

<論 文>

저어널 베어링에서의 마찰감소현상에 대한 실험적 연구

이 득 우* · 김 경 웅**

(1985년 12월 4일 접수)

An Experimental Study on Friction Reduction in Journal Bearings

Deug Woo Lee and Kyung Woong Kim

Key Words: Friction Reduction(마찰감소), Polymer Solution(고분자 용액), Flow Pattern Visualization(흐름의 가시화), Intensity of Vortices(와류강도), Base Oil(윤활유 기유)

Abstract

The friction reduction by dilute polymer solutions was investigated experimentally in journal bearings. Flow pattern visualization and torque measurements were performed for a concentric case ($\epsilon=0$). The effects of polymer concentration, bearing clearance, and polymer molecular weight on friction reduction were examined.*

The frictional torque and the intensity of vortices of the case of polymer solution were reduced compared with those of base oil only.

기 호 설 명

- C : 평균간극
- $C_f = 2\tau_w / \rho U^2 = G / \pi \rho U^2 R^2 L$: 마찰계수
- G : 마찰토크
- L : 저어널 폭
- R : 베어링반경
- $Re = UC / \nu$: Reynolds 수
- $Ta = Re \cdot \sqrt{C/R}$: Taylor 수
- U : 축의 원주속도
- ν : 동 점성계수
- ρ : 밀 도
- τ_w : 전단응력
- ϵ : 편심률

1. 서 론

저어널베어링은 대부분의 회전기계에 있어서 주요한

부분을 차지하고 있으며 점성 전단력이 지배적으로 작용하는 층류영역에서는 19세기 Reynolds에 의해 유도된 윤활이론으로 그 성능을 잘 예측할 수 있다. 그러나 근래들어 사용 기계의 대형화 및 고속화가 이루어지고, 저점도 윤활유·물 혹은 액체금속과 같은 낮은 점도의 윤활제가 많이 사용됨에 따라 베어링내의 흐름은 층류상태에서 난류상태로 변화하는 경우가 많아졌으며, 그러한 경우에는 고전적인 윤활이론을 적절한 수정없이 적용할 수 없다. 또한, 이같이 흐름이 난류가 되면 층류상태를 가정하여 계산된 이론치보다 마찰손실이 커지고 윤활유의 공급량이 적어지는 등 베어링성능에 나쁜 영향을 미치게 된다.

한편 미량의 고분자를 관내의 난류흐름에 투입하면 예외적으로 마찰손실이 크게 감소하게 되는 현상을 1949년 B.A. Toms가 발표하였다. 이같은 현상을 Toms 효과라 부르며 마찰손실을 줄이는 면에서 실질적인 산업적 이용가치가 높아 다방면에서 연구가 수행되었다^(1,2). 이 Toms 효과는 관의 직경이 작을수록 효과가 크게 나타나는데 좁은 간극인 저어널베어링내의 흐

* 한국과학기술원 생산공학과

** 정회원, 한국과학기술원 생산공학과

름에서도 잘 일어날 것을 예측할 수 있다.

저어널베어링에서의 Toms 효과에 대한 연구는 L.G. Hampson 과 H. Naylor⁽³⁾ 및 H. Fukayama 등⁽⁴⁾에 의해 물을 시험유체로 사용하여 수행되었으며, 좁은 베어링 간극에서도 관내의 흐름과 유사하게 Toms 효과가 관찰되는 것이 밝혀졌다. 그러나 실제 사용되는 베어링과 같은 아주 좁은 간극에 대해 윤활제로서 윤활유를 사용하여 Toms 효과에 관한 실험을 행한 예는 지금까지 고분자의 선정문제·마찰토크의 급격한 증대 등의 이유로 현재까지는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 첨가할 고분자로서 윤활유에 일반적으로 점도지수 향상제로 사용되는 PIB(polyisobutylene)을 사용하여, 되도록 실제 베어링에 가까운 조건에서 Toms 효과에 대해 알아 본다.

