

**제 12 회 137 억년 우주의 진화 8 강 노트**

(박문호박사님 강의를 요약 정리한 내용입니다)

12 회 137 억년 우주의 진화 마지막 강의 입니다.

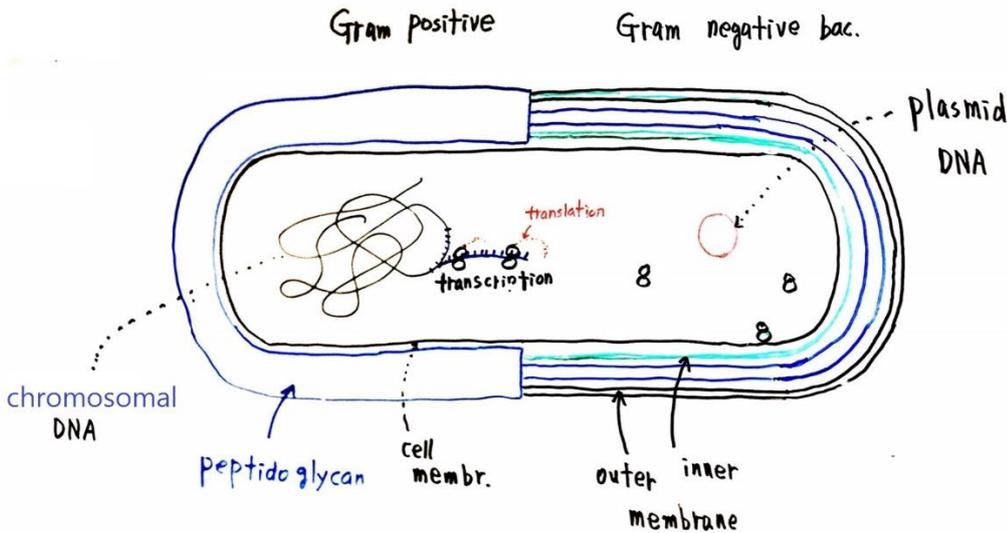
오늘의 강의 내용은 박테리아 입니다.

우리 브레인은 이미지적 사고와 상징적 사고를 한다. 언어가 출현하면서 상징적 사고가 시작되었다.

상징적 사고는 10 만년 정도밖에 되지 않았다. 그러나 이미지적 사고는 적어도 300 만년이 넘었다.

이미지가 이긴다. 그런 의미에서 그럴 수 있어야 한다.

설명하는 사람한테는 그림을 요구할 수도 있지만, 그리는 사람은 설명을 요구 받지 않는다. 그림이 더 설명보다 포괄적이고 근본적이다. 텍스트보다 이미지가 강하다.



박테리아에서 제일 중요한 것은 gram positive 와 gram negative 라는 용어이다.

**그람 양성균**(Gram 陽性菌, 영어: Gram-positive bacteria)은 **그람 염색**에서 **감청색** 또는 **보라색**으로 염색이 되는 **세균**을 말한다. 이에 반해, **적색** 또는 **복숭아 색**으로 염색이 되는 것을 **그람 음성균**이라고 부른다.

그람 포지티브 박테리아에는 파상풍, 나병, 폐렴균 등이 속하고 그람 네거티브에는 대장균이 속한다.

그람 포지티브 박테리아는 껍질이 벽이 두껍다. 박테리아에서 물을 제거하면, 그람 포지티브 박테리아 무게의 90%가 껍질이 차지한다. 단순하게 이야기하면, 박테리아에서는 껍질이 본질이다. 반면 바이러스는 안에 있는 게놈이 본질이다. 박테리아의 껍질은 Peptidoglycan 으로 되어 있다. 그람 네거티브 박테리아는 peptidoglycan 무게가 전체의 10% 밖에 안 된다. 그람 네거티브 박테리아에서 peptidoglycan 안에 있는 막을 inner membrane, 바깥에 있는 막을 outer membrane 이라고 한다. 박테리아에서 가장 안에 있는 막이 plasma membrane 이다.

박테리아와 식물은 껍질이 본질이다. 단체도 광고(propaganda)가 본질이다. 속에 무엇인가 있다고 생각하는 것이 근본주의, 본질주의이다. 언어까지 올라가면 실체는 관습이고 상징일 뿐이다. 실체는 유일하게 맥락이고 관계이다. 식물에서도 살아 있는 조직은 껍질과 잎 뿐이다. 산맥은 장중한 것이 아니라 가벼워서 뜬다. 가볍고 단단한 것이 중요하다. 그것이 껍질의 본성이다. 껍질과 데코레이션과 프로파간다가 중요하다. 그것을 문화라고 한다.

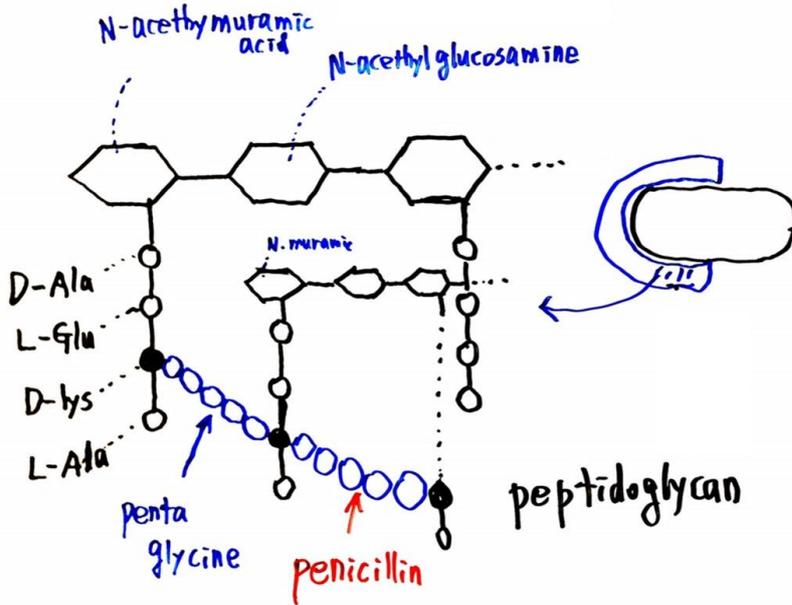
껍질을 제외하고는 그람 포지티브와 네거티브의 내부 구조는 비슷하다.

바이러스를 제외하고 박테리아부터 지구 상 눈에 보이는 모든 생물체의 게놈은 DNA 이다.

