

폴리카보네이트의 구조, 물성 및 응용

이 상 수 · 조 재 영

1. 서 론

1959년 상업화가 시작된 이후 폴리카보네이트(bisphenol-A polycarbonate)의 성장은 지속적으로 이루어져 왔다. 블렌드용까지 포함하여 폴리카보네이트의 전세계에 걸친 소비량은 1980년의 215,000톤, 1984년의 320,000톤, 그리고 1991년의 900,000톤까지 꾸준한 성장을 보여주고 있다.¹ 대개의 고분자 재료가 한 두 가지 분야에서 우수한 물성을 보여주는 반면에 폴리카보네이트는 기계적 성질, 투명성, 그리고 전기적 특성 등 다양한 면에서 매우 우수한 가격 대 성능비를 보이며, 공중합이나 블렌딩 또는 첨가제의 도입에 의해 비교적 간단히 물성의 다양화를 꾀할 수 있다는 점이 폴리카보네이트의 지속적인 수요의 성장을 이끌어 온 요인이라 할 수 있다.

2. 폴리카보네이트의 물성

표 1은 폴리카보네이트가 지닌 물성의 장단점 중 대표적인 것을 요약한 것이다. 폴리카보네이트는 bisphenol-A unit이 carbonate group으로 연결되어 있는 높은 방향족 특성을 지닌 반복 단위로 구성되어 있다. 구조상으로 보면

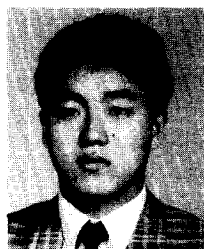
표 1. General Properties of BPA Polycarbonate

Advantage	Disadvantage
Rigidity	More expensive than PE, PS etc.
Toughness	Special care in processing
Transparency	Pale yellow color
Electrical insulation	Limited resistance to chemicals and ultra-violet light
Self-extinguishing	Notch sensitivity
Physiological inertness	

충분히 결정을 이룰 수 있을 것으로 보이나, 매우 제한적인 결정화 조건에서만 결정성을 보이며, 일반적인 가공조건에서는 우수한 투명성을 보이는 무정형의 고분자로 존재한다. 결정화가 쉽게 되지 않는 것은 bisphenol-A의 높은 방향족 특성과 carbonate group에 걸쳐있는 부분적인 이중결합성으로 이루어지는 분자 사슬의 강직성으로 인하여 결정구조에 맞추어 들어가지 못하기 때문으로 생각된다. 이러한 사슬의 강직성은 폴리카보네이트의 우수한 열안정성과 기계적 성질의 원인이 되기도 한다.

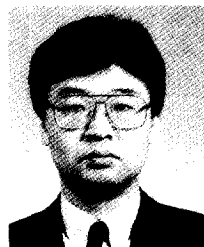
2.1 기계적 성질

상온에서의 탁월한 기계적 성질, 특히 강인성은 폴리카보네이트가 대표적인 엔지니어링 플라스틱의 자리를 차지하고 있는 중요한 이유이다. 같은 조건에서 폴리카보네이



이상수

1990 서울대학교 공업화학과(학사)
1992 서울대학교 공업화학과(석사)
1992~ 서울대학교 공업화학과
현재 박사과정



조재영

1979 서울대학교 공업화학과(학사)
1981 서울대학교 공업화학과(석사)
1990 University of Michigan 고분자학과(박사)
1990~ University of Michigan 재료공학과 연구원
1992~ 경희대학교 화학공학과 조교수
1993
1993~ 서울대학교 공업화학과 조교수
현재

Structure, Properties and Applications of Polycarbonate

서울대학교 공업화학과(Sang Soo Lee and Jae Young Jho, Department of Chemical Technology, Seoul National University, San 56-1 Shinrim-Dong, Kwanak-Ku, Seoul, 151-742, Korea)

트의 modulus와 strength는 일반 비결정성 열가소성 고분자와 비슷한 수준이지만, 강인성(toughness)에서는 훨씬 우수한 수치를 보인다. 이는 폴리스타이렌이나 폴리메틸메타크릴레이트 등의 범용 열가소성 고분자가 유리전이 온도 이하에서 딱딱하고 부서지기 쉬운 거동을 보이는 것과는 대조되는 현상으로, 이에 대한 구조적 요인과 기계적 성질 사이의 정량적 관계는 아직 확립되어있지 못한 실정이다. 그러나, 동적기계적 거동이나 유전률, NMR 등의 완화 현상에 대한 고찰을 통해 강인성에 대한 폴리카보네이트의 특이 거동은 -100°C 부근에서 넓은 범위에 걸쳐 일어나는 이차완화 현상과 관계있는 것으로 추정되고 있다.^{2~9} 이의 설명을 위하여 상온에서 외부의 응력에 대응할 수 있는 분자운동이 필요한데, 초기의 연구들에서는 반복단위 구조중의 carbonate기나 phenylene기의 국지적인 운동이 이차완화 운동으로 제안되어^{7~9} 설명에 어려움이 있었으나, 최근의 연구들에서 반복단위 한개 이상을 포함하는 사슬 운동이 제안되어, 이차완화와 강인성의 관계를 설명할 수 있는 모델이 제시되었다.^{10~12}

