

섬세한 세경쌤의 한 장에 개념노트

학번 : \_\_\_\_\_ 이름 : \_\_\_\_\_

PART 주제	PART 14. 별의 진화와 에너지원
PART 목표	<div><div>- 질량에 따른 별의 진화 과정을 비교할 수 있다.</div><div>- 질량에 따른 별의 종말의 차이를 설명할 수 있다.</div><div>- 주계열성의 에너지를 설명하고, 질량이 다른 주계열성의 내부 구조를 비교할 수 있다.</div></div>
소단원 주제	O2. 별의 탄생과 진화(2)
수업 학습 목표	<div><div>- 질량이 태양 정도인 별의 진화 과정을 핵융합 반응과 내부 힘의 관계를 통해 설명할 수 있다.</div><div>- 질량이 태양보다 무거운 별의 진화 과정을 초거성과 초신성 폭발을 통해 설명할 수 있다.</div><div>- 별의 질량에 따라 달라지는 별의 종말 단계에 대해 구분 지어 설명할 수 있다.</div></div>

수업 목차	오늘의 핵심 개념
-------	-----------

- PART 14. 별의 진화와 에너지원
- O2. 별의 탄생과 진화(2)
- (1) 별의 진화 기본 정리

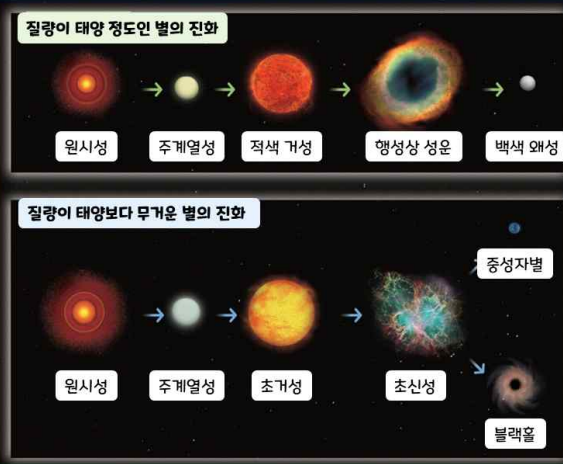
(2) 주계열성의 진화( $M_{\star} \approx M_{\odot}$ )

(3) 주계열성의 진화( $M_{\star} \gg M_{\odot}$ )

(4) 별의 진화 최종 정리
- 〈별의 탄생과 진화(2)〉

# 섬세한 세경쟁의 한 장에 개념노트

## 별의 진화 기본 정리



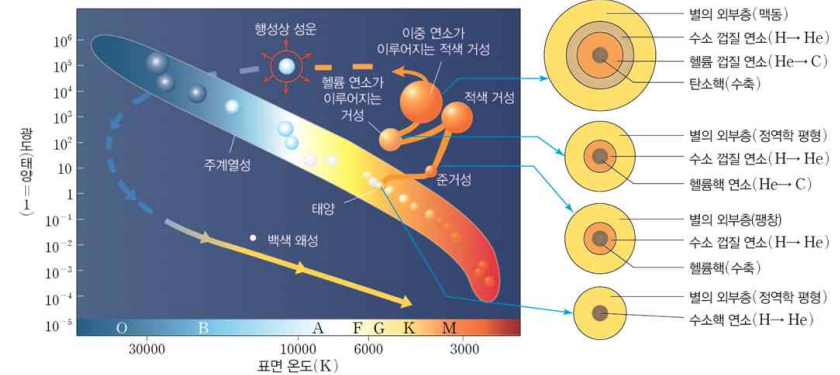
### 오늘 필요한 핵심 개념

- 별의 내부에 작용하는 2가지 힘  
→ 중력(중심 방향), 내부 압력(바깥 방향)
- 중력 수축 : (중력 내부 압력)  
→ 위치E 감소  
→ 온도 (상승 / 하강)
- 수소 핵융합 반응 개시 온도  
→ ( ) K
- 핵융합 반응 : 막대한 에너지 생성  
→ 내부 압력 (증가 / 감소)

