

Synthesis of splinter-type and plate-type potassium titanate as reinforcements in brake pad for automobile

Sung-Hun Kim^{*,**}, Jong-Young Kim^{*,†}, Wooyoung Shim^{**}, Jung Ju Lee^{***} and Sung Wook Kwon^{***}

^{*}Icheon Branch, Korea Institution of Ceramic Engineering and Technology, Icheon 17303, Korea

^{**}Department of Advanced Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

^{***}Advanced Research Team, Sangsin Brake R&D Institute, Daegu 43023, Korea

(Received November 11, 2019)

(Revised December 5, 2019)

(Accepted December 6, 2019)

Abstract We synthesized potassium titanates having splinter and plate shape and evaluated frictional and wear properties of brake pad using them as reinforcements in friction materials. For splinter-shaped potassium titanates, potassium tetratitanate ($K_2O \cdot 4TiO_2$, **PT4**) with plate shape was prepared, then K ion of the titanate was leached by acid to make potassium hexatitanate ($K_2O \cdot 6TiO_2$, **PT6**), which was transformed to splinter-shaped **PT6** by thermal treatment at 800°C. Plate-shaped potassium magnesium titanate ($K_{0.8}Mg_{0.4}Ti_{1.6}O_4$, **PMT**) was prepared by adding Mg in the potassium titanate using KCl as a flux. Using **PT6** and **PMT** as reinforcements in friction materials of brake pad, we evaluated frictional and wear properties using 1/5-scale dynamometer. According to dynamometer test results, both reinforcements shows similar friction coefficient and fade & recovery behavior to conventional material and plate-shaped **PMT** exhibits higher wear resistance than splinter-shaped **PT6**.

Key words Reinforcement, Brake pad, Potassium titanate, Splinter, Plate

스플린터 및 판상형 티탄산칼륨염 합성 및 브레이크 보강재로서의 평가

김성훈^{*,**}, 김종영^{*,†}, 심우영^{**}, 이정주^{***}, 권성욱^{***}

^{*}한국세라믹기술원 이천분원, 이천, 17303

^{**}연세대학교 신소재공학과, 서울, 03722

^{***}상신브레이크, 대구, 43023

(2019년 11월 11일 접수)

(2019년 12월 5일 심사완료)

(2019년 12월 6일 게재확정)

요약 스플린터(splinter) 및 판상(plate shape) 형상을 가지는 티탄산칼륨염($K_2O \cdot nTiO_2$, PT)을 합성하고 브레이크 마찰재의 보강재로 이용하여 마찰 특성을 평가하였다. 스플린터형 티탄산칼륨염을 합성하기 위하여 먼저 판상 형상을 가지는 사티탄산칼륨염($K_2O \cdot 4TiO_2$, PT4)을 합성하고 칼륨 이온(K^+)을 일부 산침출(acid leaching)하여 육티탄산칼륨염($K_2O \cdot 6TiO_2$, PT6)으로 변환시킨 후, 800°C에서 열처리하여 스플린터 형상의 입자를 얻었다. 판상형 티탄산칼륨염을 합성하기 위해서 염화칼륨을 용제로 사용하고 마그네슘(Mg)을 일부 첨가하여 판상의 형상을 가지는 마그네슘티탄산칼륨염($K_{0.8}Mg_{0.4}Ti_{1.6}O_4$, PMT)을 합성하였다. 얻어진 육티탄산칼륨염 및 마그네슘티탄산칼륨염 입자를 보강재로 이용하여 브레이크 패드 마찰재를 제작하고 1/5-스케일 다이내모미터(scale dynamometer)를 이용하여 마찰 마모 특성을 평가하였다. 평가 결과, 두 종류의 보강재가 유사한 마찰계수 및 Fade & recovery 특성을 보였으며 판상형 마그네슘티탄산칼륨염의 경우, 스플린터형 육티탄산칼륨염보다 우수한 내마모성을 보이는 것을 알 수 있었다.

1. 서론

자동차용 브레이크의 부품으로 사용되는 마찰재는 차량의 운동에너지를 마찰에 의해 열에너지로 변환시켜 속

도를 제어하는 기능의 부품으로 기본적으로 마찰력, 특히 열적 마찰 안정성이 크게 요구된다. 마찰재에 사용되는 성분의 구성요소는 결합재, 보강재, 그리고 마찰조정재로 구성된다[1]. 결합재는 페놀수지계를 사용하고 필요에 따라 여러 가지 변성수지를 사용하며 마찰을 일으키기 위한 마찰조정제들을 결합시키는 기지재료로 사용한다. 또한 보강재는 마찰재의 뼈대 역할을 하는 강화재로

[†]Corresponding author
E-mail: jykim@kicet.re.kr

과거에는 석면을 사용하였으나 환경규제에 의해 현재는 아라미드/세라믹(Aramid/Ceramic) 등이 사용된다. 마찰조정제는 충전제, 마찰안정제, 윤활제 등이 여기에 포함되며 형상 유지 및 초기 마찰 안정, 로터 및 드럼 보호와 마모 절감을 위해 사용한다[2]. 마찰재의 구성요소에서는 기본적인 결합제 역할을 하는 바인더 페놀 수지와 보강을 위한 아라미드 섬유를 제외하면 700°C까지 발생하는 마찰열에 의한 마찰 안정성 및 내마모성을 확보하기 위해 주로 금속 및 세라믹 소재가 복합적으로 사용된다[3]. 최근 마찰재에서 마찰재 보강 및 열분산성, 마찰계수 안정성, 소음 저감성 등의 복합적인 특성을 가지는 구리의 사용이 북미 법규에 규제 경향에 의해 대부분의 소재는 세라믹계열로 구성되고 있다[4].

