

| 감마-펩타이드를 이용한 나선구조 모방체

감마-펩타이드와 우레아/아마이드(urea/amide, U/A)와 우레아/카바메이트(urea/carbamate, U/C) 단위가 조합된 새로운 헤테로 폴다머(heterogenous foldamers)가 보고되었다. 프랑스 연구진은 구조 연구를 통해 이들 폴다머들(foldamers)이 수소 결합에 의해 어떻게 나선 구조를 생성했는지 보고했다. 연구 결과는 2013년 4월 8일자 *Angewandte Chemie International Edition*에 보고되었다.

생체 고분자의 구조와 기능은 폴다머라고 불리는 잘 정립되어 있고 예측할 수 있는 폴딩 패턴을 가진 합성물인 올리고 골격구조를, 디자인하고 합성하며 이들의 물리화학적 특징을 조사하는데 영감을 주었다. 폴다머 구조체의 다양성은 구성 단위의 화학적인 다양성에서 기인한 것으로, 구조 제약과 폴딩을 촉진하는 방법들이 개발되어 왔다. 핵산과 단백질 같이 많은 폴다머 골격구조는 서브유닛 중 하나로 만들어지며 이들의 다양성은 일반적으로 결가지 사슬을 통해 만들어진다. 베타와 감마-펩타이드, 방향족성 텔라-펩타이드, 하이드라지노펩타이드, 아미노식 펩타이드와 사슬형 올리고 우레아(oligourea)들이 그 예이다.

그렇지만, 폴다머 합성은 동일한 골격구조를 가질 필요는 없다. 즉, 두 개 이상의 단위체를 혼합해서 만든 시퀀스를 바탕으로 하는 접근으로 이질성(heterogeneous) 폴다머들이 제작되고 있기 때문이다. 예를 들어, 펩타이드의 나선구조 모방체도 알파, 베타, 감마-아미노산 잔기들을 조합해서 만들 수 있는 것이다. 그러나 이들 펩타이드 모방체들은 수용성, 골격구조 편등성, 구조 안정성, 결가지 방향과 같은 물리화학적 성질들이 다르며, 궁극적으로 생물학적 활성을 최대화할 수 있다.

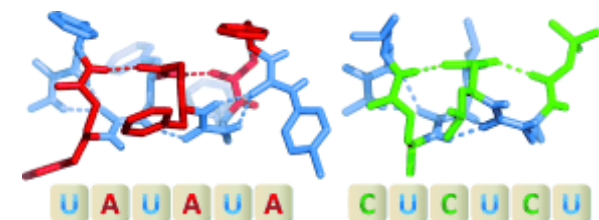


그림 1. U, A, C 유닛으로 구성된 감마-펩타이드 폴다머의 골격 구조.

프랑스 연구팀은 선행 연구에서 아마이드(A)와 우레아(U) 유닛으로 이루어진 이질성 골격 구조 시퀀스를 가진 펩타이드를 개발한 적이 있으며, 이것을 이용해서 해당 호모올리고머의 생물학적 활성을 최적화할 수 있었다고 말했다(예로, 나선형 감마4-펩타이드 A_n 과 N,N' -linked 올리고 우레아 U_n). 감마4-펩타이드 A_n 은 개체 방어용 펩타이드를 모방해서 디자인되었지만, 특이할 만한 항균성 특성을 보여주지 않았다. 하지만 U_n 시퀀스에 A 유닛을 첨가하면 U_n 호모올리고머와 비교했을 때 박테리아 막에 대한 선택성이 증가하는 것을 발견했다.

이번 연구에서 U, A 그리고 C를 혼합한 다양한 종류의 펩타이드를 합성했으며, 이들의 결정 구조를 밝혀냈다고 연구진은 말했다. 또한 이들 모방체의 구조 정보는 나중에 구조-활성 관계를 이해하는데 도움이 되며, 생리활성을 가지는 폴다머를 디자인하는데 도움이 될 수 있다고 말했다.

연구진은 U, A, C 유닛이 유사한 구조를 가지고 있지만, 다른 폴딩 특성을 가지고 있다고 말한다. U_n 구조가 오른손 나선 입체 구조를 형성하며 감마4-펩타이드 A_n 도 나선구조를 형성하지만, 감마2,4와 감마2,3,4로 치환된 펩타이드보다는 안정성이 낮았다고 말한다. 반면 C_n 은 특정한 구조를 가지지 못한다고 보고된 바 있다. 이번 연구에서 U, A, C 유닛을 서로 혼합해서 펩타이드를 만들 수 있으며, 세 가지 유닛 중에서 C가 감마 펩타이드의 나선 구조 형성에 가장 큰 영향을 주었다고 연구진은 보고했다. 또한 감마-펩타이드 골격 구조를 여러 가지 유닛으로 바꿀 수 있었고, 이들 유닛이 펩타이드 구조에 어떤 영향을 미치는지 밝혔으며, 이 연구를 통해 얻은 정보들은 생물학적 기능을 가진 폴다머를 디자인하는데 도움이 될 것이라고 말했다.

