

철강재료위 coating된 PTFE 막층의 미끄럼 마찰마모특성 연구

이한영[†]

계명대학교 신소재공학과

A Study of Sliding Friction and Wear Properties for PTFE Layer coated on Steel

Lee, Han-Young[†]

Dept. of Advanced Materials Eng. Keimyung University, Korea

Abstract – PTFE is generally utilized as the form of composites with adding various fillers. The purpose of this paper lies on clarifying the friction and wear properties of the PTFE coating layer on steel. Especially, the effects of PTFE powder size for coating and surface roughness of the counter material on the properties are investigated. Sliding friction and wear tests are conducted at several sliding speeds by employing two types of PTFE coating layer using different powder sizes. One type of coating layer is composed of uniform fine powder, whereas the other type is made up of mixture powder of different sizes.

As results, it is found that PTFE coating layer are effective to improve the wear resistance and to reduce the friction coefficient. It is clear that PTFE coating layers are abrasively removed by asperities of the counter material during sliding contact. However, PTFE coating layer with uniform fine powder shows somewhat better wear resistance than that with mixture powder of different sizes in low sliding speed region. It can be seen that the wear of the coating layer are drastically reduced because wear fragment from counter material are transferred to the coating layer. On the other hand, friction coefficient is shown not to be directly related with PTFE powder size in coating layer.

Key words – PTFE coating, particle size, surface roughness, sliding, friction, wear

1. 서 론

Teflon이라는 상품명으로 시판되고 있는 불소수지 PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene)는 미끄럼속도와 무관하게 마찰계수가 낮고 내열성 및 내약품성이 우수하지만 내마모성이 열악하고 비점착성을 나타내는 것으로 알려져 있다[1,2]. 현재 이 PTFE는 베어링소재로 널리 사용되고 있으나 이 경우 대부분 PTFE 분말을 세라믹스나 금속, 플라스틱 등과 함께 첨가하여 복합재료의 형태로 사용[3-5]되거나 섬유상으로 하여 직포형태[1,2]로 적용되고 있다. 최근은 금속의 마찰특성향상을 목적으로 하는 표면개질측면에서 PTFE 미분말을 금속면에

코팅을 하여 고체윤활제로써 활용하고자하는 연구가 주목받고 있다[1,2].

자동차의 클러치는 클러치 커버의 압축판에 의해 회전하는 플라이휠과 마찰재(clutch facing)가 압착되어 발생하는 마찰력으로 엔진의 동력을 미션에 전달하거나 차단하는 자동차부품이다[6]. 클러치 내에 많은 마찰 부품 중 diaphragm은 회전에 의한 원심력으로 primary wheel cover와 접촉하게 되고 이때 발생하는 마찰력을 이용하는 부품이다. 그러나 이 부품은 작동 중 불안정한 마찰에 의해 진동소음을 유발하는 것으로 밝혀져 현재 이들의 마찰성능향상을 위한 여러 가지 방안이 강구되고 있다. 이러한 측면에서 diaphragm의 표면에 전술한 PTFE 코팅을 적용하는 재료설계는 문제해결의 한 방안이 될 것이다. 그리고 PTFE 코팅층의 정확한 마찰

[†]주저자 · 책임저자 : lhy@kmu.ac.kr

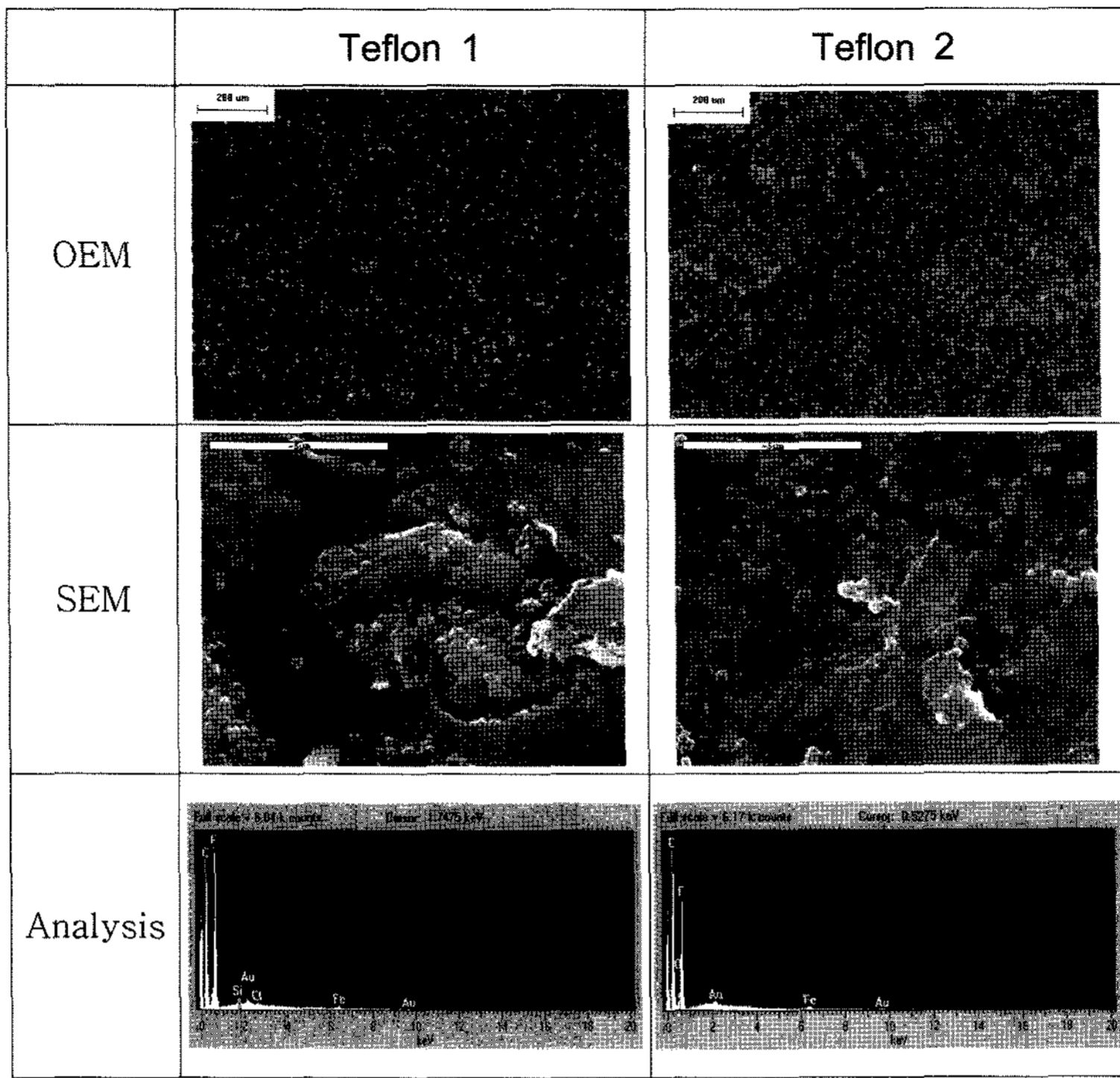


Fig. 1. Comparison between two PTFE coating layers.

