

문명을 바꾼 탄성(彈性)의 역사: 고무(Rubber) 이야기

The History of Elasticity That Changed Civilization: The Story of Rubber

이기쁨 · 나창운 | Gi-Bbeum Lee · Changwoon Nah

Department of Polymer-Nano Science and Engineering, Jeonbuk National University,
567 Baekje-daero, Jeonju, Jeonbuk 54896, Korea
E-mail: cnah@jbnu.ac.kr

1. 서론

우리가 매일 접하는 자동차 타이어로부터 기계용 벨트, 밀폐용 씰링(sealing), 건축물의 내진소재에 이르기까지 현대 문명의 유지와 안전을 지탱하는 핵심소재의 중심에는 단연 ‘고무(rubber)’가 존재한다. 고무를 정의하는 가장 대표적인 물리적 속성은 외부 변형에 대해 본래 상태로 되돌아가려는 강력한 ‘탄성(elasticity)’이다.

고무는 거대한 고분자 사슬 구조들이 꼬여 있는 무정형(amorphous) 상태로 존재한다. 이러한 구조적 특성과 높은 사슬 형태 자유도 덕분에 유리전이 현상(glass-rubber transition)을 거치며 독특한 탄성을 발휘하게 된다.^{1,2} 이 탄성 복원력은 열역학적으로 헬름홀츠(Helmholtz) 자유에너지(F)의 변화를 통해 명확히 설명된다.

$$F = U - TS \quad (1)$$

여기서 U 는 내부 에너지, T 는 절대온도, S 는 엔트로피를 의미한다. 따라서 외부 응력에 따른 고무 사슬의 신장에 대응하는 탄성 복원력(f)는 자유에너지의 사슬길이(L)에 대한 변화율로 다음과 같이 정의된다.

$$f = (\partial F / \partial L)_{T,V} = (\partial U / \partial L)_{T,V} - T(\partial S / \partial L)_{T,V} \quad (2)$$

이상적인 탄성체(elastomer) 모델에서는 길이 변화에 따른 내부에너지의 변화량이 0이 되므로 탄성 복원력은 오롯이 사슬 형태의 자유도 및 신장에 따른 엔트로피 변화량($-T(\partial S / \partial L)_{T,V}$)에 의해 결정되는 ‘엔트로피 탄성’의 거동을 보인다(그림 1).

본 고에서는 인류의 역사 속에서 고무가 걸어온 흥미진진한 발자취를 다각도로 돌아보고자 한다. 신의 선물로 불렸던 천연고무의 발견부터, 두 차례 세계대전이라는 역사적 필연(Needs) 속에서 이뤄진 합성고무의 비약적 발전, 그리고 AI 및 우주항공 시대를 맞이한 고무 소재의 미래적 전망까지 학술적·역사적 맥락을 종합적으로 조명하고자 한다.

Author



이기쁨

2009
2011
2017
2023-현재

전북대학교 고분자·나노공학과 (학사)
전북대학교 고분자·나노공학과 (석사)
전북대학교 고분자·나노공학과 (박사)
전북대학교 화학과 강사



나창운

1984
1986
1995
1999-현재

이주대학교 화학공학과 (학사)
이주대학교 공업화학과 (석사)
미국 Akron대학교 고분자공학과 (박사)
전북대학교 고분자·나노공학과 교수

2. 본론

2.1. 신의 선물에서 문명의 발굴로: 천연고무의 발견

고무의 사용 역사는 인류 문명의 깊은 곳까지 올라간다 (그림 2). 기원전 16세기경, 현재의 멕시코 지역에 거주하던 원주민들은 고무나무 수액(라텍스)을 모아 공을 만들고 통증 완화용 약재 및 방수 옷감을 제작하여 사용했다.³ 이 부족을 일컫는 '올멕(Olmec)' 명칭 자체가 '고무의 사람들'이라는 뜻을 지니고 있다. 유적지에 남아있는 경기장은 이들이 고무공을 벽면 링에 넣는 스포츠를 즐겼음을 증명한다.

유럽 대륙으로의 고무 유입은 1469년 크리스토퍼 콜럼버스가 이스파놀라 섬(지금의 아이티)에 도달하고 이후 에스파냐가 아스테카 제국을 점령하면서부터 시작되었다. 수액을 그을려 말랑말랑하면서도 강하게 튕겨 나가는 고휘 공을 만들어 사용하는 모습은 당시 유럽인들에게 커다란 문화적 충격이자 경이로운 관찰 대상이었다.

