



# 목차

Ch. 1 재료의 거동과 파손

Ch. 2 재료 시험

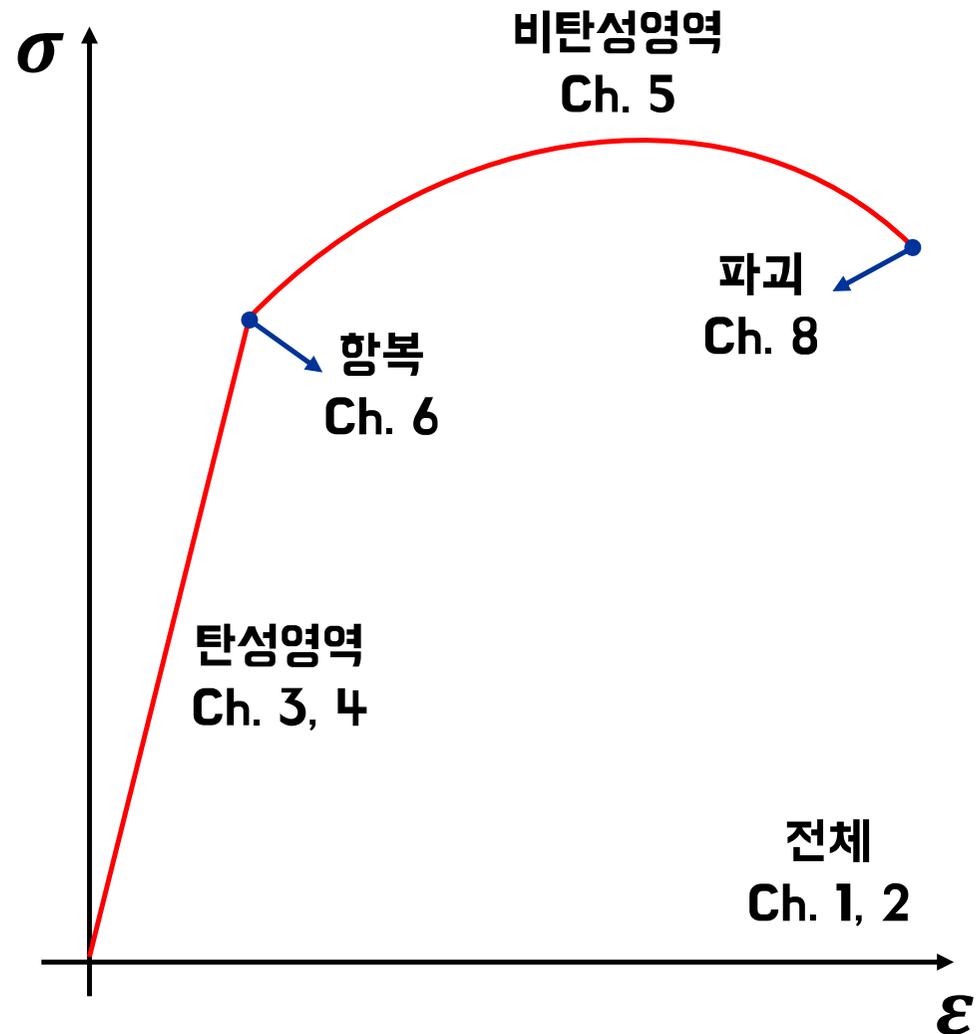
Ch. 3 응력의 변환

Ch. 4 변형률의 변환

Ch. 5 비탄성 재료의 거동

Ch. 6 항복 이론

Ch. 8 파괴역학



# 재료역학

## ○ 재료의 성질

외부 자극에 어떻게 반응하느냐?

성질	외부자극	반응
기계적 성질	힘 (stress)	변형 (strain)
전기적 성질	전기장	전도
자기적 성질	자기장	자기력
광학적 성질	빛	투과, 반사, 굴절

## ○ 재료역학 : 재료의 기계적 성질

재료역학(mechanics of materials)은 기계, 건축물, 다리 따위의 구조물을 이루는 재료의 **역학적 성질**을 연구하는 학문이다. 재료역학의 주 목적은, 구조물의 안전한 설계에 있어서 핵심이 되는 거동 해석을 위해 필요한, 구조물 및 그 부재들에 작용하는 **하중에 따른 응력, 변형과 변형률을 결정**하는 것이다.