자동차용 브레이크 패드에 사용되는 마찰재는 1990년대 초반 석면 사용규제부터 시작하여 꾸준히 친환경화가 요구되어 오고 있다. 1990년대부터 캘리포니아주는 연방정부의 수질 환경법(Clean Water Act) 대응을 위해 차량 제동 시 마다 발생하는 마찰재 잔해에 포함된 구리 및 구리 화합물을 주요 오염원으로 규정하고, 마찰재 잔해가 도로 및 수로로 유입되지 않도록 대책을 마련하게 되면서 세계적으로 마찰재의 친환경화 개발이 급속도로 진행되고 있다. 마찰재 잔해가 캘리포니아주의 각 지역으로 유입되는 구리 오염의 최대 60%까지 기여하는 것으로 조사되었으며, 마찰재 내 해당 물질의 사용 금지 혹은 저감이 가장 효율적인 대안으로 제안되었다. 캘리포니아주 및 워싱턴주는 납, 수은, 카드뮴, 석면, 6가 크롬이 함유된 브레이크 마찰재의 판매를 금지하며 점차적으로 구리 사용량을 저감하는 규제를 2010년에 제정하였으며 캘리포니아주는 2014년부터 시행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 친환경 세라믹 마찰재의 환경규제 법규 변화에 따라 북미 환경기준(Cu 0.5 wt% 이하)을 만족하는 자동차 브레이크용 Cu-free 세라믹 마찰재를 개발하는 것으로 구리를 사용하지 않고 이를 보완하기 위한 세라믹 소재를 개발하고자 하였다. 특히 보강재로 많이 사용되는 침상의 육티탄산칼륨염(potassium hexatitanate, PT6, $K_2O \cdot 6TiO_2$)의 경우 호흡기에 침투될 경우 건강상의 문제를 일으킬 수 있어 환경규제를 받고 있다. 따라

서, 스플린터(splinter) 형상을 가지는 육티탄산칼륨염과 판상의 형상을 가지는 마그네슘(Mg)가 첨가된 마그네슘 티탄산칼륨염(potassium magnesium titanium oxide, PMT, $K_{0.8}Mg_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)를 합성하였다. 마그네슘티탄산칼륨염은 사티탄산칼륨염(potassium teratitanate, PT4, $K_2O \cdot 4TiO_2$)과 유사한 결정구조와 입자 형상을 가지며 침상 입자가 생성될 가능성이 적어 환경적으로 유리한 소재로 채택이 유망하다. 본 연구에서는 이러한 보강재를 합성하고 브레이크 마찰재를 제작하여 보강재의 형상에 따른 특성, 즉 마찰계수 및 내마모성에 대하여 비교 평가하였다.

2. 실험 방법

Table 1에 육티탄산칼륨염의 합성 조건을 제시하였다. 먼저, 수산화칼륨(KOH, 95%, Samchun Chemicals, Korea)과 티타네이트(TiO_2 , 99%, Daejung Chemical Co., Korea)의 혼합하고 용융시켜 사티탄산칼륨염(potassium tetratitanate, $K_2O \cdot 4TiO_2$, PT4)을 합성하였다. 증류수(distilled water)를 용매로 하여, 수산화칼륨과 티타네이트를 31 : 69 mol%의 비율로 혼합한 후, 공기 중에서 80°C의 온도로 건조시켰다. 건조한 혼합물을 1300°C에서 용융시키고, 그 용융물을 920°C로 냉각시킨 후, 6시간 동안 유지하였다. 그 다음 상온(room temperature)으로 냉각시켜 얻어진 사티탄산칼륨염을 모르타르(mortar)에서 분쇄한 후 얻어진 사티탄산칼륨염 분말에서 칼륨 이온(K^+)이 일부 제거하였으며, 육티탄산칼륨염을 얻기 위하여 염산(HCl solution, 0.3 M)과 30분 동안 반응시키고

Table 1
Synthetic conditions of Potassium hexatitanate (PT6, $K_2O \cdot 6TiO_2$)

PT6	
Composition ratio (mol%)	31 : 69
Melting temperature (°C)	1300
Holding temperature (°C)	920
Holding time (h)	6
Acid solution (mol)	0.3
Heat treatment (°C)	850

Table 2
Composition ratio and synthesis conditions of the potassium magnesium titanate samples (PMT, $K_{0.8}Mg_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)

	Composition ratio				Synthesis condition		
	K_2CO_3	KCl (flux)	Mg(OH) ₂	TiO_2	Heating temperature (°C)	Heating rate (min/°C)	Holding time (h)
1	2.3	0	1	5.3	1050	≅ 3.5	2
2	2.3	1.2	1	5.3			
3	2.3	3.6	1	5.3			
4	2.3	6.0	1	5.3			
5	0	2.3	1	5.3			
6	0	3.6	1	5.3			

Table 3
Formulation of friction materials containing Potassium titanate (PT6 or PMT)

Materials	Component (vol%)
PT (PT6 or PMT)	20
Filler	30
Abrasive	6
Graphite	5
Aramid	7
Binder resin	17
Other	15

*PT6: splinter-type, PMT: plate-type.

80°C에서 건조하였다. 마지막으로, 화학적으로 침출(leach)된 분말을 850°C에서 30분 동안 가열하여 육티탄산칼륨 분말을 얻었다.

관상의 마그네슘티탄산칼륨을 합성하기 위하여, Table 2에 나와 있는 조성과 열처리 조건으로 탄산칼륨(potassium carbonate, K_2CO_3 , 99.5%, Yakuri Chemical Co., Japan), 수산화마그네슘(magnesium hydroxide, $Mg(OH)_2$, 96%, Samchun Chemical Co., Korea), 티타네이트, 염화칼륨(potassium chloride, KCl, flux, 99%, Daejung Chemical Co., Korea)을 혼합하고 공기 중에서 열처리하였다. 원료를 물과 함께 교반하여 혼합한 후 오븐에서 80°C로 완전 건조 후, 1차 분쇄하였다. 얻어진 혼합물을 알루미늄 도가니에 넣고 전기로에서 열처리하였으며, 열처리를 통해 합성된 분말을 분쇄하여 체가름한 후 물로 세척하여 건조하였다.

