

〈논 문〉 SAE NO. 96370044

동축 구 사이의 자성 유체의 Couette 유동에 관한 연구

Experimental Study for Ferrofluid Couette Flow between Two Coaxial Spheres

구 도 연,* 하 옥 남,** 진 운 학***
D. Y. Koo, O. N. Ha, U. H. Chun

ABSTRACT

This study investigated torque characteristics for Couette flow experimentally under circumstances that ferrofluids were between two coaxial spheres. Torque measurement was obtained for the situation where the inner sphere was rotating while the outer sphere was kept stationary. The magnetic field was imposed on the fluid, using a bar magnet which was inserted in the inner sphere.

In the laminar flow region the torque increases when the magnetic field is applied and the critical Reynolds number is increased. However, in the transition regime, the effect of the magnetic field on the torque characteristics decrease as Reynolds number increases. The value of torque were the same as those of glycerine solution beyond the critical Reynolds number.

We also made experimental equation which could obtain coefficient of torque within critical Reynolds number in terms of sphere spacing Reynolds number and magnetic properties of ferrofluid.

주요기술용어 : Couette flow(Couette 유동), Ferrofluid(자성 유체), Magnetic field(자장), Critical Reynolds number(임계 레이놀즈 수), Coefficient of Torque(회전력 계수)

기 호 설 명

C : 토오크 계수

Re : 자성 유체의 레이놀즈 수 ($Re = \lambda S^2 / \nu$)

M_1 : 자장의 세기 (2.7×10^{-2} Wb/m²)

M_2 : 자장의 세기 (3.6×10^{-2} Wb/m²)

M_3 : 자장의 세기 (6.2×10^{-2} Wb/m²)

λ : 회전 각속도

μ : 자성 유체의 점성 계수

T : 토오크

ρ : 자성 유체의 밀도

S_1 : 내구의 반경 (37.5mm)

* 국민대학교 기계 공학과 대학원

** 정희원, 조선대학교 기계 공학과 교수

*** 정희원, 국민대학교 기계 공학과 교수

- S₂ : 내구의 반경 (35.0mm)
- S₃ : 내구의 반경 (30.0mm)
- β : 구 간격비
- H : 자화

1. 서 론

자성 유체는 자연에는 존재하지 않는 인공적인 유체로서 자성과 유체의 유동성을 동시에 지닌 유체이다. 이 자성 유체는 니켈, 코발트 등 자성 유체 미립자를 계면 활성제에 표면 처리해서 액체중에 분산시킨 콜로이드 상태이다. 이러한 구조 상태에 있기 때문에 외부에서 자장을 부가할 시 점성이 증가하는 성질에 의해 sealing, 윤활, 나아가서 토오크 변환기등 공학적인 면까지 응용할 수 있다.

이들 공학적인 응용상 유체에 관해 구 간격비에 대한 유동에 대해서는 많은 연구가 시작되고 있다. 지금까지는 Wimmer¹⁾, 中林²⁾ 등에 의한 실험적 연구가 보고된 바가 있으며, 또한 동축 회전 2개의 구 사이의 자성 유체의 거동에 관해서는 자성 유체를 비 뉴우튼 유체로 가정하는 Shiliomis⁴⁾ 이론에 근거한 山口³⁾의 해석적 연구 외에 아직까지 충분히 이루어지지 않는 것이 현실이다.

본 연구에서는 회전하는 2개의 구 가운데 내구는 회전, 외구는 정지한다는 조건에 대한 것으로서 내구안에 회전축과 동축이 되도록 세 종류의 봉자석을 차례로 삽입하고 그에 따른 비균일 자장에서의 유동을 안정한 층류 영역에서부터 임계영역까지의 범위에 걸쳐서 Water base 및 Kerosene base 자성 유체를 이용해 실험을 했다. 또 구의 간격비를 3종류로 하는 등 폭넓은 실험 조건하에서 내구 회전 토오크의 특성을 고찰함으로써, 그에 대응하는 유동의 형상에 대해 山口⁵⁾의 연구 결과와 비교 검토를 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험 장치의 개요를 Fig.1에 표시했다. 주요

구성 부분으로는 구(외구, 내구), 봉자석, 모터 그리고 검출기 등으로 구성되어 있다.