마모특성 파악은 실적용 측면뿐만 아니라 향후 PTFE의 코팅의 범용적인 적용측면에서 중요한 의미를 가질 것이 분명하다.

본 연구에서는 PTFE 원료분말의 입도는 동일하나 크기분포가 상이한 두 종류의 원료분말을 diaphragm 소재 위에 각각 coating 하고 이들 코팅층에 대해 거칠기를 두 종류로 한 primary wheel cover 재료를 상대로 미끄럼 마찰마모특성을 조사하고, 해석하였다.

2. 시험편 및 실험방법

시험편은 diaphragm의 소재인 1.2 mm 두께의 탄소강 구강 STC5(0.8~0.9%C)의 강판을 10×6.4 mm로 가공한 뒤 이들 위에 C와 F가 강한 화학적 결합을 하고 있는 불소수지 PTFE 코팅을 하였다. 이때 코팅 원료분말은 DuPont사의 제품 중 분말이 뭉쳐져 크기가 불균일한 Teflon 1 분말(제품번호 #313)과 미세하고 균일한 입자로 구성된 Teflon 2 분말(제품번호 #406)을 사용하였다[7]. 이들의 coating 공정은 원료분말을 모재위에 도포하고 소성을 하는 방식으로 2차례 반복하는 것으로 알려지고 있다[7].

상대재로는 primary wheel cover의 소재인 열간압연강판 SHP1(0.15%C, 0.6%Mn, 0.05%P, 0.05%S)을 사용하여 소정의 디스크의 형상(80×4 mm)으로 가공하였다. 그리고 PTFE 코팅층의 마찰마모특성에 미치는 상대재의 거칠기 영향을 조사하기 위해 거칠기(Ra)가 0.828 μm인 것과 0.048 μm인 두 종류의 상대재를 준비하였다.

미끄럼마찰마모시험은 plate on disc형의 시험기를 사용하였다[8]. 시험조건은 클러치의 실가동 조건인 pv 값(2.1 MPacm/s)을 고려하여 하중을 326 g으로 일정하게 하고 접촉부의 선속도를 0.42, 1, 2, 3, 4, 5 m/s까지 6조건을 선정하였다. 이때 총마찰거리는 10 km까지로 하고 모든 시험은 실온 무윤활 상태에서 행하였으며 마모량은 소정의 마찰거리마다 중량감소를 측정해 산출하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3-1. PTFE 코팅층 분석

Fig. 1은 Teflon 1과 Teflon 2 두 종류의 분말을 이용해 코팅한 표면의 광학 현미경(OEM) 및 주사전

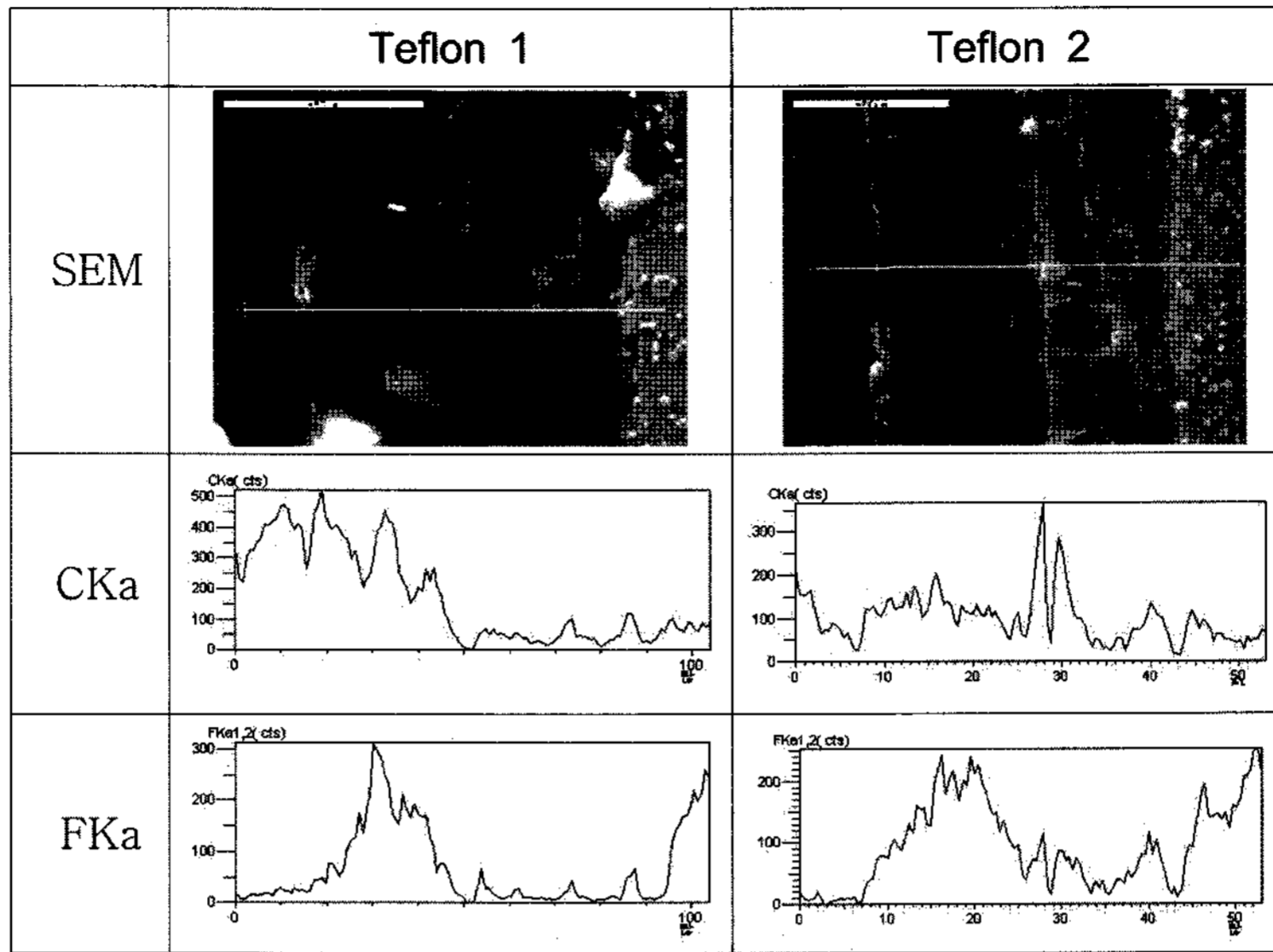


Fig. 2. Cross-sectional SEM images of each PTFE coating layer and the results of C and F analysis.

