



재료강도학-강의자료

제 8 장 크 리 프

한밭대학교 신소재공학과 신기현

8.1 서론

- 실온에서 대부분의 금속은 인장응력-변형을 곡선이 **시간에 무관**
- 인장변형속도에 따라서도 결과에 큰 차이가 **X (시간에 무관)**

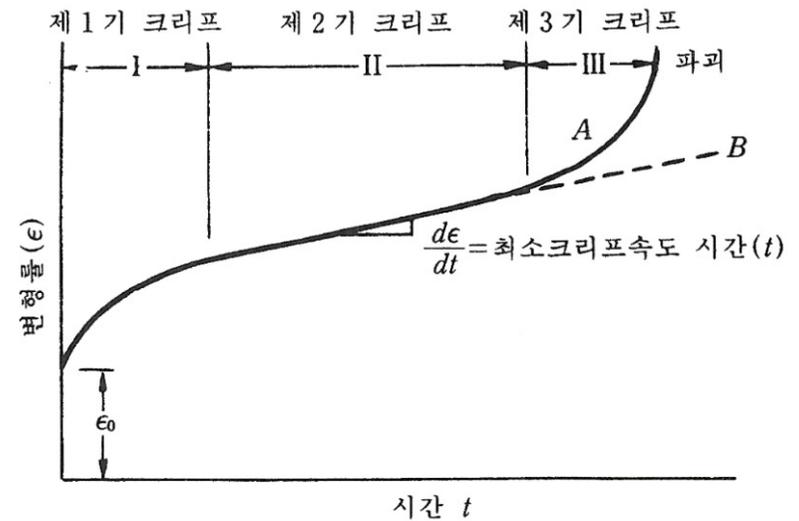
- 고온(절대용점의 1/2 이상)에서는 인장성질이 변형속도와 시험시간에 따라 크게 달라진다.
- **고온에서 일정한 응력을 받고 천천히 변형하는 현상을 크리프 (creep)라고 한다.**

- 고온에서 사용되는 장치 (화력발전소의 보일러관, 가스 터빈, 원자로의 core 부품)에는 항상 고려되어야.
- 고온강도를 측정하는데 사용하는 시험법은 사용재료가 지탱해야 하는 시간에 바탕을 두고 선택되어야.



8.2 크리프 곡선

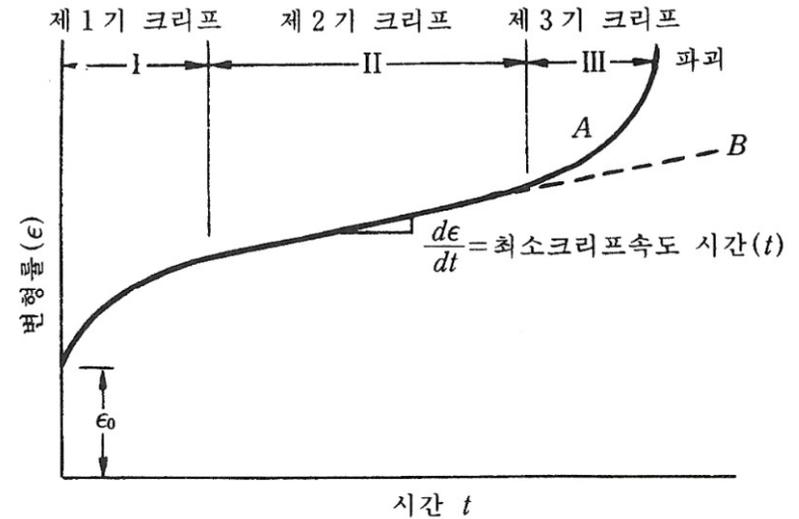
- 금속의 크리프 곡선을 결정 하기 위해 → **일정한 온도 유지 → 일정한 하중 → 시편의 변형을 시간의 함수로 나타낸다.**
- 곡선의 기울기가 크리프 속도
- 3개의 영역으로 나누어짐
- 초기의 순간적인 변형 (ϵ_0) 역시 단계로 취급하기도 하지만, 일반적으로는 3단계로 나눔. **이 변형을 크리프라고 보기는 힘들지만 총 변형의 상당한 부분을 차지하기 때문에 중요**
- 첫단계: 제1기 크리프 또는 천이 크리프
 - 크리프 속도가 시간에 따라 감소 (**전위가 움직이며 서로 밀집 → 가공경화 → 속도 감소**)
 - 저온 및 응력이 작을때는 제1기가 주된 크리프 과정



