

폴리카보네이트 판 위에 Phenylene의 공중합체들을 이용한 하드 코팅

신민재 · 양도현¹ · 오미혜¹ · 윤여성¹ · 신재섭^{2,†}

한국과학기술원 생명화학공학과, ¹자동차부품연구원, ²충북대학교 화학과
(2008년 6월 9일 접수, 2008년 8월 29일 수정, 2008년 9월 23일 채택)

Hard Coatings on Polycarbonate Plate Using Phenylene Copolymers

Min Jae Shin, Do Hyeon Yang¹, Mee Hye Oh¹, Yeo Seong Yoon¹, and Jae Sup Shin^{2,†}

Department of Chemical and Biomolecular Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

¹Korea Automotive Technology Institute, Chonan 330-912, Korea

²Department of Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

(Received June 9, 2008; Revised August 29, 2008; Accepted September 23, 2008)

요약: 자동차의 유리를 폴리카보네이트로 대체하기 위하여 폴리카보네이트 판 위에 하드 코팅을 시도하였다. 본 연구에서는 p-phenylene (PPH)과 m-phenylene (MPH)의 공중합체들을 합성하여 이것들을 이용하여 폴리카보네이트 판 위에 코팅을 시도하였다. 공중합체내의 PPH와 MPH의 비율에 따라서 다양한 강도를 나타내는 코팅이 형성되었다. PPH와 MPH의 비율이 20 : 80일 경우에 연필 경도 2H를 나타내었으며, 이 때 내마모성도 매우 우수하였다.

Abstract: Hard coatings were deposited on a polycarbonate plate as potential substitutes for glass in cars. In this research the copolymers of p-polyphenylene (PPH) and m-phenylene (MPH) were synthesized, and using these copolymers the coatings were conducted on a polycarbonate plate. The hardness of the coating surface was affected with the mole ratio of PPH and MPH in the copolymer. When the mole ratio of PPH : MPH in the copolymer was 20 : 80, the coating showed 2H class of pencil hardness and also showed the best abrasion resistance.

Keywords: hard coating, polycarbonate, polyphenylene, copolymer

1. 서 론

현재 우리가 사용하고 있는 자동차용 유리는 중량이 무겁고 파손이 쉽게 되는 등의 문제점이 있어서 플라스틱 소재로 대체하려는 시도가 오래 전부터 있어 왔다. 예를 들어 차량용 유리를 폴리카보네이트(PC)와 같은 플라스틱으로 대체하게 되면, PC의 밀도가 유리와 비교할 때 절반이하이므로 중량이 30% 이상 감소하게 된다. 따라서 구동모터의 소형화 및 전체 도어모듈의 경량화가 가능해져서 연비의 향상 및 초박형 도어설계가 가능해진다. 또한 곡면성형 및 컬러링이 용이하게 되어 차량의 미관이 향상되고 공기역학적인 형상을 달성하기 쉬워진다. 그러므로 자동차의 생산에 있어 경제성과 국제 경쟁력을 크게 향상시킬

수 있다. 그리고 차량충돌 및 차량 전복 시 승객이탈을 방지하며 외부에서 파손이 어려워 각종 차량 도난 및 파손 방지 등에도 효과가 예상된다. 그리고 기존의 유리는 복합유리 사이에 고분자 필름이 들어있어 재활용 시 이를 분리, 제거해야 하는 번거로움이 있으나 플라스틱은 재활용면에서 유리보다 우수하다. 또한 유리에 비하여 친수성, 발수성, UV차단성, 전도성 등의 고기능성을 부여하기가 용이하여 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

PC와 같은 투명 고분자 재료는 광 투과율이 90% 정도이고 내충격성이 우수하여 유리를 대체하여 자동차, 건축, 장식품, 광학렌즈 등의 분야에 많이 사용되어 왔다. 하지만 이들 고분자 재료는 내스크래치 성질이 좋지 않아 적용상에 제한이 있다. 예를 들면, 하드 코팅된 PC는 1980년대 말부터 유리를 대체하여 자동차의 헤드램프렌즈 용으로 사용되고 있는데 자동차

[†]Corresponding author: Jae Sup Shin (jsshin@chungbuk.ac.kr)

헤드램프렌즈에 사용되는 코팅의 물성은 운전자의 시야 확보를 필요로 하는 자동차 창용으로는 내스크래치성이 충분하지 못해서 적용을 하지 못하고 있는 상태이다. 따라서 보다 우수한 내스크래치성을 갖는 코팅 시스템을 개발하는 것이 필요하다.

