

실험통계법을 이용한 마찰재의 고온 마찰특성에 대한 고찰

고길주 · 박상진 · 장 호

고려대학교 신소재공학과

High Temperature Fade Behavior of Brake Friction Materials at Extreme Braking Conditions

Kil-Ju Ko, Sang-Jin Park and Ho Jang

Department of Advanced Materials Engineering, Korea University

Abstract – Tribological properties of high temperature fade were investigated by changing relative amounts of ingredients in the brake friction material. Based on a simple experimental formulation containing 10 ingredients, friction materials were tested using a pad-on-disk type friction tester. Twenty-five friction material specimens with different relative amounts of the ingredients were manufactured according to the constrained mixture design. The difference($\Delta\mu=\mu_{\max.}-\mu_{\min.}$) of friction coefficients was measured to represent the high temperature fade. Results from elevated temperature tests showed that five ingredients including cashew, graphite, Sb_2S_3 , $ZrSiO_4$, and Cu fibers played important roles on $\Delta\mu$. In order to find relative importance on fade phenomena among these ingredients, ANOVA(analysis of variance) was performed in this investigation. Thirty-two friction material specimens by changing $\pm 50\text{vol.}\%$ of these five ingredients were tested to examine the relative importance. Results showed that cashew, graphite & Sb_2S_3 , and cashew & graphite aggravated the fade behavior and Cu fibers improved on fade resistance.

Key words – friction material, constrained mixture design, fade, $\Delta\mu$, ANOVA

1. 서 론

자동차 브레이크용 마찰재는 다양한 외부 마찰조건에 대해 안전성(safety), 내구성(durability)과 안락성(comfort)이 요구된다. 마찰재는 차량이 제동될 수 있는 일정한 수준의 마찰계수를 가져야 하며, 고온에서 마찰계수가 급격히 감소하는 fade

현상의 발생을 방지해야 한다. 고온에서의 fade 현상은 마찰재에 포함된 원료들의 열분해(thermal decomposition)와 그에 따른 열분해 후의 생성물이 마찰계면에서 마찰현상에 영향을 주어 발생하는 현상으로 사료된다. 또한 고온에서의 마찰계수의 감소현상은 마찰재에 사용되는 유기질 원료가 고온에서 기화되어 마찰

재와 로터의 접촉을 방해함으로써 나타나는 현상으로도 알려져 있다[1,2].

본 실험은 고온 fade 특성을 고찰하기 위해서 제한된 영역에서의 실험계획법 (constrained mixture design)에 의하여 마찰계수의 변화($\Delta\mu = \mu_{max} - \mu_{min}$)를 우선 측정하였다. 그리고 위의 결과를 토대로 $\Delta\mu$ 에 영향을 미치는 원료 물질들을 산출한 후, 원료간의 상호작용(interaction)과 각 원료가 fade에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하고자 분산분석법(ANOVA : analysis of variance)을 적용하였다. 다른 한편으로는 마찰재 제조에 사용된 각각의 원료물질을 열분석한 후 온도에 따른 열분해(pyrolysis)를 고찰하였다. 따라서, 본 연구는 상기한 열분석 및 시험자료를 서로 비교분석해서 온도에 따른 마찰계수의 변화에 가장 영향을 미치는 원료물질을 밝히는 데 그 목적이 있다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 마찰재 시편은 NAO (non-asbestos organic)형의 마찰재로서 제조에 사용된 원료 및 함량을 Table 1에 나타내었다. 원료의 상대량은 마찰재 제조업체의 관례에 따라 group 별로 표시하였다. 마찰재의 제작은 계량, 혼합, 예비성형, 본성형 및 열처리의 순으로 진행되었으며 Rockwell 경도기(Akashi Rockwell ARK-600, S-scale)를 이용하여 마찰재의 경도분포를

측정하였다. 기공도는 수은측정법을 이용하여 30,000psi의 압력으로 측정하였다.

