을 실험을 통하여 분석하였으며 인그레스현상을 방지하기 위한 최소한의 축방향 관통류(axial throughflow)의 양을 수치화 하였다. 스테이터대신 역회전 팬(counter-rotating fan)을 구동하는 차세대 가스터빈을 모델링하기 위하여 역회전 원판을 이용한 유동장 측정 및 계산에 대한 연구가 진행중이기도 하다.<sup>(1,4)</sup> Metzger,<sup>(8,9)</sup> Popiel<sup>(10,11)</sup>등은 터빈원판 림(rim)을 냉각시키는 모델로서 회전하는 원판에 충돌하는 제트의 열전달 특성을 비정상상태 열전달방법으로 연구하였다. 회전원판을 제트로 냉각시키는 방법은 우주왕복선의 터빈 냉각에 이용되기도 한다. Qureshi 등<sup>(12)</sup>은  $Re_r = 4 \times 10^5 \sim 1.86 \times 10^6$ 의 범위에서, 냉매유동이 존재하는 공동내에서 회전하는 원판의 국소 대류열전달계수를 측정하였다.

본 연구에서는 터보기계로터 바퀴공간을 보다 효과적으로 냉각시키는 방안의 연구에 선행하여 기초적인 모델로서 자유회전원판 및 회전하는 원판에 충돌하는 제트유동의 구조 및 특성에 관하여 중점적으로 고찰하고자 한다. 이를 위하여 본 실험에서는 최고 속도 3400 rpm ( $Re_r = 1.47 \times 10^6$ ) 되는 직경 500 mm의 회전원판 시스템을 설계, 제작하였으며 제트 노즐을 설치하여 3차원 유동현상을 실험적으로 고찰한다. 슬리렌장치를 이용한 유동의 가시화와 5공 피토판과 3공 피토판을 이용한 평균유동 측정을 수행함으로써 원판의 회전속도, 노즐출구와 원판사이의 거리변화에 따른 평균속도장의 변화를 고찰한다.

## 2. 실험장치 및 측정방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 회전원판 시스템, 제트노즐과 송풍기로 구성된다.

1000 rpm이상의 고속회전 운전하에서 실험수행에 적합한 정밀한 회전원판 시스템이 설계, 제작, 조립되었다. 회전원판의 직경은 500 mm(가시화실험시에는 슬리렌 시스템의 거울직경이 240 mm인

점을 감안하여 회전원판의 직경을 450 mm로 함)이고, 원판 어댑터(adapter)의 직경은 200 mm이다. 원판의 재질은 가공성이 좋은 두랄루민을 택하였고 축, 하우징과 어댑터의 재질로는 SM40C를 사용하였다.

축은 고속회전시 무게균형과 회전 정밀도를 유지하기 위하여 타이밍 기어와 일체로 제작하였으며 최대한 대칭성이 보장되도록 최대 외경 141.23 mm, 내경 50 mm, 길이 330 mm의 중공축(hollow axis)으로 설계하였다. 회전시 자이로운동(gyro motion)을 억제할 목적으로 축의 길이를 최소화 하였다.

원판 어댑터를 축에 조립하였을때, 회전시 어댑터 윗면 외주의 아래위 방향 흔들림이 최대 15  $\mu\text{m}$ 였으며, 그 위에 원판을 올려 놓았을때 원판의 외주는 60  $\mu\text{m}$ 의 상하 흔들림이 있었다. 흔들림은 원판의 모서리에 다이알게이지를 설치하여 원판을 천천히 회전시키면서 변위를 측정하였다. 회전중심은 가공중심으로부터 0.1 mm 벗어나 있었다.

회전원판은 최고 3400 rpm ( $Re_{\text{rot}}=1.47 \times 10^6$ )까지 안정된 운전이 가능하였으나 약 1400~1600 rpm 범위에서 공진(resonance)현상이 일어나 이 범위에서의 운전은 피하였고 이 범위 이상의 운전시에는 공진 범위를 신속히 통과하도록 하였다.