PC의 내스크래치성을 높이는 코팅 방법으로 그 동안 졸-겔 반응을 이용한 코팅이 많이 검토되어 왔다 [1-13]. 졸-겔 법은 액상에서 가수분해에 의해 형성된 졸을 겔화시켜 산화물을 제조하는 방법이다. 졸-겔 법을 이용하면 높은 순도의 생성물을 제조하는 것이 가능하며 또한 두 개 이상의 성분을 사용하는 경우에 매우 균일한 생성물을 얻는 것이 가능하다. 그리고 비교적 낮은 온도에서의 합성이 가능하며 박막, 섬유, 나노 입자 등 다양한 형태의 생성물을 제조할 수 있는 장점이 있다. 졸-겔 법의 단점으로는 일반적으로 반응물들의 가격이 비싸며, 생산 공정 중에 수축이나 균열이 자주 발생하기 때문에 아주 큰 크기의 생성물 제작이 어렵다. 그리고 반응물을 다루는 데 있어서 특별한 기술이 필요하다. 결론적으로 졸-겔 반응을 이용한 방법은 장점도 많지만 단점도 적지 않게 가지고 있다.

PC의 내스크래치성을 높이는 다른 코팅 방법으로는 매우 강인한 고분자들을 합성해서 코팅을 하는 방법이 있다. 이 때 여러 가지 다양한 고분자들이 사용될 수 있는데 poly(phenylene)도 사용될 수 있다. 그러나 poly(phenylene)은 용매에 대한 용해성이 거의 없어 응용에 제약이 많다. Poly(phenylene)의 용매에 대한 용해성을 높이기 위해 곁가지를 갖는 poly(phenylene)의 합성이 몇 가지 시도되었다. 이 중에 poly(benzoyl-p-phenylene)은 용매에 대한 용해성도 우수하고, 물성도 우수하여 많은 주목을 받고 있다[14-28].

본 연구에서는 poly(p-phenylene)의 용매에 대한 용해성을 높이는 방안으로 p-phenylene (PPH)과 m-phenylene (MPH)의 공중합체들을 합성하였으며, 이 공중합체들을 사용하여 PC의 약한 강도를 갖는 표면에 solvent casting 기법으로 코팅을 시도하여 보았다. 본 연구에서는 이러한 코팅의 최적 조건들을 찾아보고, 또한 어느 정도로 강도를 높일 수 있는가와 내마모성 등을 살펴보았다.

2. 실험

2.1. 시약 및 기기

본 연구에서 사용한 1,4-dibromobenzene (1,4-DBB), 1,3-dibromobenzene (1,3-DBB), [1,1'-bis(diphenylphosphino)ferrocene]dichloronickel(II) (BDPFN), 1,1'-bis(diphenylphosphino)ferrocene (BDPF), cyclopentyl methyl ether (CPME), tetra-

hydrofuran (THF), N,N'-Dimethylformamide (DMF), toluene은 Aldrich 제품을 사용하였다. 모든 용매는 수분을 완전히 제거한 후에 사용하였다.

본 연구에서 사용한 IR spectrometer는 Jasco International사의 FT-IR 680이었다. 그리고 GPC는 Viscotek TDA 302를 사용하였으며, 이 때 column은 PL gel 10 μ m MIXED-B를 사용하였으며, 평균 분자량은 polystyrene standard를 사용하여 상대분자량을 측정하였다. 그리고 TGA와 DSC는 TA Instruments사의 TGA Q500과 DSC Q100을 각각 사용하였다. 용액 점도계는 Cannon-Fenske 타입의 제품을 사용하였으며, 사용한 PC 판은 LG Dow에서 생산한 PC 200-8을 가지고 에스폴리텍에서 제조한 PC 판을 제공받았다. 연필경도계는 pencil hardness tester 221D를 사용하였으며, 연필 경도계에서 사용한 연필은 mitsubishi 연필을 사용하였다. Hazemeter는 Nippon Denshoku사의 NDH-2000을 사용하였으며 이 hazemeter에는 할로겐램프가 장착되어 있다. 코팅의 부착력 실험은 3M 스카치테이프를 이용하여 측정하였으며, 내마모 시험은 Taber abraser Model KPM-042 (CS-10 wheel)를 이용하여 실시하였다. 그리고 scanning electron microscopy (SEM)는 Hitachi S-2500C와 Hitachi S-5200을 사용하여 얻었다.

