

고분자 과학의 개념과 혁신*

Paul J. Flory

지난 세기 동안 우리는 고분자물질의 용도가 놀랄만큼 증가된 것을 보아왔다. 오늘날, 고분자는 우리들이 당연히 필요로 하는 필수품과 사치품은 물론 의복, 주거, 통신 및 기타에 쓰이는 여러 종류의 물질들 중에서 최고의 위치를 차지하고 있다. 고분자의 중요성은 금속에 필적하여, 이미 부피로 볼 때 연간 생산량에서 금속을 능가하고 있으며, 앞으로의 성장도 계속될 것으로 여겨진다. 합성화학의 정교한 응용에 의해 얻어진 새로운 물질인 고분자들은 그 다양성에서나 전체적인 양으로 볼 때, 놀란만큼 급성장을 이루었다.

트랜지스터의 발명에서와 같이, 어떠한 획기적 변혁으로 인하여 놀랄만한 발전이 이루어진 통신술과 자료 처리 기술과는 달리 고분자 공학의 놀라운 성장은 단독으로 이루어진 발견이나 혁신에 의한 것이 아님을 알 수 있다. 새로운 과학적인 개념이나 발견으로 인하여 그 이전에는 존재하지 않았던 산업의 창조를 야기한 합성염료, 전력, 화합요법과 원자력등의 분야와는 대조적으로 고분자물은 선사시대 이전부터 사용되어 왔다. 나무나 직물로서 사용되어 온 셀룰로오스, 피혁과 양털등의 단백질, 또는 국지적으로 산출되는 천연고무와 같은 천연고분자 물질들은 태고적 부터 사용되어 왔으며, 이들의 가공 기술은 가장 오래된 것들 중의 하나로서, 장구한 세월에 걸쳐 발전해 왔다.

인간에게 유용한 물질로서 천연고분자물을 사용하는 데 있어서의 현저한 발전은 1920~30년대 Staudinger, Carothers 등 몇몇 사람들의 연구를 통하여 고분자 물질의 분자 본질이 확립되

기 오래전부터 이루어졌다. 1839년에 알려진 고무의 가황은 고무의 유용성을 크게 높였고, 이들의 대기업으로서의 기틀도 마련했다. 또 섬유나 필름형태로 성형 또는 압출 가공되기에 적합한 셀룰로오스의 화학적인 변형이 이루어져서 지난 세기 후반 동안 발전되어 왔다. 당대의 이러한 성과는 근대과학의 출현을 전, 후로 한 시기의 일이었다. 하지만 이러한 개발을 이룬 혁신자들은 아마도 그 시대에 나온 신생과학의 영향에 의해서 보다는 당시의 탐구정신에 의해 보다 더 영향을 받았던 것 같다. 그들은 자신의 노력의 대상이 매우 긴 사슬분자로 이루어진 고분자 물질이라는 것을 알지 못한 채 그들의 업적을 이루었던 것이다. 그들은 셀룰로오스나 기타 천연 고분자 물질에 대한 화학 구조 지식의 결핍 때문에 어쩔 수 없이 경험에만 의존하였으며 약간의 화학적 지식으로써 연구를 진행시켰던 것이다.

고분자물의 본질에 대한 “고분자 가설”이 일반적으로 받아들여지기 이전, 과학으로서 화학이 초기상태일 당시에 최초로 합성 고분자의 상품화가 이루어졌다. 고무가 이소프렌으로 분해될 수 있다는 것이 오래전에 알려져 있었기 때문에 이소프렌과 그의 유사물인 부타디엔으로부터 고무의 합성이 시도되었다는 것은 자연스런 일이었다. 고무의 합성이 이루어졌을 때 이 최초의 합성고무를 나타내는 화학 구조는, 당시 화학의 주류였던 비고분자물 보다 그리 크지 않은 몇 개의 단량체들이 모여서 이룬 환상화합물을 보여 주었으며, 폴리스티렌과 기타 진기한 합성물들도, 단백질이나 셀룰로오스와 유사하게 취급되었다. 세기가 바뀔 무렵, 자신이 발명한 물질의 구조를 후일에 가서야 설명할 수 있었던 화학이론이나 원리의 도움을 받지 않고도 경험적으로 열경화성수지의 분야를 개척했던 Leo H.

