

# 고분자재료의 성형방법 및 그 개선방향

尹 在 倫

한국과학기술원 생산공학과 교수



●1954년생  
●생산공학 및 고분자가공을 전공하였으며 고분자의 성형, 복합재료의 성형, 고분자 복합재료의 트라이볼로지 등에 관심이 있다.

## 1. 머리말

고분자재료나 고분자를 모체로 한 복합재료는 중요한 산업용 신소재로서 이제까지 많이 사용되어 온 전형적인 금속재료나 세라믹재료 또는 나무등을 대체할 수 있는 재료로 널리 쓰이고 있다. 특히 자동차산업이나 우주항공산업, 전자산업, 건설부문, 해양산업등에 많은 고분자복합재료가 사용되고 있는 실정이다<sup>(1,2)</sup>. 이와 같은 고분자 재료의 효율적인 이용을 위하여 재료의 기계적 물리적 성질과 성형방법에 대한 정확한 이해를 바탕으로 적절한 가공방법의 선택과 개발이 선행되어야 함이 필수적이며, 이를 위하여 고도의 기술인력이 필요하다.

현재 많이 사용되고 있는 고분자 및 복합재료의 성형방법에 대한 간단한 소개와 더불어 여러공정의 문제점에 대하여 고찰한 다음 미래 지향적인 측면에서 고분자 성형기술의 개선방향을 제시하고자 한다. 특히 제품생산(manufacturing)의 3대요소인 재료(material), 장비(equipment), 인력(man)은 고분자의 생산에도 필수불가결한 3대요소로서 고분자 성형기술의 문제점과 개선방향도 이 세분야를 중심으로 고찰할 것이다.

## 2. 고분자재료의 성형방법

고분자재료의 성형방법은 그 재료의 성질에

따라 크게 다르다. 즉 열가소성수지(thermoplastic)와 열경화성수지(thermoset)의 가공공정은 같을 수 없다. 열가소성수지는 온도를 증가시키에 따라 점도가 낮아져서 유동이 용이하므로 금형을 이용하여 요구되는 형태를 형성시킨후 냉각시켜 고체화시키는 공정이 보편적이며, 열경화성수지는 대부분 상온에서 액체상태의 수지로서, 가열됨에 따라 중합을 일으켜 경화되므로 금형의 냉각은 불필요하다. 고체화된 열경화성수지를 고온으로 가열하면 분자쇄가 분해되거나 산화되므로 일단 경화된 수지는 다시 유동시킬 수 없다. 일반적으로 열경화성수지는 대부분이 복합재료의 모체로 사용되므로 열경화성고분자의 가공공정은 복합재료의 성형방법으로 고려하는 것이 바람직하다. 열가소성고분자의 성형방법과 복합재료의 성형방법을 분리하여 소개하고자 한다.

### 2.1 열가소성 고분자의 성형

#### (1) 압출성형(extrusion)

고분자성형의 가장 기본적인 공정으로 압출 후에 어떤 공정을 연결하는가에 따라 여러공정에 응용된다. 예를들면 필름블로우잉이나 섬유방사(fiber spinning), 블로우성형, 도선피복등에 응용되는 공정이다. 압출기(extruder)는 펌프로서의 기능과 용융기(melter)로서의 기능은 물론 고분자혼합물(polymer blend)이나 고분자합금(polymer alloy)의 제조시 혼합기(mixer)로서의 역할도 동시에 수행한다. 일정

한 단면을 갖는 박판이나 파이프 또는 막대등을 연속적으로 생산할 수 있으며, 압출금형(die)내에서의 고분자 용융액의 온도, 압력, 점도등의 정확한 조정이 요구된다.

#### (2) 사출성형(injection molding)

용융된 고분자를 금형(mold) 내에 고압으로 사출시켜 충전시킨 후 압력을 유지하면서 냉각시킨 다음 추출하는 공정으로 비교적 정밀도가 높은 부품을 생산할 수 있다. 사출시와 냉각기간 중 발생하는 온도구배에 따라 불균일한 수축현상, 잔류응력(residual stress), 용접선(weld line), 싱크마크(sink mark)등 많은 문제점이 있으며, 사출성형시 사용되는 금형의 설계 및 제작에 필요한 비용이 과다하므로 대량생산에 적절한 방법이다.