2.2. DCBP와 1,4-DCB와 1,3-DCB의 공중합체 합성

본 연구에서 다양한 몰 비를 갖는 공중합체들이 합성되었다. 그 중에 가장 대표적인 합성 방법을 아래에 나타내었다.

0.236 g (1.00 mmol)의 1,4-DBB와 0.944 g (4.00 mmol)의 1,3-DBB를 10 mL의 dry THF에 용해시키고, 2.430 g (0.100 mol)의 마그네슘을 첨가해서 70°C에서 30 min 동안 반응시켰다. 이 용액을 상온으로 낮춘 후에 4.482 g (19.0 mmol)의 1,4-DBB와 17.930 g (76.0 mmol)의 1,3-DBB를 첨가하고 나서, 80 mL의 dry CPME와 80 mL의 toluene을 첨가하였다. 이 용액을 상온에서 3 h 동안 교반 시킨 후에, 이 용액에 0.684 g (1.00 mmol)의 BDPFN과 0.554 g (1.00 mmol)의 BDPF를 첨가하였다. 그리고 100°C에서 8 h 동안 반응시켰다. 위의 모든 반응은 질소 기체 분위기에서 실시하였다. 이렇게 얻어진 고분자를 THF에 녹인 후에 과량의 methanol에 부어 넣어 침전을 형성시키는 작업을 세 번 반복해서 분자량이 작은 부분들을 제거 하였다. 얻어진 고분자를 80°C의 진공 오븐에서 12 h 동안 건조시켰다. 이 때 형성된 고분자는 1.445 g (yield : 19.0 %)이었다.

2.3. 코팅 막의 형성

앞에서 합성한 공중합체들을 THF에 같은 농도의 비율로 충분히 용해시켰다. 그 다음 PC 판 위에 코팅

Table 1. The physical properties of the copolymers of PPH and MPH

	1,4-DBB:1,3-DBB (wt%)	Mn	Mw	Mw/Mn	Tg (°C)	η inh (dL/g)
P05	5 : 95	12,200	18,300	1.50	158.0	0.62
P10	10 : 90	11,900	18,000	1.51	156.5	0.61
P15	15 : 85	11,500	17,900	1.56	153.7	0.59
P20	20 : 80	11,700	17,900	1.53	154.3	0.60
P25	25 : 75	10,800	16,600	1.54	151.1	0.58

용액을 1.3~1.7 mL를 취해 흘려주어 solvent casting 기법을 사용하여 코팅해 주었다. 용액을 떨어뜨릴 PC 판의 크기는 8.0 cm × 6.0 cm 이었으며 THF를 확실하게 제거해주기 위해서 실온에서 5 h동안 건조를 시켜준 후, 90°C 오븐에서 24 h동안 건조를 시켜주었다. 실온에서의 건조시간이 짧을수록 90°C 오븐에 넣었을 때, 여분의 THF가 급격히 날아가면서 발생하는 표면의 엠보싱화가 심하게 일어나므로 실온에서 5 h 이상 건조시켜주어야 했다.

2.4. 코팅막 분석

코팅되어진 PC 표면의 경도를 측정하기 위하여 연필 경도계를 사용하였다. 연필경도는 경도 측정기에 연필경도 측정용 연필을 45° 각도로 끼우고 1 kg의 하중을 가하면서 이것을 밀어가며 측정하였다. 연필은 Mitsubishi 연필을 사용하였는데 1 H로부터 3 H까지 그리고 F, HB, B, 2B 등의 강도를 나타내는 연필들을 사용하였다.

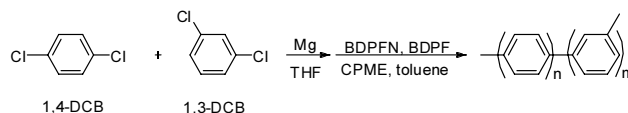
부착력은 cross-cut test 방법을 이용해서 실시하였다. 우선 날카로운 칼을 이용해 코팅한 표면을 좌우로 일정한 간격을 유지하면서 11번 긁고, 다시 위 아래로 일정한 간격을 유지하면서 6번 그어서 50개의 작은 네모난 모눈이 만들어 지게 하였다. 여기에 폭이 4.8 cm의 3M Scotch tape를 코팅 된 표면에 손가락으로 붙였다. Tape를 붙일 때 이것을 표면과 90°가 되게 어느 정도 남기고 부쳤다. 이 때 남아있는 부분을 이용해 이것을 수직으로 손으로 잡아당긴 후에 코팅 면이 PC 판위에 얼마나 남아있는가를 관찰하였다.

