

자동차용 마찰재에 사용되는 흑연과 마그네시아에 따른
전이막과 마찰특성에 관한 연구

배은갑, 윤장혁, 장 호

고려대학교 신소재공학과

**The Effects of Graphite and Magnesium Oxide in Automotive Friction
Materials on Friction and Formation of Transfer Film**

Eun-Gap Bae, Jang-hyuk Yoon and Ho Jang

Department of Advanced Materials Engineering, Korea University

Abstract – A systematic study of the role of transfer films on friction properties was performed with various temperatures in the brake system. An NAO friction material specimens containing 9 ingredients were tested using a pad-on-disk type friction tester. A new method of measuring the transfer film thickness was developed by considering the electrical resistance of the transfer film using a 4-point probe technique. The properties of transfer film such as surface morphology and film distribution varied according to the relative amount of graphite and magnesium oxide. By using SEM, it was possible to obtain information about the chemical composition of the transfer film. Results showed that there detected a threshold value of the relative amount of a two active materials to maintain a certain thickness of a transfer film. Results also showed that formation of friction layer generated on the friction surface was strongly affected by chemical action of two ingredients during sliding due to chemical reaction of solid lubricants at different interface temperature. The results suggested that no apparent relationship between transfer film thickness and the average friction coefficient was founded and friction characteristics were affected more by the property of the solid lubricant and abrasive in the material.

Key words – transfer film, electrical resistance, graphite, magnesium oxide, friction coefficient.

1. 서 론

자동차 브레이크용 마찰재는 12~20 종의 기본원료로 구성되는 복합재료로서 다양한 제동조건에서 일정한 마찰력을

유지해야 하며, 안전성과 내구성 그리고 안락성이 요구된다[1]. 특히 제동시 마찰재와 로터 사이에 형성되는 전이막은 제동온도, 차량속도, 가압력, 습도 등에 따라 다양한 두께와 분포를 가지게 된다.

또한 전이막 형성과 마찰특성은 마찰온도에 따라 민감하게 변화하며 마찰재의 원료중 고체윤활제와 연마제가 전이막에 크게 영향을 미치는 원료로 알려져 있다 [2].

자동차 브레이크용 마찰재에 첨가되는 흑연은 대표적인 고체윤활제로 층상구조(lamellar layer structure)를 가지며 각 층간 결합은 약한 Van der Waals 결합을 이루고 있다. 층간의 약한 결합은 마찰시 윤활성을 증가시키며, 상대적으로 높은 습도와 상온에서 더욱 향상된 윤활효과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 현재 고체윤활제가 전이막의 형성과 마찰특성에 미치는 영향에 관한 연구는 발표된 바 있지만 마찰계면에 형성되는 전이막의 형성기구에 관한 연구는 찾아보기 힘든 실정이다. 이는 마찰시 형성된 전이막의 두께변화가 마찰재로부터 분리된 마모입자들의 기계적, 화학적인 반응으로 인해 압축 및 응착되는 복잡한 과정을 나타내기 때문이라 사료된다. 또한 전이막의 두께는 다양한 제동조건에 따라 변하므로 전이막의 두께와 형상에 관한 연구는 충분한 실험을 통해 적절한 조건을 선정하는 것이 중요하다. 특히, 마찰시 계면에서 발생하는 접촉온도의 변화는 전이막의 특성에 민감하게 작용하므로 온도변화에 따른 원료의 특성을 고려해야 한다.

따라서 본 연구에서는 전이막 형성에 크게 영향을 미치는 고체윤활제와 연마제의 상대량을 변화시키고, 전이막의 두께 및 마찰특성을 고찰하기 위하여 서로 다른 4 가지 온도구간을 설정하여 마찰시험을 수행하였다.

