

가스 터빈 축 내부의 비정상 유동의 불안정성

허남건* · 원찬식**

Transient Flow Instability inside a Gas Turbine Shaft

Nahm-Keon Hur*, Chan-Shik Won**

Key Words: Gas Turbine Shaft(가스 터빈 축), Transient Flow(비정상 유동), Flow Instability(유동 불안정성), Taylor Vortex(테일러 와류), Equivalent Taylor Number(등가 테일러 수)

ABSTRACT

Transient flow inside a hollow shaft of a Gas Turbine engine during sudden engine stop may result in non uniform heat transfer coefficients in the shaft due to flow instability similar to steady Taylor vortex, which may decrease the lifetime of the shaft. In the present study, transient Taylor vortex phenomena inside a suddenly stopped hollow shaft are studied analytically. Flow visualization is also performed to study the shape and onset time of Taylor Vortices for various initial rotational speed.

1. 서 론

가스 터빈 엔진의 축은 보통 축이 비어있는 중공 축(Hollow Shaft)이며, 이 축을 통해 자려 유동(Self-Induced Flow) 작용^(1,2,3)에 기인하여 높은 온도의 공기를 순환시킴으로써 고공에서 엔진의 입구 부분에 결빙 되는 현상을 방지하고 있다. 가스 터빈 축 내의 자려 유동은 S. Gilham^(1,2,3) 등의 연구를 통하여 잘 알려져 있다. 그러나 이러한 연구는 정상 유동이 축에 미치는 영향에 대해서는 잘 규명하고 있으나 가스 터빈이 순간 정지할 때 일어나는 비정상 유동에 대한 연구는 미진하다. 즉 비정상 유동의 불안정에 의한 와류의 발생으로 축내의 속도가 불균일하게 되고 따라서 열전달 계수가 불균일하게 될 것이다. 물론 급작스런 가속 또는 감속시 극관성 모멘트(polar moment of inertia)가 축 균열(Shaft Crack) 등에 큰 영향을 미치겠지만 열전달 계수의 불균일함도 영향을 미칠 것이라 생각된다. 그

러므로 비정상 유동의 불안정성에 대한 연구가 필요하다.

가스 터빈 축 내부의 비정상 유동은 회전 원통이 순간 정지할 때 발생하는 단순한 유동 현상이며, 이는 내부 원통이 회전하는 환형 공간사이의 Couette 유동 현상과 아주 유사하다. 즉 외부 원통이 정지해 있고 내부 원통이 회전할 때에 낮은 속도에서는 두 원통 사이에서 정상 상태의 층류 유동을 볼 수 있지만 속도가 증가함에 따라, 어떤 임계속도를 지나서는 원통의 축 방향으로 나선 모양의 Taylor 와류가 형성된다. 이러한 Taylor 불안정성은 유동이 불안정하기 때문에 생성되며, 그 형상은 둥근 고리 형태의 3차원 유동이다. 불안정성이 발생하는 임계속도는 Taylor 수를 통해 알 수 있으며, 이 값이 1700정도일 때 결정된다.

Taylor 불안정성에 의하여 일어나는 Taylor 와류 현상은 내부 원통이 없고 외부 원통만 존재하여, 외부 원통이 회전하다가 순간 정지하는 경우에도 나타날 수 있다. 이런 경우 강체 회전(Solid Body Rotation)을 하던 유동이 벽면의 점성효과 영향으로 강체 회전 영역과 벽면의 강한 전단류의 영향을 받는 영역으로 양분된다. 즉 강체 회전을 하는 유체 자체가 내부 원

* 서강대학교 기계공학과

** 서강대학교 기계공학과 대학원

통의 역할을 한다고 할 수 있다. 하지만 두 원통 사이의 유동에서는 내부 원통의 속도를 계속해서 일정하게 유지시킬 수 있어서 와류의 형상을 지속적으로 관찰할 수 있겠지만 본 논문의 경우에는 속도가 점점 감소하게 되므로 일정한 시간이 지나서는 와류의 형상이 사라질 것이다. 그리고 층류 유동이 불안정성에 의해 붕괴되어 3차원 난류 유동으로 발달되어 가는 것을 관찰할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 이러한 현상에 대해 이론적 규명을 하고 유동 가시화를 통해 여러 가지 변수에 따른 와류의 형성을 알아보고자 한다.

