

‘AKR2 유전자’ 통해 엽록체 생성 기원 밝혔다

글 | 황인환 _ 포스텍 생명과학과 교수 ihhwang@postech.ac.kr

지구상에는 수많은 종류의 생명체가 존재하지만 스스로 에너지원을 만들어 생장할 수 있는 생명체는 식물과 일부 광합성이 가능한 시아노박테리아를 포함한 아주 일부의 종에 국한된다. 다른 생명체와 달리 식물이 스스로 에너지원을 확보할 수 있는 특성을 나타내는 것은 식물 세포내에 존재하는 엽록체라는 식물에만 존재하는 소기관 때문이다. 세포 소기관은 진핵세포에 있어서 세포 내에 한 겹 또는 두 겹의 지질막으로 둘러싸인 독립적인 공간으로 특이적인 생화학적 반응을 위하여 마련된 공간이다. 세포에는 10여 개의 서로 다른 종류의 소기관이 존재한다. 이들 소기관 가운데 엽록체는 태양 빛 에너지를 이용하여 대기 중에서 받아들인 이산화탄소를 포도당과 같은 유기물질로 변형시킬 수 있는 능력을 가지고

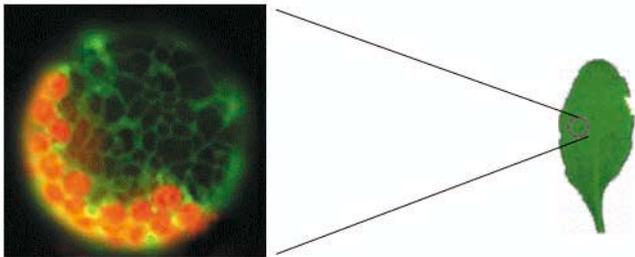
있다. 따라서 식물세포에서 엽록체가 광합성을 할 수 있다는 것은 비단 식물뿐만 아니라 지구상에 존재하는 모든 생명체에 유기물질을 공급하는 공급자로서 지구상에 모든 생명체가 계속하여 존재할 수 있도록 해주는 역할을 한다는 것을 의미한다.

원시 시아노박테리아가 엽록체로 진화 추정

식물 세포가 광합성을 하는 소기관을 갖게 된 것은 생명체의 진화의 관점에서 보면 지구에 생명체의 영속성을 보장하는 가장 흥미로운 사건 중의 하나이다. 하지만 아직도 이러한 사건이 진화 과정에서 어떻게 일어났는지에 대해 과학적으로 규명되지 않았으며, 아마도 영원히 풀리지 않는 과학적인 미스터리로 남아 있을 가능성이 높다. 그렇지만 지금까지 많은 연구를 통해 과학자들은 이 엽록체가 여러 측면에서 시아노박테리아를 닮았다는 것을 밝혔다. 시아노박테리아는 광합성을 수행할 수 있는 박테리아의 일종으로 녹색을 띠고 있다.

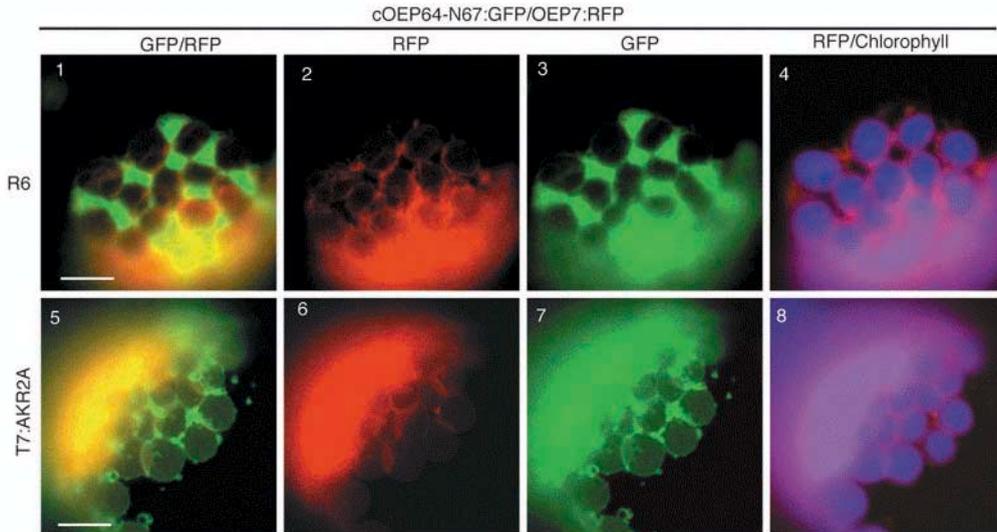
과학자들은 이러한 연구 결과를 바탕으로 식물세포의 엽록체가 광합성을 하는 녹색의 시아노박테리아에서 유래하였을 것으로 생각하고 있다. 즉 원시 시아노박테리아가 식물세포를 이루게 되는 원시 진핵세포 속으로 들어온 후 독립적인 세포로서의 기능을 포기하고 현재의 식물세포의 세포 소기관인 엽록체로 진화하였다는 것이다. 이러한 일은 적어도 10억년 전에 일어났을 것으로 추측된다. 원시 시아노박테리아는 독립적인 세포인데 이런 독립적인 세포가 다른 종류의 세포 속으로 들어와서 소기관으로 진화한 것은 매우