2. 실험장치 및 방법

Figs. 1, 2 는 실험장치의 개략도이다⁽⁵⁾. Fig. 1의 중앙에 위치한 축은 중심부에 저어널부분을 가지고 있고 양 끝에서 보울베어링에 의해 지지된다. 동력은 가변속 모터에서 V-벨트를 통하여 전달된다. 저어널부분의 직경은 172.825 mm 길이는 174 mm 이며, 재질은 탄

소강(S45C)이다. 시험베어링은 내경 173.6 mm(간극비 4.46/1000)와 내경 173.32 mm(간극비 2.86/1000)인 두 종류이며 가시화를 행하기 위해 아크릴로 제작하였다. 급유는 압력(0.07 atm)과 유량(5.5 l/min)을 각각 일정하게 하여 베어링의 중앙상부에서 하였으며, 급유온도는 30°C(±3°C)이다. 윤활제는 Paraffine계 베이스 오일(base oil)이고, 여기에 첨가되는 고분자는

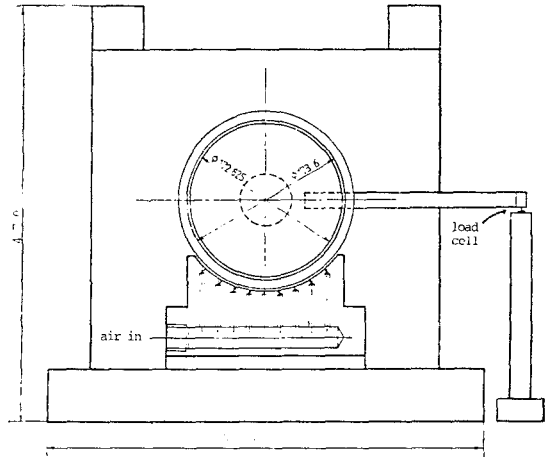


Fig. 2 Side view of the test bearing region

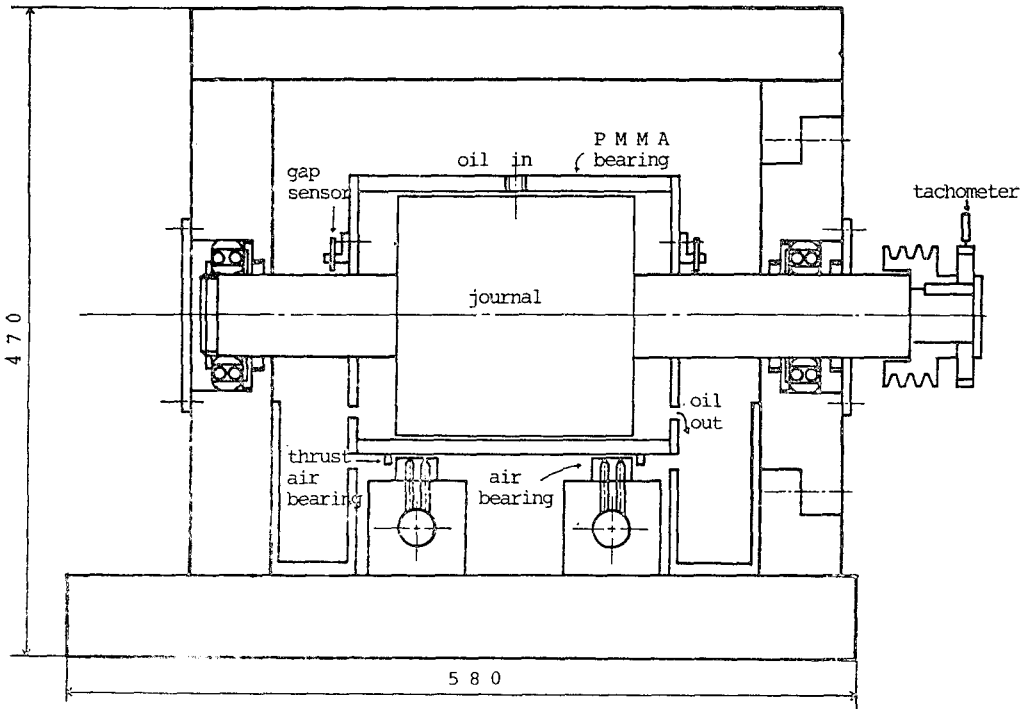
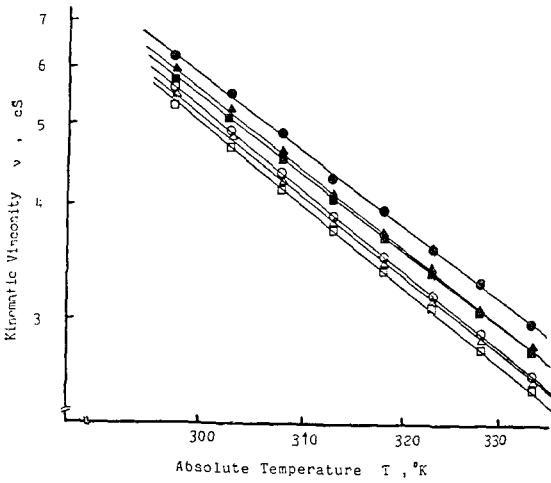


