

촉매 함량 변화에 따라 합성된 나일론의 마찰 특성에 관한 연구

정대원[†] · 강석춘*

수원대학교 신소재공학과, *수원대학교 기계공학과
(2004년 3월 24일 접수, 2004년 12월 28일 채택)

Study on the Frictional Properties of Nylons Synthesized by Varying Catalyst Content

Dae-won Chung[†] and Suk-choon Kang*

Department of Polymer Engineering,

*Department of Mechanical Engineering,

College of Engineering, University of Suwon,

P.O.Box 77, Suwon 445-743, Korea

(Received March 24, 2004; accepted December 28, 2004)

초록 : ϵ -카프로락탐(CL)의 음이온 중합에 있어서 개시제의 양을 고정하고 촉매 양을 변화시키면서 합성한 나일론의 분자량, 기계적 물성 및 마찰 특성에 관하여 연구하였다. 전체적으로 촉매/개시제 비율이 높을수록 중합속도, 반응전환율 및 분자량은 증가하였으며, 충격강도를 제외한 물성도 향상되었으나, 촉매/개시제 비율 1.0% 이상에서는 큰 변화가 나타나지 않았다. 한편, 나일론의 마찰 특성은 기계적 물성 중에서도 인장강도 및 경도에 의해 직접적으로 영향을 받는 것으로 나타났다. 마찰계수, 응력(P)과 운동속도(V)의 곱인 PV 한계 및 상대마모량의 측정 결과를 종합하면, 촉매/개시제 비율 1.0% 하에서 제조된 나일론이 마찰 기계요소로서는 최적의 성질을 갖는 것으로 밝혀졌다.

Abstract: Nylons were synthesized by anionic polymerization of ϵ -caprolactam while varying the content of catalyst. Polymerization rates, molecular weights, mechanical properties and frictional properties of the nylons were investigated. As the ratio of catalyst to initiator was increased up to 1.0%, the polymerization rate, conversion and molecular weight were found to increase, and mechanical properties except impact strength were improved. Frictional properties were affected mainly by tensile strength and hardness. According to the study on the friction coefficient, product of stress (P) and velocity (V), PV limit, and abrasive wear rate, nylon synthesized at 1.0% of the ratio of catalyst to initiator showed the best performance for sliding machine elements.

Keywords: anionic polymerization, nylon, mechanical properties, frictional properties.

1. 서론

엔지니어링 플라스틱의 소재로 나일론이 사용되기 시작한 1940년대 이후부터 나일론은 결정성이 높고, 기계적 강도, 열적 안정성, 내마모성 및 마찰 특성이 우수하여 기계재료로의 수요와 용도가 꾸준히 증가함에 따라 나일론의 기계적 성질을 향상시키려는 연구가 지속적으로 진행되어 왔다. 가장 일반적으로 사용되어지는 나일론 6은 다양한 방법에 의하여 합성할 수 있으나, ϵ -카프로락탐(이하 CL로 약함)을 음이온 중합시키는 방법이 중합속도가 빠르고, 또한 생성물이 높은 분자량을 나타낸다는 점에서 주목을 받은 이후로,¹ 중합반응의 촉매 및 성장 메카니즘에 관하여 많은 연구가 진행되어 왔다.^{2,3} CL의 음이온 중합은 sodium을 첨가하여 생성되는 sodium- ϵ -caprolactamate가 촉매로 작용하는데 sodium만으로 중합을 진행할 경우 유도기간을 가지는 중합상의 특성 때문에 중합이 원활하게 이루어지지 않으므로, CL과 반응하여 *N*-acyl caprolactam을 생성할 수 있는 활성화제가 첨가된다. 활성화제는 중합반응이 시작되는 장소가 되므로 편의상 사슬 개시제라

고도 불리우며, 일반적으로 아이소시아네이트 화합물이 사용되거나 에스터 화합물 등도⁴ 사용이 가능한 것으로 알려져 있다.