Table 1. Basic formulation of the friction material used in this work

Classification	Raw material	Content (vol.%)
Group 1	Phenolic resin	44
	Cashew	
	Aramid pulp	
Group 2	Graphite	10
	Sb ₂ S ₃	
	MoS ₂	
Group 3	Potassium titanate	26
	ZrSiO ₄	
	Copper fiber	
Filler	BaSO ₄	20
Sum		100

Table 2. Manufacturing parameter of friction materials used in this work

Specimen number	Hot pressing condition		
	Time (min.)	Temperature (°C)	Pressure (kgf/cm ²)
1	9	180	270
2			295
3			320
4			345
5		200	270
6			295
7			320
8			345
9*		220	270
10	295		
11	320		
12	345		

또한, 본 연구에 앞서 기본 마찰재의 성형조건(온도, 압력, 시간)에 따른 물성이 마찰 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위

해서 경도 및 기공도 등의 재질특성시험을 실시하였다. 이를 위해 변화시킨 마찰재의 성형조건은 Table 2에 나타내었다.

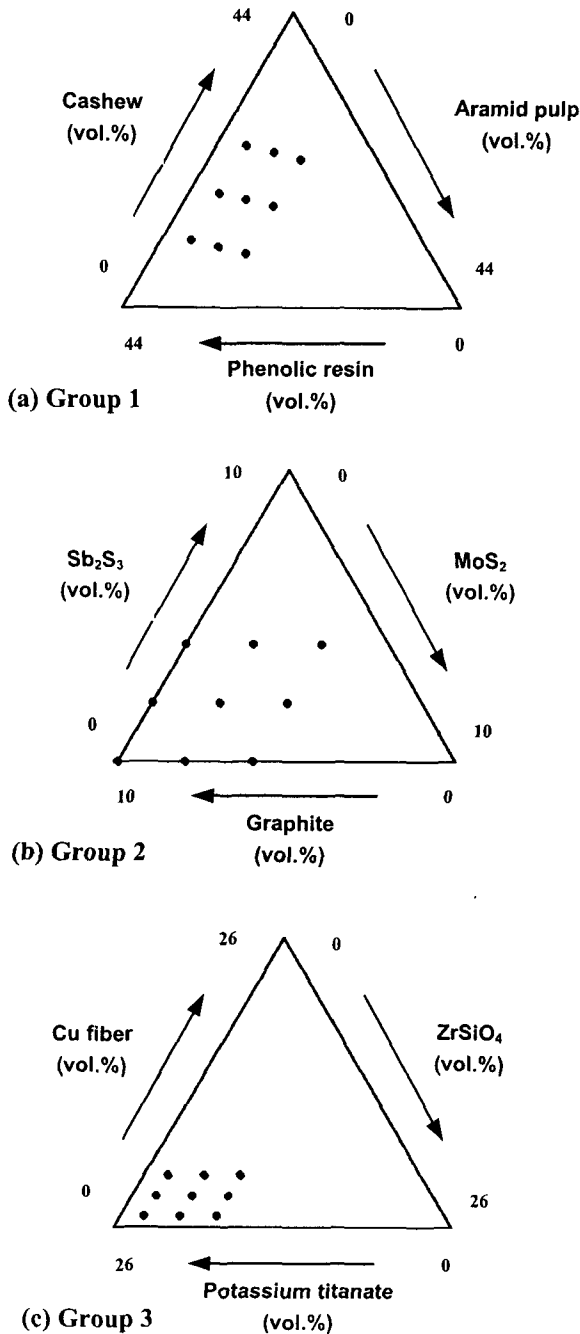


Fig. 1. Data points from constrained mixture design for each raw material group in the Table 1.

본 연구에서는 마찰재에 사용된 원료물질들을 group 1, 2, 3으로 분류하였고, 각각의 그룹은 제한된 영역에서의 실험계획법에 의하여 함량을 변화시켰다. 총 25 개의 실험점(data point)은 Fig. 1에 나타내었다[3].