<1>

## 주계열성의 진화( $M_{\star} \approx M_{\odot}$ )

주계열성의 진화( $M_{\star} \approx M_{\odot}$ ) : 주계열성 → 적색 거성 → 행성상 성운 → 백색 왜성

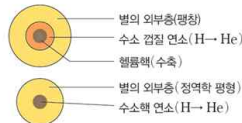


<2>

## 주계열성의 진화( $M_{\star} \approx M_{\odot}$ )

### 주계열성 단계의 종료, 준거성 단계의 시작

- 중심핵에서 ( )가 모두 소진되면 주계열 단계 종료  
→ 힘의 관계 : ( 내부 압력 중력 ) → ( ) 중심핵 수축  
→ 더 이상 주계열성 단계가 아니고 준거성 단계로 명명  
→ ( )으로 진화하는 출발점!!
- 준거성에 도달하면 헬륨 중심핵(헬륨핵)은 중력 수축에 따라 온도 ( )
- 중심핵을 감싸고 있는 외부층 중 수소 껍질에서도 이에 따라 온도 ( )



### 적색 거성의 탄생(수소 껍질 연소 단계)

- 수소 껍질의 온도가 1,000만K에 도달하면 수소 껍질에서 ( ) 개시  
→ 수소 껍질 연소로 별의 외부층에 에너지 대량 공급 → 별의 외부층이 급격히 ( )
- 주계열성 단계일 때에 비해 반지름 ( ), 표면 온도 ( ), 광도 ( )하여 적색 거성 탄생

<3>

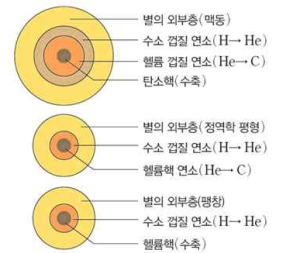
## 주계열성의 진화( $M_{\star} \approx M_{\odot}$ )

### 적색 거성의 진화(헬륨핵 연소 단계)

- 헬륨 중심핵의 온도가 중력 수축에 따라 ( )K에 도달  
→ 중심핵에서 헬륨 핵융합 반응 개시 [단단한 화학식:  $3He \rightarrow C + E$ ]

### 적색 거성의 진화(탄소핵 수축 단계)

- 별칭 : Double Shell Burning 단계
- 중심핵에서 ( )이 모두 소진되면 헬륨핵 연소 단계 종료  
→ 힘의 관계 : ( 내부 압력 중력 ) → ( ) 중심핵 수축



- 중심핵 주변 헬륨 껍질도 열에너지 전달에 따라 온도 ( )
- 헬륨 껍질의 온도가 1억K에 도달하면 헬륨 껍질에서 ( ) 개시
- 헬륨 껍질과 수소 껍질에서 동시에 핵융합 반응 발생 (Double Shell Burning 이라는 별칭이 붙은 이유)
- 탄소핵은 계속 수축하며 열에너지 ↑, But 질량 부족으로 탄소 핵융합 반응을 할 온도에는 도달 X
- 따라서  $M_{\star} \approx M_{\odot}$ 의 질량을 갖는 주계열성은 별 내부에서 핵융합으로 탄소(C)까지만 생성 가능

<4>

## 섬세한 세경쟁의 한 장에 개념노트

### 주계열성의 진화( $M_* \approx M_\odot$ )

#### 행성상 성운

- 헬륨 팽질 연소의 특성에 따라 별의 외부층이 빠르게 우주 공간으로 방출되어 중심부에는 **탄소핵**, 주변에는 **얇은 성운**이 감싼 듯한 모양을 보이는 천체

#### <헬륨 팽질 연소의 특성(열핵동)>

- 헬륨의 핵융합 반응( $3\alpha$  과정)은 **온도 변화에 매우 민감**

[별의 팽창] → [온도 감소] → [핵융합 반응 중지] → [별의 수축]  
→ [온도 증가] → [핵융합 반응 개시] → [별의 팽창] → ... 반복!!