2.2. 'Rubber'라는 이름의 탄생과 초기응용

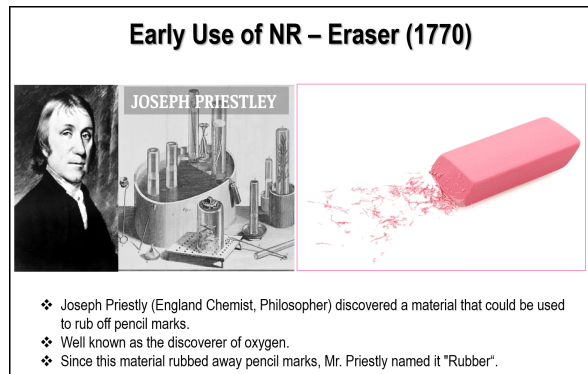
인류가 고무를 산업적·생활용 제품으로 연계하려는 본격적인 시도는 18세기 후반에 시작되었다.

(1) 연필 자국을 문질러 지우다(1770): 산소를 발견한 영국의 대표 화학자 조셉 프리스틀리(Joseph Priestley)는 고무가 흑연 자국을 문질러(rub) 지우는 특성이 있음을

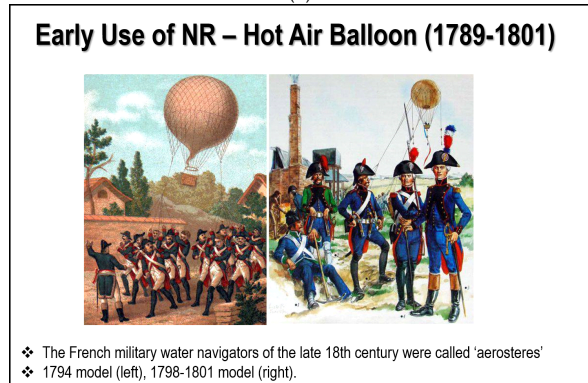
밝혀냈다. 여기서 고무를 뜻하는 명칭 '러버(rubber)'가 정식으로 탄생했다(그림 3a).

(2) 하늘을 나는 고무풍선(1780년대): 프랑스에서는 열기구(hot air balloon) 제작에 고무 코팅 기술을 적용했다. 오늘날의 정찰용 드론과 같이, 당시에는 고무 코팅 풍선이 적진을 감시하는 정찰 도구로 활용되었다(그림 3b).

(3) 스코틀랜드의 비를 막다(1818): 스코틀랜드 화학자 찰스 매킨토시(Charles Macintosh)는 직물 사이에 라텍스를 도포하여 방수 옷감을 개발했으며, 이는 세계적인 방수 레인코트 브랜드 '매킨토시'의 시초가 되었다(그림 3c).



(a)



(b)



(c)

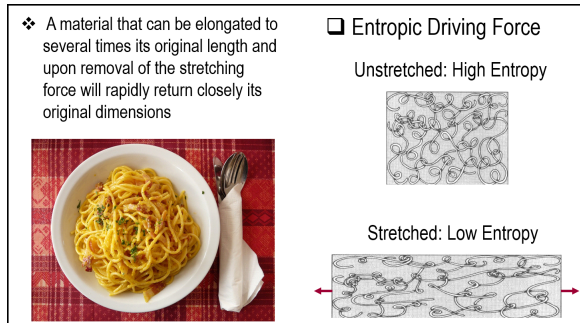


그림 1. 고무사슬 구조 및 탄성의 원리.^{1,2}

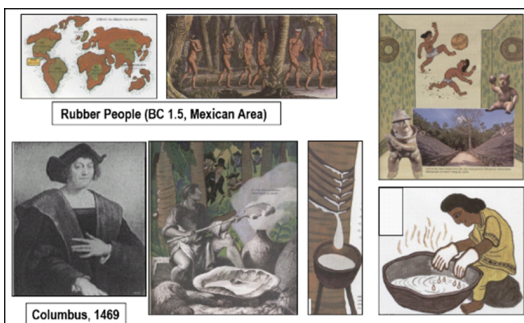


그림 2. 천연고무의 발견 및 사용기록.^{3,4}

그림 3. 초창기 천연고무 사용사례.^{3~7}

2.3. 고무공학의 두 거장: 헨콕의 '기계' vs. 굤이어의 '불꽃'

초기 천연고무는 정제 및 가공상의 치명적 한계가 있었다. 굳은 고무 덩어리는 재생형이 불가능했고, 여름철 고온에서는 끈적하게 녹아내렸으며 겨울철 극저온에서는 유리처럼 딱딱하여 심지어 깨지기도 하였다. 이를 극복한 두 거장의 발견은 고무 산업의 기틀을 확립했다.