자현미경(SEM) 사진과 면분석의 결과를 낸 것이다. 그림에서도 보듯이 두 코팅 표면은 양상이 전혀 상이한 것을 알 수 있다. Teflon 1 코팅층의 경우는 평탄한 바탕에 조대한 입자와 미세한 입자들이 혼재되어 있고 조대한 입자주변에는 틈이 관찰되고 있다. 반면 Teflon 2 코팅층의 경우는 입자가 완전히 용해되어 있는 양상을 보이고 있다. 그러나 일부 아주 미세한 입자가 관찰되나 모재와는 완전한 결합을 이루고 있는 것으로 밝혀졌다. 또한 이 두 코팅층의 조성의 측면에서는 Teflon 2에서 F의 양이 다소 적은 것이 확인된다.

Fig. 2는 이들 코팅층 단면의 SEM사진과 C/F에 대한 선분석의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 이들 코팅층은 2회 코팅처리되어 복층으로 구성된 것을 알 수 있으나 코팅층의 두께는 부위별로 다소 상이하였다. 그리고 Teflon 1의 경우는 코팅층 사이에, Teflon 2의 경우는 모재와의 계면에 균열이 관찰되나 이들도 국부적으로 존재하는 것으로 밝혀졌다. 또한 두 코팅층 사이에 C/F의 분포도 다소 상이한 것으로 밝혀졌으나 이러한 차이에 따른 해석은 본 연구에서 제외하였다.

3-2. 미끄럼 마찰마모특성

Fig. 3은 diaphragm의 소재인 SK5을 PTFE 코팅을 하지 않고 하중 326 g, 0.42 m/s의 속도에서 미끄럼 거리에 대한 마모량 및 마찰계수의 변화를 나타낸 것

이다. 그림에서도 보듯이 미끄럼거리 증대에 따라 마모량은 많아지나 초기마모영역에서 증가가 크고 정상마모

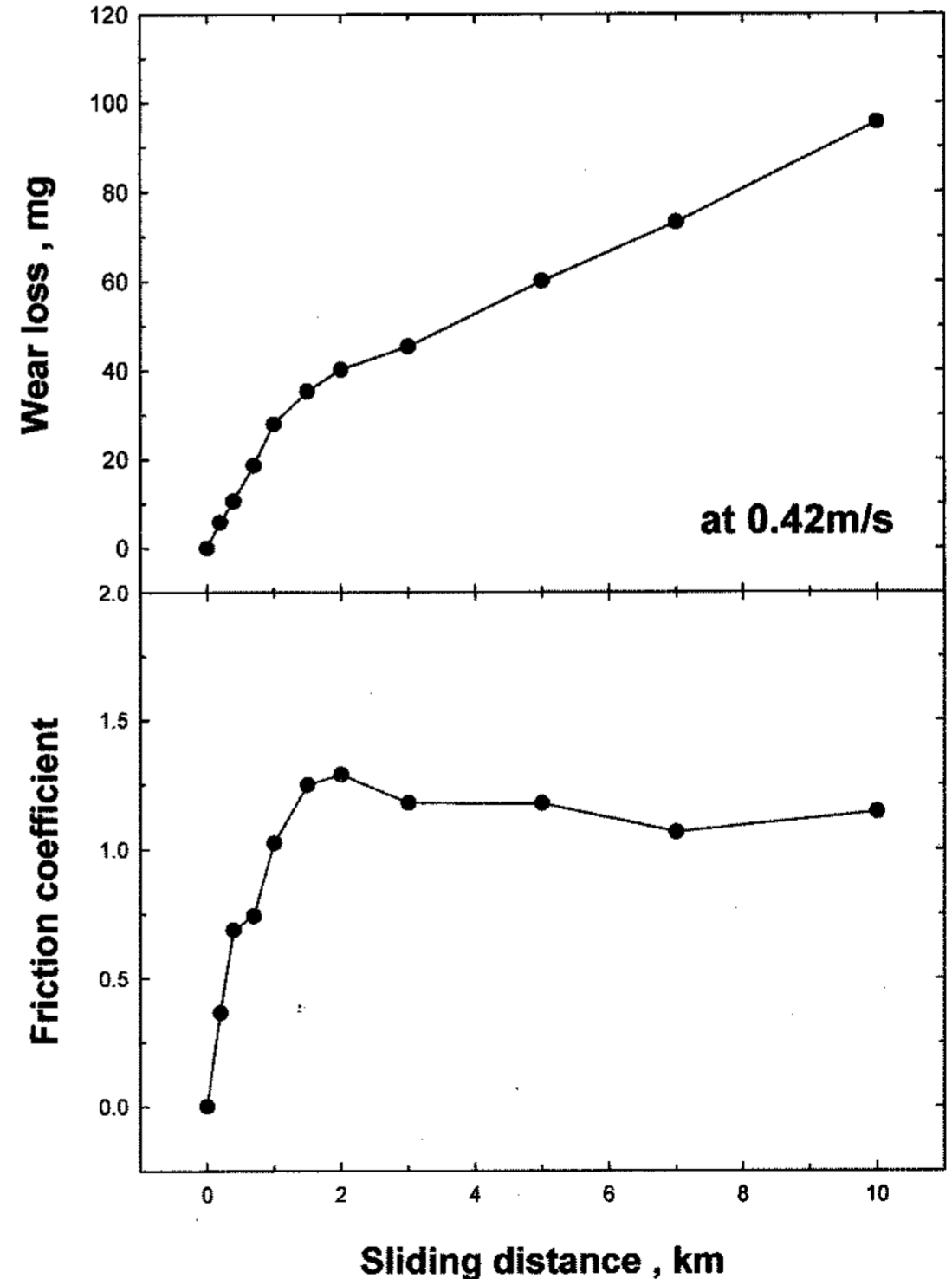


Fig. 3. Variation of wear loss and friction coefficient with sliding distance for matrix material (at 0.42 m/s).