Fig.1에서 표시된 것처럼 외구는 반경 40mm의 투명 아크릴이고 두께 10mm의 아크릴 판으로 단단히 고정되어 있다.

외구 속에는 회전하는 축과 동심이 되도록 반경 S₁=37.5mm, S₂=35.0mm, S₃=30.0mm의 3개의 내구가 있다. 또한 이 각각의 내구 속에는

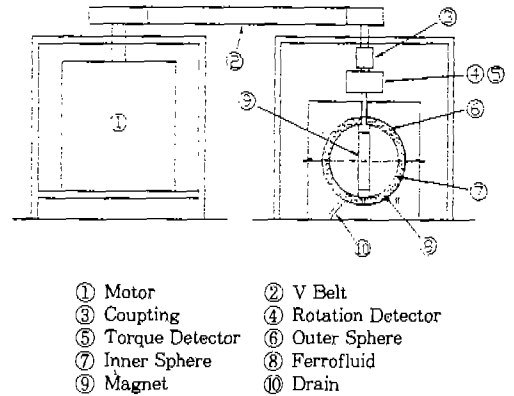


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Material property of ferrofluids

Item \ Sort	W-40	HC-50
External Appearance	Black	Black brown
Specific Gravity	1.40 ± 0.02	1.39 ± 0.02
Viscosity (25°C)	25 ± 7	22 ± 5
Surface Tension (dyne/cm)	28 ± 2	26 ± 2
Saturzated msgnetization (gauss)	380 ± 30	475 ± 30
Boiling point (°C)	100	150 ~ 250
Fleshing point (°C)	×	30 ~ 60
Range of usable Temperauter (°C)	10 ~ 80	-20 ~ 120
Solvent	Water	Kerosene

동형 동질량의 봉자석을 사용하여 자성 유체에 비균일 자장을 인가하였다. Fig.1에서 나타나듯이 모터는 내구와 봉자석을 회전시켜 주는 것으로 V벨트로 회전축과 연결시켜 200~3500rpm 사이의 다양한 회전역을 만들도록 했다. 또한 검출기는 2개의 센서에서 나오는 신호를 가지고 속도와 토오크의 관계를 보여준다.

본 실험에 사용한 자성 유체는 다이후 공업제 Ferrofluid(W-40; water base, HC-50; Kerosene base)이다. 기준 물성치는 각각의 생산분에 대한 측정치(온도-비중, 점도, 평균 입자직경, 입자의 포화자화)를 사용하였다. 온도에 의존하는 물성치는 기준치 온도 25°C를 사용하였다. 그에 따른 대표적인 물성치를 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험 방법

본 연구는 내구 회전에 따른 토오크의 특성을 구하고 그에 대응하는 유동의 형상을 고찰하는 것이다. 실험은 봉자석이 삽입된 내구를 외구속에 회전축과 동심이 되도록 조립을 한다. 그 후 내구와 외구 사이에 사용 유체를 넣은 후 드레인 마개를 닫은 후 모터와 연결된 회전축과 연결한다. 모터의 속도를 200rpm에서 시작하여 최고 3500rpm까지 속도를 50rpm 단위로 차례로 증가시켰다. 이들 각각의 회전 범위에 대한 속도와 토오크를 검출기에서 15회 반복하여 데이터를 얻어내었다. 이 데이터를 분석하여 평균값을 낸 후 실험의 자료로 삼았다. 우선 자성 유체를 사용하기 전에 기초 데이터를 얻기 위해 글리세린 수용액(75%)을 이용하여 기준 데이터를 얻는다. 여기서는 봉자석과 동일한 알루미늄 봉을 사용하였고, 글리세린에 알루미늄 분말을 현탁시켜 유동형태를 가시화 하여 관찰을 한다. 그리고 HC-50, W-40 자성 유체의 순으로 각각의 내구와 봉자석을 교대로 삽입시키면서 실험을 했다. 실험중 각각의 내구와 봉자석을 조합할 때 내구의 중심선에서 25° 되는 점(Fig.2의 A점)에서 Gauss meter를 사용하여 자장을 측정하였으며, 또한 실험 개시 및 종료 후에는 자장을 계속하여 변화가 없는 것을 확인하였다.

