



금 상

방사선 이용 분야 개발

노 영 창

한국원자력연구소 동위원소·방사선응용연구팀 책임연구원

다음은 이번 원자력기술상 수상과 관련된 주요 기술 개발 내용이다.

인공 고관절 제조 기술 개발

인공 고관절 이식술이란 질병이나 사고로 인하여 손상된 대퇴골에 인공 고관절 기구(hip prosthesis)를 이식하고 골반(pelvis)쪽에 비구컵을 이식하여 두 부분을 서로 고정시키는 시술이다. 이 때에 인공 고관절 기구를 대퇴골에 고정할 때 PMMA 폴시멘트가 사용, 접착된다.

이 수술에서 발생하는 문제점들 중 한 원인은 인공 고관절 기구와 비구컵의 무균성 루스닝(aseptic loosening)이다.

이 두 부분은 서로 연결되어 있기 때문에 어느 한쪽에 루스닝이 오면 다른 한 쪽의 루스닝을 초래한다. 따라서 비구컵 쪽의 루스닝을 막기 위해 컵의 뒷면에 음각을 파서(grooving) 폴시멘트(bone cement)와 기계적 고정(mechanical interlocking)을 유도하는 것이 현재까지의 방법이다.

그러나 비구컵의 재질인 초고분자량 폴리에틸렌은 아주 소수성이기 때문에 폴시멘트와의 접착력이 거의 없다.

본 연구팀에서는 초고분자량 폴리에틸렌 표면에 극성인 단량체, 즉 메틸메타크릴레이트를 방사선에 의해 그라프트 중합시켜 표면 처리함으로써 초고분자량 폴리에틸렌과 폴리메틸메타크릴레이트 접착제와의 접착력을 혁신적으로 향상시킬 수 있는 기술을 개발하였다.

비구컵으로 사용되는 초고분자량 폴리에틸렌은 플라스틱 중에서 가장 내마모성이 우수하여 비구컵의 재질로 사용되고 있다.

초기에는 테프론(teflon), 아세탈수지(acetal resin) 등도 재료로서 검토된 바 있으나, 초고분자량 폴리에틸렌에 비해 내마모성이 좋지 못한 것으로 판명되었다.

인공 고관절 이식에서 가장 문제가 되는 것은 비구컵의 초고분자량 폴리에틸렌의 마모 문제이다.

환자에 이식한 후 문제가 있어서 재이식 수술(revision arthroplasty)



원 자력을 우리 생활에 이용하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 핵분열에 의해 나오는 에너지를 이용하는 방법이 있고, 다른 하나는 방사성 물질에서 나오는 방사선을 이용하는 것이다. 방사선은 암의 치료에 널리 이용되고 있는 점은 둘째로 치더라도 1회용 주사기·거즈·붕대·수술용 장갑 등 각종 의료 기기를 안전하고도 완벽하게 멸균·소독하는 데 매우 효과적으로 이용되고 있으며, 뿐만 아니라 농·공업 분야에서도 헤아릴 수 없을 정도로 많이 이용되고 있다.

을 수행하고난 후 회수한 초고분자량 폴리에틸렌 비구컵을 분석한 결과, 마모에 의한 경우가 대부분이었다.

그것을 세부적으로 구분하여 보면, 분리형성층(delamination), 함요형성(pitting), 박리(abrasion), 스크래치(scratch), 연마(burnishing), 변형(deformation) 등으로 구분된다.

즉 초고분자량 폴리에틸렌이 내마모성이 가장 우수한 플라스틱일지라도 금속의 볼 헤드(ball head)나 세라믹과 수없이 반복하여 마찰되기 때문에 마모를 피할 수 없으며 이것이 인공 관절 이식 수술에 있어 가장 큰 문제점으로 되고 있다.

현재 대체적인 통계에 의하면, 비구컵의 평균 수명은 활동량이 많은 젊은 환자에 시술한 경우는 7~8년 정도, 상대적으로 활동량이 적은 노인 환자에게 시술한 경우는 10~15년 정도 사용될 수 있는 것으로 알려져 있다.

이처럼 인공 고관절의 수명은 비구컵의 재질인 초고분자량 폴리에틸렌의 마모도와 밀접한 관계를 갖고 있으므로 내마모성을 향상시키는 일이 의학적으로 시급하게 요구되고 있다.

현재까지 이러한 인공 관절 이식에 있어서 마모 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔지만 뚜렷한 성과는 없었다.