<N. Pendem et al., *Angew. Chem. Int. Edit.*, **52**, 4147 (2013),

DOI: 10.1002/anie.201209838>

| 태양 에너지 생산을 혁신시키는 나노와이어

현재 태양 패널보다 훨씬 더 효율적이며 재료를 10,000배 덜 사용하는 태양전지가 개발되어 화제가 되고 있다. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne(EPFL) 연구원들은 나

노와이어라고 불리는 작은 가는 실과 같은 재료를 이용하였다. 작은 크기에도 불구하고 나노와이어들은 에너지 생산에 엄청난 잠재력을 가지고 있다. "Single-nanowire solar cells beyond the Shockley-Queisser limit"라는 제목으로 최근 *Nature Photonics*에 게재된 논문의 저자는 이 나노와이어들이 기대했던 것보다 더 많은 광을 포획하고 있다고 밝혔다.

더 많은 에너지를 만들기 위해 12배 이상까지 광을 포획할 수 있을지에 대한 의문은, 최근 EPFL 연구진이 나노와이어들로 만들어진 태양전지들이 이러한 효율적인 광 포획을 가능케할 수 있으며 태양에너지 제품에서의 기대를 뛰어넘는다고 밝힌 데서 풀릴 수 있었다.

나노와이어들은 mm의 10억 분의 1 직경의 아주 작은 필라멘트들이다. 이러한 미니 사이즈의 와이어들은 머리카락의 직경보다 1,000배까지 더 작거나, 바이러스들의 직경 사이즈와 비교할 만하다.

전자 특성들로 제대로 구현될 때 나노와이어는 태양광을 전류로 변환시키는 아주 작은 태양 전지가 된다. Anna Fontcubertai Morral과 그 연구팀은 실리콘에 비해 광을 전력으로 전환시키는 데 더 좋은 물질인 갈륨 아세나이드(GaAs)로 나노와이어 태양전지를 만들었다. 연구팀은 나노와이어가 일반적인 태양전지에 비해 12배 더 광을 실질적으로 수집할 수 있다는 것을 발견했다. 이는 광을 더 많이 에너지로 변환시킬 수 있다는 것을 의미한다.

수직으로 서 있는 나노와이어는 필연적으로 매우 효율적인 광 깔때기(funnel)처럼 행동한다. 나노와이어의 직경이 수백 nm일지라도, 나노와이어가 12배 더 커진 것처럼 광을 흡수한다. 다른 말로 하면, 나노와이어는 기대했던 것보다 더 많은 효과를 가지고 있다.

Morral의 프로토타입은 이론적으로 통상의 단일 재료 태양 패널들을 위해 광을 전력으로 변환할 때 허용된 것보다 거의 10% 이상 더 효율적이다. 게다가, 나노와이어의 차원을 최적화시키는 것, 갈륨 아세나이드의 질을 향상시키는 것, 전류를 추출하기 위해 더 좋은 전기적 컨택들을 사용하는 것으로 효율을 증가시킬 수 있다.

나노와이어 태양 전지들의 어레이들은 에너지 제품을 위

한 새로운 전망을 제공한다. 사실상 일반적인 평면 태양 패널들이 20% 효율을 가지는 반면에, 이러한 연구는 나노와이어들의 어레이가 33%의 효율을 얻을 것으로 예상하고 있다. 또한, 나노와이어들의 어레이들은 산업적으로 사용되는 갈륨 아세나이드를 적어도 10,000배 절약할 수 있다. 갈륨 아세나이드의 경우 달러로 환산하면, 비용은 평방미터당 \$ 10,000에서 겨우 \$ 10로 급격히 줄어든 것이다. 이러한 나노와이어들을 다양한 기관 패널들 상에 설치하기 위해 엔지니어들의 상상력을 자유롭게 자극하면, 더 가볍고 더 유연하며 어떠한 제약 조건 없이 디자인할 수 있을 것이다. 에너지 소비가 이루어지는 세계에서 이러한 나노와이어들은 향후 생활용품에서 화성 우주탐사에 이르는 모든 것에 이용될 수 있다.