*본원고는 P. J. Flory 박사의 미국화학회 Perkin Medal 수상 연설문(1977), “Concept and Innovation in Polymer Science”을 번역한 것입니다. 회원 여러분에게 참고가 되었으면 감사하겠습니다. (義)

Baekeland의 천재성은 비단보다는 칭송이 되고 있다.

이러한 초기의 성과는 다음 시대의 장족의 발전과 1930년에 시작된 많은 새로운 고분자물질의 도래에 가리워져 버렸다. 고분자공학의 급속한 발전과 대부분의 고분자 산업들이 성장하게 된 것은 결코 우연한 행운이 아니었다. 우리가 고분자 과학이라 칭하는 지식체의 씨앗적인 개념의 출현 말기에 실제로 이러한 기술적 성과는 이제 막 생겨난 과학에 의해 제공된 idea와 통찰력이 없이는 이루어질 수 없었다. 몇몇 잘 알려진 일례가 이러한 것을 설명해 주고 있다.

1920년대 말기에 Wallace H. Carothers는 그의 동료 연구진들과 중합체의 조성을 문제삼지 않는 고분자물질의 합성을 연구 과제로 설정하였고, 이에 대해 이미 잘 확립되어 있던 유기화학적 방법을 이용하였다. 이렇게 하여서 합성된 물질의 성질이 그때에 분자 구조가 논란거리였던 고무, 셀룰로오즈, 전분, 단백질 및 비닐 중합체 등의 성질과 비슷하다면, 만들어진 물질 역시 중합체라고 결론지을 수 있을 것이다. 특기할 만한 사실은 계속해서 이루어진 획기적인 연구들이 지금은 고분자물로 알려진 물질들에 관한 과학적인 가설을 탐구하려는 목적으로 행하여진 것이지 새로운 물질의 발명 또는 새로운 공업을 설립하려는 의도에 의한 것은 아니었다. Carothers가 탐구하려고 설정한 가설이 옳다는 것이 확실해졌으며 이러한 노력의 결과로 축합반응과 이에 의해 합성되어 질 수 있는 물질들에 대해 많은 것을 알게 되었다. 이런 분야에서 얻어진 지식은 나일론과 폴리에스테르를 포함한 여러 선형고분자물질을 합성할 수 있도록 자극을 주었다. 나일론과 이에 뒤이은 광범위한 축중합 계열에 의해 얻어진 물질들의 상업적 개발이, 축합반응과 이에 의해서 생성된 물질들의 분자적 성질을 이해하려고 행해진 Carothers와 동료 연구원들의 연구에 의해 매우 용이하게 이루어졌다. 뒤이은 개발연구가, 축합반응에 적용되는 확실한 원리를 토대로 하여 논리적으로 행해질 수 있었으며, 이는 개발연구를 시작할 때에 과학적으로 주어진 문제에 주의와

노력을 기울인 덕택이었다. 똑같은 성과가 실험을 주르한 개발연구에 의해 나타날 수 있었는지는 매우 의심스럽다. 과학적인 이해없이 똑같은 결과를 실험적으로 얻기 위해서는 확실히 훨씬 더 광범위하고도 큰 노력이 필요했을 것이다.

오늘날 사용되고 있는 대부분의 합성고무는 현대 고분자 과학의 초창기에 개발되어진 것이다. 이들의 개발은 중합반응기구와 고분자구조에 관해 당시 점차 알려지고 있던 지식에 힘입은 바가 크며, 또한 가공가능한 고무의 제조에 방해가 되지만, 한편으로는 최종제품이 지녀야할 성질들을 완전히 실현시키기 위한 가황과정에 꼭 필요한 가교이론에서도 많은 도움을 얻었다.

제2차 세계대전 동안에 이루어진 합성고무산업의 발전은 특히 두드러졌다. 이 견줄데 없는 발전은, 절박한 때에 이끌어낸 공학기술, 경영조직 및 응용연구에 기인하여 이루어졌다. 그 과정에 참여했던 사람들은 누구나 기억하겠지만 순수, 응용 과학자들은 긴밀한 협동을 하였다. 고분자 구조의 중요한 점, 중합 반응기구, 현탁 중합의 복잡한 과정이 일어나는 매체의 콜로이드 특성에 대한 많은 생각들이 자유롭게 교환되었다.