구체적으로 비구컵의 마모가 적게 일어나도록 하기 위해 볼 헤드를 금속 대신 세라믹 소재로 대체하는 연

구가 추진되고 있기도 한다.

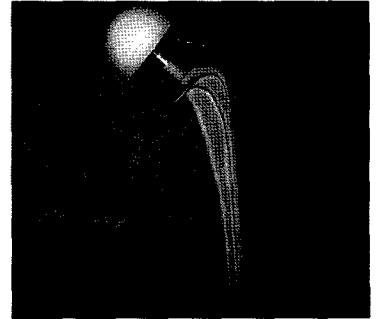
초고분자량 폴리에틸렌으로 비구컵을 가공할 때 190~300℃, 2,800 기압 이상의 압력을 가하여 가공하면 결정화도가 증가하여 내마모도를 향상시킬 수 있다고 발표하고 있으나, 초고분자량 폴리에틸렌의 가공이 수천 기압을 적용하는 것은 상업적으로 적용하기 매우 어려운 기술이다.

이밖에도 초고분자량 폴리에틸렌 시이트에 초고분자량 폴리에틸렌 섬유를 보강하여 내마모성을 증가시키는 실험을 추진한 결과, 인장 강도와 탄성률은 향상되었지만 효과적으로 내마모성을 향상시키지는 못하였다.

이처럼 볼 헤드의 소재 변환, 초고분자량 폴리에틸렌의 고온·고압에서의 가공, 폴리에틸렌 혹은 카본 섬유의 보강 등 다양한 방법으로 내마모성을 증가시키기 위한 연구가 진행되어 왔으나, 효과적인 방법으로 밝혀진 것은 아직 없는 상황이다.

위와 같은 인공 관절의 마모 문제를 해결하기 위해 방사선에 의해 고분자 재료가 가교되는 성질을 이용하여 초고분자량 폴리에틸렌의 내마모성을 향상시키기 위한 연구를 수행하던 중, 초고분자량 폴리에틸렌을 이용하여 비구컵을 압축 성형한 후 즉시 급냉하고 질소나 진공중에서 방사선 조사로 처리하면 가교 효율이 극대화하여 내마모성이 현저히 증가함을 확인하였다.

이와 같은 기술을 이용하여 인공



(그림 1) 제작한 인공 고관절

고관절의 시제품을 제조하였으며(그림 1), 중소기업과 기술 협력하여 실용화 기술을 개발중에 있다.

방사선을 이용하여 비구컵의 마모도를 줄임으로써 인공 관절의 수명을 연장시킬 수 있고, 이 기술을 이용하여 인공 고관절의 국산화시 국내 보건 의료 기술의 향상과 외화 절약이 가능할 것이며, 또한 전량 수입에 의존하고 있는 인공 고관절의 제조 기술이 상용화되면 값싼 인공 고관절의 공급이 가능할 것이다.

방사선 멸균용 주사기 원료 개발

폴리프로필렌은 섬유, 로프, 각종 가정 용기, 포장 필름 등의 재료로 사용되는 등 그 용도가 매우 다양하다.

여러 종류의 고분자 중에서 폴리프로필렌은 자체의 독성이 없고, 투명성과 물리적 성질도 우수하여 의료 제품의 원료로 가장 많이 사용된다.

폴리프로필렌이 의료용품으로 사용되기 위해서는 멸균 공정이 필수적



인데, 현재 국내에서는 에틸렌옥사이드 가스에 의한 멸균에 의존하고 있는 형편이다.

에틸렌옥사이드 가스는 발암성 물질로 규정되어 선진국에서는 점차 규제가 심해지고 있는 상황이어서 수출에 의존하고 있는 국내 산업 구조로서는 다른 방법으로의 전환이 절실히 요구되는 상황이다.

한편 선진국에서는 이미 방사선에 의한 의료품의 멸균 기술이 개발되어 산업적으로 광범위하게 이용되고 있다.

방사선 멸균법은 단위 멸균이 아니고 계속적인 멸균 공정이 수행 가능하며, 간편하면서 멸균 효과가 확실하다는 특징을 갖고 있다.

또한 감마선은 높은 투과성, 완전 포장 상태에서 멸균하기 때문에 2차적인 미생물의 감염 가능성이 없다.

그러나 기존의 국산 폴리프로필렌은 방사선 조사중과 방사선 조사 후에 발생하는 착색 현상이나 물리적 강도 등의 현저한 열화로 인하여 이들 재료로 생산되는 일회용 주사기 등 많은 의료 제품에 방사선 멸균법을 적용하지 못하였다.