내마모성의 정도는 Taber abraser Model KPM-042를 이용하여 실시하였으며 사용한 wheel은 CS-10 wheel이었다. 코팅된 시료를 내마모 측정기 위에 놓고 여기에 500 g의 하중을 걸고 500 회전을 시킨 후에, Haze를 측정하여 마모의 정도를 측정하였다. 이 때 이용하기는 Nippon Denshoku사의 Model NDH 2000이었다.

3. 결과 및 토론

3.1. PPH와 MPH의 공중합체의 합성

합성된 고분자의 IR 스펙트럼을 보면 1,3-phenylene에 의한 흡수가 1,595 cm⁻¹에서 나타났으며 1,4-phenyl-



ene에 의한 흡수가 1,000 cm⁻¹에서 나타났다. 그리고 합성된 고분자의 조성을 알아보기 위하여 NMR 등 여러 가지 방법들을 시도해 보았으나 정확한 조성을 측정하는 것은 성공하지 못했다. 따라서 합성된 고분자의 조성은 편이 상, 사용한 모노머의 비율로 나타내었다.

합성된 공중합체들의 평균분자량을 측정하기 위해서 gel permeation chromatography (GPC)를 이용하였다. Standard 물질로는 polystyrene을 사용하였고, 용매는 THF를 사용하였으며 RI detector로 측정하였다. 점도는 Cannon-Fenske type 점도계를 이용해서 측정하였는데, 이 때 용매로는 THF를 사용하였으며 25°C에서 실시하였다. 그리고 Tg는 DSC Q100을 이용하여 질소 분위기에서 분당 10°C씩 온도를 올려주며 상온으로부터 220°C까지 2번 스캔하여 얻은 그래프로부터 측정하였다. 이 모든 측정 결과들을 Table 1에 나타내었다.

Table 1의 결과를 보면, 공중합체들의 중량평균분자량은 16,600~18,300이었으며, 수평균분자량은 10,800~12,200이었다. 1,4-DBB의 함량이 커질수록 분자량은 조금씩 작아지는 경향을 보였지만 그 차이는 크지 않았다. 분자량분포 값도 1.50~1.54 정도를 나타내었다. 이 값들은 세 번의 재결정을 해서 얻은 값들이며 재결정을 하기 전의 중량평균분자량은 P20의 경우에 13,000이었으며 수평균분자량은 6,500이었다. 이 때 분자량분포 값은 2.0으로 재결정 후의 값과 비교해 보면 큰 값이다. 이것은 재결정으로 인해서 분자량이 작은 부분들이 많이 제거되면서 재결정 후에 평균분자량도 커지고 분자량 분포도 작아진 것으로 생각된다. 그리고 Tg는 151~158°C 사이의 값을 나타내었으며, 점도는 0.58~0.62 dL/g 사이의 값을 나타내었다.

3.2. PPH와 MPH의 공중합체의 열적 안정성

열적 안정성을 TGA를 이용하여 측정하여 보았다. TGA는 질소 분위기에서 분당 10°C씩 온도를 올려가면서 상온으로부터 650°C까지 측정하였으며, 이 때 사

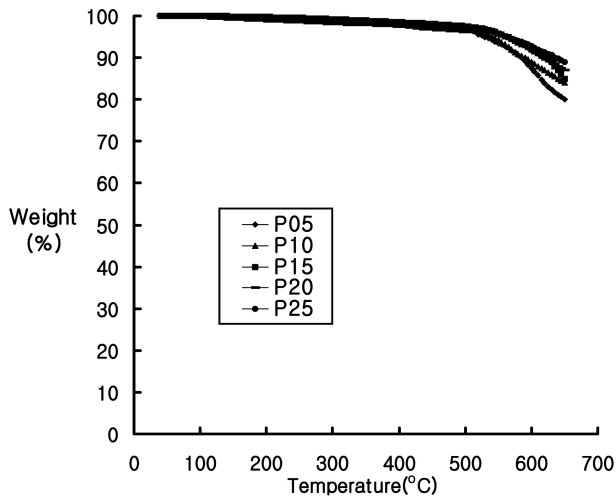


Figure 1. TGA thermogram for the copolymers of PPH and MPH.

