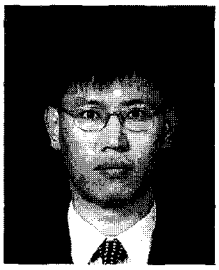
재활공학분야의 고무응용연구

이 석 민·김 경 훈·문 무 성

1. 재활공학의 개념

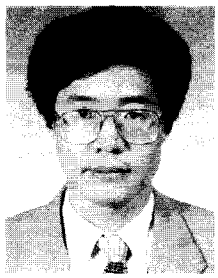
재활이란 미국 국립재활협회(National Council on Rehabilitation)에 의하면 심신장애자의 신체적, 정신적, 사회적, 직업적 또는 경제적 가용능력을 최대한으로 회복시켜주는 것으로 정의하고 있다.[1] 재활의 이념은 궁극적으로 인간의 가치실현에 두며, 재활은 장애자가 사회의 구성원으로서 가치를 실현할 수 있도록 모든 서비스를 제공하고, 이로써 장애자가 인간적으로 사회의 한 구성원으로서의 자기의 역할을 발견하고 성취하고자 할 때 삶의 보람을 느끼고 의욕있는 삶을 영위할 수 있게된다. 재활공학(Rehabilitation Engineering)은 장애자 재활을 위한 기술(technology)과 공학(engineering), 학습과 생활편의를 위한 자조용구 또는 보조공학(assistive technology), 그리고 재활기기 및 보조기구를 포함한다.[2] 미국의 재활법에 따르면 재활공학은 "교육, 재활, 취업, 교통, 독립적인 일상생활 그리고 레크리에션을 포함하는 분야에서 장애자들의 욕구를 충족시키며 장애자가 직면하는 난관에 대처하기 위한 기술공학, 공학방법론, 또는 과학적 원리의 체계적 응용"이라고 할 수 있다. 이로서 하나의 체계적이고 과학적인 재활공학이 이루어지기 위해서는 의학, 기계, 전자, 재료공학 등의 공학과 의학의 다각적인 협력체제가 구축되어야 한다. 재활공학에 주로 관련되는 연구 및 임상분야를 표 1에 나타내었다.[3-8]

재활공학에서의 소재 연구는 좁게는 신체의 접촉이 요구되는 재활기구(prosthesis)나 보조기



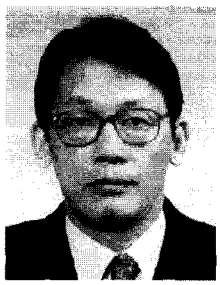
이석민

1985 서울대 공업화학과 공학사
1987 서울대 대학원 공업화학과 공학석사
1992 서울대 대학원 공업화학과 공학박사
1992 포항공대 화공과 연구원
1992~ 미국 Univ. of California, Santa Barbara, Material Research Lab. Post-doctoral Researcher
1995~2001 금호석유화학(주) 대덕연구소 전임연구원
2001~현재 재활공학연구소 재료공학실 책임연구원



김경훈

1973 숭실대 기계공학 공학사
1981 Georgia Tech. 기계공학 공학석사
1992 Purdue 대 기계공학 공학박사
1992~1994 Purdue 대 기계공학과 Post-doc.
1994~현재 재활공학연구소 책임연구원, 연구실장



문무성

1978 서울대 기계설계과 공학사
1982 서울대 대학원 기계설계과 공학석사
1992 Minnesota 주립대, 의료공학과 공학박사
1981~1985 동양공업전문대학 전임강사
1992~1993 Minnesota 주립대, 의료공학과 Research Associate
1993~1994 경희대 부속병원 정형외과, 연구교수
1994~현재 재활공학연구소 수석연구원, 연구소장

표 1. 재활공학을 구성하는 공학-의학 다학제 분야

공학	의학
기계설계(Machine design)	재활의학(Rehab. Med.)
인체공학(Human Eng.)	정형외과(Orthopedic Surgery)
전자제어(Control/s)	신경외과(Neuro Surgery)
재료공학(Material Eng.)	기타

(orthosis)에서부터 넓게는 체내에 이식되는 생체재료와 인공장기와 같은 방대한 분야에 이르며, 금속, 고분자, 고무, 세라믹 등 생체적합성을 지니면서 다양한 물리적 특성을 보이는 재료 전 분야에서 응용이 가능하다.

