

차량용 마그네틱 클러치의 마찰 특성

김동욱* · 김경웅†

한국과학기술원 기계항공시스템학부

Friction Characteristics of Magnetic Clutch Used in Automobiles

Dong-Wook Kim* and Kyung-Woong Kim†

School of Mechanical, Aerospace & Systems Engineering, KAIST

(Received June 10, 2009; Revised July 12, 2009; Accepted July 18, 2009)

Abstract – A magnetic clutch consists of pulley and disk. It delivers and isolates the power needed for the operation of the compressor used in automotive air conditioning system. To improve the performance, efficiency and durability of automotive air conditioning system, appropriate design of pulley, disk and system working parameters(the magnitude of magnetic force, and so on) is necessary. For that goal, it is required to understand the friction characteristics of magnetic clutch for the initial operating time. In this study, friction tests were carried out in order to investigate the effect of sliding velocity on the friction characteristics of magnetic clutch using pin-on-disk type friction and wear tester. For experiments, pulley and disk used in real automotive air conditioning system were considered. Friction experiments were conducted under various sliding velocities, and coefficients of kinetic friction were obtained. Under the experimental conditions considered in this study, the coefficients of kinetic friction increased with the increase of test number(sliding distance) and decreased with the increase of sliding velocity.

Key words – magnetic clutch(마그네틱 클러치), sliding velocity(미끄럼 속도), friction(마찰), wear(마모), coefficients of kinetic friction(운동 마찰 계수), wear rate(마모율)

1. 서 론

자동차 내부의 쾌적한 환경에 대한 소비자들의 욕구가 날로 높아짐에 따라 자동차용 에어컨의 성능 및 효율의 지속적인 향상이 요구되고 있다. 자동차용 에어컨의 성능 및 효율은 핵심 장치인 압축기의 작동 상태의 영향을 많이 받는다. 그리고 압축기의 작동 상태는 마그네틱 클러치의 마찰 특성에 따라 달라진다.

마그네틱 클러치는 자동차 에어컨용 압축기의 구동에 필요한 동력을 전달 또는 단속하는 기계 요소이다. 자동차 엔진-마그네틱 클러치-압축기로 구성되는 자동차용 에어컨의 동력 전달 시스템은 Fig. 1과 같다. 이

중 마그네틱 클러치는 탄소강 또는 탄소강과 마찰재로 구성된 마찰면을 갖는 풀리와 탄소강으로 구성된 마찰면을 갖는 디스크로 구성된다. 탄소강과 마찰재로 구성

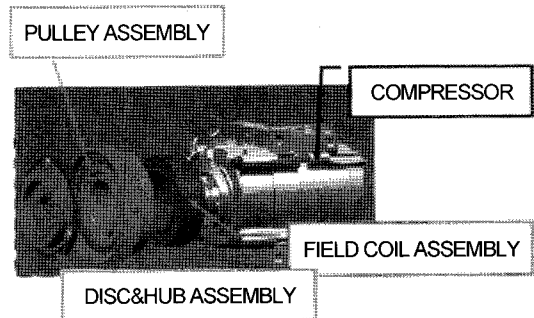


Fig. 1. Diagram of power delivery system for automotive air conditioning system.

*주저자 : dwkim0825@kaist.ac.kr

†책임저자 : taeho@kaist.ac.kr

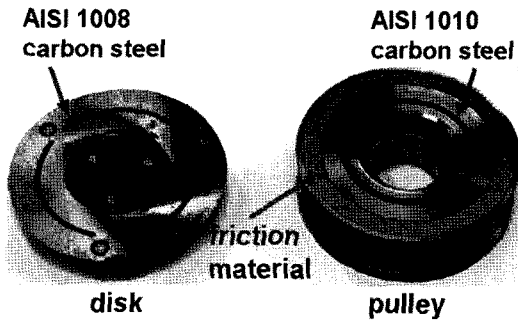


Fig. 2. Components of magnetic clutch.