Table 3. The amount of raw material ingredients used for ANOVA [vol.%]

A ⁻	B ⁻	C ⁻	D ⁻	E ⁻	
			D ⁺	E ⁺	
		C ⁺	D ⁻	E ⁻	
			D ⁺	E ⁺	
		B ⁺	C ⁻	D ⁻	E ⁻
				D ⁺	E ⁺
	C ⁺		D ⁻	E ⁻	
			D ⁺	E ⁺	

Amounts of the other raw materials are fixed. A=cashew, B=graphite, C=Sb₂S₃, D=ZrSiO₄, E=Cu fiber. '+' indicates 50 vol.% increase and '-' indicates 50 vol.% decreases from the basic formulation.

그리고, 본 연구는 위의 마찰시험결과에

따라 산출된 cashew, graphite, Sb_2S_3 , $ZrSiO_4$, Cu fiber 를 분산분석법(ANOVA)에 적용시키기 위해 각각의 함량을 $\pm 50\text{vol.}\%$ 로 변화시켜 Table 3 에 나타내었다. 그 이외의 원료물질의 함량은 고정시켜 총 32 개의 마찰재 시편을 제조하였다.

본 실험에서는 pad-on-disk 형태의 정속 마찰시험기를 사용하였으며 하중을 부가하기 위해 유압장치를 사용하였다[4]. 마찰재 시편의 크기는 $2 \times 2 \times 1\text{cm}$ 이며 2 개의 동일한 마찰재 시편이 사용되었다(총 마찰면적= 8cm^2). 마찰마모 실험에서 측정된 모든 자료는 PC-based DAQ(LAB-PC-1200, National Instrument)시스템을 이용하여 100Hz의 데이터 처리속도로 저장하였다. 본 실험에서 실시한 마찰마모시험의 자세한 조건은 Table 4 에 나타내었다. 마찰계면에서의 온도는 비접촉식 적외선 온도계(infrared heat tracer, 3M IR-16)를 사용하여 회전하는 디스크의 표면온도를 측정하였다. 마찰재와 구성원료의 고온 열분해 특성을 고찰하기 위해 열분석기(thermal analyzer, Netzsch model STA 409EA)를 이용하여 1000°C 까지 측정하였다[4].

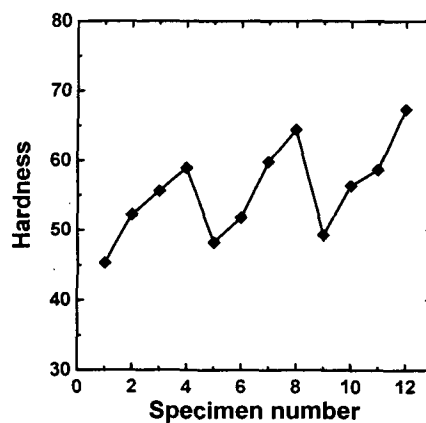
Table 4. Friction test procedures

Burnish	IBT: 100°C , 0.7MPa, 150sec, 5times
Drag	IBT: 100°C , 0.7MPa, 150sec, 5times
Constant interval test	IBT: 100°C , 4m/s, 0.7MPa 20sec(drag)&10sec(off-drag), 20times
Wear test	IBT: 100°C , 4m/s, 0.7MPa 180sec(drag), 20times

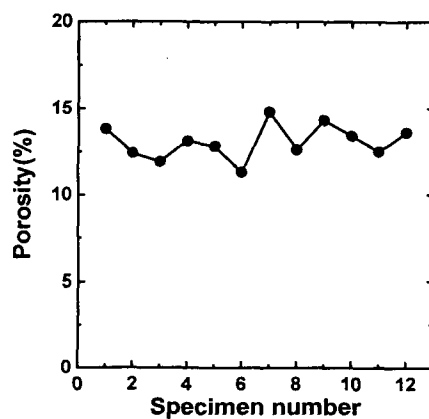
3. 실험결과 및 고찰

3-1. 성형조건에 따른 기본 마찰재의 재질특성

본성형시 성형조건에 따라서 일부 마찰재 성분들이 화학반응을 하거나 또는 마찰재 원료에 포함되어 있는 수분이 성형 과정에서 기체를 발생시켜 재질에 영향을



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Hardness, (b) Porosity of friction materials.