#### (3) 필름 블로우잉(film blowing)

링(ring) 형태의 금형을 통하여 고분자 용융액을 압출시키고 동시에 링 내부로 압축공기를 불어넣어 풍선모양으로 확장시켜 두께의 정밀도가 높지 않은 필름의 연속생산기술이다. 블로우잉시 필름의 용융강도(melt strength)가 일정하여야 하며, 금형 내에서의 고분자액의 온도 및 압력분포가 일정하여야 균일한 점도를 유지할 수 있다. 필름 블로우잉에 공급되는 고분자의 품질을 일정하게 유지하는 것도 절대적으로 중요하며 만약 분자량분포등이 변화하면 가공조건을 변화시켜야 하므로 성형에 어려움이 있다.

#### (4) 블로우 성형(blow molding)

우리병의 제작방법과 같이 공기를 불어넣어 확대시키는 방법으로 여러가지 저렴한 용기나 자동차용 연료탱크등을 생산할때 사용되며 최근에는 한겹이 아닌 여러겹(multi-layer)의 벽을 갖는 각종 용기가 개발되어 가스의 확산(diffusion)에 의한 내용물의 손상을 방지할 수 있다. 최근에 블로우성형의 이용이 급속히 증가하고 있으며, 초기상태의 원형(parison)을 성형하는 방법에 따라 사출블로우성형(injection blow molding)과 압출블로우성형(extrusion blow molding)으로 분류한다.

#### (5) 열성형(thermoforming)

압출된 판(sheet)형태의 고분자를 적절한 온도로 가열하여 금형사이에서 압축하거나, 진공을 이용하여 성형하는 방법으로 정밀도나 강도를 요구하지 않는 일회용 컵이나 접시 등의 저렴한 물건의 대량생산에 많이 사용된다.

#### (6) 캘린더링(calendering)

압출기를 이용하여 공급되는 고분자 용융액이나 혼합물을 여러 로울러 사이를 통과시켜 플라스틱 박판이나 타일 등의 가공을 하며 특히 비닐(PVC)의 성형에 많이 이용된다.

#### (7) 회전성형(rotational molding)

대형 용기의 제작시에 사출성형이나 블로우성형이 불가능하거나 비경제적인 경우에 원심력을 이용한 회전성형방법이 이용되나 광범위하게 채택되지는 않는다.

위에서 열거한 고분자 성형방법은 그 가공특성에 따라 각각의 문제점이 있으며, 고분자성질 자체로부터 기인하는 공통적인 문제점도 있다. 가장 공통적인 문제점은 고분자가 고체화되는 순간과 상온으로 냉각되는 순간에 발생하는 수축현상<sup>(3)</sup>이며 그 예로서 잔류응력의 발생<sup>(4~8)</sup>, 공동(void)의 발생, 용접선의 발생<sup>(9)</sup>등을 들 수 있다. 이 외에도 각 공급회사마다 등급이 다른 각 고분자재료의 표준화와 실용적이고 정확한 공업용데이터의 확보와 데이터베이스의 확립이 시급한 실정이다. 또한 이 데이터베이스를 바탕으로 각종 부품을 설계하며 적합한 성형방법과 가공조건의 선택 및 설계를 효율적으로 수행할 수 있는 각종 소프트웨어(software)와 전문가 시스템(expert system)의 개발과 더불어 고급인력의 확보도 시급한 문제의 하나이다.

## 2.2 복합재료의 가공

### (1) 사출성형(injection molding)

단섬유보강 복합재료(short fiber reinforced composite)나 입자형태의 충전제(filler)가 함유된 복합재료도 사출성형이 가능하며, 모체가 열가소성 고분자인 복합재료는 금형의 냉각이

필요하고, 모체가 열경화성고분자인 경우는 금형의 가열이 필요하다. 열가소성수지의 사출성형시와 같이 수지의 수축현상에 의한 문제점들이 존재하며 보강재와 모체의 수축율 차이에 의하여 야기되는 잔류응력이나 균열같은 결함(defect)등을 완전히 제거하기 어려운 문제가 있다. 표면의 질이 좋은 단섬유보강 복합재료의 성형이 가장 큰 난제 중의 하나이며 사출시 섬유의 파손 및 바람직하지 못한 배열 등도 해결되어야 한다.