된 마찰면을 갖는 풀리와 탄소강으로 구성된 마찰면을 갖는 디스크는 Fig. 2와 같다. 풀리는 엔진 크랭크와 벨트로 연결되어 엔진이 작동하는 동안에는 항상 회전하며, 엔진이 정지하면 회전을 멈춘다. 구름 베어링이 압축기의 주축과 풀리 사이에 동심 상태로 결합되므로 풀리만 회전할 경우에는 압축기가 구동되지 않는다. 에어컨이 작동을 시작하면 필드 코일 어셈블리에 전류가 인가되어 전자기력이 발생되고, 이 전자기력에 의해 압축기의 주축과 직접 결합되어 있는 디스크가 회전하고 있는 풀리와 접촉을 형성, 유지하여 압축기의 주축을 회전시킨다. 에어컨이 작동을 멈추면 필드 코일 어셈블리에 인가되던 전류가 차단되어 전자기력이 소멸되고, 고무의 복원력에 의해 디스크와 풀리의 접촉이 해제되어 압축기에 전달되는 동력이 차단된다.

풀리와 디스크는 에어컨의 작동 초기에 서로 접촉을 형성하는 과정에서 상대 운동을 경험하게 되며, 이때의 풀리와 디스크의 상대 운동 상태에 따라 압축기의 초기 작동 상태가 결정된다. 그러므로 자동차용 에어컨의 성능 및 효율 향상을 위해 마그네틱 클러치의 효과적인 설계가 요구되며, 이를 위해 중요한 설계 변수인 마그네틱 클러치의 마찰 특성을 파악하는 연구가 필요하다. 그러나 기존 연구는 대부분 자동차 파워 트레인에 사용되는 습식 클러치[1]나 클러치용 마찰재[2]의 마찰 특성을 파악하는 연구에 초점이 맞춰져 있으며 마그네틱 클러치의 마찰 특성을 파악하는 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

본 연구에서는 pin-on-disk 형태의 마찰·마모 실험 장치를 이용하여 다양한 미끄럼 속도 조건에서 마그네틱 클러치를 미끄럼 마찰시켜 운동 마찰력을 측정하고, 운동 마찰 계수를 계산하였다. 실제 자동차 에어컨 압축기에 사용되고 있는 마그네틱 클러치의 풀리와 디스크를 적절히 가공하여 각각 디스크 시편과 핀 시편으로

사용하였고, 실험 조건은 마그네틱 클러치의 실제 작동 조건을 고려하여 선정하였다.

2. 실험

2-1. 시편

본 실험에는 실제 자동차 에어컨 압축기에 사용되고 있는 마그네틱 클러치의 풀리와 디스크를 적절히 가공하여 실험 시편으로 사용하였다. 탄소강과 마찰재로 구성된 마찰면을 갖는 풀리의 중심부에 결합되어 있는 구름 베어링을 제거하여 디스크 시편으로 사용하였다. 핀 시편은 디스크를 가로 5 mm, 세로 5 mm, 높이 5 mm 인 직사각형 형태로 절단한 후 600 mesh 사포로 모서리에 수 μm 의 곡률을 주어 제작하였다. 디스크 시편(마그네틱 클러치의 풀리)의 표면 중 금속 부분의 재질은 AISI 1010 carbon steel이며 핀 시편(마그네틱 클러치의 디스크)의 재질은 AISI 1008 carbon steel이다.

마그네틱 클러치의 실제 표면 특성을 실험에 그대로 반영하기 위해 디스크 시편과 핀 시편에 에탄올 세정을 제외한 별도의 표면 처리를 수행하지 않았다.

