

Hexamethylenetetramine의 함량에 따른 마찰재의 마찰·마모 특성

김대균·장 호·윤호규

고려대학교 공과대학 재료금속공학부

Friction and Wear Characteristics of Friction Material with the Content of Hexamethylenetetramine

Dae Kyeun Kim, Ho Jang and Ho Gyu Yoon

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract – The friction characteristics of phenolic resin and model friction materials were investigated with the content of hexamethylenetetramine (HEXA). At 10 wt.% of HEXA, the phenolic resin and model friction materials showed the most stable friction coefficient in constant temperature test at various test conditions because of its good thermal stability and proper curing reaction. It was found from constant interval test in mild condition that the friction coefficients of friction materials cured with 10 wt.% of HEXA was the highest and stable values in the whole range of braking operations. However, at the severe condition in constant interval test, the friction coefficient of friction materials cured with 10 wt.% of HEXA was lowered and as the number of braking operation increased, the values became stable. In order to obtain the thermal stable friction materials, the content of HEXA from 5 to 10 wt.% could be recommended.

Key words – Phenolic resin, hexamethylenetetramine, friction coefficient, thermal stability.

1. 서 론

가장 오래된 열경화성수지중 하나인 페놀수지는 우수한 열적, 기계적 특성으로 인하여 많은 부분에 적용되고 있으며, 그 적용 범위는 일반 가정용품에서부터 정밀전자용품 및 항공산업까지 매우 광범위하다. 특히 열 안정성과 마찰특성이 우수하여 자동차용 마찰재의 binder로써 널리 사용되고 있다[1,2]. 지금까지 페놀수지의 함량에 따른 마찰·마모특성 변화에 관한 연구는 제시된 바 있으나 페놀수지의 경화특성에 영향을 미치는 경화제와 관련된 마찰·마모특성 연구는 거의 없는 실정이다.

페놀수지는 액상 및 고상 형태를 모두 가지면서 외부 경화제없이 열에 의해서 경화되는 resole과 열 이외에도 외부 경화제, 주로 소량의 hexamethylenetetramine(이하 HEXA)을 이용하여 경화되는 고상 형태의 phenol novolac(이하 PN)으로 나뉘는데[3], PN의

경우 경화제의 종류와 함량에 따라서 다른 경화특성을 보인다. 자동차용 마찰재에 주로 적용되는 binder가 PN-HEXA system과 PN-resole system[4]인 점을 생각할 때 경화제 함량의 변화에 따른 PN의 경화특성과 그로 인한 마찰·마모특성 변화에 대한 이해가 필요하다.

일반적으로 자동차용 마찰재는 12~20여종의 원료들로 구성되는 복합재료이며, 사용되는 원료의 종류와 배합방법 및 제조공정에 따라 마찰특성이 결정되어지지만, 지금까지 이 원료들의 배합에 따른 정확한 마찰·마모특성은 공개되어진 바 없다. 여러 구성원료들로 이루어진 마찰재에 대한 연구에 앞서 PN과 HEXA만으로 페놀수지시편을 제조하여 HEXA함량변화에 따른 마찰·마모특성을 연구하였으며, 이를 TGA(Thermal Gravimetric Analysis) 및 DMTA(Dynamic Mechanical Thermal Analysis)를 이용하여 분석하였다. 또한, 이러한 특성이 많은 원료들로 구성된 마찰재에

서 어떠한 경향으로 나타나는지를 확인하기 위하여 실제 적용되고 있는 마찰재의 구성원료 중 페놀수지를 포함한 6가지의 주원료를 선택한 뒤 HEXA함량을 변화시킨 마찰재를 제작하여 각 시편에 대한 마찰 · 마모특성을 연구하였다.

2. 실험

2-1. 원재료

본 실험에서 사용된 페놀수지시편은 phenol novolac(Meiwa Kasei Co., PSM4261 : PN)을 5, 10, 15 그리고 20 wt.%의 hexamethylenetetramine(Janssen Chemica : HEXA)으로 직접 경화시켰다. 또한 마찰재는 실제 마찰재의 구성원료로써 각 기능을 대표하는 6가지 원료를 적용하여 제작하였으며, 이들 원료에 대한 세부사항은 Table 1과 같다. 페놀수지와 다른 원료들의 계면접착특성을 향상시키기 위해 실란계 커플링제(γ -aminopropyltrimethoxysilane)를 소량(페놀수지를 제외한 원료들의 0.8 wt.%) 첨가하였다.

2-2. 시편의 제조

PN과 HEXA는 경화반응중에 NH_3 gas가 발생하기 때문에[4,5,6] 적당한 크기의 마찰 · 마모시험용 페놀수지시편 제조시 과도한 기공을 함유한 시편이 제조되기 쉽다. 기공의 함유량을 최소화하기 위해 PN과 HEXA를 110°C 의 교반기에서 용융 혼합하여 약 10% 경화시켜 NH_3 gas를 일부 제거한 다음 -10°C 로 급냉

시킨 뒤 분쇄하였다. 본성형(mold cure)은 160°C 에서 2시간동안 16.34 MPa의 하중으로 실시하였으며, 최초 3분간 gas제거 작업을 하여 약 2%이하의 기공을 나타내는 매우 양호한 상태의 시편을 얻을 수 있었다. 후경화(postcure)는 200°C 에서 6시간 실시하였다.