2. 유동 불안정성 해석

회전 환형 원통 내부의 유동 불안정성에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으며, 다음 식과 같이 표시되는 Taylor 수가 1700부근에서 불안정하게 된다는 것을 잘 알려져 있다.

$$Ta = \frac{r_i(r_o - r_i)^3 \Omega_i^2}{\nu^2} \quad (1)$$

여기서 r_i 와 r_o 는 각각 내부 및 외부 원통의 반지름을 나타내며, Ω_i 는 내부 원통의 회전속도, 그리고 ν 는 동점성계수를 나타낸다.

내부 원통이 없이 외부 원통만 회전하다 정지한 경우에는, 처음엔 모든 영역이 강제 회전영역이 되며 차차 벽면의 점성효과가 점점 원통 중심으로 전파되어, 중심의 영역에서는 강제 회전이 지속되고 벽면에서는 강한 전단류가 발생한다. 이러한 현상은 일반적인 Taylor 유동 불안정성이 발생하는 회전 환형공간에서 내부 원통의 반지름이 시간에 따라 점점 작아지는 것으로 취급되어질 수 있으며 이에 따라 얻어지는 Taylor 수가 임계값을 넘게 되면 유동 불안정성이 나타난다고 생각할 수 있다.

원통 좌표계로 나타낸 운동량 방정식(Navier-Stokes Equation)에서 축방향 운동(axial motion)이나 끝 부분 영향(end effect)이 없기 때문에

$$v_z = \frac{\partial}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

이라 할 수 있으며 원통내의 유체는 회전 대칭이므로 (circular symmetry) 유체 유동은 순수하게 원주 운동만 하게 된다. 따라서

$$v_\theta = v_\theta(r, t) \quad (3)$$

가 된다.

그러므로 θ 성분에 대한 운동량방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} = \frac{\nu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right) - \frac{\nu}{r^2} v_\theta \quad (4)$$

또한 경계 조건과 초기 조건은 다음과 같이 된다.

경계 조건 ;

$$v_\theta(r_o, t) = 0, \quad r = r_o \quad (5)$$

$$v_\theta(0, t) = 0, \quad r = 0 \quad (6)$$

초기 조건 ;

$$v_\theta(r, 0) = \Omega_i r, \quad t = 0 \quad (7)$$

위 경계 조건과 초기 조건을 이용하여 식 (4)를 변수 분리하면 Bessel 함수로서 다음과 같이 점선 방향 속도를 구할 수 있다.

$$v_\theta = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2r_o \Omega_i}{\alpha_n J_2(\alpha_n)} J_1(\lambda_n r) e^{-\nu \lambda_n^2 t} \quad (8)$$

여기서

r_o : 외부 원통 반경

r : 반경 방향 좌표

Ω_i : 초기 회전 각속도

$J_n()$: nth Order Bessel Function

α_n : 1st Order Zero Point

λ_n : Root of $J_1(\lambda_n, r_o)$

ν : 동점성 계수

t : Time

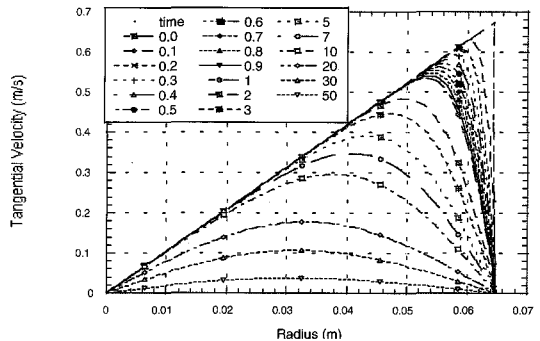


Fig. 1 Timewise variation of tangential velocity inside a suddenly stopped cylinder

위 식 (8)을 이용하여 시간의 변화와 반경의 변화에 따른 접선 방향 속도를 구하여 Fig. 1에 나타내었다. 100 rpm(10.472 R/s)을 사용했고 그림으로부터 접선 방향 속도는 원통 면에서의 점성효과에 의해 시간에 따라 작아져서 결국 정지됨을 알 수 있다.