[그림 8-1] 전형적인 크리프곡선

8.2 크리프 곡선

- **둘째단계: 제2기 크리프 또는 정상상태 크리프**
 - 가공경화와 회복 (전위의 소멸 및 재배열에 의해)의 균형 → 크리프 속도가 거의 일정
 - 평균 속도 = 최소크리프속도



[그림 8-1] 전형적인 크리프곡선

- **셋째단계: 제3기 크리프 또는 가속 크리프**
 - 주로 고온 고응력에서 일정하중으로 시험 할 때
 - **단면적의 실질적 감소** (국부수축 혹은 내부공공형성) 로 인해 나타남
 - 석출물 입자의 조대화(커짐), 재결정, 상의 확산변화 같은 조직변화와 관계가 있을 수.
 - **일정하중 대신 일정 응력하에서는 가속크리프가 나타나지 않음. (B)**
- **최소크리프속도**
 - 크리프곡선에서 얻어지는 가장 중요한 설계자료, 두가지 규격이 존재
 - 시간당 0.0001%의 크리프 속도가 얻어지는 응력 (제트엔진)
 - 시간당 0.00001%의 크리프 속도가 얻어지는 응력 (증기터빈)

8.2 크리프 곡선

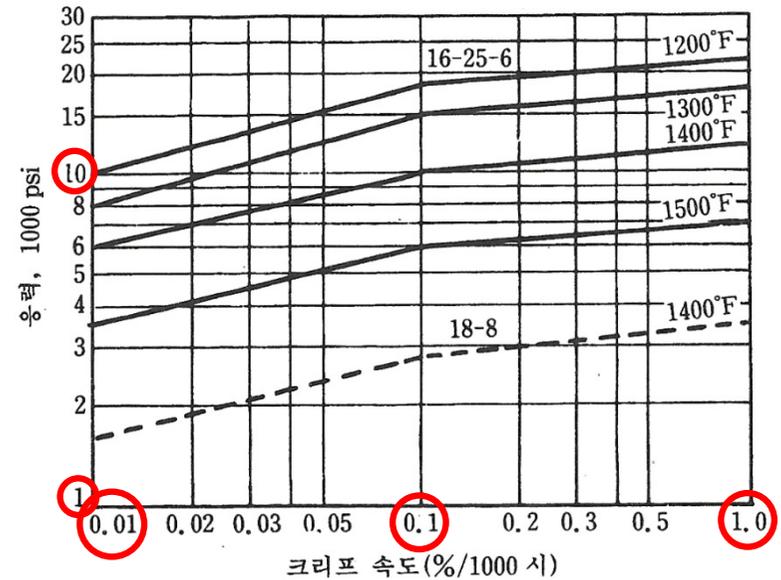
- 온도가 일정할 때 응력 대 최소크리프 속도의 **log-log** 관계가 직선관계 (지수함수 & 예측의 편이)
- 따라서 최소크리프 속도와 응력을 다음과 같이 표현가능