2-2. 실험 장치

마그네틱 클러치의 마찰 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하기 위해 Fig. 3과 같은 pin-on-disk 형태의 마찰·마모 실험 장치를 제작하여 사용하였다. 회전축

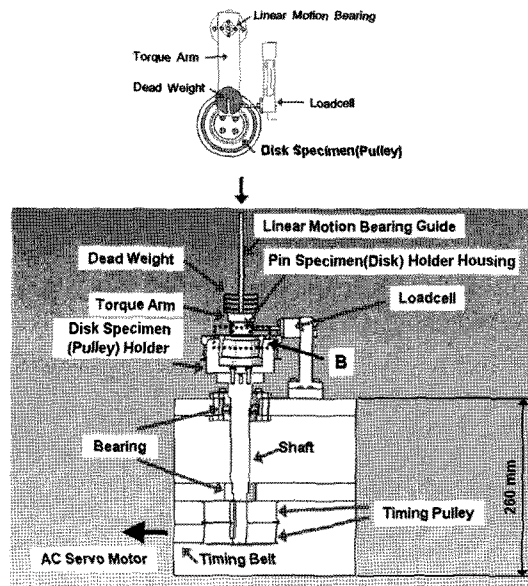


Fig. 3. Apparatus for friction experiment.

구동에 사용된 모터는 마찰력 변화에 관계없이 미끄럼 속도를 정확히 제어하기 위해 정격 용량 2 kW, 정격 회전수 1000 rpm의 AC 서보 모터를 사용하였다. 서보 모터의 속도는 PC-모션 컨트롤러-서보 모터 드라이브로 구성되는 속도 제어부에 의해 조절된다. 회전축의 회전 속도는 서보 모터의 1회전당 분해능과 모션 컨트롤러에서 발생시키는 1초당 펄스의 수, 서보 모터 드라이브의 전자 기어비를 적절히 조합하여 서보 모터의 회전축 위치를 결정하는 방식으로 제어하였다. 그리고 실험 도중 발생할 수 있는 외부 대기 조건의 변화에 의한 영향을 최소화하기 위해 실험 장치에 아크릴 덮개를 씌웠다.

토크암의 한쪽 끝 부분에는 핀 시편 홀더와 핀 시편 홀더 허우징이, 반대쪽 끝 부분에는 수직 방향과 회전 방향의 운동이 자유로운 직선 운동 베어링이 부착되어 있다. 직선 운동 베어링이 직선 운동 베어링 안내축에 설치되기 때문에 디스크 시편과 핀 시편의 마찰면에서 발생하는 마찰력은 직선 운동 베어링 안내축을 중심으로 토크암을 회전시키는 토크로 작용한다. 마찰력은 토크에 의한 토크암의 운동을 로드셀로 구속함으로써 측정하였다. 이때 직선 운동 베어링과 직선 운동 베어링 안내축에서 발생하는 마찰 토크는 매우 작으므로 무시하였다. 마찰면에 가해지는 수직 하중은 토크암의 무게와 토크암 위에 올려진 추(dead weight)의 무게의 합이 된다. 따라서 토크암의 무게가 본 실험 장치를 이용하여 구현 가능한 최소 하중이 된다.

2-3. 실험 조건

마찰 실험은 대기 온도가 16~22°C이고 상대 습도가 25~35% R.H.인 건조 마찰 조건에서 수행되었다.

접촉 면압 및 미끄럼 속도 조건은 마그네틱 클러치의 실제 작동 조건을 고려하여 선정하였다. 마찰면에 가해지는 접촉 면압은 12 V, 20°C의 조건에서 발생하는 전자기력을 폴리와 디스크가 완전히 면 접촉할 경우 형성되는 걸보기 접촉 면적으로 나누어 계산하였다. 본 연구에서는 저속의 상대 운동을 고려하므로 전자기력이 포화될 경우에 해당하는 걸보기 접촉 면압인 425 kPa을 면압 조건으로 선정하였다.

미끄럼 속도의 경우 폴리와 디스크 사이에 저속의 상대 운동이 발생할 경우의 마그네틱 클러치의 마찰 특성을 파악하기 위해 저속 영역에 해당하는 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1 m/s의 5가지 경우를 고려하였다.

