



mRNA 백신 세포에게 보내는 설계도

1 주차 1 차시 · mRNA 백신의 이해 · 40 분

손문탁 박사 · 사단법인 나눔과기술

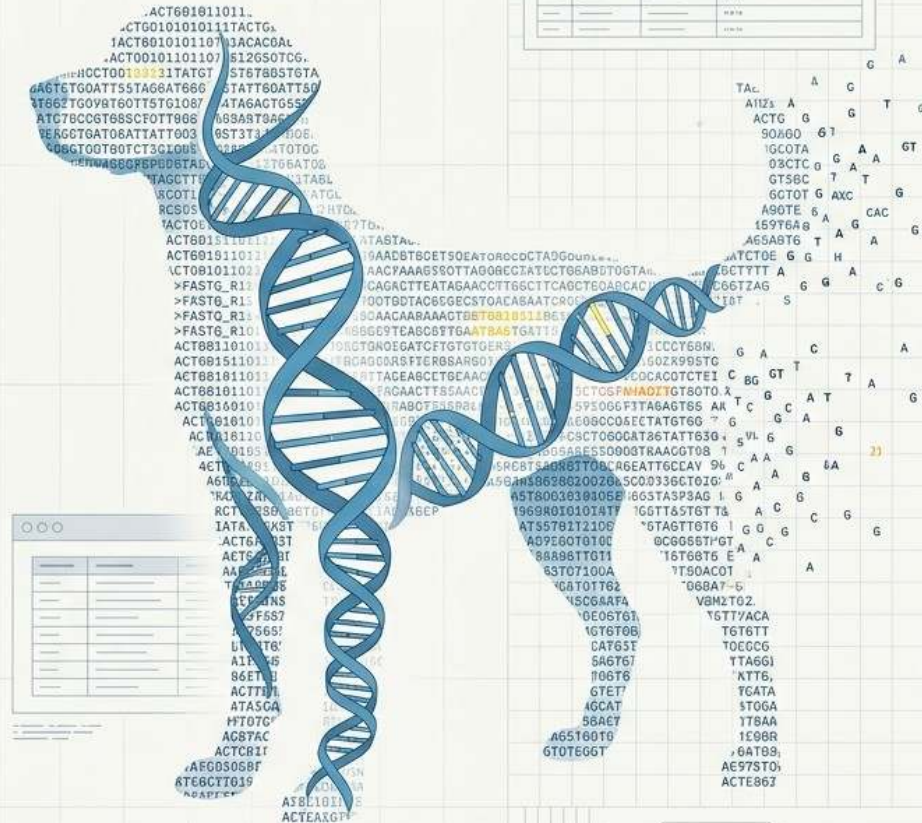
사랑하는 반려견을 위한 7주간의 기적, 그리고 데이터 과학

적을 찾아라: AI와 유전체학이 만든 맞춤형 암 백신

2024년, 병원에서도 포기한 4기 비만세포종.
한 데이터 과학자가 ChatGPT, 전장 유전체 분석,
AlphaFold를 무기 삼아 세계 최초로 반려견 맞춤형
mRNA 백신을 직접 설계하기까지의 여정.



첫 접종 7주 후, 종양의 크기가
50% 감소했습니다.



통제력을 상실한 시스템: 암세포의 행동 패턴 분석

정상 세포 (Normal)

암세포 (Cancer)

분열 (Division)

필요할 때만 분열
경우: 정상 분열



무한 증식

속도: 폭발적 (Exponential Speed)
제어: 불가능 (Uncontrollable)

정지 신호 (Stop Signal)

신호에 순응하여 멈춤
반응: 즉각적
(Immediate Response)



신호를 무시하고 돌파

반응: 무시 (Ignored)
결과: 침투 (Penetration)

세포 사멸 (Apoptosis)

손상 시 스스로 소멸
상태: 질서있는 제거
(Orderly Removal)

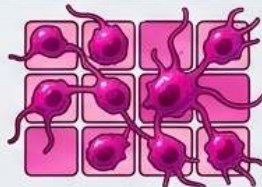


죽음을 거부

상태: 오류 축적 (Error Accumulation)
수명: 무한 (Immortal)

침투 (Invasion)

자신의 구역 유지
경계: 명확
(Clear Boundaries)



다른 조직으로 침범 (Stage 4)

경계: 붕괴 (Collapsed Boundaries)
확산: 전이 (Metastasis)

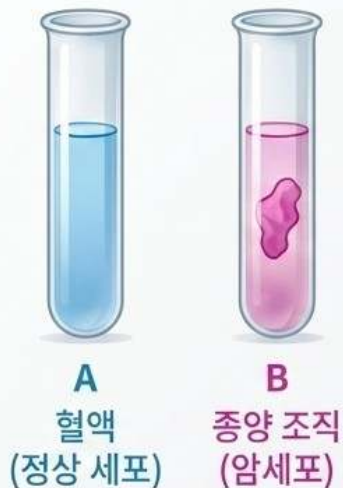
단 하나의 오타가 전체 시스템을 붕괴시키는 방식

Mutation Type	Visual Metaphor	Outcome
Silent (침묵)		의미 변화 없음
Nonsense (넌센스)		단백질 조기 생성 중단
Frameshift (틀이동)		해독 틀의 이동, 완전한 오작동
Missense (과오연)		단백질 형태는 유지되지만, 치명적인 오작동 발생

Rosie의 암은 과오연돌연변이(Missense) 때문이었습니다.
단백질의 형태는 유지되지만, 그 기능이 '완전히 잘못된 방향'으로 작동하게 만듭니다.

범인의 지문을 찾기 위한 200GB의 원시 데이터 수집

Step 1: 샘플 채취



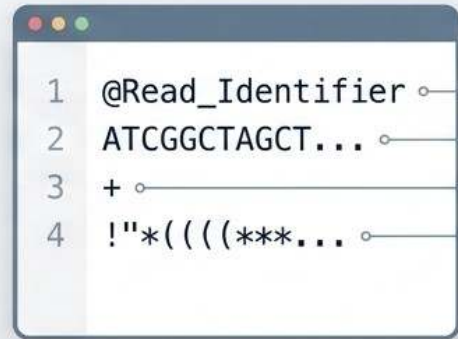
Step 2: WGS (전장 유전체 분석)



비용: \$3,000 AUD

대기 시간: 3주

Step 3: FASTQ 데이터 변환



헤더

DNA 시퀀스

구분자

품질 점수
(Quality Score)

200GB의 방대한 시퀀스 데이터 확보

숨어있는 범인을 포착하기 위한 현미경의 배율, 커버리지(Coverage)

혈액 데이터 (정상)



40x Coverage

정상적인 세포의 청사진을 파악하기에는 충분한 해상도.