박테리아에 있는 DNA 를 chromosomal DNA 라고 한다. 그리고 또 다른 DNA 인 plasmid DNA 를 갖고 있다. Plasmid 는 박테리아 안에 1 개에서 수백 개까지 있다. 대개 chromosomal DNA 가 plasmid 보다 10 배 정도 크다. 박테리아는 유전자가 1000 개 정도 된다. 인간의 유전자는 25,000 개 정도이며, 바이러스의 유전자는 최대 200 개 이내이다. Plasmid 가 없어도 박테리아가 살아가는데 문제가 없다. 그리고 필수적인 기능을 하지 않는다. 없어도 된다. 그래서 1-2 개만 갖기도 하고 수백 개를 갖기도 한다. Plasmid 는 항생제 내성과 관계가 있다. 박테리아는 plasmid 를 통해 유전자를 수평으로 교환한다. 유전공학은 plasmid 를 핸들링한다.

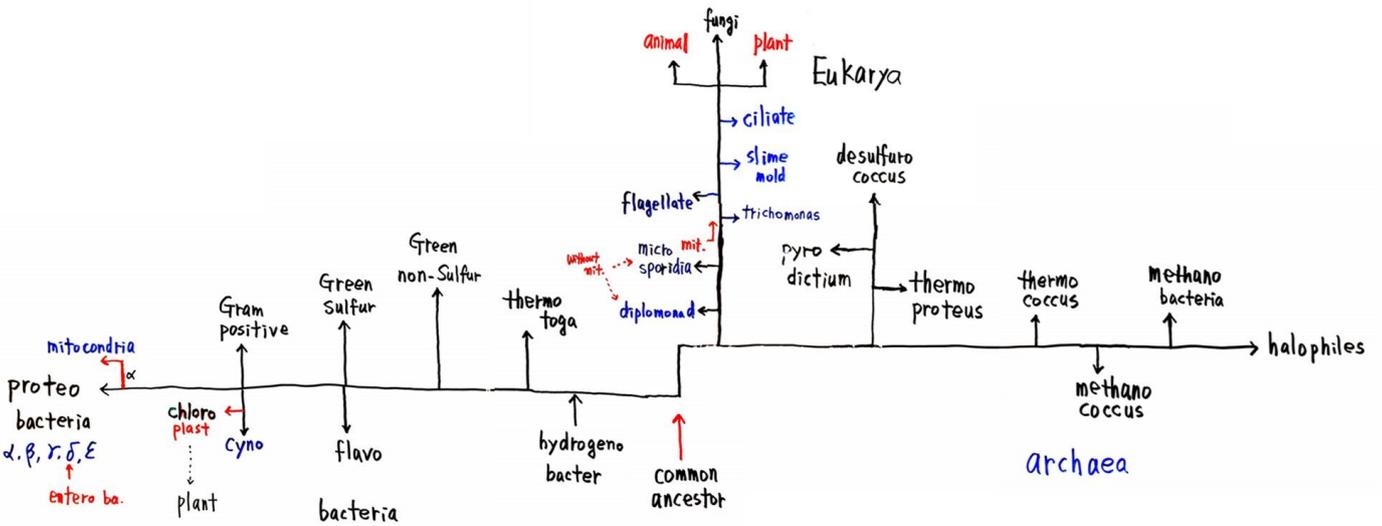
peptidoglycan 의 분자 구조이다.

N-Acetylmuramic acid 와 N-Acetylglucosamine acid 가 반복되는 구조이다.



N-Acetylmuramic acid 2 번 탄소 밑에 아미노산이 4 개 붙어 있다. 순서대로 D-Ala, L-Glu, D-Lys, L-Ala 이다. 이 아미노산 사슬은 N-Acetylmuramic acid 에만 붙는다. D-Lys 에 5 개 아미노산이 붙는다. 이 구조를 pentaglycine cross link 라고 한다. 페니실린은 pentaglycine cross link 을 자른다. 여기가 끊어지면 peptidoglycan 이 붕괴된다. 박테리아 막이 붕괴되어 죽는 것이다.

박테리아를 포함한 생명의 계통 분류도이다.



칼 우즈가 1977 년에 발표한 논문에 의해 생물학 교과서가 모두 바뀌게 되었다. 칼 우즈(Carl Woese)는 16S(또는 18S) 리보솜 RNA(ribosomal RNA)의 정보에 기초를 두고 생물계를 세균, 고세균 그리고 진핵생물 세 그룹으로 대별하였다.

제일 처음 시작된 생명체를 last common ancestor 라고 한다.

생명의 기원이 하나라는 데에 많은 학자들이 동의한다. 대부분 단일 기원 쪽으로 의견이 모아진다. 인류도 아프리카 단일 기원이 정설로 되었다. 특히 엄밀한 과학을 적용할수록 단일 기원 설이 우세하다. 우주 자체가 빅뱅 단일 기원이므로 동시에 다양하게 생긴 현상은 드물다.

박테리아(bacteria)에서 처음으로 출현한 종은 hydrogenobacter 이다. 지구 초기 수소를 이용하여 에너지를 획득했던 박테리아이다. 다음은 thermotoga 이고 다음은 green non-sulfur bacteria 이고 다음은 green sulfur bacteria 이다. 비슷한 시기에 flavobacteria 이다. 어류에 기생하는 박테리아이다. 그 다음은 gram positive bacteria 이다. 같은 시기에 cyanobacteria 가 출현 했다. 시아노 박테리아에서 나온 결가지가 엽록체(chloroplast)이다. Chloroplast 가 식물로 진화하다. 물 분해형 광합성은 수천 가지 박테리아 중에서 시아노 박테리아 1 family 만 성공했다. 대부분의 박테리아는 광합성을 하지 못한다. 그래서 그들은 산소가 없는 환경(창자, 화산지대 등) 속에서 살고 있다.

박테리아에서 가장 많은 것이 proteobacteria 이다.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$  등으로 분류된다.

내장 속에 있는 enterobacteria 는  $\delta$  proteobacteria 에 속한다. 4000 종이 넘는다.

$\alpha$  proteobacteria 에서 mitochondria 가 나왔다. 미토콘드리아가 들어가서 에너지 생산량이 18 배 높아지면서 출현하는 것이 다세포 생물이다.

다른 축은 고세균(archaea)이다.

이 쪽은 소금과 열이다. 40 억년 전 지구 초기 환경을 알게 해 준다.

먼저 thermoproteus 고세균이다. 다음은 pyrodictium, 그리고 desulfurococcus 이다.

그 다음은 thermococcus, 그리고 methanococcus 이다. 다음은 methanobacterium 이다. 마지막으로 halophiles 이다.

세균에서 제일 중요한 것은 시아노 박테리아. 메탄생성 고세균, 황산염 환원세균이다.

다음 축은 진핵 생물(eukarya)이다.

제일 먼저 diplomonad 가 나온다. 다음은 microsporidia 이다. 다음은 trichomonas 이다. Trichomonas vaginalis(질편모충)가 전 세계에서 가장 많이 감염된 병이다. 1 억 7 천만명이 감염되어 있다.