$$\dot{\epsilon}_s = B\sigma^n$$

$$\log \dot{\epsilon}_s = \log B + n \log \sigma$$

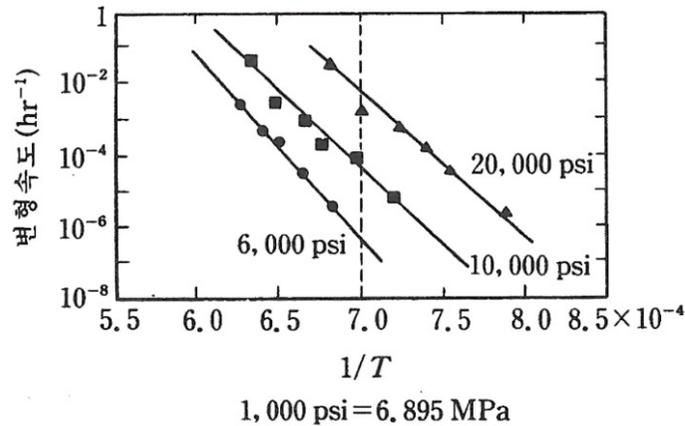
↑ Y축 ↑ Y절편 ↑ 기울기 ↑ X축

- n 을 크리프 지수라 한다. 보통 3~8
- 이러한 종류의 크리프를 멱수-법칙 (power-law) 크리프라고 함

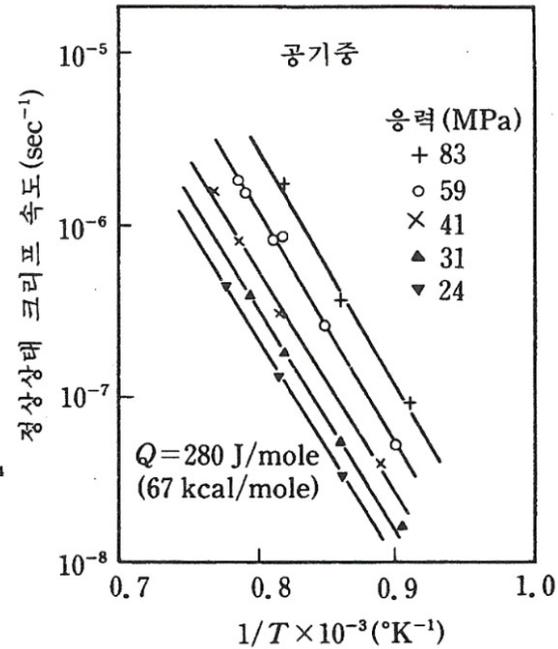


[그림 8-3] 스테인리스강의 최소크리프속도-응력관계⁽¹⁾

8.2 크리프 곡선



(a) 중탄소단조강⁽³⁾



(b) TiO₂⁽⁴⁾

[그림 8-4] 크리프속도와 온도의 관계

- 정상상태 크리프 속도 ($\dot{\epsilon}_s$)의 자연대수(ln)와 절대온도의 역수($1/T$) 관계를 위에서 보여줌
- 따라서, 다음과 같이 표현 가능

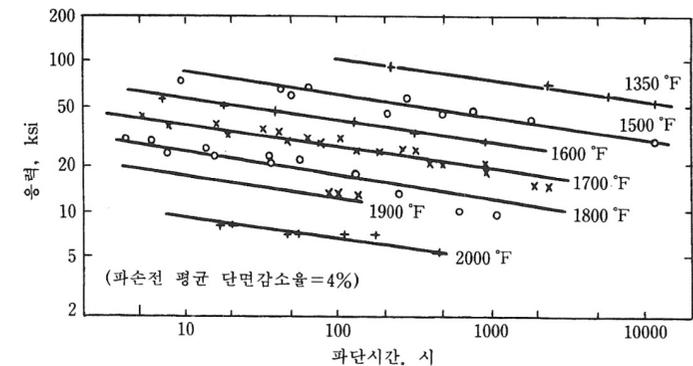
$$\dot{\epsilon}_s = A\sigma^n e^{(-Q/RT)}$$

- A 는 크리프 상수, Q 는 크리프의 활성화에너지(J/mol), R 은 기체상수 8.31 J/mol·K, n 은 크리프 지수 // A, n, Q 의 값은 재료에 따라 다르며 실험적으로 결정

8.2 크리프 곡선

- 크리프시험은 보통 낮은 응력에서 실행 → 시험시간이 길다 (2,000 ~ 10,000 시간)
- 최소크리프속도를 결정하기 위해 변형을 정확히 결정하는데 중점
- 총변형률 0.5%이하

- 하중을 크게 하여 재료가 파괴될때까지 시험하는 경우도
- 보통 응력-파단시험이라 말한다.
- 총 변형률이 약 50%, 시험시간도 짧아 1,000 시간에 끝
- 최근에 많이 사용되는 시험법 (시간문제로)