#### 백색 왜성

- 별의 외부층이 모두 방출되어 수축하는 **탄소핵만** 존재하는 천체  
→ 계속된 중력 수축 → 반지름 ( ), 밀도 ( ), 온도 ( )
- 탄소 핵융합 반응을 하지 못하는 주계열성의 마지막 진화 단계



&lt;5&gt;

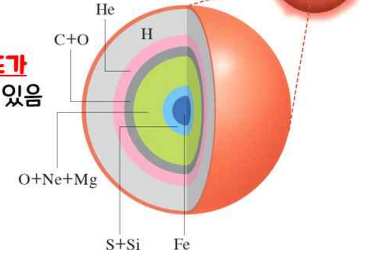
### 주계열성의 진화( $M_* \gg M_\odot$ )

#### 주계열성의 진화( $M_* \gg M_\odot$ )

- 주계열성 질량( $M_\odot$  이상): 주계열성 → 초거성 → 초신성 폭발 → 중성자별
- 주계열성 질량( $M_\odot$  이상): 주계열성 → 초거성 → 초신성 폭발 → 블랙홀

#### 초거성 단계

- 질량이 큰 주계열성은 연료의 양이 충분하므로 **중심핵의 온도가 계속 상승**하며 단순 거성이 아닌 **<초거성 단계>**로 진입할 수 있음  
→ 중심핵과 껍질에서 탄소보다 무거운 원소도 차곡차곡 생성 (ex.  $H \rightarrow He \rightarrow C \rightarrow O \rightarrow Ne \rightarrow Mg \rightarrow S \rightarrow Si \dots$ )
- 이로 인해 별은 **양파 껍질 모양의 내부 구조**를 가지게 되며 **중심으로 갈수록 무거운 원소**가 형성되고 위치함
- But, 핵융합 반응만으로는 **철(Fe)**까지만 생성 가능(★)  
(Why? 철보다 무거운 원소의 합성은 발열반응이 아닌 흡열반응 → 그럼 철보다 무거운 원소들은 어떻게 생성...?)



&lt;6&gt;

### 주계열성의 진화( $M_* \gg M_\odot$ )

#### 초신성 폭발

- 별 내부에서의 핵융합 반응으로는 **철(Fe)**까지만 생성 가능
- **철(Fe) 중심핵**은 중력 수축에 따라 **중심핵 밀도 점점 (상승 / 하강)**
- 중심핵의 밀도가 너무 높아져 물리적 한계점에 도달하면 **별은 급격히 붕괴, 외부층 폭발**
- **엄청난 에너지 생성** → **광도가 매우 높아지고(온도에 비해), 철(Fe)보다 무거운 원소 합성 및 방출**
- 폭발에 따른 충격파가 성간 물질을 압축하여 특정 공간에서의 별 탄생을 촉진하기도 함

실제 관측: SN1987A(초신성)



#### 중심핵의 질량에 따른 별의 최후

(※ 주의사항: 주계열성 질량 ≠ 중심핵 질량)

- 중심핵 질량:  $1.4 M_\odot$  미만 → ( )
- 중심핵 질량:  $1.4 M_\odot \sim 3 M_\odot$  → ( )
- 중심핵 질량:  $3 M_\odot$  초과 → ( )

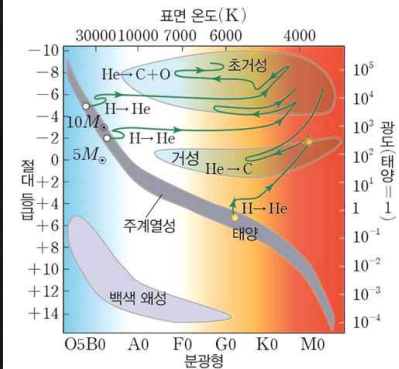
&lt;7&gt;

### 별의 진화 최종 정리

#### 질량이 태양 정도인 별의 진화



#### 질량이 태양보다 무거운 별의 진화



&lt;8&gt;