다음에 나오는 것이 flagellate 이다. 다음이 slime mold 이다. 변형균이라고도 하며 모양이 바뀐다. 다음은 ciliate(섬모충류)이다. 마지막으로 animal, plant, fungi 3 가지가 나온다.

diplomonad 와 microsporidia 에는 미토콘드리아가 없다. 진핵세포는 무조건 미토콘드리아를 갖고 있어야 된다는 것이 정설이다. 그래서 어떤 학자들은 diplomonad 와 microsporidia 가 처음에는 미토콘드리아를 갖고 있었으나 퇴화되어 없어 졌을 것이라고 주장하기도 한다.

동물, 식물, 균류를 다세포 생물이라고 한다. 그 외 모든 생물은 단세포이다. 단세포는 눈으로 볼 수 없다.

진핵 세포는 DNA 를 싸고 있는 핵막이 있다. 박테리아는 핵막이 없다. 박테리아는 핵막이 없으므로 전사(transcription)와 번역(translation)이 동시에 일어난다. 진핵 세포는 전사와 번역이 분리되어 있다. DNA 의 일부만을 copy 하는 것을 전사라고 한다. 복제(replication)는 DNA 전체를 copy 하는 것을 말한다. 박테리아 속에는 리보솜이 300 만개 정도 있다. 전사가 일어 나면 곧장 리보솜이 붙어 번역을 한다. 그러면 단백질이 나온다. 박테리아에서는 전사와 동시에 번역이 일어나므로 에러를 수정하지 못한다. 박테리아는 1/10,000 의 에러가 생기지만 진핵세포는 1/10 억 의 에러가 생긴다.

진핵 세포에서는 리보솜의 SSU 과 LSU 이 핵 안에서 만들어져서 각 각 핵막을 벗어나 세포질 속으로 나온다. 전사는 핵 속에서 일어나고, 번역은 세포질 속에서 일어난다. 세포질 속에 m-RNA 를 만나면 SSU 가 먼저 결합하고 이어서 LSU 가 결합하여 단백질을 만든다. 단백질은 핵막 안에서는 만들어 질 수 없고, 세포 질 속에서 만들어 진다.

죽음과 섹스는 미토콘드리아가 발명한 것이다.

우리 몸에 lymph node 가 500 여개 있다. 그 중에서 300 여개가 목 부위에 있다.

“배가 아프다”는 말은 내장과 신경이 직통으로 연결되어 있다는 것을 말해준다.

그런데 질투나 시기심으로 속이 쓰린 경우는 신경 작용이 내장에 영향을 미쳤다는 것이다.

시기와 질투는 인류의 보편적 감정이다. 우리가 자유롭게 된다. 자유롭게 될 때 실체에 좀더 가까이 접근할 수 있다. 회피할 필요가 없다. 배가 아픈 것은 내장에 문제가 생겨서 신경 시스템이 인지한 것이고, 질투나 시기심은 신경 시스템에서 발생한 내용이 내장에 영향을 미친 것이다. 내장과 신경 시스템이 직통으로 연결되어 있는 것이다.

개는 내장에 문제가 생기면 자신의 대변을 먹는다. 토끼는 태어난 새끼에게 어미의 변을 먹인다.

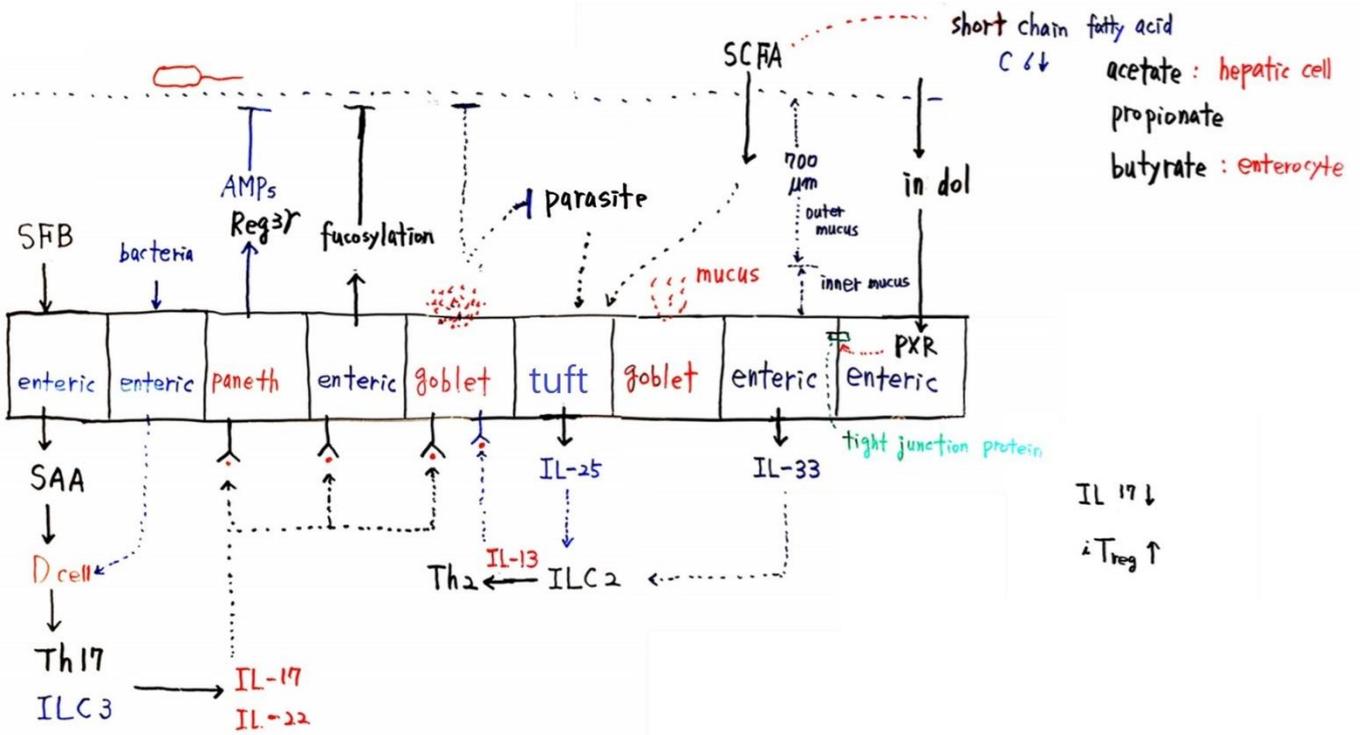
대변을 싫어하고 추하게 느끼는 것은 문화적 관습이다. 모든 것을 직시할 수 있다. 사이언스가 위대한 것은 뭔가를 직시할 수 있게 해 준다. 질투심이나 배설물을 좋지 않게 생각했으나 과학을 공부할수록 왜 그런 편견이

생겼는가를 알게 된다. 01:40

대장 속 박테리아가 4000 종이다. 그 중에 병을 일으키는 것은 100 여종에 불과하다.

