

産業體에서의 고분자 工程연구

玄 健 燮

(美 다우케미컬사 선임연구부장)



고분자수지를 생산하는 화학회사에서의 공정관계 연구과제들은 통례적으로 생산기술 개선과 개발에 중점을 두어왔다. 연구활동의 주목적은 생산가격을 내리고 수지의 품질을 높이며 수지물성의 균일성을 얻는 데 있었다. 근래에는 이보다 더 나아가서 고분자수지 수요고객의 공장에 있는 가공기계내에서 고분자수지가 어떻게 처리(process)되는지를 알아야 할 필요가 생겼다. 그래서 수지생산회사는 가공기계내에서 자기회사의 수지가 어떻게 처리되는가의 기본적인 연구를 하게 되었다. 그 이유는 같은 수지라 할지라도 각 고객의 공장에서 압출하거나 사출성형할 때에 품질이 다양한 제품들을 가공하는 경우가 많기 때문이다. 근본적 이유는 고객들이 사용하고 있는 압출기나 사출성형기가 여러 종류이고 기계제작회사도 다르기 때문에 성능도 다르고 성형공정 조건자체도 최적화가 되어있지 않은 형편이기 때문이다. 일반적으로 고객의 공정상문제는 수지생산공급자가 지도해결해주게 되고 고객들에 대한 기술지도능력은 경쟁이 치열한 국제시장권에서 판매되는 수지가치를 부가해 주는 것이다. 기계제작회사들도 종종 공정문제 해결에 도움을 주기도 한다.

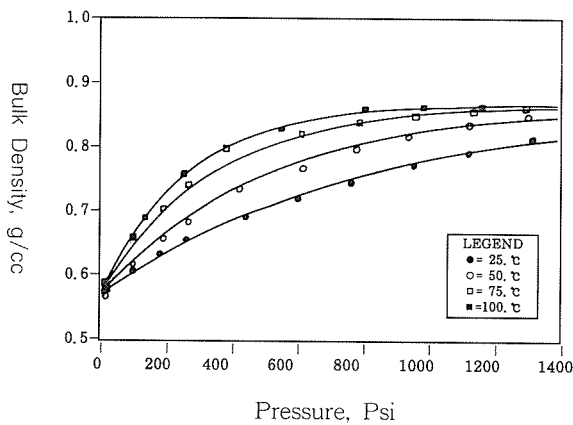
주로 생산공장에서나 고객의 공장에서의 공정상의 문제가 산업체기술연구사업의 주제가 되고 연구과제의 방향을 정해 준다. 문제가 주로 되고 있는 것은 고분자물질의 용융온도가 압출기와 사출성형기를 적절히 운전하는 데 적합하지 않거나 압출기 압출량이 주기적으로 변한다던가 고분자가 부분적으로 분해되어 그 특성을 잃는 데 있다. 많은 경우에 고객의 공정문제를 수학적 모델을 사용, 수치적으로 계산을 해서 풀어주게 된다. 이렇게 고분자수지공정의 수치해석을 하기 위해서는 고분자수지의 물리적 성질의 자료를 완성해야 하고 또한 수학적 모델을 개발해야 하며, 실험적으로 모델의 정확성을 확인해야 하고 이러한 공정을 지배하는 기본원리원칙을 이해습득해야 한다. 그렇지만 어떤 경우라도 생산공정에서 실제로 일어나는 자료가 있는데 이들 이론이나 수치계산만으로 대처하려면 큰 실수가 될 수 있다.

그러면 이 논문에서 산업체에서의 고분자공정연구의 전반적 상황을 검토해보고, 본인이 근무하는 다우(Dow)회사에서 사용하고 있는 Polymer Processing Technology팀의 개념을 소개하며 이와 동시에 미국과 유럽의 대학연구소에서 진행되고 있는 산학공동연구 상황을 소개해 보겠다.

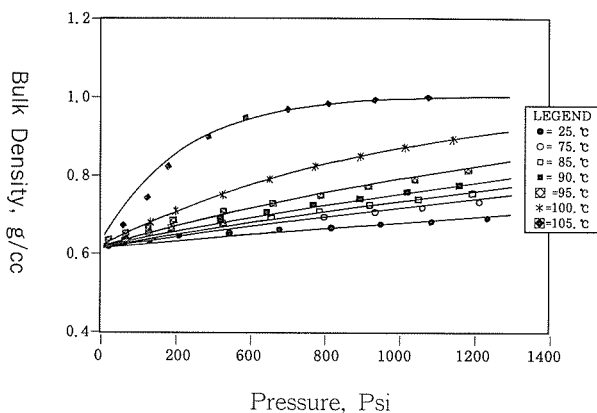
산학공동연구사업에 참여함은 회사가 개별적으로 연구활동을 수행하는 것보다 여러 모로 이점이 많다. 다만 산학공동연구활동의 결과를 자기회사의 보다 구체적인 공정문제해결에 신속히 응용할 수 있는 능력을 갖추고 있어야 이 연구방식의 이점을 최대한 살릴 수 있게 된다.