탄소강으로 구성된 마찰면만을 갖는 폴리와 디스크의

Table 1. Experimental condition

Friction surface 1 (Disk specimen)	AISI 1010 carbon steel
Friction surface 2 (Pin specimen)	AISI 1008 carbon steel
Sliding distance(m)	4.052
Contact pressure(kPa)	425 (Normal load=10.6 N)
Sliding velocity(m/s)	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1
Air temperature(°C)	16~22
Relative humidity(% R.H.)	25~35
Lubricating condition	Dry friction

마찰 특성을 파악하기 위해 핀 시편을 디스크 시편의 표면 중 탄소강 부분과 미끄럼 마찰시켰다. 미끄럼 거리는 실제 작동 상태에서 폴리와 디스크 사이에 발생할 수 있는 최대 미끄럼 거리를 계산하여 선정하였다. 이상에서 언급한 실험 조건을 정리하면 Table 1과 같다.

2-4. 실험 방법

먼저 디스크 시편과 핀 시편의 표면을 에탄올로 세정한 후 상온에서 1시간 동안 건조시킨다. 충분히 건조된 디스크 시편과 핀 시편을 각각의 홀더에 장착한 후 추(dead weight)를 이용하여 마찰면에 하중을 가한다. 그 후 아크릴 덮개를 덮고 온도계와 습도계를 이용하여 환경 조건을 점검한다. 만약 대기 온도 및 상대 습도가 실험 조건으로 선정한 범위에 포함되지 않을 경우 온풍기, 가습기, 실리카겔 등을 이용하여 조절한다. 단, 디스크 시편과 핀 시편이 정지 상태에서 접촉을 유지하는 시간은 70초로 일정하게 한다. 이는 상대 운동이 발생하기 직전까지 디스크 시편과 핀 시편이 접촉을 유지한 시간이 마그네틱 클러치의 마찰 특성에 미치는 영향을 배제하기 위해 필요하다. 이후 디스크 시편을 회전시켜 두 시편 사이에 상대 운동을 발생시킨다. 정지 상태에서 디스크 시편과 핀 시편이 접촉을 형성한 지점을 기준으로 디스크 시편이 15회 회전하는 동안 로드셀에서 출력되는 전압을 data acquisition 하드웨어 및 소프트웨어와 PC를 이용하여 수집한다. 두 시편의 표면에 존재하는 마모 입자를 압축 공기를 이용하여 제거한 후 표면 세정 및 건조 과정을 제외한 과정을 동일한 시편에 대하여 20회 반복 수행한다.

운동 마찰 계수는 디스크 시편이 핀 시편과 상대 운동을 시작한 시점부터 15회 회전을 완료하는 시점까지

Table 2. Relationship between test number and accumulated number of magnetic clutch's contact

	Test number				
Accumulated number of magnetic clutch's contact	1	2	3	4	5
	Test number				
Accumulated number of magnetic clutch's contact	6	7	8	9	10
	Test number				
Accumulated number of magnetic clutch's contact	6	7	8	9	10
	Test number				
Accumulated number of magnetic clutch's contact	11	12	13	14	15
	Test number				
Accumulated number of magnetic clutch's contact	11	12	13	14	15
	Test number				
Accumulated number of magnetic clutch's contact	16	17	18	19	20