제트노즐은 Morel방법에 의하여 제작되었으며, 출구직경 30 mm, 수축비는 9이고 균일한 유동을 얻기 위하여 3개의 스크린과 하니콤을 넣었다. 이 결과 열선유속계로 측정된 제트출구의 난류강도는 0.55%였다. 이 노즐은 원판에 수직으로 설치된다. 노즐의 재질은 두랄루민이고 연결된 덕트는 아크릴로 제작하였다.

전체 실험장치 개략도는 Fig. 1에 나타나 있다.

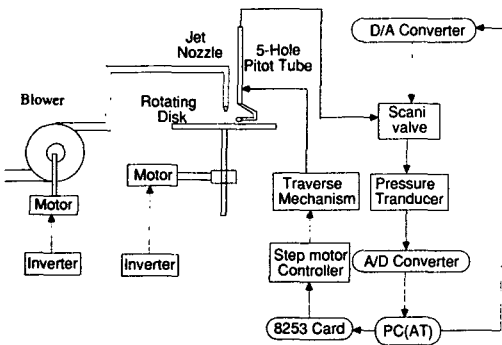


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 측정방법

본 실험에서는 원판의 반경방향(radial direction) 좌표를  $r$ , 원주방향 좌표를  $\theta$ , 원판면에 수직방향 좌표를  $z$ 로 하는 원통좌표계를 설정하였으며 좌표의 중심은 원판의 회전중심과 일치시켰다.

자유회전원판 유동과 회전원판 중앙에 분사되는 제트유동 현상은 축대칭(axisymmetry)인 점을 감안하여 측정은  $r-z$  단면에 한정시켰다.

유동장을 5공 피토티관과 3공 피토티관으로 측정할 때에는 한 지점에서 구멍의 개수만큼의 측정을 행하여야 하는데, 이 때 한 구멍에서 측정되어 압력 변환기(pressure transducer)를 통과하는 신호는 자료 처리장치 속에 얼마간 계속 남아있게 되어 다음 구멍에서 측정된 값에 영향을 미치게 된다. 그러므로 앞선 구멍에서 측정된 신호의 영향을 없애기 위해 각 구멍에서 측정되는 사이에 얼마간의 시간지연(time lag)이 필요하다. 본 실험에서는 이 경우 5초 후면 압력변환기를 거친 신호가 정상상태에 도달하므로 실험 프로그램에 7초의 시간 지연을 주었다. 한 위치에서 각각의 구멍을 통하여 얻어진 신호는 약 7초간에 걸쳐 500회 측정후의 평균값을 구하여 처리하였다.

3공 피토티관의 크기가 0.85 mm로 5공 피토티관(6 mm)에 비하여 상대적으로 작으므로 벽면 근처에서 5공 피토티관보다 정밀한 데이터 획득을 기대할 수 있다.

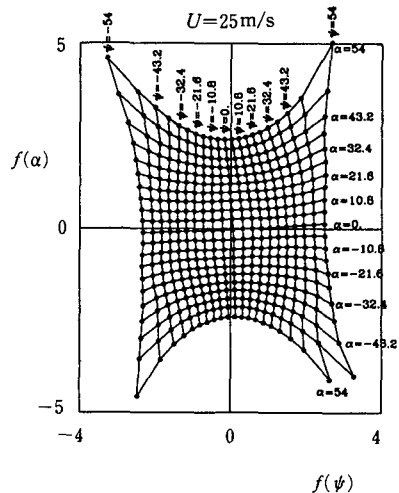


Fig. 2 5-hole pitot tube calibration chart for dynamic pressure ( $U=25 \text{ m/s}$ )

5공 피토판과 3공 피토판은 최대 이송거리 500 mm의 이송장치(X-Y table)에 부착되어 측정위치로 이송시켜 사용하였다.