6가지의 원료를 혼합한 마찰재는 10%의 경화반응을 거치지 않고 바로 본성형을 실시한 뒤 후경화를 실시하였으며, 원료들의 혼합은 dry-mixer에서 실시하였다.

2-3. 측정

자체 제작한 pad-on-disk형의 마찰·마모시험기를 사용하였다. 시편의 크기는 가로, 세로, 높이 각각 10 mm이며, disk의 직경은 120 mm, 재질은 SKD11(HRC62 이상)이고, 표면 거칠기는 12.5S이다. 측정간 발생하는 도는 적외선 온도측정기(infrared heat tracer, 3M IR-60EXPL2-2)를 사용하여 시편과 접촉하는 disk의 표면을 측정하였다.

측정 전에 400 Cw 이상의 abrasive paper를 장착한 disk를 이용하여 3 MPa, 1 m/s 로 run-in 작업을 해주어서 측정시편의 표면을 일정하게 만들어 초기조건을 동일하게 해주었고, disk와 시편은 400 Cw 이상의 abrasive paper로 표면을 정리한 후 아세톤으로 세척하였다[1,7,8].

마찰 · 마모 측정은 HEXA함량에 따른 순수 페놀수지와 브레이크 패드용 마찰재에 대해 별도로 수행하였다. 측정 조건은 일반 평지에서의 제동특성을 모

Table 1. Description of raw materials used in this study

Component		Remarks	Composition [vol. %]
Binder	Phenolic resin	PN	20
		HEXA	5-20 wt.% of PN
Reinforcing fiber	Aramid pulp	Kevlar® #979	12
Filler	Barite	BaSO_4	50
Lubricant	Graphite	crystalline form of carbon	10
Abrasive	Zirconium silicate	ZrSiO_4	3
Friction modifier	Copper	Cu	5
Coupling agent	α -aminopropyl-trimethoxysilane	$\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_2-\text{NH}-(\text{CH}_2)_2-\text{Si}-(\text{OCH}_3)_2$ CH_3	.

사한 일정온도시험(Constant Temperature Test; CTT) 과 비탈길에서의 제동특성을 모사한 일정간격시험(Constant Interval Test); CIT)을 이용하였다[9]. CTT 는 초기 제동온도를 80°C이하로 유지하며 25초간의 끌기시험을 25회 반복한 뒤 각 구간별 마찰계수의 평균값을 이용하는 시험이며, CIT는 25초 간격으로 끌기시험을 연속적으로 실시하여 각 구간별 마찰계 수의 평균값과 각 구간내의 최고온도를 이용하는 시험이다. 각각의 마찰시험동안 발생하는 질량감소율을 이용하여 마모율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 페놀수지의 마찰 · 마모특성

Fig. 1은 일정한 압력하에서 속도를 달리하여 측정 한 페놀수지의 CTT결과를 나타낸 것이다. 최대 제 동횟수에 도달하였을 때의 마찰계수는 HEXA함량과 관계없이 0.2이하를 나타내고 있으나, 10 wt.%의 HEXA로 경화시킨 페놀수지를 제외한 나머지는 모두 제동횟수가 증가할수록 마찰계수가 감소하고 있으며, 10 wt.%의 HEXA로 경화시킨 페놀수지의 경 우만이 일정한 압력하에서 속도와 관계없는 가장 안정적 인 마찰계수를 나타내고 있다. HEXA 5 wt.%로 경화시킨 페놀수지는 가압 조건을 견디지 못하여 측

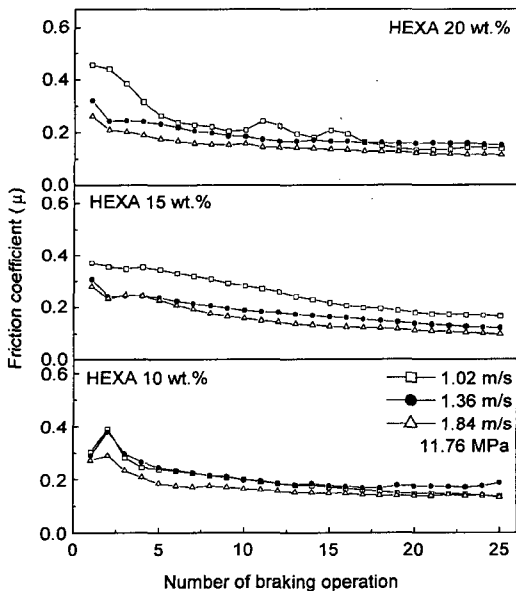


Fig. 1. Friction coefficient of phenolic resin with various velocity condition during constant temperature test.