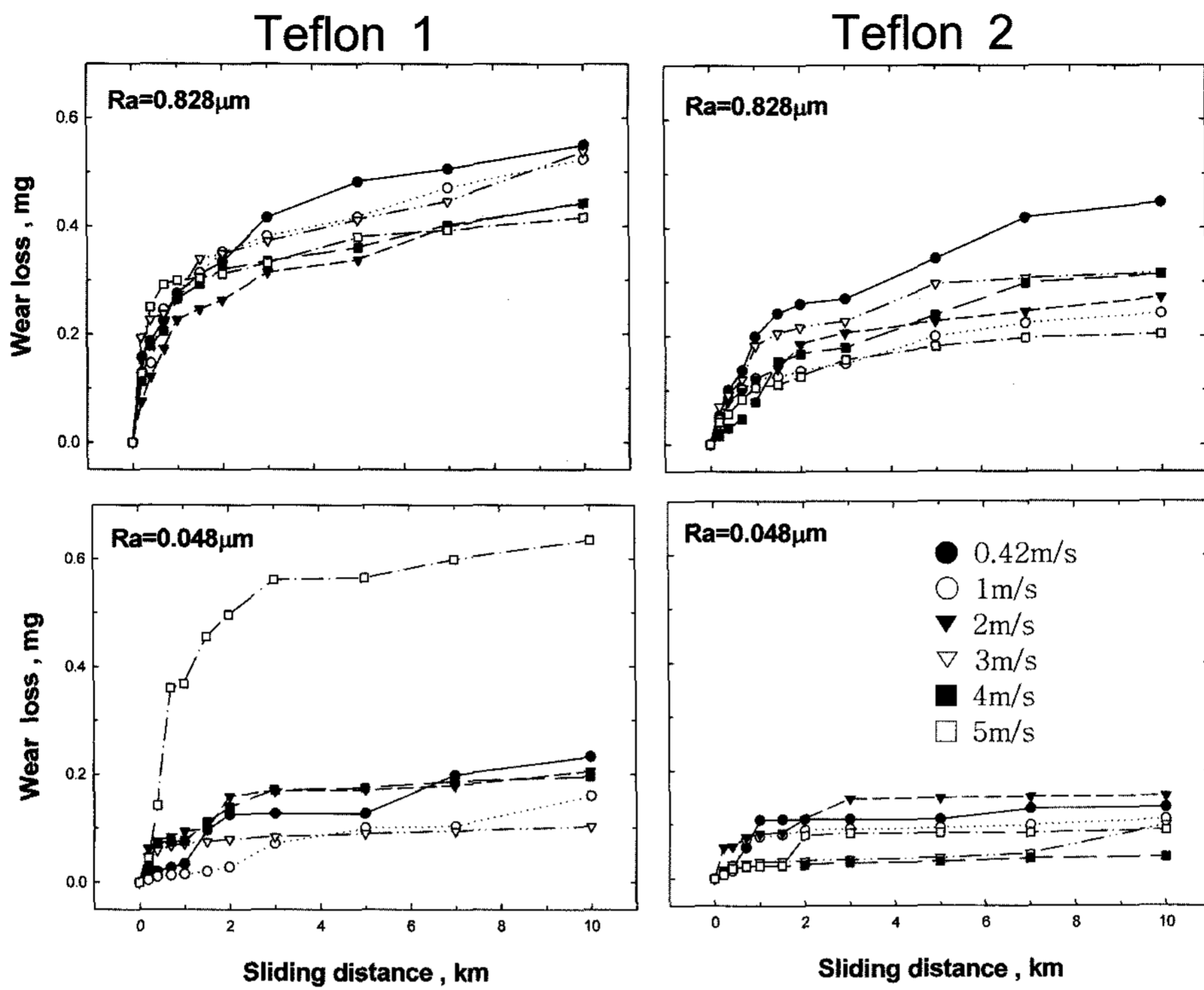


Fig. 4. Wear characteristics as a function of sliding distance at various sliding speeds.