미치게 된다[5]. 따라서 성형조건에 따른 마찰재의 물성이 마찰특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 Table 2의 성형조건으로 12개의 마찰재 시편을 제조하여 각각의 경도 및 기공도를 측정하였다(Fig. 2). 경도는 온도와 압력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으나 기공도는 성형조건에 따라 큰 변화를 나타내

지 않았다. 일반적으로 제동시 진동과 소음을 줄이기 위해서는 기공도가 10% 이상이 되어야 바람직한 것으로 알려져 있다. Fig. 3은 경도 및 기공도에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 마찰재의 마찰계수는 경도 및 기공도에 비교적 일정한 값을 유지하였다. 따라서, 성형조건에 따른 마찰재의 물성이 마찰특성에 직접적인 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다[6].

3-2. 제한된 영역에서의 실험계획법에 따른 마찰계수의 변화($\Delta\mu$)

Fading은 고온에서 발생하는 마찰계수의 감소현상으로, 그 때의 최대마찰계수와 최소마찰계수 차이의 폭($\Delta\mu = \mu_{\max} - \mu_{\min}$)으로 나타낼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 각 group 별로 설정된 실험점(data point)의 함량에 해당하는 마찰재를 제조하여 고온에서의 마찰계수의 변화($\Delta\mu$)를 측정하기 위해 일정시간간격시험(constant interval test)을 실시하였다. 일정시간간격시험은 초기제동온도(initial brake temperature)를 100°C로 유지하고 20초간 끌기시험을 20번 반복하여 그 구간별 평균마찰계수로서 최대값(μ_{\max})과 최소값(μ_{\min})을 구하여 $\Delta\mu$ 를 계산하였다.

Group 1은 phenolic resin, cashew, aramid pulp의 함량을 50%범위 내에서 변화시키고 나머지 7개의 원료물질의 함량은 고정시켰다. 각 group 별로 이루어진 실험영역

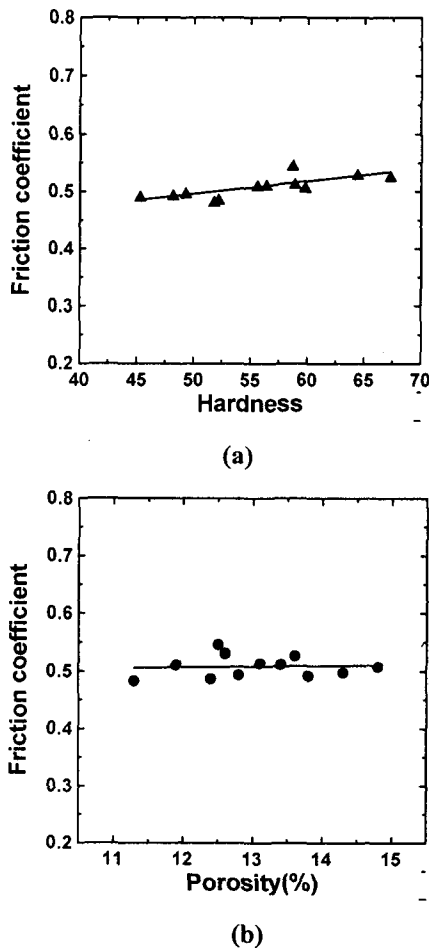


Fig. 3. Correlation between friction coefficient and (a) hardness, (b) porosity.

내의 중심점(center point)들은 모두 같은 실험점으로서 기본 마찰재의 조성을 나타낸다. Fig. 4는 고온마찰시험 후에 측정된 $\Delta\mu$ 의 추이를 중회기분석(polynomial regression)으로써 나타내었다. 중회기분석에서의 결정계수(determination coefficient: R^2)는 0.91 이었다. $\Delta\mu$ 는 cashew의 함량이 증가할수