5공 피토판의 보정(calibration)은 5 m/s, 15 m/s, 25 m/s의 3가지 주유동 속도에 대하여 요우각과 피치각 각각  $\pm 54^\circ$ 의 범위에서 보정을 수행하였다. 이로부터 요우각, 피치각, 동압, 정압에 대한 보정곡선을 얻었으며 이를 Fig. 2에 나타내었다. 본 실험에서는 주유동 방향으로 프로브를 어느 정도 일치시켜 측정하였으므로, 실제 보정은 요우각과 피치각에 대하여  $-25^\circ$ 에서  $+25^\circ$ 의 범위에서 이루어졌다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 유동의 가시화

정지된 원판에 충돌하는 제트유동과 회전하는 원판중심에 충돌하는 제트유동에 대하여 CO<sub>2</sub> 가스를 송풍기 출구에서 공기에 소량 주입시킴으로써 슐리렌장치(schlieren system)를 이용하여 유동가시화 실험을 수행하였다. Figs. 3, 4는  $H=37$  mm일때이며, Figs. 5, 6은  $H=8.5$  mm의 경우이다. 각각의 경우에  $Re_j=1.35 \times 10^4$ ,  $7.24 \times 10^4$  ( $u_j=6.79$  m/s,  $36.4$  m/s)과  $Re_{ro}=0$ ,  $1.96 \times 10^5$ ,  $1.03 \times 10^6$ 에 대한 가시화실험 결과를 제시하였다.

정지된 원판에 충돌하는 제트유동에서 제트의 출구속도가 다른 경우(Fig. 3(a)와 Fig. 4(a) 또는 Fig. 5(a)와 Fig. 6(a)), 벽제트의 가장 큰 에디들의 크기에는 차이가 없으나 제트속도가 큰 경우(Fig. 4(a) 또는 Fig. 6(a))에 제트속도가 작은 경우(Fig. 3(a) 또는 Fig. 5(a))보다 가장 작은 에디들의 크기가 현저하게 작아짐을 볼 수 있다. 이에 대한 개략도를 Fig. 7에 나타내었다.

Figs. 3~6에서 회전하는 원판중심에 충돌하는 제트유동에서 원판의 회전속도가 증가함(Figs. 3~6에서 (a)~(c)로 갈수록)에 따라 벽제트유동이 원심력에 의하여 안정화되며 가장 큰 에디들의 크기가 줄어드는 경향을 볼 수 있다. 이러한 경향은  $Re_j/Re_{ro}$ 의 값이 0.0703(Fig. 4(c)와 Fig. 6(c))에서 0.0131(Fig. 3(c)와 Fig. 5(c))로 갈수록 현저하게 나타난다. 이는 회전속도가 증가함에 따라 점성 펌핑효과(viscous pumping effect; 원판이 회전할 때 원판 바로 위의 유체가 원심력과 점성의 작용을 받아 반경 방향으로 펌핑되는 효과)가 크게 영향을

미치므로 벽제트의 경계층 두께가 줄어들기 때문으로 해석된다. 즉 반경방향으로 갈수록 벽제트와 원판에 의한 점성 펌핑유동의 상호작용이 강하게 일어난다고 할 수 있다. Fig. 3(c)의 경우 반경방향으로 갈수록 가장 작은 에디들의 크기가 점점 작아짐을 알 수 있는데, 이는 반경방향으로 갈수록 노즐에서 분사된 제트에 의한 속도의 크기는 줄어들지만 원판회전에 의한 속도의 증가가 지배적이 되기 때문이다. 즉  $Re_{ro}$ 가 지배적 변수가 되는 지역이 존재함을 알 수 있다. 또한 동일한 회전속도일 경우에 제트의 분사속도가 크면 가장 작은 에디들의 크기가 더 작아짐을 확인할 수 있다. Fig. 3(c)와 Fig. 5(c)의 개략도를 Fig. 8에 나타내었다.  $r=r_o/2$  지점 근처에서 벽제트유동이 급격히 수축하는 현상을 볼 수 있다. 이는  $Re_j$ 가 작을 때 유체가 원