[그림 8-5] 713 C 합금(Ni-Co기(基) 진공용해 초합금(超合金)의 일종)의 응력-파단자료⁽²⁾

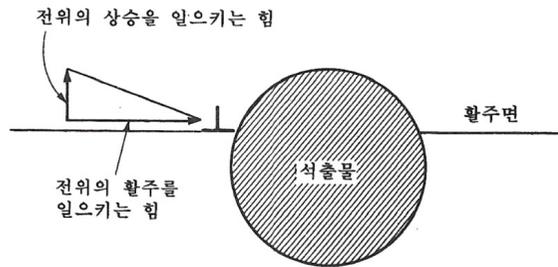
- 응력-파단시험에서 얻어지는 자료: 일정한 온도, 주어진 응력에서 파괴를 일으키는 시간
- 파괴에서의 연신율과 단면감소율도 결정. 응력-파단시간의 log-log 그림이 직선관계
- 시험 중 재료의 조직변화 (입내파괴 → 입계파괴, 산화, 재결정, 결정립성장, 구상화, 흑연화, σ 상 형성 등) → 기울기가 변화할 수 있다.

8.3 크리프변형의 기구

- 크리프 변형과 크리프 파단을 더 잘 견딜 수 있는 재료를 만들기 위해 크리프가 일어나는 기구를 이해하는 것이 중요
- 전위크리프, 확산크리프
- 전위크리프
 - 항복을 일으키는데 필요한 응력 \rightarrow 전위가 격자저항을 극복하는데 필요한 힘 + 장애물 (고용된 원자, 석출물, 다른 전위)을 극복하기 위한 힘
 - 전위가 장애물을 벗어나는데, 원자의 확산이 도움 될 수 있다.
 - 장애물을 벗어난 전위가 이동함으로써 전위 크리프가 생긴다.

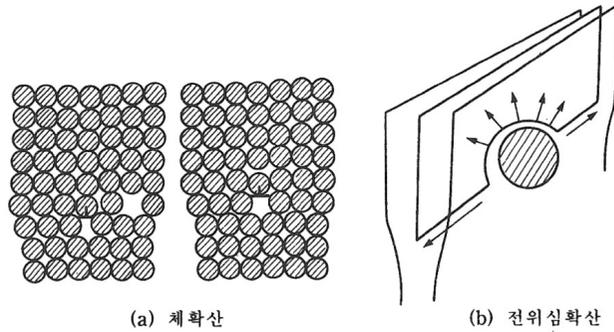


8.3 크리프변형의 기구

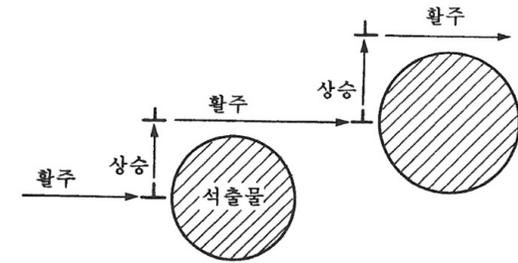


전위의 상승 힘으로 인하여 원자공공의 확산이 일어난다.

[그림 8-7] 전위의 상승힘



[그림 8-8] 체확산과 전위심 확산을 통한 전위상승



[그림 8-9] 연속적인 전위의 상승과 활주에 의한 크리프

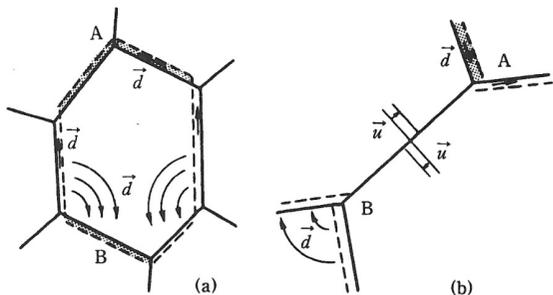
• 전위크리프

- 장애물을 벗어난 전위가 이동함으로써 전위 크리프가 생긴다.
- 전위가 원자의 확산으로 상승함으로써 장애물을 벗어날 수 있다.
- 확산이 일어나기 위해서는 온도가 $0.3 \times \text{절대용점}$ 이상이어야 한다.
- 온도가 낮을때 (0.3 ~ 0.5) 전위심을 통한 확산이 주기구, 높은 온도에서는 체확산이 주기구
- 용질원자에 의한 전위 고착, 다른 전위에 의한 전위 고착의 경우에도 비슷한 거동
- 이것으로 크리프의 점진적이고 연속적인 성질이 설명