얻어진 결정의 모양은 광학현미경(Sometech, Korea)과 주사형 전자현미경(scanning electron microscopy, JSM-6390, JEOL, Japan)으로 관찰하였다. 또한, 얻어진 티탄산칼륨 분말의 입도는 입도분석기(PSA, LA960, HORIBA, Japan)로 분석하였다. 합성된 티탄산칼륨 분

말과 육티탄산칼륨 분말을 강화재로 이용하여 Table 3과 같은 조성의 마찰재를 제작하였다. 마찰계수(Coefficient of friction, COF)는 다이내모미터(dynamometer, Sangsin Brake Co. Ltd., Korea)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 스플린터형 육티탄산칼륨의 제조

티탄산칼륨을 브레이크 패드의 강화재로서 사용되기 위하여서는 먼저 침상이 아닌[5,6], 스플린터형 또는 관상형의 형상을 가져야 한다[7,8]. 이러한 형상의 티탄산칼륨을 제조하기 위해서 입자 성장이 용이하게 이루어지는 온도 구간에서 유지 시간을 주어 형성된 핵에서 입자의 성장을 유도할 필요가 있다. 먼저 스플린터형의 육티탄산칼륨을 합성하기 위해서 사티탄산칼륨 입자를 성장시키고 화학적으로 처리하여 육티탄산칼륨을 칼륨이온 조성으로 조정한 후 열처리하여 $K_2Ti_6O_{13}$ 인 결정구조를 가지는 육티탄산칼륨을 제조하였다.

입자 성장이 이루어지는 구간은 액상과 고상이 혼재하는 구간이므로, Table 4의 열처리 조건과 같이 먼저 원료를 용융하여 핵을 생성시킨 후 액상과 고상이 혼재하는 온도 구간까지 급 냉각하고 유지하였다. 온도를 유지하는 동안 생성된 핵은 성장을 하여 입자의 크기가 커지고 입자들은 층상형으로 응집된다. Figure 1은 K_2O-TiO_2 상태도로서 온도 구간별 물질의 상태를 나타내었다[9]. 산화칼륨(K_2O)의 함량이 낮아질수록 용융점은 높아지고 1100°C의 다소 낮은 구간에서도 육티탄산칼륨이 생성되는 것을 알 수 있었다. 입자의 성장은 액상과 고상이 혼재하는 구간에서 용이하게 이루어지며 이 구간에서 시간을 증가시키면 유지되는 만큼 입자의 크기가 커졌다.

Table 4
Melting-holding condition in PT6 synthesis

	Melting temp. (°C) Heating rate (°C/min))	Cooling rate (°C/min)	Holding temp. (°C)	Holding time (h)
3	1200 (3°C/min)	20~40	900	1
				3
				6
4	1300 (3°C/min)	20~40	1000	6
				6
5	1300 (3°C/min)	20~40	1000	6
7	1400 (3°C/min)	20~40	1300	1
				3
				6
9	1450 (3°C/min)	20~40	1300	1
				3
				6

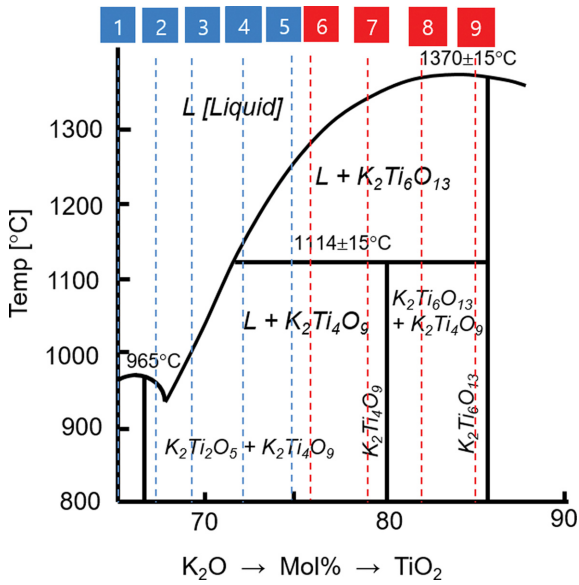


Fig. 1. Phase Diagram of K_2O - TiO_2 .

입자 성장 수 있는 합성 조건을 찾아내기 위해 각 군에서의 티타네이트 함량이 높은 3, 7, 9번을 선택하여 액상과 고상구간에서의 유지 실험을 진행하였다. 용융점이

1000°C 이하인 3번은 900°C, 5번과 7번은 1300°C에서 유지 시간을 1시간에서 6시간까지 주어 합성하였다.

합성 후 용융된 시료를 절단하여 단면을 관찰한 결과, 합성할 때 용융 후 유지 없이 냉각한 시료보다 액상과 고상이 혼재하는 온도 구간에서 유지 시간이 증가할수록 입자가 길어지는 것이 관찰되었다. 특히 3번 조성의 경우 유지하지 않은 경우에는 침상형으로 길게 입자가 생성되었으나 6시간까지 유지했을 때는 폭도 넓게 증가하는 것으로 나타났다. 합성 시 유지시간은 6시간이 최적인 것으로 확인되었다.

Figure 2는 3, 7, 9번을 분쇄하여 주사형 전자현미경 (SEM)으로 관찰한 결과이다. Figure 2에서 보이는 것과 같이 7번과 9번은 판상형 입자라기보다 하나의 거대한 직방체로 형성된 것을 알 수 있었다. 따라서 용융 후 유지를 하여 판상형으로 형상을 제어하기 용이한 조성은 3번 조성이 적합함을 확인하였다.

Figure 3은 3, 5, 7번 조성의 열처리 유지시간에 따른 결정상을 분석한 결과를 나타내었다. 3번 시료에서는 PT4 ($K_2Ti_4O_9$)의 결정상이 주된 결정상으로 나타났고 5, 7번 시료는 PT6($K_2Ti_6O_{13}$)의 결정상이 주 결정상으로 나타났다. 9번 시료의 경우 합성단계에서부터 PT6의 단일 결