앞에서 설명한 것과 같이 Fig. 1을 통해 강체 회전하는 영역의 반지름을 구해 Taylor 수를 결정할 수 있다.

그러나 강체 회전하는 영역의 경계가 명확하지 않고, 또한 유동의 불안정성도 벽면의 강한 전단류에 의해 발생하므로 벽면에서의 유동 속도구배를 Fig. 1로부터 구하여 다음과 같이 가상적인 내부 원통의 반경을 구하였다.

$$a = \frac{dv_{\theta}}{dr} = \frac{0 - \Omega_i r_i}{r_0 - r_i} \quad (9)$$

a 는 구배로서 Fig. 1의 속도 그래프를 통하여 구할 수 있다. 식 (9)에서 r_i 를 식 (1)의 Taylor 수에 넣어 정리하면 다음과 같은 등가 테일러 수, Ta_{eq} 를 얻을 수 있다.

$$Ta_{eq} = -\frac{\Omega_i^2 r_i^4}{\nu^2} \frac{a}{\Omega_i - a} \left(\frac{1}{\Omega_i - a} \right)^3 \quad (10)$$

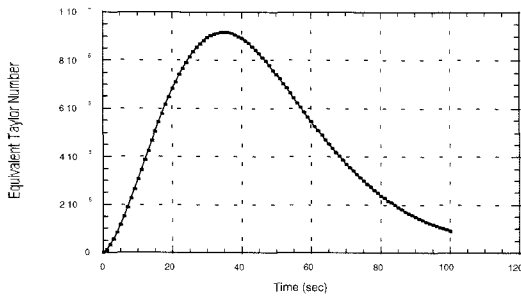


Fig. 2 Timewise variation of equivalent Taylor number

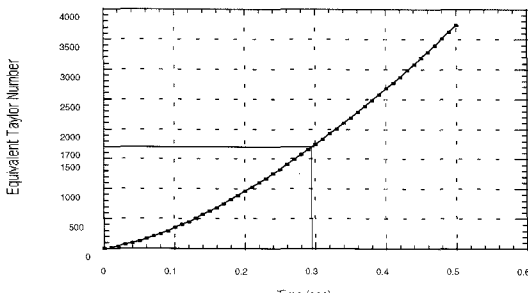


Fig. 3 Variation of equivalent Taylor number around critical value of 1700

여기서,

- r_i : 내부 원통의 반경 반경
- r_o : 외부 원통의
- Ω_i : 회전 각속도
- ν : 동점성 계수

이며, 위 식을 이용하여 Taylor 수와 시간과의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 그리고 임계시간을 구하기 위하여 임계점 부분을 따로 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 임계시간은 0.2~0.3초 사이에 나타나는데 이는 실험 결과와 잘 일치한다.

3. 유동 가시화

전체 유동 가시화 실험 장치는 1300 mm, 세로 310 mm, 높이 450 mm의 크기로 제작하였다. 그 자체가 회전하는데 외경 140 mm, 내경 130 mm, 길이 1000 mm인 아크릴을 사용하였다. 한쪽 면은 개방되어 있으며 다른 한쪽은 아크릴 원판에 의해 닫혀 있다. 회전 동력은 브레이크가 장착된 DC 모터를 이용하였다.