(1) 토마스 헨콕(Thomas Hancock)과 마스티케이터: 영국의 헨콕은 강력한 기계적 전단력을 통해 고무 분자 사슬을 끊어 분자량과 점도를 제어하는 '마스티케이터(masticator, 분쇄 가공기)'를 1820년에 발명했다(그림 4a). 원하는 형태로 가공이 가능해지면서 그는 '고분자 가공의 아버지'로 추앙받고 있다.

(2) 찰스 굤이어(Charles Goodyear)와 가황반응: 온도변화에 약한 고무의 치명적 단점은 1839년 미국의 굤이어가 발견한 '가황(vulcanization)' 기술로 해결되었다(그림 4b). 실수로 난로 곁에 황과 고무 혼합물을 떨어뜨렸을 때 고무가 녹지 않고 탄성이 비약적으로 향상되는 현상을 관찰한 것이다. 황이 고무 사슬 간 가교(cross-linking)를

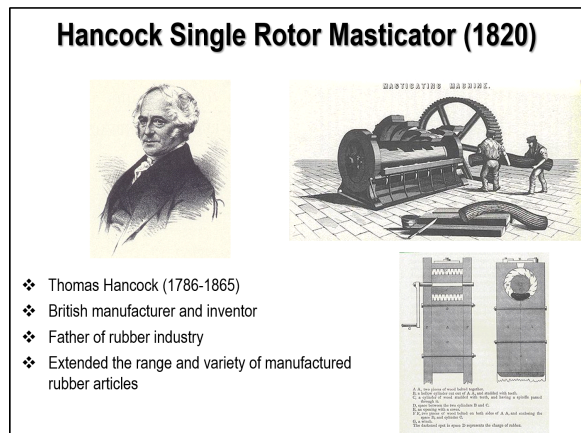
형성하여 3차원 망상 구조를 구축하는 것을 밝힘으로써, 고무는 사계절 내내 사용 가능한 범용 소재로 거듭났다.

오늘날 대표적인 미국 타이어 기업인 'Goodyear'는 발명이 굤이어의 업적을 기리기 위해 설립된 회사의 명칭이다. 흥미롭게도 국제 고무 학술대회(International Rubber Conference)등에서는 영국계 과학자들이 가공 기계의 기초를 구축한 헨콕의 공로를 우선시하는 반면, 미국계 과학자들은 화학적 가황 반응을 발명한 굤이어의 발견을 더욱 높게 평가하는 유쾌한 학술적 자존심 대결을 이어오고 있다.

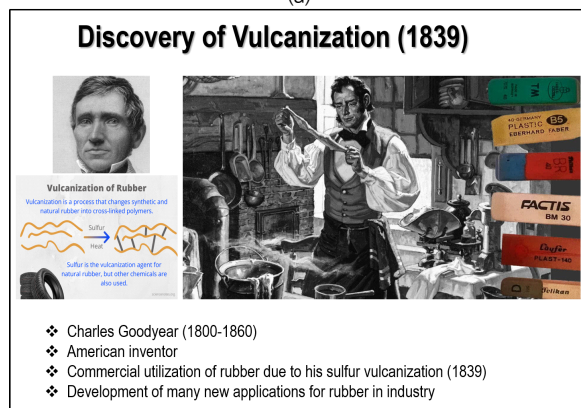
2.4. 고무 잔혹사와 대량생산의 시대

가황 기술 확립과 타이어 산업의 출범으로 천연고무 수요가 폭증함에 따라 세계사는 '고무 잔혹사'라는 비극적 단면을 겪기도 했다(그림 5a). 야생 고무나무 수액 수탈을 위해 벨기에의 레오폴드 2세(Leopold II)는 아프리카 콩고를 사유화하고 할당량을 미달한 원주민들에게 혹독한 형벌을 가했다. 아마존 푸투마요(Putumayo) 지역 역시 수많은 원주민이 강제 노동으로 희생되었다.