내구와 봉자석의 조합시 양극상에서 형성하는 자장의 분포를 Fig.2에 나타내었으며, 아울러 Table 2에 자장의 대표치를 나타내었다.

또한 실험시 토오크 계측은 유체의 유동이 충분히 정상적으로 된 후에 토오크 검출 시그널을 모니터 하면서 충분한 시간 간격(최저 간격 5분)을 두고 계측을 하였으며, 또한 내구 회전 때문에 발생하는 유체의 온도 상승의 영향을 조사하기 위해 실험을 2시간 이상 계속할 시에는 온도 상승을 측정하여 본 결과 실험중 온도상승은 1°C정도로써 물성치에는 별 영향이 없으므로 보정을 하지 않았다.

3. 실험 결과 및 고찰

자성 유체에 의한 실험에 앞서 기초 실험자료를 얻기 위해 글리세린 수용액(75%)에 의한 실험을 각각의 구 간격비에 대한 토오크 계수(Cm)와 레이놀즈 수(Re)의 관계를 Fig.3에 나타내었다.

검출기로부터 나온 속도와 토오크를 가지고 토

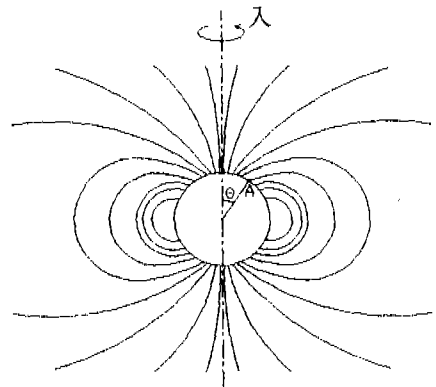


Fig.2 Distribution of magnetic field

Table 2 The intensity of magnetic field at point A. (unit; Wb/m²)

S ₁ -M ₁	2.0×10 ⁻³	S ₁ -M ₂	2.5×10 ⁻³	S ₁ -M ₃	4.0×10 ⁻³
S ₂ -M ₁	3.0×10 ⁻³	S ₂ -M ₂	4.0×10 ⁻³	S ₂ -M ₃	7.5×10 ⁻³
S ₃ -M ₁	3.5×10 ⁻³	S ₃ -M ₂	4.5×10 ⁻³	S ₃ -M ₃	9.0×10 ⁻³

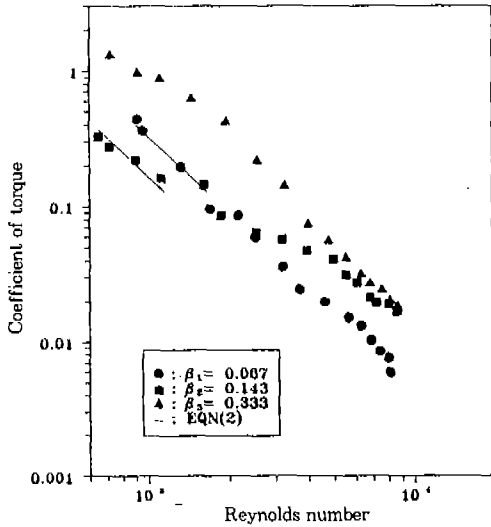


Fig.3 Coefficient of torque vs. Reynolds number (glycerine solution(75%))

오크 계수를 다음과 같이 구하였다.

$$C = \frac{T}{\rho S^5 \lambda^2} \quad (1)$$

여기서 S는 내구의 반경으로 각각 37.5mm, 35.0mm, 30.0mm이고, ρ 는 자성 유체의 밀도이고, λ 는 회전 속도이다.

Fig.3에서 나타난 바와 같이 구 간격비 β_1 이 0.067과 구 간격비 β_2 가 0.143는 서로 다른 토오크의 특성 영역이 나타나고 있음을 알 수 있다. 구 간격에 있는 주류 속도를 선형으로 가정하고, 즉 층류 Couette 유동이라는 점을 고려하여 구 간격비와 레이놀즈수와의 관계로 토오크 계수를 임계 레이놀즈 수(데이터의 분포를 보면 회전수의 변화에도 불구하고 토오크의 변화가 정체되는 부분이 있는데, 이 부분을 임계 레이놀즈 부분이라고 정의하였다. 층류에서 난류 형태로 속도를 증가하면서 관찰하였으므로, 상임계 레이놀즈 수임) 이하에 대해서 다시 정리하면 다음과 같은 실험식을 얻을 수 있고, 이 실험식은 Least-squares Curve Fitting중에서 Power Law(수치 해석)에 의해 구해진 식이다.