정이 불가능하였으며, 따라서 측정용 페놀수지시편 제조시 5 wt.% 이상의 HEXA로 PN을 경화시킬 필 요성이 있다고 할 수 있다.

PV값의 변화에 따른 HEXA함량별 마찰계수의 변 화를 확인하기 위하여 Fig. 1에 나타낸 페놀수지시 편 의 CTT결과중 초기에 안정화를 이룬 16.05와 21.64 MPa · m/s 결과를 Fig. 2에 정리하여 나타내었다. HEXA 10 wt.%로 경화시킨 페놀수지시편의 마찰계 수가 가장 안정적인 것을 확인할 수 있었으며, PV값 이 높을수록 동일한 제동횟수에서 낮은 마찰계수를 갖고, 제동횟수 증가에 따른 마찰계수의 감소가 다 소 크다는 것을 알 수 있다.

페놀과 같은 열경화성수지는 일반적으로 적절한 당 량비에 따라 경화제와 반응하여 충분한 열경화 후에 안정적인 3차원 망상(network)의 분자구조를 갖는 것

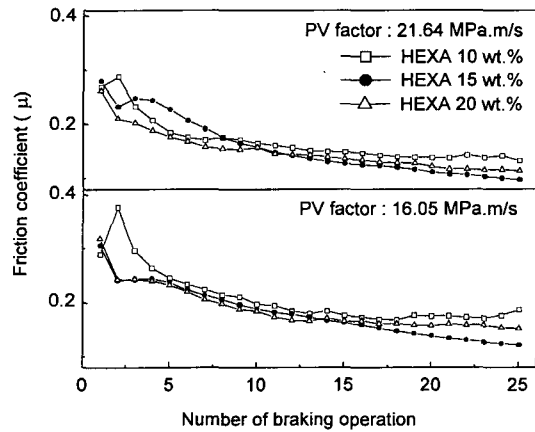


Fig. 2. Friction coefficient of phenolic resin under high PV factor during constant temperature test.

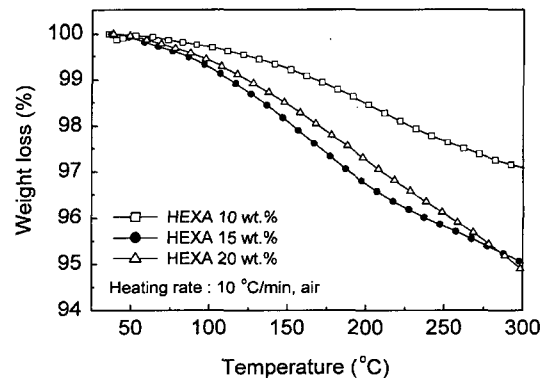


Fig. 3. TGA analyses of phenolic resin with the content of HEXA.

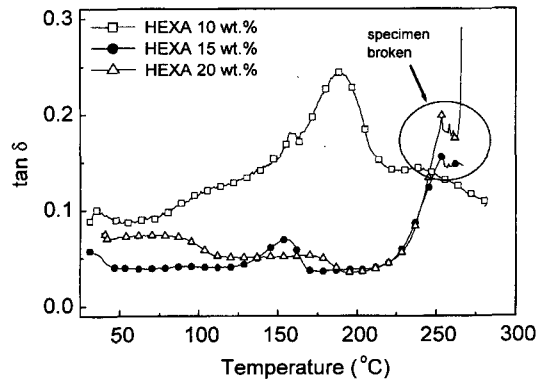


Fig. 4. DMTA analyses of phenolic resin with the content of HEXA.

으로 알려져 있으나, PN을 HEXA로 경화시킨 경우의 경화기구는 매우 복잡하며, 다만 10 wt.% 정도의 HEXA를 적용할 경우 안정적인 열적특성을 나타낸다고 알려져 있다. 본 연구에서도 10 wt.%의 HEXA로 페놀수지를 경화시킨 경우가 가장 안정적인 마찰계수를 보이고 있으며, 그 이유는 Fig. 3의 TGA 및 Fig. 4의 DMTA 결과로부터 확인할 수 있다. Fig. 3의 TGA 결과에서 알 수 있듯이 측정 온도 범위에서 HEXA 10 wt.%로 경화시킨 PN의 열분해가 가장 낮고, 15 wt.%의 경우가 가장 높았다. 이는 측정간 최고 180°C까지 온도가 상승한 페놀수지시편의 CTT 결과(Fig. 1, Fig. 2)와 일치하고 있음을 의미한다. Fig. 4의 DMTA 결과에서도 HEXA 10 wt.%의 경우 190°C 부근에서 T_g를 나타낸 반면, 나머지 시편은 온도 상승에 따른 불안정한 거동을 나타내다가 250°C 부근에서 열분해에 기인한 시편 파괴현상이 발생하고 있다. 이러한 특성은 분자 사슬의 가교점(crosslink point) 사이에 분자량 분포가 불균일하거나 불안정한 반응에 의해 생성된 불순물들이 망상구조 사이에 분포되어 있기 때문으로 판단된다[10]. 이상의 결과로부터 HEXA 함량이 10 wt.%를 초과하면 안정적인 열경화를 이룰 수 없고, 불완전한 분자가교구조를 초래함으로써 나쁜 마찰특성을 나타내는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 5에 페놀수지의 마모율 측정결과를 나타냈다. CTT 결과에서 비교적 높은 마찰계수를 나타내는 HEXA 10 wt.%의 페놀수지가 HEXA 15, 20 wt.%의 시편보다 약간 높은 마모율을 나타내었고, 15와 20 wt.%는 비슷한 정도의 마모율을 보였다. 또한 PV