의 운동 마찰력의 시간 평균값을 수직 하중으로 나누어서 계산하였다. 그리고 한가지 미끄럼 속도 조건에서 동일한 시편을 대상으로 반복 실험을 수행하여 얻어지는 20개의 운동 마찰 계수는 각각에 test number를 부여하여 구분하였다. Test number는 차량 에어컨용 압축기의 작동 및 정지에 따라 누적된 마그네틱 클러치의 접촉 형성 및 해제 횟수를 나타낸다. 차량 에어컨용 압축기가 1회 작동한 후 정지할 경우 마그네틱 클러치는 1회 접촉을 형성한 후 해제한다. 또한 본 실험에서는 미끄럼 접촉을 경험하지 않은 폴리과 디스크를 적절히 가공하여 시편으로 사용하였다. 따라서 test number가 n일 경우의 운동 마찰 계수는 n번째 접촉을 형성하는 폴리과 디스크의 운동 마찰 계수가 된다. 이 상에서 언급한 마그네틱 클러치의 접촉 누적 횟수와 test number와의 관계를 정리하면 Table 2와 같다.

3. 실험 결과

3-1. 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수

3-1-1. Test number의 변화에 따른 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수

Fig. 4는 test number의 변화에 따른 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수를 보여준다. 각각의 그래프에 표시된 도형은 디스크 시편이 15회 회전하는 동안의 운

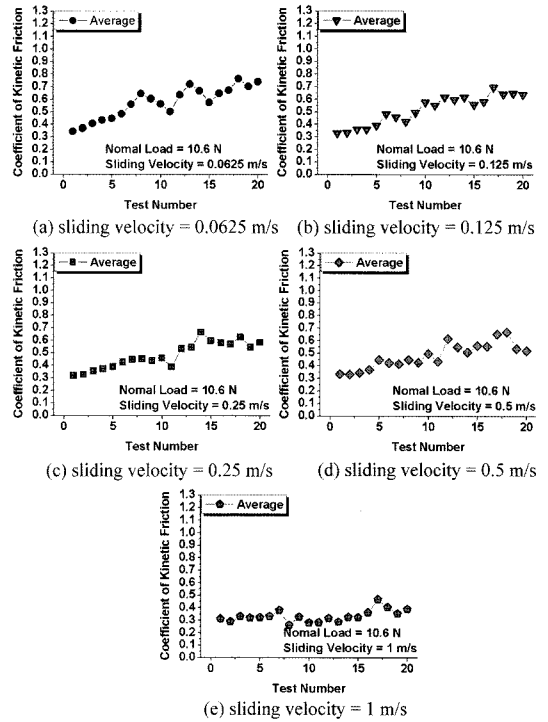


Fig. 4. Coefficients of kinetic friction of magnetic clutch according to test number.

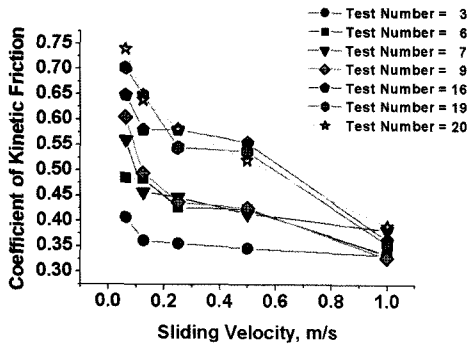
동 마찰 계수의 평균값을 나타낸다.

미끄럼 속도 조건에 따라 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수는 어느 정도 차이를 보였지만 test number가 증가할수록 운동 마찰 계수가 대체적으로 상승하는 경향은 유사하게 나타났다.

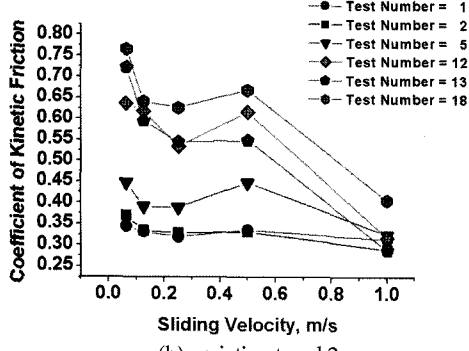
3-1-2. 미끄럼 속도의 변화에 따른 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수

Fig. 5는 미끄럼 속도의 변화에 따른 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수를 보여준다. 각각의 그래프에 표시된 도형은 디스크 시편이 15회 회전하는 동안의 운동 마찰 계수의 평균값을 나타낸다.