식물세포와 엽록체



자외선을 이용하여 형광현미경에서 본 잎 세포로 붉은 색으로 나타난 것이 엽록체이다. 자외선에 의하여 엽록체는 붉은 형광을 타나낸다. 녹색의 그물구조는 소포체이다.

엽록체로 외막 단백질의 이동을 돕는 AKR2



엽록체로의 이동이 저해를 받는 재조합유전자(cOEP64^{N67}-GFP)를 인위적으로 발현시킨 다음 형광현미경으로 관찰한 결과(녹색), 엽록체(파란색) 주변에 퍼져 있던 단백질들이 AKR2A와 함께 발현시킨 세포에서는 많은 양이 엽록체로 이동되어 있음을 볼 수 있었다. 엽록체로 이동하는 재조합 유전자(OEP7-RFP)를 함께 발현시켜 대조군으로 사용하였다(빨간색).

이례적인 일이다.

원시 시아노박테리아가 식물세포의 소기관인 엽록체로 진화하는 과정을 규명하는 것은 식물세포의 형성과정을 이해하는데 있어 과학적으로 대단히 흥미로운 일이다. 이 진화의 과정을 정확히 규명하는 것은 대단히 어려운 일이지만, 이러한 일이 일어난 일련의 과정을 상상해 볼 수는 있을 것이다.

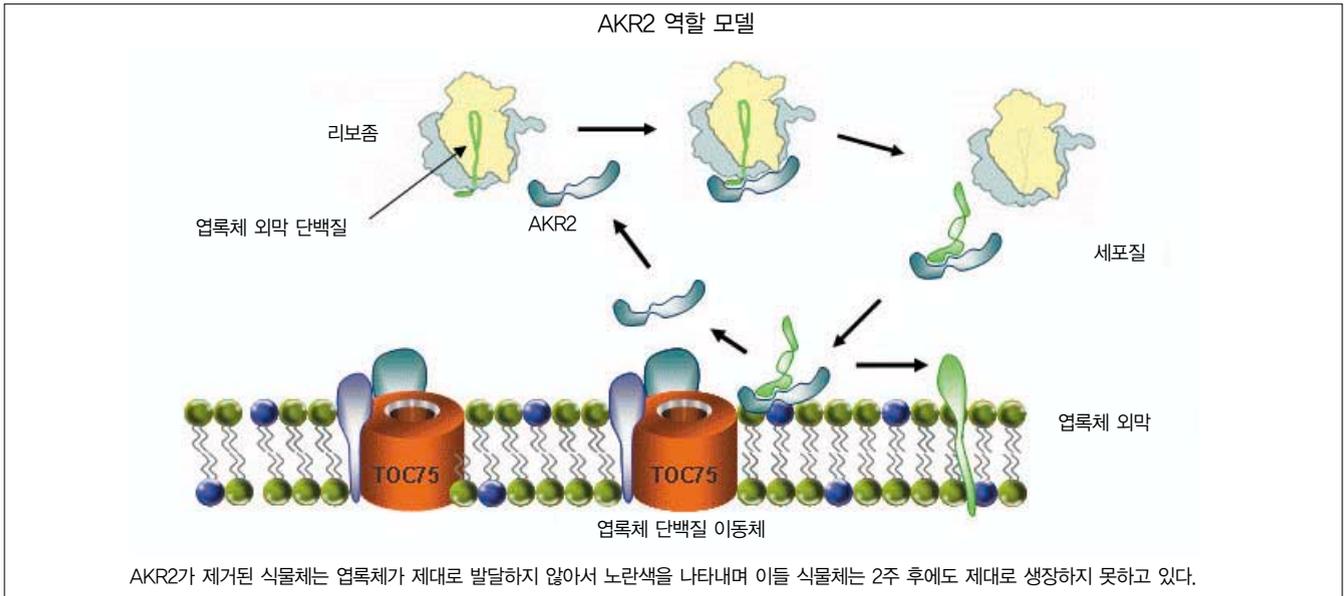
초기에는 현재의 식물세포로 진화하게 될 원시 진핵세포에 들어온 원시 시아노박테리아가 이 원시 진핵세포와 일종의 공생관계를 형성하였을 것이다. 사실 이러한 현상은 자연 생태계에 흔히 관찰된다. 콩과 식물의 경우 질소 고정 박테리아와 공생관계를 형성하여 콩과 식물은 박테리아에 탄소원을 공급해 주고 박테리아는 질소원을 공급해주는 공생관계를 형성하고 있다. 이와 마찬가지로 초기에는 원시 시아노박테리아는 원시 진핵세포에 이산화탄소를 고정하는 광합성 반응을 통하여 원시 진핵세포에 에너지원을 공급하는 역할을 맡고, 원시진핵세포는 기타 다른 종류의 영양소(질소, 산소, 무기질 등)를 공급하는 방법으로 공생하였을 것이다.