유산균은 이로운 박테리아이다. 핵심은 균형이다.

소장 점막에서 일어나는 것을 이해하면 생명 전체를 보는 관점이 달라질 수 있다.



소장 용모세포를 그린다. Villi 는 길이가 200  $\mu\text{m}$  정도 된다. Villi 위에 mucus 가 덮고 있다. 첫 번째 층(inner mucus)이 100 $\mu\text{m}$  이고, 두 번째 층(outer mucus)이 700 $\mu\text{m}$  이다. 속이 좋지 않은 것은 mucus 가 온전하지 않다는 것이다.

Mucus 바깥은 소장 내에 있는 lumen 이다. 이곳에는 세균이 득실거린다. Mucus 가 없으면 소장의 세포들이 박테리아의 공격을 직접 받게 된다. 스트레스를 받으면 mucus 의 두께가 수시로 바뀐다. Mucus 를 얼마나 잘 유지하는가 하는 것이 전체 면역 시스템과 연결된다.

속이 편해야 기분이 좋아진다. 내장과 신경은 하이웨이로 연결되어 있다. 마음보다는 내장을 먼저 편하게 해야 한다. 그 출발이 면역 시스템과 점막을 정확히 이해하는 것이다.

SFB (segmented filamentous bacteria)가 enteric 세포를 공격하면 enteric 세포가 SAA(serum amyloid A)를 분비하고, D 세포가 SAA 를 감지하여 Th 17 세포와 ILC 3(innate lymphoid cell 3) 세포에게 전달한다.

이 두 세포가 IL(interleukin)17 과 IL 22 를 방출한다. IL 은 leukocyte 사이의 정보 전달 물질이다.

한편으로 박테리아가 직접 enteric 세포를 통해 들어와 D 세포에 감지 되는 경우도 있다.

IL 17 번과 IL 22 번이 Paneth 세포를 자극하여 AMP(antimicrobial peptide)와 Reg  $\gamma$  같은 항균제의 생산을 촉진시키고, goblet 세포로 하여금 mucus 의 생산을 등대시켜 기생충을 막고 mucus 층을 보호한다.

그리고 enteric 세포의 fucosylation 을 활성화하여 mucus 층의 붕괴를 막는다.

Parasite 가 tuft 세포와 enteric 세포를 공격하면 tuft 세포에서 IL 25 이 나오고, enteric 세포에서는 IL 33 번이 나온다. IL 25 번과 IL 33 번은 ILC 2 를 자극하고 ILC 2 는 IL 13 번을 분비하고 Th 2 세포를 자극한다.

IL 13 번은 goblet 세포를 자극하여 mucus 생산을 증대 시킨다.

Indole 은 PXR 활성화를 통해 tight junction protein 의 발현을 상향 조절한다.

high fat diet 는 mucus 를 약화 시키고, 섬유소가 많은 음식은 mucus 를 강화시킨다.

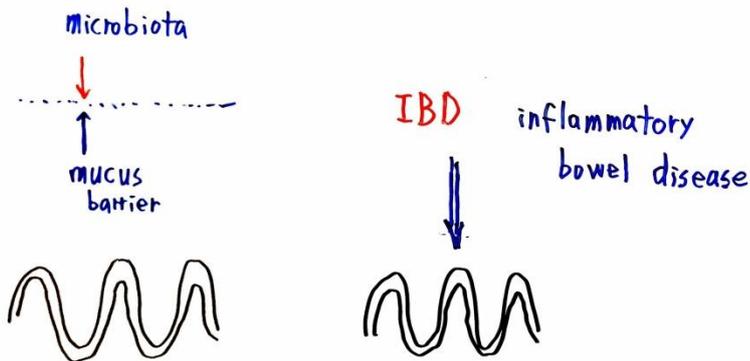
mucus 가 약화되면 그것을 복원하기 위해 전쟁이 일어 난다. 많은 세포들이 동원되고 몸이 힘들어 진다.

면역 시스템이 조용해 지는 것이 속이 편안한 것이다. mucus 층이 양호하여 면역계가 반응할 필요가 없는 것이 속이 편안한 것이다.

SCFA(short-chain fatty acid)도 goblet 세포를 자극하여 mucus 생산을 증대시킨다.

SCFA 에는 acetate, propionate, 그리고 butyrate 가 있다. Acetate 는 간 세포(hepatic cell)의 에너지 원이다.

Butyrate 는 내장(enteric cell)의 에너지 원이다.



박테리아 침범을 mucus barrier 가 막고 있다. 스트레스 등으로 인해 Mucus 층이 약해지면 IBD(inflammatory bowel disease) 상태가 된다. 위궤양도 IBD 의 일종이다.

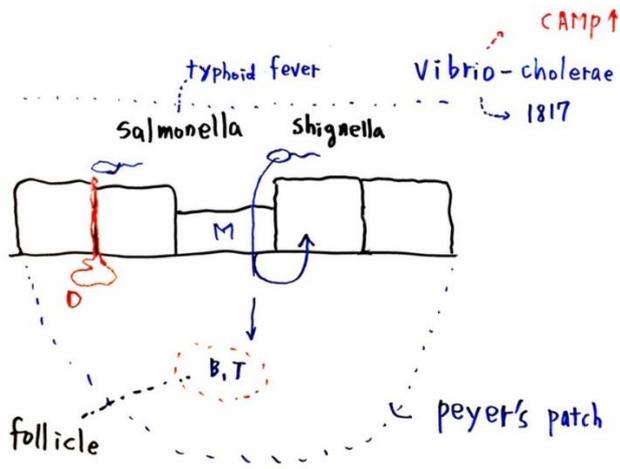
Mucus 층이 붕괴되어 박테리아가 들어와 면역 세포와 만나면 인터루킨 등이 혈류를 타고 몸 전체로 번져 나가면 비장 상태가 된다.

속이 편한 것은 IL 17 번이 줄어들고 iTreg 이 늘어나는 상태이다.

(2 교시)

대장에는 산소가 거의 없어 대장에는 박테리아가 번성하고 있다.

소장에 peyer's patch 가 있다.



소장의 안쪽(관강쪽)에는, 융모라는 작은 돌기가 밀집해 있어 영양분을 흡수하는 역할을 한다.

그런데 1677년 스위스의 의사 파이어(Joseph Conrad Hans Peyer)는 이 융모가 소장 내부에 균일하게 있는 것이 아니라, 군데군데에 융모가 패치워크장에 몰려 있는 점을 알아내고, 이것을 파이어의 판(Peyer's patch)이라고 이름 붙였다. 그 후, 조직학 해석에 따라 이 판 아래에 해당하는, 소장의 점막 고유층에, 림프 소절이 평면상으로 모여 있는 것이 밝혀졌고, 이 림프 소절에 의한 평판 모양의 림프 조직을 파이어의 판이라 부르게 되었다.