이러한 수급 불균형과 인권 비극을 해결한 모멘텀은 식물학적 이송과 대단위 재배농장(Plantation) 구축이었다

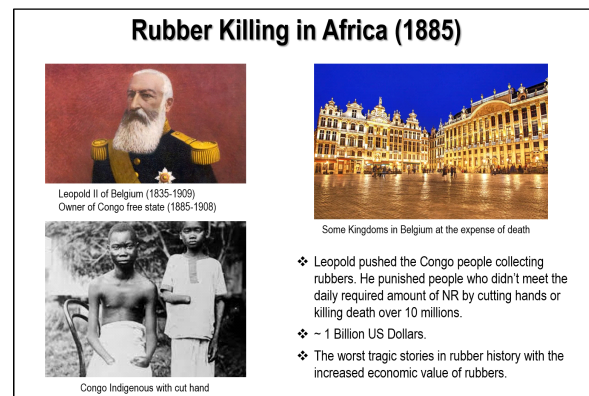


(a)



(b)

그림 4. 헨콕과 굤이어의 위대한 발견.^{8~11}



(a)



(b)

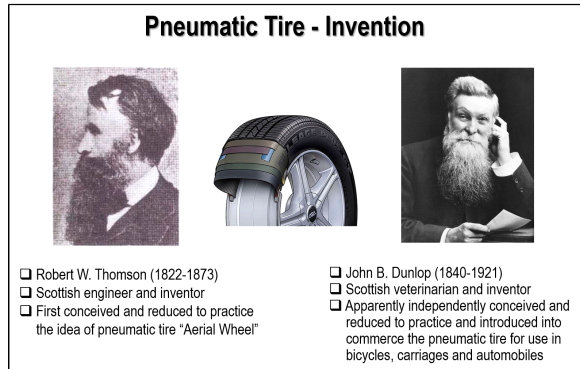
그림 5. 고무의 잔혹사와 대량생산.^{12~15}

(그림 5b). 영국의 헨리 위컴(Henry Wickham)과 리들리(Ridley) 등이 아마존 고무나무 씨앗을 채집하여 기후 조건이 유사한 동남아시아 지역에 이식 및 대량 재배 기술을 성공시켰다. 이로 인해 말레이시아 및 태국 등이 세계 최대 천연고무 생산 거점으로 재편되었다.

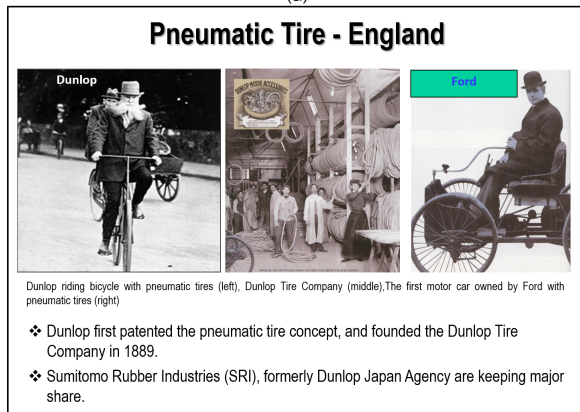
2.5. 바퀴와 타이어: 미술랭 스타부터 K-Rubber까지

인류가 개발하여 사용한 휠(Wheel)은 통나무 판자 휠(BC ~ 3500년), 바퀴살(Spoke) 휠(BC ~ 2000년), 철제 태두리 보강 휠(BC ~ 1000년) 등을 거쳐 19세기 중반 통고무 타이어 휠 등을 사용하여 왔다.³³ 19세기 후반 오늘날 사용 중인 공기압 개념의 타이어(Pneumatic Tire)가 개발되고 도입되면서 휠의 성능과 역할 측면에서 한단계 도약하였다. 휠 기술의 패러다임이 바뀌는 결과를 초래하였기 때문에 천연고무의 사용량도 급증하게 되었다.