하지만 독립적인 세포로서 단순히 공생관계를 가질 때 서로에도 도움이 되는 하지만 효율면에서 그렇게 높지는 않았을 수도 있다. 원시 진핵세포 속의 원시 시아노박테리아도 모든 유전자를 가지고 이들 유전자에서 세포로서 생존에 필요한 단백질을 만들어야

하며, 원시 진핵세포 역시 모든 유전자를 가지고 있으며 이들 유전자를 이용하여 세포의 활성화에 필요한 모든 단백질을 만들어야 했을 것이다.

두 세포가 동시에 세포의 생존이나 활성화에 필요한 모든 단백질을 만든다는 것은 대단히 비효율적이다. 따라서 시간이 흐르면서 두 세포는 점차 기능적인 면에서 특성화의 과정을 거쳤을 것이다. 즉 원시 시아노박테리아는 독립적인 세포로서의 역할을 포기하고 광합성을 전문적으로 하는 원시 진핵세포의 소기관으로 변화했을 것이고, 원시 진핵세포는 이 소기관이 필요로 하는 단백질을 포함한 모든 것을 공급하는 역할을 맡았을 것으로 보인다. 이는 두 개의 독립적인 국가로 존재하다가 병합하여 하나의 국가로 합쳐지면서 초기에는 일종의 국가 연합을 만들고, 궁극적으로는 그 중의 한 국가의 정부가 대부분의 일을 책임지고 다른 한 국가는 특정일을 수행하는 하나의 자치 주로 변화하는 과정과 비슷하다.

공생과정을 통하여 독립적인 두 개의 세포로 존재하는 경우보다 원시 시아노박테리아가 원시 진핵세포의 광합성 담당의 소기관으로 변화하여 한 세포로 진화하는 것이 자연계에 존재하는 다른 세포들과 경쟁관계에서 훨씬 유리했을 것이다. 따라서 이러한 세포들이 긴 진화의 과정 동안에 살아남아서 현재의 식물세포를 형성하였을 것으로 보인다.



AKR2에 의한 외막 단백질 이동기작 최초 규명

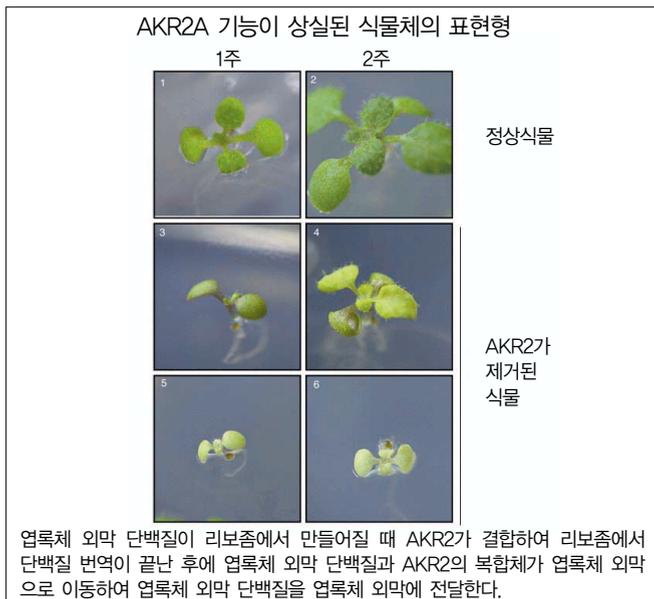
원시 시아노박테리아가 독립적인 세포로서 원시 진핵세포와 공생관계를 형성하고 있다가 원시 진핵세포의 소기관으로 변화하는 과정의 초기에 일어난 가장 중요한 것은 원시 시아노박테리아의 생존이나 원시 시아노박테리아가 광합성과 같은 기능을 수행하기 위해서 필요한 단백질을 원시 진핵세포가 만들어 공급해주는 일이었다. 이를 위하여 원시 진핵세포의 세포질에서 단백질을 만들어 원시 시아노박테리아로 옮기는 방법을 개발하였을 것이며, 이 단백질 이동 방법의 획득이 공생관계에서 소기관을 변화하는 과정에 있어서 가장 중요한 단계였을 것이다. 따라서 세포질에서 엽록체로 단백질을 이동하는 기전의 연구는 엽록체의 형성 비밀을 풀 수 있는 가장 중요한 부분이다. 필자의 연구팀에서는 AKR2라는 유전자가 세포질에서 엽록체로 외막단백질을 공급하는 역할에 핵심적인 단백질이라는 것을 최초로 밝혔다.