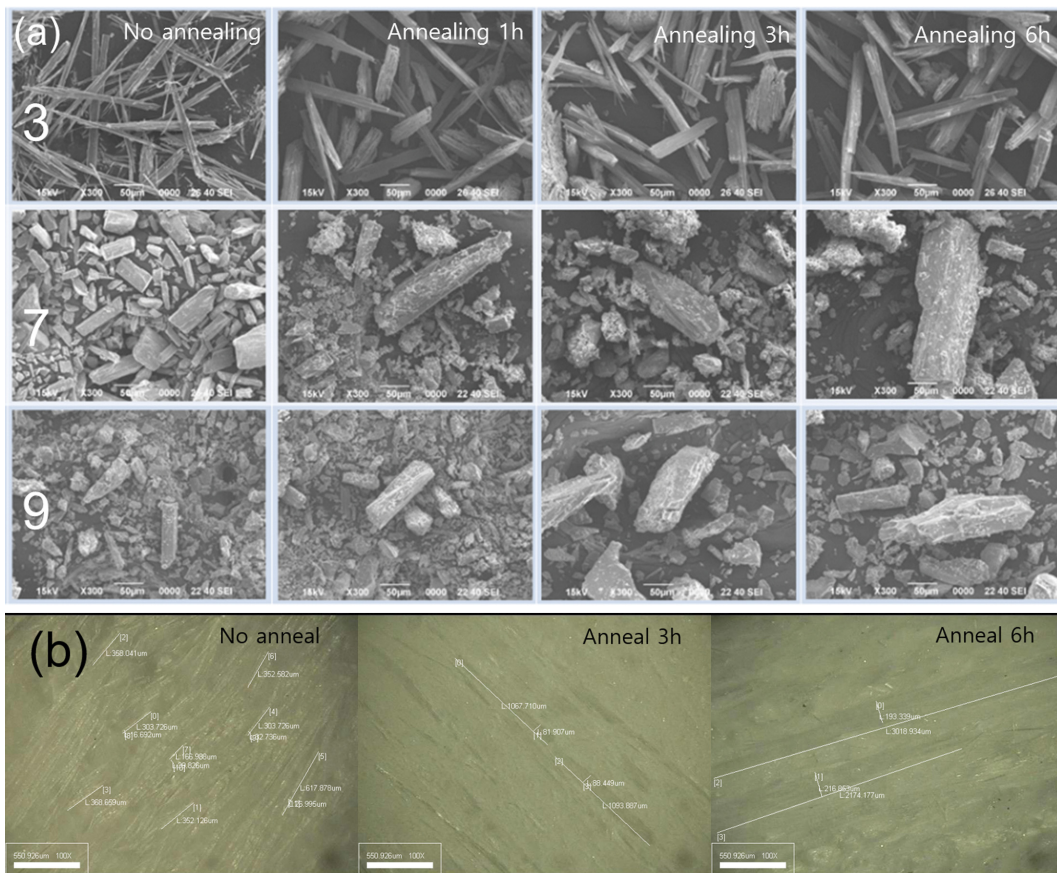


Fig. 2. (a) SEM images of PT6 samples (3, 7, 9 in Fig. 1). (b) Optical microscope images of PT6 samples (3 in Fig. 1) according to holding time.

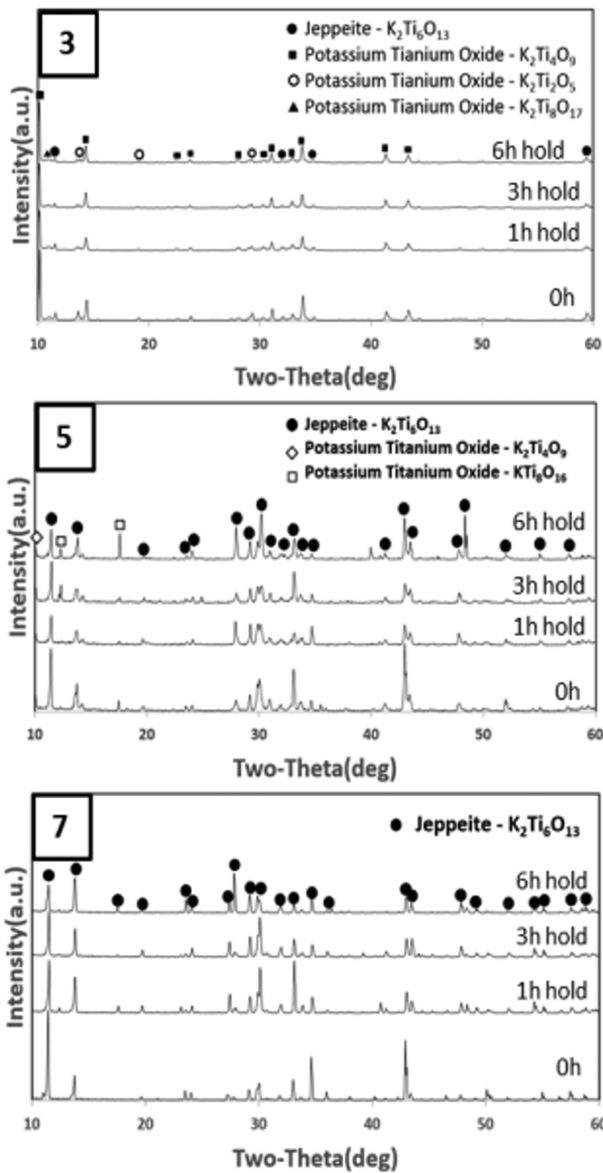


Fig. 3. XRD diffraction patterns of PT6 samples (3, 5, 7 in Fig. 1) according to holding time. $K_2Ti_6O_{13}$ (Jeppite): JCPDS No. 40-0403, $K_2Ti_4O_9$: 32-0861, $K_2Ti_2O_5$: 51-1890, $K_2Ti_8O_{17}$: 41-1100, KTi_8O_{16} : 41-1097.

정상으로 나타났기 때문에 화학적 침출을 이용한 용융합성 이후의 단계를 진행할 수 없어 형상 조절이 적합하지

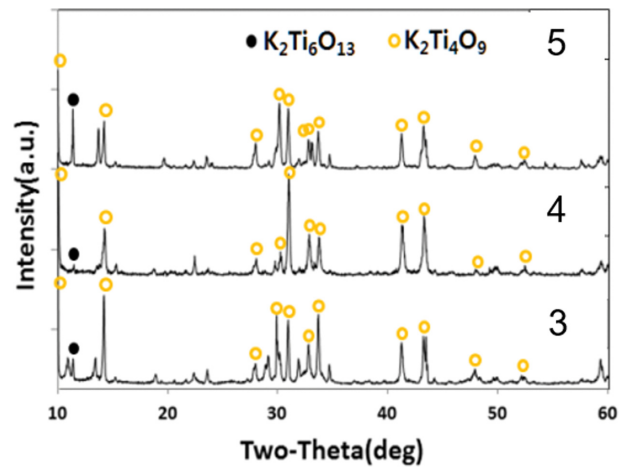


Fig. 4. XRD diffraction patterns of PT6 samples (3-5 in Fig. 1).

