

# <메셀슨과 스탈의 DNA 복제 실험>

## (1) DNA의 복제 가설

- ① 보존적 복제: DNA 전체를 주형으로 하여 새로운 DNA가 합성된다.
- ② 반보존적 복제: DNA의 두 가닥이 풀려 각 가닥을 주형으로 상보적인 가닥이 합성된다. 따라서 복제 후의 DNA에서 한 가닥은 주형 가닥, 나머지 한 가닥은 새로 합성된 가닥이다.
- ③ 분산적 복제: DNA가 작은 조각으로 잘려 각각을 주형으로 복제된 후 다시 연결된다. 따라서 복제 후의 DNA에는 주형 DNA 조각과 새로 합성된 DNA 조각이 섞여 있다.



■ 주형 DNA □ 새로 합성된 DNA

DNA 복제의 3가지 가설

1. 질소 두 가지 동위 원소  $^{14}\text{N}$ 과  $^{15}\text{N}$ 의 방사성이 아닌 밀도 차(무게 차)를 이용해서
2. 원심 분리 처리  
-> 밀도 차에 따라 높이가 다른 층이 형성됨.

**보존: 원본 그대로 보존하고, 새로운 가닥 추가됨.**

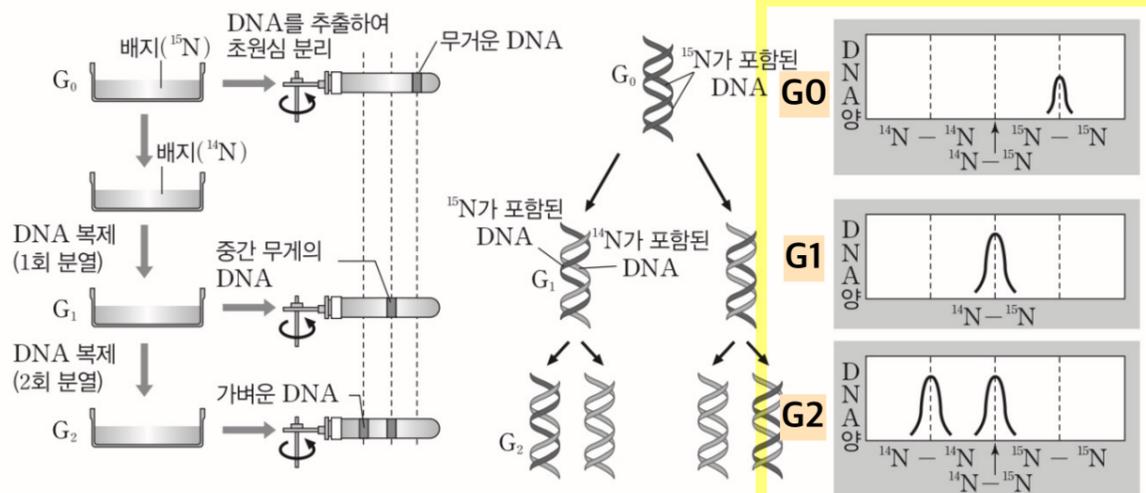
**반보존: 원본을 반으로 갈라서, 반씩 새로운 가닥 추가됨.**

**분산: 보존 없고, 갈기갈기 찢어져서 재조립됨.**

## 탕구자료 살펴보기 메셀슨과 스탈의 실험

### 과정 및 결과

- (가) 대장균을  $^{15}\text{N}$ 가 들어 있는 배지에서 여러 세대 배양하여  $^{15}\text{N}$ 가 포함된 DNA를 갖는 대장균( $G_0$ )을 얻는다.  
 (나)  $G_0$ 을  $^{14}\text{N}$ 가 들어 있는 배지로 옮겨 한 세대 배양하여 얻은 1세대 대장균( $G_1$ )과 한 세대 더 배양하여 얻은 2세대 대장균( $G_2$ )에서 각각 DNA를 추출하고 초원심 분리기로 DNA를 분리한다.



## 실제 나타난 원심 분리 결과

보존 가설이 맞으려면  $G_1$ 에서도 15-15 층이 보존되었어야 하는데 그렇지 않음 ( $G_1$  결과에서 가설 기각됨).