지난 5월말에 미국 오하이오주 Edison Polymer Innovation Corporation(EPIC)에서 연구비를 지원하는 산업체회원대표들이 회의를 갖고 각 회원사들이 고분자공정연구의 중요한 주제들을 제시하도록 했다. 여기에서 64개의 연구과제가 제출되었는데 그 전부가 고분자가공기계들과 관련되어 있다. 그러므로 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 기계의 기능을 알아야 하고 기계내에서의 수지의 용융상태, 물리적 유동상태 등 제반 현상을 이해하여야 한다. 압출기나

〈제1도〉 Solid Bulk Density Low Density Polyethylene



〈제2도〉 Solid Bulk Density Polystyrene Resin



Banbury Mixer 및 다른 기계내의 Melting Mechanism을 이론적으로 분석하기 위해서는 처리되는 수지의 물성을 우선 알아야 한다. Polymer Blend인 경우 Blend자체의 물성외에도 각 개별조성고분자들의 물성도 알아야 한다. 그런데 EPIC회의에서 제시된 연구과제가 스티렌스공과대학내에 있는 Polymer Processing Institute(PPI)에서 3년전에 시작한 Polymer Mixing Study라는 산학공동연구과정에서 연구된 문제와 비슷한 것이 많이 있다. 이미 3년간 연구과정을 마치고 제2차 공동연구로 발전이 되어 계속 연구가 진행되고 있다.

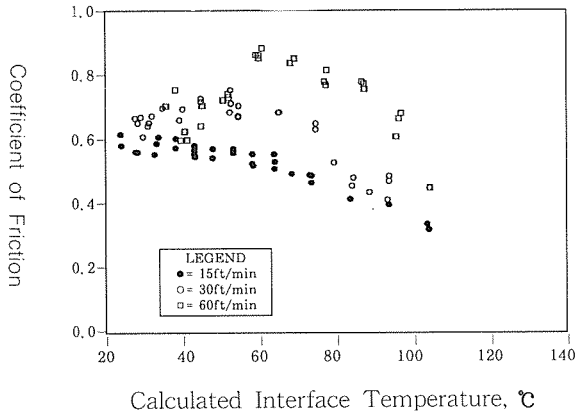
또한 몇년전 미국국립표준기술연구원 (National Institute of Standards and Technology 짧게 해서 NIST)에서 산업계의 고분자 생산공정연구관계 과학기술자를 모아놓고 산업체에서 가장 중요한 공정상의 문제점이 무엇인가를 물어본 적이 있다. 그 결과로서, 유동고분자 용융물질의 전단능력과 온도를 In-line으로 측정할 수 있다면 현재의 기술개발뿐 아니라 미래의 공정방법으로 예기되는 Intelligent Polymer Processing 개념개발에 매우 중요한 요소가 될 것이라는 결론을 내렸다.