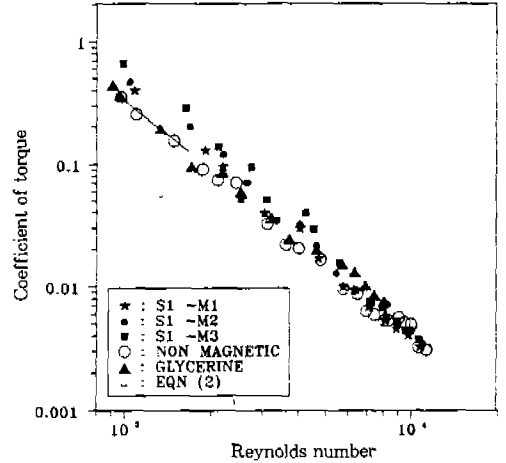


Fig.4 Coefficient of torque vs. Reynolds number(HC-50)($\beta_1=0.067$)

$$C_m = 2339.37\pi \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) Re^{-1.84} \quad (2)$$

이러한 실험식은 Fig.3에서 볼 수 있듯이 임계 레이놀즈 수 이하에서 실험치와 거의 일치한다는 것을 알 수 있다.

Fig.3을 보면 β_3 가 0.333의 간격비에 대한 데이터는 다른 구 간격비와는 다른 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 내구 회전시 다른 간격과는 층류 Couette 유동인데 반해 구 간격비 β_3 가 0.333은 구간격비가 커졌기 때문에 Couette 유동이라고 할 수는 없다.

본 연구에서는 자성 유체 토오크 특성을 얻기 위한 기초 실험인 글리세린 수용액을 사용하여 얻은 토오크 특성은 레이놀즈 수가 증가되면, 토오크 계수는 감소하며 간격비가 β_1 과 β_2 인 경우에는 Couette 유동이라 생각되며, 간격비가 β_3 인 경우에는 비 Couette 유동이다. 따라서 간격비가 β_1 과 β_2 인 경우에는 각각 임계 레이놀즈 수가 존재하며 그 값은 각각 대략 1800, 1200 정도이다.

Fig.4는 구 간격비가 0.067이고 사용된 자성 유체가 HC-50인 경우의 토오크 계수를 레이놀즈 수의 변화의 함수로 표시하였다.

HC-50 자성 유체를 사용하였을 때 무자장인

상태에서는 임계 레이놀즈 수 범위에서는 글리세린 수용액(75%)의 데이터와 일치하여 뉴우튼 유체의 성질을 나타내었다. 단 글리세린 수용액을 사용한 실험 데이터와 비교하여 토오크 특성의 변화점, 즉 글리세린보다 자성 유체의 임계 레이놀즈 수가 상승하는 경향을 볼 수 있다. 그러나 임계치 이후에서의 토오크 계수는 글리세린의 값보다 낮은 값을 나타내고 있다. 이러한 경향은 레이놀즈 수가 10^4 까지 보여지고 있는 것을

볼 수 있다.

한편, 임계 레이놀즈수는 자장의 크기에 의해 증가하며 자장이 S_1-M_1 , S_1-M_2 및 S_1-M_3 일 때의 임계 레이놀즈 수는 각각 2500, 3200 및 3700이다. 이러한 사실은 유체의 유동은 자장이 부가되면 보다 안정된 유동이 되고, 자장이 강할수록 유동은 더욱 안정됨을 알 수 있다. 또한 레이놀즈 수가 증가함에 따라 자장의 영향은 점차 감소하고 레이놀즈 수 8000 부근에서는 자장의 크기에 무관하게 글리세린 수용액의 데이터와 일치한다는 것을 볼 수 있다.

다음으로 Fig.5에 구 간격비가 0.067이고 사용된 자성 유체가 W-40인 경우에 대해서 Fig.4의 경우와 마찬가지로 토오크 계수와 레이놀즈 수와의 관계로 나타내었다.