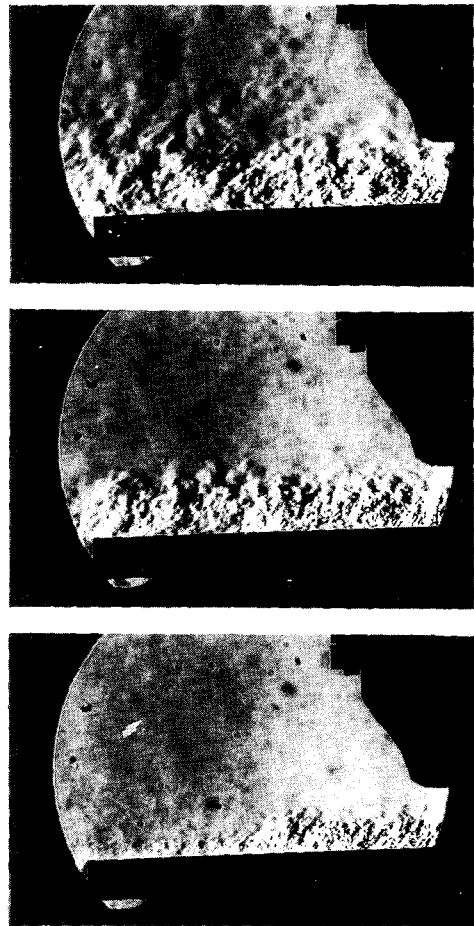


Fig. 3 Schlieren photographs for  $H=37$  mm and  $Re=1.35 \times 10^4$

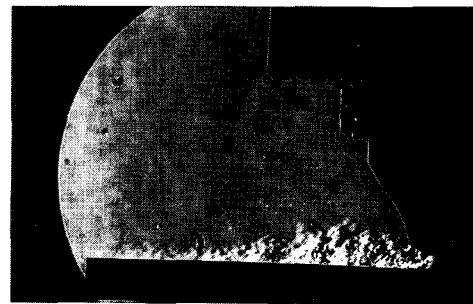
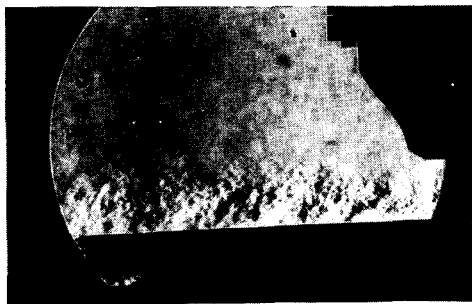
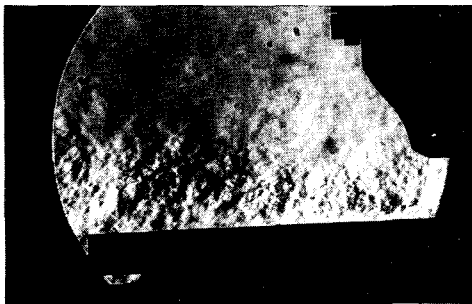
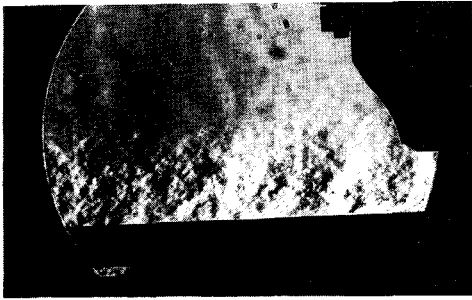


Fig. 4 Schlieren photographs for  $H=37$  mm and  $Re_0=7.24 \times 10^4$

Fig. 5 Schlieren Photographs for  $H=8.5$  mm and  $Re_0=1.35 \times 10^4$

심력을 크게 받아 안정화되기 때문이다.  $r=r_0/2$  부터  $r=3r_0/4$  지점까지 작은 에디들이 관찰되며 그 후부터  $r=r_0$ 까지는 난류유동이 안정화효과로 인하여 재층류화(relaminarization)되는 가능성이 보이나 이를 정확히 규명하기 위하여는 열선유속계를 이용한 측정이 필요하다 하겠다.

Figs. 3, 4와 Figs. 5, 6에서  $H$ 의 변화를 비교할 때 제트출구와 원판사이의 거리가 작을 경우 벽제트의 경계층 두께가 더 작아지는 것이 관찰되나  $H$  변화에 따른 영향은  $Re_0$ 와  $Re_j$ 의 변화에 따른 영향보다는 크지 않다고 할 수 있다.