(1) 영국: 19세기 후반, 톰슨(Thomson)과 던롭(Dunlop)에 의해 공기를 주입하는 '공기압 타이어(Pneumatic Tire)'의 아이디어가 세계 최초로 제시되었다(그림 6a). 수의사였던 던롭은 아들의 자전거 타이어의 승차감을 올리기 위해 고심한 끝에 공기압 타이어를 개발하였고, 이를 1889년 산업화에 성공함으로써 영국의 Dunlop Tire 제조 기업으로



(a)



(b)

그림 6. 공기압 타이어를 개발한 톰슨과 던롭.^{4,16,17}

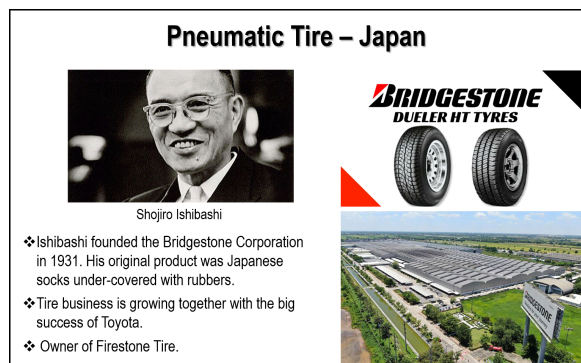


그림 7. 프랑스 공기압 타이어 역사.^{18,19}

발전시켰다(그림 6b). 이를 계기로 세계적인 타이어 산업의 부흥을 가져오게 되었다.

(2) 프랑스: 미술랭(Michelin)은 레인코트를 개발한 메킨토시의 조카와 결혼하면서 고무에 관심을 갖게 되었다. Michelin 타이어를 1889년 설립하였다. 초창기에는 주로 자전거 타이어를 제조하였는데, 프랑스 자전거 경주대회(Tour de France)에서 빠른 타이어 교체 시스템을 도입해 명성을 얻었다(그림 7). 이후 자동차 타이어 판매를 늘리기 위해 운전자들이 맛집과 멋진 경치를 찾아 여행을 떠나도록 안내책자를 만들었는데, 이것이 오늘날 세계적인 식당 평가 기준인 '미술랭 맛집(Michelin Star)'의 유래가 되었다. 지금까지 연구개발에 막대한 투자를 집중하여 세계최고의 타이어 메이커의 명성을 유지하고 있다.

(3) 미국: 헨리 포드(Henry Ford), 토머스 에디슨(Thomas Edison), 하르비 파이어스톤(Harvey Firestone) 세 사람이 절친한 친구였다. 에디슨 회사의 엔지니어였던 포드는 회사를 그만두고 내연기관 중심의 자동차회사인 Ford사를 창업하였다. 이들은 주말마다 포드가 만든 RV 차량을 타고 캠핑을 다녔는데, 이 광경이 언론에 보도되면서 미국 내 자동차 대중화를 이끌게 되었고, 큰 성공을 거두었다. 한편 포드는 친구인 파이어스톤에게 타이어 회사 설립을 요청하였고, 이에 따라 파이어스톤은 Firestone 타이어 메이커를 오하이오 Cleveland/Akron 지역에 설립하여 Ford사에 납품하게 되었다. 당시 오하이오(Cleveland/Akron 지역)에는 이미 B. F. Goodrich, Goodyear 등 타이어 제조기업이 설립되어 있었고, 고무관련 화학제품 제조사들도 인근에 자리를 잡게 되어 거대한 고무산업 벨트를 형성하였다.³ 아울러 세계2차대전 당시 합성고무의 대량제조 연구가 Akron을 중심으로 이루어졌는데, 세계최초로 고분자교육 프로그램이 Akron 대학에서 개설되어 오늘날까지 이어지고 있다. 당시 국가적인 연구지원에 대한 필요성이 인정되어 미국의 연구지원기관인 National Science Foundation(NSF)가 Akron에서 시작되기도 하였다(그림 8).

그림 8. 미국 공기압 타이어 역사.^{20,21}그림 9. 독일 공기압 타이어 역사.²²그림 10. 일본 공기압 타이어 역사.^{23,24}그림 11. 한국 공기압 타이어 역사.^{4,32}

(4) 글로벌 강국들과 한국(K-Rubber): 독일의 컨티넨탈(Continental)은 트레드 표면에 물 빠짐용 '그루브(Groove)'를 최초로 도입했고(그림 9), 일본의 브리지스톤(Bridgestone)은 고무가 달린 양말 사업에서 출발해 글로벌 Top 3 타이어 기업으로 성장했다(그림 10). 한국 역시 1920년대 고무신 산업으로 출발해 한국타이어, 금호타이어, 넥센타이어, DRB 동일, 금호석유화학, LG화학 등으로 이어지는 밸류 체인을 구축하며, 현재 고무 사용량 기준 세계 6위의 고무 강국(K-Rubber)으로 자리매김하고 있다(그림 11).