<P. Krogstrup *et al.*, *Nat. Photonics*, 7, 306 (2013),

DOI: 10.1038/nphoton.2013.32>

관절염 통증 경감 치료제로 쓰일 고분자 인공 윤활액

관절 연골조직의 마찰을 줄여주는 새로운 인공 윤활액(synovial fluid)으로 사용될 수 있는 고분자 물질이 미국 연구진에 의해 개발되었다. 새로운 인공 윤활액은 체내에서 분해되지 않기 때문에 기존 인공 윤활액에 비해 효과가 오래 지속될 수 있을 것으로 예상된다.

관절염으로 인한 연골조직 손상은 관절을 움직일 때마다 극심한 통증을 유발한다. 특히 몸 전체를 떠받치는 무릎 관절 연골조직이 손상되면 엄청난 고통을 경험하게 된다. 인공 윤활액은 연골이 손상된 관절에 주입해서 윤활과 완충작용을 통해 통증을 개선하는 약물 치료제다.

미국 보스턴대학(Boston University)의 Mark Grinstaff 교수 연구진은 개환복분해중합반응(ring-opening metathesis polymerization, ROMP)을 이용해 고분자 합성법을 개발하는 과정에서 고분자 사슬 길이가 보통 수준보다 현저하게 긴 고분자를 얻었다. 일반적으로 분자량 1~20만 정도의 고분자가 얻어지는데, 연구진은 분자량이 2,500만인 고분자를 얻었

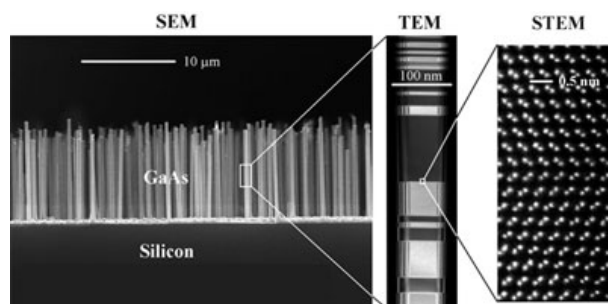


그림 2. 실리콘 기판상에 성장한 GaAs 나노와이어 결정의 이미지.

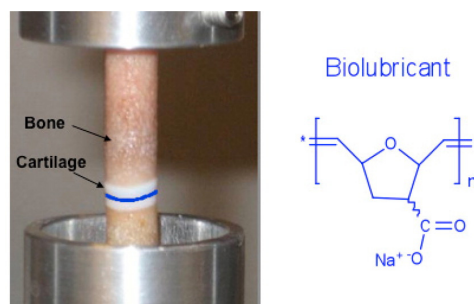


그림 3. 새로 개발된 biolubricant의 적용실험 및 화학구조.

다. 이처럼 분자량이 증가하면 물질의 유동성(rheological properties)에 큰 변화가 발생하여 이 물질을 물에 녹이면 매우 미끄러운 액체로 변했다. 이 사건은 연구진이 인공 윤활액을 개발하게 되는 동기가 되었다.

Grinstaff 교수 연구진이 합성한 인공 윤활액은 'poly (7-oxanorbornene-2-carboxylate)'라는 물질로 겔가지에 달려 있는 카복실산 그룹(carboxylic acid group)은 히알루론산(hyaluronic acid)과 화학적으로 매우 유사하다. 히알루론산은 탄수화물 기반 천연 고분자의 일종으로, 사람의 관절강 속에 존재하는 윤활액 구성 성분 중 하나이기도 하다.

현재 임상에서 사용되고 있는 인공 윤활액도 히알루론산 유도체다. '신비스크(Synvisc)'라는 상품명으로 판매되고 있는 인공 윤활액은 주사 바늘로 관절강 내부에 주입하는 형태의 의약품이다. 처음 발매되었을 당시엔 일주일 간격으로 3회 투여하는 방식이었지만, 지금은 제형개선을 통해 1회 투여로 6개월 간 효과가 지속되는 '신비스크-원(Synvisc-one)'이 사용되고 있다. 이 인공 윤활액은 젤 상태의 히알루론산 유도체를 관절 부위에 직접 주사해 점액성 윤활액을 보충해서 통증을 호전시키는 치료제다.

관절염은 노년층에서 발생 빈도가 높은 질병이다. 최근 들어 우리나라 인구에서 노년층이 차지하는 비중이 증가하면서 인공관절 이식수술도 증가하고 있는 추세다. 손상된 연골 조직은 약물요법 등을 이용한 보존적 치료를 통해 복원하거나 추가 손상을 예방해야 한다. 하지만 관절 변형이 발생하면 수술 치료를 받아야 한다. 인공 윤활액 치료는 수술 치료를 회피하기 위한 보존적 치료의 일환인 것이다.