분산 가설이 맞으려면  $G_2$ 에서도 한 층으로만 나타나야 하는데, 그렇지 않음 ( $G_2$  결과에서 가설 기각됨).

**Generation = G**  
 $G_0 = 0$ 세대  
 $G_1 = 1$ 세대

### point

- $G_1$ 의 DNA를 원심 분리하면 중간 무게의 DNA( $^{14}\text{N}-^{15}\text{N}$ ) 띠가 형성된다. 이 결과로 보존적 복제 가설이 옳지 않음을 알 수 있다.
- $G_2$ 의 DNA를 원심 분리하면 가벼운 DNA( $^{14}\text{N}-^{14}\text{N}$ ) 띠와 중간 무게의 DNA( $^{14}\text{N}-^{15}\text{N}$ ) 띠가 1 : 1 비율로 형성된다. 이 결과로 분산적 복제 가설이 옳지 않음을 알 수 있다. → DNA는 반보존적으로 복제됨을 알 수 있다.

[25029-0129]

05 다음은 DNA 복제 가설과 DNA 복제에 대한 실험이다.

• 그림은 DNA 복제 방식에 대한 가설 I~III을 나타낸 것이다.

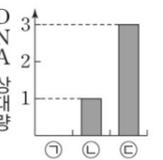


### [실험 과정]

- (가) 대장균을  $^{15}\text{N}$ 가 들어 있는 배지에서 여러 세대 배양하여 모든 DNA가  $^{15}\text{N}$ 로 표지된 DNA를 갖는 대장균( $G_0$ )을 얻는다.  
 (나)  $G_0$ 을  $^{14}\text{N}$ 가 들어 있는 배지로 옮겨 배양하여 1세대 대장균( $G_1$ ), 2세대 대장균( $G_2$ ), 3세대 대장균( $G_3$ )을 얻는다.  
 (다)  $G_0 \sim G_3$ 의 DNA를 각각 추출하고, 각각 원심 분리하여 상층( $^{14}\text{N}-^{14}\text{N}$ ), 중층( $^{14}\text{N}-^{15}\text{N}$ ), 하층( $^{15}\text{N}-^{15}\text{N}$ )에 존재하는 이중 나선 DNA의 상대량을 확인한다.

### [실험 결과]

- 그림은 ㉠의 DNA를 추출하여 원심 분리하였을 때, ㉠~㉢에 존재하는 DNA 상대량을 나타낸 것이다. ㉠은  $G_0 \sim G_3$  중 하나이고, ㉠~㉢은 상층, 중층, 하층을 순서 없이 나타낸 것이다.



이 자료에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 돌연변이는 고려하지 않는다.)

### (보기)

- I은  $G_1$ 의 DNA를 추출하여 원심 분리하였을 때 ㉢에 DNA가 존재하지 않아 기각되었다.
- II에 따라 DNA가 복제된다면 ㉠의 DNA를 추출하여 원심 분리하였을 때 ㉠에 DNA가 존재할 것이다.
- $G_2$ 에서  $\frac{^{14}\text{N로 표지된 단일 가닥 DNA 수}}{^{15}\text{N로 표지된 단일 가닥 DNA 수}} = 3$ 이다.

- ① ㄱ      ② ㄷ      ③ ㄱ, ㄴ      ④ ㄴ, ㄷ      ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

# <샤가프 법칙>

## (2) DNA 입체 구조 규명에 활용된 증거

① 샤가프의 법칙: 1950년대 샤가프에 의해 밝혀졌다.

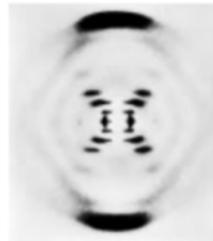
- DNA를 구성하는 A, T, G, C의 비율은 생물종에 따라 다르다.
- 각 생물의 DNA에서 A와 T의 비율이 같고(A=T), G와 C의 비율이 같다(G=C). 따라서 퓨린 계열 염기(A+G)의 비율과 피리미딘 계열 염기(T+C)의 비율이 같다.

$$\text{조성 비율 : } A=T, G=C, A+G=T+C=50\%$$

- 왓슨과 크릭에 의해 DNA의 이중 나선 구조가 규명될 때 상보적 염기쌍은 중요한 단서가 되었다.