Fig. 1 Front view of the test bearing region



Symbol	Lubricant	Molecular Weight	Concentration (PPM)	LogLog(ν+0.6) = A - BLog T	
				A	B
□	Base Oil	—	—	9.83	4.02
△	PIB. Sol.	1.2×10 ⁶	100	9.56	3.90
○	PIB. Sol.	6×10 ⁴	500	9.70	3.96
■	PIB. Sol.	1.2×10 ⁶	500	9.23	3.76
▲	PIB. Sol.	2.3~3.3×10 ⁶	500	9.29	3.71
●	PIB. Sol.	1.2×10 ⁶	1000	9.12	3.71

Fig. 3 A.S.T.M. Chart of lubricant

분자량 6×10⁴, 1.2×10⁶, (2.3~3.3)×10⁶ 인 PIB를 사용하였다. 윤활제의 점도는 Fig. 3 과 같다.

실험은 동심상태에서 행한다. 실험에서는 Taylor 와류를 가지화하고 베어링면에 발생하는 마찰토크, 윤활제의 온도 및 축의 회전수를 측정한다. 가지화는 윤활제에 알루미늄 분말을 첨가하여 행한다. 마찰토크는 저어널베어링의 옆판에 부착된 연결막대를 이용하여 로드셀(load cell)로써 힘으로 측정하고, 그 값에 축중심에서 로드셀까지의 거리를 곱하여 얻는다. 마찰토크가 최대한 정밀하게 측정될 수 있도록 저어널베어링은 공기베어링으로 지지되어 있다. 윤활제의 온도는 베어링의 옆면으로 배출되는 온도를 측정하여 베어링면에서의 온도로 간주한다. 회전수는 축의 한 끝면에 부착된 회전속도계에서 측정한다. 측정은 회전수 300 rpm 에서 부터 100 rpm 씩 증가시켜 1100 rpm 까지 행하고 그 이후는 200 rpm 씩 증가시켜 4500 rpm 까지 행한다.

3. 결과 및 검토

3.1 와류영역에 대한 고찰

동심상태인 저어널베어링내의 흐름과 같이 두 원통 사이에서 내부원통만 회전할 경우 회전속도가 어떤 임계점을 넘어서면 Fig. 4 와 같은 와류가 발생하고 이 임계점은 선형안정성이론에 의하면 다음과 같이 정의되는 Taylor 수가 41.2 인 경우이다⁽⁶⁾.

$$Ta = Re \cdot \sqrt{\frac{C}{R}} \tag{1}$$

본 실험에서는 고분자의 첨가에 따른 와류의 변화를 관찰하였다.

Figs. 5~9 는 저어널베어링내의 흐름을 가지화한 그림으로 축의 회전방향은 그림의 밑 부분에서 윗부분으로 향한다. (a)는 윤활유 기유만을 윤활제로 사용한 경우이고 (b)는 윤활유 기유에 PIB(분자량 1.2×10⁶