상온에서의 내충격성은 notch가 없을 경우 어떤 고분자 재료보다 우수한 수치를 보이나, notch를 가지는 시편의 내충격성은 없을 경우에 비해 상당히 떨어진다. 내충격성은 또 notch의 반경이 작아질수록 급격히 감소하여, 폴리카보네이트는 notch 민감성이 큰 고분자의 하나이다. 이는 폴리카보네이트의 사슬구조가 다른 고분자에 비해 비교적 선형의 강직한 구조로 되어있어, notch가 있을 경우 crack이 사슬사이로 쉽게 지나가기 때문으로 생각된다. 그러나 notch가 있는 경우의 내충격성도 범용 고분자의 내충격성을 훨씬 증가하는 수치를 보이고 있다. Notch 민감성을 개선하기 위하여 여러가지 공중합체와 합금이 시도되었으나, 다른 성질 즉 투명성 등을 해치지 않고 개선된 경우는 드문 것으로 보고되고 있다.

2.2 투명성

투명성은 비결정성 고분자의 특성이지만 폴리카보네이트는 투명성이 특히 우수한 고분자로 가시광선의 경우 80~90%의 투과율을 보인다. 높은 투명성의 원인은 분자구조상의 높은 방향족 특성에 기인하는 높은 굴절률 때문이다. 합성된 폴리카보네이트는 옅은 노란색을 띠고 있으나, 가공단계에서 옅은 푸른색의 안료를 섞어 이를 가리고 있다.

자외선에 노출될 경우 폴리카보네이트는 표면에서 점진적인 투명성 감소를 보인다. 이런 투명성의 감소는 폴리카보네이트 표면에서의 미세한 crack 형성에서 기인하는 것으로, 표면을 구성하는 고분자의 분자량이 상당히 많이 감소해있는 것을 발견할 수 있다. 표면에서의 분해 거동은 굴곡강도나 탄성계수에 큰 변화를 초래하지는 않으나 심각한 투명성과 충격강도의 저하를 일으킨다. 자외선에 의한 황화 현상(yellowing)과 분자량 감소는 광산화 반응의 결과로서 여러가지 메커니즘이 제안되었는데,^{13~16} Fig. 1의

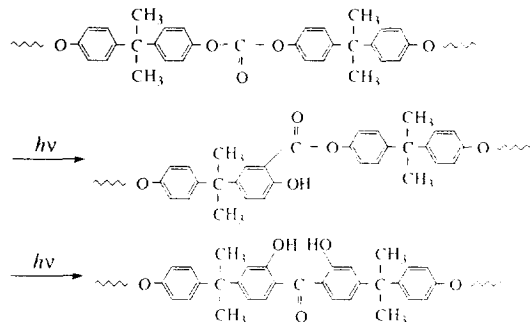


Fig. 1. Photo-Fries rearrangement of polycarbonate.

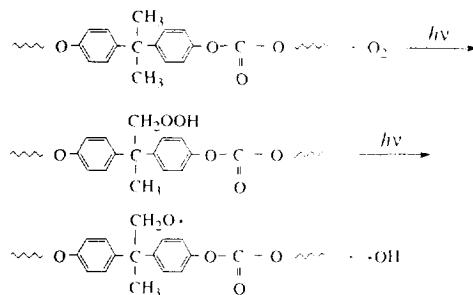


Fig. 2. Peroxide formation in polycarbonate.