전쟁이 낳은 긴급상태를 타개하기 위해 급하게 모아진 개념들은 다행하게도 잘 착상된 것들이어서, 확실한 근거가 있으며 유용한 것들임을 알게 되었다. 전례없이 급속했던 합성고무산업의 발전에 이들이 끼친 영향들을 평가한다는 것은 어려운 것이다. 모두들의 통찰력이 그와 같은 일을 수행하여 나아가는데 있어서 항상 일어나는 어려움들을 해결하면서 공업의 발전에 본질적인 역할을 했다는데 동의할 것으로 나는 생각한다.

그로부터 10년 후에 입체 균일성 중합체, 특히 isotactic 폴리프로필렌이 개발되었다. 이들은 올레핀을 고분자화 시키는 공정의 연구도중 아주 우연히 나타났다. 이 연구들은 1950년대에 여러 실험실에서 개별적으로 진행되었으며, 이 발견이 뜻밖의 것이었고, 특별히 원하는 특성을 가지는 결정성 중합체를 생산하기 위하여 계획된 노력의 결과로서는 아니지만, 이들 중합체의

물리적 특성을 좋게 해준 구조적 특징은 재빨리 이해되었다. 이보다 수년 전에 Staudinger 가 비닐 중합체는 분자사슬의 주쇄에서 이들 치환체가 임의로 위치하기 때문에 결정성이라기 보다는 비결정성이라고 주장했었다. 다른 사람들도 같은 견해를 표시했다. 역으로 생각하여, 단일 치환체들이 규칙적으로 할당된 위치에 놓여 질 수 있도록 정렬시킬 수 있다면, 아마도 얻어진 중합체는 결정성을 가질 것이고, 따라서 입체규칙성이 없는 무정형의 이성체와는 전연 다른 특성을 나타낼 것이다. 그래서, 초기에 Carl Schilcknecht 에 의한 비닐에테르에서, Giulio Natta 와 그의 공동실험자 등에 의한 폴리올레핀에서 결정성 비닐중합체가 우연히 만들어졌을 때, 곧 이에 대한 설명을 할 수 있었다. 그로부터 급속하게 연구가 진행되어 성형물, 섬유, 필름들을 만들기 위한 물질들이 흔하게 얻어질 수 있게 되었다.

나아가서, 최근의 예로 나는 충격에 대한 특성이 좋고 내구성이 특출한 heterophase block copolymers 에 관심을 가지고 있다. 수년 전에 용액과 melts 속에서의 고분자의 상호작용에 관한 열역학적 연구들이 화학적으로 다른 두 polymers 사이에서의 intrinsic incompatibility 를 예언, 설명했다. 하지만 hybrid block copolymer 가 한 단량체의 긴 사슬에 다른 단량체의 긴 사슬이 연결됨으로써 만들어 진다면 두 개의 다른 구성 성분의 완전한 분리는 불가능하다. 그리하여, 이들의 분결 경향은 조그맣고, 따로따로 분리된 domain 을 형성하게 된다. 이들 domain 은 필연적으로 각각의 단량체들의 blocks 와 같은 크기를 가지며 중합체의 분자크기 정도이다.

이러한 중요한 발전은 그 이전에 나온, 기초 연구들 통해 유용하게 만들어진 이론과 개념에 의해 뒷받침되었다. 이때 연구에 종사한 사람들에게는 아마도 이들의 연구에 대한 실제적 의미를 이해하지 못한 책임이 있을 수 있다. 이들의 전망에 대한 잘못이 무엇이었던지 간에 인간은 한번에 오직 한 단계씩 나아가고, 그들의 생각이 결코 다 맞을수는 없다는 것을 명심해야 한다. 기초적인 이론은 호기심과 흥미의 산물이었

다. 실제적인 응용면은 관심거리가 되지 못하였으며, 또 실제적인 면으로의 응용으로는 수많은 난관이 존재하였으나, 기술적인 면에서의 개발은 다행하게도 일찌기 그 이전에 이루어져 있던 이론들에 힘입어 용이하게 이루어 질 수 있었다.