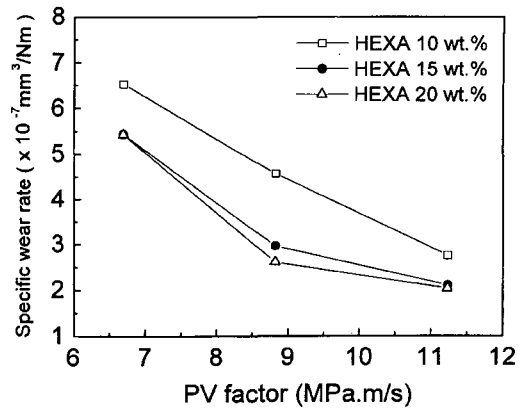


Fig. 5. Specific wear rate of phenolic resin with PV factor during constant temperature test.

값이 증가함에 따라 마모율은 감소하는 경향을 나타냈으며, 이는 낮은 PV값에서는 온도의 영향이 크지 않지만, PV값이 증가할수록 온도상승에 따른 윤활막의 형성이 촉진되기 때문에 나타나는 결과로 판단된다[1]. 12 MPa·m/s를 초과하는 PV범위에서는 열적 열화로 인해 측정시편의 부분적 파괴가 일어나는 등의 극심한 질량변화를 나타내어 이에 대한 결과는 Fig. 5에서 제외시켰다.

HEXA 함량에 따른 윤활막 형성의 차이는 Fig. 1의 CTT 결과에서도 관찰할 수 있으며, HEXA 10 wt.%의 경우만이 초기 윤활막이 없는 상태에서 마찰계수가 증가하다가 윤활막의 형성과 동시에 감소하는 경향을 보이는 반면, 열 안정성이 나쁜 15, 20 wt.%의 경우는 빠른 윤활막의 형성으로 인해 지속적으로 마찰계수가 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 마찰계수의 증가 및 감소에 대한 분석은 이미 발표된 바 있으며 [12], 이러한 경향은 본 연구에서도 일치하였다. 윤활막은 고분자표면의 부드러운 asperity들에 대한 금속표면의 반복되는 미끄럼 운동에 기인하여 재료의 연화가 발생하며, 따라서 고분자 표면의 부분적 melting에 의해 형성되는 것이라 할 수 있다[13,14].

3-2. 마찰재의 마찰·마모 특성

마찰재의 마찰·마모시험에는 페놀수지의 마찰·마모시험에 적용한 PV값 중에서 가장 높은 21.64 MPa·m/s(11.76 MPa, 1.84 m/s)를 적용하여 실시하였다. 6가지의 원료로 구성된 마찰재에 대하여 저온에서의 마찰특성을 확인할 수 있는 CTT결과와 고온

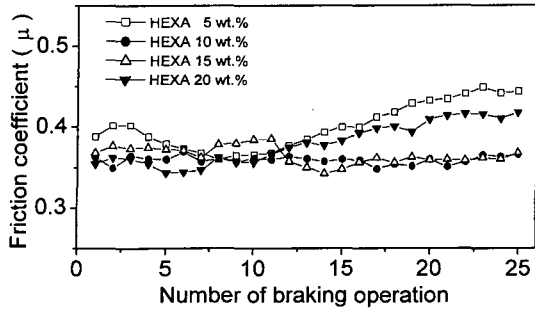


Fig. 6. Friction coefficient of friction material with the content of HEXA during constant temperature test.

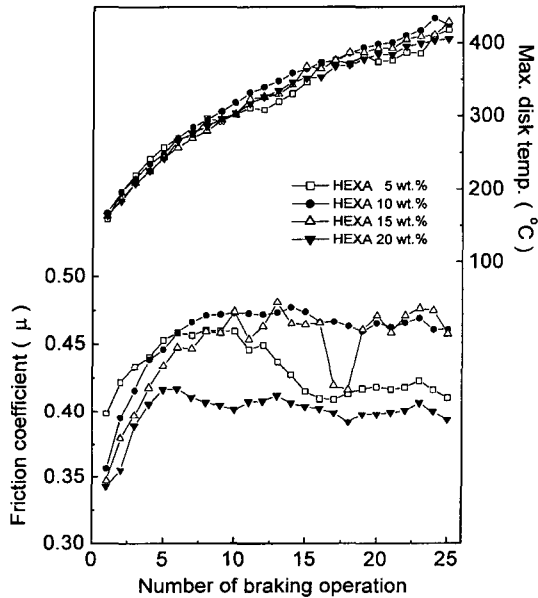


Fig. 7. Friction coefficient and maximum disk temperature of friction material with the content of HEXA during constant interval test.