종양 데이터 (암)

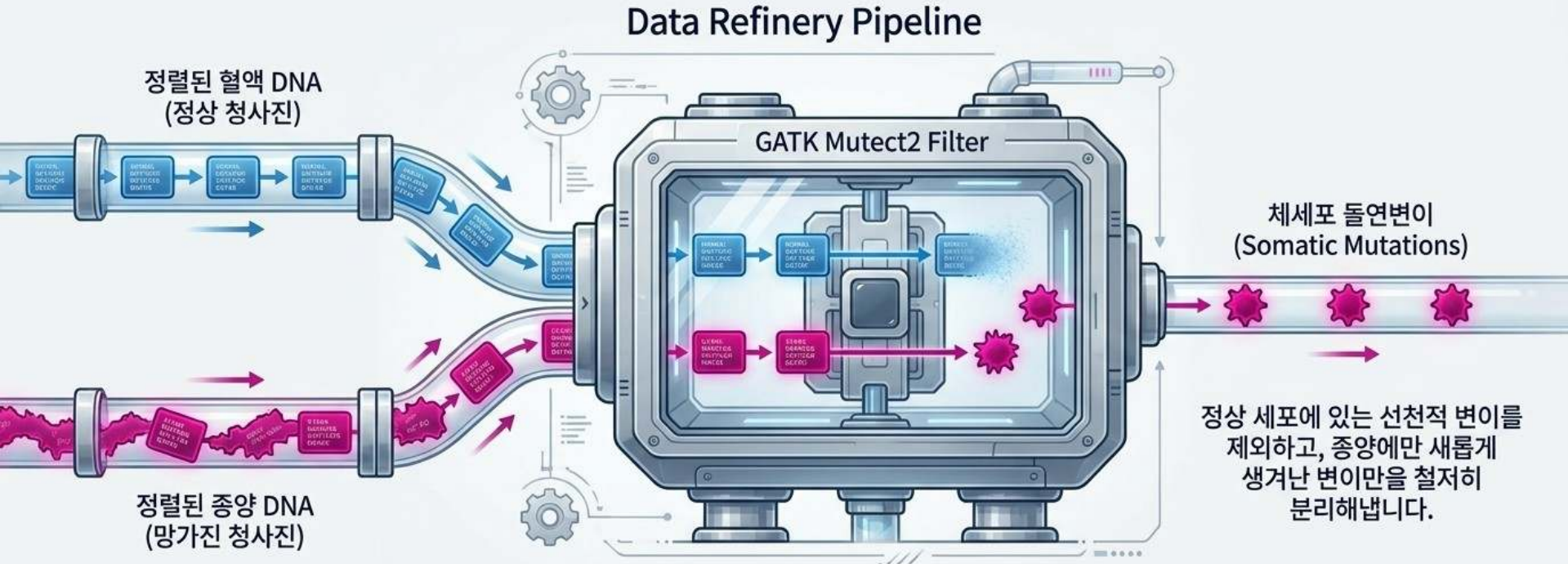


85x Coverage

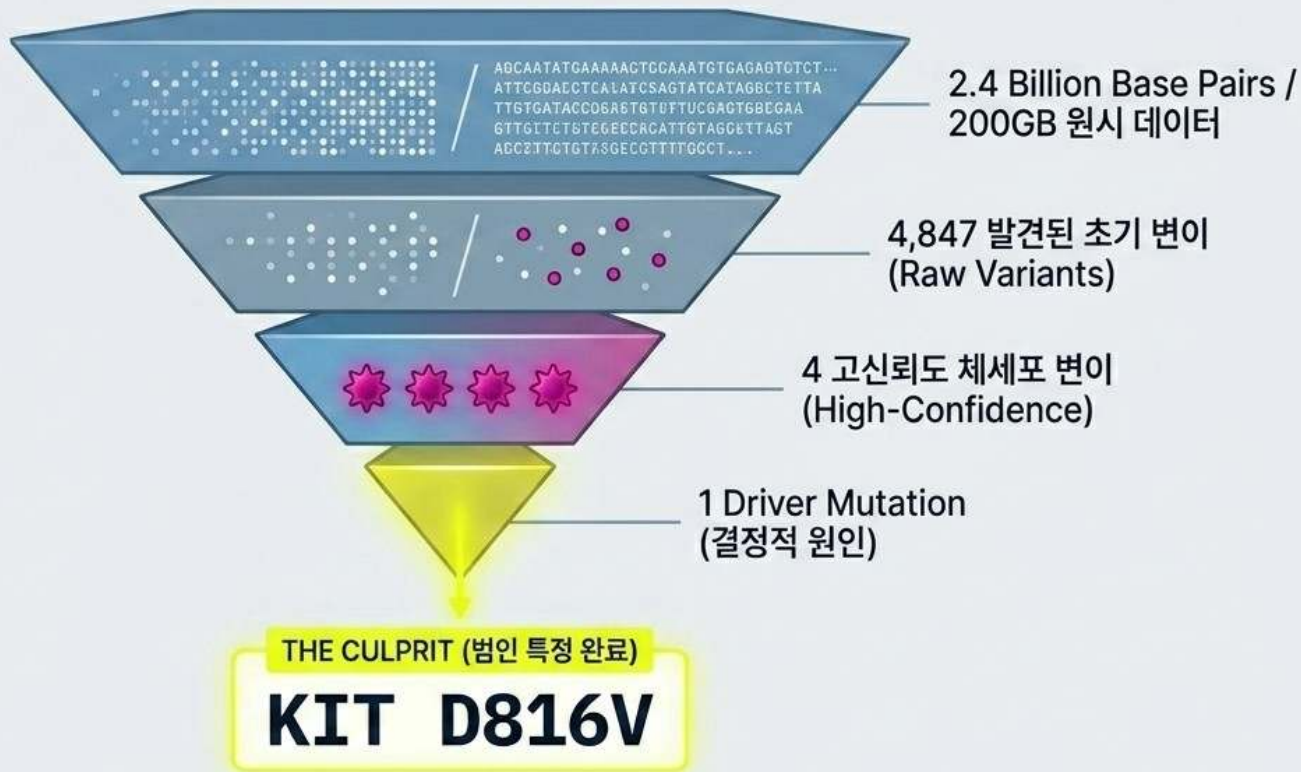
수많은 정상 세포들 사이에 숨어있는 단 몇 개의 '암세포 돌연변이'를 놓치지 않기 위해 훨씬 깊고 반복적인 판독이 필요함.