고분자공정 및 플라스틱제품 가공분

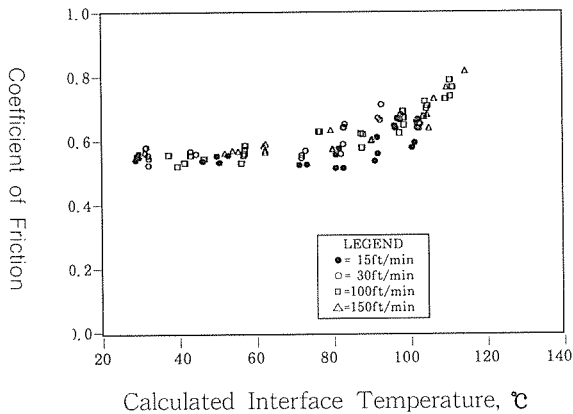
야에서 고분자의 물리적 특성을 측정하는 것이 공정연구를 한다던가 고객의 공정문제를 해결하기 위한 첫 단계라 하겠다. 즉, 동마찰계수(Coefficients of Dynamic Friction), Bulk Density, 비열, 유리화 전이온도, 용점, 용해열, 열전도도, 용융점도 등의 물성을 온도, 압력, 또는 다른 인자의 함수로 측정하는 것이다. 현재 압출기의 수지공급부(Feed Section) 내의 고체공급기구(Solid Conveying Mechanism)의 가장 보편화된 이론은 1956년에 발표된 다넬 몰(Damell-Mol)이론이라 하겠다. 이는 압출기 각 부분의 공정기구중 가장 간단하고 보편화된 이론이면서도 40년동안 아직도 그 이론을 과학적으로 적절히 증명할 수 없었다. 그 이유는 첫째, Bulk Density와 동마찰계수가 일정하다고 가정하였으나 실제로는 이 두 물성들이 온도와 압력에 따라 변화한다는 것이고 둘째, 동마찰계수를 정확하게 측정할 수 없었기 때문이었다. 그런데 고체공급론은 동마찰계수의 정밀도에 의존하게 되는데 동마찰계수는 실험적으로 측정하기도 어려울 뿐 아니라 측정치를 정확히 해석하기에도 어려움이 있었다. 더욱 Bulk Density자체도 온도와 압력에 따라 변하기 때문에 유리화 전이온도가 높은 비정형고분자 수지에는 이 고정치가정이 적용이 될지 몰라도 유리화 전이온도가 상온이 아닌 경우에는 이 이론을 그대로 적용하기 곤란하게 된다. 예를 들어서 제1도에서 보이는 것같이 폴리에틸렌의 Bulk Density는 온도의 증가에 따라 일정하게 변화하지만 제2도에 예시된 폴리스티렌의 경우 Bulk Density의 압력의존성은 유리화 전이온도에 접근해야만 커진다는 것을 볼 수 있다.

단축압출기의 공급부분에 있어서 압력을 증대시키고 고분자열분해 등에 큰

〈제3도〉 Coefficient of Dynamic Friction Low Density Polyethylene 100 psi



〈제4도〉 Coefficient of Dynamic Friction Polystyrene Resin 100 psi



영향을 주는 인자는 동마찰계수이다. 이것은 단순히 수치를 용해해서 압출하거나 사출하는 경우 모두에 적용된다. 그렇지만 앞서 언급한 바와 같이 마찰계수는 측정하기도 어렵고 측정치를 분석해서 정확한 수치를 얻기도 어렵다. 왜냐하면 마찰로 인한 열발생량은 마찰계수와 적하압력 및 서로 접촉하여 움직이는 접촉면의 속도에 비례하여 증가하기 때문이다. 실험중에 그 온도를 일정하게 유지하려고 하나 실제접촉면의 온도는 마찰열 때문에 증가하게 되며, 실제 표면온도는 수치해석방법에 의해 계산이 가능하다. 폴리에틸렌의 동마찰계

수는 제3도에 볼 수 있듯이 압력, 온도, 회전속도와의 복잡한 함수관계를 갖고 있다. 한편 폴리스티렌의 동마찰계수는 제4도에 보이듯이 전혀 다른 성격을 띄고 있다. 마찰계수의 압력, 온도, 속도의 관련성은 실험기구의 원리와 계산방법을 이해습득하지 않고서는 분리할 수가 없다. 또한 마찰계수의 함수성과 용해과정에 있어서 공급부분과의 연관성은 이미 논의된 바가 있다.

통상 고분자공정에 있어서 가장 중요한 과제는 물리적 특성인 용융점도를 측정하고 이를 정확히 분석하는 데 있었다. 아직도 용융점도는 여전히 중요한

물성이며 이를 측정하는 여러 가지의 방법은 이미 문헌에 많이 기술되어 있다. 소형압출기에 Slit Die를 첨부하여 용융정도를 측정하면 내열성이 약한 고분자수지도 열분해없이 처리할 수 있다. 또한 Pressure Transducers를 Slit Die벽에 설치 Pressure Drop을 계산함으로써 Bagley and Correction을 할 필요가 없게 된다.