에서의 마찰특성을 확인할 수 있는 CIT결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다.

Fig. 6의 HEXA함량에 따른 CTT결과로부터 마찰재는 페놀수지와 동일하게 HEXA 10 wt.%로 경화시킨 경우가 가장 안정적인 마찰계수를 나타내었으며, 5 및 20 wt.%의 경우는 제동횟수 10회 이상에서 서서히 증가하는 마찰계수를 나타내고 있고, 15 wt.%로 경화시킨 경우는 12회 이상에서 fading 현상이 발생하고 있다. HEXA 10 wt.%의 안정적인 마찰계수는 순수 페놀수지에 대한 측정 결과와도 일치하는 것으로써, 10 wt.%보다 많거나 적은 HEXA로 경

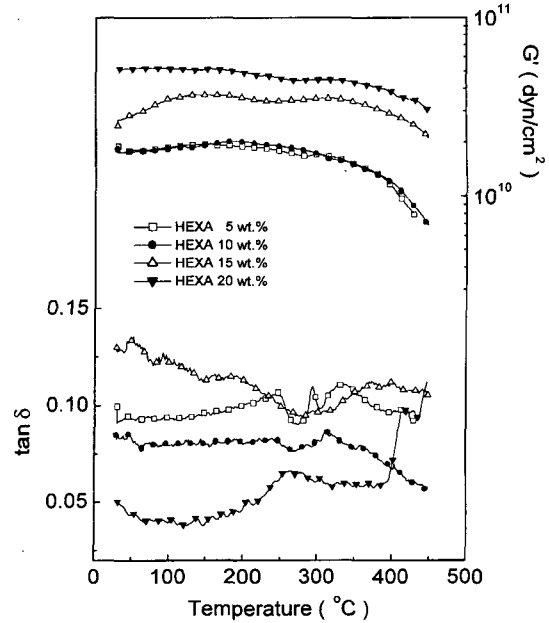


Fig. 8. DMTA analyses of friction material with the content of HEXA.

화시킬 경우 부적절한 열경화 반응에 의한 마찰특성의 저하를 초래하는 것이라고 할 수 있다. 마찰재에 대한 CIT결과(Fig. 7)에서도 HEXA 10 wt.%로 경화시킨 마찰재가 가장 안정적인 마찰계수를 나타내고 있으며, 특히 각 시편에서 보이는 fading 현상을 비교하면, HEXA 20 wt.%의 시편이 7회 측정에서 가장 빨리 나타났으며, HEXA 5 및 15 wt.%는 약 11회 측정에서, 10 wt.%의 경우는 약 16회 측정에서 나타나는 경향을 보였다. 이때의 fading이 발생하는 온도는 각각 270°C, 310°C 및 360°C로, HEXA함량에 따른 마찰재의 내열성을 확인할 수 있었다.

CTT와 CIT에서 나타나는 HEXA함량별 마찰계수의 안정성과 크기의 차이는 10°C/min의 승온조건에서 0.1%의 변화율을 가하며 측정된 DMTA결과로부터 그 원인을 확인할 수 있었으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. DMTA의 저장탄성율(G')변화에서 HEXA 10 wt.%시편을 제외하고 모두 300°C이하에서 감소 후 증가하는 불안정한 거동을 보였으며, HEXA 20 wt.%시편의 경우 초반부터 감소하는 경향을 보이고, HEXA 15 wt.%시편은 증가했다가 감소하는 폭이 가장 크게 나타났다. 이러한 불안정한 거동은 tanδ 결과에서도 보이며 G'과 tanδ에서 가장 안정적인 거동을 보인 HEXA 10 wt.%시편에서 가장 안정적인

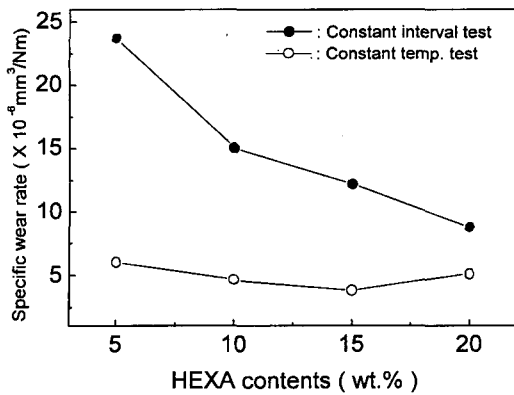


Fig. 9. Specific wear rate of friction material with the content of HEXA.

마찰계수가 나타난 것으로 판단된다.