재활공학에서 사용되는 생체재료로서 요구되는 특성은 다음과 같다.[6]

(1) 생체적합성(biocompatibility)이 뛰어나야 한다. (신체접촉 또는 체내이식 시에 무독성이고 발암성(carciogenicity)이 없어야 하며, 화학적으로 비활성이고 안정해야 한다.)

(2) 기계적 강도가 있어야 한다.

(3) 내구성이 있어서 장기간 동안 재료의 특성을 유지하여야 한다.

(4) 가공과 제작이 용이하여야 한다.

(5) 값싸고 재생산성이 있어야 한다.

2. 재활공학에서의 고무응용 예

재활공학 제품분야에서 이용되는 고무의 응용예는 매우 다양하지만 여기서는 주요한 몇 개의 예에 대하여 간단히 소개한다.

2.1 소켓 라이너(Socket Liner) 와 패드(Pad)

장애자는 주로 선천적 또는 후천적 질병 또는 질병으로 인하여 신체의 일부가 절단 또는 마비된 사람을 말하며, 특히 사고 또는 당뇨병 등의 심혈관계 질환에 의하여 신체의 일부를 절단하게 되는 경우 운동능력을 회복하기 위하여 의지를 장착하게 된다.[2] 그림 1과 2에는 의지 사용시 사용하게 되는 소켓라이너와 패드의 그림을 각각 나타내었다. 절단장애자의 절단부(stump)상태에 따라 필요한 경우 소켓라이너를 착용하고 의지를 장착하게 된다. 또한 소켓제작시 절단부가 뼈가 돌출되어 있는 부분(bony prominence)의 소켓에 의한 압박을 최소화하기 위하여 소켓의 내부에 패드를 부착한다.

이들은 절단부에 뼈의 돌출부분과 혈액순환이 용이하지 않다든지 등의 이유로 정상적인 경우보다 환부상태가 취약하기 때문에 이를 보호하고 의지 착용시 발생하는 압력에 의한 통증을 방지해 준다. 소켓라이너와 패드의 소재로는 현재 실리콘탄성체가 주로 사용되고 있으며, 소켓라이너의 경우 당뇨병에 기인하는 말초신경변증에 의한 절단의 경우 체압분산의 효과가 뛰어난 우레탄탄성체가 사용되고 있다.[5] 이밖에도 열가소성탄성체(TPE)를 이용한 소켓라이너도 이용되고 있다. 현재 우리나라의 경우 각종 사고로 인한 절단 장애자가 많이 발생하여 착용감이 우수한 실리콘소재가 주종을 이루고 있으나, 미국 등의 선진국에서는 고령사회로 인하여 노인들의 당뇨병에 의하여 절단장애자가

(a) (b) (c)

그림 1. (a)소켓라이너와 (b)착용한 모습 (c) 의지를 착용한 모습

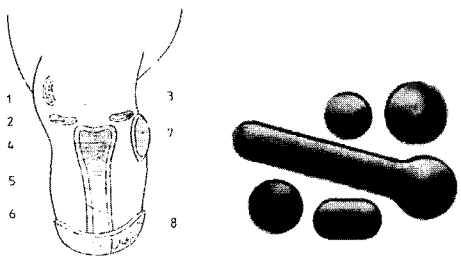


그림 2. 소켓의 내부에 부착되는 패드

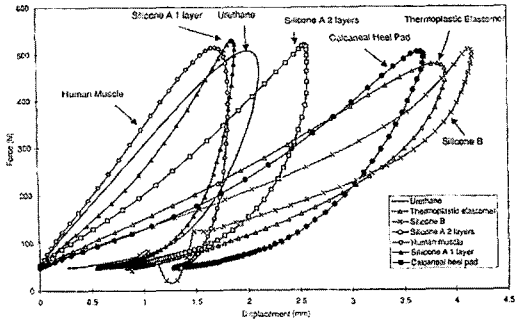


그림 3. 소켓라이너로 사용되는 여러 가지 탄성 체재료의 압축시의 기계적 물성

70%이상을 차지하여 우레탄소재가 더 많이 사용된다.