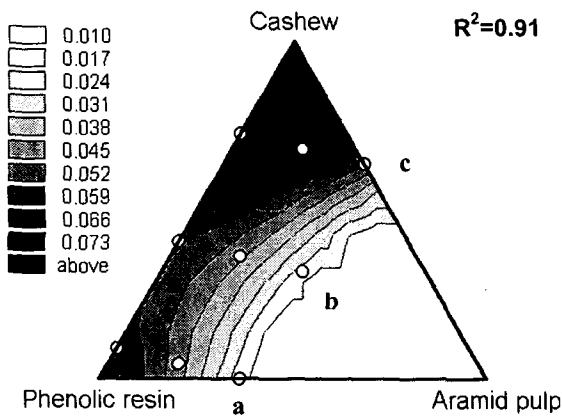


Fig. 4. $\Delta\mu(=\mu_{\max}-\mu_{\min})$ on ternary diagrams enclosed by the confined compositions of group 1.

특 급격히 증가하였으며, aramid pulp의 함량이 증가할수록 다소 감소하는 현상을 보였다. 페놀수지(phenolic resin)는 $\Delta\mu$ 에 큰 영향을 주지 않았으나 극히 함량이 많은 경우에 증가 현상을 나타내었다. 특히, cashew의 경우는 중심점(center point)이상의 함량에선 $\Delta\mu$ 가 급격히 증가하였다. 따라서, 원료함량 변화에 따라 $\Delta\mu$ 에 영향을 미치는 원료물질은 cashew와 aramid pulp로 나타났으며, group 1의 경우 a, b, c 점을 연

결하는 선이 가장 낮은 $\Delta\mu$ 를 나타내었다.

Group 2는 윤활제들인 graphite, Sb_2S_3 , MoS_2 으로 구성되어 있어서 그 함량을 100%내에서 변화시켰다. Fig. 5는 고온마찰시험 후에 측정된 $\Delta\mu$ 의 추이로서 결정계수(R^2)는 0.95 였다. $\Delta\mu$ 는 Sb_2S_3 의 함량이 증가함에 따라 지속적으로 증가하고,

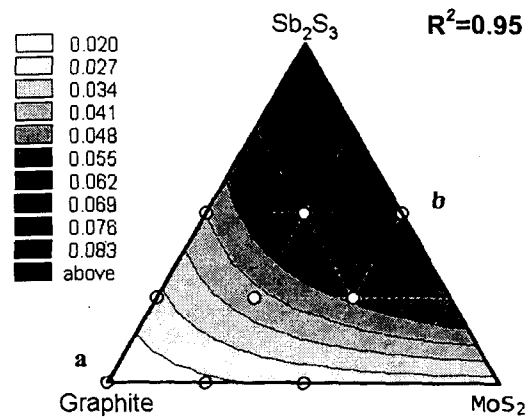


Fig. 5. $\Delta\mu(=\mu_{\max}-\mu_{\min})$ on ternary diagrams enclosed by the confined compositions of group 2.

graphite의 함량이 증가함에 따라 지속적으로 감소하는 현상을 나타내었다. 이는 $\Delta\mu$ 가 graphite와 Sb_2S_3 의 상대적 비율에 따라서 영향을 받는 것으로 사료된다. MoS_2 는 함량변화에 따른 $\Delta\mu$ 에 비교적 적은 영향을 나타내었다. 따라서, 함량변화에 따라 $\Delta\mu$ 에 영향을 미치는 원료물질은 graphite와 Sb_2S_3 로 사료되며, a와 b 점을 연결하는 선이 가장 효과적인 $\Delta\mu$ 의 추이를 나타내었다.

Group 3 은 potassium titanate, $ZrSiO_4$, Cu fiber 의 함량을 50%범위 내에서 변화시켰다. Fig. 6 은 고온마찰시험 후에 측정된 $\Delta\mu$ 의 추이로서 결정계수(R^2)는 0.89 였다. $\Delta\mu$ 는 $ZrSiO_4$ 의 함량이 증가할수록 급격히 증가하고, Cu fiber 의 함량이 증가할수록 감소하는 현상을 나타내었다. 이는 $\Delta\mu$ 가 $ZrSiO_4$ 와 Cu fiber 의 상대적 비율에 따라