이와 같은 CL의 음이온 중합반응 중에서도, 용융상태의 CL을 성형틀 안에서 캐스팅하여 나일론 6을 제조하는 방법이 주목을 받고 있다. 이와 같은 방법으로 제조되는 나일론은 상업적으로는 모노머 캐스팅 나일론(monomer casting nylon)이라 불린다. 모노머 캐스팅 나일론은 일반적으로 성형한 나일론과 비교하였을 때 분자량 및 결정화도가 매우 높으며 인장강도, 내마모성 등이 우수하여 기어, 베어링, 롤러, 부싱 등의 다양한 기계요소의 절삭 가공용 플라스틱 소재로 각광을 받고 있으나, 모노머 캐스팅 기법상, 첨가제를 모노머와 함께 첨가하여 음이온 중합반응을 수행하여야 된다는 문제점 때문에 응용분야에 한계가 있었다. 그러나 최근에 윤활제를 함유한 나일론을 합성함으로써 마찰 특성을 현저하게 향상시킨 나일론^{5,7} 및 인조 흑연을 첨가제로 사용하여 제전기능을 갖는 나일론^{8,9} 모노머 캐스팅 기법에 의해 합성하는데 성공함으로써 그 응용분야의 확장이 크게 기대되고 있다.

본 연구자들은 촉매와 개시제의 첨가비를 변화시켜 가면서 모노머 캐스팅 기법에 의하여 CL의 음이온 중합반응을 수행하여 중합시간, 반응전환율을 측정하여, 촉매/개시제 첨가비와 중합반응과

[†]To whom correspondence should be addressed. E-mail: dwchung@suwon.ac.kr

의 상관관계를 고찰한 바 있다.¹⁰ 본 논문에서는 CL 대비 개시제의 함량을 고정하고 축매의 첨가비를 변화시켜 가면서 CL의 음이온 중합반응을 수행하여 합성한 나일론의 분자량 및 마찰특성을 포함하는 기계적 물성을 측정하여, 축매/개시제 첨가비가 나일론의 화학적, 물리적 특성에 미치는 영향을 고찰함과 동시에 향후 모노머 캐스팅 나일론의 기계요소 소재로서의 응용 가능성에 관하여 검토하였다.

2. 실험

2.1 시약 및 기기

CL은 BASF사의 AP grade를 P₂O₅ 하에서 진공 건조하여 사용하였으며, sodium, toluene diisocyanate (TDI), 및 97% 황산 등은 시약 용을 정제 없이 사용하였다. 생성된 중합체에 포함된 저분자 물질의 추출은 Soxhlet 추출장치를 사용하였고, 분자량의 측정은 Cannon Fensk 점도계를 사용하였다.

2.2 나일론의 합성

개시제 함량을 CL 대비 0.3 mol%로 고정하고, 축매를 개시제 대비 0.4, 0.6, 1.0 및 1.4 mol%로 변화시키면서 CL의 음이온 중합을 다음과 같이 수행하였다.

건조질소 기류 하에서, 삼각플라스크에 CL 550 g과 TDI 5.1 g을 혼합한 후, 120 °C에서 40분 동안 교반하여 준다. 또 다른 플라스크에 CL 550 g과 일정량의 sodium을 건조질소 기류 하에서 혼합한 후 수소기체의 발생이 끝나면 CL과 sodium의 반응이 종결되었다고 판단하고, 상기 두 용액을 혼합하여 30초간 교반한 후, 155 °C로 유지된 주형에 캐스팅한다. 유리막대로 10초간 저어주고 1시간 동안 중합반응을 계속한다. 반응의 경화시간은 용융상태인 반응물의 표면이 굳어질 때까지의 시간으로 결정하였다.¹¹

2.3 화학적/기계적 특성

1 mm 이하의 두께로 가공한 나일론 시편을 4시간 동안 메탄올을 용매로 사용하여 Soxhlet 추출한 후, 남아있는 시편을 60 °C에서 건조하여 무게를 측정함으로써 추출된 올리고머 함량을 측정하고 이로부터 반응 전환율을 계산하였다.