② DNA의 X선 회절 사진: 1952년 프랭클린과 윌킨스에 의해 연구되었다.

- DNA 시료에 X선을 쬐어 얻은 회절 사진으로부터 DNA의 이중 나선 구조를 밝히는 결정적인 단서를 얻었다.



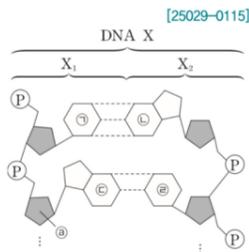
DNA의 X선 회절 사진

## (3) DNA 이중 나선 구조

① 두 가닥의 폴리뉴클레오타이드가 결합해 오른 나선 방향으로 꼬여 있는 이중 나선 구조이다.

- 폴리뉴클레오타이드 가닥의 방향성: 인산기가 노출된 한쪽 끝을 5' 말단, 5탄당의 수산기(-OH)가 노출된 다른 쪽 끝을 3' 말단이라고 한다.
- 이중 나선을 이루고 있는 두 가닥은 양 말단의 방향이 서로 반대인 역평행 구조이다.

07 그림은 서로 상보적인 단일 가닥 X<sub>1</sub>과 X<sub>2</sub>로 구성된 이중 가닥 DNA X의 일부를 나타낸 것이다. ㉠~㉣은 각각 아데닌(A), 사이토신(C), 구아닌(G), 타이민(T) 중 하나이고, ㉤는 당이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 (보기)에서 있는 대로 고른 것은? (단, 돌연변이는 고려하지 않는다.)

- (보기)
- ㄱ. ㉤는 리보스이다.
  - ㄴ. ㉤은 RNA에도 있다.
  - ㄷ. X<sub>1</sub>의  $\frac{㉠+㉡}{㉢+㉣}$ 은 X<sub>2</sub>의  $\frac{㉢+㉣}{㉠+㉡}$ 와 같다.

① ㄴ    ② ㄷ    ③ ㄱ, ㄴ    ④ ㄱ, ㄷ    ⑤ ㄴ, ㄷ

16 다음은 100개의 염기쌍으로 구성된 이중 가닥 DNA X와 Y에 대한 자료이다.

- 그림은 X와 Y를 구성하는 염기쌍 중 1종류를 나타낸 것이다.
- X의  $\frac{㉠+㉡}{㉢+㉣} = 3$ 이고, Y의  $\frac{㉠+㉡}{㉢+㉣} = \frac{2}{3}$ 이다. ㉠~㉣은 아데닌(A), 사이토신(C), 구아닌(G), 타이민(T)을 순서 없이 나타낸 것이다.
- ㉤은 피리미딘 계열 염기이다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 (보기)에서 있는 대로 고른 것은? (단, 돌연변이는 고려하지 않는다.)

- (보기)
- ㄱ. ㉤은 구아닌(G)이다.
  - ㄴ. Y에서 ㉢의 개수와 ㉣의 개수의 합은 100이다.
  - ㄷ. X에서 염기 간 수소 결합의 총개수와 Y에서 염기 간 수소 결합의 총개수의 합은 485이다.

① ㄴ    ② ㄷ    ③ ㄱ, ㄴ    ④ ㄱ, ㄷ    ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