W-40 자성 유체를 사용하였을 경우에도 동일한 경향을 살펴 볼 수 있다. 그러나 자장에 있을 때의 임계 레이놀즈 수는 HC-50과 비교하여 볼 때 작은 편으로 자장이 S_1-M_1 , S_1-M_2 및 S_1-M_3 일 때의 임계 레이놀즈 수는 각각 2500, 2800 및 3300의 값을 가진다.

다음으로 Fig.6에 구 간격비 β_2 가 0.143에 대한 HC-50 자성 유체에 대한 실험 결과를 그래프로 나타냈다.

실험치는 Fig.4와 Fig.5의 결과와 비교를 하면

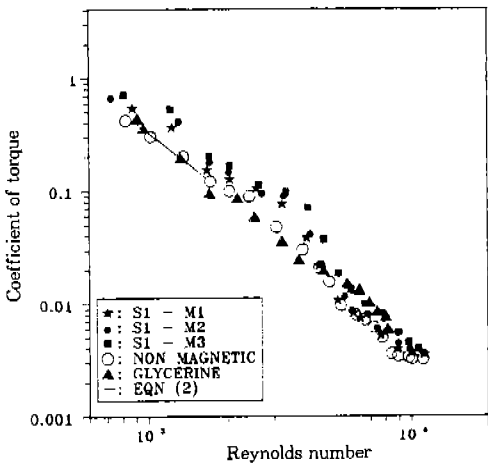


Fig.5 Coefficient of torque vs. Reynolds number (W-40) ($\beta_1=0.067$)

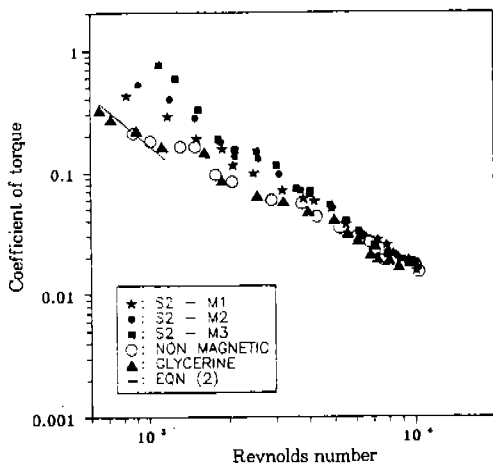


Fig.6 Coefficient of torque vs. Reynolds number (HC-50) ($\beta_2=0.143$)

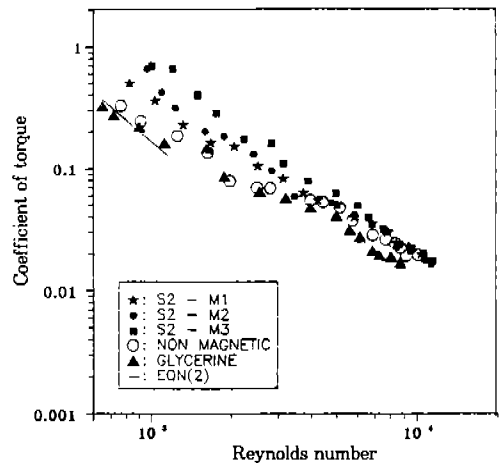


Fig.7 Coefficient of torque vs. Reynolds number (W-40) ($\beta_2=0.143$)

거의 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 구 간격비 β_1 이 0.067과 비교해 볼때 토오크 계수의 값은 전체적으로 완만한 기울기를 이룬다는 것을 알 수 있다. 무자장하에서의 토오크 계수의 값은 구 간격비가 상승함에 따라 낮은 레이놀즈수 영역에 있어서 전체적으로 구 간격비 β_1 이 0.067에 비해 상대적으로 낮다는 것을 알 수 있다.

이것은 임계 레이놀즈 수 이하에 있어서 간격비의 상승에 의한 전단력의 저하에 의한 것이다. 그러나 구 간격비 β_2 가 0.143에서 자장에 의한 토오크 계수의 증가 비율은 Fig.4 및 Fig.5의 결과에 비해 상대적으로 크게된다. 이것은 사용하는 내구가 작아졌기 때문에 실질적으로 인가된 자장의 강도가 증가했기 때문이다.