나일론 시편을 0.25, 0.10, 0.05 g/dL의 농도가 되도록 97% 황산에 녹여 25 °C에서 비점도 η_{sp} 를 측정하고, 여기서부터 고유점도 $[\eta]$ 를 구하였다. 나일론 6에 관하여 알려져 있는 Mark-Houwink식의 계수를 활용하여 측정된 $[\eta]$ 값에서부터 다음과 같이 공중합체의 분자량을 계산하였다.¹²

$$M_w = 2.81 \times 10^4 \times [\eta]^{1.35}$$

인장강도와 충격강도는 ASTM D-638, type M-1과 D-258의 절차에 따라 측정하였다. 시편은 80 °C에서 24시간 동안 건조한 다음 시험 직전까지 데시케이터(desiccator)에 보관한 후 측정하였다. 인장시험은 Lloyd instruments, LR 50K를 사용하였고 충격시험은 TMI Mode I43-02(pendulum : 75 kg · cm)를 사용하였으며 한 종류의 나일론에 대하여 7개의 시편을 시험한 후, 가장 큰 값과 작은 값을 제외한 5개의 자료를 평균하였다.

2.4 마찰계수 및 PV 한계

본 연구에서 개시제에 대한 축매량의 비를 달리하여 제조한 나일론의 마찰계수와 두 요소사이에 미끄럼 운동이 일어날 경우, 작



Figure 1. Picture of roller on disk friction tester.



Figure 2. Picture of pin on disk type wear tester.

용하는 하중의 세기인 응력 P 와 상대운동속도 V 의 곱인 PV 한계의 측정은 Figure 1에 나타난 롤러-디스크형(roller on disk type) 마찰 시험기를 이용하였고 자세한 재원은 여러 논문에 게재되어 있다.¹³

마찰시험을 하기 위해서 나일론 시편은 절삭가공에 의해 50×50×5 mm로 가공하였고 상대 마찰재료로는 AISI 52100으로 제조한 직경이 5 mm, 길이가 10 mm인 롤러베어링을 중심에 고정시켜 나일론의 면에 축면으로 접촉하도록 하고 베어링의 회전은 역제시킨 상태로 나일론의 표면과 미끄럼 마찰을 하도록 하였다. 또 베어링의 접촉부위를 1 mm정도 마모시킨 것을 사용함으로써 나일론 평면시편과 면접촉 상태를 유지하도록 하였다. 이때 베어링의 접촉면적은 10 mm²로써 베어링에 비하여 경도가 매우 작은 나일론과의 마찰시험 중에 베어링의 마모는 무시할 정도이므로 시험 과정에서 일정한 접촉응력을 받는 것으로 취급하였다.

나일론 시편들은 가공 후에 시험 직전에 나일론과 베어링은 헤파탄으로 깨끗이 닦아내고 가열처리를 한 다음에 데시케이터에서 보관하여 수분흡수를 억제하고 마찰시험을 하였으며 본 연구에서는 윤활이 안 된 건조마찰 상태에서 시험하였다.

2.5 마모시험

나일론의 연삭마모형 내마모성 시험은 Figure 2와 같은 핀-디스크(pin on disk)형 마모시험기를 사용하여 측정하였다.¹⁴ 연삭마모시험용 나일론 시편(핀)은 5×10×24 mm의 직육면체로써 디스크와 면접촉이 되도록 하였고 시험중에 시편의 마모량에 상관없이 일정한 응력을 받도록 하였다. 나일론과 마찰하는 상대 마찰요소는 직경은 150 mm인 회전형 연삭숫돌을 디스크로 사용하였고 표면의 평균 거칠기는 7.6 μm R_a 이며 나일론 마모시험 과정에서 디스크의 표

