

자동차용 마찰재에서 각 원료의 상대량에 따른 전이막 형성 및 마찰특성의 변화

조민형 · 이재영 · 김대환* · 정근중* · 최천락* · 장 호

고려대학교 재료금속공학부,
*한국타이어(주) 중앙연구소 신소재연구팀

The Changes of Transfer Film and Friction Characteristics with the Relative Amounts of Raw Materials

Min Hyung Cho, Jae Young Lee, Dae Hwan Kim*,
Geun Joong Cheong*, Chun Rak Choi* and Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University,
**Advanced Material Research Team, Ltd. R&D Center, Hankook Tire Co.*

Abstract – An NAO friction material (low-steel type) containing 15 ingredients was investigated to study the role of transfer film on the friction characteristics. The friction material specimens with extra 100% of each ingredient were tested using a pad-on-disk type tribotester. A non-destructive method of measuring the transfer film was developed by considering the electric resistance of the transfer film. Results showed that solid lubricants and iron powder assisted transfer film formation on the rotor surface. Average friction coefficient was independent of transfer film thickness in this experiment. On the other hand, the thick transfer film on the rotor surface reduced the amplitude of friction oscillation under temperature conditions ($\approx 250^\circ\text{C}$) that transfer film forms.

Key words – friction materials, transfer film, solid lubricant, friction coefficient, friction oscillation.

1. 서 론

마찰시 계면에 형성되는 전이막(transfer film)의 형성기구 및 그에 따른 마찰특성에 관한 연구는 오랜 시간 동안 계속되어 왔다. 이는 마찰계면에 형성되는 전이막

이 미끄럼 운동을 하는 두 물체의 직접적인 접촉을 방지하여 내마모성, 소음, 떨림 현상 등의 마찰현상에 영향을 미치기 때문이다. 일반적으로 로터표면에 형성되는 전이막의 두께는 대략 $50\mu\text{m}$ 정도이며, 탄소강 섬유를 포함하지 않는 비석면 유기질

마찰재의 경우가 탄소강 섬유를 포함하는 경우에 비해 두꺼운 전이막을 형성시키는 것으로 알려져 있다.

전이막은 미끄럼운동 도중에 마찰재로부터 분리된 마모입자들이 로터쪽에 압축, 응착되어 형성된다. 전이막의 형상 및 두께는 온도, 압력, 미끄럼 속도 등에 크게 영향을 받으며, 이것은 전이막 내의 구성 성분의 응착 및 유동성이 이러한 조건에 따라 달라지기 때문이다. 그러므로 전이막의 형상 및 두께를 연구하기 위해서는 특정한 조건을 선정하여 세심하게 실험하여 한다.

Table 1. Raw material ingredients contained in the specimen of basic formulation. Numbers in the parenthesis indicate the Mohs hardness of each ingredients

Basic Role	Ingredients (Mohs hardness)	Vol. %
Reinforcing Fiber	Kevlar(2.3), Steel Fiber(5.5), Mineral Fiber(2.5)	15
Binder	Unmodified Phenolic Resin, Epoxy Modified Phenolic Resin	12.4
Lubricant	Graphite(1.5), MoS ₂ (1.3)	21
Abrasive	ZrSiO ₄ (7.5), MgO(5.5)	5
Friction Modifier	Cashew(4), BaSO ₄ , Vermiculite, Ca(OH) ₂ , Iron powder(4.5), Synthetic Rubber	46.6

이러한 전이막과 마찰특성과의 관계를 규명하기 위하여 많은 연구가 진행되어왔다. 연구결과에 따르면, 전이막의 성분이 소음 및 마찰특성에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으나[1-3], 전이막 형성 및 두께가 마찰특성에 미치는 영향에 관해서는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 각 원료의 증가에 따른 전이막 형성 및 그에 따른 마찰특성의 변화를 고찰하기 위하여, 표준시편을 포함하는 13 개의 시편을 제작하여 마찰시험을 수행하였다.