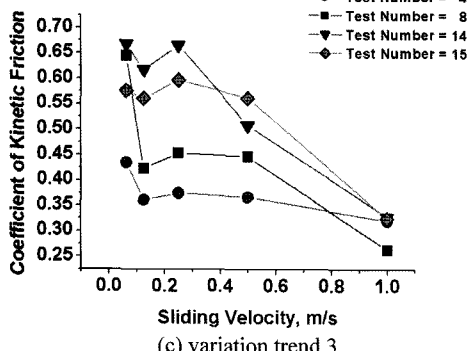
동일한 test number에 해당하는 운동 마찰 계수가 미끄럼 속도의 증가에 따라 변화하는 양상을 살펴보면 크게 4가지 경향을 보인다. 우선 Fig. 5(a)의 경우 미끄럼 속도가 증가함에 따라 운동 마찰 계수가 지속적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)의 경우는 운동 마찰 계수가 미끄럼 속도가 0.25 m/s일 때까지 지속적으로 감소한 후 미끄럼 속도가 0.5 m/s일 때 증가한 후 다시 감소하였고, Fig. 5(c)의 경우는 운동 마찰 계수가 미끄럼 속도가 0.125 m/s일 때까지 지속적으로 감소한 후 미끄럼 속도가 0.25 m/s일 때 증가



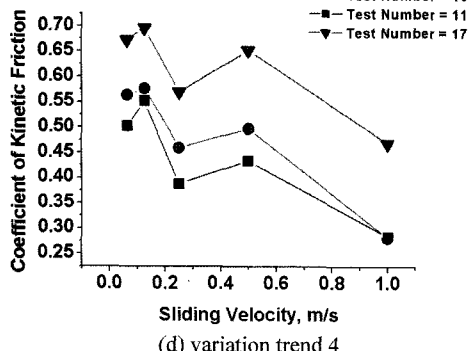
(a) variation trend 1



(b) variation trend 2

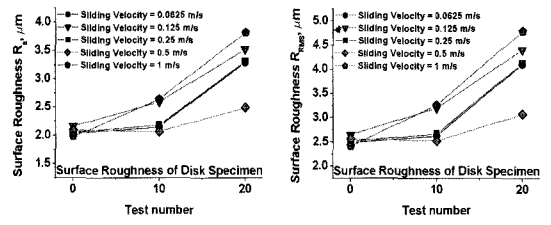


(c) variation trend 3

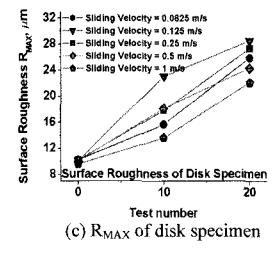


(d) variation trend 4

Fig. 5. Coefficients of kinetic friction of magnetic clutch according to sliding velocity.

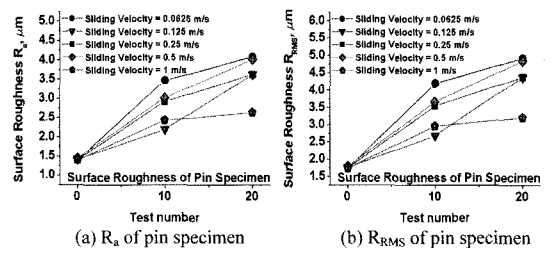


(a) Ra of disk specimen (b) RRMS of disk specimen

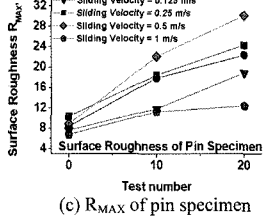


(c) RMAX of disk specimen

Fig. 6. Surface roughness of disk specimen according to test number.



(a) Ra of pin specimen (b) RRMS of pin specimen



(c) RMAX of pin specimen

Fig. 7. Surface roughness of pin specimen according to test number.