면에 마모입자가 충전되기 때문에 매 시험마다 연마포(#80)를 사용하여 디스크 표면을 충분히 연마시킨 후에 다음의 시험을 수행하였다. 원판 디스크의 회전으로 인한 시편과의 상대운동 속도는 260 m/min으로 하였다. 또 마모시험은 나일론의 열축적 영향을 고려하여 2분 동안하였으며 마모시험 전과 후에 나일론의 무게를 측정 한 후 그 차이를 각 나일론 시편의 마모량으로 하고 마찰거리와 압력을 계산하여 비교하였다. 마모시험에서 시편의 접촉압력은 시험 기 작동조건과 충분한 예비시험을 통하여 0.08 MPa로 설정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 합성 및 화학적 특성

나일론 합성에서 촉매량의 변화에 따른 반응시 경화시간, 전환율 및 생성된 나일론의 분자량 변화를 Table 1에 정리하였다. 개시제 대비 촉매의 비율이 증가할수록 즉, 촉매농도가 증가함에 따라 경화시간은 점차로 단축되는 것으로 나타났다. 일반적으로 경화시간만으로 중합속도를 예측할 수는 없으나, 2개 이상의 반응에서 상대속도를 개략적으로 비교하는 데에는 매우 유용하게 활용되고 있다.¹¹ 또한, 반응 전환율 역시 경화시간과 동일한 경향을 나타내었다. 즉, 촉매 함량이 낮을수록 개시제 또는 성장중인 사슬이 동시에 촉매의 공격을 받을 수가 없으므로 촉매의 공격을 받지 못하는 사슬은 일시적으로 성장이 정지되는 순간들이 발생하게 된다. 이러한 순간 동안 반응계에 존재하는 물에 의해 사슬의 성장이 종결될 수 있다.¹¹ 종결된 사슬은 더 이상 성장이 진행되지 못하기 때문에 단량체 소모 장소로서의 기능을 상실하게 되고, 중합속도는 더욱 늦어지게 된다. 이와 같은 반응시간의 차이는 직접적으로 반응 전환율에 영향을 미치게 된다. 즉, 촉매 함량이 낮을수록 중합속도는 저하하게 되며, 반응계 내에 미량(100 ppm 이하) 존재하는 물로 인해 사슬성장이 종결될 가능성이 높다. 물에 의한 사슬성장의 종결이 발생되면 사슬이 성장할 수 있는 장소가 줄어들기 때문에 중합반응이 활발하게 진행되지 못하므로 상당량의 단량체가 미반응 상태 또는 올리고머 상태에서 중합이 정지되어 반응 전환율은 급격하게 감소되는 것으로 판단된다. 이와 같은 촉매 함량의 영향은 분자량에도 직접적인 영향을 입히게 된다. 즉, 전체적으로, 촉매의 함량이 낮을수록 분자량도 낮아지는 경향을 나타내었다.

이상의 결과를 종합하여 보면, 개시제 대비 촉매의 비율이 0.4 mol%인 경우에는 중합이 제대로 진행되지 않고 상당량의 올리고머를 포함하므로 반응 전환율 및 분자량도 매우 낮게 나타났으며, 정상적인 중합이 일어났다고 할 수는 없을 것으로 판단된다. 한편, 개시제 대비 촉매의 비율이 0.6 mol%인 경우에는 정상적인 중합은 일어났으나, 약간의 올리고머를 포함하고 있으며, 분자량도 약간 낮아지는 것으로 보인다. 반면에, 개시제 대비 촉매의 비율이 1.0 mol% 또는 그 이상인 경우에는 전환율도 99% 이상이며 분자량도 약 35

Table 1. Effect of Ratio of Catalyst to Initiator in Polymerization of CL on Conversion and Molecular Weight

Ratio of catalyst to initiator (mol%)	Solidification time (min)	Conversion (%)	Molecular weight (g/mol)
0.4	11	92.3	68000
0.6	6	97.2	312000
1.0	4	99.2	376000
1.4	4	99.1	338000