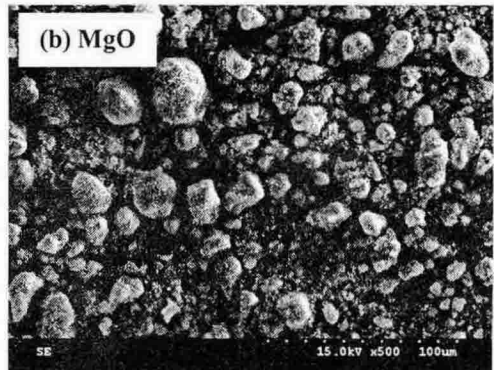
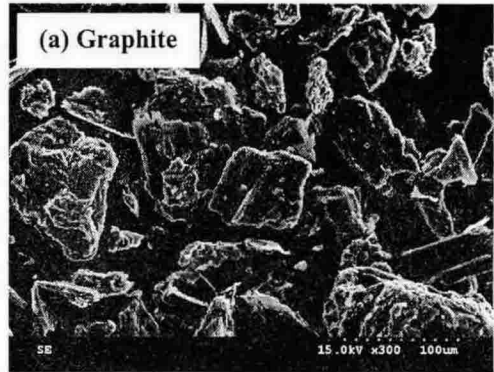


Fig. 1. SEM micrographs of solid lubricant (a) graphite and abrasive (b) MgO used in this study.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 마찰재 시편은 비석면 유기질(non-asbestos organic) 마찰재로서 제조에 사용된 원료 및 함량을 Table 1에 나타내었다. 원료의 상대량에 따른 전이막과 마찰특성을 고찰하기 위해 흑연과 마그네시아의 상대량을 변화시켜 총 4종의 마찰재를 제작하였다. 마찰재의 제조공정은 계량, 건식혼합, 예비성형, 본성형 및 열처리의 순서로 제작되었으며 구체적인 조건은 이미 발표한 바 있다[3]. 본 연구에 사용한 마찰재의 표면경도는 Rockwell

경도기(Akashi Rockwell ARK-600)의 HRs 규격으로 57 ± 2.5 을 나타내었다.

Table 1. The composition of the friction material used in this study [vol.%]

Ingredients	G13M5	G13M1	G4M5	G4M1
Binder	14	14	14	14
Fibers	37	37	37	37
Graphite	13	13	4	4
MgO	5	1	5	1
Friction modifier	15	15	15	15
Filler	16	20	25	29

본 연구에서 사용된 마찰 시험기는 pad-on-disk 형태의 정속 마찰 시험기를 사용하였으며, 시험중의 마찰력, 가압력, 디스크 온도, 회전속도는 PC-based DAQ(LAB-PC-1200, NI) 시스템을 이용하여 100Hz 의 데이터 처리속도로 저장하였다. 마찰재의 상대재로는 직경이 12cm 두께가 2.5cm 인 회주철 로터를 사용하였다.

마찰시험은 burnishing, film remove test, constant interval test(CIT)로 구성되어 있다. 전이막 제거하는 실험은 저압의 압력조건 하에 저속으로 끌기를 함으로써 burnishing 과정에서 형성된 전이막을 제거하기 위한 과정이며, CIT 시험은 전이막 형성 및 평균 마찰계수를 측정하기 위한 실험이다. 마찰시험의 구체적인 실험조건은 Table 2 에 나타내었다.

전이막의 두께측정은 광학현미경을 이용한 방법과 저항을 측정하는 방법을 사용하였다. 광학현미경을 이용한 방법은 고배율(x840)에서 미세눈금을 이용하여 전이

막과 회주철 금속표면 사이의 높이차를 측정하는 방법이며, 전기저항 측정법은 마찰시 형성된 전이막에 6mm x 6mm 의 정사각형 모양으로 silver paste 를 코팅하고 전기저항을 측정하여 두께를 비교하는 방법이다. 이 방법은 전이막이 복합재료로 구성된 부도체이므로 전이막의 두께가 증가함에 따라 저항이 비례하여 증가하는 원리를 이용한 것이다. 실제로 연구과정에 있어서 저항과 전이막의 두께와의 관계가 비례함을 발표한 바 있다[4].