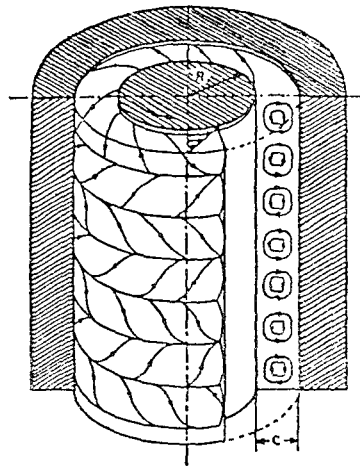
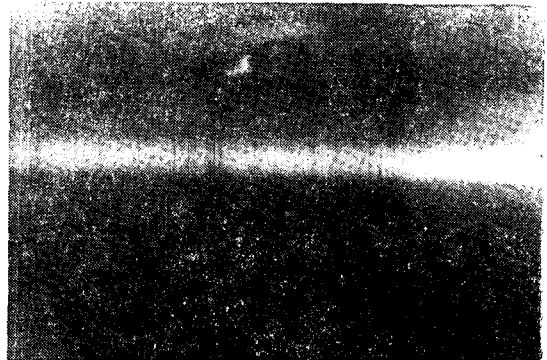
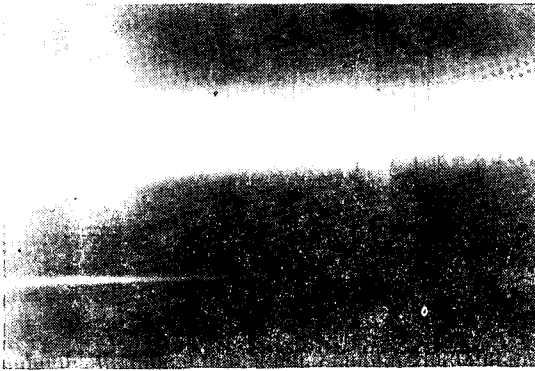


Fig. 4 Taylor vortices (Ref. 5)

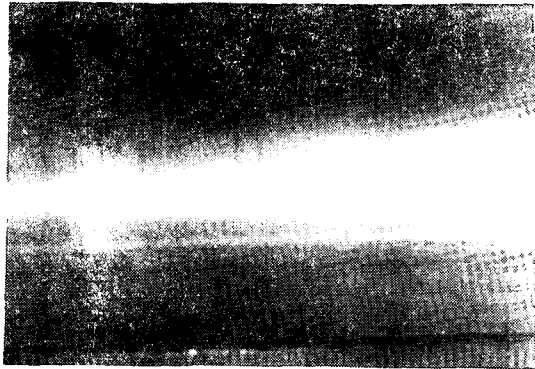


(a) Taylor number : 39

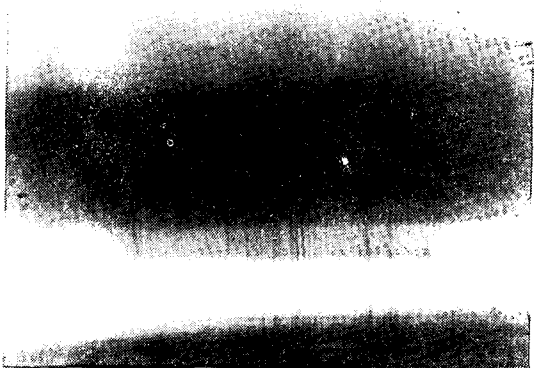


(b) Taylor number : 42.2

Fig. 5 Flow of the laminar regime



(a) Taylor number : 41.3

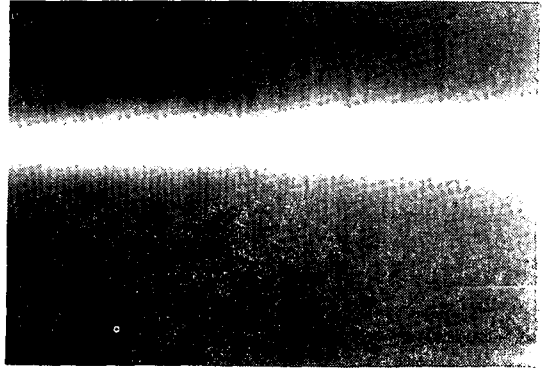


(b) Taylor number : 44

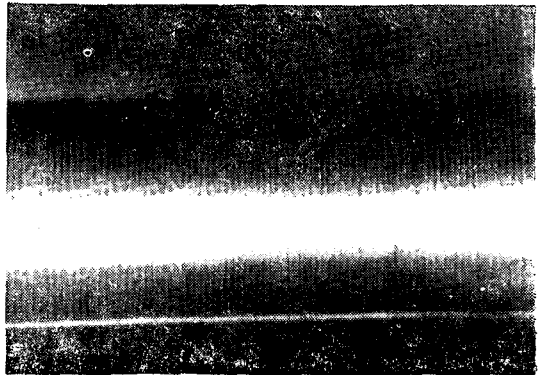
Fig. 6 Occurrence of the first Taylor vortices

