

천연고무 생산 대체고무작물 개발현황

한국생명공학연구원 융합생물소재연구부 박종찬, 유병태

1. 개요

고무나무 *Hevea brasiliensis*에서 생산되는 천연고무 (*cis*-1,4-polyisoprene)는 합성고무로 대체 할 수 없는 전략적 중요성을 지닌 고 분자량 바이오 폴리머로서 운 송산업, 의약산업 및 방위산업과 같은 주요 산업분야에 필수적이고 중요한 원료이다. 천연고무는 높은 탄력성, 탄성, 내마모성 및 내충격성, 효율적인 열 분산 및 저온에서의 가단성을 포함하는 고유한 물리적인 특성으로 인하여 다양한 고무 및 라텍스 제품의 제조에 중요한 원료가 되며 약 4만개가 넘는 소비자 제품으로 사용된다. 또한 트럭 타이어 및 비행기 타이어와 같은 높은 탄력성 및 고효율의 열 분산을 필요로 하는 제품의 용도에서 합성고무가 천연고무를 대체 할 수가 없다. 재생 가능한 재료를 기반으로 하는 바이오 폴리머는 재생 불가능한 자원인 석유화학을 기반으로 한 산업용 폴리머를 점차 대체 하여 그 수요는 점점 확대될 전망이다.

중국과 인도의 급격한 경제 발전은 천연고무 수요의 성장을 촉진하고 있으며 가격이 급격히 상승하는 결과를 초래하였다. 또한 자동차 타이어를 비롯해 고무제품의 수요가 꾸준히 늘어나고 있지만 고무나무에서의 고무를 채취하기까지의 걸리는 시간이 6~7년이 걸려 당장의 수요를 예측하지 못해 심한 가격변동을 초래하고 있다. 또한 생산지의 독과점은 가격인상으로 직결될 수 있는 큰 위험성을 항시 내재하고 있다. 예로서 태국, 말레이시아 및 인도네시아의 3대 주요 고무생산국이 협의를 통하여 고무생산량과 수출량을 줄여서 궁극적으로 천연고무 가격을 높이는 상황을 만들기도 하였다. 이는 우리나라와 같이 천연고무의 공급원이 없는 국가에서는 경제적 타격을 받는 상황으로 이어졌다.

2. 고무나무에 의한 천연고무 생산

연간 전 세계 천연고무 생산량은 거의 14,000,000톤

(<http://www.rubberstudy.com>)으로 추정되며 거의 모든 공급원은 *Hevea* 고무나무에서 생산된다(그림 1). 태국, 말레이시아 및 인도네시아의 3대 주요 고무생산국은 세계 공급량의 80% 정도를 생산한다. *Hevea* 고무나무는 특정지역에서만 자라기 때문에 매우 한정적이며, 고무나무의 번식은 주로 묘목의 접순과 접목 방법으로 이루어져 유전적으로 매우 균질하기 때문에 식물 질병에 대대적으로 감염되기 쉽고 이로 인한 천연고무 생산급감 위험은 매우 중요한 문제이다. 고무나무는 크게 박테리아, 곰팡이, 해충에 의해 병이 일어난다. 대표적인 질병으로는 박테리아의 한 종류인 *Agrobacterium tumefaciens*에 의한 크라운 담즙 병과 *Xanthomonas campestris*에 의한 잔토모나스 반점병이 있으며, 총채벌레와 밀짚벌레와 같은 해충에도 약한 것으로 보고되고 있다. 여러 요인 중 고무나무에 가장 큰 피해를 입히는 것은 곰팡이에 의한 병이다. 이는 고무나무의 재배지인 습지와도 연관이 있으며, *Sclerotium rolfsii*와 *Microcyclus ulei*에 의한 남미 잎마름병(South American Leaf Blight, SALB)이 대표적