국내에서 주로 사용하는 에틸렌옥사이드 가스는 발암성 물질로서 선진국에서는 극심한 규제를 받고 있으며 앞으로도 그 이용은 점차 어려워지는 상황이다.

폴리프로필렌은 방사선 조사시 가교 반응보다는 분해 반응이 우세하여 조사 조건과 결정도에 따라 약간의

차이가 있으나 G(S)/G(X)의 값이 대략 1.1~1.5 정도인 것으로 보고되고 있다.

폴리프로필렌은 방사선 조사중에서 뿐만 아니라 조사 후에도 결정성 부분에 남아 있는 라디칼과 공기중의 산소와 반응, 즉 산화 분해 반응에 의해 재질의 열화가 지속된다.

이와 같은 조사중 및 조사 후의 물성 변화와 착색 현상을 감소시키기 위해 여러 종류의 첨가제와 조사 조건에 대한 연구가 많은 방사선 화학자들에 의해 진행되어 왔다.

한국원자력연구소와 호남석유화학(주)의 공동 연구를 통하여 방사선에 의해 착색이나 강도, 신장률이 방사선 조사 전후 변화가 없는 내방사선 폴리프로필렌을 개발하였다. 앞으로 일회용 주사기·포장재 등에 사용될 전망이다.

방사선 이용 흡착제 제조

오래 전부터 사용되고 있는 탈취제로서는 활성탄이나 제올라이트 등의 무기물이 주류이지만 암모니아 가스, 황화수소, 질소 산화물 등의 유해 가스에 대한 흡착력은 극히 낮다. 또 종래의 흡착제는 입상이기 때문에 성형 가공면에서 한계가 있다. 따라서 흡착 표면적이 큰 필터 등의 중요성이 요구되게 되었다.

방사선 그래프트 중합법은 가공이 용이한 직포·부직포·합성지 등의

기존 소재의 특성을 손상하지 않고 이온이나 탈취 성분의 흡착 기능을 도입하는 특징을 갖고 있다.

본 연구팀에서는 기존의 섬유 소재에 방사선을 조사하고 여기에 스틸렌이나 아크릴산 등의 단량체를 그래프트 반응시키고 관능기를 도입하여 섬유형 유해 가스 흡착제를 제조하는 기술을 개발하였다.

개발된 유해 가스 흡착 부직포는 반도체 제조 공장의 청정실에 사용이 가능하기 때문에 벤처 기업인 카엘환경(주)와 특허 기술 실시 계약을 체결하고 기술 이전중에 있다.

중금속 흡착막의 제조

납이온(Pb²⁺)을 효과적으로 제거할 수 있는 새로운 중공사막을 합성하였다.

방사선 그래프트 중합법을 이용하여 폴리에틸렌 중공사막에 GMA를 그래프트시킨 후, IDA(imino diacetic acid)를 도입하여 킬레이트형 막을 제조하였다. 폴리에틸렌 중공사막에 GMA를 그래프트시켜 80% 그래프트율의 중공사막을 0.425M IDA 수용액으로는 반응이 진행되지 않아서 디메틸술폭사이드/물, 메탄올/물, 에탄올/물, 디옥산/물, 디메틸포름이드/물, 아세톤/물, 테트라하이드론/물, 혼합 용매에서 반응시켰다. 디메틸포름아마이드/물 혼합 용액에서 IDA가 가장 많이 도입되었다.

IDA의 함량이 1.29 mmol/g인 킬레이트형 중공사막을 선택하여 Pb^{2+} 이온의 흡착능을 측정하였다.

이 막을 사용하여 고농도의 나트륨 및 칼슘 이온이 존재한 상태에서 유해 중금속인 납의 흡착 특성에 대하여 검토하였다.

IDA 함량이 1.29 mmol/g인 킬레이트형 중공사막에 20, 50, 그리고 100ppm Pb^{2+} 이온을 통과시켜 Pb^{2+} 이온의 흡착량을 측정한 결과 납의 농도에 관계없이 약 35.0 g/kg로 일정하였다.