전체적인 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 외류의 형상을 가시화하기 위하여, Laser(TSI사 Innova TM 70 Series Ar-ion Laser)를 이용해 평행한(collimated) 빛을 만들고, 그 빛을 원통의 축 방향으로 비추어 주어 원통의 길이 방향에 대하여 2차원 평면을 만들어 주었다. Laser 광원을

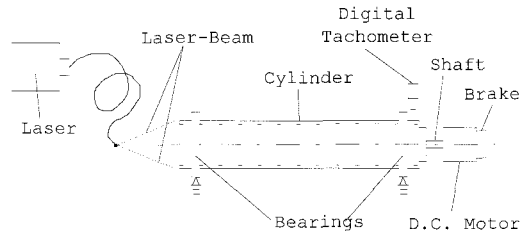


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

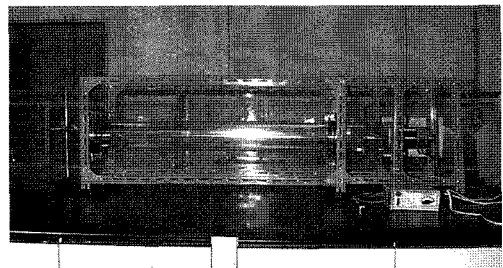


Fig. 5 Experimental setup

만들어 주기 위하여 3W의 전력을 공급하였으며, 사용된 광원은 녹색광원으로 파장은 514.5 nm이다. 2차원 평면에 형성된 와류를 촬영하기 위해서 Digital Camera (Kodak사 DC 50)를 이용하였으며, 원통의 회전 속도를 측정하기 위해서 Digital Tachometer (Prova사 RM-100)를 이용하였다.

실험은 일정한 각속도로 원통을 회전시켜 원통내 유동이 강제 회전을 하게 될 때까지 회전을 지속한다. 본 연구에서는 담배 연기를 유동 가시화 입자로 사용하였으며, 회전하고 있는 원통 내부에 넣어 주었다. 원통의 한쪽 끝 부분은 열려져 있기 때문에 회전하는 동안, 가시화하기 충분한 정도의 연기를 열려진 부분으로 계속해서 공급해 주었다. 유동이 강제 회전을 하게 되면 브레이크를 작동시켜 원통을 순간적으로 정지시키고, 이 때 나타나는 현상을 확인하며 카메라를 이용하여 촬영하였다. 그리고 이러한 실험을 각속도를 변화시켜가며 수행하였다.

4. 결과 및 토의

유동을 강제 회전이 될 때까지 충분히 회전시켜 준 다음 순간적으로 원통을 정지시켰을 때, 유동은 불안정성에 의해서 Fig. 6에서와 같이 2차 유동인 와류가 축방향을 따라서 회전하는 원통 반지름 방향 끝 부분에 생성된다. 입자에 의해 가시화 된 모습을 보면 와류는 고리 모양으로 서로 반대 방향으로 회전하는 와류가 한 쌍을 이루며 형성된다. 생성되는 와류의 크기, 개수는 Figs. 7~10에서 볼 수 있듯이 회전하는 원통의 속도에 따라 달라짐을 살펴 볼 수 있다. 즉 원통의 초기 회전 속도가 빠르면 빠를수록 임계 Taylor 수가 나타나는 시간이 짧아지고, 임계 Taylor 수에 도달했을 때 점성의 영향을 받는 부분이 좁아지게 되므로 작은 여러 개의 와류가 형성됨을 볼 수 있다. 와류의 크기와 개수는 Table 1과 Figs. 11~12에 나타내었다. 그림으로부터 회전 속도가 증가할수록 와류의 개수가 선형적으로 증가하며 와류의 크기도 감소함을 볼 수 있다. 와류의 생성시간은 회전하는 유동의 속도가 낮을수록 더 오래 걸린다. 즉 원통을 세운 후 얼마간의 시간이 지나야 와류가 생성됨을 볼 수 있다. 실험을 통해 약 40 rpm에서는 2~3초 정도 지나서 와류가 생성됨을 볼 수 있었고 약 100 rpm 정도에서는 0.1~0.5초, 150 rpm 이상에서는 거의 정지되는 순간에 와류가 생성되었다. 그리고 그 와류가 지속되는 정도도 역시 빠른 회전 속도보다 낮은 회전 속도에서 더 오랜 지속시간을 가짐을 볼 수 있다.