CIT와 CTT로부터 측정된 마모율을 Fig. 9에 나타내었다. 초기 제동온도를 80°C이하로 유지하며 측정된 CTT의 마모율은 Fig. 6의 CTT결과에서 불안정한 마찰계수를 보인 HEXA 5와 20 wt.%가 비교적 높은 마모율을 보였지만, 전반적으로 CIT의 마모율보다 낮은 값을 나타내었다. CIT의 마모율은 측정간 발생하는 고온 영향으로 HEXA함량에 따른 마모율

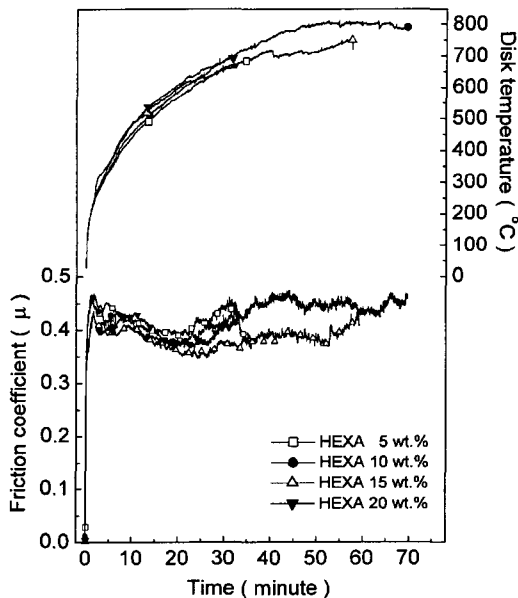


Fig. 10. Friction coefficient and disk temperature of friction material with the content of HEXA during dragging test.

의 차이가 확실히 구분되었으며, HEXA 20 wt.%의 경우 빠른 fading 현상을 보인 뒤 나타나는 가장 낮은 마찰계수로 인하여 낮은 마모율을 보였고, HEXA 함량이 감소할수록 마모율은 점차 증가하였다.

HEXA 10 wt.%시편의 고온안정성은 Fig. 10에 나타낸 dragging test결과에서도 확인할 수 있었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 HEXA 10 wt.%시편만이 800°C까지 끌기실험을 하는 동안 떨림현상이 측정이 가능하였다. 그러나, HEXA 15 wt.%의 경우 750°C 부근부터 떨림현상이 나타났고 HEXA 20과 5 wt.%또한 700°C와 685°C에서 각각 떨림현상을 보여 더 이상의 측정이 불가능하였다. Dragging test 동안 발생한 질량감소율을 이용하여 나타낸 마모율을 Fig. 11에 나타내었으며, 측정간 가장 높은 온도까지 올라간 HEXA 10 wt.%시편에서 보인 높은 마모율을 제외하고는 CIT에서 나타난 마모율결과와 같이 HEXA 함량의 증가에 따라 마모율이 감소하는 결과를 나타내었다.

페놀수지와 같은 열경화성 수지의 경화도는 경화온도와 경화시간에 따라 큰 차이를 나타내며 최적의 경화도를 나타내기 위해서는 수지의 유리전이온도보다 약 20~30°C 높은 온도에서 충분한 시간동안 경화를 시켜야한다. 이러한 특성은 열경화성 수지의 온도 및 시간에 따른 유리화(vitrification)와 겔화(gelation)를 나타낸 Gillham등의 Time-Temperature-Transformation(TTT) diagram을 통해서 알 수 있다[17]. 또한 높은 온도와 장시간에 걸친 경화과정에 의해 열경화성 수지의 경화도가 증가하는 것은 PN과 HEXA분자의 운동(mobility)에 관계하는 것으로 높은 온도에

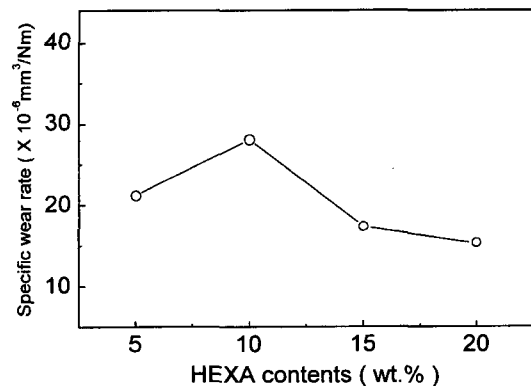


Fig. 11. Specific wear rate of friction material with the content of HEXA during dragging test.

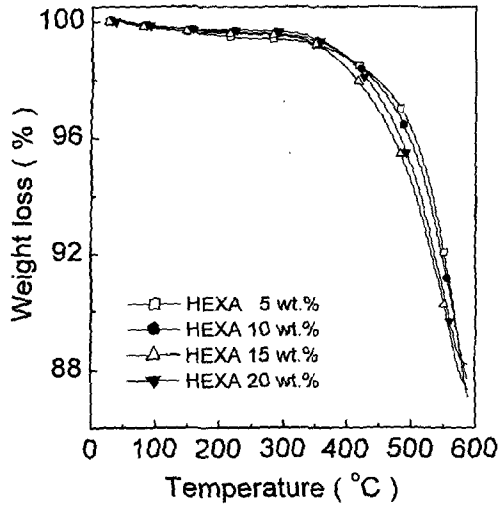


Fig. 12. TGA analyses of friction material with the content of HEXA.