최근 십년간에 우리는 강도에 있어 강철을 능가할 중합물질을 만들었다. 이의 밀도는 철의 1/6이지만 같은 무게에 대한 인장강도는 5배 가량 된다는 것을 보면 좋은 비교가 될 수 있을 것이다. "Kevlar"가 위의 성질을 가지는 최초로 상품화된 aramide 섬유인데 이 aramide 섬유는 한정된 유연성을 가지는 매우 펼쳐진 상태의 고분자 사슬들로 되어 있다. 용해가 되면, 이들 강직성 사슬 고분자는 anisotropic phase, 혹은 liquid crystalline domains 를 형성하고, 여기에서 고분자물은 서로 나란하게 배열된다. 이들 anisotropic 상태로부터 형성된 섬유의 특성들은 높은 정도의 질서도로 부터 기인한다.

이런 자연적으로 이루어지는 질서를 설명한 이론은 20여년 전에 세워졌다. 50년대 후반에 C. Robinson 의 α -helical polypeptides 에 대한 실험에서 펼쳐진 상태의 고분자용액 속에서 상분리 현상이 이론에 의해 예측되어진 것 처럼 증명되었다. 하지만, 실제적인 사용이 시작된 것은 비교적 최근이다. 이들 사건들의 나열은 제쳐놓고서라도, 이 발전이 그 같은 계에 의해 나타난 특이한 거동과 특성들에 대해 영향을 주는 요소와, 분자 level 에서의 형태상의 특징들의 명백한 이해 없이는 매우 곤란할 것이다. 아마도 오늘날까지의 업적조차 오직 시작에 불과한지 모른다. 기본적 원리의 응용은, 여러조건 아래서 좋은 물성이 얻어지는 고분자물질의 가능성에 전적으로 새로운 전망을 열었다.

위에서 인용한 것과 같은 몇몇 경우에 있어 창조적 마음이 혁신에 대한 능력을 사용하는데 요구되는 지식과, 개념과 각각의 본질적인 중요성을 입증했다. 중대한 발명은 우연한 일이지만 한 것은 아니다. 이 잘못된 견해가 널리 퍼져 있고 불행히도 과학사회에서 조금도 없애기 위한 노력을 하고 있지 않는 것 중의 하나이다. 우연한 일이라는 것이 작용하기는 하며, 이는 일

반적인 관념에서 보다는 발명에서 더욱 그러하지만 넓고 깊은 지식은 사실상 없어서는 안되는 것이다. 미리 이러한 준비가 되어 있지 않다면 발명에의 불꽃은 이것이 나타난다 할지라도 불을 붙일만한 어떠한 것도 갖지 못할 것이다.

물론 발명가가 잘못된 생각을 믿고도 발명을 이룬 예들도 있기는 하다. 그러나 이러한 사실들은 예외적인 것이라고 믿는다. 현재와 같은 기술수준에서 기초가 되는 원리를 확고하게 갖지 못한 발명은 점점 힘들게 되고 있다. 어림짐작의 발명이 계속해서 일어날 수는 있지만 기회는 진보된 발명가에 더욱 유리하며, 이러한 경향은 점점 증가하고 있다.

기초연구가 기술의 발전과 이들 가능성의 확대에 가장 크게 공헌을 했다는 것은 정확히 이러한 점 때문이라고 볼 수 있다. 이러한 이야기는, 기초연구의 실제적 가치가 상업화 할 수 있는 진실을 밝혀내는 데 달려 있다는 일반적인 견해와 모순된다.

기초연구에 의한 우연한 발견들은 과학자들과 대중에 의해, 기초연구의 후원에 대한 주요 평가로 널리 받아들여지고 있다. 이 견해가 받아들일 때, 과학자들은 연구후원에 대한 평가로서의 그들 연구계획에서 연구계획의 변화에 대한 가능성을 강조하기 쉽다.

예상하지 못한 채 이루어진 발견의 중요성을 부정하지 않고도, 나는 기초 연구가 지식의 진보에, 날카로운 개념들을 제공함에, 그리고 통찰력을 예리하게 함에 있어 더욱 중요한 사명을 갖고 있다고 생각한다. 이들은 넓은 분야의 혁신을 지속시켜 주는 요소들이다. 그들이 혁신적인 발견에서와 같이 주의를 끌지는 못하나, 나는 기초 연구의 명백하지 못한 듯한 공헌이 더욱 중요하다고 생각한다. 이러한 사실은 시간이 갈수록 더욱 진실이 되고 있다.