신비스크-원은 효과가 6개월을 넘기지 못한다. 그 이유는 탄수화물계 화학물질이 기본 성분이기 때문이다. 이러한 물질은 체내 효소에 의해 잘 분해되고, 연골조직으로 확산되기 때문에 일정 시간이 지나면 기능을 상실하게 된다. Grinstaff 교수 연구진이 개발한 고분자 물질은 분자량이 매우 크다. 이는 히알루론산 유도체에서 나타나는 문제점을 상당 부분 해결할 수 있다는 것을 의미한다. 즉 연골조직으로 흡수되거나 잘 분해되지 않기 때문에 환자의 통증을 완화시키고 수술 치료를 예방하는 기능을 더 오래 동안 발휘할 수 있다.

수술 치료는 의사나 환자 모두에게 있어 최후의 선택이다. 수술에 따른 심리적 압박감과 신체적 부담, 그리고 감염 등의 부작용 위험을 감수해야 한다. 약물을 이용한 보존적 치료지만 인공 윤활액은 주사로 관절강에 주입하기 때문에 환자는 수술에 맞먹는 부담감을 느낄 수 있다. 따라서 한 번 수술로 오랜 지속효과를 기대할 수 있어야 환자의 치료 순응도를 높일 수 있으므로, 새로 개발된 고분자 인공 윤활액의 개발 소식은 관절염 환자들에게 희소식임이 분명하다. 하지만 인체에 적용하려면 아직 많은 검증 단계를 거쳐야 하므로 언제쯤 이 물질이 환자 치료에 사용될지는 예단하기 어려워 보

인다. 이상의 연구 결과는 *Journal of the American Chemical Society* 최신호에 실렸다.

<M. Wathier et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **135**, 4930 (2013),

DOI: 10.1021/ja400695h>

박테리아 및 뱀 독소를 흡수하는 생체 모방 나노스펀지

항병독소 치료와 같은 중독 치료(detoxification treatment)는 박테리아 감염, 독으로 인한 피해 및 생물 무기 등에 의해 유발되는 독성 요소(virulence factor)를 정화시키는 방법을 제공한다. 항혈청, 단일 클론 항체(monoclonal antibodies), 작은 분자 억제제 및 고분자 등과 같은 기존의 중독 치료가 독소의 분자 구조를 타겟으로 작용하기 때문에, 맞춤 제작된 치료가 서로 다른 질병마다 요구된다.

미국 샌디에이고 대학(University of California, San Diego) 연구진은 혈액으로부터 항생제 내성 세균(methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*, MRSA), 대장균 및 독이 있는 뱀과 벌 등이 배출하는 유해한 독소를 안전하게 제거할 수 있는 나노스펀지(nanosponge)를 고안했다. 나노스펀지는 세포막에서 구멍을 만들어 세포를 파괴하는 기공형성 독소(pore-forming toxin)의 효력을 중화시킨다. 나노스펀지는 개별적 독소 유형에 대한 고객 맞춤의 합성이 요구되는 다른 항독소와 달리, 다양한 기공을 형성하는 독소를 흡수할 수 있다. 이 연구에서 MRSA로부터 분리한 알파-헤몰리신 독소(alpha-haemolysin toxin)에 대하여 나노스펀지를 이용한 전처리(pre-innoculation)를 수행했을 때, 쥐의 89%가 치사량에도 불구하고 생존할 수 있다는 것이 확인됐다. 치사량에 노출된 이후 나노스펀지를 적용하는 경우, 44%의 쥐가 생존할 수 있었다. 샌디에이고 대학의 제이콥스 공대(Jacobs School of Engineering) 소속 나노공학자가 주도하는 연구팀은 2013년 4월 14일 관련 연구를 *Nature Nanotechnology* 저널에 발표했다.

이것은 혈류에서 독소를 제거하는 새로운 방법이라고 이 연구의 선임 저자이며 제이콥스 공대 나노공학부 교수인 Liangfang Zhang은 밝혔다. 개별적인 독소에 특별한 처리를 하는 대신에, 연구진은 MRSA와 다양한 항생제 내성을 지닌 박테리아를 포함한 광범위한 병원균에서 유발되는 독소를 중화시킬 수 있는 토대를 마련할 수 있을 것이라고 Zhang은 밝혔다. 또 이 연구는 독이 있는 뱀이나 벌레에 물린 경우같은 비-종-특이성 치료(non-species-specific therapies)로 이어질 수 있을 전망이다. 이 방안은 헬스케어 공급자 또는 위험에 처한 개인이 가장 필요할 때 이용할 수 있는 인명을 구하는 방안을 확보할 것이다.