Table 2. Mechanical Properties of Nylons Polymerized under Various Ratios of Catalyst to Initiator

Ratio of catalyst to initiator (mol%)	Tensile yield strength (kg/cm ²)	Elongation at break (%)	Izod impact strength (kgcm/cm)	Hardness (R-scale)
0.4	620	8	3.10	116
0.6	880	18	4.90	119
1.0	920	16	4.15	120
1.4	910	16	4.07	120

만 정도의 고분자량 나일론이 합성되는 것으로 확인되었다. 이는 철저히 공기와의 접촉을 차단한 상태로 제조된 나일론의¹¹ 최대 분자량(약 500000)보다는 작으나, 일반적인 모노머 캐스팅 기법에 의해서 CL을 음이온 중합시킴으로써 제조되는 나일론의¹⁰ 분자량과는 유사하다.

3.2 기계적 물성

이와 같은 특성을 나타내는 나일론의 기계적 물성을 측정한 결과를 Table 2에 나타내었다. 개시제 대비 촉매의 비율이 0.4 mol%인 경우에는 모든 물성치가 캐스팅 기법에 의해 합성된 나일론이라고 하기에는 현저하게 부족한 특성을 나타내었으며, 이는 앞에서 설명한 바와 같이 지나치게 낮은 촉매의 함량에 의해서 CL의 중합이 원활하게 진행되지 않았기 때문이다. 반면에 촉매/개시제 비율이 1.0 또는 1.4 mol%인 경우에는 큰 차이가 없었으며, 일반적으로 MC 나일론 또는 캐스팅 나일론이라는 이름으로 시판되고 있는 나일론과 유사한 성질을 보여주었다. 그러나, 개시제 대비 촉매의 비율이 0.6 mol%인 경우에는 일반적인 나일론에 비해서 인장강도와 경도는 약간 낮으나, 신율 및 충격강도는 향상되는 경향을 나타내었다. 이는 일반적으로 가소제를 첨가하여 MC 나일론의 딱딱함을 감소시켰을 때 발생하는 경향과 동일하다. 즉, 개시제 대비 촉매의 비율이 0.6 mol%인 경우에는 약간 더 포함되어 있는 올리고머가 가소제와 동일한 역할을 하기 때문에 신율 및 충격강도가 향상되는 것으로 판단된다.

3.3 나일론의 마찰 특성

기계에는 슬라이드 베어링이나 캠, 기어 등 두 요소가 서로 상대 미끄럼운동을 하는 기능을 가진 요소들이 많이 사용되고 있다. 이들의 미끄럼운동 과정에서는 운동의 저항성질인 마찰이 수반되고 그에 따라 마찰열의 발생 및 재료가 마모되는 문제가 발생하므로 마찰 특성이 좋지 않을 경우에는 기계요소 수명이 단축되거나 성능이 저하되는 문제점이 제기되고 있다. 따라서 상대운동을 하는 두 재료사이의 마찰계수를 감소시키기 위해서는 마찰접촉면의 접선력에 대한 저항성인 전단강도(s_t)는 작아야 하고 모재의 소성변형에 대한 저항성인 소성유동압력(p_m) 즉, 경도는 커야만 접촉면에서 얇은 윤활기능의 피막 효과가 생성되고 마찰계수는 작아진다는 사실이 널리 인정되고 있다. 보통 마찰계수 μ 는 식 (1)과 같이 나타내고 재료의 마찰 특성을 설명하고 있다.¹⁵

$$\mu = s_t / p_m \quad (1)$$

여기에서 s_t 는 표면의 전단강도 (=인장강도 / 2)이고 p_m 은 재료의 경도로 나타내는 소성 유동저항 성질이다.