박종찬

2008. 2. 동의대학교 자연대 생물학과 이학사
2010. 8. 동의대학교 대학원 생물학과 이학석사
2018. 8. 경희대학교 대학원 생명공학원 이학박사
2010. 10. ~ 2011. 10. 극지연구소 연구원
2018. 10. ~ 2019. 10. University of Nevada, Reno 박사후 연구원
2019. 10. ~ 현재 한국생명공학연구원 박사후 연구원



유병태

1992. 11. University of Minnesota Ph.D.
1999. 12. ~ 2003. 6. 금호생명과학연구소 전임연구원
2003. 7. ~ 2006. 7. POSTECH 연구교수
2006. 8. ~ 현재 한국생명공학연구원 책임연구원/UST교수



〈그림 1〉 동남아시아 고무나무 재배단지 방문 및 Fresh Latex 채취 (2020년 1월)

이다. 예로서 1934년에 SALB에 의해 브라질에서는 고무생산을 폐지하였으며, 풍토병원균인 *Microcyclus ulei* 으로 인하여 대규모의 생산을 다시 할 수는 없었다. SALB가 문제되지 않는 한정적인 브라질의 토지에서의 현재 생산량은 연간 96,000톤으로 이는 세계 생산량의 약 1%에 불과하다. 세계 천연고무 생산량의 80%를 차지하는 동남아시아에서 SALB가 우연히 확산되더라도 한다면 수년 안에 수백만 톤의 생산이 줄어들어 천연고무의 심각한 부족현상이 발생하게 되고 결과적으로는 가격이 크게 상승함과 더불어 세계 산업경제에 미치는 타격은 실로 어마하다고 할 수 있다.

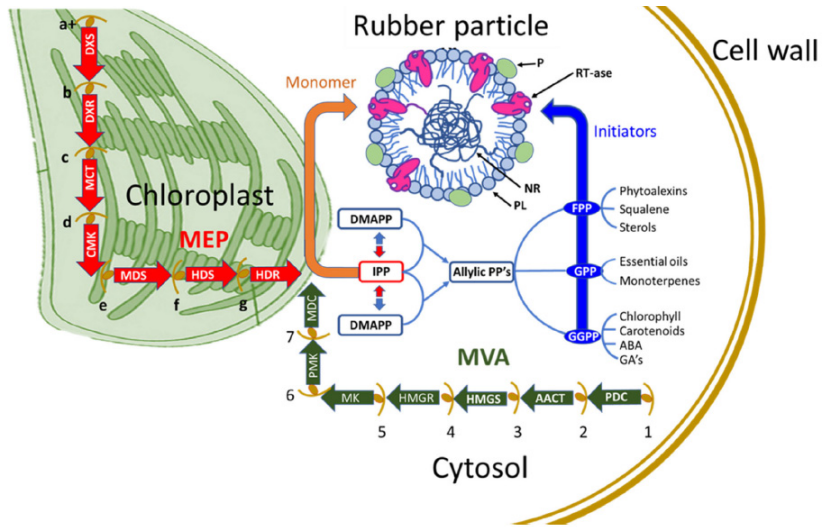
고무나무 재배면적의 증가는 생태계를 파괴하는 결과를 낳기도 한다. 예로서 중국 윈난성 시샹반나 열대림은 중국의 아마존이라 불리울 정도로 식물 수만 무려 1만 1700여종이 서식하며 식물뿐만 아니라 760종이 넘는 야생동물이 서식하는 지역이다. 1947년 동남아에서 유입된 화교들이 고무나무를 심은 것을 시초로 하여 2010년에는 중국에서 천연고무 생산량 2위를 차지할 정도로 고무농장의 규모는 커졌지만 결과적으로 열대우림은 사라지고 500여 종의 식물이 멸종되고 80% 이상의 포유류 동물이 사라졌다. 하지만 재배면적의 증가는 필수불가결 하지만 여기에도 걸림돌은 존재한다. 그것은 팜오일 농장과 토지 경쟁이다. 말레이시아의 팜 오일 면적은 10만 헥타르 미만에서 200만 헥타르로 증가하여 고무나무 재배 면적보다 더 커졌으며, 두 농작물이 함께 말레이시아 총 농업 토지이용의 70% 이상을 차지하고 있으며, 태국과 인도네시아에서도 비슷한 발전이 이루어지고 있다.