많은 산업체의 연구활동은 고분자공정기계내에서 일어나는 물리적 현상을 이해하려는 데 초점을 두고 있다. 기본원리를 완전히 이해하게 되면 새로운 공정을 개발하는 시간을 비교할 수 없을 만큼 단축시킬 수 있는 것이다. 고객의 문제도 쉽게 진단 해결할 수가 있고, 또한 공정에 대한 부가적 설명을 제시할 수 있다. 예를 들면 공압출(Coextrusion)에 있어 층후분포(Layer Thickness Distribution)는 각 층에 있는 각 수지의 점도의 차이로 이루어진다고 가정되어 왔다. 다시 말해서 2층공압출에 있어서 각 층의 점도가 같지 않을 때 각 층의 두께가 다르게 된다는 뜻이다. 최근에 같은 수지라 해도 Flow Channel의 기하학(geometry)자체가 공층의 재분배를 일으킨다는 것이 발견되었다. 이러한 새로운 실험결과를 이해하기 위하여 많은 연구가 계속될 것이다.

2축압출기, 혼합작용, 그리고 2축압출기의 screw설계분야에도 많은 연구가 진행되고 있다. 2축압출기 screw설계와 운전조건을 개선함으로써 고성능고분자 Blends의 물성을 상실치 않고 개발할 수 있다. 그러므로 보다 나은 기계설계와 혼합작용 추진방법을 이해하는 것이 고분자공정분야에서 중요한 일이라 하겠다.

압출기의 수치해석 모델은 새로운 공정설계, 최적공정조건을 찾고 문제해결에 많이 사용되며, 공정원리를 이해습득

하는 데 크나큰 도움이 된다. 그러나 대부분의 모델들이 사용하기에 복잡하고 사용하더라도 믿을 수 있는 물리적 특성데이터베이스가 필요하고 어느 경우에는 소량의 실험치도 필요로 한다. 정확한 물성수치가 없이 모델을 사용했을 때에 정확하지 못한 결론을 내어 고객에게 큰 손해를 끼치게 할 수도 있다.

산업체연구방향은 고객이 수지를 사용할 때 일어나는 공정문제해결을 위해 공정에 필요한 지식을 습득하는 데 중점을 둔다. 많은 경우에 수치모델이 사용되고 새로운 문제가 생길 때마다 계속 새로운 모델이 개발된다. 최근에 발표된 실험결과로 확인된 수치해석 모델들은 단축압출기분석, Die Flow분석 2축 압출기연구, 온도측정에 관한 연구를 들 수 있다. 압출기와 Die Flow문제를 분석 및 해석하는 데 쓸 수 있는 소프트웨어 패키지가 상품화하여 산업계에 판매되고 있다.

산업체연구는 학문적 연구와는 달리 실제적 문제를 해결해야 한다. 즉, 어떤 물리적 현상의 경향(Trend)만 예측하는 것만으로는 불충분하다. 대부분 기초적 연구가 학문적으로 치우칠 경향이 있으므로 많은 경우 이에 대한 타당성 검토가 요구된다. 기초연구의 타당성은 기초연구의 결과를 어떻게 적절히 사용하여 고객의 문제를 해결했느냐에 있겠으나 실제 그 가치를 산출하기가 어렵다.

고객의 문제가 압출기 기초기술을 사용 새로 도안 제작한 사출성형기의 screw로 해결되어 연간 거액의 생산비를 절약했다면 이는 분명히 (1)현재 기존사업을 유지하고, (2)새로운 사업을 더 할 수 있고, (3)고객의 생산단가를 저하시켰으니 기초연구의 열매가 맺어 생산수지에 부가가치를 더한 것과 다름이 없다.

현재 기존하고 있는 기술을 촉진시켜 보려는 기초연구가 단축압출기분야에 활발하다. 예를 들면 압출기와 기어펌프를 겸용하여 압출물의 온도를 내리면서 압출량을 올리는 것이다. 이 경우에 압출기는 고분자수지를 용융시키는 데 사용되고 Die pressure는 기어펌프를 사용 극복하는 것이다. 이로 인한 이점은 소규모투자로 기어펌프를 구입 압출량(생산량)증가의 큰 혜택을 보게 되는 것이다. 가공하기 어려운 PVDC수지의 High Rate Extrusion을 연구한 논문, Extrusion Coating용 수치개발을 위해 시행한 연구 등의 현존 공정기술의 한계를 넘긴 예라 하겠다. 현존 공정기술을 촉진, 신기술을 개발하는 데 산학공동연구가 주요역할을 하고 있다.

산업체에서 후원하는 대학에서의 산학공동연구는 고분자공정기술을 정립하는데 크나큰 역할을 한다. 많은 경우 다우는 연구과제를 대학이나 정부출연연구소와 공동연구로 연결시켜 정하게 된다.