### 3.2 정지된 원판에 충돌하는 제트유동

제트속도 62.1 m/s, 제트출구 높이 142 mm와

37 mm일 때 벽에 충돌하는 원형제트에 의해 생성되는 벽제트(wall jet) 유동을 5공 피토관으로 측정 한 결과 원판과 제트노즐 출구 사이의 거리는 벽제트유동에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다. Fig. 9에는 제트속도 62.1 m/s, 제트출구 높이 37 mm의 결과만을 제시하였다. 그런데,  $r=30$  mm로부터  $r=130$  mm 사이에  $+z$ 방향의 속도 성분은 벽면 근처의 속도구배가 큰 영역에서의 5공 피토관의 한계성을 보여준다 하겠다. 따라서  $r=150$  mm 이상, 수직방향 속도성분이 반경방향 속도성분이나 원주방향 속도성분에 비하여 작은 영역에 한하여, 3공 피토관(두께 0.85 mm)으로 실험을 수행하였다. 이때  $V_{r,max}$ 의 존재를 확인할 수 있었으며 이로부터 반경방향 속도분포중 벽면으로부터 최대속

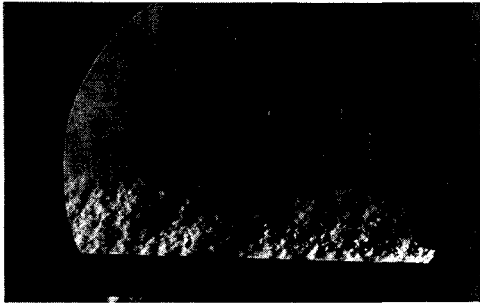
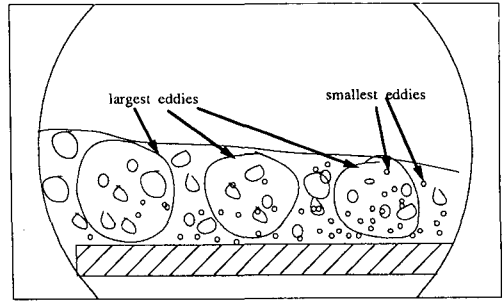


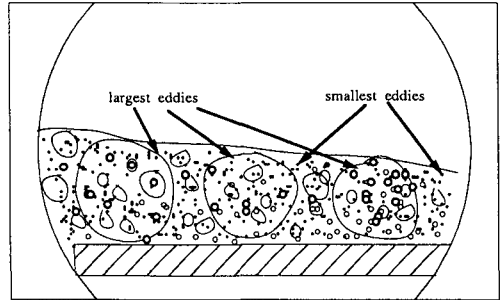
Fig. 6 Schlieren photographs for  $H=8.5$  mm and  $Re_j=7.24 \times 10^4$

도의 1/2되는 지점까지의 거리  $b$ 를 특성길이로 무차원화한 후 열선으로 측정된 Poreh<sup>(13)</sup>의 실험결과와 비교하여 Fig. 10에 나타냈다. Poreh의 실험결과와 비교할 때, 제트 경계층 내에서의 약간의 차이는 열선유속계와 3공 피토관의 측정기법의 차이에 기인하는 오차와 3공 피토관의 유효길이 (effective length)의 영향이 그 원인이 될 수 있다. Fig. 11에는  $r$ 과 반경방향의 최대속도가 반이 되는 위치,  $b$ 와의 관계를 보였다. Poreh의 실험결과인 기울기 0.087를 고려할 때 상대 오차가 0.9% 정도로 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

3.3 회전하는 원판중심에 충돌하는 제트유동  
먼저 기초적인 모델로서 von Karman에 의하여



(a)



(b)

Fig. 7 Schematic diagrams of photographs: (a) Fig. 3(a), (b) Fig. 4(a)

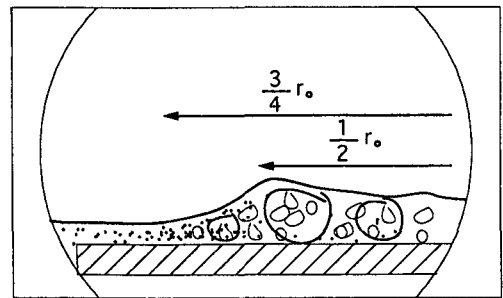


Fig. 8 Schematic diagrams of photographs Fig. 3(c) and Fig. 5(c)