Peyer's patch에는 follicle이 있고 그 속에 B 세포와 T 세포가 많이 모여 있다. D 세포의 세포 막이 두 세포 사이를 통해 올라가서 안테나를 세우고 있다. D 세포가 박테리아를 감지하면 T 세포와 B세포를 훈련 시킨다. 박테리아들은 주로 M 세포를 통과한다. M 세포는 APC(antigen presenting cell)의 일종이다. D 세포에게 항원을 제시해 준다. 병원균들은 M 세포를 통과한 후 옆에 있는 세포들을 감염 시킨다.

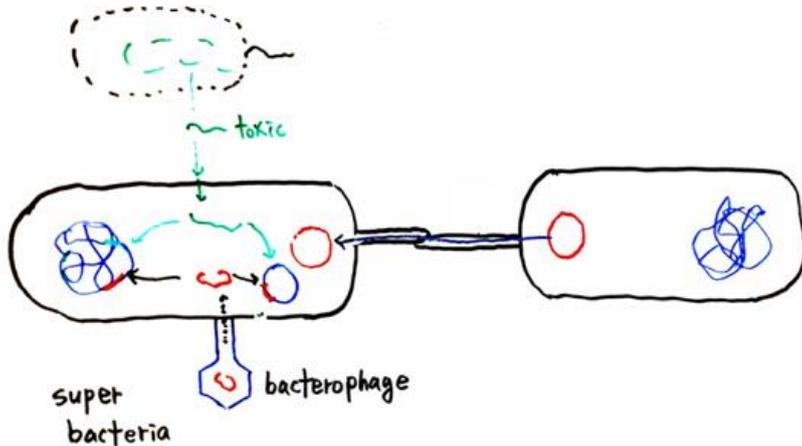
salmonella는 장티푸스 균이다. Typhoid fever라고도 한다. Shigella는 이질균이고, 콜레라(vibrio-cholera)는 vibrio 균의 일종이다.

콜레라는 인도의 풍토병이었다. 1883년 로버트코흐(Robert Koch)가 캘커타에서 콜레라의 원인이 비브리오 균임을 밝혀 내고, 병원균 설을 주장하였다. 이때부터 인류는 전염병의 원인이 박테리아라는 것을 알게 되었다.

병원균 설은 인류의 10가지 과학 혁명에 속한다.

콜레라에 걸리면 설사를 심하게 하는데 이유는 cAMP가 증폭되기 때문이다.

다음은 박테리아가 유전자를 전달하는 방법이다.



박테리아와 박테리아 사이에 유전물질을 주고 받는다. Plasmid가 이동을 한다.

Plasmid가 수 백 개가 될 수도 있다. 한편으로 바이러스의 침입을 받게 되면 바이러스의 게놈이 들어 온다.

박테리아에 감염하는 바이러스를 bacteriophage라고 한다.

바이러스에서 들어온 게놈이 박테리아의 chromosomal DNA에도 들어 가고 plasmid DNA에도 들어 간다.

Plasmid에 심어진 바이러스의 DNA는 수평으로 다른 박테리아에 확산되고 전 지구적으로 퍼진다.

용해 현상에 의해 분해된 박테리아의 DNA가 조각이 나서 흩어지면 조각난 DNA가 박테리아로 들어간다.

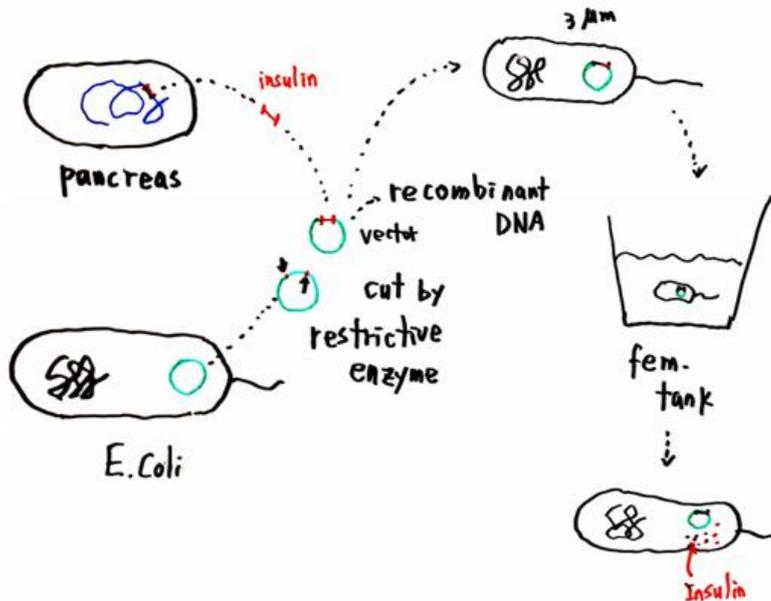
DNA가 조각이 나면 toxic해 진다. 들어온 DNA는 plasmid DNA에도 가고 chromosomal DNA에도 간다.

항생제에 내성을 가진 박테리아가 죽으면서 그 파편을 전달해 줄 수 있다. 이러한 과정이 수없이 진행된다면 대부분의 항생제에 내성을 갖는 박테리아가 생길 수 있다. 그런 박테리아를 super bacteria 라고 한다.

인간의 게놈 속에도 박테리아에서 온 유전자가 200개가 넘는다.

생명은 키메라이다. 나는 없다. 여럿이 모여서 내가 되었다.

이 시스템을 인간이 역 이용한 것이 유전공학이다.