다음으로 W-40자성 유체를 사용하였을 경우 구 간격비 β_2 가 0.143에 대한 토오크 계수와 레이놀즈 수와의 관계를 Fig.7에 나타내었다.

Fig.7은 Fig.6의 경우와 마찬가지로 거의 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나 HC-50 자성 유체의 경우에 임계 레이놀즈수는 W-40 경우보다 상대적으로 떨어진다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 자성 유체의 조성에 의한 차이라고 생각된다.

앞에서 구한 임계 레이놀즈 수를 Table 3에 종합해 보았다.

Table 3을 보면 자성 유체의 임계 레이놀즈수는 글리세린 유체에 비해 높은 값으로 나타났다. 이것은 자성 유체속에 포함된 입자가 불안정성을 억제해 보다 더욱 안정화시키는 작용에 의한 것이라고 생각된다.

구 간격비 β_1 이 0.067의 경우에 있어서는 S_1-M_3 의 자장에 의한 임계 레이놀즈수의 상승은 1.8배 정도 된다. 반면에 간격비 β_2 가 0.143에 있어서 글리세린 수용액의 임계 레이놀즈 수는 1200으로서 S_2-M_3 의 경우와 비교할 때 임계 레이놀즈 수의 상승은 약 2.3배 정도 된다. 이와 같이 자장에 의한 상승은 구 간격 β_1 이 0.067의 경우가 β_2 0.143보다 상대적으로 크게 되는 경향이 보여지고 있다. 이것은 구 간격비 β_2 가 0.143에 대한 자장 강도의 상대적 상승에 의한 것

이다. 이것은 자장이 부가된 상태의 경우가 유체 입자의 교란을 보다 억제하는 쪽으로 강하게 나타난다. 이 경향은 HC-50 자성 유체의 경우가 W-40 자성 유체에 비해 유체 입자 교란억제가 현저하게 나타나진다는 것이 관찰된다. 이것은 자성 유체 자신의 조성에 의한 차이 또는 속도장과 자장의 상호 작용에 의한 차이에 의하여 유체 거동의 차이가 나타났다고 생각된다.

Table 3 Critical Reynolds number due to spacing of spheres and kinds of ferrofluid by this study

	Intensity of magnetic field(Wb/m ²)	Glycerine solution (75%)		
		HC-50	W-40	
$\beta=0.067$	non magnetic	2,000	2,000	1,800
	S_1-M_1	2,500	2,500	
	S_1-M_2	3,200	2,800	
	S_1-M_3	3,700	3,300	
$\beta=0.143$	non magnetic	1,700	1,200	1,200
	S_2-M_1	2,000	1,780	
	S_2-M_2	2,500	2,400	
	S_2-M_3	2,800	2,500	

Table 4 Critical Reynolds number due to spacing of spheres and kinds of ferrofluid by Red.5

	Intensity of magnetic field	Glycerine solution (75%)		
		HC-50	W-40	
$\beta=0.07$	non magnetic	2,100	2,000	2,000
	S_1-M_1	3,000	2,500	
	S_1-M_2	4,000	2,800	
$\beta=0.15$	non magnetic	1,000	900	900
	S_1-M_1	1,500	1,000	
	S_1-M_2	3,000	1,700	

또한 이러한 값을 식들을 β_3 의 실험결과와 비교하기 위해 그 결과를 Table 4에 표시하였다.

Table 3과 Table 4를 비교해 보면 본 연구에서 얻어진 데이터는 β_3 의 것과 경향이 같다는 것을 알 수 있다. 즉, 임계 레이놀즈 수에서 글리세린에 비해서 자성유체가 크며, 자장의 세기가 증가할수록, 간격비가 적을수록 큰 임계 레이놀즈 수를 갖는다. 그리고, HC-50이 W-40보다 크다는 것을 알 수 있다.

다음으로 Fig.8과 Fig.9에 구 간격비 β_3 가 0.333인 경우의 토오르크 특성을 볼 수 있다.

정상적으로는 글리세린에서 볼 수 있는 변화와 동일한 경향을 보이고 있다. 임계치 이후의 토오르크에 대한 거동은 자장의 영향이 레이놀즈 수가 증가함에 따라 감소하고 레이놀즈 수가 커질수록 점점 글리세린의 특성에 가까운 값에 접근한다는 것을 알 수 있다.