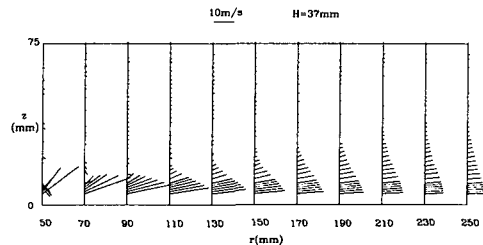


Fig. 9 Velocity distribution measured by 5-hole pitot tube on  $r$ - $z$  cross section for  $Re_{r_0}=0$ ,  $Re_j=1.23 \times 10^5$  and  $H=37$  mm

상사해가 알려진 자유회전원판 위의 유동을 3공 피토포관으로 측정하였다.

$\frac{r^2\omega}{\nu}$ 로 정의되는 회전레이놀즈 수  $Re_r = 1.46 \times 10^5$  ( $r=150$  mm,  $\omega=914$  rpm),  $2.55 \times 10^5$  ( $r=200$  mm,  $\omega=920$  rpm),  $3.30 \times 10^5$  ( $r=150$  mm,  $\omega=2115$  rpm),  $4.60 \times 10^5$  ( $r=150$  mm,  $\omega=2947$  rpm),  $5.90 \times 10^5$  ( $r=200$  mm,  $\omega=2126$  rpm)의 경우, 자유회전원판 위의 유동에 대한 실험결과를 무한원판 위의, 층류유동에서 얻어지는 상사해<sup>(2)</sup>와 비교하여 나타내었다. (Fig. 12)  $Re_r = 1.46 \times 10^5$ ,  $2.55 \times 10^5$ 는 층류영역,  $Re_r = 3.30 \times 10^5$ 의 데이터는 천이영역으로 판단되며,  $Re_r = 4.60 \times 10^5$ 과  $Re_r = 5.90 \times 10^5$ 의 실험데이터가 서로 일치함을 확인할 수 있는데, 이는 유동이 천이과정을 거쳐 완전히 난류로 되었음을 의미한다.<sup>(10)</sup> 또한 난류에서의 점성확산거리(viscous diffusion length)는 층류에서의 그것보다 증가한 것을 확인할 수 있다. 층류에서 실험데이터와 상사해가 어느 정도 차이를 보이는 원인은 다음을 들 수 있다. 첫째, 상사해는 무한원판에서 얻어진 해이며 실험은 유한원판에서 수행하였으므로, 유한원판의 경우 원판밖의 정지된 유체의 영향을 받을 수 있다. 둘째, 3공 피토포관을 가능한 한 벽 가까이 붙여 실험하였는데, 벽면근처의 속도구배가 큰 지역에서의 벽으로부터의 유효거리(effective length)를 어디로 정할 것인지가 또 하나의 문제이다. 셋째, 유속과 length scale이 작으므로 이에 따른 측정상의 오차가 수반되었을 것이다.

회전하는 원판중심에 충돌하는 원형제트에 의하여 생성되는 벽제트유동을 5공 피토포관으로 측정하였으나 전체적인 경향은 정지된 원판에 충돌하는 제트유동과 유사하였다. 벽 근처에서는 5공 피토포관의 크기로 인하여 유동장을 측정할 수는 없었으나

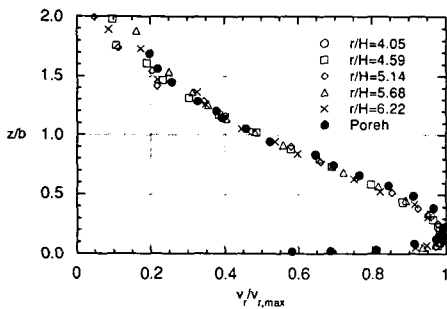


Fig. 10 Dimensionless velocity distribution of wall jet induced by circular impinging jet