않아 제외하였다. 7번 시료의 경우에도 결정상 분석에서 PT6의 단일 결정상은 아니지만 주사형 전자현미경으로 형상을 확인한 결과 입자의 형태는 직방체로 적합하지 않아 제외하였다.

Figure 4는 3~5번 시료의 결정상을 분석하였다. 각각의 시료의 결정상을 상세히 비교 분석하여 보면, 3번 조성에 비해 티타네이트의 비율이 높은 4, 5번 조성의 경우 PT6의 결정상 피크가 높게 나타났다. Figure 5는 세 가지(3, 4, 5번) 시료의 입자 형상을 주사형 전자현미경으로 관찰한 결과이다. 5번 조성의 경우 4번 조성과 비슷하게 입자의 형상이 하나의 큰 덩어리처럼 형성되어 있으며 4번 조성은 3번 조성과 유사하게 판상형의 입자가 관찰되었다. 따라서 용융 후 유지 시간을 주어 판상형의 사티탄산칼륨염으로 합성하기에 용이한 조성은 3, 4번 조성의 영역으로 판단되었다.

앞선 결과를 통해 결정된 3, 4번 조성의 사티탄산칼륨염을 Table 5의 조건과 같이 산 처리를 통하여 칼륨 이온을 침출 후 열처리함으로써 스플린터 형상의 육티탄산칼륨염으로 변환시키고자 하였다[8]. 최적의 화학처리 조성을 개발하기 위해 염산의 농도를 0.1~1.0 M까지 조절하며 30분간 250 rpm으로 교반하고 건조한 뒤 800°C에서 열처리하였다. Figure 6은 화학적 침출 및 열처리한

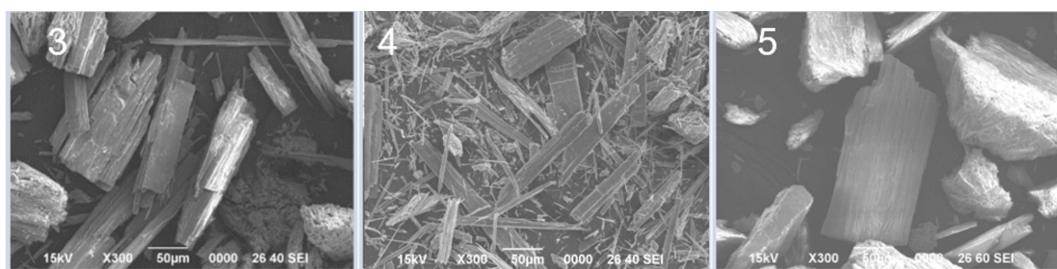


Fig. 5. SEM images of PT6 samples (3-5 in Fig. 1).

Table 5
Acid leaching and thermal treatment condition

	HCl conc./vol. (powder 10g)	Leaching time	Stirring speed	Heating temp.
1	1.0 M/100 ml	30 m	260 rpm	800°C
2	0.5 M/100 ml			
3	0.3 M/100 ml			
4	0.1 M/100 ml			

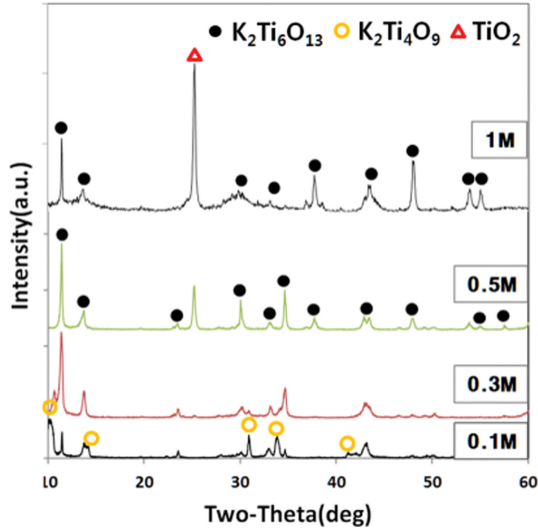


Fig. 6. XRD diffraction patterns of acid leached PT6 samples of 3.

시료의 결정상을 분석한 결과를 나타내었다. 1 M의 경우 티타네이트가 과다하게 석출되었고 0.5 M에서도 석출되는 것으로 확인되었다. 0.1 M의 경우 PT4의 결정상이 관찰되어 화학처리 조건으로 불충분한 조건임을 확인하였다. 따라서 티타네이트가 석출되지 않고 PT4 결정상이 나타나지 않은 0.3 M로 최적 조건을 결정하였다.

Figure 7은 화학적 침출 처리 후 열처리한 시료의 미세조직을 관한 결과를 나타내었다. 3번 조성과 4번 조성에서 판상형의 티탄산칼륨염의 입자가 관찰되었고 5번 조성의 경우 직방체 형태의 입자가 관찰되었다. 따라서 3, 4번 조성을 용융, 침출, 열처리에 의해 합성하면 스피린터형의 육티탄산칼륨염을 합성할 수 있었다.

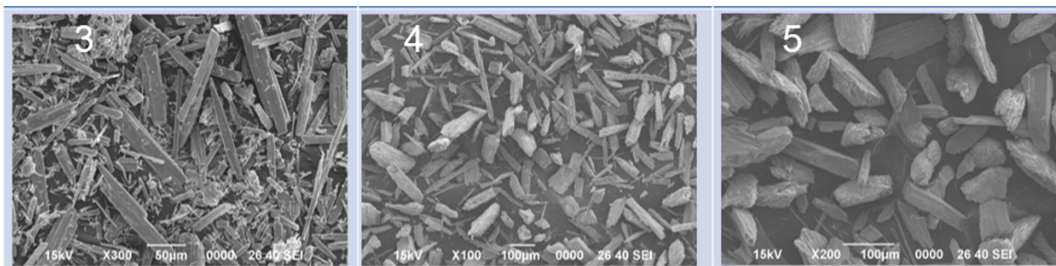


Fig. 7. SEM images of PT6 samples (3, 4, 5 in Fig. 1) after thermal treatment at 800°C.