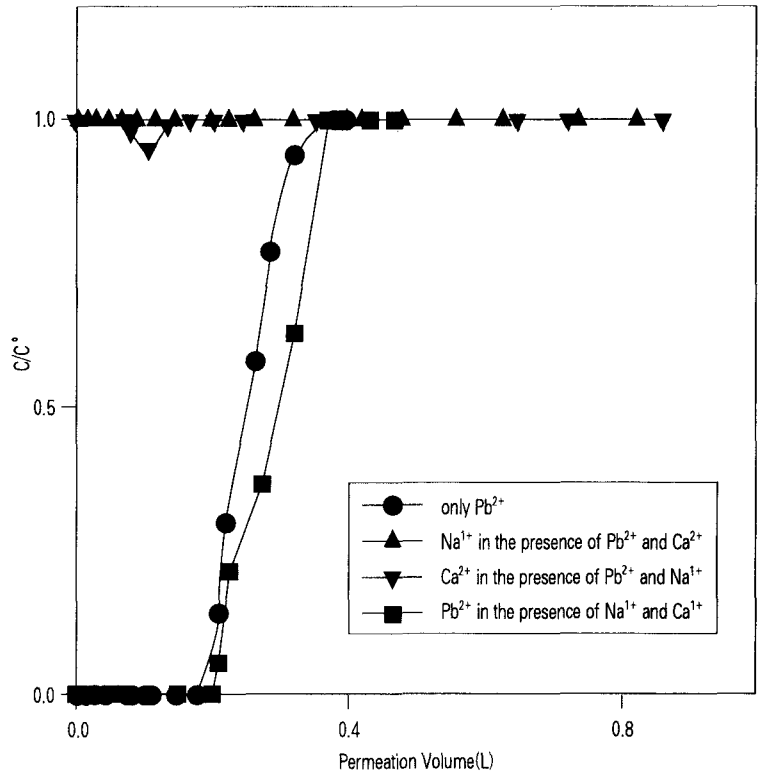
나트륨과 칼슘 이온을 각각 500ppm 증류수에 용해시키고, 여기에 다시 50ppm의 Pb^{2+} 를 용해시킨 수용액을 IDA의 함량이 1.29 mmol/g인 킬레이트형 막에 통과시켜 Pb^{2+} 에 대한 선택적 흡착 특성에 대하여 검토했다.

또한 나트륨과 칼슘을 용해시키지 않고, Pb^{2+} 만을 50ppm 용해시킨 용액에 대하여도 같은 함량의 IDA가 도입된 중공사막을 사용하여 Pb^{2+} 흡착량에 대하여 조사하였다.

합성한 IDA기가 도입된 중공사막은 고농도의 칼슘과 나트륨 이온이 공존해 있는 상태에서도 같은 양의 Pb^{2+} 만을 선택적으로 흡착하였다 (그림 2).

납 이온이 흡착된 중공사막에 0.5M, 1.0M HCl 용액을 투과시켜 탈착 여부를 확인하였다.

염산의 농도가 높을수록 탈착 속도



〈그림 2〉 나트륨, 칼슘이온 공존하에서 납이온의 흡착 특성(50ppm Pb^{2+} , 500ppm Na^+ , 500ppm Ca^+)

는 컷으나 HCl의 농도에 관계없이 Pb^{2+} 이온의 탈착량은 일정하였고 흡착된 Pb^{2+} 이온은 모두 탈착되었다.

이와 같이 염산으로 탈착시킨 킬레이트형 막에 다시 Pb^{2+} 이온을 재흡착시킨 결과 처음의 흡착 곡선과 같은 경향을 나타내어, 이 킬레이트형 막은 재현 성능이 아주 뛰어난 사실을 알았다.

또한 우라늄만을 선택적으로 제거하기 위해서 폴리에틸렌 중공사막에 아크리로나이트릴을 반응시키고, 하이

드록시아민을 반응시켜 킬레이트형

중공사막을 합성하였다. 아크리로나이트릴의 그래프트율이 85%인 폴리에틸렌 중공사막을 6.5%의 하이드록실 (NH_2OH)과 반응시켜서 아마독심기(amidoxime group)를 갖는 킬레이트형 중공사막을 합성하였고, 이것으로 우라늄 이온의 흡착 특성을 검토하였다.

UO_2^{2+} 이온 농도를 30ppm로 만들어 아마독심기 함량이 0.95, 2.50, 3.57 mmol/g인 킬레이트형 중공사막의 흡착 특성을 조사한 결과 UO_2^{2+} 이온의 흡착량은 12.6, 25.3,



그리고 42.2g/kg이었다.

나트륨과 칼슘 이온을 각각 300ppm 증류수에 용해시키고, 여기에 다시 30ppm의 UO_2^{2+} 를 용해시킨 수용액을 아미독심기의 함량이 3.57mmol/g 인 킬레이트형 막에 통과시켜 UO_2^{2+} 에 대한 선택적 흡착 특성에 대하여 검토했다.