투입량 500 PPM)를 첨가하여 윤활제로 사용한 경우이다. 윤활제는 0.07 atm으로 압력을 일정하게 유지하여 공급하였다.

Fig. 5는 와류가 발생하기 전의 상태로서 (a) (b) 각각의 Taylor 수는 39와 42.2이다. Fig. 6은 와류가 발생하는 초기의 상태로서 (a) (b) 각각의 Taylor 수는



(a) Taylor number : 46.5



(b) Taylor number : 47.4

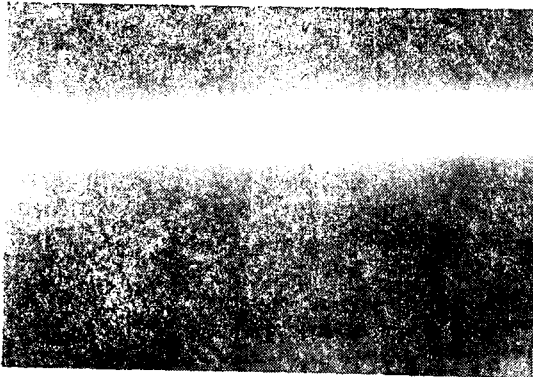
Fig. 7 Occurrence of the increased Taylor vortices

41.3과 44.0이다. 고분자가 첨가됨으로서 임계 Taylor 수가 커지는데 이것은 첨가된 고분자가 흐름의 안정성을 높이기 때문이라고 생각된다. Fig. 7는 와류가 발달된 상태로서 (a) (b) 각각의 Taylor 수는 46.5와 47.4이다. 와류의 모양이 선명하고 등간격의 규칙적인 배열임을 알 수 있다. Fig. 8은 와류가 변형된 상태로서 (a) (b) 각각의 Taylor 수는 62.8과 63.6이다. (a)는 와류의 배열이 균일한 상태에서 흐트러져 와류가 겹쳐진 형상을 나타내고 있다. 이에 비해 (b)는 흐트러짐이 없이 계속 규칙적인 배열을 보이고 있다. Fig. 9는 와류가 완전히 흐트러진 상태로서 (a) (b) 각각의 Taylor 수는 75.3과 79.1이다. 이와같이 Taylor 수가 큰 경우일수록 뚜렷이 고분자가 와류를 안정화시키고 있음을 알 수 있다.

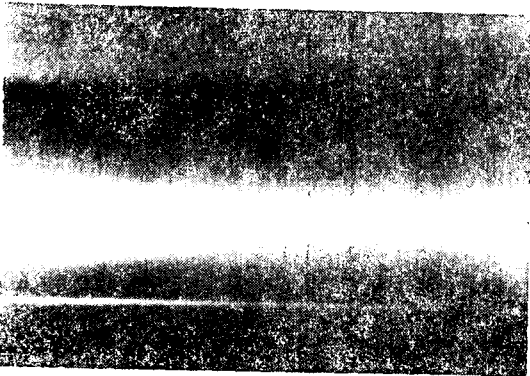
가시화의 결과로 베어링내의 흐름은 선형안정성 이론으로 예측되는 임계점 부근에서 와류가 발생함을 알 수 있다. 그리고 그것이 점점 발달하여 난류에 도달하게 되지만 와류에서 난류로의 전이점은 확인 할 수 없었다. 또한 윤활제에서 고분자를 첨가하여 실험한 결

과에서는 와류의 발생시기가 지연되고 와류의 강도가 약화되고 있음을 알았다.