그 외부의 유동장은 회전 각속도나 원판으로부터의 제트 출구 높이에 별다른 영향을 받지 않는 것으로 여겨진다. 대부분의 유동변화가 벽근처 얇은 층내에서 일어날 것으로 예상하여 3공 피토포관으로 벽면 가까이까지 유동측정을 수행하였고 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 이 그림은 벽제트가 반경 방향으로 퍼져 나갈 때, 벽면근처의 속도변화를 잘 보여주고 있다. 벽면근처에서  $r$ 이 증가함에 따라 원주방향속도의 영향이 뚜렷하게 나타난다. 또한 제트

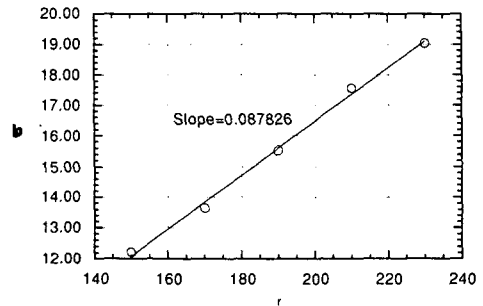


Fig. 11 Length scale for b vs. r

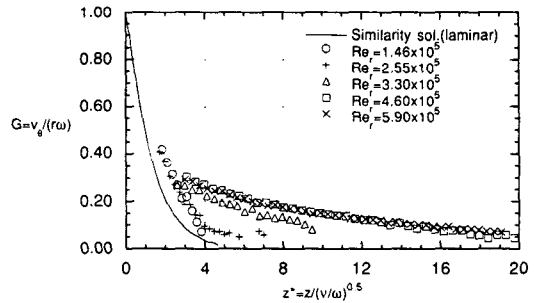


Fig. 12 Non-dimensional tangential velocity profile over a free rotating disk flow

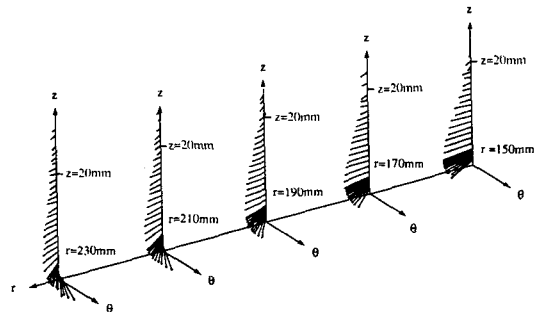


Fig. 13 View of wall jet flow measured by 3-hole pitot tube for  $Re_{r0} = 9.2 \times 10^5$ ,  $Re_j = 6.08 \times 10^4$  and  $H = 37$  mm

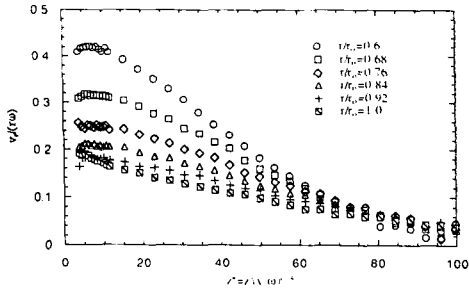


Fig. 14 Nondimensionalized radial velocity for  $Re_{r0} = 9.2 \times 10^5$ ,  $Re_j = 6.08 \times 10^4$  and  $H = 37$  mm

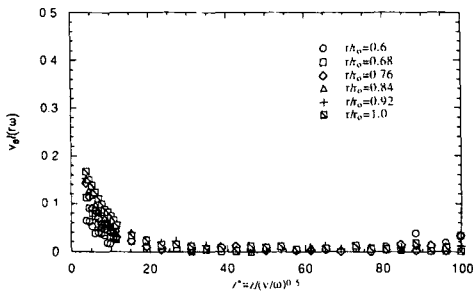


Fig. 15 Nondimensionalized circumferential velocity for  $Re_{r0} = 9.2 \times 10^5$ ,  $Re_j = 6.08 \times 10^4$  and  $H = 37$  mm

출구속도,  $u_j$ 에 대한 원주방향 속도의 비가 증가함에 따라 속도분포의 모습이 달라지며 뚜렷하게 존재하던  $V_{r,max}$ 이 불명확해짐을 알 수 있다. 이 원인은 점성에 의하여 펴뭉되는 유동과 제트에 의한 유동의 상호작용일 가능성과 유동 자체의 3차원적 효과일 가능성이 있다. Fig. 13에서의 속도분포를 무차원화하여, 반경방향 속도분포와 원주방향 속도분포를 각각 Fig. 14와 Fig. 15에 도시하였다. 유동 가시화실험 중에서 Fig. 4(c)의 경우에 가장 가까우며, 슬리렌사진에서  $r$ 이 증가함에 따라 가장 작은 에디들의 크기가 점점 작아지는 것은 벽근처에서 원판회전에 의한 원주방향 속도가 지배적이 되는데 기인한다고 설명할 수 있다.