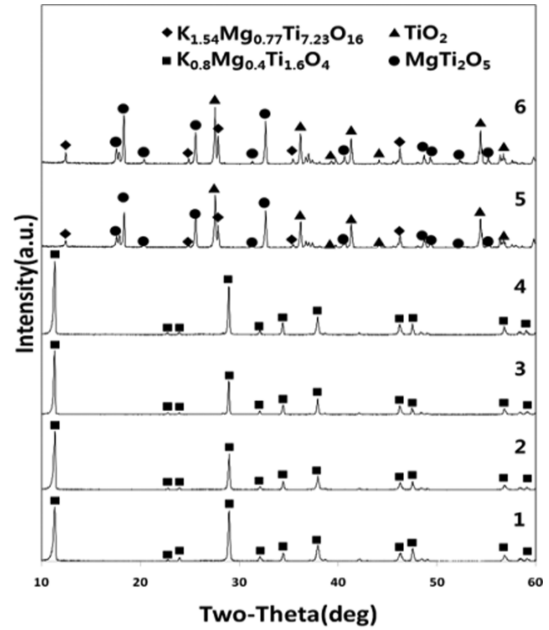


Fig. 8. XRD diffraction patterns of PMT samples (1-6 in Table 2) according to composition.

3.2. 판상형 티탄산칼륨염 제조

판상의 입자 형상을 가지는 티탄산칼륨염을 개발하기 위해 수산화마그네슘, 용제인 염화칼륨을 첨가하여, 마그네슘 티탄산칼륨염을 열처리 방식으로 합성하였다. 기존의 티탄산칼륨염은 용융 방식으로 합성하는데 이러한 경우 결정 성장이 이루어져 입자의 크기가 크고 응집이 되어 분쇄하는 공정에서도 상당 시간 및 비용이 소요된다. 하지만 용제를 첨가하게 되면 합성 온도를 낮출 수 있고 용융이 아닌 열처리로도 합성이 가능하게 된다. 또한 기존의 티탄산칼륨염은 용융 합성 후 화학적 침출/열처리를 통하여 제조되는데, 본 연구에서는 화학 공정을 제거함으로 화학 처리시 발생하는 부산물을 처리하는 시간과 비용을 절감할 수 있었다.

Table 2에서 볼 수 있듯이, 다음 3가지 종류의 시료를 준비하여 비교하였다(염화칼륨 용제가 없는 조성, 수산화마그네슘 대비 1~6배의 용제를 첨가한 조성, 티탄산칼륨 대

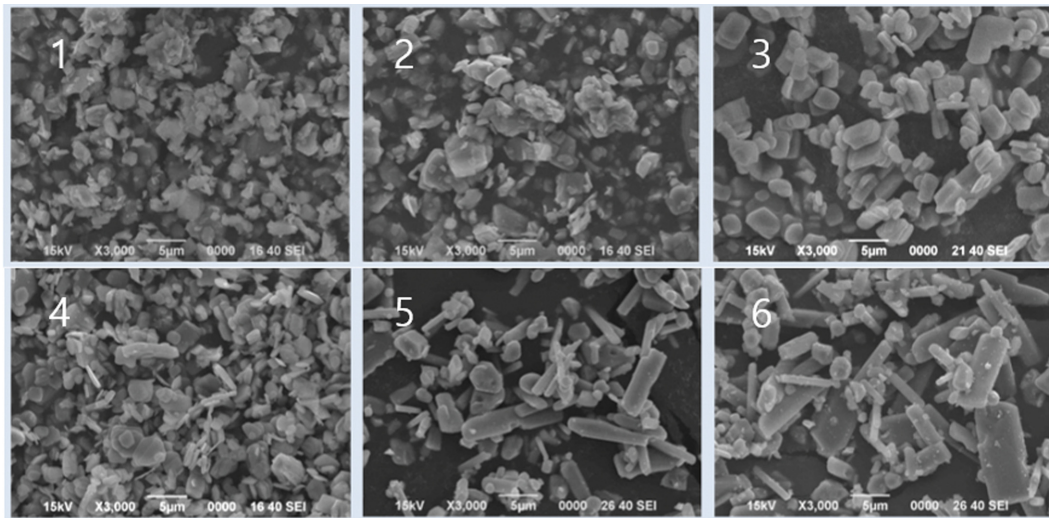


Fig. 9. SEM images of PMT samples (1-6 in Table 2).

신에 염화칼륨 용제를 첨가한 조성) 모든 시료는 1050°C에서 2시간 동안 열처리하여 합성하였다.

Figure 8은 열처리한 마그네슘티탄산칼륨염의 결정상을 관찰한 결과를 나타내었다. 1번 조성(염화칼륨 용제 무첨가)과 2~4번 조성(염화칼륨 용제 1~6배 첨가)은 $K_{0.8}Mg_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ 의 결정상이 주 결정상으로 관찰된다. 탄산칼륨을 첨가하지 않고 염화칼륨 용제만 첨가한 5, 6번 조성은 $K_{1.54}Mg_{0.77}Ti_{7.23}O_{16}$, $MgTi_2O_5$, TiO_2 의 세 가지 결정상이 혼재되어 있음이 확인되었다.

Figure 9는 Table 2에 나타난 1~6번 조성의 마그네슘티탄산칼륨염의 형상을 관찰한 결과를 나타내었다. 염화칼륨을 첨가하지 않은 조성은 결정 성장이 저조하여 다른 조성보다 입자의 크기가 작은 것으로 확인되었다. Figure 9에서 3번 조성에서 볼 수 있듯이, 염화칼륨을 3.6배 첨가하였을 때 입자의 크기가 전반적으로 균일하게 성장한 것을 관찰할 수 있었다. 염화칼륨을 6배 첨가한 4번 조성은, 1~3번 조성에서는 거의 관찰되지 않은

긴 입자들이 관찰되는 것을 볼 수 있었다. 염화칼륨만 첨가한 5~6번 조성에서는 침상형의 긴 입자와 파우더형의 입자 등이 관찰되었다. 따라서 판상형 마그네슘티탄산칼륨염을 균일하게 합성하기에 최적의 조건은 Table 2의 3번 조성으로 확인되었다. 마그네슘티탄산칼륨염의 종횡비를 측정하고 종횡비율 평균 1.26로 스플린더형상보다는 판상 형상에 가까운 결과를 얻었다.