커버리지는 특정 DNA 위치를 몇 번이나 반복해서 읽었는가를 의미합니다. 종양 샘플은 희귀 변이를 놓치지 않기 위해 혈액보다 2배 이상 높은 85번의 검토를 거쳤습니다.

오직 암세포에만 존재하는 흔적, 체세포 돌연변이(Somatic) 추출



200GB의 데이터 속에서 단 하나의 범인을 특정하다



용의자 선상에 오른 변이들, 그리고 가장 유력한 범인

Gene	Mutation	VAF	Effect	Known Cancer Gene
TP53	R248W	61.2%	missense	✓ Yes
PDGFRA	D842V	33.4%	missense	✓ Yes
KIT	D816V	84.7%	missense	✓ Yes

VAF(Variant Allele Frequency) 84.7%:
종양 세포의 84.7%가 이 돌연변이를 가지고 있습니다. 가장 압도적인 비율을 차지하는 드라이버 돌연변이(Driver Mutation)입니다.

D816V: 816번 자리에 발생한 치명적인 교체

KIT : 세포 분열을 명령하는
수용체 단백질

(Receptor Tyrosine Kinase)

816 : 단백질 구조 내의 위치
(816번째 자리)

KITD816V

D : 원래 있어야 할 정상 아미노산
-> 아스파르트산
(Aspartic acid)

V : 돌연변이로 인해
잘못 끼워진 아미노산
-> 발린 (Valine)

단 하나의 아미노산(Asp -> Val)이 바뀌었을 뿐입니다.
하지만 이 작은 변화가 화학항암제마저 무력화시킨 참극의 원인이었습니다.

스캔 완료

일시정지

초기화

속도 배속: 1X

5X

15X

50X

즉시스캔

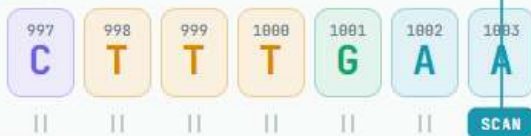
SCAN PROGRESS

100.0%

고정밀 염기 시퀀싱 스캐너 뷰어 (실시간 배율)

REAL-TIME DECODING WINDOW

정상 DNA



암세포 DNA

* 시퀀서 중앙의 하늘색 세로선이 현재 스캔하는 유전체 가닥을 가리킵니다.

● A ● T ● G ● C ● 변이

유전체 전체 매크로 매핑 보드 (1003 BP)

각 타일 = 1개의 염기쌍 (Base-Pair)

■ 대기중 ■ 스캔 활성 ■ 정상 염기 ■ 변이 발견 (Index 513)



탐지 결과

- 변이 탐지! Index 513에서 암 유발 후보 염기 변화를 확인했습니다.

탐지 염기 인덱스

Index 513

정상 코돈 염기

GAT

변이 코돈 염기

GTT

정상 아미노산

아스파르트산 (GAT / Asp)

변이 아미노산

발린 (GTT / Val)

의학적 코멘트:

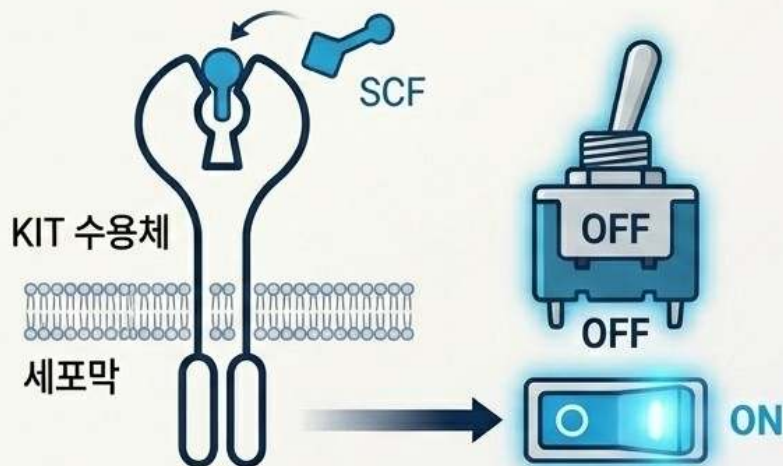
정상 DNA 서열 상 Index 513번째 위치에서 아스파르트산 (Aspartic Acid)을 코딩하는 GAT 코돈이 Valine(발린)으로 대체 되는 미스센스 돌연변이(GTT)가 발생했습니다. 해당 아미노산 치환은 단백질의 3차원 물리적 접힘 구조에 유의미한 변형을 유발하여 암세포 증식 관련 키나아제 활성화를 유도할 수 있습니다.

로지의 권장 실험 지침

발린(Val) 전이에 따라 하위 수용체 억제제(Tyrosine Kinase Inhibitor) 저항성이 발생할 우려가 있습니다. 추가 세포독성 평가 실험을 설계하십시오.

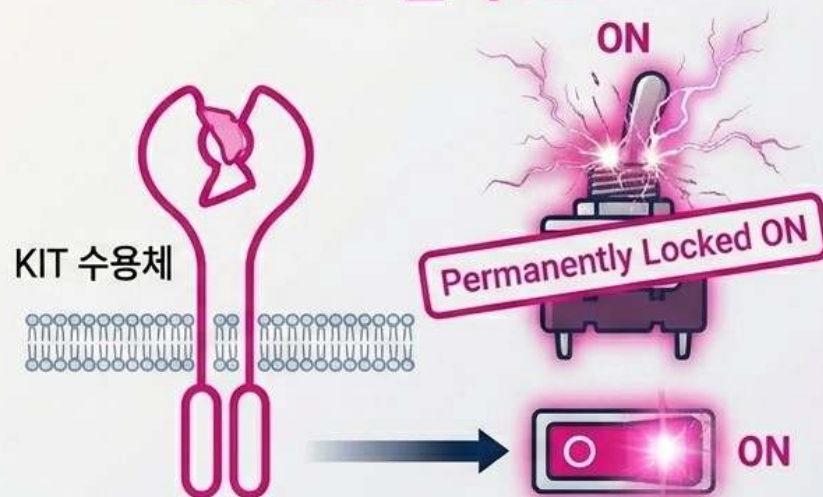
신호 없이도 항상 켜져 있는 고장 난 분열 스위치

정상 KIT 수용체



SCF(신호 물질)가 결합할 때만 스위치 **ON**
-> 분열 신호 전달. 떨어지면 **OFF**.