연구진은 이 연구를 승인된 치료로 전환하는 것을 목표로 하고 있다. 연구진이 목표로 하는 최초의 응용 중 하나는 MRSA에 대한 항병원성 치료(anti-virulence treatment)가 될 수 있다. 이러한 목표는 연구진이 MRSA에서 분리한 가장 맹독성의 독소 중 하나를 연구하는 이유이기도 하다고 이 논문의 제1 저자인 Che-Ming Hu는 밝혔다.

면역 시스템을 피하고 혈액 순환 내에 남아 있게 하기 위하여, 연구진은 나노스핀지를 적혈구 세포막으로 감쌌다. 이러한 적혈구 세포 클로킹 기술(cloaking technology)은 Zhang 교수 실험실에서 개발됐다. 이전에 연구진은 적혈구 세포로 위장된 나노입자가 암을 치료하는 약물을 중앙에 직접적으로 전달하는데 이용될 수 있다는 것을 증명한 바 있다. 적혈구 세포는 기공을 형성하는 독소의 주요 타깃 중 하나이다. 독소가 적혈구를 파괴할 때 기공이 형성되어, 제어되지 않는 이온이 세포 안으로 난입하여 세포가 죽게 된다.

나노스핀지는 적혈구 세포처럼 보이기 때문에, 독소를 유인하고 모으는 적혈구 세포처럼 작용한다. 나노스핀지는 해로운 독소를 흡수하여 세포의 타깃으로부터 독소를 우회시킨다. 나노스핀지는 쥐에 수행된 연구진의 실험에서 40시간의 반감기를 나타냈다. 실제로 간은 식별할 수 있는 손상 없이 나노스핀지와 분리된 독소 모두에서 안전하게 대사 작용을 수행했다.

각각의 나노스핀지는 약 85 nm의 직경을 가지며, 적혈구 세포막과 동일한 부분으로 둘러싸인, 생체에 거부 반응을 일으키지 않는 고분자 중심부으로 만들어진다.

Zhang 교수 연구진은 원심분리기를 이용하여 작은 혈액 시료에서 적혈구를 분리한 후, 세포를 부풀어 올라 터지게 하는 용액에 배치하여 헤모글로빈을 배출하고 적혈구 세포의 껍질만 남겼다. 이러한 껍질은 이후 적혈구 세포막으로 나노입자가 코팅될 때까지 공 형태의 나노입자와 혼합됐다. 단 한 개의 적혈구 세포막은 수천 개의 나노스핀지를 만들 수 있으며, 이러한 나노스핀지는 적혈구 세포보다 3,000배 가량 더 작다. 단일 투여로 나노스핀지는 혈류로 흘러 적혈구

세포보다 수적으로 우세할 뿐 아니라 독소를 차단한다.

테스트-튜브 실험을 기반으로, 각 나노스핀지에 흡수될 수 있는 독소의 수는 독소에 따라 좌우됨이 관찰되었다. 예를 들면, MRSA에서 생성되는 알파-헤몰리신 독소는 약 85개, 스트렙토폴리신-O(streptolysin-O)는 약 30개, 벌 독소의 일부인 멜리틴 모노머(melittin monomer)는 약 850개가 흡수된다. 쥐에서 나노스핀지와 알파-헤몰리신 독소를 동시에 처리해도 독소와 나노스핀지의 비율이 70:1의 비율로 독소를 중화시키며 식별할 수 있는 손상을 유발하지 않았다. 연구진은 이 연구의 다음 단계는 임상 시험을 추적하는 것이라고 밝혔다.

<C-M. Hu, et al., Nat. Nanotechnol., ASAP (2013),

DOI:10.1038/nnano.2013.54>

자기 조립하는 나노크기 케이지

영국 연구진은 단백질을 자기 조립해서 나노크기의 케이지를 만드는데 성공했다. 이번 연구진은 화학, 생물학, 의학 분야에 적용될 수 있는 새로운 유형의 나노입자를 개발했다. Science에 게재된 이번 연구결과에서, 브리스톨 대학(University of Bristol)의 다학제간 연구팀은 세포와 심지어 질병이 걸린 조직 속에 약물과 같은 생물작용 분자를 이동시키는데 사용될 수 있는 나노입자를 만들었다.

Dek Woolfson 교수가 이끄는 이번 연구진은 펩타이드 분자가 더 복잡한 구조로 어떻게 디자인될 수 있는지를 제시했다. 이 연구결과는 합성 생물학(synthetic biology)으로 알려진 생물학적 시스템을 더 예측할 수 있고 더 신뢰할 수 있도록 한다.