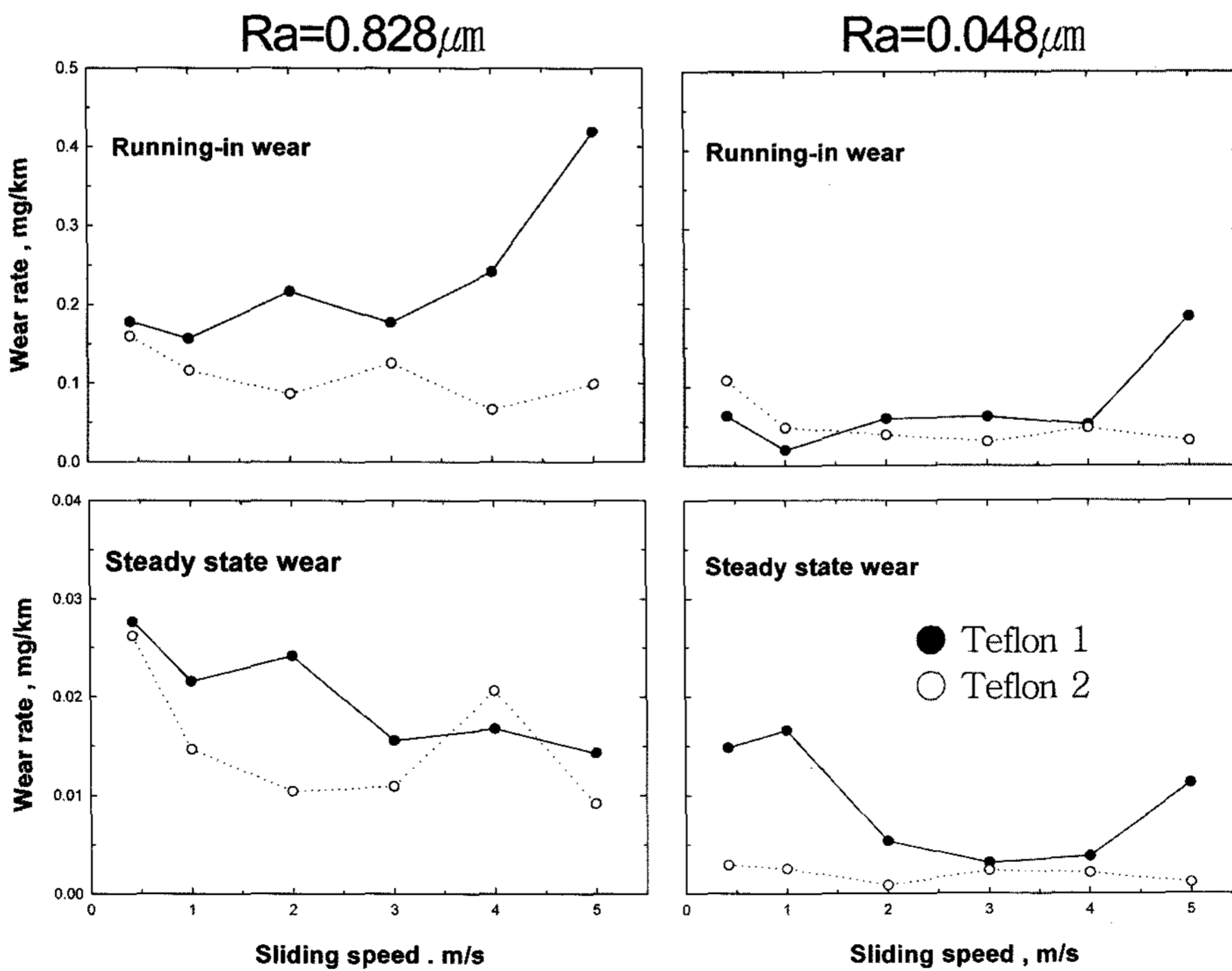


Fig. 5. Wear characteristics as a function of sliding speed.

영역에서 다소 감소하고 있다. 각각의 마모율은 27.59 mg/km와 7.192 mg/km인 것으로 밝혀졌다. 마찰계수 변화는 마찰초기에 급증을 하나 이후는 일정해져 정상마모영역에서 1.1836의 평균 마찰계수를 나타내었다.

Fig. 4는 두 종류의 PTFE 코팅층에 대해 각 미끄럼 속도에서 거리에 대한 마모량의 변화를 상대재 거칠기별로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 어느 것도 거리 증대에 따라 마모량이 증대하는 전형적인 거리특성곡선을 나타내고 있으나 원료분말 종류나 상대재의 거칠기에 따라 정도에 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고 전반적으로 이들의 마모량은 모재의 마모량(Fig. 4)에 비해 현저히 적다는 것을 확인 할 수 있다. 사실 모재와 PTFE간에는 비중이 상이하어 절대 비교는 불가능

하나 PTFE의 비중(2.13~2.3) [1,2]과 철강재료의 비중(7.8)을 고려할 경우 0.4 mg의 PTFE의 마모량은 철강재료의 1.4 mg정도에 상응하여 PTFE의 내마모성은 모재보다 우수한 것으로 추정된다.

Fig. 5는 이들을 초기마모영역과 정상마모영역으로 구분하여 각 속도에 대한 마모율을 상대재 거칠기별로 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 코팅층의 마모율은 미끄럼속도가 증가할수록 감소하는 경향이며 정상마모영역에서는 마모율이 현저히 낮다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 속도가 증가할수록 낮은 마모율을 보이는 것은 PTFE 자체의 양호한 내열성에 기인하는 것으로 생각 할 수 있다. 전반적으로 균일한 분포의 원료분말을 사용한 코팅층(Teflon 2)의 내마모성이 불균일한 분

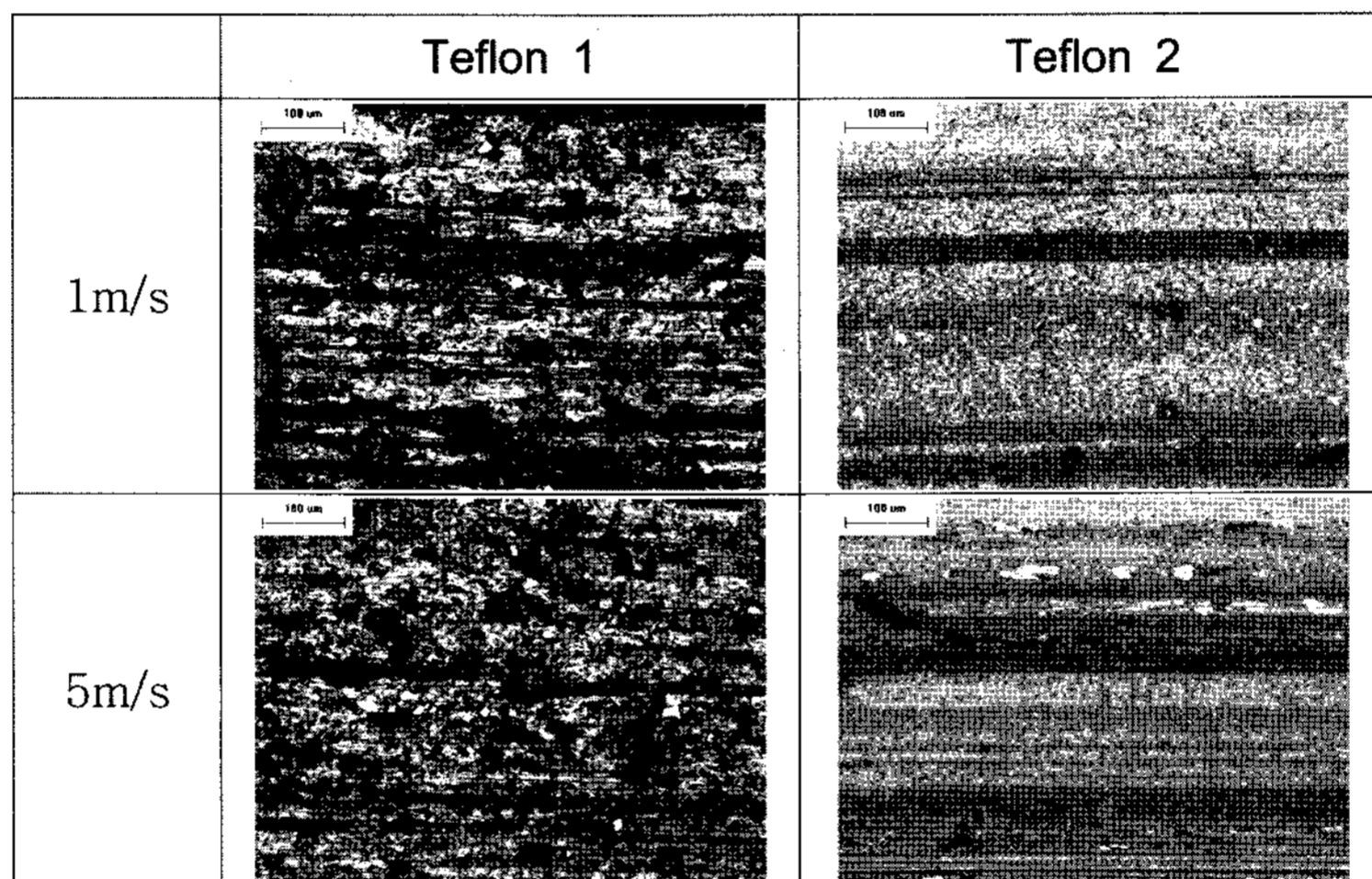


Fig. 6. Optical micrographs on worn surface of PTFE coating layers.