또한 자장이 가장 강하게 생기는 경우를 제외하고는 낮은 레이놀드 수 구간에서의 구 간격비 S_3-M_1 과 S_3-M_2 는 거의 비슷한 토오르크 값을 나타내고 있다.

연구에서 얻어진 데이터를 바탕으로 임계 레이놀즈 수이하의 종류 Couette 유동에 대한 각각의 구 간격비 β_1 이 0.067, β_2 가 0.143에 대해 하나의 실험식을 구할 수 있었다.

$$C_m = 108743.8\pi \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^{-0.1} Re^{-1.71} \left(\frac{M}{H}\right)^{0.73} \tag{3}$$

여기서 C_m 은 토오르크 계수, β 는 구 간격비 M 은 봉자석의 자장의 세기(Wb/m^2), H 는 자성 유체의 자화의 세기이다. 실험식 (3)과 각각의 구 간격비에 대한 실험값을 임계 레이놀즈 수 이하에 대해서 Fig.10 및 Fig.11에 비교하였다.

Fig.10과 Fig.11에서 볼 수 있듯이 실험값과 실험식은 약간의 오차는 있지만 거의 일치하는 경향을 보인다. β_3 는 간격비 β 가 0.0714, β 가 0.154에 대해서 동일 자성 유체를 사용하여 토오르크 계수를 구할 수 있는 실험식을 발표하였다.

$$C_m = \frac{2\pi}{Re} \left\{1 + \left(\frac{1}{\beta}\right)^n\right\} \times \int_0^\pi \left\{1 + C_1 \left(\frac{M_\theta \Delta H_\theta}{\eta_N \epsilon^N}\right)^{C_2} \left(\frac{M_\theta}{H_\theta}\right)^{C_3}\right\} \sin^{2+n}\theta d\theta \tag{4}$$

여기서 η_N 은 자성 유체의 점도, ϵ^N 은 구 간격의 속도를 직선으로 가정하였을 대의 속도 분포, M_θ 는 봉 자석의 자장의 세기, H_θ 는 자성 유

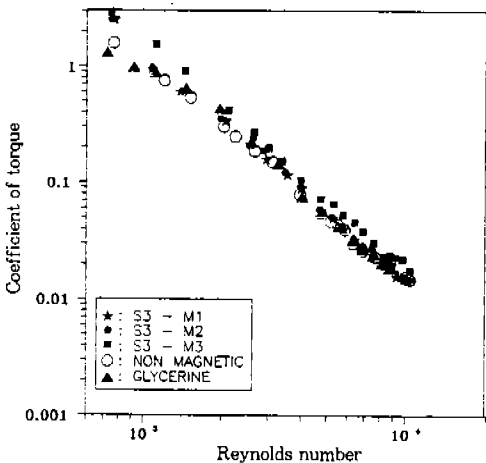


Fig.8 Coefficient of torque vs. Reynolds number (HC-50) ($\beta_3=0.333$)

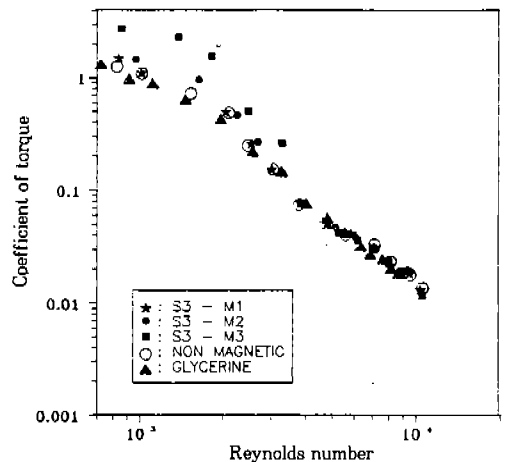


Fig.9 Coefficient of torque vs. Reynolds number (W-40) ($\beta_3=0.333$)