2. 실험방법

본 시험에 사용된 마찰재들은 탄소강 섬유를 포함하는 비석면 유기질 마찰재(NAO lining containing steel fiber)로서, 총 15 가지의 원료로 구성하였다. Table 1 에 시편 제작에 사용된 원료 및 표준시편의 대략적인 조성을 나타내었다. 각 원료의 증가에 따른 전이막 형성 및 마찰특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 다음과 같이 시편들을 제작하였다. 마찰특성에 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있는 barite, vermiculite, Ca(OH)₂ 를 제외한 12 가지 원료를 대상으로 한 원료의 함량을 표준시편의 함량보다 100% 증가시켰으며, 나머지 원료에 대해서는 일정비율로 감소시키며 12 개의 비교시편을 제작하였다. 마찰재의 제조는 상용 마찰재의 제조 공정인 원료혼합, 예비성형, 본성형의 순서로 시행되었으며, 구체적인

Table 2. The composition of the gray cast iron rotor used in this study (wt%)

C	Si	Mn	Cr	Cu
3.5	1.7	0.8	0.5	0.25
S	P	Sn	Mo	Fe
0.1	0.15	0.05	0.05	Bal.

조건은 이미 발표한 바 있다[10].

본 연구에 사용된 마찰시험기는 pad-on-disk 형태의 정속 마찰시험기를 사용하였으며[11], 시험중의 마찰력, 가압력, 디스크 온도, 회전속도는 PC-based DAQ(LAB-PC-1200, NI)시스템을 이용하여 100Hz의 데이터 처리속도로 저장하였다. 마찰재의 상대재로는 직경이 12cm, 두께가 2.5cm인 회주철 로터가 사용되었으며, 회주철 로터의 조성은 Table 2에 나타내었다. 회주철 로터의 미세구조는 퍼얼라이트 기지 내에 A-type 흑연이 존재하는 형상을 나타내었다.

Table 3. Friction test procedure used in this study

1. Burnishing : IBT=100°C, Pressure=0.82Mpa, Speed=6.9m/sec, Time= 600sec (10sec drag- 10sec interval, 30times).
2. Constant Interval test: IBT=100°C, Pressure=0.82Mpa, Speed=6.9m/sec, Time= 600sec (10sec drag- 10sec interval, 30times).
3. Drag: IBT= 250°C, Pressure=0.82Mpa, Speed=2.5m/sec, Time= 15sec

마찰시험은 burnishing, constant interval test(CIT), drag test로 구성되어 있다. CIT의 경우는 전이막 형성 및 평균마찰계수를 측정하기 위한 실험이며, drag test는 전이막의 두께에 따른 마찰계수 진폭의 변화를 측정하기 위한 실험이다. 구체적인 실험조건은 Table 3에 나타내었다.

전이막의 두께측정은 광학현미경을 이용하는 방법과 저항측정을 이용하는 방법을 사용하였다. 광학현미경을 이용하는 방법은 고배율(x840)에서 미세눈금을 사용하여 전이막과 회주철 금속표면 사이의 높이를 측정하는 방법이며, 전기저항 측정법은 전이막에 7mm x 7mm 크기의 silver paste를 도포하고, 전기 저항을 측정함에 의해 두께를 비교하는 방법이다. 전이막이 부도체이므로 전이막의 두께가 증가함에 따라 저항은 증가하게 된다. 광학현미경을 이용하

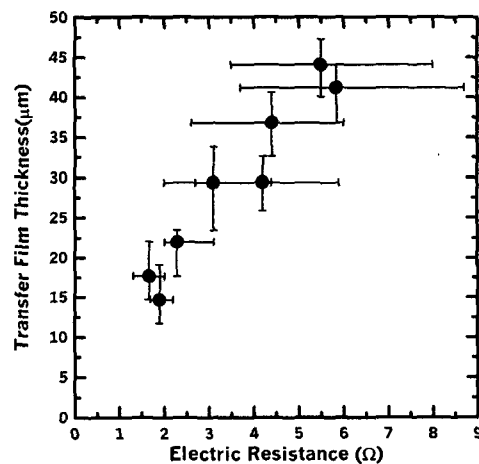


Fig. 1. The relationship between electric resistance and transfer film thickness.

는 방법은 두께를 직접적으로 측정할 수는 있지만, 측정자에 의한 오차가 심하다. 반면에 저항을 이용하는 방법의 경우에는 비교적 정확하게 두께 차를 비교할 수는 있지만 직접적인 두께를 얻을 수 없으며, 또한 전이막의 조성에 따라 두께와 저항과의 관계가 변하게 된다.