그림 3에서 보듯이 우레탄소재는 신체의 연부조직, 즉 근육 또는 피부와 비슷한 압축강도 및 연신율을 보이기 때문에 착용시 절단부에 가해지는 압력분산에 효과적이다. 동일한 압축강도에 대하여 변형의 정도를 비교할 때 우레탄고무와 인체의 생체조직이 가장 작은 수준이며, 다음이 실리콘과 열가소성 탄성체의 순서이다.

우리나라도 급속하게 고령사회화가 진행되고 있으며, 이러한 추세에 따라 우리나라에서도 실리콘 뿐만이 아니라 우레탄탄성체를 이용한 소켓라이너의 연구개발이 필요하다.

2.2 인공발 (Artificial Foot)

의지에 사용되는 인공발은 복합소재로 구성된 관절부와 우레탄고무로 구성된 외피부로 구성이 된다.[2] 관절부는 에너지를 저장하는 기능을 가지고 있어 보행을 자연스럽게 유지하게 하며, 우레탄 외피부는 최소 1백만 번 이상의 굴절테스트를 통해 우수한 내구성을 지녀야 한다. 1백만 번 정도의 굴절테스트를 통과해야만 최소 일년이상의 내구성을 지니게 된다. 우레탄고무는 주로 경질의 우레탄발포고무를 사용한다. 굴절테스트에는 폴리에테르계보다 폴리에스터를 soft segment로 사용하는 폴리우레탄이 더욱 적합한 것으로 알려져 있다. 그림 4에는 인공발의 예를 나타내었다. 그림 5에는 인공발의

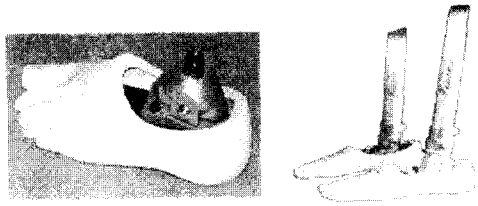


그림 4. 인공발과 의지 pylon에 장착된 예시.

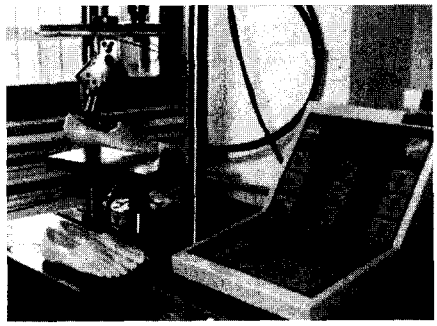
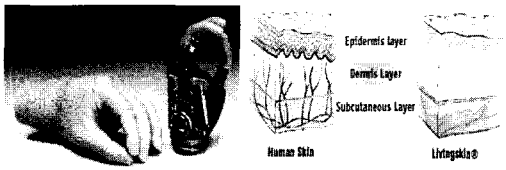


그림 5. 인공발의 기능 및 내구성 테스트

기능 및 내구성을 측정하기 위하여 굴절테스트하는 모습을 나타내었다.

2.3 인공 미용피부 (Artificial Cosmetic Skin)

재활기기와 보조기구가 주로 기능회복 위주의 목표를 구현하고 있는 반면, 장애자들은 육체적인 불편함뿐만 아니라 심리적으로도 장애에 대한 고통과 어려움을 겪고있다. 외양적인 면에서 신체일부를 상실한데서 오는 심리적인 어려움을 극복하기 위한 한 방법으로 실리콘고무를 이용한 인공 미용피부를 사용한다. 단순한 미용소재뿐만 아니라 잔존하는 피부와 접촉하는 부분에서 공기의 투과성을 부과하는 고기능성을 지니면서 외양적인 면에서 실제의 피부와 유사하게 보여서 심리적인 치료 및 재활에 최대의 효과를 기대할 수 있다. 그림 6에는 전자손4과 기능성 인공미용 피부(Livingskin)와 이의 구조를 나타내었다.