Photo-Fries rearrangement가 가장 타당성있는 것으로 알려져있다. 빛에 의해 형성된 2,2'-dihydroxybenzophenone 구조는 가시광선을 흡수하면서 황화현상을 일으킨다. 폴리카보네이트 내 isopropylidene 구조의 methyl기는 산소와 만나 빛에 의해 hydroperoxide를 형성하며 여기서 발생한 arylalkoxy radical이 고분자 사슬의 분해를 일으켜 분자량 감소를 야기한다(Fig. 2). 이 때문에 외장재료의 응용이 필요한 경우 자외선 안정제 처리는 필수적이며 폴리카보네이트의 경우 benzotriazole이 가장 널리 쓰인다.^{17,18}

2.3 기타 물성

폴리카보네이트의 유리전이온도는 150°C , 열변형온도는 130°C 로 폴리설폰 등 몇몇 내열성 엔지니어링 플라스틱에는 미치지 못하나, 일반적인 용도에는 충분한 내열성을 보이며, 특히 가격대비 내열성은 우수한 편이다. 폴리카보네이트는 극성의 carbonate기를 가지고 있으나 극성기가 주사슬에 포함되어 있어 상온에서 우수한 전기절연성을 보인다. 또한 높은 방향족 특성으로 산염기에 비교적 내구성이 있는 편이지만 강한 염기에 의해서는 가수분해를 일으킨다. 일부 유기화합물에 대해서 장시간 노출될 경우 crazing에 의한 물성의 저하가 초래될 수 있다.

폴리카보네이트 수지는 수분 흡수율이 매우 낮은 편이지만, 일부 존재하는 수분은 성형 공정 중 휘발하여 제품의 최종 상태에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 폴리카보네이트 수

지는 용융 점도가 매우 높은 편으로 가공 전의 수분 제거와 적당한 유동성의 확보가 공정 조건에 상당한 제한을 가한다. 일반 열가소성 수지와 비교해서 폴리카보네이트 수지의 용융 점도는 온도에 따른 변화가 작은 편이며 (Fig. 3), 또한 전단 속도에 대한 의존성도 작은 편이다(Fig. 4). 이에따라 폴리카보네이트의 가공 온도는 통상 높은 편으로 사출 성형시 약 290~320℃에 이르는데, 이 온도 범위에서는 폴리카보네이트의 분해 반응이 빠르게 진행되며 물성의 현저한 저하가 초래될 수 있다. 또한 용융된 폴리카보

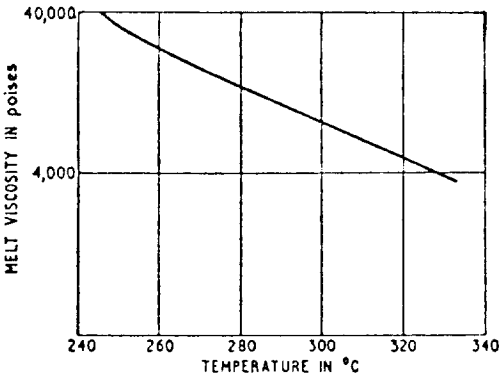


Fig. 3. Influence of temperature on melt viscosity of polycarbonate. Shear stress = 1×10^6 dyne/cm². After Christopher and Fox.³³

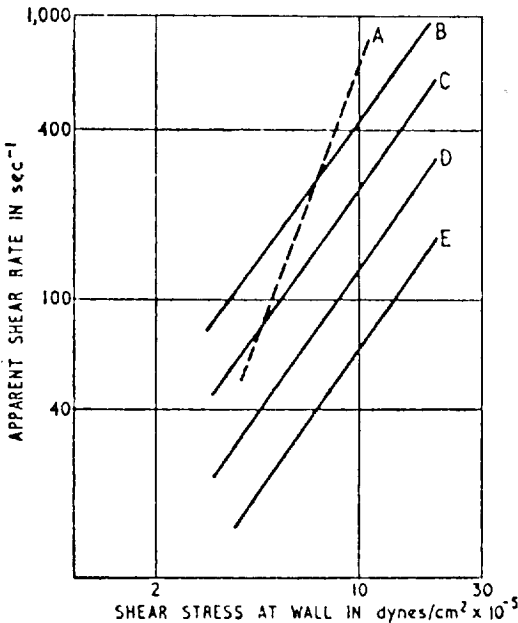


Fig. 4. Shear stress-shear rate relationship for a polystyrene at 440 F (A) and polycarbonate at 650 F (B), 600 F (C), 550 F (D), and 500 F (E). After Fielder et al.³⁴

네이트는 금속 표면에서의 접착력이 커서 사출기나 압출기의 내부에서 냉각이 되면 수축이 일어나면서 성형 기기 벽면 으로부터 금속의 탈리를 일으키거나 표면의 훼손을 초래한다. 그러므로 가공 중 급속한 냉각은 피해야하며 성형 후에는 폴리카보네이트의 완전한 제거가 필수적인데 성형 기기의 세척에는 보통 폴리에틸렌 등이 이용된다.