Clarkson대학에서는 Campbell교수팀이 압출기내의 공급부에서 screw flight edge의 역할을 연구하고 있다. Campbell 교수는 Flight edge가 고체입자의 유동의 원인이라고 가정하고 있다. 현재 우리가 수렴하고 있는 가설은 Flight는 유동고체입자나 용융수지의 칸막이로만 취급한다. 그의 가정이 옳다고 실험적으로 증명이 되면 여지껏 생각했던 유동성분포가 복잡하게 되면서 혼합공정도 많은 변화를 초래할 것이다.

Teledo대학의 고분자연구소에서는 Extrusor라는 새로운 압출기에 관해 연구하며 이의 상업화를 시도하고 있다. Extrusor는 새로운 공정원리를 이용한 압출기의 한 종류로 전기가열기를 사용해서 고분자수지를 용융시키는 방법을 사용한다. 이 기계는 특정한 응용부분

(예: wire coating)에서 범용성 압출기를 대체할 수 있을 것이다. Extrusor는 길이가 직경의 약 10배정도 짧은 screw부분이 있어 pellet와 powder를 공급하면서 상당한 압력을 발생시킨다. 이 공급부에서 고분자수지는 약 10%정도밖에 용융하지 않는다. 일단 가압된 고체물질은 annular melting chamber를 통과하면서 열전도에 의해서 용해하게 되는 것이다. 이 열전도부분에는 원통형 Barrel내에 Torpedo가 중앙에 고정되어 있어 annular space를 마련한다.

다우의 compounding연구의 목적은 compounding에 있어서 기본적인 상호반응 mechanism과 morphology, rheology와 제반조건의 상호관계를 습득하고 이해하는 데 있다. 우리는 두가지 방법을 채택하였다. (1)최신기술을 이용할 수 있는 능력을 양성해서 다우의 특정한 생산공정의 요구를 충족시키는 반면에, (2) Polymer mixing의 기본적 mechanism과 그에 따른 근본원리의 추구는 산학공동연구 프로그램에 참여하여 성취하도록 한 것이다. 약3년전에 다우는 메릴랜드대학의 Mixing Program과 PPI의 Polymer Mixing Study Program에 참여했다. 메릴랜드대학 프로그램의 목적은 mixing을 어느정도 성취하는가를 기준해서 2축압출기의 성능을 평가하는 데 사용하고자 해서 혼합도(Degree of Mixing)를 정의하는 등 혼합유동성 등 많은 연구결과가 나와 지난 3년간 세계적으로 학회 등을 통해 발표가 되었다. 이 프로그램에는 5개회사가 참여했다. 참여회원회사는 논문발표 6개월전에 연구결과를 3분기 보고회의때 알게 되고 대학원학생들과 직접 상호연락할 수 있는 이점이 있고 이로써 회사원 고용에도 도움이 된 바 있다. PPI의 프로그램은 기초기술을 개발하여 Mixing과정에서

일어나는 복잡한 기계내의 유동현상을 수치적으로 해석할 뿐 아니라 실험을 통해서 특수한 지식을 습득하여 산업계 중요고분자 Blends나 충전고분자소재(Filled Polymer Materials)를 생산하는데 응용할 수 있도록 하는 데 목적을 두었다. 22개의 회사가 참여하여 연 50만불 이상의 기금으로 공동연구가 시행되고 있다. 이미 제1차로 지난 3년간 연구결과를 매년 2번씩 보고되었고 제2차 프로그램에 들어가서 제1차 연구결과를 실제적으로 응용하는 데 중점을 두게 된다. 이 프로그램의 결과도 회원회사에 1년간의 우선권을 주고 학회에 발표된다. 이로 볼 때 얼마나 미국의 기술개발이 급속도로 진행되고 있다는 것을 알 수 있고 6개월 내지 1년면저 최신기술을 습득함으로써 세계적 경쟁에서 앞설 수 있다는 산 증거가 되는 것이다.

다우는 작년에 미국표준기술연구원(NIST)에서 개시한 「고분자공정에서 필요한 측정방법에 관한 공동연구」프로그램에 참여하여 이미 새로 배운 측정방법을 다우 자체연구활동에 사용하고 있다. 이 공동연구의 목적은 광학적 측정방법을 써서 고분자공정해석에 중요한 인자를 측정하는 In-line측정기술을 개발하는 데 있다. 이 계획의 요점은 형광성 발생염색소재를 사용해서 유동하는 고분자용융물의 온도나 전단계수를 측정하는데 있다. 이 방법을 사용하여 실제적 공정문제를 해결한 예도 들 수 있다.