용한 기기는 TGA Q500이었다. 그 결과를 Figure 1에 나타내었다.

Figure 1의 결과를 보면 무게 감소가 급격하게 일어나는 온도는 본 연구에서 합성한 공중합체 모두 500°C 부근에서 시작되었다. 즉 500°C 부근까지는 매우 완만한 감소를 나타내다가 500°C 부근에서는 비교적 큰 기울기로 무게 감소가 나타났다. 이 때의 기울기는 공중합체의 몰 비에 따라 조금씩 달라졌는데 P05가 가장 크게 감소하였으며 P25가 가장 적게 감소하였다. Figure 1의 결과에서 650°C에서 남아있는 중량 비율은 P25 : 80.3%, P20 : 83.9%, P15 : 85.8%, P10 : 87.1%, P05 : 89.2%이었다. 이 결과로부터 합성된 고분자의 열적 안정성은 P25 > P20 > P15 > P10 > P05 순이라고 말할 수 있다. 즉 1,4-DBB의 몰 비가 커질수록 합성된 고분자의 열적 안정성은 더 커지는 것으로 나타났다. 그 이유는 1,4-DBB의 경우에 para 치환되어 있어 meta 치환보다 결정구조를 갖는데 더 유리하기 때문으로 추정된다. 그러나 그 차이는 그렇게 크지는 않았다.

3.3. PPH와 MPH의 공중합체의 용매에 대한 용해성

합성한 고분자들이 여러 가지 용매에서 어느 정도 용해되는지를 비교하여 보았다. Poly(p-phenylene)의 경우, 어떤 용매에도 쉽게 녹지 않아서 우수한 성질을 나타내는 고분자임에도 불구하고 많은 분야에 적용하기가 쉽지 않았다. 그러나 본 연구에서 합성된 공중합체들은 THF, DMF, chloroform에 잘 용해되었다. 1,4-DBB : 1,3-DBB의 비율이 30 : 70 wt%인 경우도 합성을 하여 보았는데 용해성에 약간의 문제가 있었으며 2일 이상 용해를 시도하여도 녹지 않는 부분들이 조금씩 있었

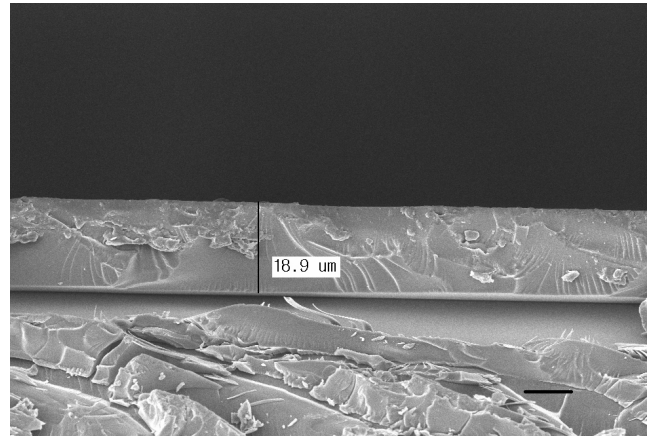


Figure 2. SEM for the cross section of the coating film using P20 (bar represents 10 μm).

Table 2. Pencil hardness and adhesive power of the coatings with the copolymers of PPH and MPH

	Pencil hardness	Adhesive power
P05	1H	43/50
P10	1H	50/50
P15	1H	50/50
P20	2H	50/50
P25	2H	41/50

다. 순수한 poly(m-phenylene)의 경우에도 위의 용매들에 대한 용해성은 완전하지 못하였다.

3.4. 코팅 막의 물성

코팅이 이루어진 형태를 자세히 살펴보기 위하여, 액체 질소를 이용해서 코팅된 PC 판을 완전히 냉동시킨 후에 이 판을 수직으로 자르고 그 단면을 SEM으로 살펴보았다. 그 결과를 Figure 2에 나타내었다.

Figure 2의 결과를 보면 코팅된 면이 매우 평평한 면을 이루고 있음을 볼 수 있었고, 코팅된 면의 두께는 평균 $18.9 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 이었다.