Figure 10은 Table 2의 1~6번 조성의 마그네슘티탄산칼륨염의 입도를 측정하고 결과를 나타내었다. 침상형으로 관찰된 5~6번 조성은 평균사이즈가 6µm 이상인 것으로 확인되었다. 용제인 염화칼륨을 넣지 않은 1번 조성의 평균 입도는 2.68µm로 가장 작은 것으로 확인되었고 용제인 염화칼륨이 첨가된 2~4번 조성은 평균사이즈가 3~4µm로 관찰되었다. 1, 2, 4번 조성은 1.0µm 이하의 미세입자가 있는 것으로 관찰되었다. 3번 조성의 입자분포는 미세입자 없이 1~10µm, 5~6번 조성은 3~15µm 사이로 확인되었다.

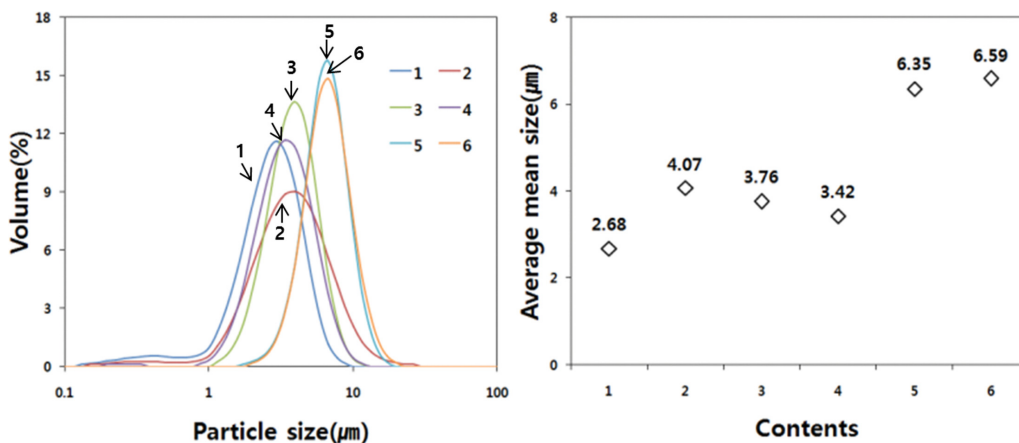


Fig. 10. Particle size analysis results of PMT samples (1-6 in Table 2).

3.3. 마찰재 특성 평가

스플린더형 및 판상형 티탄산칼륨염을 이용한 브레이크 패드 마찰재는 Table 3에서 나타낸 조성으로 제작하였고, 제작된 패드 마찰재를 1/5 스케일의 다이내모미터

를 이용하여 마찰특성을 평가한 결과, Table 6과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 각 소재에 해당하는 브레이크 패드의 제동 특성은 일본 JASO C406P1 효력평가모드에 준하여 평가를 실시하였다. Figure 11의 Y축은 마찰계수, X축은 제동 회차를 나타낸다. Figure 11에서 볼

Table 6
Dynamometer test results

	Friction coefficient (Average m)	Burnish (μ)	2 nd eff (μ)	1 st fade & Recovery (μ)	2 nd fade & Recovery (μ)	3 rd eff (μ)	Padwear (mm)	Disc wear (g)
Splinter	0.40	0.41	0.45	0.41	0.40	0.41	0.513	0.543
Plate	0.42	0.42	0.44	0.44	0.42	0.43	0.471	0.530