### (2) 압축성형 (compression molding)

가열되어 있는 금형내부에 예비혼합물(preform)을 올려놓고 압축시켜 가공하는 방법으로 비교적 대형 부품의 생산에도 적합하다. 열가소성 모체의 사용시는 냉각장치가 필요하나 열경화성 모체의 경우에는 필요없다. 유동시 섬유의 배열과 모체로부터의 분리현상등이 문제가 되며, 높은 정밀도를 얻지 못하는 단점이 있다. 예비혼합물로는 SMC(sheet molding compound)와 BMC(bulk molding compound)등이 일반적으로 자주 사용된다.

### (3) 전달성형 (transfer molding)

복합재료의 예비혼합물을 미리 가열하여 유동이 가능하게 된 다음 금형 내부로 스프루(sprue)와 러너(runner)를 통하여 전달시켜 경화시키는 방법으로 금형내의 압력은 사출성형보다 낮으나 장비의 비용은 저렴하다. 압축성형과 사출성형의 중간 형태로 생각할 수 있으나 압축성형보다는 정밀도가 높고, 스프루나 러너로 낭비되는 양이 많다.

### (4) 수지전달성형 (resin transfer molding)

보강재가 이미 배치되어 있는 금형 내부로 수지만을 사출시켜 충전시킨 후 고온 또는 실온의 금형내에서 경화시키는 성형방법으로 장섬유가 보강된 대형복합재료 부품의 제조에 편리하다.

### (5) 반응사출성형 (reaction injection molding)

고분자의 원료인 단분자(monomer)를 노즐을 통하여 분사시켜 난류를 이용하여 혼합된 후 금형내부로 사출시켜 경화시키는 성형방법

으로 주로 폴리우레탄(polyurethane)과 나일론(nylon)의 가공에 사용되며 그 응용은 광범위하다. 단섬유를 각각의 단분자와 혼합하여 분사시키는 RRIM(reinforced RIM)을 이용하여 단섬유가 보강된 복합재료를 가공하며, 표면조로, 생산속도, 금형으로부터의 분리(release)등이 개선되어야 할 문제이다.

### (6) 블리이더 적층성형 (bleeder ply molding)

장섬유보강 복합재료(continuous fiber reinforced composite)의 성형에 널리 이용되며, 특히 탄소섬유 복합재료의 성형에 대표적인 가공공정이다. 일반적으로 프리프레그(prepreg)를 금형위에 적층시킨 후 압력솥(autoclave)안에서 진공주머니(vacuum bag)를 이용하여 기포 등을 제거하고 각 적층판의 압착을 유도한다. 고질의 프리프레그 공급이 요구되며, 적절한 압착을 획득함과 동시에 경화기간을 최소화할 수 있는 최적성형조건의 결정이 중요하다. 최종부품에 적합한 기계적성질을 부여할 수 있는 적층판의 구조를 예측하여야 하는 문제가 있다.

### (7) 끌어당김성형 (pultrusion)

열경화성수지에 함침시킨 장섬유를 일정한 단면을 갖는 금형을 통하여 잡아당겨 가열된 금형 속에서 경화시켜 막대나 패널모양의 제품을 생산하는 기술로서 가공에 필요한 힘의 예측이나 금형내부에서의 경화도(degree of cure) 및 온도변화의 해석 등 많은 연구가 필요하다.

### (8) 필라멘트 와인딩 (filament winding)

수지에 함침된 섬유를 굴대(mandrel) 위에 미리 계획된 방향으로 감아서 경화시킨 후 굴대를 제거하면 전체가 한 다발의 섬유로 이루어진 부품을 생산할 수 있다. 굴대의 설계와 제작에 소요되는 시간이 길며 완성품의 기계적 거동에 대한 정확한 해석이 어려운 등의 문제점이 있다.