코팅된 면의 경도를 살펴보기 위해서 연필경도계 (pencil hardness tester 221D)를 이용해 연필경도를 측정하였다. 그리고 코팅된 면에 50개의 모눈을 낸 후에 3M 테이프를 이용해 코팅의 부착력을 측정하였다. 이 두 가지의 결과를 모두 Table 2에 나타내었다.

Table 2의 결과를 보면 코팅을 하기 전의 PC의 표면의 연필 경도는 2B를 나타내어 매우 무른 성질을 보여 주는 것에 비해 본 연구에서 합성한 공중합체를 이용해서 코팅한 코팅 면의 연필 경도는 1H~2H의 값을 나타내었다. P05, P10, P15의 경우에는 1H를 나타내었으며 P20, P25의 경우에는 연필 경도가 2H를 나타내었다. 즉 P20과 P25의 경우가 더 단단한 코팅

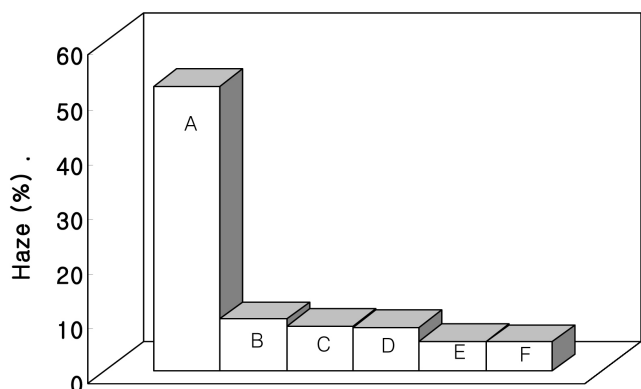


Figure 3. Haze of the coating film after abrasion resistance test using CS-10 wheel under 500 g, 500 cycles. A: original PC, B: P05, C: P10, D: P15, E: P20, F: P25.

면을 형성하였다. 그러나 부착력을 살펴보면 P05나 P25의 경우에는 부착력이 완전하지 않아서 일부분 떨어지는 현상을 나타내었다. P25의 경우에 부착력이 떨어지는 것은 강도가 지나치기 때문으로 생각되며, P05의 경우는 용매에 용해시키는데 시간이 많이 걸린 것과 상관이 있을 것으로 추정된다. 이들 결과들을 종합하면 본 실험에서 부착력이 완전하면서 연필 경도가 가장 우수한 결과를 나타낸 경우는 P20을 사용하였을 경우라고 할 수 있다.

3.5. 코팅 막의 내마모성 실험

코팅된 막의 내마모성을 살펴보기 위하여 Taber abraser model KPM-042를 이용하여 내마모성의 정도를 측정하여 보았다. 이 때 사용한 wheel은 CS-10 이었으며 코팅된 시료를 내마모 측정기 위에 놓고 여기에 500 g의 하중을 걸고 500 회전을 시킨 후에, 코팅면의 haze의 정도를 haze meter로 측정하였다. 결과를 Figure 3에 나타내었다.

Figure 3의 결과를 보면 코팅을 하기 전의 PC 판에 내마모성 실험을 한 경우에는 haze 값이 52.0%이었다. 그러나 본 연구에서 합성한 공중합체들을 사용한 코팅면의 haze 값은 매우 작아서 내마모성이 크게 향상되는 것을 볼 수 있었다. 특히 P20이나 P25를 사용하였을 때 P05, P10, P15의 경우보다 조금 더 우수한 결과를 나타내었다. 그러나 P25의 경우에는 부착력에 조금 문제가 있으므로 따라서 결론적으로 연필 정도, 부착력, 내마모성들을 모두 고려할 때 본 연구에서 가장 우수한 코팅은 P20을 사용하였을 경우라고 할 수 있다.

4. 결 론

- 1) 본 연구에서는 1,3-DBB나 1,4-DBB를 사용하여

공중합체를 합성하였으며 이들은 THF, DMF, chloroform 등의 유기용매에 잘 용해되었다.

- 2) 합성한 공중합체들을 이용하여 PC 판을 코팅하였으며 매우 평평한 표면을 갖는 코팅이 형성되었다.

- 3) 공중합체 내의 MPH에 대한 PPH의 비율이 커질수록 열적 안정성이 커졌으며, 코팅의 표면 강도도 증가하였다.