3. 폴리카보네이트의 응용

폴리카보네이트는 일반 비결정성 열가소성 고분자에 비해 다소 복잡한 구조에 높은 가격이지만 생산과 수요면에서 전세계에 걸쳐 가장 꾸준한 성장을 보이고 있다.⁶ 현재 폴리카보네이트는 생산 단가가 떨어짐에 따라 여러 분야에서의 응용이 확대되고 있으며, 생산량면에서는 엔지니어링 플라스틱 분야에서 나일론 다음의 위치를 점하고 있다. 지역별로 그 소비 현황을 살펴보면 미주 지역이 45%로 가장 많으며 그 다음으로는 유럽의 30%, 일본의 15% 순이다.

3.1 전기 전자 통신분야

폴리카보네이트의 응용 중 가장 규모가 큰 것은 전기 및 전자 공업 분야로서 전체 시장의 약 50% 정도를 차지하고 있다(Fig. 5). 폴리카보네이트가 보이는 매우 우수한 전기 절연성에 투명성, 난연성, 내열성, 내충격성과 치수 안정성, 그리고 온도와 습도에 따른 물성의 변화가 크지않다는 장점이 결합되어 스위치, 축전기, 릴레이 등 각종 전기, 전자 제품의 케이스에서 주로 이용되고 있다. 그 외에 컴퓨터나 각종 계산기, 자기 디스크의 하우징, 형광등의 스타터 전구 등 그 응용 범위는 매우 넓게 분포하고 있다.

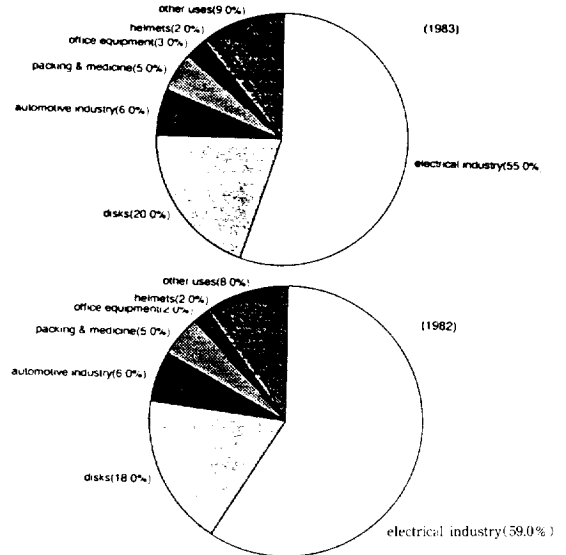


Fig. 5. Distribution of polycarbonate consumption in Western Europe.

폴리카보네이트는 또한 정보 통신 분야에서도 폭넓게 응용되고 있다. 주된 분야는 전화기의 전환 장치(switching mechanism)이었는데, 최근 10년 사이에 콤팩트 디스크 등 광 데이터 저장 매체로서의 응용 분야가 괄목할만한 신장세를 보이고 있다. 레이저 빔을 이용한 데이터 저장 장치에서 디지털로 전환된 자료들은 미세한 홈의 형태로 투명한 폴리카보네이트의 표면에 저장되며, 이러한 홈들은 몰드 내에 위치한 주형에 의해 사출 방식으로 고순도 폴리카보네이트의 표면에 기록된다.

레이저 기술 분야에서는 높은 투명성, 변형을 막기위한 낮은 흡습률, 기계적 안정성, 높은 열변형 온도 그리고 성형시 낮은 복굴절율을 얻을 수 있을 정도의 충분한 흐름성 등이 적용될 재료가 지녀야할 필수적 물성이다. 유동성이 우수한 폴리카보네이트는 이러한 목적을 위해 개발된 것으로, 분자량이 22,000~32,000 정도인 사출 성형 등급의 폴리카보네이트 말단에 분지가 많이 이루어진 alkylphenyl 구조를 도입한 형태를 갖고있다.¹⁷ 말단에 형성된 분지는 전체의 기계적 물성에는 큰 영향을 주지않으면서 유동성을 향상시켜 성형시 국부적인 잔류 응력의 존재를 피할 수 있게 해준다(표 2). Mobay Chemical의 Makrolon FCR 2405처럼 성형 시간의 단축과 가공성 향상을 목적으로 유동성을 개선시킨 폴리카보네이트의 경우 기계적 물성 저하를 막기위해 일정 수준이상의 분자량이 요구되지만 판디스크와 같은 경우에는 18,000~20,000 정도의 낮은 분자량도 적용이 가능하며 특히 이 경우 용융 점도의 감소를 통해 낮은 복굴절율을 이룰 수 있어서 광학 특성의 향상을 기대할 수도 있다.