#### 4. 결 론

(1) 유동의 가시화를 통하여 원판의 회전속도가 증가함에 따라 벽제트유동이 안정화 되며 가장 큰 에디들의 크기가 줄어드는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 경향은  $Re_j/Re_{r0}$ 의 값이 작을 수록 현저하

게 나타났다.  $H$ 값에 따른 유동장의 변화는  $Re_j$ 와  $Re_{r0}$ 의 변화에 따른 영향보다 민감하지 않았다.

(2) 회전하는 원판중심에 충돌하는 제트유동에서 회전에 의한 점성의 영향은 벽면 가까운 지역에 국한되며 이로부터 유동장의 평균속도의 변화는 벽근처에 밀집되었다.

(3) 제트출구속도에 대한 원주방향속도의 비가 증가함에 따라  $V_{r,max}$ 의 분포가 달라지는 경향은 벽제트와 점성에 의하여 펴뭉되는 유동과의 상호작용 가능성이 있음을 시사한다.

#### 후 기

본 연구는 티보동력기계연구센터의 지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다. 또한 실험장치 제작에 도움을 주신 대우중공업(주) 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Owen, J. M., 1992, "Flow and Heat Transfer in Rotating-Disc Systems," *ICHMT International Symposium in Heat Transfer in Turbomachinery*, Athens, Greece.
- Schlichting, H., 1979, *Boundary Layer Theory*, 7th Ed., McGraw-Hill, pp. 102~107.
- Ong, C. L. and Owen, J. M., 1991, "Computation of the Flow and Heat Transfer Due to a Rotating Disc," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 12, pp. 106~115.
- Owen, J. M., Wilson, M. and Kilic, M., 1992, "Computation of Flow in Rotating Disc Systems," *Proceedings of the International Symposium in Heat Transfer in Turbomachinery*, Athens, Greece.
- Morse, A. P., 1991, "Assessment of Laminar-Turbulent Transition in Closed Disc Geometries," *J. Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 131~138.
- Staub, F. W., 1992, "Rotor Cavity Flow and Heat Transfer with Inlet Swirl and Radial Outflows of Cooling Air," *37th ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, Cologne, 92-GT-378.
- Bhavani, S. H., Khodadadi, J. M., Goodling, J.



- S. and Wagott, J., 1992, "An Experimental Study of Fluid Flow in Disk Cavities," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 114, pp. 545~561.
- (8) Metzger, D. E., Mathis, W. J. and Grochowsky, L. D., 1979, "Jet Cooling at the Rim of a Rotating Disk," *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 101, pp. 68~72.
- (9) Metzger, D. E. and Grochowsky, L. D., 1977, "Heat Transfer Between an Impinging Jet and a Rotating Disk," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 99, pp. 663~667.
- (10) Popiel, C. O. and Boguslawski, L., 1986, "Local Heat Transfer From a Rotating Disk in an Impinging Round Jet," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 108, pp. 357~364.
- (11) Popiel, C. O., Boguslawski, L. and Taliszka, E., 1974, "Heat Transfer from a Rotating Disk in an Impinging Round Air Jet," *Proceedings of the 5th International Heat Transfer Conference*, Tokyo, Vol. 3, pp. 212~216.
- (12) Qureshi, G., Nguyen, M. H., Saad, N. R. and Tadros, R. N., 1989, "Heat Transfer Measurements for Rotating Turbine Discs," *ASME Paper* 89-GT-236.
- (13) Poreh, M., Tsuei, Y. G. and Cermak, J. E., 1967, "Investigation of a Turbulent Radial Wall Jet," *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 89, pp. 457~463.