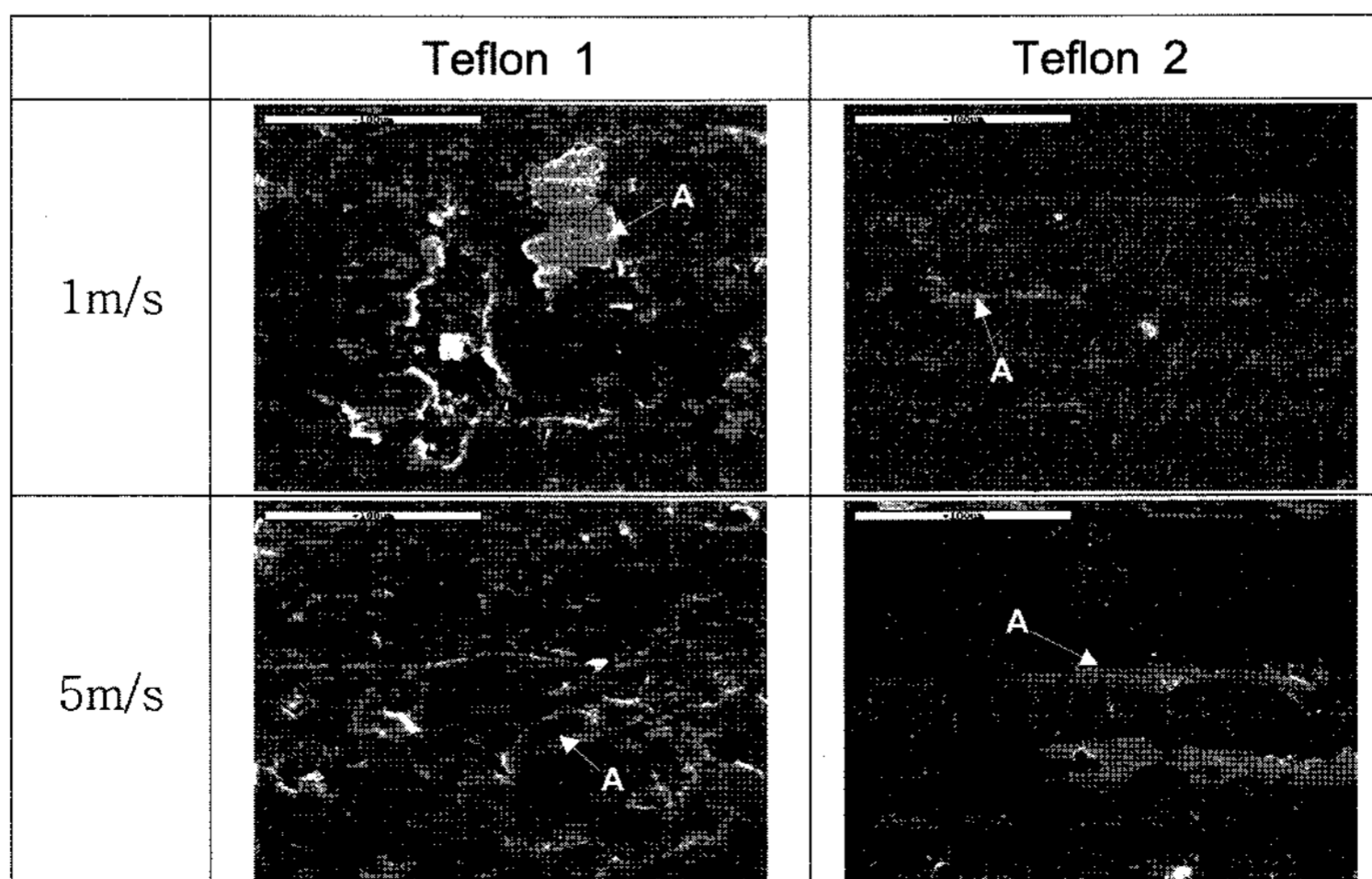
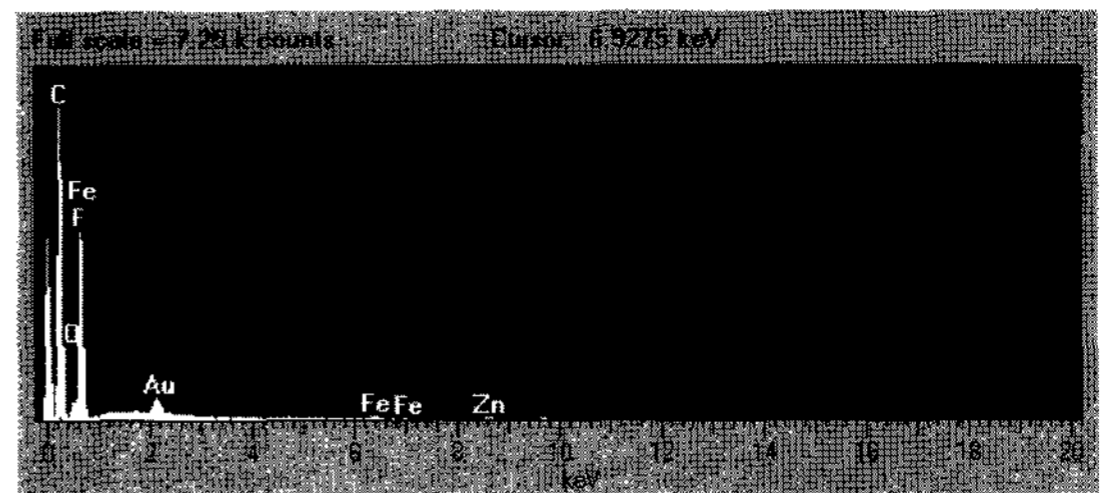


Fig. 7. SEM images on worn surface of PTFE coating layers.