1. A(아데닌)은 T(타이민)과 G(구아닌)은 C(사이토신)과 수소 결합한다.

2. A와 T는 2개의 수소 결합  
G와 C는 3개의 수소 결합을 이룬다.

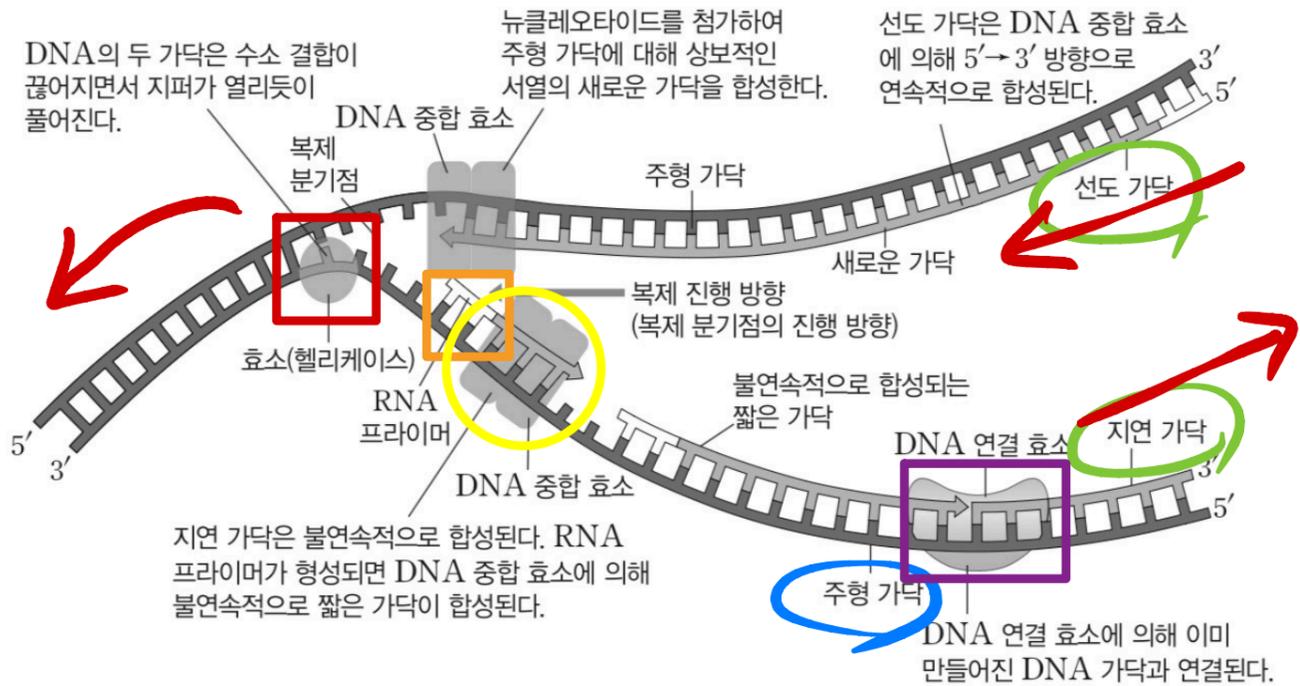
3. A와 G는 크기가 큰, 고리 2개의 퓨린 계열  
T와 C는 작은, 고리 1개의 피리미딘 계열

4. 이중 가닥은 상보성(상호보완)을 가지므로,  
ex) A 맞은 편에는 T가 있다.

따라서, A와 T의 개수가 동일.  
G와 C의 개수가 동일.

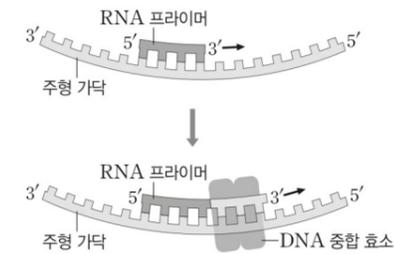
5. [4.]에서 A=T, G=C이므로,  
**A+G = T+C**  
퓨린 계열과 피리미딘 계열은  
딱 50%씩 존재.

# <DNA의 반보존적 복제 과정>



## (3) DNA의 반보존적 복제

- 이중 나선의 풀림: 복제가 시작되는 지점(복제 원점)에서 효소(헬리케이스)의 작용으로 염기 사이의 수소 결합이 끊어지면서 이중 나선이 두 가닥으로 풀어진다.
- 프라이머 합성: RNA 프라이머가 합성된다. 프라이머는 새로 첨가되는 뉴클레오타이드가 DNA 중합 효소의 작용으로 당-인산 결합을 형성할 수 있도록 3' 말단을 제공한다.