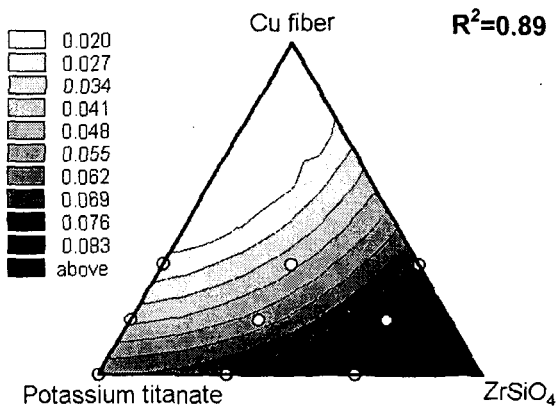


Fig. 6. $\Delta\mu(=\mu_{max}-\mu_{min.})$ on ternary diagrams enclosed by the confined compositions of group 3.

서 영향을 받는 것으로 사료된다. Potassium titanate 는 함량변화에 따른 $\Delta\mu$ 에 큰 영향을 주지 않았다. 따라서, 함량변화에 따라 $\Delta\mu$ 에 영향을 미치는 원료물질은 $ZrSiO_4$ 와 Cu fiber 로 사료된다.

3-3. 분산분석 (analysis of variance)

본 연구에서는 3-2 의 결과와 지금까지 발표된 연구결과를 조사하여[7-10], 고온

fade 현상에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 cashew, graphite, Sb_2S_3 , $ZrSiO_4$, Cu fiber 를 대상으로 실험하였다. 따라서, 이 5 가지 원료물질의 상호작용(interaction)을 유추하고자 분산분석을 실시함으로써 어떠한 원료물질들이 고온 fade 현상에 가장 영향을 미치는지 고찰하고자 하였다. 3-2 와 마찬가지로 일정시간간격시험(CIT)을 실시하여 $\Delta\mu$ 를 계산하였다.

Fig. 7 에는 분산분석 후에 각 인자(factor)들의 $\Delta\mu$ 에 대한 영향을 나타내었다. 5 가지 인자인 cashew, graphite, Sb_2S_3 , $ZrSiO_4$, Cu fiber 는 A, B, C, D, E 로 표기하였으며, 각각의 상호작용은 AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE, DE, ABC, ABD, ABE, ACD, ACE, ADE, BCD, BCE, BDE, CDE, ABCD, ABCE, ABDE, ACDE, BCDE, ABCDE 로 나타내었다. $\Delta\mu$ 에 대한 영향은 cashew, graphite & Sb_2S_3 , cashew & graphite 순으로 나타났다. 특히, graphite 는 Sb_2S_3 및 cashew 와 연계되어 고온 fade 특성에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Graphite 는 carbon 간에는 강한 공유결합을 하고 있지만 층간에는 약한 van der waals 결합을 하고 있다. 따라서 상온에서는 수분이나 습기등과 잘 흡착하여 우수한 윤활특성을 나타내지만 고온에서는 층간전단강도(interfacial shear strength)를 줄이기 위해서 결정간 결합이 약해져서 마찰계수가 감소하는 것으로 알려져 있다.