(a) (b)

그림 6. (a)전자손과 실리콘고무를 이용한 인공미용피부와 (b) 기능성 인공미용피부의 구조

2.4 인공 근육 (Artificial Muscle)

사고나 질병으로 인하여 망실된 신체의 근골격계 근육을 재건하기 위하여 생체모방형의 고분자구동체를 이용하여 근골격계 인공근육을 개발하려는 연구는 최근 10년 전부터 미국 등의 선진국을 중심으로 활발하게 이루어지고 있다.[3] 근육은 대뇌로부터 신경신호에 의하여 명령이 전달되어 체내의 화학적 환경을 변화시킴으로써, 즉 체액의 수소, 칼슘, 칼륨의 이온농도의 변화에 의하여 ATP를 ADP로 분해되면서 발생하는 에너지를 이용하여 운동을 하게되는 일종의 점탄성을 지니는 생체재료이다. 그림 7에 나타내듯이 등장성(isotonic)과 등척성(isometric)의 특징을 지니고 있다.

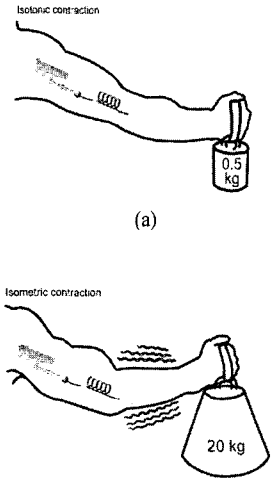


그림 7. 근골격계근육의 (a) 등장성(isotonic)과 등척성(isometric)의 예시

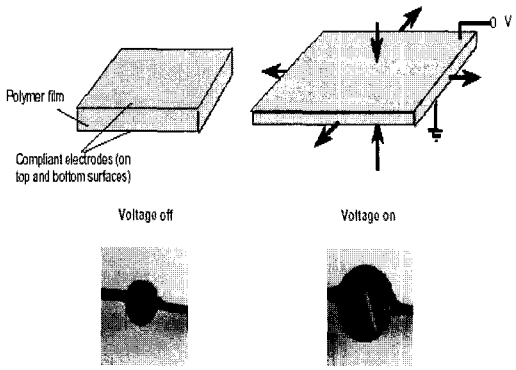


그림 8. 유전성탄성체의 전기적 변형의 예시

등장성이란 동일한 힘을 유지하면서 수축과 이완을 통하여 변형을 변화시킬 수 있는 특성을 가리키며, 등척성이란 동일한 변형을 유지하면서 힘을 변화시킬 수 있는 특성을 말한다. 가령 아령으로 팔운동을 하는 경우가 근육의 등장성에 해당되며, 잠긴 문의 손잡이를 당기는 운동이 근육의 등척성에 해당되는 예라 할 수 있다.

인공근육으로 주로 관심을 갖는 소재로는 이온성고분자의 금속복합체(IPMC 또는 ionic polymer metal composite)와 유전성탄성체를 들 수 있다.

특히 유전성탄성체의 경우 강유전성과 낮은 탄성율을 지니는 탄성체가 이에 적합하다. 이는 전위를 인가하면 유도쌍극자 모멘트에 의하여 변형을 하는 특성을 보인다. (그림 8) 미국의 SRI International사에서는 실리콘, 우레탄, 아크릴탄성체를 이용하여 전기반응고분자(electrostrictive polymer)로 제조하여 전기신호변화에 수축과 팽창을 반복하는 연구결과를 보고하였다.

이런 전기적 반응은 구동력과 변위의 인공근육의 구성요소 관점에서 볼 때 그림 9에서 보는 바와 같이 인체의 생체근육과 유사한 구동특성을 보이는 것으로 알려져 있고, 따라서 인체 근골격계에 사용되는 인공근육으로 개발될 가능성이 높은 것으로 보인다. 구동력을 향상시키기 위한 방법으로 유전성탄성체에 이온성 관

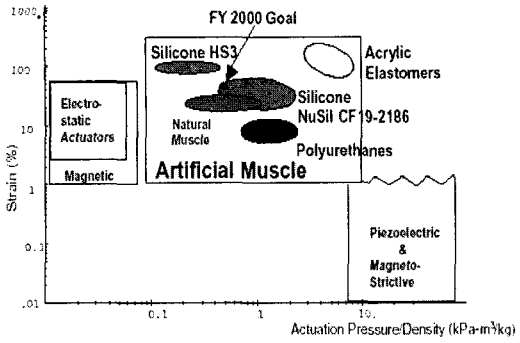


그림 9. 유전성탄성체의 구동특성 비교

능기를 도입하여 새로운 이온성 탄성체를 이용하는 방법이 연구되고 있다.