Fig. 10 은 와류의 가시화와 동시에 측정된 마찰토크·윤활계의 온도 및 회전수를 이용하여 다음식으로 계산되는 마찰계수(C_f)와 Reynolds 수 (Re)사이의

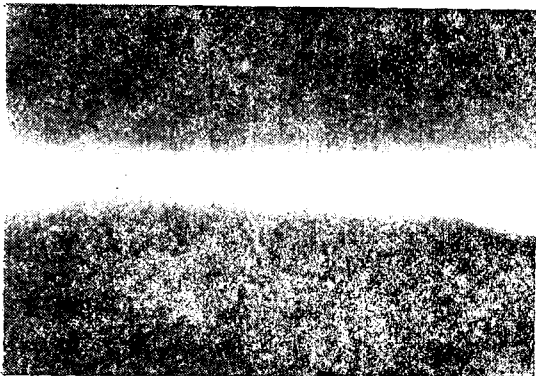


(a) Taylor number : 62.8

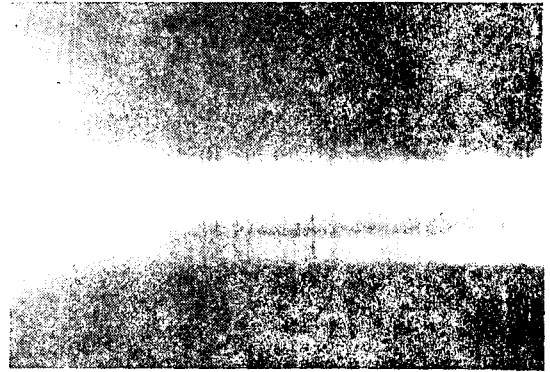


(b) Taylor number : 63.6

Fig. 8 Occurrence of the developed Taylor vortices



(a) Taylor number : 75.3



(b) Taylor number : 79.1

Fig. 9 Occurrence of the distorted Taylor vortices

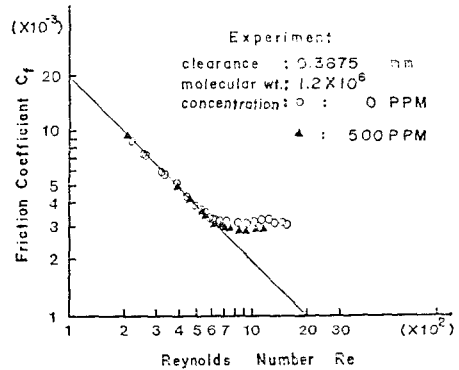


Fig. 10 The variation of C_f with Re

관계로 나타낸 것이고 그림에서 직선의 실선은 층류상태에서 계산된 $C_f = 2/Re$ 를 나타내고 있다.

$$C_f = G/\pi\rho U^2 R^2 L, \quad Re = UC/\nu \quad (2)$$

층류영역에서는 고분자의 첨가유무에 관계없이 이론적 계산식인 $C_f = 2/Re$ 에 잘 일치하고 있으나 와류영역에서는 고분자가 첨가되므로써 마찰계수가 작아지는 것을 볼 수 있다.

3.2 난류영역에 대한 고찰

Figs. 11~14 는 Fig. 10 과 같은 형식으로 C_f 와 Re 의 관계를 나타낸 그림이다. 윤활제는 5.5 l/min 으로 유량을 일정하게 유지하여 공급하였다.

Fig. 11 은 급유방법에 따른 실험결과로 가시화의 실험에서와 같이 축방향의 흐름이 거의 없는 경우와 축방향의 흐름이 11 cm/sec(유량 5.5 l/min)정도 있는 경우에 대한 결과를 비교하여 보면 층류영역에서는 차이가 없으나 와류영역에서는 축방향의 흐름이 있는 경우에서의 마찰계수가 작음을 알 수 있다. 이것은 M.A. Younes 등⁽⁷⁾과 비슷한 결과로서 축방향의 흐름이 와류