기초연구에 또 다른 밀접하게 관련된 기능이 있는데, 그들 중의 하나는 이미 위의 예에서 암시했다. 나는 이것이 실험실에서의 발단에서 부터 성공적인 상업화까지의 믿을 수 없는 길에 대해 혁신적인 생각을 발전시키는 데에 역할이 있다고 생각한다. 발명의 수행에 항상 뒤따르는

무수한 어려움의 해결에는 기술적, 과학적 지식이 제공해 줄 수 있는 최상의 것이 필요하며, 이와 같은 최상의 것에 의한 뒷받침이 없이 맹목적으로 진행하는 것은 적어도 노력을 허비하는 것이며 성공의 기회를 소멸시키는 것이다.

이와 같은 이유로서 연구를 통한 기초지식의 증진과 확장은 반드시 계속되는 기술적인 전진의 지속에 대해 필수적인 것으로 받아들여야 한다. 기초연구는, 산업기술이 발전되지 않거나, 산업기술의 경쟁자가 없을 때에도 이의 발전이 이윤 때문에 연기될 수 있는, 없어도 되는 부가물로 취급되어서는 안된다.

이런 상태에서 응용과학과 기술에서 필요로 하는 것을 제공하는 것이 순수과학의 가치라는 사실을 부인해 보자. 이것은 여기서의 관심사중의 하나이며, 다른 것들은 이 강연에서 무시하기로 한다.

“어떻게 할 것인가”라는 응용연구의 동기는, 기초연구에 동기를 주는 “왜”에 대한 관심을 위협스럽게 무시해가며 현재 강조되고 있다. 이 경향은 긴 시간의 기본적이고 탐구적인 연구가 행해지지 못하고 완전히 없어져 버린 현장의 실험실에 널리 퍼져 있다. 이는 연구를 지원하는 정부 기관들의 명령으로 되어 있고, 점점 대학에 까지 퍼져가고 있다. 교수들은 생물학적 응용, 환경문제의 해결, 혹은 현 사회가 직면하고 있는 많은 다른 문제들에 대해 연구하지 않으면 안된다고 느끼고 있다. 이들의 연구 의무는 종종 자발적이기도 하며, 연구기금과 행정적 압력이 그 요인이기도 하다. 확실히 긴급한 현존 문제들은 가장 먼저 해결되어야 한다. 그러나 대부분의 경우 그들에 대한 성공적인 해결은 관련된 분야의 과학적 기초의 확대를 요구한다. 현재의 절박한 상황은 지식의 확장만이 유용하다는 생각을 배제하지 못하도록 되어 있다.

고분자과학은 과학사회와, 공공사회에서 널리 유행하고 있는 과학적 연구에 관련되는 연구태도들에는 영향을 받지 않았다. 생물학과 공업기술에 직접 관련된 분야인 고분자과학에서는 기본적인 연구에 너무나 적은 노력이 행해지고 있다. 이것은 화학공업의 중요한 관심사임에 틀림

없다. 그들의 실험실에서 노력의 균형을 수정하는 것뿐만 아니라, 과학적 연구가 행해지고 있는 대학과 다른 공공 기관에서 이 분야에 적당한 관심을 가지도록 조장하는 것이 그들의 당면 과제이다.

미래에 대해서는 무엇이냐고 할 수 없겠지만 이제 과거의 기준들로부터 현재의 평가를 시도 할만한 것 같다. 마치 우리의 조상이 석기시대 청동기 시대를 잇달아서 지나온 것처럼, 우리는 거대분자의 시대로 들어가고 있다는 것이 Mandelkern에 의해 이야기되고 있으며 그 증거는 명백하다.

고분자에 대한 의존도가 계속 증가하리라는 것을 예견하는 것은 어려운 일이 아니다. 그러나 미래의 개발 방향을 예견하는 것은 매우 어렵다. 확실히, 우리가 독특한 성질을 나타내는 고분자물질을 개발할 가능성은 아직도 얼마든지 존재한다. 구조단위가 긴 사슬로 이루어져 있기 때문에 고분자는 분자적 구성에서 이루어 지는 수많은 변화를 화학적, 물리적, 기계적인 여러 성질에 반영하여서 물질의 종류로서 독특하고 다양한 용도를 가질 수 있게 된다.