Table 2. Friction test procedure used in this study

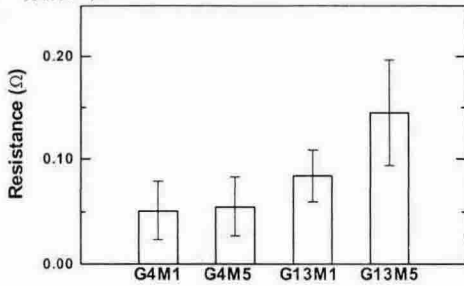
	IBT=50°C, Pressure=0.82MPa
Burnishing	Drag=10sec, Duration=10sec Speed=1000rpm, Time=600sec
Remove test	IBT=50°C, Pressure=0.5MPa Speed=100rpm, Time=600sec
Constant interval test	IBT=50, 100, 150, 200°C Pressure=0.82MPa, Drag=10sec, Duration=10sec Speed=1000rpm, Time=600sec

3. 실험결과 및 고찰

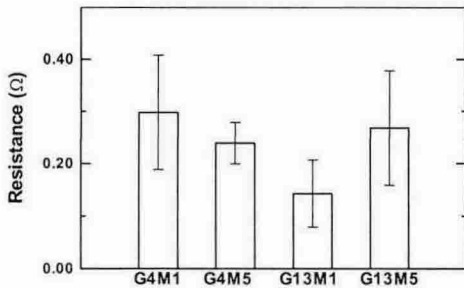
3-1. 전이막의 두께

마찰재의 원료중에서 고체윤활제와 연마제의 상대량에 따른 전이막의 두께와 마찰특성을 고찰하기 위해 온도구간을 각각 50°C~100°C, 100°C~150°C, 150°C~200°C, 200°C~250°C 의 4 구간으로 변화하여 600 초동안 constant interval test 를 시행하였다. Fig. 2 에 원료의 상대량과 온도변화에 따른 전이막의 두께를 각각의 온도구간별로

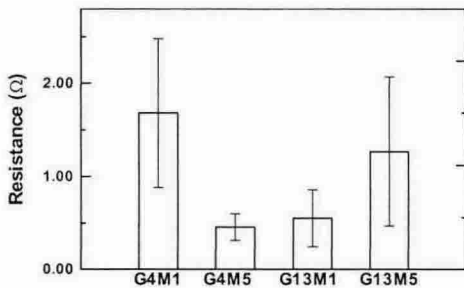
전이막의 저항치로 나타내었다. 고체윤활제와 연마제가 상대적으로 많은 G13M5의 경우 온도구간 50~100°C 와 200~250°C에서 전이막의 두께가 상대적으로 두껍게 형성되었다. 그러나 저온에서의 저항값은 실제로 쌓인 전이막의 두께가 수 μm 이하의 얇은 전이막으로 원료의 상대량에 따른 전이막의 두께차이는 크지 않음을 알 수 있었다.



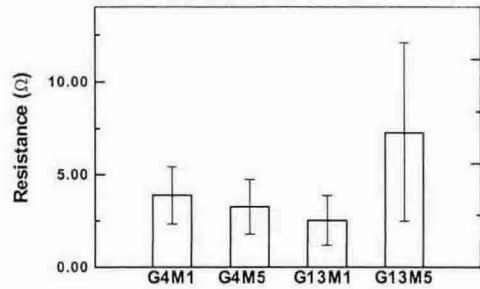
(a) 50~100°C



(b) 100~150°C



(c) 150~200°C



(d) 200~250°C

Fig. 2. The average transfer film thickness as a function of specimen under constant initial temperature test.

특히, 200~250°C 구간에서의 전이막 두께는 고체윤활제로 사용된 흑연의 마모입자가 고온에서 열분해 되지 않고 마찰계면에 존재하는 연마제의 입자와 결합하여 상호보완효과를 나타냄으로써 표면에 쉽게 응착되어 두꺼운 막을 형성한 것으로 사료된다. 또한 G13M5의 경우 저온에서의 전이막 두께를 볼 때, 고체윤활제와 연마제가 초기에 계면에서의 응착이 상대적으로 쉽게 이루어짐으로써 온도 상승시, 전이막의 두께가 두껍게 형성됨을 추정할 수 있었다.

본 실험을 통해 NAO 마찰재의 전이막 형성 구간은 200~250°C로 예측할 수 있었으며, 이 온도구간에서 연마제의 함량이 전이막 형성에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다. 또한 200°C 이상에서 원료의 반응을 고려할 때 결합제와 유기질 원료의 열적분해 현상과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다. 온도에 따른 전이막의 형상(Fig. 3)을 고찰해보면 상대적으로 높은 온도에서 균일한 전이막(transfer film)과 마찰막(friction film)이 형성됨을 알 수 있

었고 반면에 낮은 온도에서는 불균일한 전이막과 마모입자들이 분리된 마찰막을 관찰할 수 있었다.