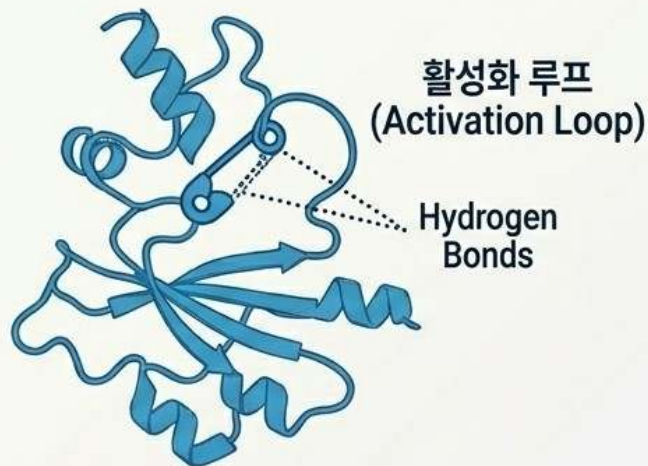
D816V 변이 KIT



SCF 신호 물질이 아예 없음에도 불구하고
스위치가 물리적으로 항상 **ON** 상태로 고정됨.
멈추지 않는 분열 명령 -> **암(Cancer) 발생**.

보이지 않는 적의 실체: AlphaFold가 밝혀낸 3D 단백질 붕괴 구조

정상 상태 (Normal)



돌연변이 상태 (Mutated)



단순한 숫자와 알파벳의 배열이 아닙니다. AlphaFold는 이 하나의 오타가 수소 결합을 파괴하여 키나아제(Kinase)의 활성화 루프를 영구히 열어버린다는 물리적 진실을 눈앞에 보여주었습니다.

코로나 팬데믹이 남긴 질문

“원리를 모르면 공포가 자리를 차지한다”



“내 DNA가 바뀐다?”

mRNA는 핵에 들어가지 않고 며칠 안에 분해됩니다.



“1년 만에 만들어 위험하다?”

mRNA 기술은 30년 넘게 연구되었고, 서열만 바꾸면 됩니다.



“몸속에 무언가 남는다?”

지질 입자와 mRNA는 세포가 재활용하는 평범한 분자입니다.

→ 대중이 이해할 수 있는 교육 자료가 필요하다. 그래서 우리는 mRNA 백신을 게임으로 만들어 원리를 전파한다.

수업 개요 — 2 주, 6 시간

1 주차 · 이해하기

1

1 차시 mRNA 백신의 이해 (오늘)

2

2 차시 Prince of mRNA 게임을 하면서 이해하기

3

3 차시 AI 로 mRNA 백신 교육용 웹 게임 만들기 — 맛보기

2 주차 · 만들기

1

1 차시 구글 AI Studio 로 웹 게임 만드는 원리 — 줄거리 구상 , 프롬프트 , 실행 , Gemini 이미지 자산

2

2 차시 게임 만들기 실습

3

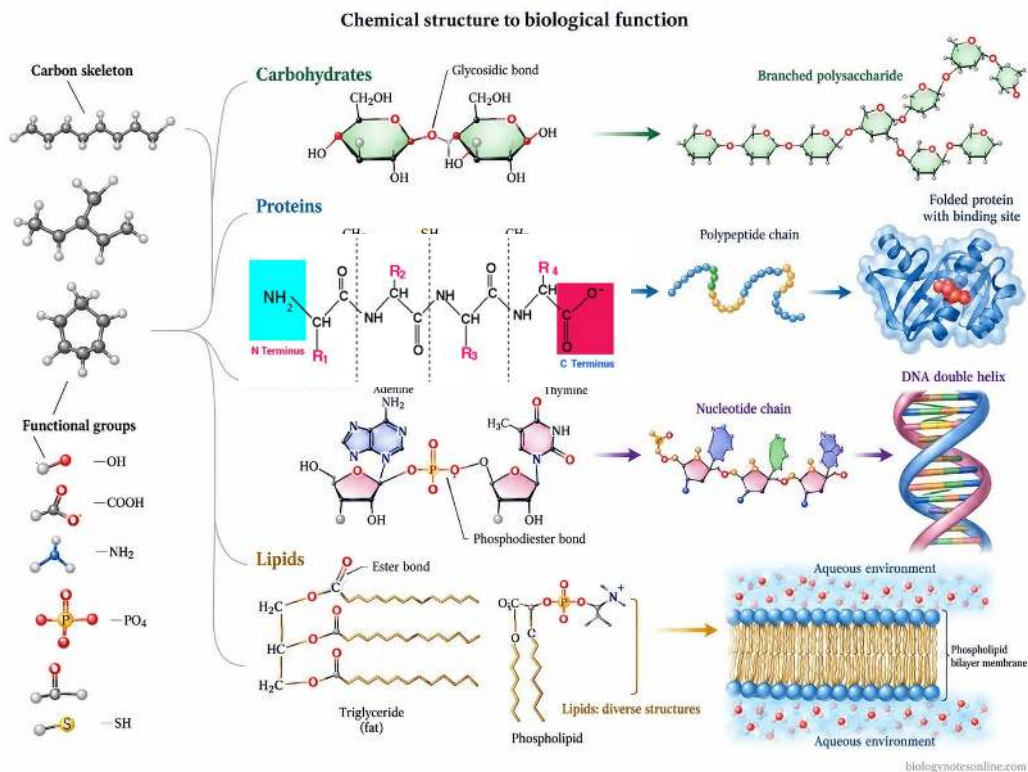
3 차시 stivibe.iotok.org 에 업로드하고 친구들 앞에서 발표

1 부 · 생체분자와 중심원리

세포는 무엇으로 만들어졌나

탄수화물 · 단백질 · 핵산 · 지질, 그리고 DNA → mRNA → 단백질

생체분자 네 가지 — 화학 구조가 기능을 만든다



1 핵산 (DNA·RNA)

정보 . 오늘의 주인공 mRNA

2 단백질

일꾼 . 효소 · 수용체 · 항체 — 백신이 만들 ‘항원’