Cashew의 $\Delta\mu$ 에 대한 영향은 온도분포

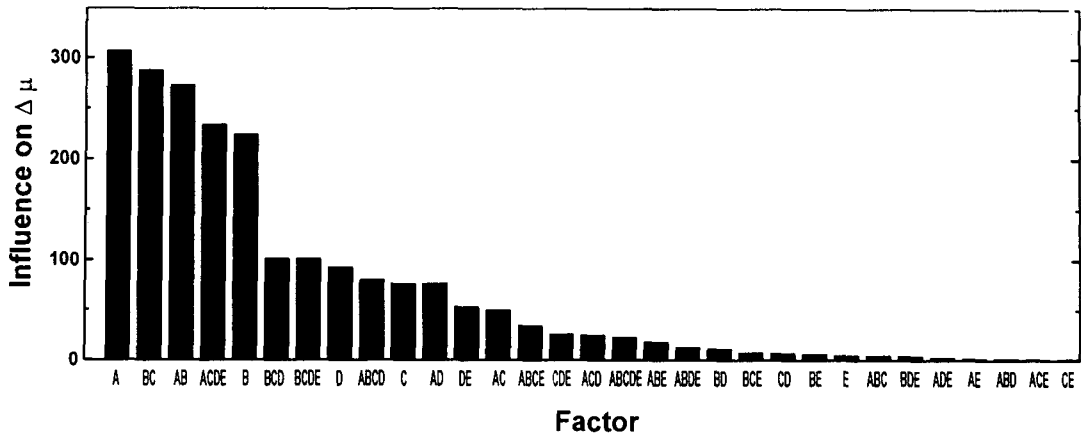


Fig. 7. Influence on $\Delta\mu(=\mu_{\max}-\mu_{\min.})$ of factors using analysis of variance.

A=cashew, B=graphite, C=Sb₂S₃, D=ZrSiO₄, E=Cu fiber

에 따른 열분해(pyrolysis) 특성에서 기인된 결과라고 평가된다. 일반적으로 cashew 는 마찰조절제로서 소음을 줄여주고 마찰계 수를 안정화시켜주는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 하지만 본 마찰시험은 고온 fade 특성을 고찰하기 위해서 가혹한 조건으로 실험을 하였으며, 측정된 디스크 표면의 온도는 350℃ 이상의 고온이었다. 또한, 마찰계면에서의 실제온도는 측정온도 이상의 고온으로 알려져 있다. 따라서 열중량 분석법(TGA:thermogravimetry analysis)을 이용하여 cashew 의 열적특성을 고찰하였다(Fig. 8). 열분석시 온도상승과 마찰시 발생하는 온도상승에는 차이를 보이지만 cashew 의 고온특성을 상대적으로 평가는 가능하였다. Fig. 8 에서 볼 수 있듯이 cashew 는 400℃ 부근에서 급격한 열분해 반응을 보이고 있다. Cashew는 cashew nut tree에서 자연적으로 생성된 CNSL(cashew

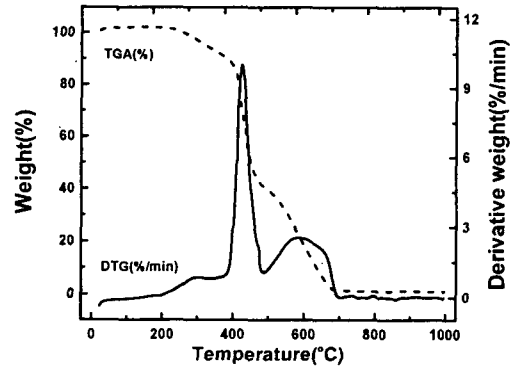


Fig. 8. Weight loss and derivative weight loss curves of cashew.