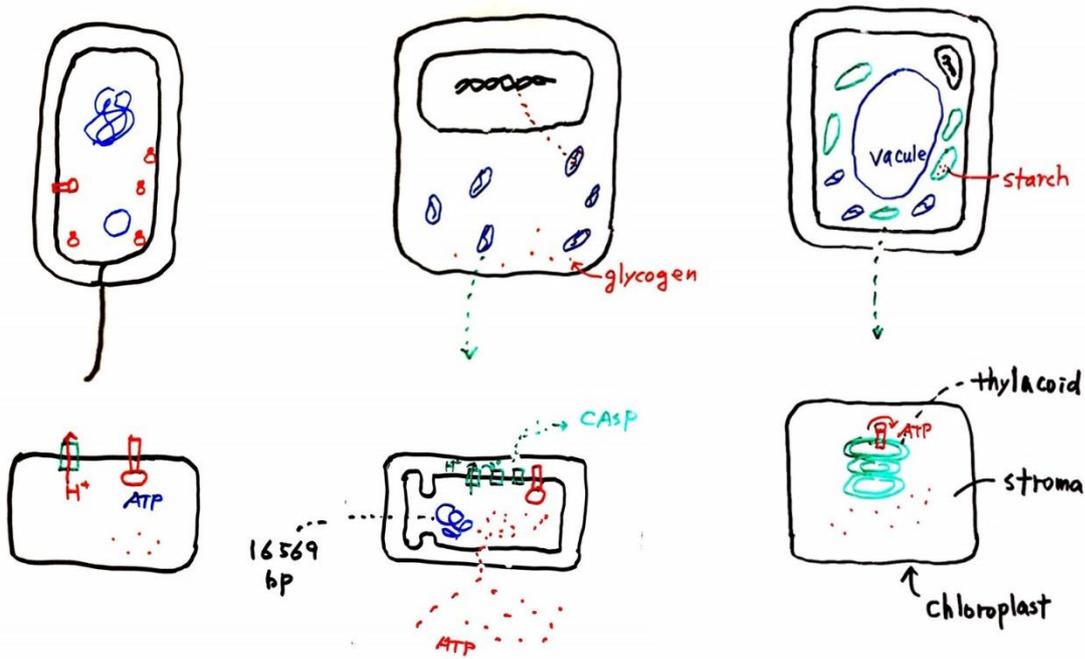


대장균 박테리아의 plasmid DNA를 제한효소(restrictive enzyme)으로 잘라내고, 그 자리에 췌장에서 인슐린을 만드는 DNA를 잘라내어 붙인다. 이렇게 조작한 plasmid(vector)를 다른 대장균 박테리아에 집어 넣는다.

대장균의 크기는 3μm이다. 이 박테리아를 발효탱크(fermentation tank)에 넣어 인슐린을 양산한다.

이것을 생합성이라 한다.

박테리아, 동물세포, 식물세포의 특징을 비교해 보자



식물세포는 구조가 박테리아와 비슷하다. 껍질이 두껍다.

박테리아 게놈은 chromosomal DNA와 plasmid가 있다. 그리고 리보솜이 세포질 속에 있다.

동물 세포의 핵막 속에 DNA가 있다. 그리고 미토콘드리아가 100-100,000마리까지 있다.

세포질 속에 입자 형태의 글리코겐이 있다.

식물세포에는 부피의 약 90%를 차지하는 액포(vacuole)가 있다. 식물의 잎이 팽팽한 이유도 액포 때문이다.

핵 속에 DNA가 있고, 미토콘드리아와 엽록체가 있다. 엽록체 안에 녹말이 저장되어 있다.

밤 동안에는 녹말이 sucrose 형태로 체관을 타고 조직으로 이동한다. 고구마 감자가 된다.

다음은 에너지를 만드는 방법이다.

박테리아는 ATP 합성 효소가 막에 박혀 있다. 세포질 속에서 ATP를 만든다.

동물은 미토콘드리아에서 ATP를 만든다. 미토콘드리아는 2중막이다.

양성자가 막간 공간에 모였다가 ATP 합성효소를 통해 ATP를 만든다.

박테리아와 미토콘드리아는 방향이 동일하다. 미토콘드리아가 만든 ATP는 세포질로 보내 세포가 쓰도록 한다.

미토콘드리아가 스트레스를 받으면 cytochrome C가 빠져 나가서 CASP를 활성화 시키고 CASP는 핵 속으로 들어가 DNA를 파괴 시킨다. 세포사가 일어난다.

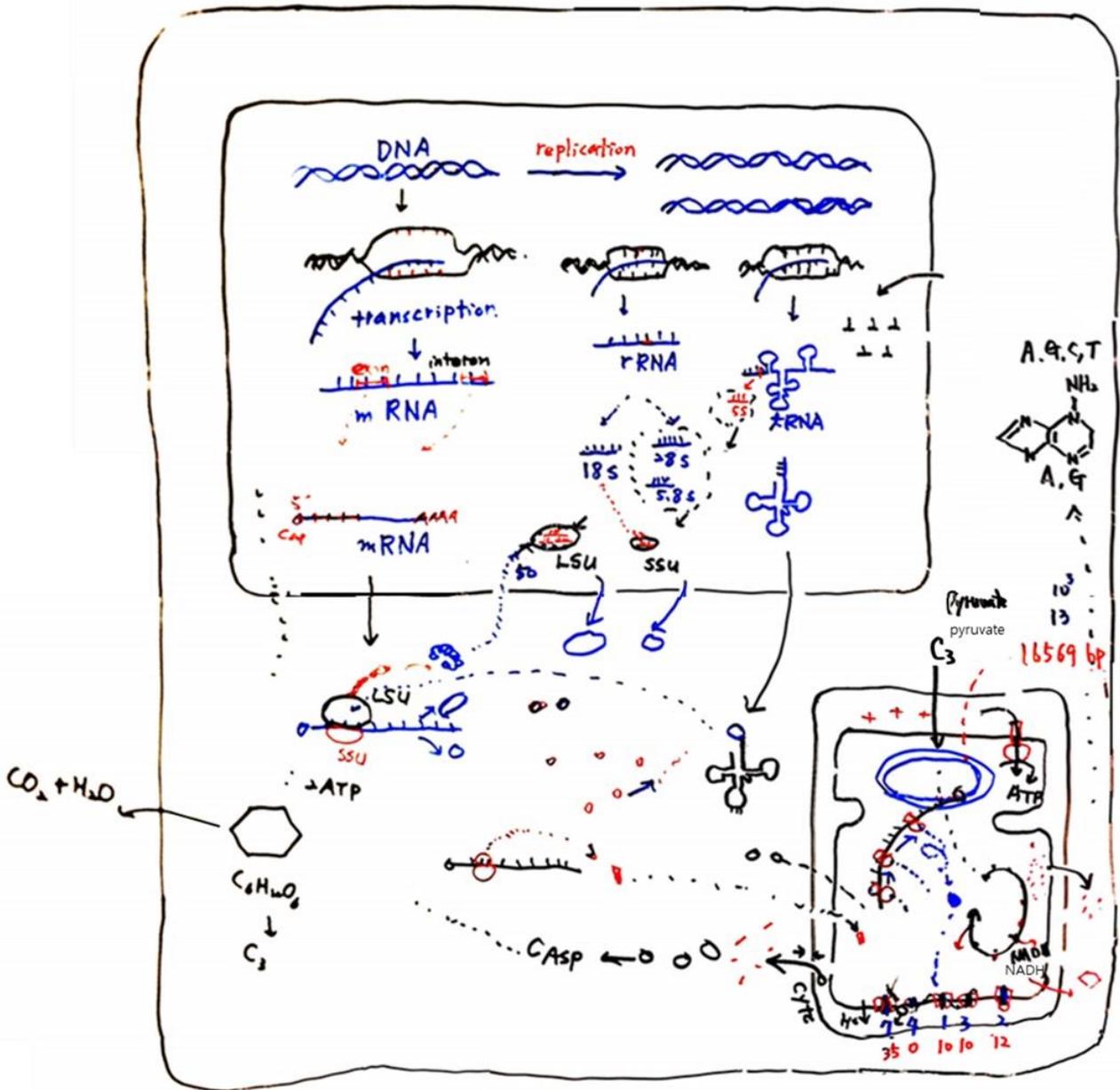
식물은 엽록체 안에 틸라코이드 막이 있다. 엽록체 바깥 공간이 stroma이다.