2.6. 전쟁의 포화 속에서 탄생한 '합성고무'

고무화학 및 공학 역사상 가장 압도적인 기술적 도약은 두 차례의 세계대전을 거치며 이뤄졌다. 자원봉쇄라는 극단적인 위기 상황과 국가적 요구(Needs)가 고분자 중합기술을 정립시켰다.

(1) 제1차 세계대전(독일): 연합군의 해상 봉쇄로 천연고무 수급이 차단되자 독일 바이엘의 호프만(Hofmann)은 디메틸 부타디엔 고무(BR) 합성을 최초로 성사시켰다. 이는 헤르만 슈타우딩거(Hermann Staudinger) 교수의 거대분자(macromolecules) 개념 정립(1953 노벨화학상)과 결합하여 SBR, NBR 등의 현대 합성고무 화학의 기초가 되었다.

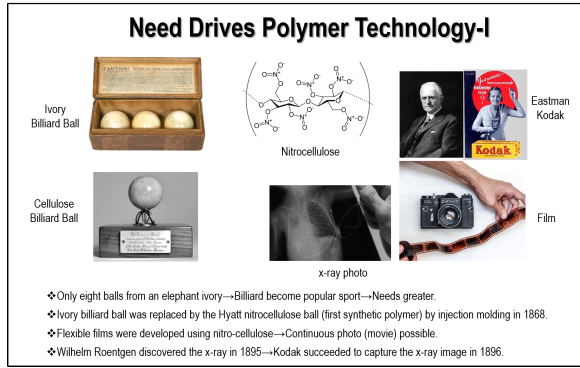
(2) 제2차 세계대전(미국): 1940년대 일본의 동남아 점령으로 연합군의 천연고무 수급이 90% 이상 차단되었다. 이에 미국 정부는 기업·대학이 참여한 국가 연구단(Rubber Reserve Company)을 결성하여 SBR 및 NBR의 공업적 대량생산 기술을 확립했다. 이 과정에서 폴 플로리(Paul J. Flory) 교수는 고분자 통계역학 이론을 완성하여 1974년 노벨화학상을 수상했다.

2.7. '필요(Needs)'가 낳은 뜻밖의 고분자 기술

고무 및 고분자 기술사는 "필요는 발명의 어머니"라는 명제를 연쇄적으로 입증한다.

(1) 상아 부족이 초래한 당구공과 영화 필름의 진화: 코끼리 상아 희소성으로 당구공 수급이 난항을 겪자 대체제로 개발된 '나이트로셀룰로스(Nitrocellulose)' 당구공은 최초의 합성고분자 성형체로 기록된다. 이 기술은 이스트먼 코닥(Eastman Kodak)을 통해 유연성 사진 필름 및 연속 영화용 롤필름 개발로 전파되었다(그림 12a).

(2) X-ray 분석이 밝혀낸 골프공 편심과 타이틀리스트: 엔지니어 필 영(Phil Young)은 골프공의 퍼팅 편차 원인을 분석하기 위해 친구의 치과용 X-ray로 골프공 내부 구조를 촬영했다. 고무 코어가 중심에서 벗어나 있음을 확인한 그는 완벽한 중심 정렬을 이루는 골프공 제조법을 개발했고,



(a)



(b)

그림 12. 필요에 의해 탄생한 고분자.^{25~30}

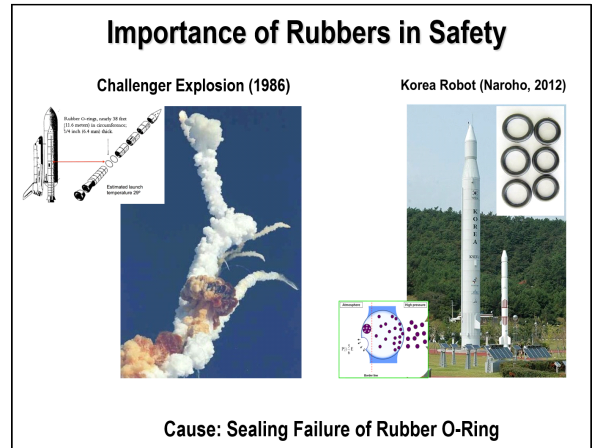


그림 13. 고무 기밀성에 의한 대재앙의 사례.