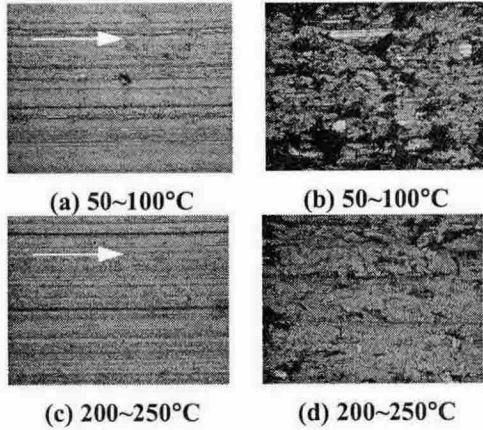
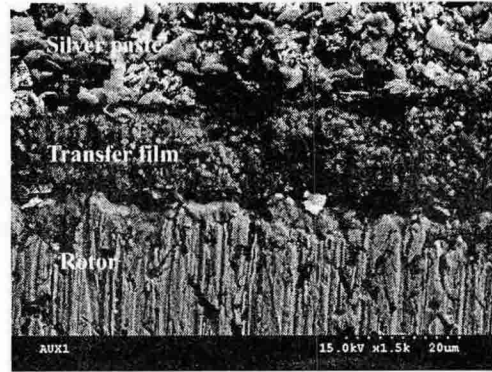


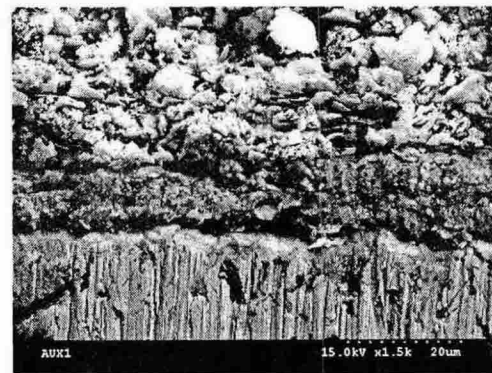
Fig. 3. A morphology (x 100) of the transfer film (a, c) on the disk surface and friction film (b, d) on friction materials (G13M5) after friction test. Arrows indicate sliding direction.

전기 저항방법과 광학현미경을 이용하여 전이막의 두께를 예측할 수 있지만 실제 전이막의 두께를 계산하는 것은 쉽지 않다. 그러나, Fig. 4 에서 볼 수 있듯이 G13M5, G4M1 시편의 경우 150~200°C 구간에서 형성된 전이막의 두께는 로터의 단면을 관찰하였을 경우 실제로 10~15 μm 의 두께를 나타낸다. 따라서 1.2 Ω , 1.5 Ω 의 평균저항값을 보정하여 실제 전이막의 두께를 환산할 수 있다. 또한 마찰시 형성된 전이막은 불균일하게 분포되어 있으므로 오차범위와 함께 평균값으로 표현하였다.

3-2. 평균마찰계수



(a) G13M5

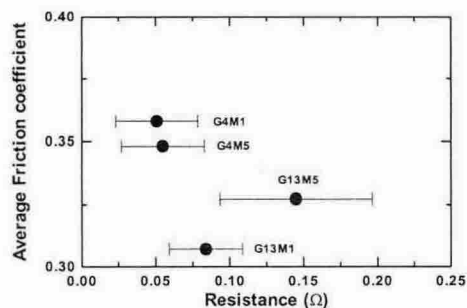


(b) G4M1

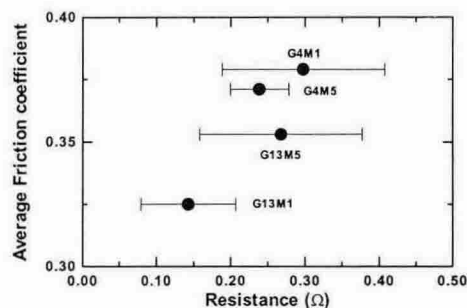
Fig. 4. SEM micrograph of transfer film thickness cross section side of rotor at 100~150°C temperature used in this study.