천연고무의 10%는 장갑, 콘돔 및 기타 의료제품을 생

산하는 라텍스로 사용된다. 천연고무수액인 라텍스는 그 단백질이 피부나 입을 통해 인체로 들어갈 수 있다. 인체로 들어간 단백질로 인해 일부 사람들에게는 알레르기 반응이 일어날 수 있다. 특히 미국뿐만 아니라 유럽과 일본에서도 많은 사람들이 *Hevea* 고무단백질에 알레르기가 있다. 이러한 위험요인으로 인하여 미국 재료 테스트 협회는 천연고무 건조중량 그램 다 200 마이크로그램 미만의 총 단백질을 포함하고 감지 할 수 없는 천연고무 라텍스의 새로운 표준인 ASTM D1076-06을 정의하게 되었다. 또한 Namork연구팀에 따르면 천연고무의 항원성 단백질이 함유된 자동차 타이어에서 마찰 및 마모 중에 발생하는 미립자에 의한 알레르겐이 천식환자의 증상이 악화된다는 연구결과를 발표하였다. 그러나 다른 연구결과에 따르면 *Hevea* 천식고무 제품에는 추출 가능한 단백질 함량이 매우 적으며 알레르기 유발성이 매우 낮거나 무시할 수 있다는 연구결과를 발표하였다. 각기 다른 연구결과와 발표에도 불구하고 *Hevea* 고무에 의한 알레르기 반응은 잠재적인 위험요소로 사료된다.

3. 천연고무 생합성 기작

Hevea 고무나무의 천연고무는 주로 *cis*-1,4-poly isoprene으로 구성된다. 고무분자는 일반적으로 mevalonic acid(MVA)경로와 methylerythritol(MEP)경로를 통하여 합성되어지며 isoprenoide를 전구체로 사용하여 생성된다(그림 2). 식물의 laticifer 세포의 세포질에 존재하는 고무전이효소(EC. 2.5.1.20)는 단일 allylic diphosphate primer 분자에 isopentenyl- diphosphate moieties를 점진적으로 첨가하여 고무 바이오폴리머를 형성한다. 고무



〈그림 2〉 식물에서의 천연고무 (*cis*-1,4-polyisoprene) 생합성에 대한 대사경로
 (출처: Cherian et al 2019 Plant Biotech J. p2041-61, 교신저자 유병태)

분자는 중 특이적 지방산 단일 층 및 고무입자 관련 단백질로 둘러싸인 입자에 축적된다. 고무분자의 길이는 생성된 천연고무의 기능적 특성에 대한 주요 결정 요인 중 하나이다.

4. 대체고무작물 개발의 필요성

라텍스에서 천연고무를 생산하는 식물은 8개의 식물군과 300 속, 그리고 1,800 종이 확인이 되었으나, 이들 중 소수만이 고분자량의 고무를 생산하는 것으로 알려져 있다. 우리나라는 연간 400,000톤 이상의 천연고무를 사용하고 있으며 전량을 수입에 의존하고 있다. 그렇기 때문에 천연고무를 안전하게 확보하는 방안을 마련하는 것이 시급하며 석유화학 기반의 합성고무에 대한 의존성을 줄일 필요가 있다. 그러나 산업적으로 이용하는 천연고무는 동남아시아에서 주로 생산되며 *Hevea* 고무나무 한 종에 의존하여 생산되고 있으며, 이는 천연고무의 생산량 및 생산의 중단이 발생할 시 전 세계 경제에 치명적인 타격을 줄 수 있는 위험성이 항시 내재되어 있어 대체고무작물의 개발은 글로벌 이슈로 대두 되고 있다.