본 실험에서는 전이막의 두께를 측정하기 위하여 두 가지 방법을 병행하여 상호간의 장단점을 보완하였다. 우선적으로 여러 시편에서 측정된 전기저항과 광학현미경으로 측정된 두께와의 상관관계를 구하여 Fig. 1에 나타내었다. 전이막의 두께와 전기저항은 비례관계를 나타내었으며, 관계식은 다음과 같다.

$$\text{Thickness} = 6.45 \times \text{Resistance} + 6.12$$

측정한 전기저항 값이 넓은 오차범위를 나타내는 것은 초기 로터의 런아웃(runout)에 기인하여 두께가 불규칙한 전이막이 형성되었기 때문으로 사료된다.

본 실험에서는 다소 시편의 조성에는 차이가 있지만 전이막의 두께와 저항과의 관계가 위의 식에서 크게 벗어나지 않았다. 따라서 앞으로 언급하는 전이막의 두께는 저항값을 측정한 후, 위의 식에 대입하여 얻은 값이다.

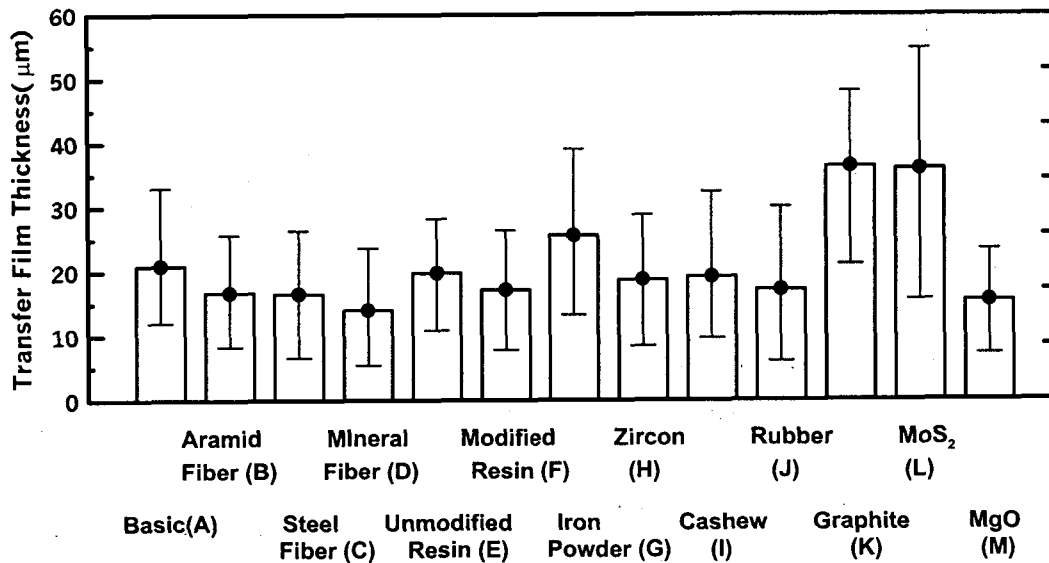


Fig. 2. The transfer film thickness on the rotor surface when the friction materials with extra 100% of each ingredient were tested on the gray iron rotor surface. Error bars indicate the amount of thickness variation.

3. 실험결과 및 토의

3-1. 전이막의 두께

마찰재 내의 각 원료의 증가에 따른 전이막 두께의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 흑연과 MoS₂와 같은 고체윤활제의 증가에 따라 전이막은 두껍게 형성되었다. 이것은 극성을 가진 고체윤활제가 로터표면에 잘 응착되기 때문인 것으로 사료된다. 또한 환원분철(iron powder)이 전이막 형성을 촉진시키는 것으로 나타났으며, 이러한 현상은 마찰재로부터 마모되어 나온 미세한 환원분철이 로터 표면에 응착되며 전이막 형성에 기여하는 것으로 판단된다. 이와 유사한 결과로서, 공구강(tool steel)에 PTFE 전이막을 형성시킬 경우, Cu 나 Pd를 첨가하게 되면 두꺼운 전이막이 형성