- 새로운 가닥의 합성: DNA 중합 효소가 주형 가닥과 상보적인 염기를 갖는 뉴클레오타이드를 결합시키면서 새로운 가닥이 합성된다. 이때 합성 중인 가닥의 3' 말단에 새로 첨가되는 뉴클레오타이드의 5' 말단 인산기가 결합하므로 새로운 가닥은 5' → 3' 방향으로만 합성된다. 그런데 주형 가닥과 새로운 가닥은 방향이 서로 반대이므로 DNA 중합 효소는 주형 가닥을 따라 3' → 5' 방향으로 이동한다.
- 선도 가닥과 지연 가닥: 새로 합성되는 두 가닥은 방향이 서로 반대인데, 복제는 두 가닥에서 동시에 진행된다. 두 가닥의 합성 과정에 차이가 있으며 각각 선도 가닥과 지연 가닥으로 불린다.
  - 선도 가닥의 합성: 복제 진행 방향(복제 분기점의 진행 방향)과 같은 방향으로 끊김 없이 연속적으로 합성되는 가닥을 선도 가닥이라고 한다. 복제 진행 방향이 주형 가닥의 3' → 5' 방향일 때 선도 가닥이 5' → 3' 방향으로 합성된다.
  - 지연 가닥의 합성: 복제가 진행되는 방향과 반대 방향으로 짧은 가닥이 불연속적으로 합성되는 가닥을 지연 가닥이라고 한다. 불연속적으로 합성된 각각의 짧은 가닥은 DNA 연결 효소에 의해 연결된다. 복제 진행 방향이 주형 가닥의 5' → 3' 방향일 때 지연 가닥이 합성되며, 불연속적으로 합성되는 각각의 짧은 DNA 가닥은 5' → 3' 방향으로 합성된다.

1. **헬리케이스가 DNA 이중나선을 풀어냄.**

2. **RNA 프라이머가 DNA에 붙어 시작점 제공.**

**이유:** 뉴클레오타이드를 하나씩 붙이기에는 결합이 불안정하여, 일단 **큰 블록을 붙여버림.**

복제가 끝날 쯤, 프라이머(RNA이니까)를 다시 DNA로 전환시켜 복제를 완성함.

3. **DNA 중합 효소가 새로운 가닥을 형성 = 신장하다(늘이다).**

### 3-1. 방향

- **New 가닥 기준: 5' → 3'** 방향으로 뉴클레오타이드가 추가됨. = 5'이 복제 시작 쪽 / 3'이 나중 쪽.

- **Original, 주형 가닥 기준:** 이중 나선은 가닥 방향이 서로 반대. 따라서, **3' → 5'**.

### 3-2. 선도 / 지연

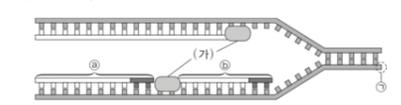
- 한번에 만들어지면 **선도 가닥**, 끊어서 조금씩 만들어지면 **지연 가닥**

- **[헬리케이스의 이동 방향], 즉 [DNA가 풀어지는 방향]과 같으면 선도 가닥,**

**반대 방향이면 지연 가닥.**

**지연 가닥은 끊겨 있으므로, 마지막에 DNA 연결 효소가 필요함.**

10 그림은 복제 중인 DNA를 나타낸 것이다. (가)는 DNA 중합 효소와 DNA 연결 효소 중 하나이고, ㉠은 3' 말단과 5' 말단 중 하나이며, ㉡와 ㉢은 새로 합성된 가닥이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 (보기)에서 있는 대로 고른 것은? (단, 풀연변이는 고려하지 않는다.)

- (보기)
- ㉠은 5' 말단이다.
  - ㉡는 ㉢보다 먼저 합성되었다.
  - (가)는 주형 가닥과 상보적인 프라이머를 합성한다.

① 나 ② 다 ③ 가, 나 ④ 가, 다 ⑤ 나, 다

09 다음은 DNA 복제 과정의 일부를 순서 없이 나타낸 것이다. [25029-0117]

- (가) 주형 가닥과 상보적인 RNA 프라이머가 처음 합성된다.
- (나) 복제가 시작되는 지점에서 이중 나선이 두 가닥으로 풀어진다.
- (다) 불연속적으로 합성된 각각의 짧은 가닥이 효소 ㉠에 의해 연결된다.
- (라) DNA 중합 효소에 의해 새로 합성되는 가닥은 (㉡) 방향으로 합성된다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 (보기)에서 있는 대로 고른 것은?

- (보기)
- 가, 5' → 3'은 ㉠에 해당한다.
  - 나, ㉡는 DNA 중합 효소이다.
  - 다, DNA 복제 과정은 (나) → (다) → (가) → (라) 순서로 일어난다.

① 가 ② 나 ③ 가, 다 ④ 나, 다 ⑤ 가, 나, 다