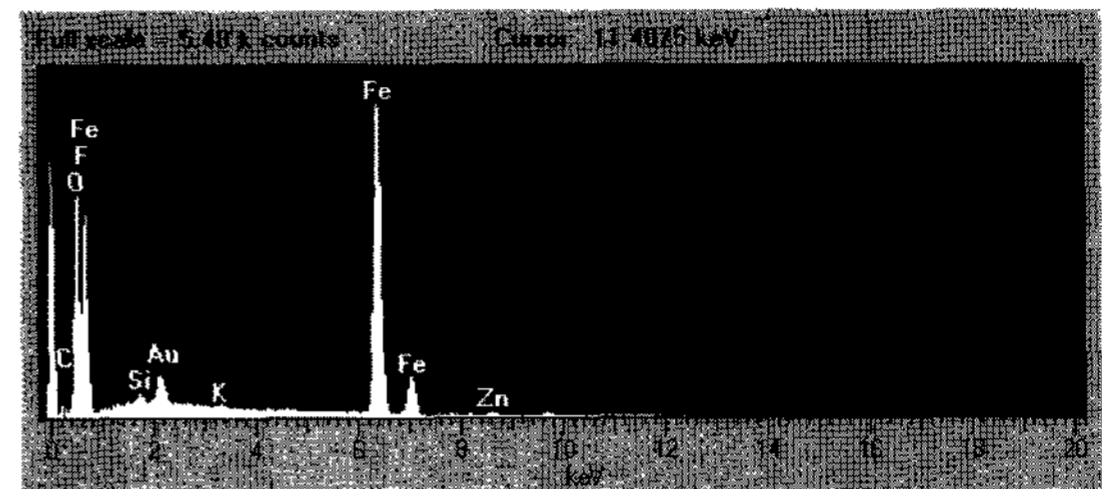
포의 원료분말을 사용한 코팅층(Teflon 1)에 비해 양호하나 고속도영역에서는 거의 차이가 없다. 그러나 5 m/s 에서 Teflon 1의 마모율이 다소 증대하는 경향을 보여 5 m/s 이상의 고속도영역에서는 내마모성에 차이가 발생할 것으로 추정된다. 그리고 마모율에 미치는 상대재 거칠기 영향은 현저하여 상대재 거칠기가 적어질수록 마모율은 현저히 감소하고 있다. 이는 이들의 마모 기구가 후술하듯이 abrasive마모이기 때문으로 생각되었다.

3-3. 마모면의 관찰결과

Fig. 6은 시험 후 코팅층의 마모면을 관찰한 광학현미경 사진을 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 이들 마모면에는 미끄럼 속도에 관계없이 scratch가 관찰되었다. 그러나 Teflon 1과 Teflon 2의 마모면의 양상은 상이한 것을 알 수 있다. Teflon 2의 마모면은 깨끗하고 평탄하나 Teflon 1의 마모면에는 다수의 흑색부위가 관찰되고 있다. Fig. 7은 이들 마모면을 관찰한 SEM사진을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 Teflon 1의 경우는 이착물이 다수 존재하고 박리된 부위가 존재하는 것으로 밝혀졌다. 그러나 Teflon 2의 마모면에는 scratch 주변에 이착물만이 관찰된다. 이들 이착물의 EDX분석 결과를 Fig. 8에 나타내었으나 이들 대부분은 상대재로부터 이착된 철산화물(A부위)이나 일부는 PTFE 코팅층 자체가 재이착된 것도 포함하고 있었다. 결국 미끄럼 초기에 상대재의 돌기가 PTFE 코팅층을 abrasive 시키고 이들 돌기가 탈락되어 PTFE 코팅층에 이착되고 이때 상대재에 이착된 PTFE



(a) matrix



(b) A

Fig. 8. Results of EDX analysis on worn surface of PTFE coating layers.

코팅층도 재전이되는 것으로 생각되었다. 이러한 측면에서 PTFE 코팅층의 마모가 상대재의 거칠기의 영향이 현저하였던 것으로 생각되어 진다.

일반적으로 PTFE 코팅층은 band상 구조를 가져 200 μm 정도의 정질 층이 얇은 비정질 층 사이에 존재하는 층상 구조로 되어 있고 실제 마모에 의한 파단은 비정질층에서 전단되어 박편의 형상으로 마모되는 것으로 알려져 있다[1,2]. 그러나 이러한 정질 및 비정

	Teflon 1	Teflon 2
0.42m/s		
5m/s		

Fig. 9. Optical micrographs on worn surface of counter materials.