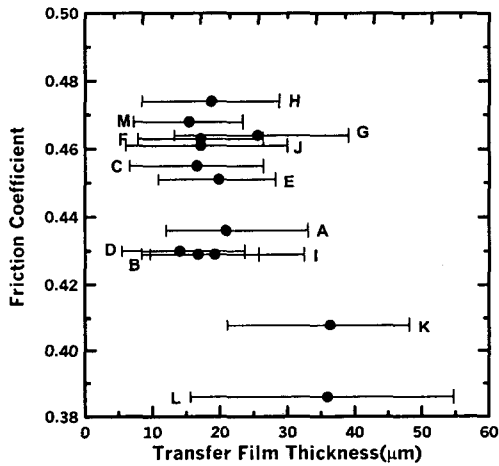


Fig. 3. The average coefficient of friction plotted as a function of the transfer film thickness.

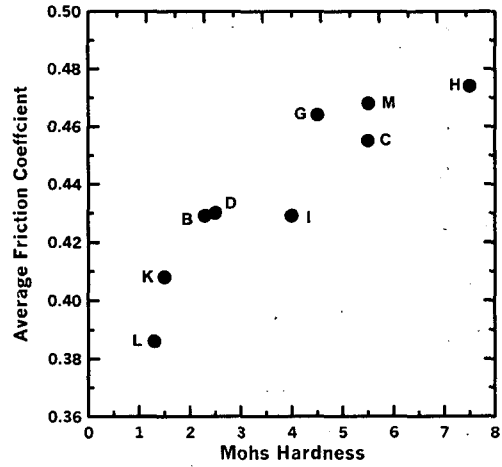


Fig. 4. Average friction coefficient as a function of Mohs hardness of the ingredients that were added more in the friction material specimen.

된다는 결과도 이미 발표된 바 있다[9]. 반면에 ZrSiO₄, MgO와 같은 연마제와 mineral fiber의 경우는 전이막 형성을 저해하였다.

3-2. 평균마찰계수

전이막의 두께가 마찰특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 우선적으로 전이막의 두께에 따른 마찰계수를 Fig. 3에 나타내었다. 전체적으로 마찰계수는 전이막 두께의 변화에 무관하였다. 따라서, 마찰계수에 영향을 미치는 인자를 찾기 위하여 Fig. 4에 첨가한 물질의 경도값과 마찰계수를 나타내었다. 경도가 높은 원료의 증가에 따라 마찰계수가 증가하는 경향이 나타났다. 일반적으로 물질의 마찰계수는 모스경도와 비례한 것으로 알려져 있으며, 모스

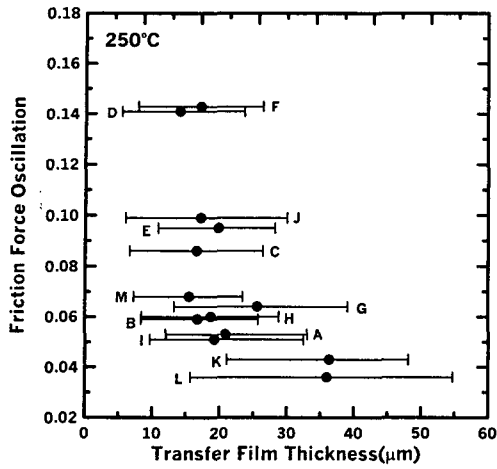
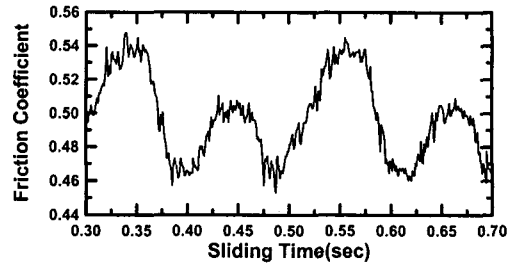


Fig. 5. Effect of transfer film thickness on the amplitude of friction oscillation. The transfer film thickness was measured after friction test at 250°C.

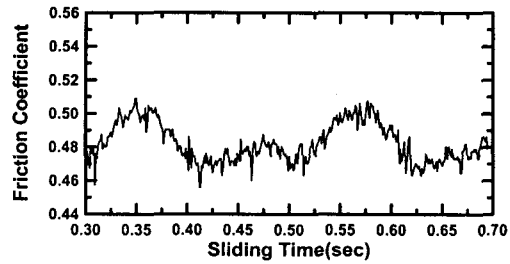
경도가 높은 물질의 증가는 전체적으로 마찰계수를 상승시키는 것으로 판단된다.