이 새로운 연구에서, 연구진은 더 큰 육각형 단백질 조립체를 만들기 위해서 툴킷(toolkit)을 이용했다. 이것은 단백질 시트를 만들기 위해서 조각을 내는데 사용되었고, 이렇게 만들어진 패턴은 닭장의 육각형 패턴과 닮았다. 그 후에

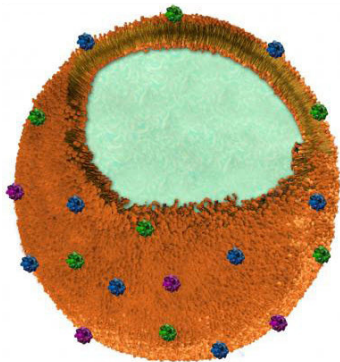


그림 4. 혈류 내 광범위한 유해독소를 안전하게 제거할 수 있는 나노스핀지.

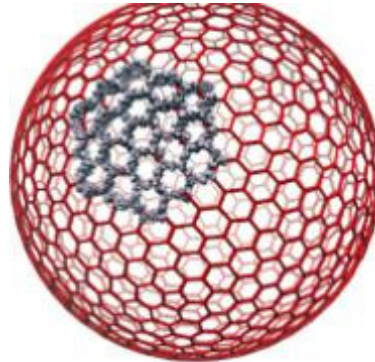


그림 5. SAGE라고 명명된 나노크기 케이지.

단백질 시트는 스스로 접혔고, 공동 구체를 형성하기 위해서 닫혔다.

생물학적 분획의 경계와 닮은 이런 능력은 자기 조립의 이해를 향상시키고, 약물 및 생물학적 제제의 전달, 원세포(proto-cell)의 발현에 적용될 수 있는 새로운 물질을 만들 수 있게 한다. 연구진은 펩타이드가 매우 작은 단일 박막 구체를 형성할 수 있다는 것을 증명했다. 이 디자인은 두 개의 이형 이량체(heterodimeric), 동형 삼량체(homotrimeric)의 비공유결합성 이중 나선 다발로 구성되었다.

이런 구체는 사람 머리카락의 약 100분의 1 정도에 해당하는 100 nm의 지름을 가졌고, 그들 표면 위에 나노미터 크기의 구멍을 가졌다. 그들은 실제로 나노크기 케이지가 되었고, 연구진은 이것을 SAGE라고 명명했다. 이것은 수 많은 잠재적인 적용을 가진다. 예를 들어, 이것은 새로운 백신을 만들 때 유용하게 적용될 수 있을 것이다. 또한 이것은 체내 질병에 걸린 조직과 세포에 약물과 같은 생체활성 분자를 전달할 수 있고, 더 효율적이고 제어 가능한 화학적 반응을 수행하기 위해서 효소 분자를 농축시키는 분야에도 매우 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

연구진은 이 새로운 연구결과에 매우 흥분했고 SAGE의 잠재적인 적용 분야를 발굴하기 위해서 현재 노력하고 있다. 이것을 위해 이번 연구진은 의학 및 합성 생물학 분야를 새롭게 조사하고 있다. 이 연구결과는 *Science*에 "Self-Assembling Cages from Coiled-Coil Peptide Modules"라는 제목으로 게재되었다.

<J. M. Fletcher *et al.*, *Science*, ASAP (2013),

DOI: 10.1126/science.1233936>

진공공간에서도 살아남을 수 있는 나노물질로 코팅된 벌레

살아있는 생명체를 진공상태와 같은 치명적인 조건에 놓고 전자현미경으로 관찰하면 이미지를 만들어내는데 사용되는 전자는 실제로 보호효과를 일으킨다. 연구자들은 주사 전자현미경으로 일부 애벌레에게 자연적으로 얇은 코팅막을 만들어 마치 미니 우주복과 같이 진공상태에서 1시간까지 이 동물을 보호할 수 있음을 관찰하였다. 일본의 하마마츠 의대(Hamamatsu University School of Medicine)의 생물학자인 Takahiko Hariyama와 그의 동료들은 'Proceedings of the National Academy of Sciences' 지에 발표한 논문에서 그 연구결과를 제시했다. 이번 발견은 딱정벌레의 애벌레와 진드기를 포함하는 일부 생명체가 주사 전자현미경의 극한적인 저압력 환경에서도 짧은 기간 동안 생존할 수 있으며 심지어 동면하고 있는 완보동물(tardigrades 또는 water

bear)은 외계공간에서도 살아남는다는 발표에 이어 이루어진 연구결과이다.

연구자들은 얼마나 다양한 동물들이 고도의 진공상태에서 살아남는가에 대한 연구를 하는 과정에서 이것을 이미지 화하기 위해 주사 전자현미경을 사용하면서 새로운 사실을 발견했다. 많은 생물체들은 이러한 조건에서 빠르게 수분을 빼앗기게 되며 탈수와 물리적 이글어짐에 의해 죽게 된다. 하지만 과실파리의 애벌레는 약 60분 동안 살아남았으며 정상적인 압력으로 되돌아왔을 때에는 정상적으로 성장했다.