폴리카보네이트는 필름 형태로도 많이 응용된다. 필름으로의 성형은 압출이나 casting에 의해 이루어지며 후자의 경우 무배향 상태나 길이 방향으로 배향된 결정성 상태가

표 2. Properties of Easy-flow Polycarbonate

Property	Test method	Easy-flow grades ^a		Standard PC	
Melt-flow index at 300°C/1.2kg, g/10min	DIN 53,735 ^b ISO 1133	32~35	17~20	17~20	10~12
Spiral flow at 300°C, cm		54	38	38	33
Notched impact strength, Charpy, kJ/m ²	ISO 53,453 ISO R 179	20	40	20	40
Elongation at break after 400h thermal aging at 100°C, %	DIN 53,455 ISO R 527	10	50	10	30

^a Based on polycarbonate with higher branched alkylphenyl end groups.

^b Deutsche Industrie Norm, Germany.

얻어진다. 기계적 물성은 필름의 연신과정을 통해 증가시킬 수 있으며, 동시에 결정성의 조절로써도 내열성의 향상을 도모할 수 있다. 폴리카보네이트 필름은 loss factor가 낮으며, 약간의 온도의 의존성을 보인다. 절연 저항성은 고온에서도 탁월하며, 낮은 수분 흡수성으로 전기적 성질의 습도 의존성은 거의 없는 편이며 또한 우수한 치수 안정성을 보인다. 폴리카보네이트 필름의 가장 큰 용도는 전기 장치 분야이다. 라디오나 텔레비전에 소요되는 코일의 절연체나 컨덴서의 케이스로 가장 많이 이용되고 있으며, 그 외에 금속이 함침된 형태로써 컨덴서의 제조에 쓰이거나, 마이크와 전화기의 수화기 부분에 쓰이는 폴리카보네이트 막 등이 있다.

3.2 발포 폴리카보네이트

폴리카보네이트는 발포제를 이용하여 성형과정 중에 폼(foam)의 형태로도 가공을 할 수 있다.¹⁷⁻¹⁹ 1973년 상업화가 이루어진 폴리카보네이트 폼은 단순 팽창 상태 또는 다공성 중심부와 치밀한 외피 구조를 갖는 구조발포체(structural foam)로 만들 수 있다. 상업화 초기에는 Union Carbide의 질소 기체에 의한 물리적 발포법이 일반적이었으나, 오늘날은 더 우수한 발포 상태를 얻기위해 화학적 발포법이 이용되고 있다. 발포제는 용융된 재료와 잘 섞여야하며 그 분산 상태가 아주 균일해야한다. 또한 가공 온도에서 쉽게 분해가 일어나야하며 제품의 최종 물성에 영향이 없어야하며 기체 발생량이 커야하는데 대표적인 발포제로는 5-phenyltetrazole, phenyldihydrooxadiazinone 등이 있다.

표 3. Properties of Foamed Polycarbonate Makrolon SF 800

Property	Test method	Value
Vicat softening temp VST/B	DIN 53,460	140
Flammability test, 6.4mm	UL 94	VO
Elongation at break, %		5
Flexural strength at 5% peripheral		
Fiber elongation, MPa		
at 23°C	DIN 53,452	70
at 60°C	DIN 53,452	60
Impact strength, kJ/m ²		
at +23°C	DIN 53,453	40
at -23°C	DIN 53,453	40
Tensile strength, MPa	DIN 53,455	>35
Tensile modulus of elasticity, MPa	DIN 53,457	2,000
Flexural modulus of elasticity, MPa		
at 23°C	DIN 53,457	
at 60°C	DIN 53,457	
Heat distortion resistance, °C		
at 1.81 MPa	DIN 53,461	127
at 0.45 MPa	DIN 53,461	137
Izod notched impact strength, method E, J/m		
at +20°C	ASTM D256	350
at -20°C	ASTM D256	350

표 3은 Bayer의 발포 폴리카보네이트 제품인 Makrolon SF 800의 물성을 나타낸 것이다. 폴리카보네이트 폼은 밀도가 0.6 g/cm^3 이하인 경우에서도 일반 금속에 비해 무게 대 굴곡 강도가 약 2배에 이르는 우수한 물성을 보이는데 유동성과 발포성 그리고 기계적 강도가 균형을 이루기 위해서는 $28,000 \sim 32,000$ 의 분자량에 $0.8 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$ 의 밀도 조건이 요구되는 것으로 알려져 있다.