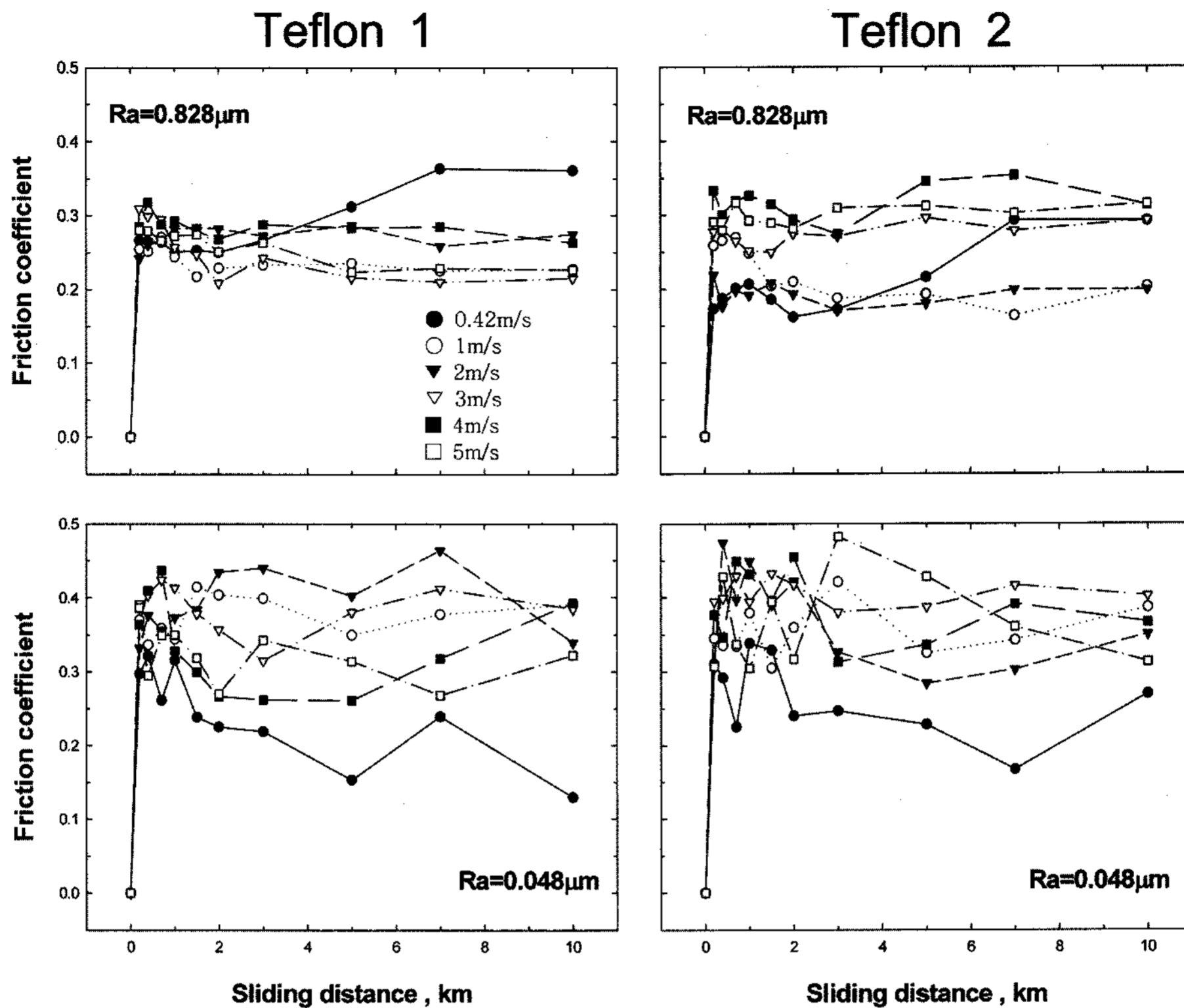


Fig. 10. Variation of friction coefficient with sliding distance.

질 층의 크기는 코팅조건에 따른 결정화도에 결정되나 결정화도 증가에 따라 내마모성도 향상되게 될 것이다. 본 연구에서 사용된 두 코팅처리에 의한 결정화도의 정도는 불확실하나 미세한 입자를 사용한 Teflon 2 코팅층의 경우는 입자의 표면적이 커서 용점이 낮을 것이 분명하다. 이러한 측면에서 동일 온도처리라도 결정화가 많이 이루어졌을 것으로 사료되어 내마모성에 유리하게 작용한 것이 분명하다. 또한 Teflon 2의 코팅층도 치밀하여 미세한 마모입자가 생성하는 것으로 사료된다. 반면 Teflon 1 코팅층의 조대한 입자 주변에 균열은 마모량 증대에 기여한 것으로 사료된다.

Fig. 9는 이들의 상대재 마모면의 광학현미경으로 관찰한 결과를 비교한 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 미끄럼속도 그리고 원료분말의 크기분포와 관계없이 모든 마모면에서도 scratch가 관찰되었다. 그러나 이들 마모면 profile에서는 다소의 요철만 있을 뿐 현저한 groove는 관찰이 되지 않았다. 이러한 측면에서 PTFE 코팅층에 이착된 상대재의 마모입자는 PTFE코팅층을 강화하여 마모발생을 줄이고, 이착된 상대재의 철산화물은 상대재를 abrasive시키나 PTFE가 쿠션역할을 하

여 하중을 감소, 상대재의 마모도 감소시키는 것으로 생각되었다.

3-4. 코팅층의 마찰계수변화

Fig. 10은 미끄럼 거리에 대한 구간별 평균 마찰계수의 변화를 상대재 표면거칠기별로 나타낸 것이다. 일반적으로 PTFE의 마찰계수는 저속에서 낮은 것으로 알려져 있다[1,2]. 그러나 본 연구 결과에서는 속도에 따른 마찰계수의 변화에는 이러한 경향을 관찰 할 수 없고 원료분말 차이에 따른 경향의 차이도 현저하지 않다. 단지 거칠기가 적은($Ra=0.048\mu m$) 상대재에 대한 0.42 m/s의 속도시의 마찰계수는 현저히 낮은 것으로 밝혀져 본 연구에서 행한 시험속도가 이러한 경향을 나타낼 정도의 속도 영역이 아니기 때문으로 생각되었다.

4. 결 론

클러치의 diaphragm과 primary wheel cover와의 접촉에서 diaphragm 소재 표면에 크기분포가 상이한

두 종류의 PTFE원료분말의 이용하여 각각 코팅층 형성하고 미끄럼 마찰마모시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) diaphragm의 마찰마모특성은 PTFE 코팅으로 현저히 개선된다.
- 2) PTFE 코팅층의 마모특성은 미끄럼 속도가 증가할 수록 양호해지나 원료분말의 크기분포 차이에 따른 특성의 차이는 현저하지 않았다. 그러나 균일한 크기의 원료분말을 사용했을 때 내마모성이 저속에서 다소 양호해지는 것으로 밝혀졌다.
- 3) PTFE 코팅층의 마모는 상대재의 돌기에 의한 abrasive 마모로 진행되나 PTFE층은 상대재의 이착에 의한 강화작용과 PTFE의 쿠션역할에 의해 코팅층과 상대재의 마모를 현저히 감소시키는 것으로 생각되었다. 그러나 불균일한 크기의 원료분말을 사용한 코팅층은 결정화도가 감소하고 조대한 입자 주변의 틈으로 인해 마모량이 다소 증대하는 것으로 추정되었다.
- 4) 원료분말의 크기분포 차이에 따른 코팅층의 마찰계수의 변화에는 거의 차이가 없으나 상대재 거칠기를 조정하면 저속에서 마찰계수의 감소가 예상된다.

참고 문헌

1. 川崎景民, “オイルレスベ어링,” アグネ, pp. 19, pp. 50, pp. 149, pp. 164, 1980.
2. 日本潤滑學會, “新材料のトライボロジ-,” 養賢堂, pp. 62-69, 1991.
3. K.Tanaka, “Effects of Various Fillers on the Friction and Wear of PTFE-based Composites,” in K. Friedrich(ed), Friction and wear of polymer composites, Elsevier, pp. 137-174, 1986.
4. 심현태, 권오관, “PTFE-폴리이미드 복합재료의 마찰과 마모 특성,” 윤활학회지, 제11권, 제4호, pp. 28-34, 1995.
5. 심현태, 권오관, 이규한, 김병환, “PTFE-폴리이미드 복합재료의 마찰과 마모에 대한 성분비와 온도의 영향,” 윤활학회지, 제12권, 제3호, pp. 55-62, 1996.
6. 自動車技術會, “自動車のトライボロジ-,” 養賢堂, pp. 118, 1994.
7. Dupont사의 기술자료(카타로그).
8. 이한영, 김근영, 허만대, “자동차용 클러치 마찰재의 미끄럼 마찰마모특성 해석(제1보 마모특성),” 윤활학회지, 제20권, 제6호, pp. 296-305, 2004.