과실파리 애벌레의 외피는 자연적으로 단백질과 같은 생물학적인 입자로 만들어진 물질로 코팅되어 있다. 그리고 연구자들은 전자빔에 노출되는 경우에 이들 물질의 분자가 긴 체인형태로 변화를 일으켜 일종의 중합체의 형태로 결합된다고 생각했다. 이것은 유연한 50~100 나노미터 두께의 방어막을 형성하게 된다.

일본 꿀벌(Japanese Honeybees, *Apis cerana japonica*)과 검정파리(blue bottle fly, *Protophormia terraenovae*)와 같이 유사한 코팅을 갖는 다른 생물체는 플라스마 광선에 노출된 후에 고도 진공상태에서 생존할 수 있었다. 이 플라스마 광선은 전자 빔과 같이 유사하게 중합체 형성결과를 일으켰다. 플라스마 광선은 이미 일부 산업체에서도 사용되고 있다. 이들의 가설을 증명하기 위해서 이 연구팀은 일종의 인공적인 코팅(계면활성제로 만든 합성세제)을 만들어서 이러한 코팅이 되어 있지 않은 와충(flatworm)과 아시아 타이거 모기(asian tiger mosquito, *Aedes albopictus*)에 사용했다. 플라스마 광선에 노출되면서 이 코팅은 나노-우주복과 유사한 형태를 형성했다.

연구자들은 또한 생존에 성공한 애벌레의 세부구조는 코팅이 되지 않은 생물이나 전통적인 표본과는 완전히 다른 형

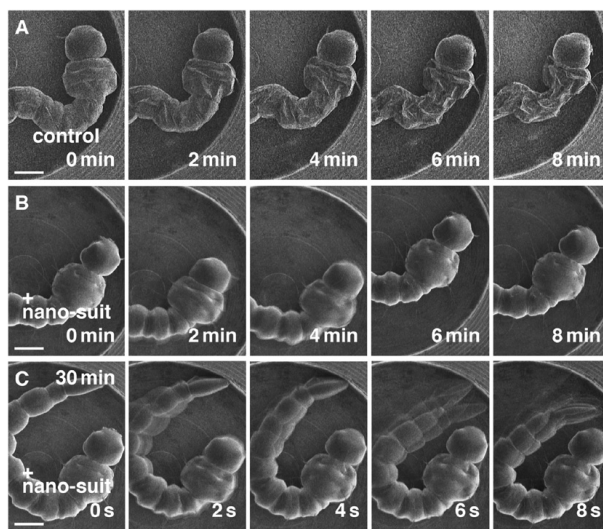


그림 6. 나노우주복(nano-suit)로 코팅된 벌레.

태었다는 사실을 발견했으며, 이 나노-우주복이 이 생물체의 실제 생명을 보존하는 결과를 가져왔음을 관찰했다. 하지만 캘리포니아의 스탠퍼드 대학(Stanford University)의 물질 과학자인 Robert Sinclair는 이 과정은 부가적인 변화를 일으키는 것이라고 주장했고 이 연구에서 이용한 확대과정은 전자현미경에 있어서 상대적으로 낮았다고 지적했다.

하지만 이번 발견이 증명된다면 이 기술은 “현재 전자현미경을 이용하여 일부 살아있는 생명체를 연구하는데 있어서 변화를 일으킬 수 있다”고 아이오와 주립대학 에임스(Iowa State University in Ames)의 발달생물학자인 Harry Horner는 말했다. 그는 이어서 “지구상에 존재하는 생물체뿐 아니라 우주공간으로 보내는 생물체나 우주탐사에서 얻은 생물체에도 사용할 수 있다”고 말했다. Hariyama 교수는 이미 우주공간에 관심을 갖기 시작했다. 그의 연구진은 작은 동물에 나노-우주복과 같은 코팅을 입혀서 우주에 보내기를 바라고 있으며 이미 나노우주복으로 코팅한 작은 물고기에서 상당한 성공을 거두었다고 밝혔다.

<Y. Takaru et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, ASAP (2013), DOI: 10.1073/pnas.1221341110>

알츠하이머병 관련 펩티드를 자유롭게 조절하여 다양한 기능을 가진 나노와이어 제조

호카이도대학 대학원 이학연구원 화학부문의 연구진은 물질재료 연구기구 및 캘리포니아 대학 산타바버라 캠퍼스 연구진과 공동으로 알츠하이머병의 원인분자라고 생각하고 있는 아밀로이드 펩타이드가 수용액 중에서 자발적으로 집합하여 나노와이어 구조를 형성하는 성질에 착안하여, 이 분자적 성질을 제어함으로써 효율적으로 다양한 기능화 나노와이어를 제조하는 신규 방법의 개발에 처음으로 성공하였다.