발포용 폴리카보네이트의 성형은 통상 저압 상태에서 이루어진다. 발포용 기체의 압력은 무발포 시의 사출 성형 조건에 비해 낮으며 이런 낮은 압력 조건으로 인해 보다 경제적인 운전조건을 얻을 수 있다. 또한 몰드 내부에 미치는 압력이 낮으므로 더 경제적인 재료, 예를 들면 알루미늄 등을 몰드에 적용할 수가 있다. 저압 발포 공법에서는 기체의 팽창이 발포제의 충전 과정, 몰드로의 이동 과정 등에서도 일어날 수도 있으므로 최종 제품의 표면 상태가 균일하지 못한 단점이 있다. 이런 단점을 극복하기 위해 여러 가지 방법이 제안되었으며 그 중에 counterpressure법이 있다(Fig. 6). 밀봉된 몰드 내에 불활성 기체(통상 질소

기체)로 내부 압력을 발생시킨 후 용융된 폴리카보네이트를 밀어넣으면 기체가 용융물내로 녹아들어가고 표면층에서는 일부 발포가 일어난다. 몰드에 작용하던 counterpressure를 제거하면 용융된 폴리카보네이트 내에 녹아있던 발포용 기체가 팽창을 하여 용융물 내부에서 발포가 일어나게 되는데 counterpressure의 감소 속도를 조절함으로써 기체의 팽창을 조절할 수가 있으며 이로부터 매우 균일한 표면 상태 (약 5 micron의 roughness)를 얻을 수 있다. 또한 발포 중 폴리카보네이트의 밀도와 내부 구조의 균일한 분포가 가능해짐으로써 충격 강도의 향상도 도모할 수 있다.

발포 폴리카보네이트는 비교적 크고 무거운 제품의 성형 작업에 주로 응용되는데 초기에는 사무용 기기류의 하우징 제작이 주를 이루었다. 현재는 유리 강화 등급이 개발되어 그 응용 분야가 더욱 넓어졌는데 가벼우면서도 강도와 피로에 견디는 물성이 우수하여 수상 스키용품 제조 등에 사용된다.

3.3 가정용품 분야

오늘날 폴리카보네이트 응용에서 가장 두드러진 수요의

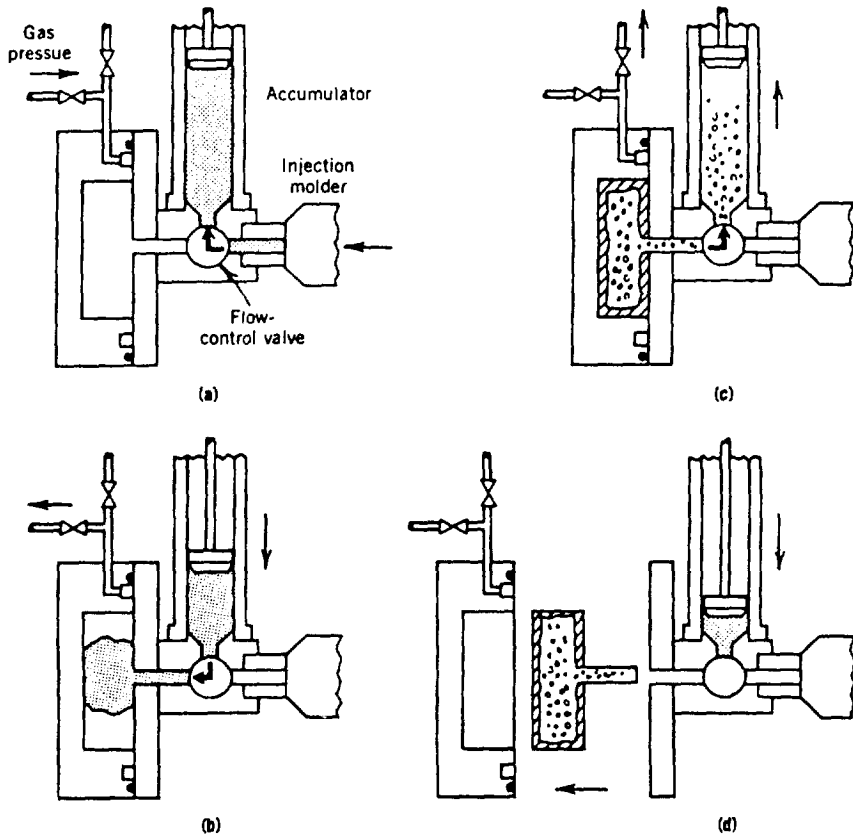


Fig. 6. Gas counterpressure structural foam injection molding process. (a) Empty mold, pressurized, foamable resin stored in accumulator ; (b) foamable resin injected against gas pressure ; (c) gas pressure relief, accumulator retracted to allow foaming(optional) ; (d) article ejected, resin in accumulator recompressed.