다우는 세계제일로 손꼽는 고분자수지생산회사이다. 가장 생산량이 큰 STYRON폴리스틸렌, 다우폴리에틸렌의 범용성 유연성고분자수지로부터 특수기능성고분자수지인 MAGNUM ABS와 CALIBRE폴리카보네이트까지 가장 광범위한 수지류를 생산하고 있다. 이러한 고분자수지원료물질은 2축압출기, 단축

압출기 및 사출성형기를 통하여 고체물질에서 용융수지로 처리가 된다. 용융수지는 Sheet나 Film dies를 통해서나 공압출 FeedBlock 및 이와 연결된 coat-hanger나 T-die를 통해서 Sheet나 Film으로 가공이 된다. 이렇게 만들어진 Sheet는 후에 열성형(Thermofoming)을 하여 여러 가지 제품으로 생산된다. 사출성형시는 적절한 금형에 용융수지를 Nozzle을 통과 사출하여 성형 제품화된다. 다우생산수지의 절반이 사출성형, 절반이 압출분야에 판매된다. 이렇게 광범위한 고분자수지를 다양한 응용분야에 판매하므로 당연히 공정상의 고분자용융수지유동관계를 연구하게 된다. 이러한 공통적 공정기본원리연구를 인정해서 각 수지개발연구부에서 각기 공정연구를 하는 대신에 연산 70년 이상의 공정연구경험이 있는 과학기술자 4명을 선정하여 Polymer Processing Technology(PPT)팀을 6년전에 형성해서 상술한 연구활동을 하여 다우 고객의 공정문제를 해결했을 뿐 아니라 다우회사내에서도 수많은 문제를 해결하였다. 이 팀원들은 개인별로 주요 공정기술분야의 한 분야씩 책임지고 타 분야에는 상호부조하기로 되어있다. 가장 노련한 선임과학자가 팀을 인도하고 다른 연구팀과의 상호연락관계를 조정관리한다. PPT팀의 임무는 Dow Plastics R&D의 다른 팀과 협동작업(Teamwork)을 통해서 고분자공정기술의 기초지식을 개발하고 이를 적절히 응용하는 데 있다. 그래서 이 팀은 각 플라스틱 연구개발부에서 후원을 받아 다우 플라스틱(Dow Plastics)전체를 위해서 연구를 하고 있다. 작년에는 다우유럽에 PPT팀을 조직 공정연구의 세계화를 추진하고 있다. 그러므로 이 PPT팀은 전세계에서 수행되고 있는 고분자공정연구에 정통을 추구하고 있

다. 이 팀은 미국의 대학과 계속적으로 연락을 하면서 우호관계를 유지하며 나아가 독일의 유명대학연구소와도 관계를 맺고 있다. 예를 들어 독일의 아헨에 있는 IKV(Institut für Kunststoffverarbeitung)와 파테르보른대학의 포텐데교수팀이 있다. IKV나 KTP(Kunststofftechnologie Paderborn)프로그램은 독일의 고분자수지생산회사와 기계제작회사들이 회원이 되어 산학공동연구체를 형성하여 연구가 진행되고 있다. 다우의 PPT팀은 상술한 방법으로 연구에 종사하고 고분자공정분야에 종사하는 대학교수나 연구원들과 개인접촉이나 학회활동을 통해서 연락망을 유지하고 자문협약이나 공동연구에 참여 밀접한 관계를 유지하고 있다.

산업체의 고분자공정연구는 가공기계내에서 일어나는 물리적 현상을 이해하는 데만 있는 것이 아니라 공정조건을 최적화함으로써 고분자수지의 생산성을 높이고 고객의 공장에서 수지를 가공함에 있어서도 생산성을 증가시키는 데 목표를 두어 수지에 가치를 부가시킨다.

산업체공정연구 초점은: (1)물리적 특성의 적절한 규정: 용융점도, Bulk Density 등 마찰계수, 기타 열적 성질 등을 정확히 측정한다. (2)수치적 모델개발과 실험결과를 종합하여 문제해결시간을 단축한다. (3)산학공동연구에 참여 그 결과를 효율적으로 응용하여 공정연구에 최대의 효과를 올리도록 한다.

계획의 가치판단은 (1)기존사업을 유지, 발전시키거나, (2)새로운 사업을 창출할 수 있거나, 또는 (3)생산단가절감이 가능한가 등에 기준을 두면 되겠다.

이 글은 지난 8월2일부터 14일까지 고려대에서 과총주최로 열린 '93세계 한민족과학기술자 종합학술대회 특별강연논문이다.