3-3. 마찰계수의 진폭

마찰계수진폭의 변화는 제동시 발생하는 진동(vibration)의 원인으로 간주된다. 따라서, 낮은 마찰계수 진폭을 나타내는 것이 진동, 소음 측면에서 좋은 특성을 나타낼 것으로 판단된다. 마찰계수의 진폭은 마찰재의 표면경도, 압축률, 로터의 런아웃 등에 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 모든 마찰재에서 압축률과 표면경도의 차이가 적었으며, 로터의 런아웃은 마찰시험이 시작되기 전에 15 μ m 정도로 고정하였다. 250°C에서 전이막의 두께가



(a) Rubber



(b) MoS₂

Fig. 6. The oscillation of the friction coefficient during sliding in the cases of using friction materials containing extra rubber or MoS₂.

마찰계수의 진폭에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 전이막이 두꺼워짐에 따라 마찰계수 진폭은 감소하였다. 이러한 현상을 분석하기 위하여 비교적 낮은 진폭을 나타내는 MoS₂ 첨가 시편과 큰 진폭을 나타내는 rubber 첨가 시편에 대하여 로터 2 회전 동안의 마찰계수 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 회전 주기와 같은 주기로 나타나는 첫 번째 큰 파형의 진폭이 전이막이 두꺼워짐에 따라 감소하였다. 이것은 생성된 전이막이 로터의 낮은 부분을 채우며 런아웃을

감소시켜 발생한 현상으로 사료된다. 전이막이 두꺼워짐에 따라 오차범위가 증가하는 현상도 전이막의 불균일한 분포 때문인 것으로 판단된다.

3-4. 마찰계수의 안정성

여러가지 제동조건에서 마찰계수를 유지하는 것은 상용 마찰재에서 중요한 요건이다. 특히, 마찰계수는 온도의 변화에 민감하게 반응하므로, 온도 상승에 따른 마찰계수의 변화는 많은 연구의 초점이 되어왔다. 페놀수지를 결합제(binder)로 사용하는 마찰재는 극한 제동조건에서 페놀수지의 열분해로 인해 제동력을 상실하게 된다. 제동시 온도상승에 따른 페놀수지의 분해가 시작되는 온도는 약 200°C 정도로 알려져 있으며, 일반적으로 이 온도 범위에서 마찰계수의 감소가 시작된다.

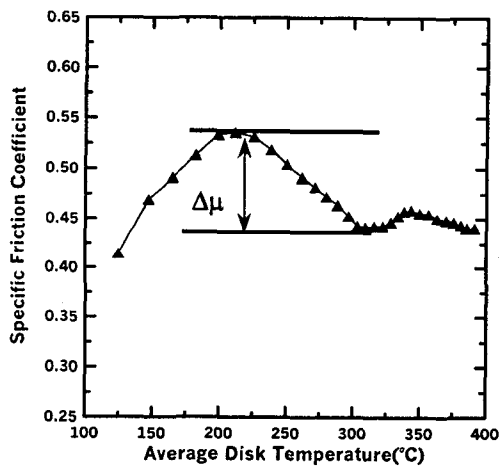


Fig. 7. The definition of $\Delta\mu$ at the constant interval test(CIT).

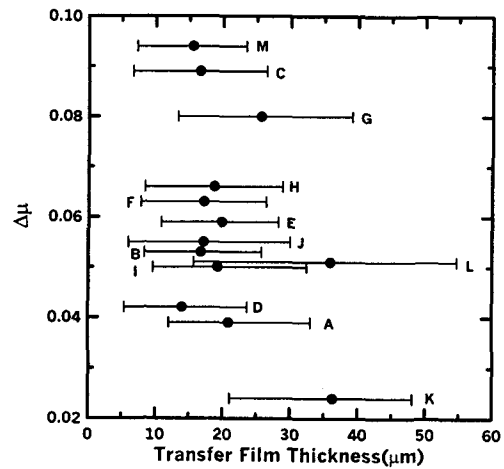


Fig. 8. The amount of fade during drag test plotted as a function of transfer film thickness on the rotor surface.