천연고무의 생산은 *Hevea* 고무나무 고무생산 시스템의 취약성, 천연고무에 대한 산업적 수요증가, 환경적 측면에서의 모라토리엄, 고무제품에 존재하는 단백질에 대한 알레르기 반응 등 위의 모든 이유 때문에 대규모 대체 천연고무 생산기술의 개발하여야 한다. 국내 작물

의 상용화 및 천연고무 생산은 경제적 산업적으로 우리나라의 장단기 이익에 가장 적합하다. 또한 천연고무는 현재 진행 중인 자원전쟁에서도 매우 귀중한 전략적 자원으로 구성될 수 있으며 이는 국가와 정부도 주요 이해 당사자임을 인지하여야 한다. 천연고무가 없으면 산업경제의 많은 부분이 큰 어려움을 겪을 것이기에 천연고무 생산 대체고무작물의 개발이 필요하다.

5. 천연고무 대체공급원인 과울

과울(*Parthenium argentatum*, guayule)은 멕시코와 미국 텍사스주의 치와와 사막에 서식하는 국화과의 다년생 관목이다. 과울은 적어도 마야 문명까지 거슬러 올라가는 아메리카 인디언을 위한 고무공의 공급원 이었는데 과울 식물을 씹어 섬유질을 분리하여 고무 덩어리를 축적함으로써 얻어졌다. 과울의 상업적 이용은 20세기 초 아마존의 천연고무 생산이 중요한 사업수단이 되었고 고무수요가 급격히 증가하여 미국의 수입 가격이 높게 형성되었던 시점에 시작되었다. 1910년에는 과울에서 연간 1만톤의 천연고무를 생산하였지만, *Hevea* 고무나무의 고무생산이 더 효율적이 되고 자연에서의 과울양이 줄어들면서 과울을 이용한 천연고무 생산전략은 점차 포기하게 되었다. 20세기 간헐적인 번식노력으로 과울은 부분적으로 성공적 재배가 가능한 농작물이 되었다.

과울에서 생산된 천연고무는 *Hevea* 고무나무의 천연

고무와 동일한 분자량 및 일반적인 특성을 갖지만, 심각한 알레르기 반응을 일으킬 수 있는 *Hevea* 천연고무에 존재하는 단백질을 포함하고 있지 않은 이점을 가지고 있다. 이러한 이점으로 인하여 과육유래 천연고무에 대한 연구는 관심을 되살릴 수 있었다. 현재는 미국에 본사를 둔 회사인 Yulex가 대체 천연고무 공장에서 과육에서 추출한 천연고무를 이용하여 저 단백질 라텍스의 생산을 하고 있다.

과육의 천연고무에 관한 연구는 생산성 증대를 위한 분자유전학 및 유전공학 기술과 육종기술을 접목시켜 최적의 바이오매스를 구현하는 목표를 바탕으로 활발하게 진행되고 있다. 과육은 지금까지 사막과 같은 환경, 습한 따뜻한 조건, 더운 건조한 조건 및 반 건조 조건에서 재배되고 있으며 이러한 환경과 조건은 세계 여러 지역에서 찾을 수 있어 천연고무 생산 대체고무작물로 크게 평가를 받고 있다.

6. 새롭게 주목받는 대체고무작물 러시아(고무)민들레

이상적인 고무대체작물은 매년 빠르게 성장하며 대량의 바이오매스를 생산하는 것이 목표이다. 과육과 비교하여 고려되어지고 있는 대체고무작물 중의 하나인 고무민들레(*Taraxacum kok-saghyz*)는 이러한 조건에 부합하는 후보 중의 하나이다. 고무민들레는 소련에서 천연고무 원천기술을 개발하기 위해 1931-32년 전략 프로그램과정에서 카자흐스탄에서 확인 되었다. 고무민들레의 뿌리는 제 2차 세계대전 동안 고무를 만드는데 사용되었으며 고품질의 라텍스 공급원으로 밝혀졌으며, 연간 1헥타르 경작지에서 150-500kg의 뿌리를 수확할 수 있으며, 뿌리 1톤당 45kg의 천연고무를 생산하였다. 고무민들레

의 천연고무로 만든 타이어는 *Hevea* 고무와 같이 탄성이 좋으며 과육기반의 천연고무로 만든 타이어보다 품질이 우수하다.