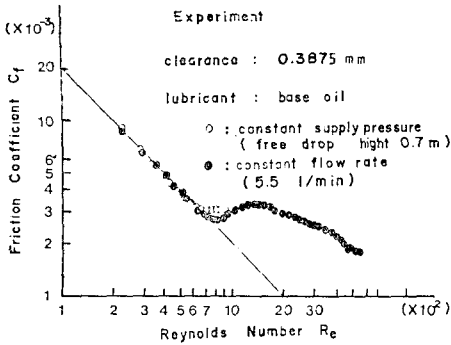


Fig. 11 The variation of C_f with Re

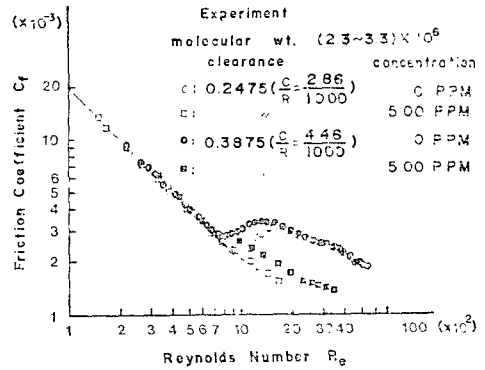


Fig. 14 The variation of C_f with Re

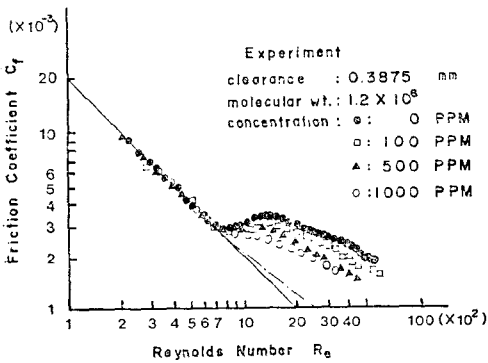


Fig. 12 The variation of C_f with Re

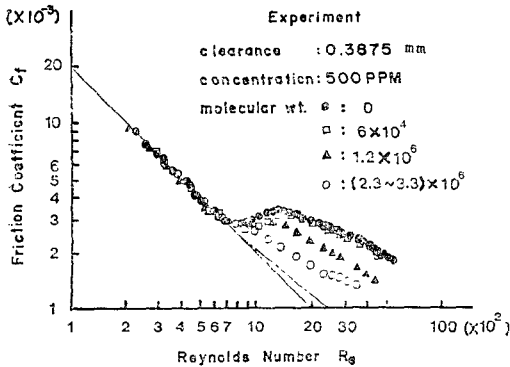


Fig. 13 The variation of C_f with Re

를 안정화시키고 있음을 나타낸다.

Fig. 12 이후의 그림에서 나타난 일정쇄선은 P.S. Virk 등⁽⁸⁾이 제시한 고분자용액에서 최대마찰감소가 일어날 때의 값을 근사화한 것으로 식(3)과 같다.

$$\sqrt{1/(2C_f)} = 11.7 \ln(Re \cdot \sqrt{C_f}/8) - 17.0 \quad (3)$$

Fig. 12는 고분자(PIB 분자량 1.2×10^6)의 투입량을 변화시키면서 실험한 결과이고 간극은 0.3875 mm(간극비 4.46/1000)이다. 판내의 흐름에서와 같이 투입량

이 많을수록 마찰감소효과가 큰 것을 알 수 있다. 여기서 투입량이 100 ppm—500 ppm—1000 ppm으로 증가할 때 투입량의 증가비율보다 마찰감소의 증가비율이 적어짐을 볼 수 있는데 이것은 일정치의 마찰감소가 일어난 후 그 이상 투입량을 증가시켜도 마찰감소의 효과면에서는 큰 이득이 없음을 나타내는 것 같다. 또한 P.S. Virk 등⁽⁸⁾이 제시한 최대마찰감소의 근사도 어떤 최적의 조건 이상에서는 그 이상의 효과가 없음을 나타내는 것이다. 일반적으로 실제 사용하는 윤활유에는 첨가제로 고분자가 다량 투입되는 경우가 많다. 그러나 이런 경우에도 마찰감소의 효과는 투입량에 비례하여 증가하는 것이 아니라 일정치에서 제한을 받게 된다고 생각된다.