신장을 보이는 분야 중 하나가 가정용품 분야이다. 폴리카보네이트는 투명성에 외관이 미려하며 강인성과 내열성이 뛰어나 각종 가정용 전기, 전자 제품, 예를 들어 모발 건조기, 커피 제조기, 전기 면도기의 하우징에서 주종을 이루고있으며, 그 외에 화학적으로 매우 안정한 구조를 갖고 있어서 부엌의 싱크대, 저온용 보관 용기 등에서 응용되고 있다.

4. 공중합체를 통한 폴리카보네이트의 개질

폴리카보네이트는 bisphenol-A의 구조를 일부 다른 bisphenol로 대체함으로써 매우 다양한 물성의 창출을 꾀할 수 있다. 폴리카보네이트는 폴리스폰 등 새로운 엔지니어링 플라스틱에 비해 열변형 온도가 다소 낮은 편이며 강염기에 의한 가수분해 반응에 취약한 단점이 있다. 이를 보완하기 위한 여러 공중합체가 시도되어 부분적인 성공을 거두었다. 이들 경우 폴리카보네이트 특유의 투명성, 강인성을 해치지 않는 노력이 병행되어야함은 물론이다. 1979년 Bayer에서 시험생산을 시작한 것이 2,2-bis(3,5-dimethyl-4-hydroxyphenyl)propane(tetramethylbisphenol-A) 구조를 갖는 TMBPA-PC로서 Vicat softening point가 196℃에 이르며 탁월한 내가수분해성을 지닌, 밀도가 1.1 g/cm³ 정도의 비교적 가벼운 고분자 재료이다. 그러나 TMBPA-PC는 폴리카보네이트에 비해 높은 열변형 온도를 보이는 점에서 알 수 있듯이 연성이 낮아 충격강도나 stress에 견디는 정도에서 다소 취약하다.^{20,21}(표 4)

폴리카보네이트의 굴절률($n_D=1.590$)보다 다소 높은 수치($n_D=1.610$)를 보이는 1,1-bis(4-hydroxyphenyl)sulfide(bisphenol S)를 공중합시킨 경우는 향상된 광학 특성을 기대할 수 있다.^{22~26} 또한 2,2-bis(3,5-dibromo-4-hydroxyphenyl)propane(tetrabromobisphenol-A)가

공중합되면 일반적인 첨가제가 없이도 매우 우수한 난연성을 얻을 수 있다.^{22~25,27,28} 그외에 2,2-bis(4-hydroxyphenyl)-1,1-dichloroethylene(bisphenol-C)와의 공중합체는 폴리카보네이트와 유사한 충격강도를 보이면서 높은 투명성과 뛰어난 난연성을 보인다.^{29~31} Bisphenol-A와 1,1-bis(4-hydroxyphenyl)cyclohexane, (bisphenol-Z)으로 합성된 변성 폴리카보네이트는 열변형 온도가 높으며, 페인트 수지나 전기절연성 필름 제조에 응용된다.^{22~25,32}

5. 결 론

현재 환경 문제로 폴리카보네이트 산업에 대해서도 일부 제약이 가해질 것이 예상되기는 하지만, 새로운 제조 공정의 개발이 추진되고있는 현실점에서 보면 범용 플라스틱에 비해 크게 높지 않은 가격에 엔지니어링 플라스틱의 성능을 지니고 있는 폴리카보네이트의 특성상 향후 그 수요량은 끊임없는 성장을 계속할 것으로 예견되며, 새로운 시장의 창출 또한 무궁할 것으로 보인다. 본 총설에서는 현재까지 주종을 이루고있는 폴리카보네이트의 구조와 기본적인 물성, 그리고 대표적인 응용 분야에 대해 간략히 살펴보았다. 여기에서는 언급하지 않았지만 폴리카보네이트가 기존의 고분자 재료와 물리적 혼합상을 이룰 때에도 우수한 물성을 발현하는 경우가 다수 발표, 상업화 되었으며, 여러가지 변성 폴리카보네이트에 대한 연구 또한 많은 진척을 보이고 있는 점에서 볼 때 오늘날 산업과 사회의 고도화에따라 요구되는 재료의 물성에 부합되는 신소재의 개발에 있어서 폴리카보네이트의 발전적 가능성은 더욱 커질 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. J. A. Brydson, "Plastics Materials", Butterworths, London, 1989; Mod. Plastics Sep. (1991).
2. K. H. Illers and H. Breuer, *Kolloid-Z.*, **176**, 110 (1961).
3. F. P. Rending J. A. Faucher, and R. D. Whitman, *J. Polym. Sci.*, **54**, 556 (1961).
4. L. E. Nielsen, "Mechanical Properties of Polymers and Composites", Marcel Dekker, New York, 1974.
5. M. Tomikawa and N. Hujimoto, *Kobunshi Kagaku*, **25**, 625 (1968).
6. J. Bussink and J. Heijboer, in J. A. Prins, ed., "Physics of Non-Crystalline Solids" North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1965.
7. S. Matsuoka and Y. Ishida, *J. Polym. Sci., Part C*, **14**, 247 (1966).
8. D. J. Massa and J. R. Flick, *Polym. Prepr., Am. Chem. Soc., Div. Polym. Chem.*, **14**(2), 1240 (1973).
9. L. J. Garfield, *J. Polym. Sci., Part C*, **30**, 551 (1970).