하지만 헥타르 당 낮은 수확량과 노동 집약적 재배, 다른 민들레종과의 교차오염 및 잡초로 인하여 농업학적 특성은 좋지 않다. 그럼에도 불구하고 고무민들레는 고무합성의 모델식물로 개발이 될 수 있었다. 현재 고무민들레의 유전염기서열의 해독은 모두 끝난 상태이며 이를 바탕으로 분자유전학 및 대상공학 분자유종을 바탕으로 생산성 증대의 길이 열린 것이다. 고무 민들레의 매력적인 특징은 온화한 기후의 지역에서 연간 고무를 생산할 수 있는 큰 이점을 지니고 있다. 재배법 또한 치커리와 유사하여 손쉽게 재배를 할 수 있는 이점이 있다.

현재 생명공학연구원에서는 고무민들레의 전통육종 방법을 시도하여 뿌리 바이오매스도 증가할 뿐 아니라 고무함량이 약 30% 증가된 신품종 고무민들레 개발에 성공하였다 (그림 3). 또한 신품종의 고무민들레는 다른 민들레종과의 교차오염을 방지하기 위한 불임성 품종으로 뿌리를 통한 대량증식 재배법을 개발하여 활용하고 있는 중이다. 농가재배 시 잡초로 인한 생산량 감소 및 재배효율을 증대하기 위하여 제초제 저항성 품종의 개발에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 한편 미국의 경우 고무민들레의 재배를 스마트팜 공법을 이용하여 활발한 연구가 진행 중에 있다는 보고가 있으며, 이는 앞서 언급한 농업적 특성의 단점을 보완하는 주요한 기술이라고 할 수 있다.

7. 그 밖의 대체고무작물

미역취(*Solidago virgaurea* var. *asiatica*, goldenrod)는 국화과 미역취속에 속하는 잡초성 다년생초이다.



〈그림 3〉 고무(러시아)민들레 재배모습 및 육종을 통하여 얻은 신품종

1920년대 후반 고무가격이 급등하였을 때 Thomas Edison, Henry Ford 및 Harvey Firestone은 고무의 천연 공급원을 찾기위해 에디슨 식물연구소를 설립하고 고무의 품질과 양을 검사하였다. 연구결과에 따르면 미역취는 5%의 라텍스 수율을 보였으나, 생산된 천연고무를 재료로 하여 만든 4개의 타이어를 헨리포드가 테스트한 결과 품질은 떨어졌다. 그 후에 몇 개의 미역취종에서는 평균 분자량이 20만 dalton 이하인 고무를 함유하는 것으로 나타났다. 좋은 원예특성을 지닌 작물로 언급이 되지만 고무 수확량이 매우 낮으며, 우리나라를 비롯한 유럽국가에서는 유해 종으로 분류되어 있다. 또한 용매 추출을 사용한 미역취의 가공은 매우 어렵고 비용이 많이 드는 것으로 나타났다.

Castilla, *Ficus*, *Funtumia*, *Manihot* 및 *Cryptostegis* 종과 같은 열대 덩굴과 나무도 고무를 함유하고 있다. 그러나 이 식물들 중 어느 것도 미국과 유럽에서 자라지 않았으며, 고무 생합성에 관한 생화학적 연구가 수행된 *Ficus sp.*를 제외하고는 대부분 무시되었다.

사막의 관목인 고무 토끼 브러쉬(*Chrysothamnus nauseosus*)도 제 2차 세계대전 중 긴급 고무프로젝트에서 조사 되었으나 과일과 마찬가지로 1945년 이후 관심이 줄었다. 고무의 분자량은 약 50만 dalton이며, *Hevea* 및 과일 천연고무의 150만 dalton에 비해 낮다.