- 4) 합성한 공중합체들 중에서 P20을 사용한 경우에 연필 경도는 2H를 나타내었으며, 내마모성도 우수하였고 이때 부착력도 완전하였다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. R. Kim, M. K. Kang, Y. J. Shin, M. H. Oh, Y. S. Yoon, and J. S. Shin, *Polymer(Korea)*, **31**, 485 (2007).
2. Y. J. Ji, H. Y. Kim, Y. S. Yoon, S. W. Lee, and J. S. Shin, *J. Adhesion Interface*, **6**, 10 (2005).
3. J. Y. Kim, Y. J. Shin, Y. R. Shin, Y. J. Ji, Y. S. Yoon, and J. S. Shin, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **17**, 170 (2006).
4. Y. J. Ji, Y. J. Shin, Y. R. Shin, J. Y. Kim, Y. S. Yoon, and J. S. Shin, *J. Adhesion Interface*, **7**, 10 (2006).
5. Y. T. Lee, D. S. Jeong, and H. J. Jeong, *Polymer(Korea)*, **19**, 753 (1995).
6. S. E. Yoon, H. G. Woo, and D. P. Kim, *Polymer(Korea)*, **24**, 389 (2000).
7. D. G. Park, *Polym. Sci. Technol.*, **8**, 268 (1997).
8. H. S. Yang, O. H. Kwon, J. D. Lee, J. S. Rho, and Y. H. Kim, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **7**, 823 (1996).
9. H. K. Kim, J. G. Kim, J. A. Yu, and J. W. Hong, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **12**, 287 (2001).
10. T. H. Lee, E. S. Kang, and B. S. Bae, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **27**, 23 (2003).
11. Y. J. Eo, D. J. Kim, B. S. Bae, K. C. Song, T. Y. Lee, and S. W. Song, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **13**, 409 (1998).
12. D. K. Hwang, J. H. Moon, Y. G. Shul, K. T. Jung, D. H. Kim, and D. W. Lee, *J. Sol-Gel Sci.*

- Techonol.*, **26**, 783 (2003).
13. M. S. Lee and N. J. Jo, *J. Sol-Gel Sci. Techonol.*, **24**, 175 (2002).
 14. V. Chaturvedi, S. Tanaka, and K. Kaeriyama, *Macromolecules*, **26**, 2607 (1993).
 15. M. Connolly, F. E. Karasz, and M. S. Trimmer, *Macromolecules*, **28**, 1872 (1995).
 16. Y. H. Ha, C. E. Scott, and E. L. Thomas, *Polymer*, **42**, 6463 (2001).
 17. P. Kovacic and M. B. Jones, *Chem Rev.*, **87**, 357 (1987).
 18. P. Kovacic and A. Kyriakis, *J. Am. Chem. Soc.*, **85**, 454 (1963).
 19. C. S. Marvel and G. E. Hartzell, *J. Am. Chem. Soc.*, **81**, 448 (1959).
 20. M. Abe and T. Yamamoto, *Synthetic Metals*, **156**, 1118 (2006).
 21. S. E. Morgan, R. Misra, and P. Jones, *Polymer*, **47**, 2865 (2006).
 22. R. A. Vaia, R. Krishnamoorti, C. Benner, and M. Trimer, *J. Polym. Sci., Polym. Phys.*, **36**, 2449 (1998).
 23. R. W. Phillips, V. V. Sheares, E. T. Samulski, and J. M. DeSimone, *Macromolecules*, **27**, 2354 (1994).
 24. G. P. Simon, M. S. Ardi, A. A. Goodwin, M. D. Zipper, S. R. Andrews, S. Shinton, G. Williams, M. Galop, and M. Trimmer, *J. Polym. Sci. Polym. Phys.*, **36**, 1465 (1998).
 25. Y. Wang and R. P. Quirk, *Macromolecules*, **28**, 3495 (1995).
 26. D. Dean, M. Husband, and M. Trimmer, *J. Polym. Sci., Polym. Phys.*, **70**, 2971 (1998).
 27. T. Yammamoto, B. Wu, B. K. Choi, and K. Kubota, *Chem. Lett.*, 720 (2000).
 28. T. Yammamoto, M. Abe, Y. Takahashi, K. Kawata, and K. Kubota, *Polym. J.*, **35**, 603 (2003).