식물세포의 엽록체에서는 광합성이 가장 중요한 일의 하나이지만 이뿐만 아니라 수많은 화학 반응이 일어난다. 초기에는 광합성이 주된 일이었을 것이나 진화하는 과정에서 식물세포는 엽록체가 식물이 필요로 하는 수많은 생화학물을 만들어 내기 위한 생화학 공장의 역할을 더 맡도록 한 것처럼 보인다. 대부분의 식물 호르몬을 만들며, 철분과 같은 무기 영양소를 보관하는 장소의 역할까지 맡게 되었으며, 활성산소를 제거하는 역할까지 수행한다. 따라서 이러한 다양한 기능을 수행하기 위해서는 엽록체는 화학반응에 필요한 효소를 포함한 무수히 많은 단백질들을 세포질로부터

공급받아야 한다. 약 3천~5천 종의 단백질이 엽록체로 공급된다고 추정된다. 이들 단백질이 세포질로부터 엽록체로 공급되기 위해서는 엽록체를 둘러싸고 있는 두 겹의 지질막을 통과해야 한다. 단백질은 이 두 지질막을 자유로이 통과할 수 없기 때문에 특별한 방법을 마련해야 했을 것이다. 따라서 이들 단백질들이 세포질로부터 엽록체로 이동하는 과정이 엽록체의 생성 및 기능에 대단히 중요하다.

지금까지의 연구 결과는 이처럼 많은 수의 단백질이 하나의 경로를 통하여 엽록체로 이동하는 것이 아니라 단백질의 종류에 따라서 다양한 경로를 택하는 것으로 잘 알려져 있었다. 하지만 이들을 선별적으로 선택하여 세포질에서 엽록체로 이동하는데 직접적인 일을 수행하는 단백질의 실체는 알려져 있지 않았다. 필자의 연구진에서는 세포질에서 리보솜이 만들어 내는 수많은 종류의 단백질 중에서 AKR2는 엽록체의 외막으로 가는 단백질만을 선별하여 엽록체의 외막으로 이동시킨다는 것을 최초로 밝혔다.

연구진은 이러한 과정이 엽록체의 생성 과정이나 식물체의 발달 과정에서 어떤 의미를 갖는지를 연구하기 위해 AKR2가 결손된 식물체를 만들었다. 이 경우 AKR2가 결손된 식물체가 엽록체를 제대로 만들지 못하고 성장하지도 못한다는 것을 통하여 AKR2에 의한 엽록체의 외막으로의 외막 단백질의 이동이 엽록체의 생성에 필수적이라는 사실을 밝혔다. 또한 엽록체가 생성되지 않는 식물체는 광합성을 할 수 없을 뿐만 아니라, 식물세포가 필요로 하는 식물 호르몬과 같은 다양한 화학물질을 만들지 못하여 정상적인 식물로 발



달하지 못하게 된다는 것을 보였다.