따라서, Fig. 7 에서와 같이 200°C 이후의 최대 마찰계수 감소량을 $\Delta\mu$ 로 정의하고, 전이막의 두께와 $\Delta\mu$ 의 관계를 Fig. 8 에 나타내었다. $\Delta\mu$ 는 전이막의 두께와는 무관하였으며, 반면에 Fig. 9 에서와 같이 모스경도가 높은 원료의 첨가에 따라 $\Delta\mu$ 가 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 경향성을 설명하기 위하여 Fig.10 에 전이막의 두께와 모스경도가 다른 세 개의 시편에 대한 온도 및 마찰계수를 나타내었다. 마찰계수의 변화는 온도에 따라 세 단계로 구분되었다

초기 단계(200°C 이하)는 모든 시편에서 온도의 증가에 따라 마찰계수가 상승하였다. 상승폭은 비슷하지만, 마찰계수의 수준에 차이가 나타났다. 이것은 3-2 절에서 나타난 바와 같이 모스경도에 따른 마찰계수

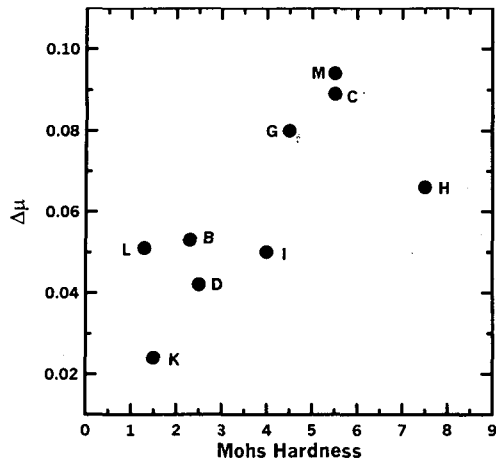


Fig. 9. The amount of fade as a function of Mohs hardness of the ingredients that were added more in the friction material specimen.

의 차이로 사료된다.

두 번째 단계(200°C - 300°C)에서는 마찰재의 열분해에 의해 마찰계수가 감소하는 단계로서, 계면에 전이막이 충분하게 형성되는 단계이다. 온도에 따른 전이막 형성 정도를 증명하기 위하여 표준시편에 대하여 별도로 실험하여 온도와 전이막 두께의 관계를 Fig.11 에 나타내었으며, 전이막이 200°C 이상에서 형성되어 유지됨을 확인할 수 있었다. 이 단계에서는 두꺼운 전이막이 형성됨에 의해 세 시편의 마찰계수가 일정한 값으로 수렴하였으며, 상호간의 마찰계수차이가 감소한 것으로 사료된다.

세 번째 단계(300°C 이상)에서는 전이막이 안정하게 유지되는 단계로서 세 시편

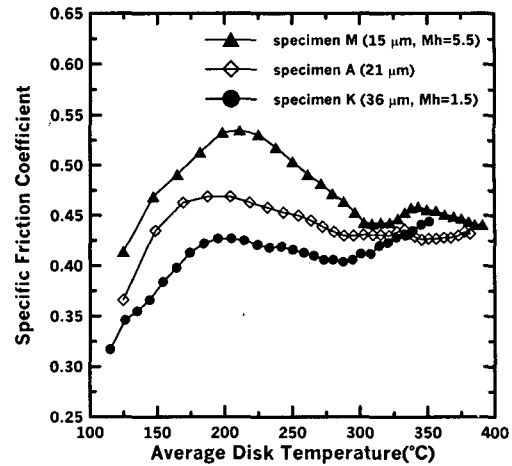


Fig. 10. The change of friction coefficient as a function of temperature. The Mh indicates Mohs hardness of the ingredients that were added more in the friction material specimen.

이 유사한 마찰계수를 나타내었다. 이 단계에서는 Fig. 11에서와 같이 계면에 전이막이 충분하게 형성된다. 따라서, 마찰계수 조절에 전이막의 역할이 증가한 것으로 판단되며, 그로 인하여 시편들 간에 유사한 마찰계수를 나타내는 것으로 사료된다. 전이막이 충분히 형성되지 않는 저온과는 다르게 이 구간에서는 마찰계수가 모스경도에 무관하였다.