2.5 욕창방지시트 (Seat Preventing Bedsore)

절단 또는 마비 장애자가 휠체어를 이용하는 경우, 장시간동안 앉아 있게 될 때 발생하는 체압에 의하여 욕창이 발생하게 된다.[1] 욕창은 그림 10에 나타낸 바와 같이 피부에 압력이 지속적으로 인가될 때 혈액순환에 장애가 발생하고 장시간 지속되면 피부 및 근육조직이 손상되고 나아가서는 괴사가 발생하게 된다.

마비환자의 경우 특히 욕창이 발생해도 느끼지 못하기 때문에 그 피해는 훨씬 심해질 수 있다. 따라서 욕창을 방지하기 위하여 체압을 분산시켜 주는 기능의 방석시트가 필요하며, 소재로서 공기주머니, 물주머니, 겔 또는 폼 형태의 고분자탄성체 등이 이용된다 (그림 11). 공기 주머니형에서는 내약품성이 우수한 네오프렌과 같은 불소계 고무컴파운드를 사용하게 되고, 겔은 실리콘 또는 우레탄를 부분 가교시킨 탄성체, 폼은 발포우레탄 탄성체가 많이 사용된다. 요구되는 물성은 기본적으로 내약품을 비롯하여 환자의 분비물 등에 의한 감염이나 오염을 방지하기 위한 항균성 또는 방부성의 기능이 요구된다. 그림 12에는 욕창방지 방석에 사람의 둔부에 해당하는 압력을 인가하였을 때 발생하는 체압의 분산을 나타내는 예시이다. (a)는 체압이 효과적으로 분산이 되는 양상이며, (b)는 체압의 분산이 효과적으로 이루어지지 않아 둔부에 압력이 집중되는 현상을 볼 수 있다.

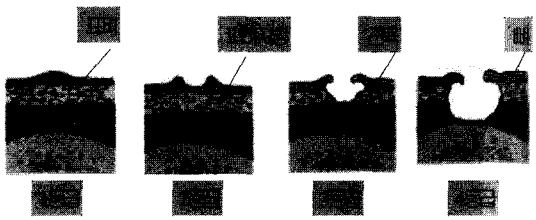
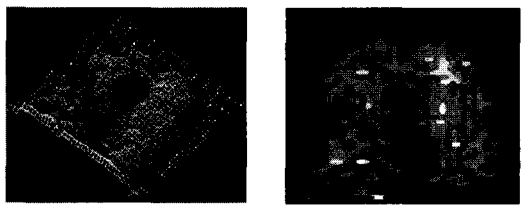


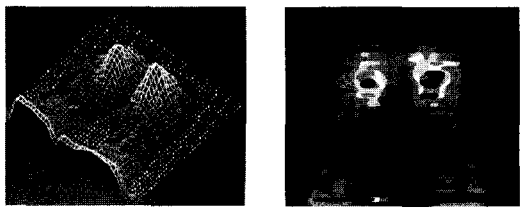
그림 10. 욕창의 진행 모식도

(a) (b) (c)

그림 11. (a) 공기주머니 형, (b) 겔타입 탄성체형 (c) 폼타입 탄성체형 욕창방지시트



(a)



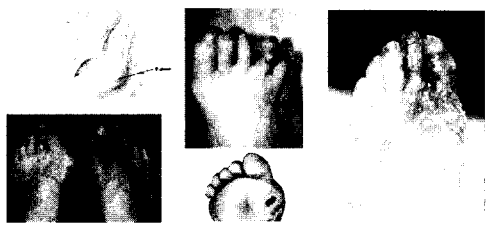
(b)