ATP는 stroma 공간에 만들어 진다.

미토콘드리아는 자체적인 DNA가 있다. 사람 세포 속의 미토콘드리아는 16,569개의 bp로 구성 되어 있으며, 유전자는 37개로 알려져 있다.

박테리아의 유전자는 대개 1,000여개 이다. 미토콘드리아는 90% 이상을 숙주 세포에 넘겨 주었다. 우리 DNA 속에는 미토콘드리아가 넘겨 준 DNA를 그대로 갖고 있다. 미토콘드리아는 세포 밖으로 나가면 살 수 없다. 숙주 세포가 죽으면 미토콘드리아도 죽는다. 운명 공동체이다. 죽음은 미토콘드리아가 발명하여 우리에게 선물한 능력이다.

죽음을 피하고 싶으면 단 세포로 돌아가면 된다. 박테리아는 죽음이 없다. 다세포 생명은 함께 죽기로 서약한 것이다. 죽음은 만들어진 개념이다. 죽음과 섹스는 미토콘드리아가 만들어낸 발명품이다.



진핵 세포이다. 지구상 모든 동물, 식물, 균류의 세포이다. 박테리아 보다 10,000 배나 크다. DNA 이중 나선이 있다. 완전히 동일한 2 세트를 만드는 것을 복제(replication)라고 한다.

우리 몸의 체 세포는 일생 동안 50여 회 복제를 한다. 텔로미어 문제 때문에 더 이상 분열할 수 없다.

일부를 copy하는 것을 전사(transcription)라고 한다. 전사하여 나온 결과물이 RNA이다.

RNA는 3가지 이다. 메신저(m) RNA, r-RNA, t-RNA이다.

메신저 RNA에서 엑손 부분만 모으고, 머리에는 cap을 씌우고, 꼬리에는 polyadenine을 붙이면 정품이 된다.

정품이 되어야 핵막을 통과해서 세포질 속으로 들어갈 수 있다.

RNA는 세포질 속에서 15분 정도 밖에 살 수 없다. 세포질 속에 있는 리보솜 SSU(small sub unit)와 LSU(large sub unit)가 m-RNA를 만나 단백질을 만든다. 리보솜 SSU와 LSU는 핵 속에서 각각 만들어져서 핵 막을 통과해서 세포질 속으로 들어온다.

리보솜 SSU와 LSU는 r-RNA가 50여종의 단백질과 결합하여 만들어 진다.

SSU에는 18s RNA가 들어가고, LSU에는 28s, 5.8s, 5s RNA가 들어 간다.

리보솜 SSU와 LSU를 만드는데 필요한 단백질은 모두 세포질에서 만들어져 거꾸로 핵 속으로 들어간 것이다.

단백질을 만드는데 필요한 아미노산은 세포질 속에 있다. 이 아미노산을 t-RNA가 실어서 LSU으로 가져 간다.

미토콘드리아는 이중 막이다. 미토콘드리아는 20억년 전에 잡아 먹힌 박테리아이다. 알파 프로테우스 박테리아의 일종 이었다.

미토콘드리아에는 독자적인 DNA가 있다. 16, 569개 bp로 구성되어 있다. 단백질을 만들 때 박테리아처럼 전사와 번역이 동시에 이루어 진다. 만들어진 단백질들이 전자전달 회로에 박힌다. 그러나 제 역할을 하기 위해서는 숙 주 세포에서 만드는 단백질이 필요하다. Host cell 에서 만든 단백질이 미토콘드리아에 만든 단백질과 합해져서 전자 전달 체인을 완성한다. 미토콘드리아에서 각각 7,4,1,3,2 개 단백질이 들어가고, 세포질에서 35, 0, 10, 10, 12 개 단백질이 들어 가서 호흡 채널을 완성한다.

미토콘드리아 안에는 TCA회로가 있다. TCA회로가 돌면 태양 에너지를 머금은 NADH가 만들어 진다.

NADH가 NADH 탈 수소 효소에 의해 분해되면 전자가 빠져 나와 전자 전달 체인을 통해 이동을 한다.

전자가 이동하면서 막간 공간으로 양성자를 내 보낸다. 막간 공간에 양성자 농도가 높이 진다. 그 양성자가 ATP 합성효소를 타고 다시 미토콘드리아 기질(matrix)속으로 들어온다. 양성자 3개가 ATP 합성효소를 통과하면 ATP 1 분자가 만들어 진다. 미토콘드리아 속에서 만들어진 ATP가 세포질 속으로 들어가서 사용된다.

미토콘드리아가 스트레스를 받으면 시토크롬 C가 막간 공간으로 빠져 나가고 다시 미토콘드리아 외막을 통과하여 세포질로 빠져 나간다. 이 시토크롬 C가 카스파제를 트리거 한다. 카스파제가 핵 속으로 들어가 DNA를 파괴 한다. 그것이 우리의 죽음이다. 죽음은 미토콘드리아가 결정한다.

미토콘드리아도 박테리아 이므로 2분법으로 분열한다. 미토콘드리아는 host cell이 분열해야 자기도 분열할 수 있다. 그런데 host cell이 돌연변이의 축적 등 기타 이유로 DNA에 문제가 생기면 분열할 수 없다.

그래서 미토콘드리아가 숙주 세포에게 젊고 싱싱한 다른 세포와의 유전자 교환을 유도한다. 이것이 섹스의 기원 이다. 죽음과 섹스는 미토콘드리아가 우리에게 준 선물이다.

숙주세포와 미토콘드리아가 합작으로 만든 것이 호흡이다.

미토콘드리아 호흡을 통해서 18배나 더 많은 에너지를 얻을 수 있게 되었다. 에너지가 많으므로 세포 내에 많은 기관을 유지할 수 있게 되었다. 그래서 세포들이 모이기 시작했다. 그것이 다세포 생명체의 출현이다.

그러나 생명에서 더 근본적인 것은 glucose이다.

glucose( $C_6H_{12}O_6$ )는  $CO_2$ 와  $H_2O$ 의 결합이다. 그 결합을 매개한 것이 태양의 에너지이다. Glucose는 태양의 아들이다. Glucose는 세포질에서 해당 작용을 거쳐 피루브 산(pyruvate)이 된다. TCA 회로의 시작은 피루브산이다. glucose가 세포질에서 해당작용을 거치면 2개의 ATP를 얻는다. 그러나 TCA회로를 돌면 36개의 ATP를 얻는다. 그래서 생명의 폭발이 일어났다.