와류가 축 방향을 따라서 일정 부분에 약간의 와류가 생성될 때 그 양옆에서는 와류가 소멸되었다가 다시 생성되는 것을 볼 수 있다. 그것은 원통 한쪽은 막혀 있고 다른 한쪽은 열려 있어서 와류가 나선회전을 하

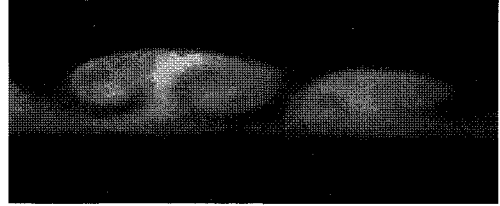


Fig. 6 Typical Taylor vortex shape

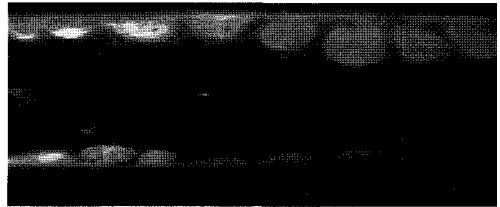


Fig. 7 Taylor vortex occurring at inner surface of suddenly stopped hollow cylinder ($\Omega_i=38$ rpm)

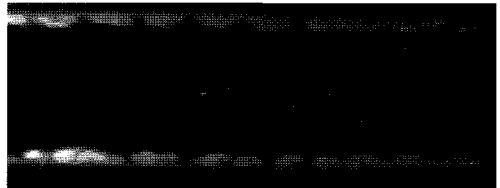


Fig. 8 Taylor vortex occurring at inner surface of suddenly stopped hollow cylinder ($\Omega_i=80$ rpm)

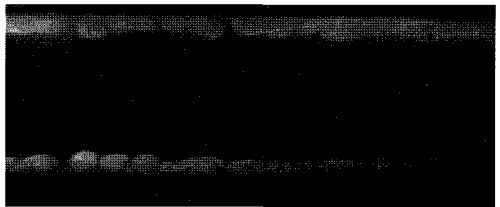


Fig. 9 Taylor vortex occurring at inner surface of suddenly stopped hollow cylinder ($\Omega_i=103$ rpm)

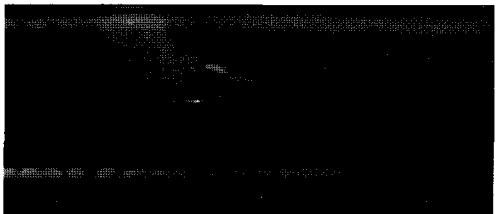


Fig. 10 Taylor vortex occurring at inner surface of suddenly stopped hollow cylinder ($\Omega_i=180$ rpm)

며 열려진 방향으로 운동하기 때문이다.

본 연구에서는 실험 장치는 축방향으로 한쪽 끝 부분은 열려 있고 다른 한쪽 끝 부분은 막혀 있는 원통을 사용하였다. 한쪽 끝 부분을 열어 놓은 이유는 우선 입자의 연속

Table 1 Comparison size and number of Taylor vortex with initial rotational speed

원통 회전 속도(rpm)	Cell 의 개수(개/m)	Cell의 크기(mm)
38	59.7	24.4
80	87.5	15.1
103	112.2	14.4
180	159.1	10.4