Fig. 13은 Fig. 12와 같은 실험조건에서 고분자의 투입량은 500 ppm으로 일정하게 하고 고분자의 분자량을 변화시키면서 실험한 결과를 나타낸다. 분자량이 클수록 마찰감소효과가 큰 것을 알 수 있다. 이것으로 윤활제에서는 같은 효과를 나타내는 첨가제라도 고분자의 분자량이 큰 것을 첨가함으로써 마찰감소효과면에는 이득이 있는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 14는 2가지의 간극비에 대해 고분자의 분자량이 $(2.3-3.3) \times 10^6$ 이고 투입량을 500 ppm으로 일정하게 하여 C_f 와 Re 의 관계를 나타낸 것이다. 간극이 좁을수록 마찰감소효과가 커지는 것을 볼 수 있고 간극이 0.2475 mm(간극비 2.86/1000)인 경우의 결과는 P.S. Virk 등⁽⁸⁾이 제시한 최대마찰감소의 근사치에 거의 도달하고 있다.

위의 결과에서 윤활제에 첨가제로 고분자가 첨가되면 난류영역에서는 첨가제로서의 역할외에 마찰감소현상이 있음을 알았다. 그러므로 실제 여러가지 첨가제가 들어있는 윤활제를 사용할 경우의 와류영역 및 난

류영역의 베어링해석에서는 마찰감소현상의 고려가 필요하다.

4. 결 론

저어널베어링에서 마찰토크의 측정 및 흐름의 가시화로 Toms 효과에 관한 실험을 행한결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 저어널베어링내의 흐름에 있어 층류에서 와류로의 전이점은 선형 안정성 이론으로 예측한 값 부근이며, 전이점 이후에서 와류가 발생하여 그것이 발달하여 난류에 도달하게 된다. 층류에서 와류로의 전이점은 가시화로 뚜렷이 알 수 있으나, 와류에서 난류로의 명확한 전이점은 가시화의 결과에서는 존재하지 않았다.

(2) 윤활제에 고분자가 첨가되면 와류로의 전이점은 지연되고 와류강도는 약화되며 와류영역 및 난류영역에서 마찰감소현상이 나타난다.

(3) 관내의 흐름과 유사에게 고분자의 투입량이 많을수록, 분자량이 클수록 또한 베어링사이의 간극이 좁을수록 마찰감소효과는 커진다. 그러나 고분자의 투입량이 어느 일정치 이상에서는 투입량을 크게 변화시켜도 효과가 그다지 증가되지 않는다.

(4) 첨가제로서 고분자가 첨가된 윤활제를 사용하는 경우의 와류 및 난류영역의 베어링 해석은 마찰감소효과를 고려하여 흐름을 해석하여야 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- (1) Hoyt, J.W., "The Effect of Additives on Fluid Friction", ASME Journal of Basic Engineering, Vol. 94, No. 2, p.258, 1972
- (2) Virk, P.S., "Drag Reduction Fundamentals", AIChE Journal, Vol. 21, No. 4, p.625, 1975
- (3) Hampson, L.G. and Naylor, H., "Friction Reduction in Journal Bearing by High Molecular Weight Polymers", Proceedings of the 2nd Leeds Lync Symposium on Tribology Mechanical Engineering publications Ltd., London, p.70, 1975
- (4) Fukayama, H., Tanaka, M. and Hori, Y., "Friction Reduction in Turbulent Journal Bearings by Highpolymers", ASME F, Vol. 102, p.439, 1980
- (5) 정연민, "저어널베어링에서의 와류 영역에 대한 실험적 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1984
- (6) Taylor, G.I., "Stability of Viscous Liquid Contained Between Two Rotating Cylinders", Philosophical Transaction, Series A, Vol. 223, p.289, 1923
- (7) Younes, M.A., Mobbs, F.R. and Coney, J.E.R., "Hydrodynamic Stability of The Flow between Eccentric Rotating Cylinders with Axial Flow; Torque Measurements", Instn. Mech. Eng., Tribology Convention, Paper c76/72, p.14~19, 1972
- (8) Virk, P.S., Mickley, H.S. and Smith, K.A., "The Ultimate Asymptote and Mean Flow Structure in Toms Phenomenon," ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 37, No. 2, p.488, 1970