전이막의 두께와 마찰계수와의 상관관계를 고찰하기 위해 전이막의 두께에 따른 마찰계수를 Fig. 5 에 나타내었다. 본 실험에서 마찰계수는 전이막의 두께변화와 무관하였다. 그러나 마찰계수의 거동은 초기 제동온도의 상승에 따라 증가하였다가 다소 감소하는 경향을 보여주었다. 특히 200°C 에서의 마찰계수의 증가는 고온에서 형성되는 탄화숯(carbonaceous char)에 의한 응착의 결과로 사료된다. 실제로 제동시에 결합제에서 형성되는 탄화숯은 마찰계면

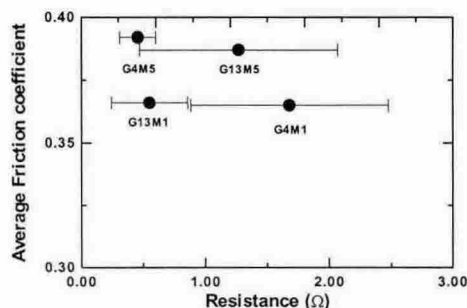
에서 고체윤활제와 연마제의 성분과 함께 전이막을 형성시킴으로써 열분해 되기전 까지 강한 응집력(cohesive force)을 나타내는 것으로 알려져 있다[6]. 특히, 200~250°C 에서의 마찰계수의 거동은 마찰재를 구성하는 원료의 열적특성이 아닌 마찰면에 형성된 전이막의 두께와 분포에 크게 영향을 받는다.



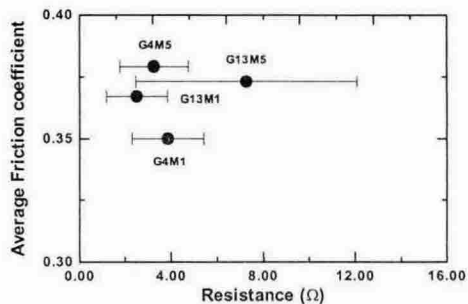
(a) 50~100°C



(b) 100~150°C



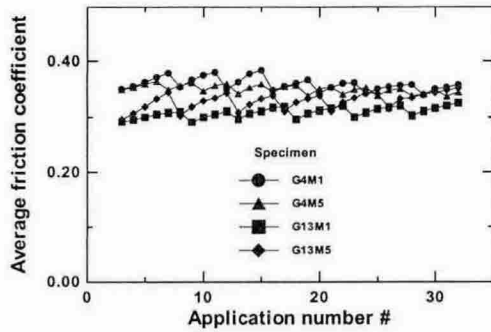
(c) 150~200°C



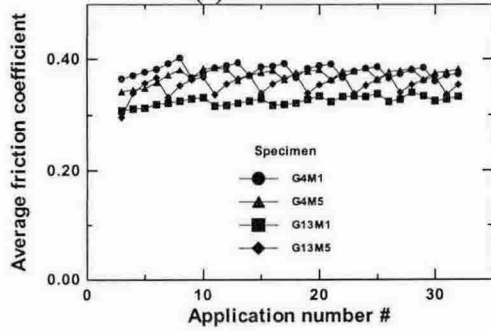
(d) 200~250°C

Fig. 5. The average of friction coefficient as a function of transfer film thickness under constant initial temperature test

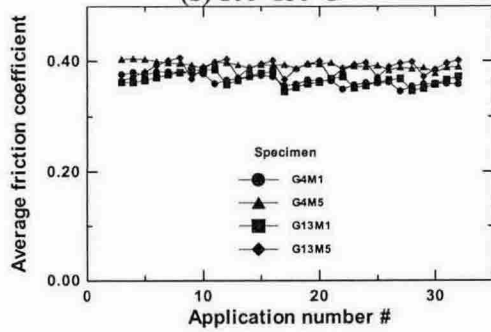
원료의 상대량과 온도변화에 따른 마찰계수의 거동을 고찰하기 위해 고체윤활제와 연마제의 상대량을 변화시켜 마찰재를 제조한 후 초기제동온도를 변화시켜 10 초 간격으로 constant interval test 를 시행하였다. Fig. 6 은 초기 제동 온도에 따른 마찰계수의 거동을 나타낸 것이다. 저온영역에서의 마찰계수 변화는 각 원료의 상대량에 따라 불안정한 거동을 나타낸 반면 고온영역에서는 상대적으로 안정된 마찰계수의 분포를 나타내었다. 이것은 저온영역에서의 불균일한 전이막의 분포가 고온영역과는 달리 마찰력의 차이를 유발하여 나타난 결과로 사료된다. 이와 같이 마찰계수의 안정성은 마찰시 계면에 형성되는 전이막의 분포와 밀접한 관계를 가지며, 실제로 고체윤활제의 함량이 많을수록 균일한 전이막을 형성하여 안정된 마찰계수의 거동을 나타내는 것으로 평가된다.