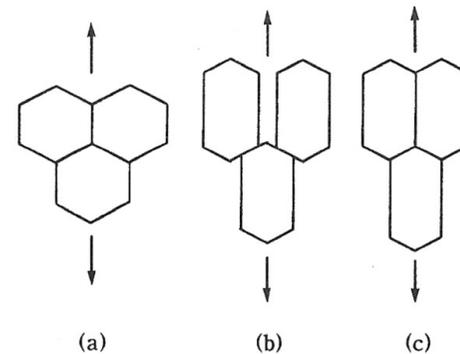
8.3 크리프변형의 기구

- **확산크리프**

- 응력이 감소하면 크리프의 변형속도는 급격히 떨어진다. $\dot{\epsilon}_s = A\sigma^n e^{(-Q/RT)}$
- 하지만, 실제 변형속도는 급격히 떨어지지 않는다. → 다른 기구가 존재
- 상하 방향으로 인장응력이 작용할 때 → 결정립의 한 면에서 다른 면으로 확산 → 그 결과 인장방향으로 결정립 성장



[그림 8-10] (a) 결정립의 한 부분으로부터 다른 부분으로의 원자의 확산에 의하여 크리프가 일어날 수 있다. Nabarro-Herring 크리프에서는 확산이 입내를 통하여 일어나고, Coble 크리프에서는 확산이 입계를 따라 일어난다. (b) 3결정립이 만나는 3중점에서의 입계미끄럼의 간섭은 3중점 주위의 원자가 벡터 d 방향으로 확산함으로써 해소될 수 있다.

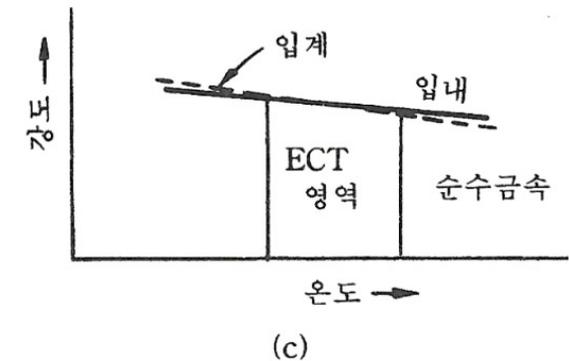
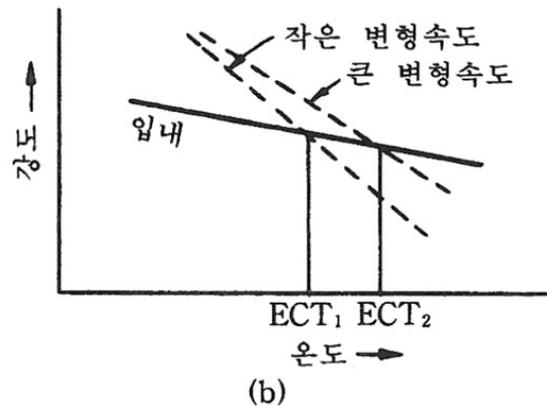
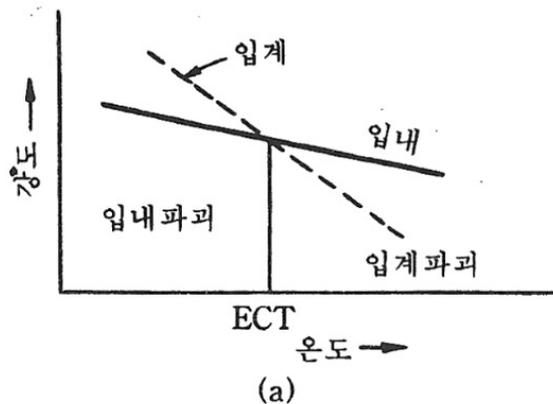


[그림 8-11] 응력으로 인한 확산으로 결정립이 늘어나서 결정립과 결정립이 분리될 수가 있다. 그러나 입계미끄럼에 의하여 결정립이 적응할 수 있다.