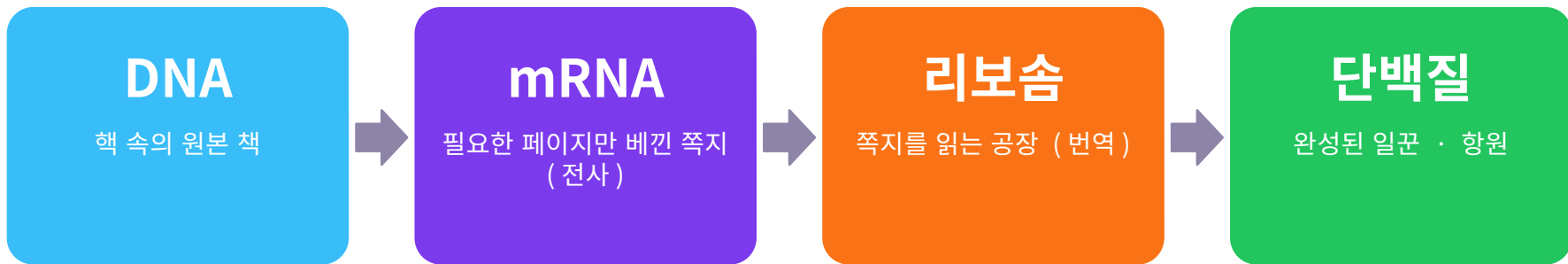
3 지질

막 . 인지질 이중층 — mRNA를 감싸는 LNP 포장재

4 탄수화물

에너지와 구조

중심원리 — 설계도에서 단백질까지

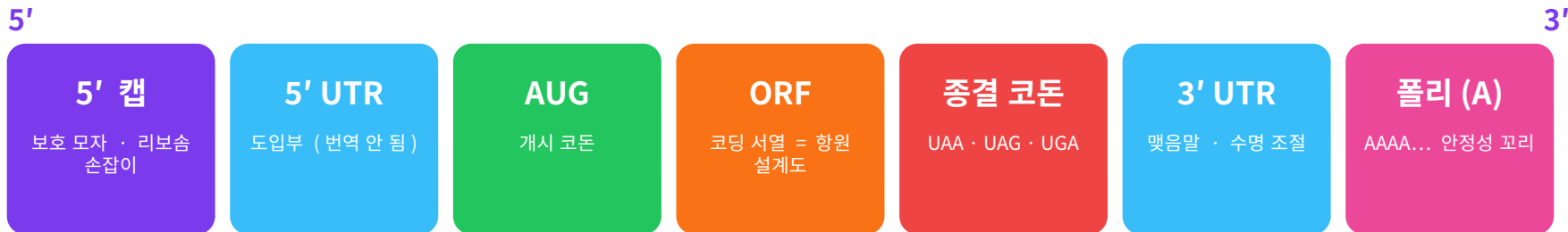


핵심 1 mRNA 는 임시 쪽지다 . 며칠 안에 분해되어 재활용된다 .

핵심 2 mRNA 는 핵에 들어가지 않는다 . 핵 밖 세포질에서만 읽힌다 .

핵심 3 정보는 DNA → RNA → 단백질로 흐른다 . 백신 mRNA 는 DNA 를 바꾸지 않는다 .

mRNA 의 구조 — 7 가지 부품



- ↯ 읽는 방향은 항상 5' → 3'
- ↯ 코돈 = 염기 3 개 = 아미노산 1 개 . ORF 는 코돈이 줄지어 선 진짜 설계도
- ↯ 캡과 꼬리가 없으면 세포는 mRNA 를 ‘침입자’로 보고 즉시 분해
- ↯ 백신 설계 : 안전한 UTR(글로빈 유전자에서 빌림), 변형 뉴클레오타이드 (슈도유리딘) 로 면역 과민반응을 줄임
- ↯ 게임 3 장 ‘분자 왕국’ : 7 개 부품을 모아 합성기에서 5'→3' 순서로 조립

2 부 · 여섯 단계

mRNA 백신은 어떻게 작동하는가

설계 → 포장 (LNP) → 세포 진입 → 번역 → 면역 훈련 → 자연 분해

백신이란 — 전통 백신과 mRNA 백신

전통 백신

약독화 · 사백신, 단백질 백신

- ㄱ 바이러스나 항원 단백질을 공장에서 배양 · 정제
- ㄱ 개발에 수년, 배양 설비 필요
- ㄱ 변이마다 새로 배양
- ㄱ 오랜 사용 경험

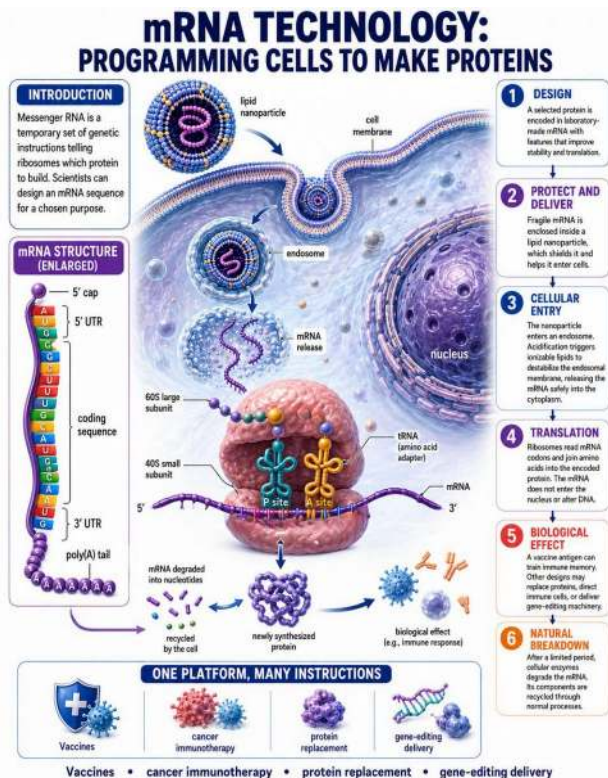
mRNA 백신

설계도만 보낸다

- ㄱ 항원 단백질의 mRNA 만 합성해 주사
- ㄱ 서열을 알면 설계에 몇 주
- ㄱ 변이 → 서열만 교체
- ㄱ 몸의 세포가 항원을 직접 생산 · 초저온 보관 필요