이는 100년 역사의 '타이틀리스트(Titleist)' 브랜드를 탄생시켰다(그림 12b).

2.8. 안전을 지키는 고무: 작은 오링(O-ring) 하나의 무게

고무는 단순한 일상용품을 넘어 인간의 생명과 국가적 안전을 지키는 핵심소재이다. 그러나 엄격한 품질 관리가 결여될 경우 치명적인 참사로 직결된다(그림 13).

Rubber History-Summary

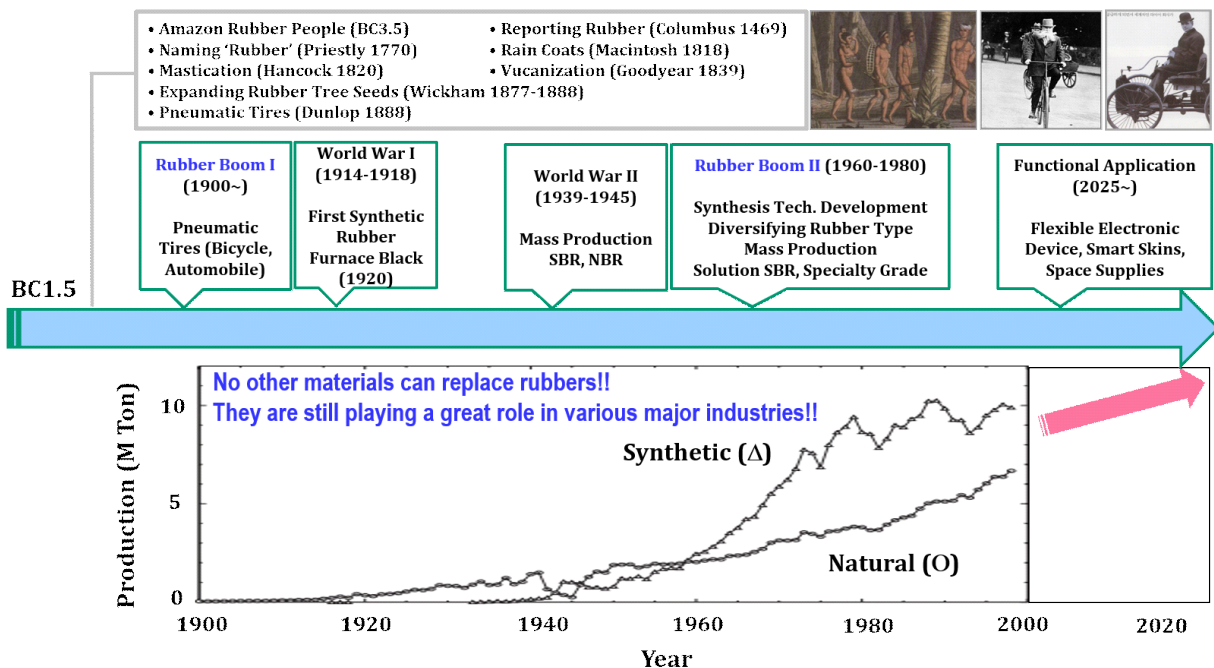


그림 14. 고무역사 요약 및 고무의 사용량 추이.³¹

1986년 미국 우주왕복선 챌린저호(Challenger) 폭발 사고와 2012년 대한민국 나로호 3차 발사 지연 및 이상 원인 분석 모두 저온 환경에서의 탄성 복원력 상실 및 설계 결함에 따른 ‘고무 오링(O-ring)’의 기밀 유효성 실패에서 비롯되었다. 수십 미터에 달하는 발사체의 성패가 단 수 센티미터 크기의 고무 부품 탄성 특성에 종속된다는 사실은 고무 공학의 엄중함을 시사한다.

3. 결론 및 제언: AI 및 우주항공 시대의 고무소재

현재 세계 고무 시장은 합성고무와 천연고무가 약 6:4의 수급 비율을 이루며 상호보완적 산업 구조를 형성하고 있다 (그림 14). AI, 휴머노이드, 우주항공 등 차세대 첨단 기술 시대에도 고무 소재의 물리적·화학적 입지는 더욱 공고해질 것으로 확신한다.