그림 12. 욕창방지방석의 체압분산테스트 (a) 둔부의 압력을 효과적으로 분산시키는 소재 (b) 둔부의 압력을 효과적으로 분산시키지 못하는 소재

2.6 발변형방지 신발

고혈압이나 당뇨병 등에 의하여 심혈관계에 이상이 발생하면 순환장애에 의하여 장기적으로는 말초부위, 특히 심장에서 먼 발 부분에 병이 발생하게 되며, 발의 변형이나 피부와 근육의 괴사가 유발된다. 류마치스 관절염 또는 신발의 요인에 의한 발의 기형적 변형, 내외반증 망치족 등의 질병이 발생하게 된다. 그림 13는 이러한 여러 가지 요인에 의하여 발생될 수 있는 기형적인 발의 변형과 당뇨병에 의해 조직이 괴사되는 발의 사례를 나타낸다.

발변형을 방지하거나 당뇨환자의 발을 보호하기 위한 신발의 기능은 매우 중요하며 적절할 기능을 지니는 신발소재의 선택이 이루어져야 한다. 기본적으로는 보호기능으로서 당뇨발은 상처나기 쉬우며 상처가 났을 경우 치료 역시 어려워 부드럽게 보호를 해줄 수 있어야 하며, 세균번식을 억제하기 위하여 통기성이 뛰어나야 한다. 또한 균형성이 우수하여야 하며 이는 족관절, 족궁(Arch)의 균형을 잡아서 변형된 형태의 보행이 되지 않도록 한다.



(a) (b)

그림 13. (a)변형된 발과 (b)당뇨발의 사례

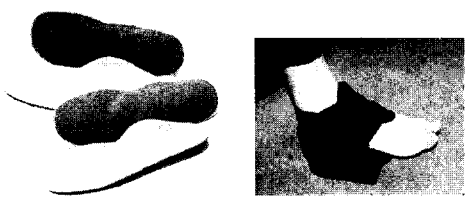


그림 14. (a) 당뇨발을 위한 깔창과 (b) 족압제거신발의 사례

이러한 발보호 신발의 안창(insole)은 여러층의 고무소재를 적층하다던지 하는 방법을 사용하여 보호기능, 통기성, 균형성 등의 기능을 부여하게 된다. 바칼창(outsole)은 충격방지 기능을 지니는 발포폼 등으로 구성된 내마모성 우레탄고무을 사용하게 된다. 그림 14에는 당뇨발에 사용되는 신발의 인솔이나 깔창과 족압제거 신발의 외국제품 착용사례를 나타내었다.

2.7 인공수정체

ICL(Implantable Contact Lens; 안내삽입콘택트렌즈)은 특히 고도근시 및 원시의 시력교정을 위하여 각막을 그대로 보존하고 원래의 수정체 위에 삽입할 수 있도록 고안된 특수렌즈이다.

ICL 렌즈는 현재까지 알려진 모든 굴절수술과 비교할 때 가장 투명하고 우수한 시력을 제공하며, 특히 수술과정이나 수술 후에도 각막조직에 손상을 주지 않는 우수한 장점이 있다. 소재로서는 굽힘특성과 함수율 등의 생체적합성을 지녀야 하며 아크릴고무와 실리콘 탄성체가 사용된다. (그림 15) 또한 400nm이하의 유해한 자외선은 차단시켜 줌으로써 눈의 시력을 보호할 수 있다. 제조는 일반적으로 cast-molding을 하게 되며, polyimide로 제조된 공막이 함께 구성된다. 눈의 수정체와 홍체사이를 절개하여 영구 이식하게 된다.