연구그룹은 아밀로이드 펩타이드에 새로운 상호작용 계면을 부여한다는 것에 기초하여, 말단에 세 개의 아미노산을 부가시킨 신규 아밀로이드 펩타이드(SCAP 펩타이드)를 디자인하고 다른 종류의 유닛을 가진 복수의 SCAP 펩타이드를 혼합하여 효과적으로 자기조립화를 제어하는 혼합 SCAP법을 개발하였다. 물질재료 연구기구 국제나노아키텍트로닉스 거점 연구진과 캘리포니아 산타바버라 캠퍼스 연구진은 공동연구에 의해 원자간력 현미경법 및 이온 모빌리티 질량 분석법을 이용하여 혼합 SCAP법에 의해 유도되는 신규 자기조립화 메커니즘을 밝혀 내었다. 또한 기능분자와 특이적인 결합능을 가진 프로브분자를 SCAP에 개질시킨 P-SCAP를 합성하여 상당히 효율적인 기능화 나노와이어를 형성하였다.

세 개의 아미노산 유닛을 부가한 복수의 SCAP를 혼합함

으로써 경이적으로 섬유신장이 촉진되어 상당히 긴 아밀로이드 섬유의 형성이 나타났다. 이것은 전형적인 아밀로이드 섬유보다 10배 이상 긴 것으로 지금까지의 보고로는 최대 종횡비(길이/폭 > 8,000)를 가지고 있다. 또한 이 촉진효과가 어느 정도 작용하고 있는가를 조사하기 위해 아밀로이드 펩타이드의 회합상태를 알 수 있는 이온 모빌리티 질량분석법에 의한 해석을 실시한 결과, 혼합 SCAP에 의해 아밀로이드 펩타이드끼리의 상호작용능이 뚜렷하게 향상되어 있을 뿐만 아니라 회합상태의 구조가 섬유형성에 적합한 상태로 변화하고 있다는 상당히 흥미로운 자기조직화 특성이 나타났다.

즉, 혼합 SCAP법은 펩티드의 자기조립화 특성을 분자 수준에서 제어함으로써 형성되는 나노와이어 구조를 크게 변화시키는 신규 자기조립화 메커니즘의 해명에 성공하였다. 그리고 이 자기조립화 메커니즘을 P-SCAP에 응용함으로써, 어떠한 프로브 분포도 용이하게 동일한 긴 사슬 나노와이어 안에 도입시킬 수 있었다. 프로브에 특이성을 가진 기능성 분자를 결합시킴으로써 기능화 나노와이어를 상당히 효율적으로 제조하는데 성공하였다. 또한 이 방법을 기반으로 산화티타늄 나노와이어를 비롯한 다양한 무기물성 나노와이어의 제조법을 확립하였다.

나노기술의 발전에 의해 기능을 가진 미세구조의 범용적인 형성법은 중요한 연구대상이 되어 왔다. 그러나 현재 자기조립화 접근방식에서는 미세구조와 기능을 동시에 제어하는 것이 상당히 곤란하였다. SCAP를 이용하는 방법은 나노와이어 구조의 제어/효율적인 기능화를 실현한 상당히 범용성이 높은 것으로 차세대 나노기술 개발에 크게 공헌할 것으로 기대된다.

산화티타늄은 반도체 및 광촉매로서의 기능을 가진 것으로 알려져 있어 혼합 SCAP법에 의해 형성한 매우 긴 사슬 나노와이어는 나노 전극 사이의 배선에 유용하다고 생각되기 때문에, 본 방법을 이용한 나노 전자디바이스 및 센서의 개발이 이어질 것으로 생각된다. 또한 본 연구로 도출한 아밀로이드 섬유 형성의 촉진기구는 알츠하이머 및 아밀로이드증 등 질환성 아밀로이드 섬유의 형성기구의 해명 및 방해 방법의 개발에 기여할 것으로 생각된다. 본 방법은 다른 다양한 종류의 무기물성 나노와이어 형성에도 응용 가능하기 때문에 복수의 무기물을 조합시킴으로써 새로운 물성을 가진 나노와이어 제조 등 다양한 전개가 기대된다.

<H. Sakai, et al., Adv. Funct. Mater., ASAP (2013), DOI: 10.1002/adfm.201300577>

본 기술뉴스는 KISTI 미리안의 글로벌동향브리핑(<http://mirian.kisti.re.kr>)에서 발췌, 정리하였습니다.
(서울대학교 김태일, e-mail: seal1004@snu.ac.kr)