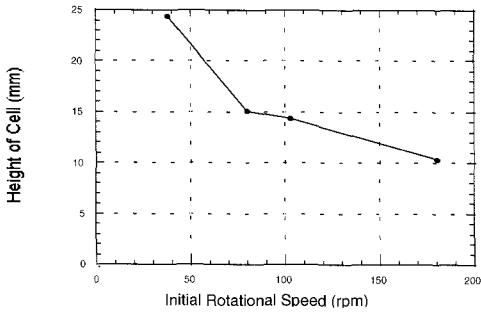


Fig. 11 Size of Taylor vortex for various initial rotational speed

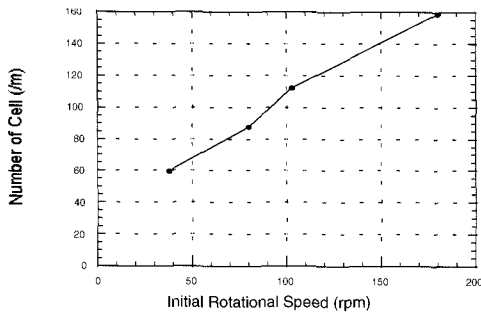


Fig. 12 Number of Taylor vortex for various initial rotational speed

적인 공급을 위함이었고 원통이 길기 때문에 와류가 생성되는 자체는 충분히 관찰 할 수 있기 때문이다. 하지만 끝부분이 열려 있기 때문에 유동은 축방향을 따라 계속 움직이는 상태이고 따라서 생성된 와류도 이에 영향을 받는다. 유동이 축방향을 따라 움직이는 현상을 자려 유동이라고 하는데⁽¹⁾ 한쪽이 열려 있고 다른 한쪽이 닫혀 있을 경우 유체는 열려진 쪽에서 원통의 중심축을 따라 유입되어 딱혀진 한쪽 단면에서 반경 방향으로 진행하여 회전 원통을 따라 밖으로 나가는 것을 말한다. 원래 와류는 원통의 반지름 방향 끝 부분에서 축에 수직되게 형성되는데 자려 유동의 영향으로 열려진 방향으로 기울어지는 형상을 갖는다. 자려 유동은 회전 속도가 빠를수록 유체가 유입되는 속도와 나가는 속도가 빨라지게 된다. 따라서 생성된 와류는 회전 속도가 빠를수록 밀려나가는 정도가 커져서 관찰하기

가 쉽지 않다. 그림으로 주어진 와류의 형상도 자려 유동의 영향이 작은 낮은 회전 속도에서 촬영한 것이다.

열려진 원통 끝 부분에서는 와류의 형상을 관찰하기가 힘들었다. 열려진 곳에서는 외부 유동의 영향을 쉽게 받을 뿐만 아니라 원통내에서 나가는 유동 역시 정지 순간 유동 방향의 다양한 변화에 따라 영향을 주기 때문이다.

5. 결론

순간 정지하는 가스 터빈 축의 내부에는 유동의 불안정성으로 인해 형성되는 Taylor 와류에 의해 열전달 계수가 위치에 따라 달라져서, 균열이 발생할 가능성이 있다. 본 논문에서는 회전하는 원통을 순간적으로 정지시켰을 때 원통내 유동의 불안정성에 의해서 나타나는 와류의 생성을 등가 Taylor 수를 규정하여 이론적으로 규명하였으며, 유동 가시화를 통해 Taylor 와류의 형성을 확인하였다. 원통의 회전속도가 빠를수록 원통이 정지하였을 때 와류의 생성 시간이나 소멸 시간 그리고 소멸된 후 유동의 천이 상태에서 원통내의 유동의 불안정성은 커짐을 알 수 있었다. 또한 회전 속도가 클수록 생성되는 와류의 개수가 많아지고 그 크기가 작아짐을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 터보동력기계연구센터의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Gilham, S., Ivey, P.C., Owen, J.M., and Pincombe, J.R., 1991, "Self-Induced Flow In a Rotating Tube," J. Fluid Mech., Vol. 230, pp. 505~521.
- (2) Gilham, S., Ivey, P.C., and Owen, J.M., 1991, "Self-Induced Flow In a stepped Rotating Tube," ASME Int. Gas Turbine Conf., Orlando, Paper 91-GT-276.
- (3) Gilham, S., Ivey, P.C., and Owen, J.M., 1992 "The Transfer of Heat by Self-Induced Flow In a Rotating Tube," ASME, Paper 92-GT-305.
- (4) 이기석 외 5명, 1996, "주기적으로 회전시키는 원통 내부 유체유동의 수치 실험", 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 451~456.
- (5) 이상준, 박용준, 1991, "동심원통사이의 Taylor 와류의 불안정성에 관한 연구", 대한기계학회논문집 제15권 제4호, pp. 1324~1332.