개시제 대비 촉매의 비율을 달리하면서 합성한 나일론의 마찰계수를 측정하고 그 결과를 Figure 3에 나타내었다. 그림에서 촉매의

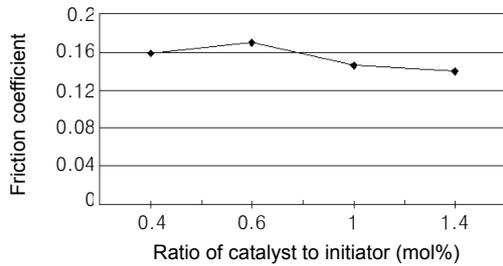


Figure 3. Friction coefficient of the nylons of the different ratio of catalyst to initiator.

비율이 낮을 경우에 나일론의 마찰계수는 비교적 크게 나타나고 0.6%에서 가장 크며 그 이상으로 축매비율을 증가시키면 다시 낮아지는 경향을 보여 준다. 이것은 0.4 mol%의 경우에 Table 1에서와 같이 낮은 인장강도를 가지므로 식 (1)에서 s_1 가 매우 작기 때문에 낮은 경도 즉 낮은 p_m 에도 불구하고 마찰계수 값은 작아진다. 그러나 축매의 비율이 0.6 mol%로 증가하게 되면 경도 p_m 은 크게 차이가 없으나 전단강도 즉 s_1 가 커져서 마찰계수가 증가하는 것으로 판단된다. 축매제 비율이 1.0 mol% 이상으로 증가하게 되면 경도가 증가되어 마찰계수가 감소되고 1.4 mol%의 경우 경도는 큰 차이가 없지만 인장강도, 즉 전단강도가 약간 감소함으로써 마찰계수 역시 미세하게 감소하는 것으로 판단된다.

3.4 PV 한계

PV 한계는 재료의 마찰 저항성에 대하여 견딜 수 있는 한계를 나타내는 중요한 성질이다. 이것은 일반적으로 일정한 속도에서 일정한 시간 동안 하중 즉 작용응력을 가한 후 단계적으로 응력을 높이면서 마찰력이 급격히 증가할 때의 작용응력과 속도의 곱으로 설정되는 PV 한계를 측정하여 평가한다.¹³ 즉, 최초의 응력과 마찰속도에서 일정한 시간(10초)을 마찰시험을 하고 응력을 단계적으로 증가시키면서 마찰력을 기록하면, 작동조건에 비하여 마찰면이 더 이상 일정한 마찰특성을 유지하지 못할 경우에는 소음과 진동을 유발함과 동시에 마찰력은 급격하게 증가하게 되며, 이 때의 응력 P 와 상대운동 속도 V 의 곱을 PV 한계로 설정한다. Figure 4는 작용하중을 변수로 하여 PV 한계를 측정한 시험결과로써 개시체에 비하여 축매의 비가 증가할수록 작용 한계하중이 점차 증가하다가 1.0 mol%에서 가장 높은 하중 즉 응력을 받을 수 있었고 축매의 비가 1.2 mol%인 경우에는 다시 감소하고 있음을 보여준다.

나일론의 PV 한계를 비교한 결과가 Figure 5에 제시되어 있다. 개시체에 대한 축매의 비가 0.4에서 1.0 mol%까지 증가할수록 PV 한계는 증가하지만 그 이상의 경우에는 다시 감소하고 있음을 보여준다. 이 결과는 PV 한계가 나일론의 전단강도 즉 인장강도와 경도 크기에 지배를 받는 것으로써 특히 나일론의 경도가 비슷하면 인장강도가 큰 것이 더 우수한 마찰 특성을 보이고 1.0 mol%에서 가장 큰 인장강도를 가지므로 높은 PV 한계를 보여주고 있음을 알 수 있다.