한 후 다시 감소하였으며, Fig. 5(d)의 경우는 미끄럼 속도가 증가함에 따라 운동 계수가 증가와 감소를 반복하였다. Fig (b), (c), (d)의 경우 국부적인 마찰 계수의 증가와 감소가 관찰되었지만 전반적으로 Fig. 5에 나타난 결과들은 test number가 동일할 경우 미끄럼 속도가 증가할수록 운동 마찰 계수가 대체로 감소하는 경향을 보인다.

3-2. 디스크 시편과 핀 시편의 표면 거칠기 변화

Figs. 6과 7은 각각 test number의 변화에 따른 디스크 시편과 핀 시편의 표면 거칠기(Ra, RRMS, RMAX)

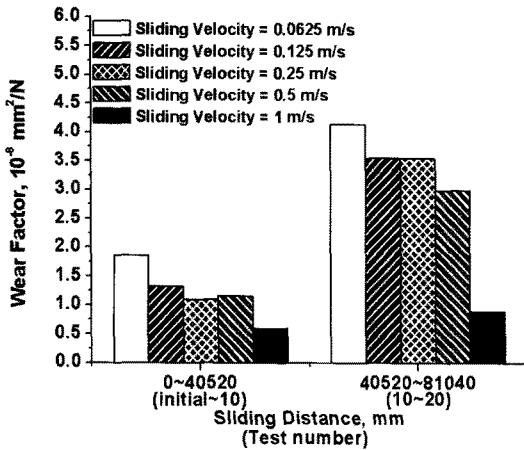


Fig. 8. Wear factor of pin specimen according to sliding distance(test number).

를 나타낸다. 동일한 미끄럼 속도 조건에서 디스크 시편과 핀 시편의 표면 거칠기는 test number가 증가함에 따라 대체로 증가하였다. 그러나 미끄럼 속도의 변화에 따른 뚜렷한 변화 경향은 관찰할 수 없었다.

3-3. 핀 시편의 마모율

Fig. 8은 미끄럼 거리의 변화(test number의 변화)에 따른 핀 시편의 마모율을 나타낸다. 본 연구에서는 핀 시편의 마모율을 다음과 같이 정의되는 비마모량으로 표시하였다.

$$K = \frac{V}{W \times l}$$

여기서 V : 마모 체적[mm³], W : 수직 하중[N],
 l : 미끄럼 거리[mm]

동일한 미끄럼 속도 조건에서 핀 시편의 마모율은 미끄럼 거리가 증가(test number가 증가)함에 따라 증가하였다. 그리고 동일한 미끄럼 거리(동일한 test number)에 해당하는 마모율은 미끄럼 속도가 증가할수록 대체로 감소하였다.

4. 고 찰

4-1. 미끄럼 속도의 영향

Fig. 5를 통하여 미끄럼 속도의 변화에 따른 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수 변화를 살펴보면 test number의 변화에 따라 미묘한 차이가 존재하지만 대체로 미끄럼 속도가 증가함에 따라 운동 마찰 계수는

감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 미끄럼 속도의 변화에 따른 마모율 및 선풍 온도, 디스크 시편과 핀 시편의 표면 거칠기 변화에 의한 영향이 마찰력에 반영된 결과라 판단된다.

Fig. 8을 통하여 동일한 미끄럼 거리(동일한 test number)에 해당하는 핀 시편의 마모율은 미끄럼 속도가 증가할수록 대체로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 마모 입자의 연삭 작용에 의해 발생하는 마찰력은 미끄럼 속도가 증가할수록 감소할 것이라 판단된다.