이러한 다양성은 생물체에 있어 구조적, 화학적, 조절기능등에 이바지하고 있는 고도로 세분화된 수많은 생물 고분자들을 이루어 놓은 자연에서 잘 살펴 볼수 있다. 만약 사람들이 고분자 화학이 거의 한계점에 도달하고 있다고 결론짓

는 실수를 저지른다면, 생물고분자에 대한 대략적인 연구만으로도 아직 개발할 분야가 많다는 것을 이들에게 충분히 확신시킬 수 있다. 고분자의 설계와 합성에 있어서 자연과의 경쟁은 비길바 없는 중대한 도전이다. 비록, 이것이 우리가 결코 도달할 수 없는 목표일지라도, 이 목표에 도달하기 위한 노력은 헛되지 않을 것이다.

미래를 예견한다는 것이 상당히 위험한 일이지만, 최근에 급격히 발달된 대량 생산 그리고 다목적으로 사용될 수 있는 고분자물의 생산 방향이 아니라 오히려 특수한 목적에 필요한 고분자물의 생산의 방향으로 나아갈 것이라 기대된다. 의술에 필요한 고분자물은 이미 좋은 예증이 된다. 또 다른 예는 고온이나 저온에서 잘 견디는 고분자물을 만들어 금속을 대신해서 사용하는 것이다. 강력한 분자 사슬로 되어 있고 잘 정렬된 고분자물이 벌써 생산되고 있으며, 이들로 만들어진 섬유는 아주 우수한 강도와 내구성을 가지므로 고분자 재료의 응용에 있어서 새로운 방향을 제시했다. 이와 같은 것은 과학적 기초원리가 넓게 응용된 것을 잘 보여주고 있다.

고분자물의 재료로서의 새로운 용도는 이미 규모와 다양성 때문에 널리 사용될 가능성이 있으며, 이러한 가능성은 새로운 지식의 추구하고 이 목적을 위한 끊임없는 노력을 요구할 것이다. 이것들이 화학공업에서 진정한 관심과 지지를 요구하는 문제들이다.

플리머 技術 뉴스

美國 Union Carbide 社의 새로운 저밀도 폴리에치렌 製造工程

美國의 Union Carbide 社는 그들이 오랫동안 研究開發하여 온 폴리에치렌의 氣相重合方法의 結果로서 새로운 저밀도 폴리에치렌의 製造工程이 이미 UC 社의 Seadrift, Texas 의 工場에서 使用되고 있으며 새로운 工場이 또한 계획되고 있고 1982년까지는 年産 950millim lb 의 施設에 到達할 것이라고 發表하였다.

이 새로운 重合方法은 從來의 高溫, 高壓 (30,000~50,000 psi)의 條件으로 부터 劇적인 向上이 있는 方法으로 새로운 觸媒를 使用하여 施設投資의 50%를, 에너지所機量을 75%로 大幅經約할 수 있다고 하나 이 새 重合方法은 100~300psi, 온도 100°C 以下에서 氣相으로 重合을 進行시킨다고 한다. 工場操業의 安全度 또한 크게 向上된 이 工程은 製品의 값을 25%까지 低下시킬 것이며 公害라는 面에서도 從來의 思相變化法에 比하여 크게 向上되었다고 進하였다.

化學工程開發分野에서 1970年代의 가장 큰 發展이라고 主張되는 이 工程은 앞으로 建設되는 새로운 저밀도 폴리에치렌 工場들에 採用될 것은 勿論이며 이에 對하여 UC 社는 앞으로 必要하다면 얼마든지 licensing 契約에 依하여 技術을 供給할 계획이라고 發表하였다.

UC 社는 또한 主張하기를 이 工程은 從來의 저밀도 폴리에치렌과 性質이 同一한 製品은 勿論이며 좀더 넓은 範圍의 다른 grade 의 폴리에치렌을 製造할 수 있어 저밀도 폴리에치렌의 需要面에 있어 또한 많은 變化를 가져 올 것이라고 主張하였다.

(Chem. and Eng. News. Nov. 21, 1977)