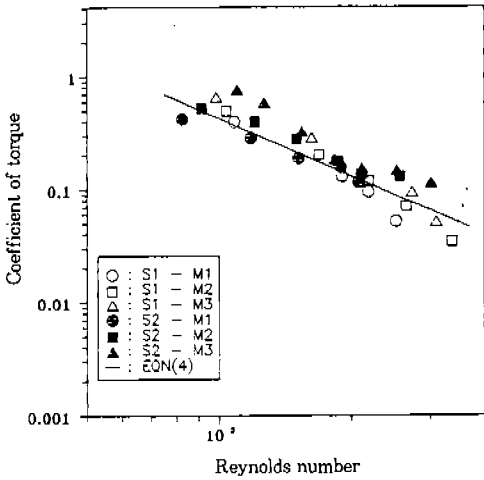


Fig.10 Coefficient of torque vs. Critical Reynolds number (HC-50)

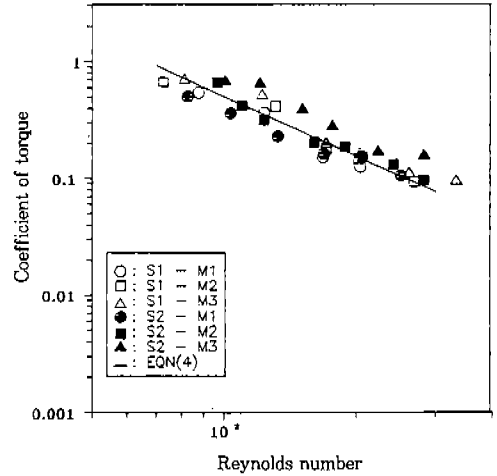


Fig.11 Coefficient of torque vs. Critical Reynolds number (W-40)

체의 자화의 세기이다. 山口⁵⁾는 이 식을 구 간격의 속도를 직선으로 가정하고 단위 표면에 작용하는 점성응력에 의한 토오르크를 구 표면 전체에 대해 적분하여 내구 회전 토오르크를 자장의 영향을 고려한 무차원 파라미터를 이용해 구한 식이다. 실험식중 점성력에 대한 자기력의 무차원비의 변수가 포함되어 있으나 이는 레이놀즈수와 자성 유체의 자기적 성질에 관한 비로 표시될 수 있으므로 본 실험식에서는 이 항을 임계 레이놀즈수로 표시하였던 바 식 (3)은 식 (4)의 근사치를 구하는 데 사용될 수 있는 것으로 사려된다.

4. 결 론

HC-50 및 W-40 자성 유체를 이용해서 내구 회전에 있어서의 동심 구 간격비를 갖는 구 유동에 대한 토오르크 특성을 실험적으로 구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험 자성 유체의 토오르크 계수를 임계 레이놀즈 수 이하의 층류 영역에 대해 구할 수 있는 실험식 (3)을 구하여 간격비, 레이놀즈 수 및 자성 유체의 자기적 성질의 항으로 구하였다.

2) 구 간격비가 작은 β_1 이 0.067, β_2 가 0.143의 유동에 대해서는 자장의 인가시에도 천이의 현상이 나타나 글리세린 수용액의 경우와 같이 Couette 유동 현상을 보인다. 한편, 자장의 증가함에 따라 토오르크 계수가 커질 뿐 아니라 임계 레이놀즈 수의 값이 커지고(최대 2.3배), 상당히 큰 레이놀즈 수에서 안정화된 유동이 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향은 W-40 자성 유체에 비해 HC-50 자성 유체의 경우에서 더욱 잘 나타난다.

3) 각각의 자성 유체는 레이놀즈 수보다 작은 구간에서는 글리세린 수용액(75%) 보다 높은 토오르크 값을 나타내는 반면, 레이놀즈 수가 임계값을 지나면 거의 같은 토오르크 계수의 값을 갖는 경향을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 1995년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Wimmer, M., Fluid Mech., 78-2 pp. 317, 1976.
2. Nakabayashi, K., J. Fluid Eng., 100 pp. 97, 1978.
3. Yamaguchi, G, J. Fluid Mech., vol 119, pp. 1, 1982.
4. Shiliomis, M. I., sov. Phys. Usp., 17-2 pp. 153, 1974.
5. 山口ほか 2名, “磁性 流體의 쿼엣트流れ 關する 實驗的 研究”, 日本 機械 學會論文集 (B), vol. 59~562, pp. 292~296, 1993.