3.5 마모 특성

재료가 기계에서 마찰요소의 소재로 사용되기 위한 또 다른 중요한 기계적 물성은 상대운동 중에 재료의 손실을 의미하는 마모에 대한 저항성이다. 마모에는 연삭마모, 용착마모, 피로마모, 부식과 화학적 마모가 있지만 그 중에서 연삭마모는 상대운동 중에 필연적으로 발생하므로 연삭마모에 대한 저항성 즉 내마모성을 비교

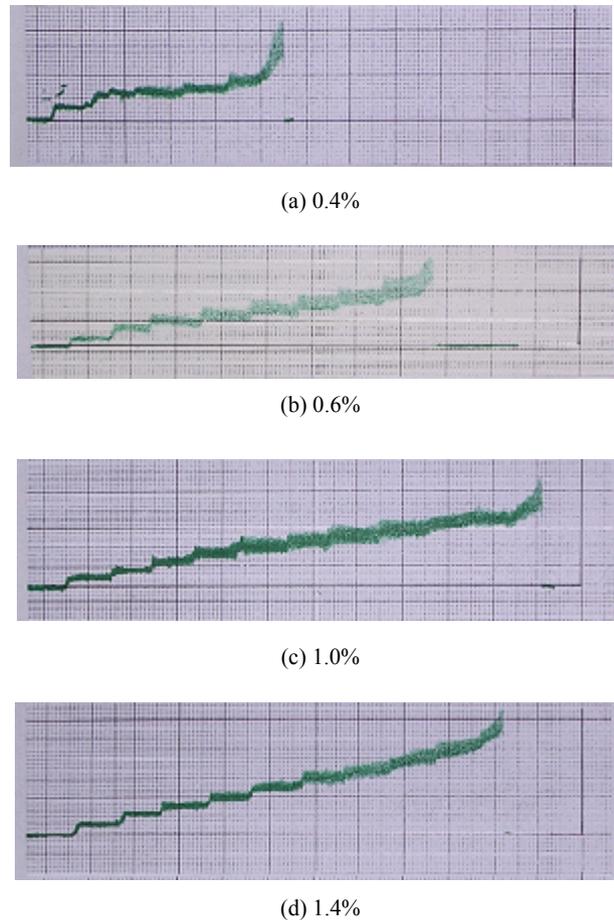


Figure 4. Friction change of the nylons of the different ratio of catalyst to initiator during friction test.

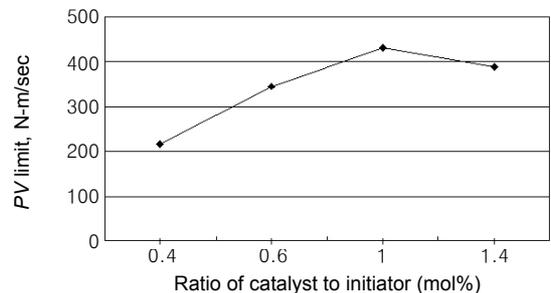


Figure 5. PV limit of the nylons with the different ratio of catalyst to initiator.

하였다. 연삭 마모시험기에 의한 개시체에 대한 축매의 비율을 달리 하여 제조한 나일론 시편의 상대 마모량을 측정된 결과를 Figure 6에 나타내었다. 개시체에 비하여 축매의 비가 높을수록 상대마모량이 작지만 그의 비가 1.0 mol%보다 더 크게 되는 경우에는 마모량이 증가하는 경향을 보여준다. 이것은 나일론의 경도와 인장강도에 영향을 받고 인장강도와 경도가 같이 증가할수록 내마모성이 커지며 축매의 비가 1.0 mol%인 경우가 가장 내마모성이 우수한 나일론으로 나타나고 1.4 mol%의 경우에는 인장강도가 작아져

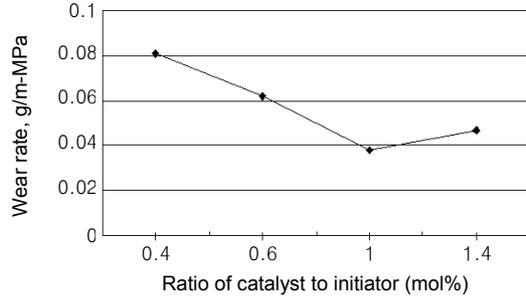


Figure 6. Relative wear rate of the nylons of the different ratio of catalyst to initiator.