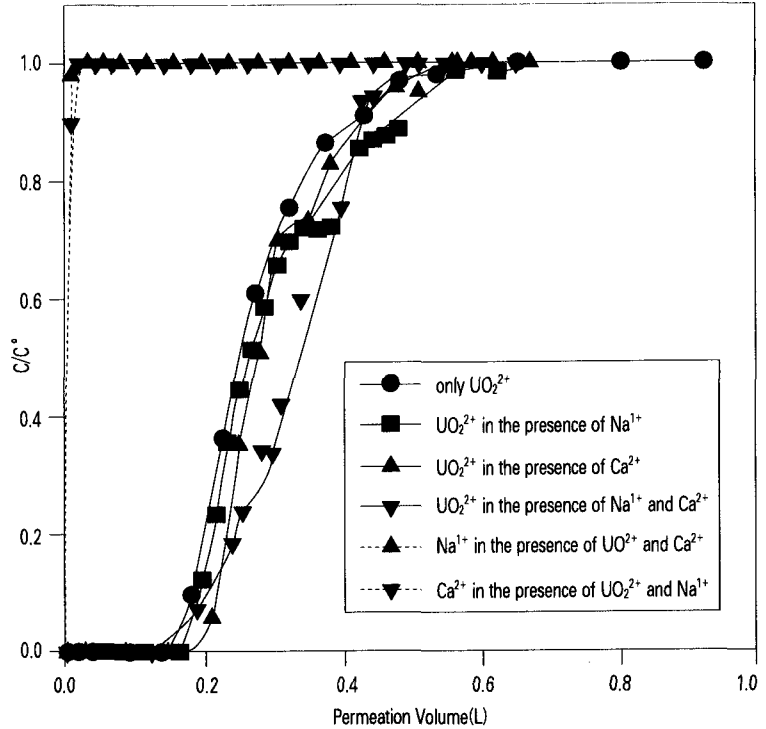
또한 나트륨과 칼슘을 용해시키지 않고, UO_2^{2+} 만을 30ppm 용해시킨 용액에 대하여도 똑같은 농도의 아미독심기가 도입된 증공사막을 사용하여 UO_2^{2+} 흡착량에 대하여 조사하였다.

본 실험에서 사용한 아미독심기가 도입된 증공사막은 고농도의 칼슘과 나트륨 이온이 공존해 있는 상태에서 같은 양의 UO_2^{2+} 만을 선택적으로 흡착하였다(그림 3).

아미독심기의 함량이 3.57 mmol/g 인 킬레이트형 증공사막에 0.5M, 1.0M HCl 용액을 투과시켜 탈착 여부를 확인하였다.

염산의 농도가 높을수록 탈착 속도는 컸으나 HCl의 농도에 관계없이 UO_2^{2+} 이온의 탈착량은 일정하였고 흡착된 UO_2^{2+} 이온은 모두 탈착되었다.

이와 같이 염산으로 탈착시킨 킬레이트형 막에 다시 UO_2^{2+} 이온을 재흡착시킨 결과 처음의 흡착 곡선과 같은 경향을 나타내어, 이 킬레이트형 막은 재현 성능이 아주 뛰어난 사실을 알았다.



(그림 3) 나트륨, 칼슘이온 공존하에서 우라늄 이온의 흡착 특성(30ppm UO_2^{2+} , 300ppm Na^+ , 300ppm Ca^{2+})

수상 소감

본인은 85년 한국원자력연구소에 입소하여 지금까지 주로 방사선을 이용한 고분자 재료의 질을 향상하는 연구를 수행해 왔다.

방사선을 이용한 흡착제 개발, 방사선으로 멸균 처리할 수 있는 1회용 주사기 플라스틱 재료 개발, 방사선을 이용한 인공 고관절 제조 기술 등을 개발하였고, 98년 한해에만 국내에 6편, 외국에 12편의 논문을 게재하였으며, 26편의 논문을 국내외에 발표하였고, 4건의 특허를 출원

하였다.

앞에서 언급한 기술 개발과 논문 발표에 대한 공로를 인정받아 이번 원자력기술상을 수상하게 된 것 같다.

원자력산업회의에서 매년 원자력 기술 발전의 공로자에게 포상을 하여 원자력 종사자에게 기술 개발 및 연구에 매진할 수 있는 동기를 부여하여 주신 데 대하여 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드리며, 본인의 원자력 증장기 과제에 참여한 연구원들에게 고마운 마음을 전하고 싶다.