결과적으로, 시편들 간의 Δμ의 크기는 초기 단계에서 마찰계수의 최대값의 크기에 따라 변화하며, 원료의 모스 경도가 이러한 최대값의 변화에 주요한 영향을 미치

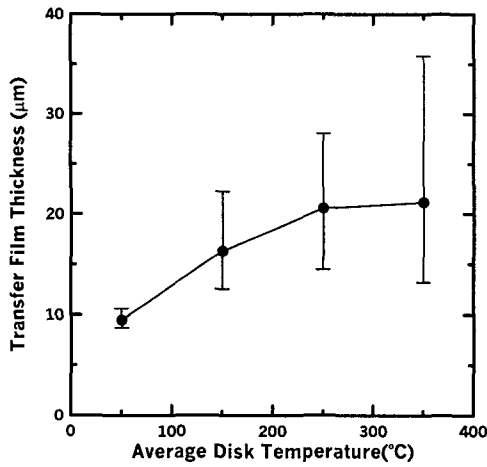


Fig. 11. The change of transfer film thickness as a function of temperature for the specimen A.

는 것으로 판단된다.

3. 결론

각 원료의 증가에 따른 전이막 형성 및 마찰특성의 변화를 고찰하기 위하여, 13 개의 서로 다른 마찰재를 대상으로 실험하였다. 마찰시험은 pad-on-disk 형태의 마찰시험기를 사용하였으며, 각 원료의 증가가 전이막 형성, 마찰계수의 크기, 마찰계수의 진폭, 마찰계수의 안정성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 본 연구에서 실험한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 전이막 형성을 촉진시키는 주요한

원료는 고체윤활제(흑연, MoS₂)였으며, 환원분철(iron powder)도 전이막 형성에 도움을 주었다.

2. 평균마찰계수의 크기는 전이막의 두께와는 무관하였으며, 첨가 원료의 모스경도에 비례적으로 증가하였다.

3. 마찰계수의 진폭은 두꺼운 전이막의 형성에 따라 감소하였다.

4. 온도에 따른 마찰계수의 안정성은 전이막의 두께보다 첨가원료의 모스경도에 의존하였다. 모스경도가 높은 원료의 첨가는 마찰계수의 안정성을 저해하였다.

참고문헌

1. S. K. Rhee, M. G. Jacho, and P. H. S. Tsang, "The Role of Friction Film in Friction, Wear, and Noise of Automotive Brakes", SAE Paper, No. 900004, 1990.
2. M. Börjesson, P. Ericsson, C. Kuylenstierna, P. Nilsson, and T. Hermansson, "The role of friction films in automotive brakes subjected to low contact forces", ImechE, C444/026/93, 1993, pp. 259-267.
3. A. Wirth, D. Eggleston, R. Whitaker, "A fundamental tribochemical study of the third body layer formed during automotive friction braking", Wear, Vol. 179, 1994, pp. 75-81.
4. V. K. Jain and S. Bahadur, "Material transfer in polymer sliding", Proc. Int. Conf. On Wear of Materials, St. Louis, MO, April

- 25-28, 1977, ASME, New York, pp.144-152.
5. V. A. Smurugov, "On the thickness and effectiveness of friction transfer films", *Soviet Friction and Wear Journal*, 9(1), 1988, pp.122-125.
 6. M. G. Jacko, P.H.S. Tsang and S. K. Rhee, "Wear debris compaction and friction film formation of polymer composites", *Wear*, 133 (1989) pp.23-38.
 7. J. K. Lancaster, "Transfer lubrication for high temperatures: A review", *Journal of Tribology*, vol. 107 Oct. 1985, pp.437-443.
 8. E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, 2nd edn., John Wiley & Sons, New York, 1995, 96-104p.
 9. G.C. Pratt, "Recent developments in PTFE-based dry sliding materials and treatments", *Proceedings of IMechE*, 1967, No. 16, pp.132-143.
 10. S.J. Kim and H. Jang, "Friction characteristics of non-asbestos organic and low-steel friction materials: the comparative study", *KSTLE International Journal*, 1, 1, (2000) 1-7.
 11. M.H. Cho, R. H. Basch, J.W. Fash, H. Jang, "Tribological study of gray cast iron with NAO and low-metallic friction materials: the effect of rotor microstructure", submitted for publication at *Tribology International*.