8.4 고온파괴

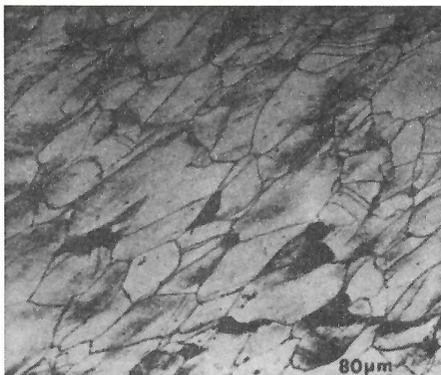
- 온도가 상승, 금속의 파괴 입내파괴 → 입계파괴로 변한다.
- 크리프의 파손은 대부분 입계파괴
- 입내파괴: 슬립면이 입계보다 약함, 입계파괴: 입계가 더 약한 부분
- 등강도온도 (ECT, EquiCohesive Temperature)
 - 결정립의 강도 = 입계의 강도
 - 고정된 값이 아니다.
 - 변형속도도 영향을 미침 (강도-온도 영향보다 큼)
 - 결정립이 크면 (입계면적이 작아져) → ECT 이상에서 높은 강도 (이하에서는 이와 반대)
 - 고순도 소재는 입계와 입내의 강도차이가 거의 없어 ECT가 매우 넓은 영역에 존재



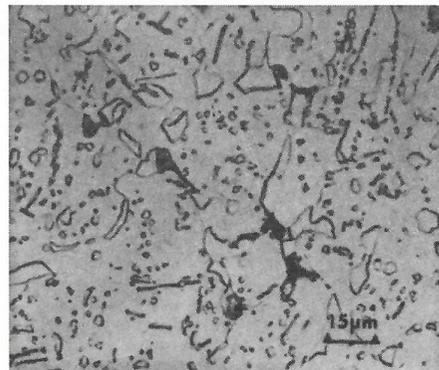
8.4 고온파괴

- 크리프의 제3단계에서는 입계균열과 공동이 생김
- 크리프와 열간가공에서 두가지 형태의 입계균열 (삐기모양의 균열과 구상 형태의 공동)
- **삐기모양의 균열(W형)**

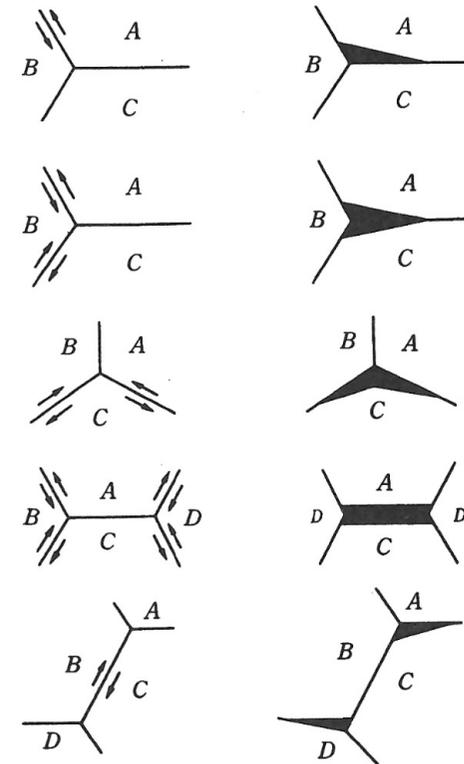
- **입계의 3중점에서 발생**
- 작용응력과 대략 수직인 입계를 따라 전파 (8-16a)
- 이것은 응력집중점에서 입계 미끄럼으로 발생 (8-18)
- 입계석출물과 기지 사이의 계면의 분리에 생길 수도 (8-16b)
- **그다지 높지 않은 온도와 큰 응력에서의 크리프와 관계**