DNA와 RNA의 본질은 NT(nucleotide)이다. NT의 기원은 미토콘드리아이다. 미토콘드리아 TCA회로의 알파 케토 글루타르산과 옥살로 아세테이트 산에서 대부분의 아미노산이 만들어진다. 그리고 아데닌과 구아닌, 시토신, 티민을 만드는 퓨린과 피리미딘도 결국 glucose에서 왔다. 모두가  $H_2O$ 와  $CO_2$ 가 결혼한 태양의 아들이다. NT는 모두 미토콘드리아에서 만들어져 핵 속으로 공급되고, DNA와 RNA가 만들어진다.

생명의 재료는 아미노산과 NT 2가지 밖에 없다. 그 2가지를 미토콘드리아가 만들어 준다. 미토콘드리아를 이해하지 않고는 생명을 이해할 수가 없다. 그러나 미토콘드리아가 작업을 하기 위해서는 glucose가 있어야 한다. 생물학은 입자물리학과 같다. 지금 생물학의 주류는 분자 진화이다. 생물학은 아미노산과 NT이야기이다.

동물은 시간을 포기하고 공간적 진화를 했다. 동물은 중추 신경계를 발달 시켜 이동을 통해서 새로운 환경에 적응하는데 활용했다. 식물은 공간 이동을 못하는 대신 시간을 컨트롤 했다. 그것이 씨앗이다.

생명은 게놈이라는 개념으로 통합된다. 게놈은 NT로 구성되어 있다. 바이러스와 단백질의 본질은 아미노산이다. 우리 세포 속에 단백질이 16만 종이 있고 세포 하나에 단백질이 10억개 있다.

모두 구슬을 붙이고 자르는 이야기이다. 그 구슬은 아미노산과 NT이다. 아미노산과 NT의 기원은  $H_2O$ 와  $CO_2$ 의 결합이다. 산소도 필요 없고 질소도 나중에 들어 온다.  $CO_2$ 와  $H_2O$ 만 있으면 된다.

기체 상태의 산소는 지구 탄생 20억년 후 시아노박테리아에 의해서 만들어 졌다.

20억년 이전에도 생명은 있었지만 산소가 필요하지 않았다. 수소와 메탄 그리고 황의 시대였다.

지구 생명의 역사 40억년은 바톤 체인지이다. 전반기 20억년은 황의 시대였고, 이후 20억년은 산소의 시대였다. 황과 산소는 동일한 역할을 했다. 황과 산소는 주기율표에서 족이 같으므로 원자가가 같다. 산소와 황은 형제이다. 초기 역사 20억년은 황산염 환원세균, 황화철이 중요하고, 나머지 20억년은 산소에게 바톤을 넘겨 주었다.

20억년 후 대기 중 산소의 농도가 1%를 넘어서면서 지구상 모든 암석을 산화 시켰다. 지구상 광물의 종류가 4500개가 넘는다. 화성에는 광물종류가 500개 정도이다. 20억년 이후에 광물의 70%가 새로 생겼다.

새로 생긴 산화 광물이 대륙을 만들고 그것이 풍화되어 토양을 만들었다. 토양이 만들어 지면서 식물이 육상으로 진출한다. 산소가 대기 중에 출현한 첫 번째 결과가 토양 층의 형성이다.

그 토양 층을 배경으로 녹조류가 먼저 올라 와 식물로 진화했다. 다음에는 그 토양 위에 곤충이 출현한다. 그리고 물고기가 육지로 올라온다. 그래서 우리가 출현하게 된다.

행성 지구가 20년의 산통 끝에 산소라는 옥동자를 낳았다. 산소 농도가 2%로 되면서 활개를 친 생명이 미토콘드리아이다. 그리고 5억년이 지난 15억년 전에 다세포 생명체가 출현한다.

5억 4천만년 전에 캄브리아 생명 대폭발이 일어난다. 대기 중 산소가 21%까지 올라간다. 다세포 모든 동물 문이 이 때 출현한다. 그 중에 하나가 척추동물인 어류이다. 그 어류가 육지로 올라 오면서 앞 지느러미가 앞발로 바뀌면서 사지동물이 출현한다.

사지 동물이 공룡을 거쳐 앞 다리가 날개로 바뀐다. 물고기부터 인간까지 척추를 중심으로 부속지 4개로 이루어져 있다. 물고기의 앞 지느러미 2개와 뒤 지느러미 2개가 육지로 올라와 앞다리와 뒤 다리로 바뀌었다.

중생대 말기에 앞다리 2개가 날개로 바뀌면서 조류가 출현했다.

포유류는 2억년 동안 공룡을 피해 밤으로 들어 가면서 중추 신경계를 진화 시켰다.

포유류는 파충류와 갈라진 후 3억년 동안 중추 신경계를 진화 시키면서 공룡이 사라진 신생대를 우점하는 종이 되었다.

중추 신경계를 통해 모든 정보를 통합했던 포유동물이 영장류를 거쳐 호모 사피엔스는 마지막 비약을 한다. 그것이 가상세계이다. 그것이 언어이다.

그리고 우리의 인지 시스템을 실리콘이라는 광물 속에 스며들게 해서 반도체 혁명이 일어나게 된다.

인지 혁명은 브레인이라는 생명과 반도체라는 광물이 공진화한 결과이다.

그 모든 것들이 절지 동물부터 시작한 부속지 혁명의 마지막 버전이다. 그것이 언어이고 마지막 꽃이 가상세계이다. 가상세계는 몇 년 전에 출현한 것이 아니라 언어가 출현할 때 출현했다.

우리는 중추 신경계를 통해 4개의 부속지를 논리적 구조와 상징 구조로 바꾸어 설계도를 만들어서 비행기를 만들고 잠수함을 만들어 어떤 물고기 어떤 새보다 더 깊은 바다 더 먼 하늘로 간다. 화성까지 간다.

이것이 생명 진화가 가져온 4개 부속지의 혁명이다.

지난 시간에 앞으로 가상 세계가 어디로 갈지는 단백질에게 물어보아야 한다고 했다.

단백질이라는 거대한 공화국 속에 가상세계라는 작은 흔적이 생겼다.

앞으로 가상세계가 어디로 갈지는 생명의 진화를 다시 되짚어 보면 답이 나올 것이다.

가상세계는 거대한 박테리아 세포막의 거품 같은 현상이다.

박테리아가 원자를 컨트롤하면서 상상을 초월한 레고 블럭 작업에 들어간 것이다.

그 끝에 우리의 사랑, 미움 감정이 출현했다. 생물학은 위대하다.

수고하셨습니다.