한편 미끄럼 속도가 증가하면 마찰면의 온도가 상승한다. 이 때 마찰면에 가해지는 수직 하중의 크기가 작고, 미끄럼 속도가 느리더라도 실제 접촉을 형성하는 표면 돌기들에 의해 형성되는 진실 접촉 면적은 겉보기 접촉 면적에 비해 매우 작으므로 미끄럼 마찰되는 표면 돌기의 온도는 수백 °C에 도달하게 되는데 이를 선풍 온도라 한다. 선풍 온도에 의해 표면 돌기들은 강도, 경도 및 탄성 계수의 저하를 경험하게 된다. 강도 및 경도의 저하는 표면 돌기의 접촉에 의해 형성되는 마찰면의 전단 강도를 감소시키고, 탄성 계수의 저하는 진실 접촉 면적을 증가시킨다[3,4]. 본 실험의 결과를 토대로 실험에서 고려한 조건에서는 마찰면의 전단 강도 저하에 의한 마찰력의 감소가 진실 접촉 면적의 증가에 의한 마찰력 증가보다 우세하며, 이에 의한 영향이 마찰력에 반영되어 미끄럼 속도가 증가할수록 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수가 감소하게 된다고 추측할 수 있다.

디스크 시편과 핀 시편의 표면 거칠기 변화에 의한 영향도 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수 변화에 어느 정도 영향을 미칠 것이라 생각된다. 그러나 디스크 시편과 핀 시편의 표면 거칠기 변화가 미끄럼 속도의 변화에 따라 뚜렷한 변화 경향을 보이지 않는 것으로 미루어 그 영향은 앞서 기술한 마모율 및 선풍 온도에 의한 영향에 비해 상대적으로 작을 것이라 판단된다.

4-2. Test number의 영향

Fig. 4를 통하여 test number의 변화에 따른 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수 변화를 살펴보면 대체로 test number가 증가함에 따라 운동 마찰 계수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 test number의 변화에 따른 마모율과 디스크 시편과 핀 시편의 표면 거칠기 변화에 의한 영향이 마찰력에 반영된 결과라 판단된다.

Fig. 8을 통하여 동일한 미끄럼 속도에 해당하는 핀 시편의 마모율은 미끄럼 거리가 증가(test number가

증가할수록 대체로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 마모 입자의 연삭 작용에 의한 마찰력은 미끄럼 거리가 증가(test number가 증가)할수록 증가할 것이라 추측된다.

또한 Figs. 6과 7을 통하여 동일한 미끄럼 속도 조건에서 디스크 시편과 핀 시편의 표면 거칠기는 test number가 증가함에 따라 대체로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 거칠어진 표면 돌기의 연삭 작용에 의한 마찰력 역시 test number가 증가할 수록 증가할 것이라 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 마그네틱 클러치의 마찰 특성을 파악하기 위해 미끄럼 속도를 변화시키며 마그네틱 클러치를 미끄럼 마찰시키는 실험을 수행하였다. 실험 결과 측정되는 마찰력과 수직 하중을 이용하여 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수를 계산, 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수는 미끄럼 속도가 증가함에 따라 대체적으로 감소하는 경향을 보였다.

(2) 마그네틱 클러치의 운동 마찰 계수는 test number

가 증가(미끄럼 거리가 증가)함에 따라 대체적으로 증가하는 경향을 보였다.

후 기

이 논문은 2009년도 BK21 사업에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

1. Marklund, P. and Larsson, R. "Wet Clutch Friction Characteristics Obtained from Simplified Pin on Disk Test", *Tribology International*, Vol. 41, pp. 824-830, 2008.
2. Eguchi, M. and Yamamoto, T. "Shear Characteristics of a Boundary Film for a Paper-based Wet Friction Material: Friction and Real Contact Area Measurement", *Tribology International*, Vol. 38, pp. 327-335, 2005.
3. Bhushan, B., Principles and applications of tribology, Chap. 4&6, JOHN WILEY & SONS, INC, U.S.A, 1999.
4. Rabinowicz, E., Friction and wear of materials, Chap. 4, JOHN WILEY & SONS, INC, U.S.A, 1995.