공통 목표 : 병에 걸리기 전에 면역계에 ‘적의 얼굴 (항원)’ 을 보여 주고 기억시킨다

한눈에 보기 — mRNA 기술 전체 그림



1 설계

원하는 단백질을 mRNA 서열로 적는다

2 보호와 전달

연약한 mRNA를 지질 나노입자 (LNP)에 넣는다

3 세포 진입

엔도솜으로 들어가고, 산성화되면 mRNA가 세포질로 풀려난다

4 번역

리보솜이 코돈을 읽어 항원 단백질을 만든다 · 핵에는 들어가지 않는다

5 생물학적 효과

항원이 면역 기억을 훈련시킨다

6 자연 분해

mRNA는 효소에 분해되어 뉴클레오타이드로 재활용된다

한 플랫폼, 여러 설계도: 백신 · 암 면역치료 · 단백질 대체 · 유전자 편집 전달

1 단계 · 설계와 제조 — 시험관에서 쓰는 설계도

1 **서열 공개** 바이러스 유전체가 공개된다 (2020 년 1 월 10 일)

2 **설계** 항원 (스파이크) ORF + 안정한 UTR + 캡 + 폴리 (A) — 컴퓨터로 며칠

3 **DNA 주형** 설계한 서열을 플라스미드 DNA 로 만든다

4 **시험관 전사 (IVT)** RNA 중합효소가 주형에서 mRNA 를 대량 합성
· 세포 · 바이러스 배양 불필요

5 **정제 · 품질검사** 불순물과 이중가닥 RNA 제거 → 포장 단계로

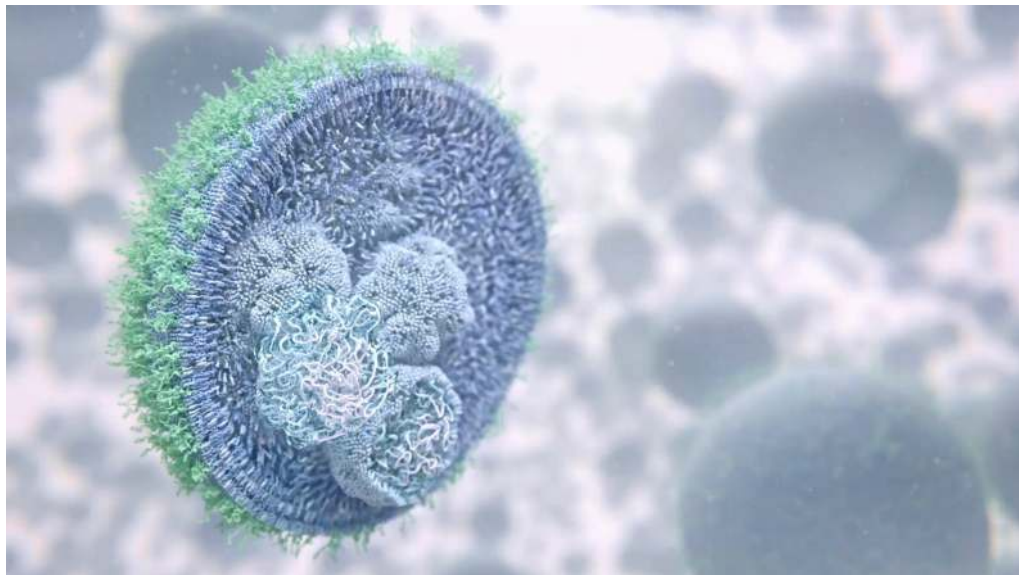
30+

년의 연구
(1990 년 첫 mRNA 주사 실험 →
2005 년 변형 뉴클레오타이드 발견 →
2023 년 노벨 생리의학상)

63 일

서열 공개에서 첫 임상시험 주사까지
(2020 년)

2 단계 · 포장 — 지질 나노입자 (LNP)



영상: LNP의 구조 (15 초)

RNase가 가득한 몸속에서 벌거벗은 mRNA의 수명은 몇 분 — 게임 3장에서 RNase를 뛰어넘어 혼합기로 가야 하는 이유

1 이온화 지질

pH 4에서 양전하로 mRNA와 결합, 혈액에서는 중성, 엔도솜 산성에서 다시 양전하 → 탈출

2 인지질

이중층 막을 만든다

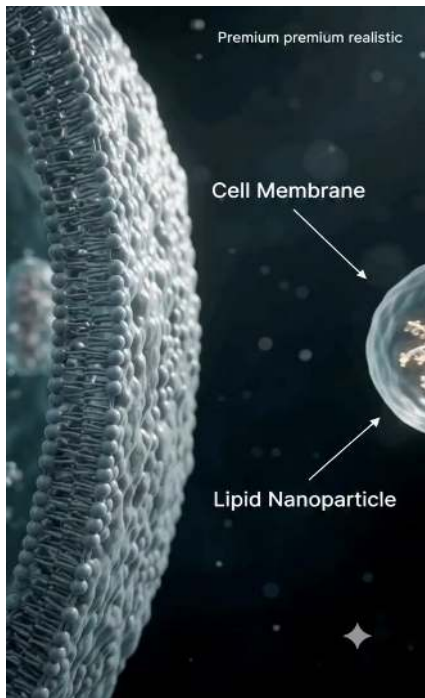
3 콜레스테롤

막의 틈을 메워 단단하게

4 PEG-지질

매끈한 걸면 · 혈액 속 수명 연장

3 단계 · 세포 진입과 엔도솜 탈출



영상: mRNA 방출 (30 초)

1 세포내이입

세포막이 LNP를 감싸 안으로 — 엔도솜 주머니 생성

2 산성화

양성자 펌프가 H^+ 를 넣어 pH 7.4 → 4~5

3 막 파괴

양전하가 된 이온화 지질이 음전하 막과 결합 → 막이 불안정

4 탈출

mRNA가 세포질로 — 늦으면 리소솜에 소화됨 (성공률 1~2%)

게임 4장 ‘세포 속으로’

- 수지상세포에 닿으면 세포내이입 장면
- 엔도솜에서 pH 계기판을 보며 6.6~5.2 사이에 탈출
- 5.0 아래로 떨어지면 리소솜에 먹힘 → 재도전
- 탈출 후 폴리 (A) 꼬리가 닳기 전에 리보솜까지 달리기

4 단계 · 번역 — 리보솜이 설계도를 읽는다



영상: 리보솜 번역 애니메이션 (10 초)