형질전환 해바라기 또는 상추에서의 고무생산은 미국 및 캐나다에서 고려되고 있다. 이러한 후보 작물 종을 대체고무작물로 성공적으로 전환하여 상업적으로 사용할 수 있는 양의 고품질 고무를 생산하는 것은 유전공학적 전략을 통해서만 가능하다. 현재 EU에서는 고무생산을 위한 유전자 변형작물의 사용은 EU에서 허용되지 않을 수 있다.

8. 대체고무작물 개발을 위한 대안

천연고무에 대한 산업시장과 *Hevea*와 관련된 위험요소를 감안할 때 우리는 자체적으로 고무를 생산하는 기반을 국내 또는 국외에 마련하여야 할 것이며 이는 우리나라에 상당한 경제적 원동력을 제공할 것으로 기대된다. 이를 위해서는 천연고무에 관한 연구 및 조사가 전략적으로 필요하다. 대체고무작물의 개발은 기존 *Hevea*고무가 지닌 문제점을 해결 개선해나갈 새로운 산업의 발전에 뒷받침하는데 필수적이며, 현재의 천연고무 단일 공급원 *Hevea* 고무나무에 문제가 발생 할 경우 강력한 대체 공급 망을 제공하는 아주 중요한 기회가 될 것이다.

이를 위해 우리나라는 천연고무 공급에 문제가 발생 시 즉각적이고 전략적으로 대응할 수 있는 기술력과 시스템을 구축하는 것이 매우 중요하다. 미국과 유럽에서는 천연고무의 첫 번째 대체고무작물로 과일을 이용하고 있으나, 우리나라의 경우 과일의 재배 및 활용기술의 경우 인프라 구축이 되어 있지 않다. 하지만 생명공학연구원에서는 고무민들레를 활용한 대체고무작물에 관한 연구가 오랜 기간 진행되었으며, 그 연구결과도 상당한 진척을 이루었다. 고무민들레의 유전체 분석의 완료로 앞으로 포스트-게놈 기술을 적용할 수 있게 되었고 고무민들레의 고무생산성 향상에 중점을 두는 R&D에 집중하여야 할 것이다. 또한 고무 민들레 대량재배 생산을 위해서는 개발도상국과 협력을 할 필요성이 있다. 끝으로 우리나라는 현재 진행 중인 식물유래 융복합소재 Isoprenoid 고분자 생산과 활용 융합클러스터 사업을 통하여 자체개발한 대체고무작물인 고무민들레를 활용하여 추출한 천연고무를 고무가치 첨가소재로 활용하고자 산학연이 함께 노력하고 있으며 정부의 지원도 많아졌기 때문에 앞으로 국가 고무산업 기술력 향상에 대한 전망은 밝다고 할 수 있다.

참고문헌

1. Cherian et al., (2019) Natural rebber biosynthesis in plants, the rubber transferase complex, and metabolic engineering progress and prospects, *Plant Biotechnology Journal* 17, 1-21
2. Jan van Beilen, (2006) Alternative sources of natural rubber, *cpjpress*
3. Cornish, K. (2001) Similarities and differences in rubber biochemistry among plant species. *Phytochemistry* 57, 1123-1134.
4. Bushman, B.S.et al., (2006) Identification and comparison of natural rubber from two *Lactuca* species. doi:10.1016/j.phytochem.2006.09.012.
5. Hirsch, R.L. et al., (2006) Peaking of world oil production and its mitigation. *AIChE J.* 52, 2-8.
6. International Rubber Study Group various issues and International Rubber Study Group (IRSG) vol. 60 No. 6-7, March/April 2006
7. Coffelt, T.A. et al., (2005) Genotypic and environmental effects on guayule (*Parthenium argentatum*) latex and growth. *Ind. Crops Prod.* 22, 95-99.