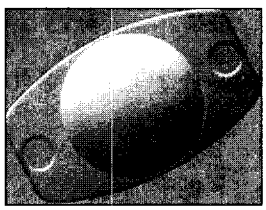


그림 15. 실리콘으로 제조된 인공수정체

2.8 인공장기

최근 활발히 연구가 진행되고 있는 인공장기의 경우 그 적합한 소재의 선택은 매우 중요하

다.[5-8] 인공장기는 체내에 이식되기 때문에 세포 조직과 혈액에 대한 적합성, 염증과 발암성이 없어야 하는 안전성, 소재의 장기적 안정성 및 내구성 등이 요구되며, 이러한 요건들을 정교하게 만족시키지 못하면 오히려 치명적인 결과를 가져 올 수 있다. 대표적인 인공장기로는 인공심장을 들 수 있다. 인공심장이란 심장기능의 일부 또는 전체를 대신할 수 있는 의료기기로서 크게 심실보조장치와 완전이식형 인공심장으로 구분된다. 1982년 미국 유타대학에서 외부공기구동형 인공심장이 처음 시술되어 112일 동안 생명을 유지 시킨 후 1985년에는 620일 동안 생존시키는 등 외부구동형 인공심장은 심장을 이식받을 때까지 환자의 수명을 연장하는데 긴요하게 쓰이고 있다. 현재는 세계 각국이 몸 속에 완전 이식하는 완전내장형 인공심장을 개발하고 있으며, 각국이 집중연구 중이지만 다른 인공장기보다는 실용화의 진전이 느리다. 소재로 우레탄탄성체 또는 공기투과성을 감소시킨 우레탄 탄성체 나노복합재를 사용한다. 인공심장의 모식도는 그림 16에 나타내었다. 이밖에 인공장기에 사용되는 고무의 예는 표 2에 나타내었다.

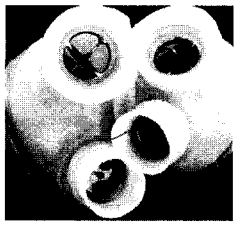


그림 16. 우레탄탄성체로 제작된 인공심장 (인공심장판막과 인공혈관이 부착되어 있다.)

표 2. 인공장기 및 의료용에 사용되는 고무의 예

인공장기	고무종류
심장	우레탄, PVC
식도, 기관	천연고무, 우레탄, 실리콘, PE
혈관	우레탄, Polyester, PTFE
유방	실리콘, 우레탄
귀, 턱, 코	실리콘
카테터	천연고무, 우레탄, 실리콘

2.7 기 타

이밖에도 장애인이나 노인들을 위한 욕조, 배면기 등의 개호용품이나 운동 등에 사용되는 재활기기 등에 많은 고무부품 등이 사용되고 있으며, 이러한 제품들은 비교적 낮은 기술수준으로도 개발이 가능하나 국내에서는 시장상황이 제한되어 있어 많은 제품들이 아직 수입에 의존하고 있다.

3. 맺 음 말

우리나라는 재활공학에서의 소재 및 제품 개발은 지금까지는 사회적 또는 국가적인 관심부족과 기술 및 시장성이 열악하여 매우 낙후되었다. 이 분야는 현재 고무뿐만 아니라 거의 모든 소재와 제품분야에서 영세성을 면치 못하거나 수입에 의존하고 있다. 우리가 경제적 또는 산업적인 고도성장을 추구할 때, 한편으로 장애자 및 노인들의 복지와 이에 관련된 소재, 기술 및 제품개발은 외면되어 왔다. 세계보건기구에 의하면 세계전체인구의 10%가 장애자이고, 이중 60%가 지체장애자이며 사회가 고령화될수록 장애자의 비율이 급격히 증가하고 있다. 우리나라도 21세기를 맞이하여 고령사회로의 진입이 가속화되고 있으며, 각종 사고와 성인병에 의한 후천적 절단 및 마비장애자의 수가 급증하고 있다. 이제는 사회적, 국가적으로 뿐만 아니라 각 개개인과 과학기술자들도 관심을 갖고 관련 소재, 제품개발 및 산업육성을 해 나가는 것이 매우 절실하다.

참 고 문 헌

1. 김진호, 한태륜 "재활의학" 군자출판사 2002.
2. 박윤기, 이재학, 황현교 "보조기 및 의수족" 고문사1986.

3. Yeseph Bar-Cohen "Electroactive Polymer Actuators as Artificial Muscles" SPIE Press 2001.
4. 김남균 외 "의공학개론" 여문각 2000.
5. Nina M. K. Lamba, "Polyurethanes in Biomedical Applications" CRC Press, 1998
6. Buddy D. Ratner "Biomaterials Science- An introduction to materials in medicine" Academic Press, 1996.
7. Fredrick H. Silver "Biomaterials Science and Biocompatibility" Springer 1999.
8. M. Szycher "Biocompatible polymers, metals, and composites" Technomic Pub. Co. Lancaster, 1983.