표 4. Properties of TMBPA Polycarbonate and BPA Polycarbonate

Property	Test method, DIN	TMBPA PC, $\eta_r=1.30^*$	BPA PC, $\eta_r=1.30^*$
Glass-transition temp, °C		203	150
Density, g/cm ³	53,479	1.08	1.20
Refractive index		1.546	1.586
Tensile modulus, MPa	53,457	2,400	2,200
Tensile strength, MPa	53,455	80	65
Tensile strength at break, MPa	53,455	62	68
Impact strength, kJ/m ²	53,453	45	no break
Notched impact strength, kJ/m ²	53,453	4	>300
Elongation at break, %	53,455	50	>100

* η_r determined in a solution of 0.5 g polymer in 100 ml CH₂Cl₂ at 25°C.

10. A. F. Yee and S. A. Smith, *Macromolecules*, **14**, 54 (1981).
11. K. L. Ngai, R. W. Rendell and A. F. Yee, *Macromolecules*, **21**, 3396 (1988).
12. J. Y. Jho and A. F. Yee, *Macromolecules*, **24**, 1905 (1991).
13. D. Bellus, P. Hrdlovic and Z. Manasek, *J. Polym. Sci. Pt. B*, **4**, 1 (1966).
14. A. Gupta, A. Rembaum and I. Moacanin, *Macromolecules*, **11**, 1285 (1978).
15. A. Gupta, R. Liang, I. Moacanin, R. Goldbeck and D. Kliger, *Macromolecules*, **13**, 262 (1980).
16. A. Factor and M. L. Chu, in N. Grassie, ed., "Polymer Degradation and Stability", Vol. 2, Applied Science Publishers, London, 1980.
17. P. R. Müller, *Kunststoffe*, **74**, 569 (1984).
18. W. Cohnen and W. Meyer, *Kunstst. Rundsch.*, **10** (1973).
19. S. Y. Hobbs, *J. Appl. Phys.*, **48**, 4052 (1977).
20. V. Serini, D. Freitag and H. Vernaleken, *Angew. Makromol. Chem.*, **55**, 175 (1976).
21. Ger. Pats., 2,013,052 (1970).
22. H. Schnell, *Polym. Rev.*, **9** (1964).
23. H. Schnell, *Angew. Chem.*, **68**, 633 (1956).
24. *Ind. Eng. Chem.*, **51**, 157 (1959).
25. *Plast. Inst. Trans.*, **28**, 143 (1960).
26. Ger. Pats., 2,721,595 (1977) ; Eur. Pats., 40,863 (1981) ; 85,578 (1983).
27. Ger. Pats., 2,462,470 (1977).
28. E. C. Gilbert and G. D. Brindell, *Am. Chem. Soc. Div. Org. Coat. Plast. Chem. Pap.*, **34**, 136 (1974).
29. Z. Sobiczewski and Z. Wielgosz, *Plaste Kautsch.*, **15**, 176 (1968).
30. A. Factor and C. M. Orlando, *J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed.*, **18**, 579 (1980).
31. M. R. McLaury, A. D. Chan, A. M. Colly, A. Saracino and A. M. Toothaker, *J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed.*, **18**, 250 (1980).
32. W. J. Jackson, Jr. and J. R. Caldwell, *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, **2**, 246 (1963).
33. W. F. Christopher and D. W. Fox, "Polycarbonates", Reinhold, New York, 1962.
34. E. F. Fielder, W. F. Christopher and T. R. Calkins, *Modern Plastics*, **36**, 115 (1959).