### (9) 수작업 (hand lay-up and spray-up)

제작된 대형 금형 위에 브러시(brush)를 이용하여 수지와 섬유를 입히거나 수지 및 섬유

를 동시에 분무하여 대형의 보우트나 육조 등을 생산하는 방법으로, 인건비가 많이 들며 제작속도가 늦고 작업자의 안전관리 등에 문제가 있다.

복합재료의 대부분이 많은 노동력이나 시간을 요하므로 생산주기의 단축 및 자동화가 절실히 요구된다. 특히 프리프레그 적층작업의 자동화나 필라멘트 와인딩의 고속화에 의한 생산기간의 단축효과는 매우 클 것이다. 복합재료의 경우 여러물질이 혼합되어 있고 각각의 열팽창계수가 다르므로 불균일한 수축현상 때문에 표면조도가 좋지 않고 잔류응력도 발생하며 내부에도 미세균열(microcrack)이나 공동<sup>(10,11)</sup>이 생기는 문제가 있다. 대형 부품인 경우에도 수축현상으로 인한 휨(warping)이나 표면이 울퉁불퉁해 지는 문제가 있다. 대형물체인 경우 금형으로부터의 분리와 운반(handling)의 문제 및 제조기간의 단축 등 개선할 점이 많다. 고열에 강한 복합재료의 개발, 여러 가지 첨가제의 개발과 저밀도 보강재의 개발 등도 시급하다.

### 3. 고분자 가공의 개선방향

머리말에서 지적한 바와 같이 세가지의 생산요소인 재료, 장비, 인력의 관점에서 고분자 가공기술의 개선책을 고려할 수 있다. 물론 세 분야가 독립적으로 개선되는 것보다 서로 적절한 조화를 이루며 진전되었을 때 진정한 기술혁신이 가능하다.

#### 3.1 재료

재료분야의 궁극적인 목표는 탄성계수, 강도, 인성, 충격강도가 높으며 고온에서 사용가능하고 유동성이 우수하여 가공이 용이하며 가격이 저렴한 고분자재료의 개발에 있다. 이러한 새로운 고분자의 합성이외에도 현존하는 공업용고분자(engineering plastic)에 대한 정확한 이해와 이 소재들을 이용한 고분자 합금의 개발도 중요하다<sup>(12~14)</sup>. 대표적인 고분자재료인

PC(poly carbonate), POM(poly oxymethylene), PPS(poly phenylene sulfide), PEEK(poly ether ether ketone), PAI(poly amide-imide), 액정고분자(LCP) 등의 공학적인 성질을 실제응용에 맞도록 측정하고 그 데이터베이스를 완성하여 설계에 활용하도록 하여야 한다. 또한 같은 고분자에서도 분자량의 변화나 가공방법에 따라 그 성질이 다르므로 품질의 표준화가 절실하며, 엄격한 품질조정을 통하여 일관성있는 고분자의 공급이 이루어지도록 하는 것이 중요하다. 복합재료의 더욱 광범위한 응용을 위하여서는 난연성첨가제, 충격강도 수정첨가제, 결합제(coupling agent), 내부윤활제(internal lubricant) 등의 개발과 저밀도 보강제와 충전제의 개발이 시급하다. 복합재료도 고분자재료와 같이 생산업체마다 다른 등급과 종류를 판매하므로 복합재료의 표준화도 반드시 이루어져야 한다.

#### 3.2 장비

가공장비의 고도화 및 자동화에 의한 생산속도와 정밀성 향상이 가장 중요한 과제이다. 예를 들면 수축이나 휨 또는 잔류응력을 완전히 제거할 수 있는 혁신적인 사출기의 개발이나 인공지능을 이용하여 사출금형을 가공할 수 있는 전문가 시스템의 개발, 또는 고질의 표면을 갖는 대형패널을 생산할 수 있는 반응사출성형이나 압축성형 등의 개발이다. 물론 이를 뒷받침하는 소재의 공급도 필수적이다. 역시 장비에 있어서도 표준화가 시급하다. 성형기계와 금형설계 및 부대장비의 표준화로 장비 선택시의 어려움을 제거하고 생산성향상에 기여할 수 있다.