(a) 크리프 파손된 316 스테인리스강에서의 균열



(b) 316 스테인리스강에서 석출물과 기지 계면의 분리에 의한 균열



[그림 8-16] 삐기모양 균열⁽⁹⁾

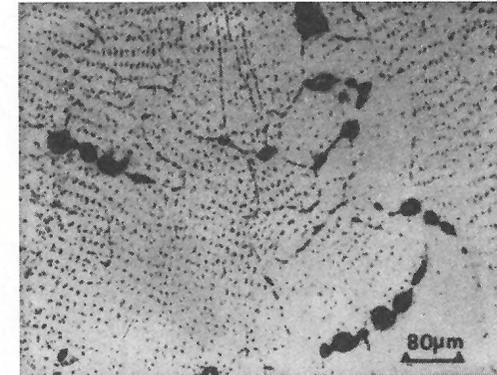
[그림 8-18] 입계미끄럼에 의한 삐기모양 균열 발생기구⁽¹¹⁾



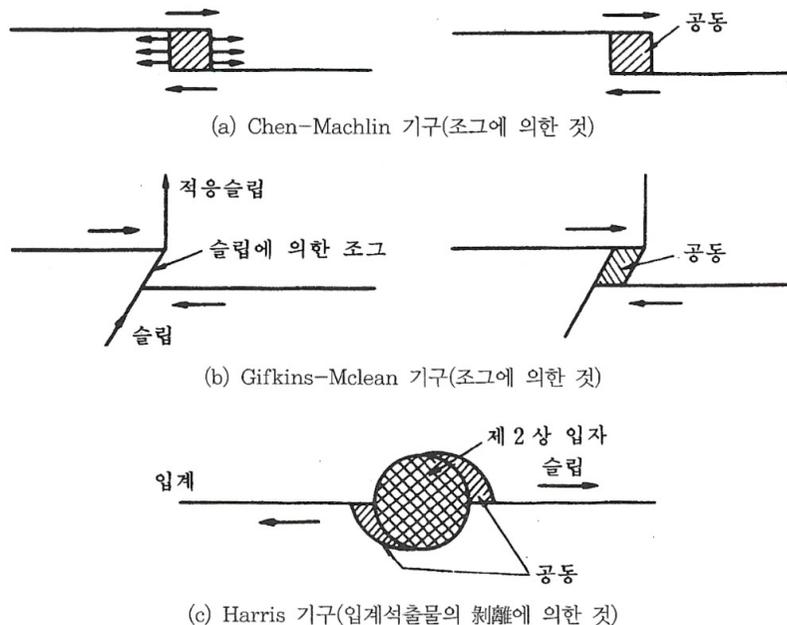
8.4 고온파괴

• 구형의 공동

- 입계를 따라 조그만 구상의 공동이 수 마이크로 간격으로 발생한 후 천천히 성장,합체가 되어 파형의 윤곽을 가진 균열을 형성
- 인장응력에 수직방향의 입계에서 많이 나타나며
- **쇄기모형의 균열에 비해 고온, 저응력에서 나타남.**



[그림 8-17] 구형(球形) 공동(空洞), 고온에서 크리프파손된 316 L 용접금속⁽⁹⁾



[그림 8-19] 입계에서의 공동(空洞)발생기구



8.6 크리프 저항재료 (고온재료)

- **역수-법칙 크리프 (전위크리프)에 저항하는 재료는 다음의 요건을 만족**
 - **확산이 T/T_m 에 따라 증가하므로 높은 용점을 가질 것**
 - **고용체로서 분상상, 석출물(고온에서 안정한)을 가지고 있어 전위 이동을 최대한 억제**
 - **가능한 한 큰 격자저항을 가질것, (산화물, 규산화물, SiC, Si₃N₄ 같은 공유결합 고체)**
- **재료의 결정립이 작고 고온 저 하중에서 사용될 경우 확산유동이 중요, 확산유동에 저항하는 재료는 다음의 요건을 만족**
 - **높은 용점을 가질 것**
 - **확산거리가 길고 입계확산을 억제하기 위하여 결정립이 클 것, 단결정이 최고**
 - **입계미끄럼을 방해하기 위하여 입계에 석출물을 가질 것**