서 분자의 운동이 충분히 빨라질 수 있고, 또한 짧은 시간보다는 충분한 시간에 걸친 분자운동의 축진으로 인해 양분자간의 반응이 더욱 원활하게 진행될 수 있기 때문이다[18]. 그러나, 이러한 분자의 운동은 마찰재와 같이 많은 종류 및 함량의 원료들이 포함될 경우에는 수지를 제외한 나머지 원료들에 의해 수지의 분자 운동이 제한되어 질 수 있으며, 따라서 수지를 제외한 원료들의 입자 크기와 함량에 따라 경화특성이 달라질 수 있을 뿐만 아니라 마찰재의 내열특성에도 많은 영향을 미칠 수 있다. Fig. 12는 HEXA함량을 달리한 마찰재의 TGA결과를 나타낸 것으로써 초기 350°C 부근까지는 HEXA 10 및 20 wt.%로 경화시킨 마찰재의 중량감소가 약간 낮은 것으로 나타났으나 약 400°C 이상에서는 5, 10, 20, 15 wt.%의 순서로 낮은 중량감소를 보이고 있다. 이것은 앞에서 서술한 바와 같이 PN과 HEXA의 분자운동에 의한 경화반응이 이들을 제외한 원료들에 의해 방해를 받아, 상대적으로 낮은 함량의 HEXA로 경화시킨 경우가 분자 이동이 제약받을 수 있는 확률이 적어지기 때문이라고 할 수 있으며, 따라서 보다 나은 3차원 망상 분자구조를 형성할 수 있었기 때문으로 판단할 수 있다. 이와 같은 중량감소는 순수하게 페놀수지만에 의한 중량감소이므로 중량감소율이 낮을수록 3차원 분자구조가 완벽하게 이루어진다고 할 수 있다.

Fig. 13은 2분간 연속적인 끌기시험 뒤의 마찰계수

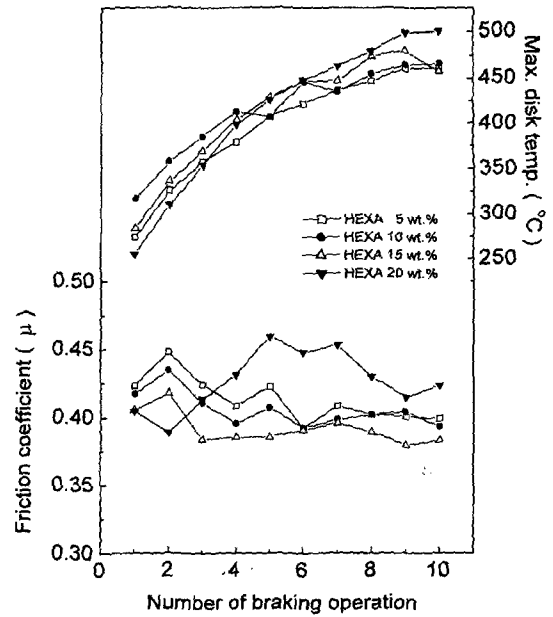


Fig. 13. Friction coefficient and maximum disk temperature of friction material with the content of HEXA during modified constant interval test.

의 평균값을 나타낸 CIT결과로써, HEXA 5 및 10 wt.%로 경화시킨 마찰재의 온도상승이 가장 완만하게 나타나고 있으며, 400°C이후에도 HEXA 5 및 10 wt.%의 경우가 가장 낮은 온도를 나타냈다. 또한 25초간의 연속 끌기시험 결과인 Fig. 7에 비하여 HEXA 함량에 따른 온도차이가 크며 마찰계수의 변화 역시 매우 다른 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 마찰열은 마찰재 및 disk의 열전도도에 따라 발생정도가 다르게 나타나지만, 본 마찰재는 HEXA함량만이 다른 경우이며, 따라서 마찰재를 구성하고 있는 각종 원료들에 의한 열발산 효과를 극대화하기 위해서는 여러 원료들간 network를 형성할 수 있고 마찰 운동간에 이들의 network를 유지할 수 있도록 적절한 HEXA함량으로 페놀을 경화시켜 최적의 분자 구조를 갖도록 하여야 한다. Fig. 13에서 나타난 5 및 10 wt.%의 시편이 가장 낮은 온도를 나타내고 있는 것은 Fig. 12의 TGA결과를 간접적으로 나타내고 있다고 볼 수 있으며, 따라서 수지를 제외한 원료들의 함량이 본 실험에서와 같이 80 vol.%일 경우에는 적절한 경화 특성과 분자 운동을 고려하여 5~10 wt.%의 HEXA로 마찰재를 구성하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

4. 결 론

PN과 HEXA만으로 만들어진 페놀수지시편을 이용한 마찰·마모특성 연구로부터 HEXA 10 wt.%시편이 가장 높고 안정적인 마찰특성을 보였으며, 이는 15와 20 wt.%의 HEXA에 비해 10 wt.%의 HEXA가 안정적 경화물을 만드는 적절한 경화제의 함량이기 때문임을 TGA 및 DMTA결과로부터 확인할 수 있었다.