#### 3.3 인력

마지막으로 잘 훈련된 고급인력의 양성이 요구된다. 순수고분자와 고분자 합금 그리고 복합재료들의 무한한 가능성과 각 재료의 응용한계성을 정확히 인식하고, 각 기계요소나 제품의 설계를 효율적으로 수행할 수 있는 창의적

인 인력의 양성과 최종제품의 정밀도 및 기계적 성질을 예측할 수 있는 소프트웨어의 개발<sup>(15-17)</sup>이 필요하다. 각 대학은 기본적인 공학 재료로서의 고분자재료의 특성과 가공기술에 대한 교과목을 개설 제공함으로써, 최종제품 및 가공공정을 설계할 수 있는 인력양성에 노력하여야 한다.

#### 4. 맺 음 말

고분자 및 복합재료 성형기술의 향상은 다른 재료의 생산기술에서 요구되는 것과 같이 고정밀도를 성취하기 위한 기술, 전산기를 이용한 가공공정의 자동화, 풍부한 데이터베이스 및 소프트웨어의 개발, 재료 및 성형장비의 표준화, 고급인력의 양성 등이 절대적인 필수조건이다. 필자는 아직 국내의 사정에 익숙하지 못해서 여러면에서 부족한 국내의 산업수준을 고려할 때 국내의 고분자관련산업도 많은 발전을 요구한다고 판단된다. 자동차, 전기전자, 우주항공 등 첨단산업으로부터 장난감, 스포츠용품까지 널리 사용되는 고분자 재료의 가공기술 개발에 과감한 투자를 하여야 할 것으로 확신한다.

#### 참 고 문 헌

- (1) V. Wigotsky, 1985, "Plastics Engineering", Oct. pp. 27~35.
- (2) D. F. Kates, 1988, "Plastics Engineering", Apr. pp. 37~41.
- (3) R. S. Spencer and G. D. Gilmore, 1950, J. Appl. Phys., Vol. 21, pp. 523~526.
- (4) R. G. Treuting and W. T. Read, Jr., 1951, J. Appl. Phys., Vol. 22, pp. 130~134.
- (5) Z. Tadmor, 1974, J. Appl. Polym. Sci., Vol. 18, 1753~1772.
- (6) L. Hoare and D. Hall, 1977, Polym. Eng. Sci., Vol. 17, pp. 204~212.
- (7) W. Dietz, J. L. White, and E. S. Clark, 1978, Polym. Eng. Sci., Vol. 18, pp. 273~281.
- (8) A. Redner, 1987, "Plastics Engineering", Feb. pp. 37~39.
- (9) R. Boukili, R. Gauvin, and B. Fisa, 1987, "Plastics Engineering", Nov. pp. 37~39.
- (10) L. J. Broutman and R. H. Krock, 1967, "Modern Composite Materials", Addison-Wesley.
- (11) L. J. Broutman and R. H. Krock, 1974, Composite Materials, "Fracture and Fatigue", Academic Press, Vol. 5.
- (12) D. Klemperer and K. C. Frisch, 1983, "Polymer Alloys III", Plenum Press.
- (13) V. Wigotsky, 1986, "Plastics Engineering", July. pp. 19~29.
- (14) M. C. Schwars, H. Keskkula, J. W. Barlow, and D. R. Paul, 1988, J. Appl. Polym. Sci., Vol. 35, pp. 653~677.
- (15) C. A. Hieber and S. F. Shen, 1980, J. Non-Newtonian, Fluid Mech., Vol. 7, pp. 1~32.
- (16) C. L. Tucker and F. Folgar, 1983, Polym. Eng. Sci., Vol. 23, pp. 69~73.
- (17) C-C. Lee, F. Folgar, and C. L. Tucker, 1984, ASME J. Eng. Ind., Vol. 106, pp. 114~125.