아직 식물세포의 소기관인 엽록체의 생성 기원이나 엽록체의 기능을 이해하기 위해서는 더 많은 연구가 필요할 것이다. AKR2에 의한 외막 단백질 이동 기작을 규명한 것은 이러한 과정규명의 시작에 불과하다. AKR2가 어떻게 정확히 엽록체 외막 단백질을 인식하며, 또한 이 AKR2가 세포의 여러 소기관들 중에서 어떻게 엽록체만을 인식하게 되며, 또한 어떤 과정을 통하여 이들을 엽록체 외막으로 데려다 주는지에 대한 더 많은 연구가 필요하다. AKR2는 외막 단백질만을 특이적으로 데려다 주므로 외막 단백질 외의 엽록체 단백질의 경우에는 다른 종류의 단백질이 관여할 것으로 생각된다. 이 과정에 관여하는 단백질 역시 광합성 같은 엽록체의 기능을 수행하는데 있어서 대단히 중요한 역할을 할 것으로 생각된다. 이 과정에 관여하는 단백질은 아직 규명되지 못했다. 연구진에서는 이 부분에 대한 연구도 활발히 하고 있다.

엽록체에 인간이 원하는 새로운 기능 추가 기대

우리가 식물세포에서 엽록체의 생성 기작을 밝히려는 가장 중요한 목적은 인간이 과학적인 측면에서 생명현상을 어떻게 이해할 수 있는가 하는 질문에 대한 답을 구하고자 하는 것이다. 현재의 생명체가 어떻게 진화돼 왔으며, 또 수천 년, 수억 년 후의 미래에는 어떻게 변할 것인가와 같은 생명체에 대한 근본적인 질문에 대한 기초적인 지식을 제공할 수 있을 것이다. 또 다른 중요한 목적은 생명현상에 대한 기초연구를 통하여 발견한 원리를 응용하거나 활용하

여 인류의 삶에 기여할 수 있는 방법을 찾고자 하는 것이다. 즉 식물세포의 기초적인 구성 원리, 엽록체의 생성원리 등을 응용하여 식물세포의 엽록체를 재설계하여 광합성의 효율이 더 향상된 식물을 개발할 수 있을 것이다. 물론 이렇게 하기 위해서는 단백질 이동과정을 포함한 더 많은 기초연구가 필요하다. 광합성 효율이 증가된 식물은 더 많은 이산화탄소를 흡수하여 현재 가장 커다란 환경문제로 대두되고 있는 이산화탄소의 제거에 활용할 수 있을 것이다.

또 다른 중요한 활용은 엽록체를 재설계하여 현재의 식물세포의 엽록체가 수행하지 않는 기능을 추가할 수 있을 것이다. 이러한 과정은 이미 진화의 과정에서 식물세포가 적용한 방법이다. 위에서 설명하였듯이 엽록체는 원시 식물세포에서 초기에는 광합성을 담당하는 소기관이었을 것이지만 지금은 식물세포가 필요로 하는 수많은 생화학물질을 공급하기 위한 화학반응을 수행하는 소기관으로서의 역할을 수행한다. 따라서 인간의 필요에 따라서 엽록체에 인위적으로 새로운 기능을 추가할 수 있을 것이다. 물론 새로운 기능을 추가하기 위해서는 이 기능을 수행하는데 필요한 단백질을 암호화하고 있는 유전자가 있어야 한다. 이러한 문제는 수많은 게놈 프로젝트를 통하여 무수히 많은 유전자가 알려져 있기 때문에 이들 게놈프로젝트에서 얻어진 정보를 활용하여 유전자를 확보할 수 있을 것이다. 이렇게 확보된 유전자는 식물세포에 형질전환기법을 통하여 도입할 수 있을 것이다. 이 때 이 유전자를 약간 변형시켜 엽록체로 이동할 수 있는 형태로 식물체에 도입한다면, 이 유전자가 암호화하고 있는 단백질은 세포질에서 만들어져 엽록체로 이동하여 저장될 것이다. 그리고 이 단백질은 엽록체에서 인간이 원하는 어떤 기능을 수행할 수 있을 것이다. 이렇게 인위적으로 새로이 추가된 단백질이 의약품 단백질과 같은 고부가가치의 단백질이라면 이 식물체는 고부가가치의 의약품 단백질을 만들어서 엽록체에 대량으로 저장하고 있는 식물체가 될 것이다. 궁극적으로는 이러한 응용 가능성을 확대하여, 식물세포를 재설계하는 방법을 통하여 식물세포를 고부가가치의 유용하고 다양한 단백질을 생산하는 생산 시스템으로 활용할 수 있을 것이며, 이는 어떤 단백질을 생산하고자 하느냐에 따라 산업적으로 무한한 가능성을 갖게 될 것이다. **ST**



글쓴이는 서울대학교 화학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 미국 노스캐롤라이나대학교 채플힐 캠퍼스에서 박사학위를 받았다. 미국 하버드 의과대학 박사후 연구원, 경상대학교 교수, 식물 단백질 이동 연구단 단장을 지냈다.