HEXA함량을 변화시켜가며 제작한 브레이크 패드형 마찰재의 마찰·마모시험으로부터 HEXA함량 변화가 마찰재의 마찰·마모특성에 커다란 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었으며, 저온은 물론 400°C이상의 고온조건 실험으로부터 5~10 wt.%의 HEXA를 첨가한 마찰재의 경우 안정적인 마찰특성을 확인할 수 있었고, 이는 마찰재에서 많은 원료들을 묶어주는 binder로써 사용된 PN의 경화에 적정량의 HEXA가 사용되어 안정적인 구조를 이루었기 때문으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지원 특정기초과제 “자동차 브레이크용 마찰재에 사용되는 원료와 제조공정이 마찰특성에 미치는 영향(과제번호 : 98-0200-02-01-3)”의 세부과제 “페놀수지의 경화특성이 자동차용 마찰재의 마찰특성에 미치는 영향”의 일부로 수행된 것으로서 이에 그 재정적 지원에 대하여 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. P. Gopal, L. R. Dharani, Frank D. Blum, “Load, Speed and Temperature Sensitivities of a Carbon-Fiber-Reinforced Phenolic Friction Material,” *Wear*, Vol. 181-183, pp. 913-921, 1995.
2. M. G. Jacko, W. M. Spurgeon, R. M. Rusnak and S. B. Catalano, “Thermal Stability and Fade Characteristics of Friction Materials,” *SAE Q. Trans.*, Paper 680417, 1968.
3. S. Chow, P. R. Steiner, “Comparisons of the Cure of Phenol-Formaldehyde Novolac and Resol Systems by Differential Scanning Calorimetry,” *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 23, pp. 1973-1985, 1979.
4. W. A. Keutgen, *Phenolic Resins*, 1st ed., Union Carbide Corporation, US, Vol. 10, pp. 1-73, 1986.
5. Galen R. Hatfield, Gary E. Maciel, “Solid-state NMR Study of the Hexamethylenetetramine Curing of Phenolic resins,” *Macromolecules*, Vol. 20, pp. 608-615, 1987.
6. James M. Herring, Jr., “Mechanism of Brake Fade in Organic Brake Linings,” *SAE Q. Trans.*, Paper 670146, 1967.
7. S. K. Sinha, “Effect of Sliding Speed on Friction and Wear of Uni-directional Aramid Fibre-Phenolic Resin Composite,” *J. Mat. Sic.*, Vol. 30, pp. 2430-2437, 1995.
8. S. K. Sinha, “Friction and Wear Behaviour of Continuous Fibre as Cast Kevlar-Phenolic Resin Composite,” *J. Mat. Sic.*, Vol. 27, pp. 3085-3091, 1992.
9. Yuji Handa, Takahisakato, “Effects of Cu Powder, BaSO₄ and Cashew Dust on the Wear and Friction Characteristics of Automotive Brake Pads[®],” *Tribology Transactions.*, Vol. 39, No. 2, pp. 346-353, 1996.
10. Lawrence E. Nielsen, Robert F. Landel, *Mechanical Properties of Polymers and Composites*, Chap. 4, pp.131-232, Marcel Dekker, Inc., New York, 1994.
11. M. Clerico, V. Patierno, “Sliding Wear of Polymeric Composites,” *Wear*, Vol. 53, pp. 279-301, 1979.
12. Witold Brostow, *Failure of Plastic*, Hanser, NY, 1986.
13. T. J. Moon, H. G. Yoon, “Characteristics of Friction and Wear of Polymer/MoS₂ Composites,” *J. KSLE.*, Vol. 5, No. 1, pp. 12-20, 1989.
14. C. Lhymn, “Effect of Normal Load on the Specific Wear Rate of Fibrous Composites,” *Wear*, Vol. 120, pp. 1-27, 1987.
15. P. Gopal, L. R. Dharani, Frank D. Blum, “Hybrid Phenolic Friction Composites Containing Kevlar[®] Pulp Part I. Enhancement of Friction and Wear Performance,” *Wear*, Vol. 193, pp. 199-206, 1996.
16. Takahisakato, Akira Magario, “The Wear of Aramid Fiber Reinforced Brake Pad: The Role of Aramid Fibers[®],” *Tribology Transactions.*, Vol. 37, No. 3, pp. 559-565, 1994.
17. G. Wisanrakkit and J. K. Gillham, “Glass Transition Temperature (T_g) as an Index of Chemical Conversion for a High-T_g Amine/Epoxy Systems Chemical and Diffusion-controlled Reaction Kinetics,” *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 41, No. 11-12, pp. 2885-2929, 1990.
18. Seung Han, Whan Gun Kim, Ho Gyu Yoon, Tak Jin Moon, “Curing Reaction of Biphenyl Epoxy Resin with Different Phenolic Functional Hardeners,” *J. Polym. Sci.*, Vol. 36, pp. 773-783, 1998.