핵 밖에서만 일어난다 · 세포에는 RNA를 DNA로 바꾸는 효소가 없다 ·
그래서 유전자는 바뀌지 않는다

1 캡 인식

5' 캡이 리보솜 작은 소단위 (40S)를 부른다

2 개시

AUG를 찾으면 큰 소단위 (60S)가 덮인다

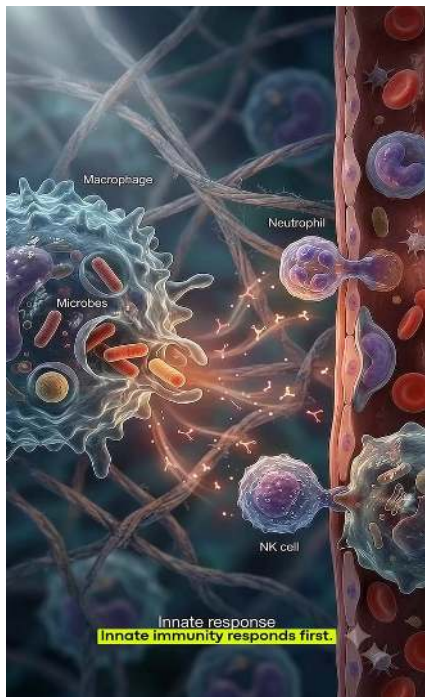
3 신장

코돈마다 tRNA가 아미노산을 가져와 잇는다

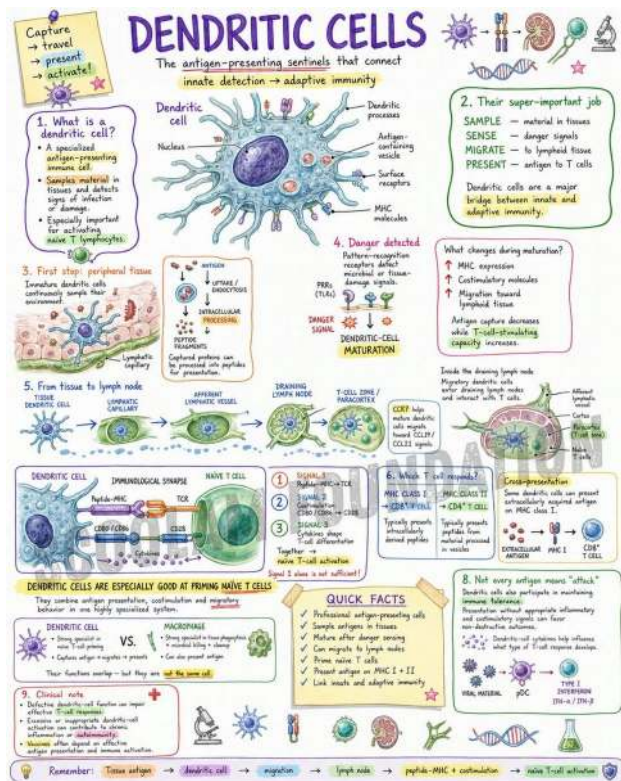
4 종결

종결 코돈에서 분리 → 항원 단백질 완성

5 단계 · 면역의 파수꾼, 수지상세포



영상: 대식세포 vs 수지상세포 (64초)



1 채집 (sample)

조직에서 재료를 삼킨다 — LNP 도 여기서

2 감지 (sense)

위험 신호를 느끼면 성숙: MHC·보조자극 분자 증가

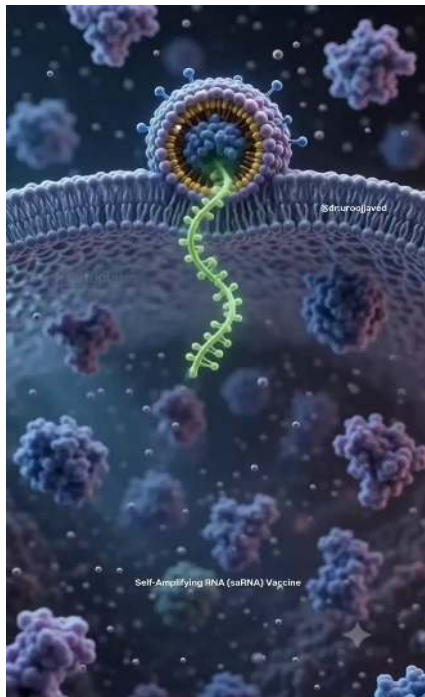
3 이동 (migrate)

CCR7 수용체로 림프절의 CCL19/21 냄새를 따라감

4 제시 (present)

펩타이드-MHC를 T 세포에 보여 준다 (신호 1·2·3)

6 단계 · T 세포 · B 세포 훈련과 면역 기억



영상 : mRNA 백신의 원리 (30 초)

mRNA 백신 · 1 주차 1 차시

1 신호 1

펩타이드 -MHC ↔ TCR: ‘이 적이 맞는가’

2 신호 2

CD80/86 ↔ CD28 보조자극: ‘위험한가’

3 신호 3

사이토카인: ‘어떤 종류의 T 세포가 될까’

4 클론 확장

T 세포 하나가 수천 개로 — 림프절이 붓는 이유

5 항체 · 기억

B 세포가 항체 생산 · 기억세포는 수년간 대기

접종 후 팔이 아프고 열이 나는 이유

면역계가 훈련 중이라는 신호입니다 .
수지상세포가 위험 신호를 감지하고 ,
림프절에서 T 세포가 복제되며 ,
사이토카인이 돌아 열이 납니다 . 1~2
일이면 가라앉고 , 기억세포가 남습니다 .

2 회 접종 = 기억세포 훈련을 한 번 더

자연 분해 — 그리고 오해와 진실

들었던 이야기	과학이 말하는 사실
“mRNA 가 내 DNA 를 바꾼다”	mRNA 는 핵에 들어가지 않고 , 사람 세포에는 RNA→DNA 역전사 효소가 없다 . 며칠 안에 분해된다 .
“ 너무 빨리 만들어 검증이 안 됐다”	플랫폼은 30 년 연구의 산물 . 서열만 바꾸므로 설계가 빠를 뿐 , 임상 1·2·3 상과 수만 명 시험은 그대로 거쳤다 .
“ 스파이크 단백질이 몸에 쌓인다”	항원은 세포 표면에 잠시 전시된 뒤 분해된다 . 몸은 매일 수십억 개의 단백질을 만들고 부순다 .
“ 부작용이 숨겨져 있다”	드문 심근염 등은 공개 감시 체계 (VAERS 등) 로 발견 · 공표되었고 , 감염 자체의 위험이 훨씬 크다 .
“ 자연 면역이면 충분하다”	감염은 위험을 동반한 훈련이고 , 백신은 위험 없는 훈련이다 . 둘 다 같은 기억세포를 만든다 .