서 내마모성이 감소하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는, 개시제 양을 고정하고 촉매 양을 변화시키면서 수행한 ϵ -카프로락탐(CL)의 음이온 중합에 있어서의 중합속도, 경화시간, 반응전환율 및 생성물의 분자량의 변화 및 기계적 성질을 관찰하였다. 전체적으로 촉매/개시제 비율이 높을수록 중합속도, 반응전환율 및 분자량은 증가하였으나, 촉매/개시제 비율 1.0 mol% 이상에서는 큰 변화가 나타나지 않았다. 한편, 기계적 성질에서는 촉매/개시제 비율이 커질수록 인장강도와 경도가 커지다가 촉매/개시제 비율이 1.0 mol% 이상에서는 경도에 큰 변화가 없으나 인장강도는 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 기계적 물성 차이는 직접적으로 마찰성질과 관련이 있는 것으로 나타났으며, 촉매/개시제 비율 0.6 mol%에서 마찰계수치가 가장 큰 것으로 판명되었다. 마찰재의 성능을 비교하는 PV 한계 및 상대마모량을 측정 한 결과, 촉매/개시제의 비율을 1.0 mol%로 하여 합성한 나일론의 경우에 PV 한계가 최대가 되고 마모율도 최소로 나타났다.

이상의 결과를 종합하면, CL의 음이온 중합에 의해서 제조되는 나일론이 상대 미끄럼 운동을 하는 마찰 기계요소로서 사용하기 위해서는 촉매/개시제 비율을 1.0 mol%로 합성한 나일론이 낮은 마찰계수와 높은 내마모성을 갖는 가장 우수한 재료임이 밝혀졌다.

감사의 글 : 본 연구는 2000년도 과학재단의 목적기초연구 (과제번호 R01-2000-00218-0)에 의하여 지원되었으며, 이에 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

1. G. Champetire and H. Sekiguchi, *J. Polym. Sci.*, **48**, 309 (1960).
2. J. Sebenda, *Comprehensive Polymer Science*, C. F. H. Tipper and C. H. Bamford, Editors, Pergamon Press, Oxford, Vol 3 (1988).
3. R. Puffr, *Lactam-based Polyamide*, R. Puffr and V. Kubanek, Editors, CRC Press, Boca Raton, Vol 1 (1991).
4. D. Petit, R. Jerome, and P. Teyssie, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, **17**, 2903 (1979).
5. D-w Chung and S-c Kang, *J. Korean Ind. & Eng. Chem.*, **9**, 726 (1998).
6. S-c Kang and D-w Chung, *Trans. Korean Soc. Mecha. Eng. A*, **22**, 2011 (1988).
7. S-c Kang and D-w Chung, *Wear*, **239**, 244 (2000).
8. D-w Chung and Y-t Park, *J. Korean Ind. & Eng. Chem.*, **11**, 239 (2000).
9. D-w. Chung and C-h. Kim, US Patent 6,265,529 (2001).
10. D-w. Chung, Y-T. Oh, and Y-T. Park, *Polymer(Korea)* **25**, 1 (2001).
11. K. Ueda, K. Yamada, M. Nakai, T. Matsuda, M. Hosoda, and K. Tai, *Polym. J.*, **28**, 446 (1996).
12. L. H. Sperling, *Introduction to Physical Polymer Science*, John Wiley & Sons, New York, p105 (1992).
13. K. Budinski, *Engineering Materials, Properties and Selection*, Prentice-Hall Inc, New York, p160 (1992).
14. S-c. Kang and D-w Chung, *Wear*, **254**, 103 (2003).
15. F. P. Bowden and D. Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids*, Clarendon Press, Oxford, p100 (1986).