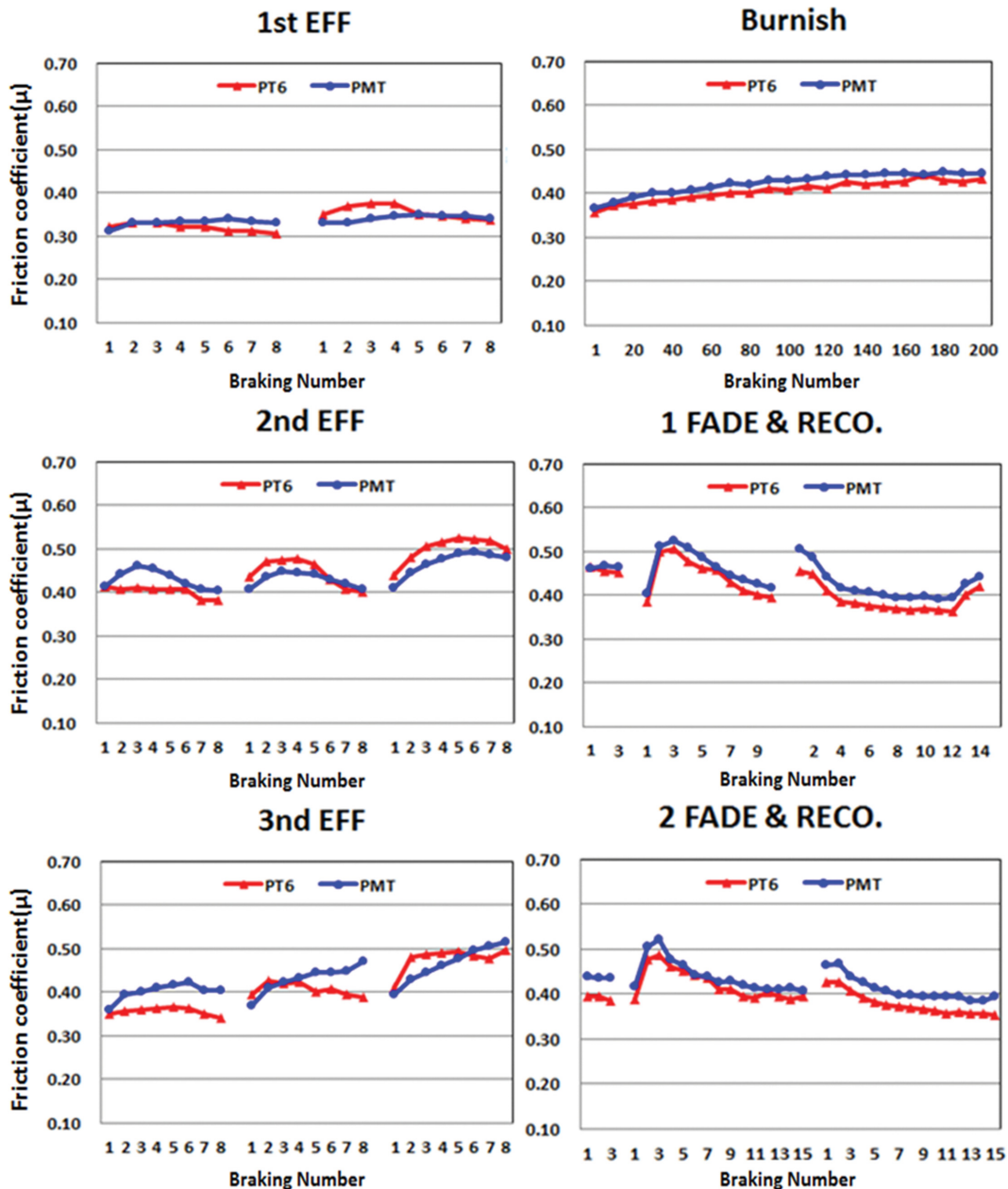


Fig. 11. Dynamometer analysis results of PT6 and PMT samples.

수 있는 바와 같이, 2호력 구간의 마찰계수의 경우 스플린터형이 중속 구간 이후부터 다소 우세하지만, 3호력 구간의 경우 판상형의 마찰계수가 높아졌다. 전반적인 평균 마찰계수의 경우, 판상형이 약 5% 가량 높은 것으로 나타났다. 속도 및 감속도에 대한 마찰 안정성은 유사하며 변화량이 크지 않기 때문에 양호한 마찰 특성을 보여주고 있음을 확인할 수 있다.

또한, 고온에서 제동능력이 감소하는 Fade 현상 및 회복(recovery)되는 능력을 평가하였다. Fade 구간에서는 판상형이 스플린터형 대비 1st Fade & recovery의 경우 약 7%, 2nd Fade & recovery의 경우 약 5% 가량 우수한 것으로 나타났다. Fade 구간에서는 두 종류 마찰재 모두 현재 양산 마찰재와 유사한 fade 수준을 보여주고 있다.

패드 마모의 경우, 판상형이 스플린터형 대비 약 9% 가량 내마모성이 우세하다. 디스크의 마모가 상대적으로 많아서 강한 대면 공격성에 의한 동종 마찰이라고 볼 수도 있지만 일반 마찰재 대비 적은 수준으로 볼 수 있다.

4. 결 론

브레이크 마찰재의 환경 규제 범규 변화에 따라 자동차 브레이크용 Cu free 세라믹 마찰재를 개발하기 위하여 구리를 제거하고 이를 보완하기 위하여 티탄산칼륨염(Potassium titanate, PT, $K_2O \cdot nTiO_2$) 소재가 개발되고 있다. 특히 보강재로 많이 사용되는 침상의 육티탄산칼륨염(Potassium hexatitanate, PT6, $K_2O \cdot 6TiO_2$)의 경우 호흡기에 침투될 경우 건강상의 문제를 일으킬 수 있어 스플린터형 또는 판상 형상을 가지는 티탄산칼륨염의 개발이 요구되고 있다. 따라서, 스플린터 형상을 가지는 육티탄산칼륨과 판상의 형상을 가지는 마그네슘(Mg)이 첨가된 마그네슘티탄산칼륨염(Potassium magnesium titanium oxide, PMT, $K_{0.8}Mg_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)을 합성하였다. 이러한 보강재를 합성하고 브레이크 마찰재를 제작하여 보강재의 형상에 따른 특성, 즉 마찰계수, 내마모성을 비교 평가한 결과, 두 종류의 마찰재가 유사한 마찰 마모 특성을 보이며 판상형 마그네슘티탄산칼륨염 소재의 경우 우수한 내마모성을 보였다.

감사의 글

본 과제는 산업통상자원부 산업기술혁신사업(미세먼지 저감을 위한 승용/상용차용 고성능 브레이크 개발, 20003598)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] D. Chan and G.W. Stachowiak, "Review of automotive brake friction materials", Proc. Instn. Mech. Eng. 218 (2004) 953.
- [2] J.J. Lee, J. Lee, S. Kwon and J.-J. Kim, "Effect of different reinforcement materials on the formation of secondary plateaus and friction properties in friction materials for automobiles", Tribol. Int. 120 (2018) 70.
- [3] M.H. Cho, S.J. Kim, D.H. Kim and H. Jang, "Effect of ingredients on tribological characteristics of a brake lining: an experimental case study", Wear. 258 (2005) 1682.
- [4] K.H. Cho, M.H. Cho, S.J. Kim and H. Jang, "Tribological properties of potassium titanate in the brake friction material; morphological effects", Tribol. Lett. 32 (2008) 59.
- [5] T. Endo, H. Nagayama, T. Sato and M. Shimada, "Crystallization of potassium titanate from the amorphous phase", J. Mater. Sci. 23 (1988) 694.
- [6] T. Oota, H. Saito and I. Yamai, "Synthesis of potassium hexatitanate fibers by the hydrothermal dehydration method", J. Cryst. Growth 46 (1979) 331.
- [7] J.J. Lee, S. Kwon, J.-Y. Kim, N. Lee, J.-H. Pee, Y. Kim, J. Lee and J.-J. Kim, "Effect of hardness and morphology of potassium titanate on frictional wear characteristics of brake pads", Int. J. Nanotech. 15 (2018) 474.
- [8] N. Song, Y. Liu, B. Liu, Y. Liu, Y. Tan, W. Wei and T. Luo, "Controlled synthesis of platy potassium titanates from potassium magnesium titanate", RSC Adv. 3 (2013) 8326.
- [9] G. Eriksson and A.D. Pelton, "Critical evaluation and optimization of the thermodynamic properties and phase diagram of the MnO-TiO₂, MgO-TiO₂, FeO-TiO₂, Ti₂O₃-TiO₂, Na₂O-TiO₂, and K₂O-TiO₂ system", Metall. Mater. Trans. B. 24 (1993) 795.