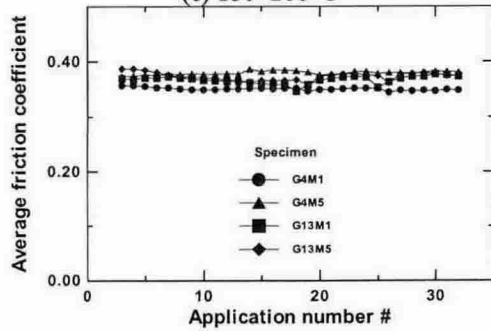
(a) 50~100°C



(b) 100~150°C



(c) 150~200°C



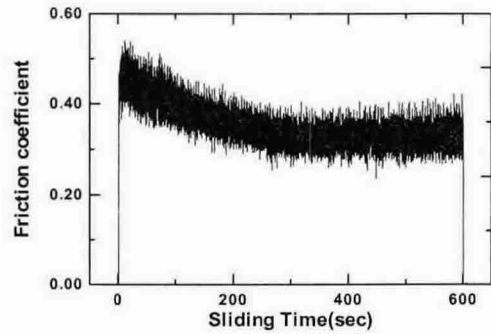
(d) 200~250°C

Fig. 6. The variations of friction coefficient

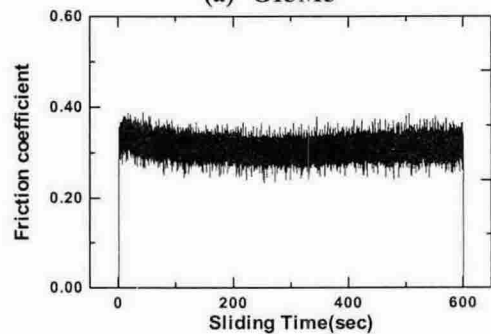
as a function of number of application during constant interval test (applied pressure: 8.2MPa, speed: 1000rpm).

3-3. 마찰력의 변화량

마찰력의 변화량은 제동시 발생하는 진동의 원인이 되며, 마찰재의 경도 및 로터의 run-out 에 영향을 받게 된다. 본 연구에서 사용된 마찰재의 표면경도의 차이는 적었으며, 로터의 초기 run-out 을 10 μ m 정도로 고정하였다. Fig. 7 은 고체윤활재와 연마재의 상대량이 마찰계수의 진폭에 미치는 영향을 고찰하기 위해 초기 제동 온도 200°C 에서 저속 저압의 조건으로 600 초 동안 끌기시험을 하였다.



(a) G13M5



(b) G13M1

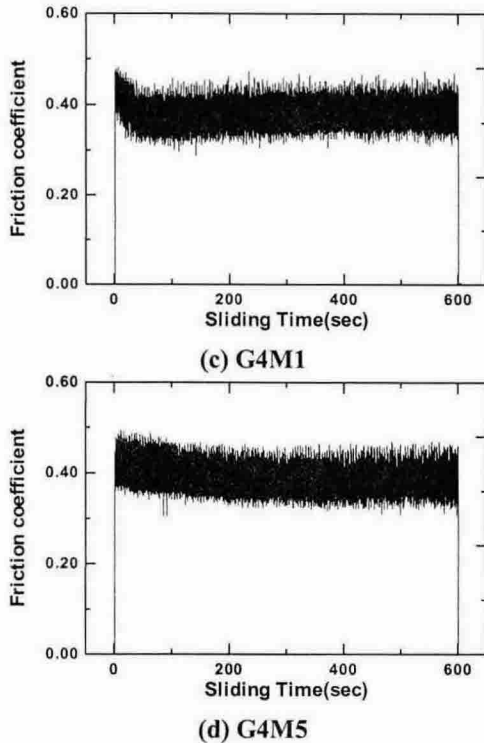


Fig. 7. The oscillations of the friction coefficient during drag test for G13M5, G13M1, G4M1, and G4M5 (Speed: 100rpm, Pressure: 5MPa)