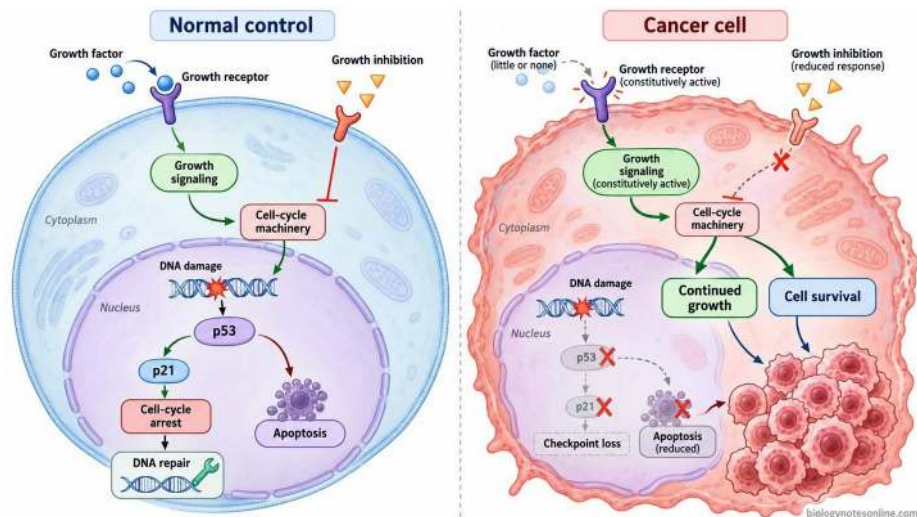
남는 것은 단 하나 — 면역 기억

3 부 · 개인 맞춤 암 백신

암 mRNA 백신 , 그리고 게임

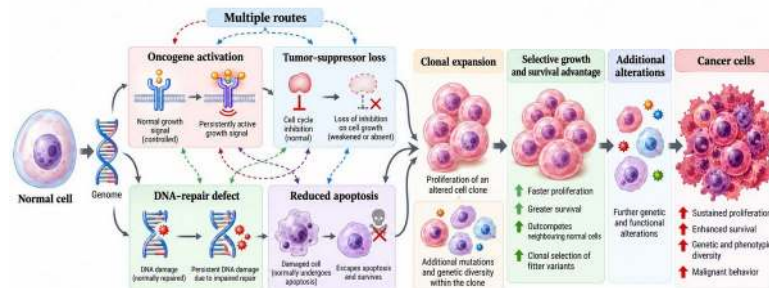
같은 플랫폼 , 다른 설계도 — 왕자가 공주를 구하는 이야기

정상세포와 암세포 — 무엇이 다른가



정상세포 (왼쪽) vs 암세포 (오른쪽): 성장 신호, p53, 세포자살

정상세포: 신호가 있을 때만 분열, 손상되면 멈추거나 자살 · 암세포: 항상 켜진 성장 신호, 고장 난 p53, 멈추지 않는 분열



암은 여러 경로의 변화가 쌓인 결과

신항원 (neoantigen) 돌연변이가 만든, 그 환자의 암세포에만 있는 단백질 조각. 암세포 표면 MHC에 전시된다 → 면역계의 '표적'이 될 수 있다.

개인 맞춤형 암 백신 — 그리고 Prince of mRNA 의 6 장

1 1 장 동굴

미라 공주에게 가는 길 · 조작법 익히기

2 2 장 공주의 방

고대 두루마리 : ‘생명의 메시지’ mRNA 의 비밀 (설계)

3 3 장 분자 왕국

7 개 부품으로 mRNA 조립 → 혼합기에서 LNP 포장

4 4 장 세포 속으로

수지상세포 진입 → 엔도솜 탈출 → 리보솜 번역 → 항원 제시

5 5 장 림프절

수지상세포 타고 이동 → 3 가지 신호로 T 세포 활성화

6 6 장 종양

T 세포 부대를 이끌고 암세포만 골라 제거 → 미라 회복

실제 과정 : 종양 DNA 해독 → 신항원 선택 → mRNA 설계 · IVT → LNP 포장 → 수지상세포 → T 세포 훈련 → 종양 공격 (흑색종 임상 2b 상 : 재발 위험 약 44% 감소)

다음 시간 — Prince of mRNA 를 플레이한다



prince.aiedus.org

휴대폰 · 노트북 어디서나 — 설치 없음
이름 + 반 코드 입력 → 교실 화면에 실시간 순위
종양을 가장 먼저 제거하면 우승

1 이동

방향키 / WASD, 화면 조이스틱

2 점프

스페이스 — RNase, 엑소뉴클레아제를 뛰어넘는다

3 상호작용

E — 두루마리, 합성기, 정거장

4 튜토리얼

? — 3 장 · 4 장에서 오늘 배운 내용을 다시 본다

5 언어 / 음성

F3 한국어 · 영어, V 음성 해설

2 주차 예고 — AI 로 나만의 mRNA 백신 게임 만들기



과제 다음 주까지 게임 줄거리를 한 쪽으로 써 오세요 : 주인공은 누구인가 (mRNA? T 세포 ?), 어떤 단계를 가르치는가, 이기는 조건은 무엇인가 . 오늘 배운 과학이 틀리지 않게 !

정리 — 세 문장, 그리고 퀴즈

1 mRNA 는 임시 설계도

세포에게 ‘이 단백질을 만들어라’라고 전하는 쪽지. 읽히면 분해된다.

2 포장 → 진입 → 번역 → 기억

LNP 가 세포까지 데려가고, 리보솜이 항원을 만들고, 면역계가 기억한다.

3 DNA 는 바뀌지 않는다

핵에 들어가지 않고, 역전사 효소도 없다. 남는 것은 면역 기억뿐.

손들기 퀴즈

Q1 LNP 는 왜 엔도솜 안에서만 mRNA 를 풀어 줄까 ?

Q2 항원 단백질은 세포의 어느 기관에서, 어느 장소에서 만들어질까 ?

Q3 T 세포가 활성화되려면 어떤 세 가지 신호가 필요할까 ?

보너스 “ mRNA 백신이 DNA 를 바꾼다”는 말에 과학적으로 한 문장으로 답해 보자.



다음 시간에 게임에서 만나요

prince.aiedus.org · 이름과 반 코드로 로그인 · ? 키로 튜토리얼

참고 : 2023 년 노벨 생리의학상 — 카탈린 커리코 , 드루 와이스먼 (변형 뉴클레오타이드 mRNA)