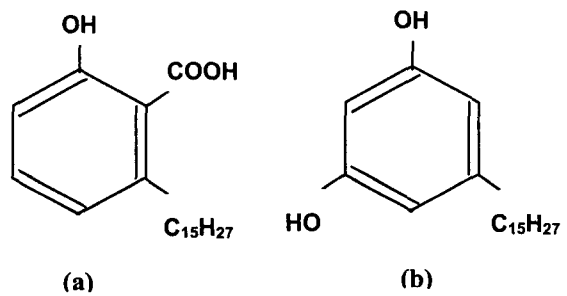


Fig. 9. Chemical structure of (a) anacardic acid and (b) cardol

nut shell liquid)을 이용하여 제조되며, 불포화기가 부착된 phenolic monomer를 기본으로 하는 polymer이다. CNSL은 90%의 anacardic acid와 약 10%의 cardol이며, 미량의 cardanol과 methyl cardol로 구성되어 있다(Fig. 9). 따라서, anacardic acid와 cardol이 약 400°C 이상의 온도에서 열분해 반응을 일으킴으로써 고온 fade 특성이 나타난 것으로 사료된다. 반면에 Cu fiber는 $\Delta\mu$ 에 대한 영향이 매우 작아서 우수한 anti-fade 특성을 나타내고 있다. 이는 Cu fiber의 높은 열전도도가 마찰계면의 열확산을 초래하여 온도상승을 억제할 뿐 아니라 고온에서 생성된 구리산화물이 마찰계수를 증가시키기 때문으로 사료된다. 또한 구리와 같은 연한 금속은 마찰시 상대표면에 전이막을 형성하는 경향이 있으며 이러한 경향은 고체윤활제와의 반응에 의해 더욱 가속되며 전이막의 형성에 따라 마찰계수를 약간 상승시키는 것으로 알려져 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 마찰재에 사용된 원료물질의 상대량에 따른 고온 fade 특성을 고찰하였다. 이를 통해 온도에 따른 마찰계수의 변화($\Delta\mu$)에 가장 영향을 미치는 원료물질을 밝히고자 하였다.

1. 고온 마찰특성은 마찰계수의 변화($\Delta\mu$)에 관계되며, 제한된 영역에서의 실험

계획법에 의해서 group 별로 $\Delta\mu$ 를 측정하였다. 그 결과 $\Delta\mu$ 에 효과적인 역할을 하는 원료물질은 cashew, graphite, Sb_2S_3 , $ZrSiO_4$, Cu fiber로 나타났다.

2. 위의 결과에 따라 cashew, graphite, Sb_2S_3 , $ZrSiO_4$, Cu fiber의 상호작용을 유추하고자 분산분석을 하였다. $\Delta\mu$ 에 대한 영향은 cashew, graphite & Sb_2S_3 , cashew & graphite 순으로 나타났다. 반면에 Cu fiber는 우수한 anti-fade 특성을 나타내었다. 고온 마찰특성은 fade 현상뿐만 아니라 마모(wear), 소음(noise), 대면공격성(aggressiveness), 진동(vibration)과 같은 현상과도 관계된다. 그러나 본 연구는 고온에서의 마찰계수 감소에만 중점을 두었으므로 우수한 마찰특성을 나타내는 마찰재를 제조하기 위해서는 상기한 특성들에 대한 다각적인 모색이 필요하다.

참고문헌

1. J.D. Halderman, "Automotive Brake Systems," Prentice Hall, Columbus, Ohio, 1996.
2. Kim, S. J., Cho, M.H., Lim, D.S. and Jang, H., "Synergistic Effects of Aramid Pulp and Potassium Titanate Whiskers in the Automotive Friction Material," Wear, Vol.251, pp.1484-1491, 2001.
3. Jang, H., Lee, J.S., and Fash, J.W., "Compositional Effects of the Brake Friction Material on Creep Groan Phenomena,"

- Wear, Vol.251, pp.1477-1483, 2001.
4. Kim, S. J. and Jang, H., "Friction and Wear of Friction Materials containing Two Different Phenolic Resins Reinforced with Aramid Pulp," Tribology International, Vol. 33, No.7, pp.477-484, 2000.
 5. Jacko, M.G. and Ducharme, R.T., "Simulation and Characterization of used Brake Friction Materials and Rotors," SAE paper, No.730191, 1973.
 6. Kim, S. J. and Jang, H., "Friction Characteristics of Non-Asbestos Organic and Low-Steel Friction Materials: The Comparative Study," KSTLE International Journal, Vol.1, No.1, pp1-7, 2000.
 7. Ko, K. J., Cho, M. H., and Jang, H., "The Effect of Metal Fibers on the Tribology of Automotive Friction Materials," Journal of the KSTLE Vol.17, No.4, pp.267~275, 2001.
 8. Kim, S. J. and Jang, H., "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.
 9. Kim, S. J. and Jang, H., "High Temperature Friction and Wear of Friction Material; The Effect of the Relative Amount of Graphite and Zirconium Silicate ($ZrSiO_4$)," Journal of the KSTLE, Vol.16 No.5, pp.365-372, 2000.
 10. Kim, S. J. and Jang, H., "Effects of the

Relative Amounts of Graphite and Antimony Trisulfide(Sb_2S_3) on Brake Performance of Non-Asbestos Organic (NAO) Type Brake Linings," Journal of the KSTLE, accepted.