고체윤활제의 함량이 많고 연마제의 함량이 적은 G13M1 시편의 경우 상대적으로 진폭의 변화가 작게 나타났으며 비교적 일정한 마찰력의 분포를 보여주었다. 그러나 시편 G13M1의 경우 얇은 전이막의 두께를 나타내었다. 이러한 결과는 고체윤활제의 함량이 많았지만 연마제의 부족으로 낮은 마찰계수를 나타냄으로써 효과적인 전이막 형성에 저해요소로 작용한 것으로 사료된다. 반면에 상대적으로 고체윤활제의 함량이 적은 시편의 경우 진폭과 전이막의 두께차이는 크지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 마찰제에 사용된 흑연과 마그네시아의 상대량에 따른 전이막 형성 및 마찰특성을 고찰하기 위하여 pad-on-disk 형태의 마찰시험기를 사용하여 4개의 서로 다른 마찰제를 대상으로 4구간의 온도 영역에서 마찰시험을 수행하였다. 본 연구에서 실험한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 초기제동온도 시험을 통해 NAO 마찰제의 전이막 형성에 영향을 주는 온도구간은 200~250°C임을 확인할 수 있었다.
2. 전이막 두께는 고체윤활제와 연마제에 크게 영향을 받았으며, 고온영역에서 고체윤활제와 연마제의 함량이 증가할수록 두껍게 형성되었다.
3. 평균마찰계수의 거동은 전이막의 두께와 무관하였으며, 저온보다는 고온에서 안정한 마찰계수의 변화를 나타내었다.
4. 마찰계수의 진폭은 고체윤활제의 함량이 증가할수록 감소하였으나 전이막의 형성과는 무관하였다.

참고문헌

1. H. Jang, J.J. Lee, S.J. Kim, K.Y. Jung, "The Effect of Solid Lubricants on Friction Characteristics," SAE Technical Paper 982235, pp.1-8, 1998.
2. A. Wirth, D. Eggleston, R. Whitaker, "A Fundamental Tribochemical Study of the Third Body Layer Formed during Automotive Friction Braking", Wear, Vol. 179, pp.75-81, 1994.

3. S.J. Kim, H. Jang, "Friction Characteristics of Non-asbestos Organic and Low Steel Friction Materials: The Comparative Study", *KSTLE International Journal*, Vol.1, No.1, pp.1-7, 2000.
4. 조민형, 이재영, 김대환, 정근중, 최천락, 장호, "자동차용 마찰재에서 각 원료의 상대량에 따른 전이막 형성 및 마찰특성의 변화," 한국윤활학회, 제 33 회 춘계학술대회 초록집, pp.271-279, 2001.
5. J.K. Lancaster, "Transfer Lubrication for High Temperatures: A Review", *Journal of Tribology*, Vol.107, pp.437-443, 1985.
6. H. Jang, S.J. Kim, "The Effects of Antimony Trisulfide(Sb_2S_3) and Zirconium Silicate($ZrSiO_4$) in the Automotive Brake Friction Material on Friction Characteristics," *Wear*, Vol.239, No.2 pp.229-236, 2000.
7. M.G. Jacko, P.H.S Tsang, S.K. Rhee, "Wear Debris Compaction and Friction Film Formation of Polymer Composites", *Wear*, Vol.133, pp.23-38, 1989.
8. E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, 2nd edn., John Wiley & Sons, New York, pp.96-104, 1995.
9. J-M. Martin, C. Grossiord, T.L. Mogne, J. Igarashi, "Transfer Films and Friction under Boundary Lubrication", *Wear*, Vol.245, pp.107-115, 2000.
10. 김성진, 장호, "자동차용 마찰재에 사용되는 결합제와 강화섬유에 따른 마찰 및 마모특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제 15 권, 제 4 호, pp.314-320, 1999.