(1) 휴머노이드 로봇과 AI 촉각 피부: 인간과 물리적으로 상호작용하는 휴머노이드 관절, 유연 인공지능 센서, 피부 모사 소재는 고무의 탄성 복원력과 유연성을 지닌 고무계 고분자가 필수 불가결하다.

(2) 우주항공 및 미래 모빌리티(AAM): 극저온과 극고온을 오가는 극한 환경에서의 충격완화 및 완벽한 밀폐(sealing) 성능은 우주탐사선과 차세대 항공 모빌리티의 안전을 좌우한다.

기원전 올멕 부족의 고무공에서 출발해 세계대전의 포화를 거쳐 첨단 로봇 및 우주선 부품으로 진화해 온 고무의 역사는, 고분자 사슬의 독보적 ‘엔트로피 탄성’을 바탕으로 지속가능한 미래 소재 산업의 핵심축으로서 그 역할을 계속해 나갈 것으로 전망된다.

참고문헌

1. L. H. Spering, “*Introduction to Physical Polymer Science*”, 4th Ed., John Wiley & Sons, Inc. (2006).
2. U. W. Gedde, “*Polymer Physics*”, Chapman & Hall (1995).
3. H. Wolf, R. Wolf, “*Rubber-A Story of Glory and Greed*”, iSmithers-A Smithers Group Company (2009).
4. 글 최재인, 그림 이광익, “아마존에서 조선까지 고무따라 역사 여행”, 너머학교 (2012).
5. [https://www.microcells.net/shop-Priestly\(1770\):Naming'Rubber'](https://www.microcells.net/shop-Priestly(1770):Naming'Rubber')
6. <http://vikond65.livejournal.com/348379.html>
7. https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Macintosh
8. B. N. Zimmerman, Ed., “*Vignettes from the international rubber science hall of fame (1958-1988): 36 major contributors to rubber science. A biographical collection*”, Rubber Division, American Chemical Society, Inc., The University of Akron (1989).
9. J. L. White, “*Rubber Processing: Technology, Materials, and Principles*”, Hanser (1995).
10. <https://ko.wikipedia.org/wiki/>
11. <https://susannahfullerton.com.au/the-eraser/>
12. <https://www.hmap.co.kr/post/view.php?no=7540>
13. https://www.windsortour.co.kr/B2B_mobile/tour_info/infor_list.asp?infor_cd=02&cd=A&nat_cd=BE&city=BRU&site_cd=1010
14. <https://www.joongang.co.kr/article/21969451>
15. https://en.wikipedia.org/wiki/Henry_Wickham
16. https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%A1%B4_%EB%B3%B4%EC%9D%B4%EB%93%9C_%EB%8D%98%EB%A1%AD
17. <https://blog.naver.com/kt9411/150158861212>
18. <https://macsmotorcitygarage.com/video-a-conversation-with-henry-ford-thomas-edison-and-harvey-firestone/>
19. <https://namu.wiki/w/>
20. <https://macsmotorcitygarage.com/video-a-conversation-with-henry-ford-thomas-edison-and-harvey-firestone/>
21. <https://www.bridgestone-korea.co.kr/ko/about/about-firestone>
22. https://en.wikipedia.org/wiki/Continental_AG#/media/File:Continental_plant_Philipbornstrasse_Hanover_Germany_04.jpg
23. <https://macsmotorcitygarage.com/video-a-conversation-with-henry-ford-thomas-edison-and-harvey-firestone/>
24. <https://www.bridgestone-korea.co.kr/ko/about/about-firestone>
25. <https://www.liveauctioneers.com/en-gb/price-result/ivory-billiard-balls-3-in-brunswick-balke-collender-d/>
26. https://www.researchgate.net/figure/John-Wesley-Hyatts-Celluloid-billiard-ball-20-National-Museum-of-American-History_fig15_351081018
27. <https://www.capture.hk/en/blog/analogue-media-1/film-cameras-37-50>
28. <https://namu.wiki/w/%EC%BD%94%EB%8B%A5>
29. <https://www.kodak.com/en/company/page/health-imaging-history/>
30. <https://calgolfnews.com/the-beginning-of-titleist-golf/>
31. H. Mooibroek, K. Cornish, *Applied Microbiol. Biotechnol.*, **53**, 355 (2000).
32. 한국고무학회 정보마당 고무산업통계(<https://rubber.or.kr/>).
33. R. W. Bulliet, “*The Wheel: Inventions and Reinventions*”, Columbia University Press (2016).