# 재료의 거동과 파손

## ○ 재료의 손상

- 재료의 거동을 공부하는 이유 → 급작스런 파손을 방지
- 재료의 수명에 영향 요소 → 온도, 습도, 화학적, 생물학적, 역학적, 미시적, 거시적  
각각의 요소가 어떠한 방식 작용 → 많은 연구 필요
- 안전한 구조물 → 재료의 특성을 파악 → 다양한 조건에 따른 재료의 반응을 이해

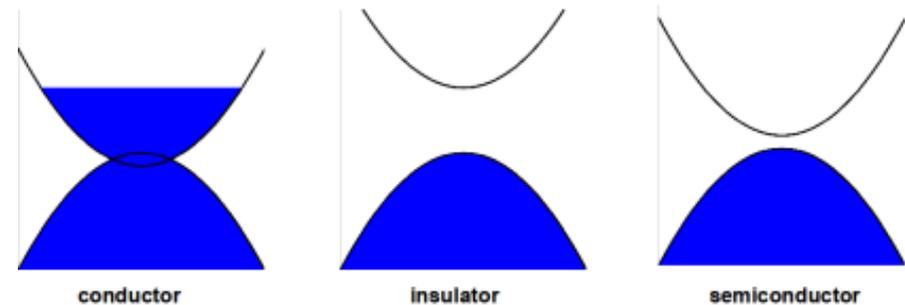
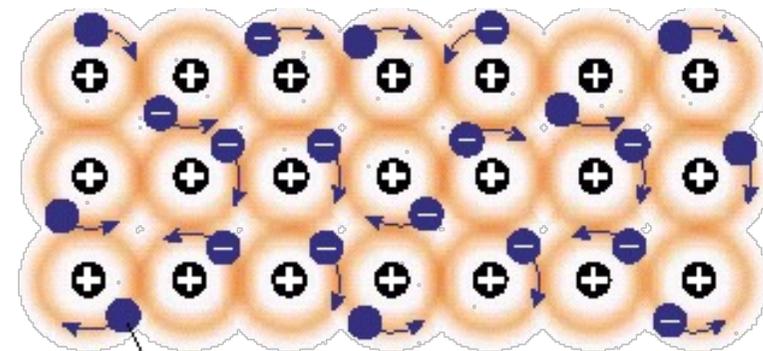


# 재료의 종류

## ○ 금속재료

- 금속재료(metallic materials)는 모든 분야에서 가장 널리 사용되는 재료
- 열과 전기의 전도율 높음, 강도(strength)와 연성(ductility)도 뛰어남
- 합금은 철을 많이 함유하고 있는 강(steel)
- 알루미늄, 구리, 타이타늄 등의 비철금속(nonferrous metals)

1A	2A	3B-8B										1B	2B	3A	4A	5A	6A	7A	8A																																																																		
1 H 1.008	2 He 4.003	3 Li 6.941	4 Be 9.012	5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18	11 Na 22.99	12 Mg 24.31	13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc 98.91	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3	55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm 146.9	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0	71 Fr 87	72 Ra 88	73 Ac 227.0	74 Th 232.0	75 Pa 231.0	76 U 238.0	77 Np 237.0	78 Pu 244.1	79 Am 243.1	80 Cm 247.1	81 Bk 247.1	82 Cf 251.1	83 Es 252.0	84 Fm 257.1	85 Md 258.1	86 No 259.1



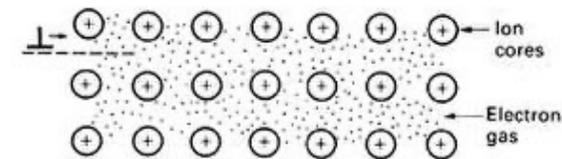
# 재료의 종류

## ○ 세라믹 재료

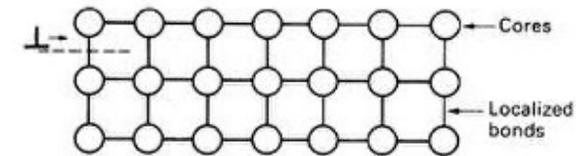
- 세라믹 재료(ceramics)는 금속-비금속 결합
- 높은 강도, 내열성, 내마모성을 들 수 있으며 무게가 가벼움.
- 취성을 나타내며 역학적인 하중에 취약하다.
- 고온에서 열을 차폐하는 기능이 탁월해서 내열성이 요구되는 곳에서 많이 사용됨.



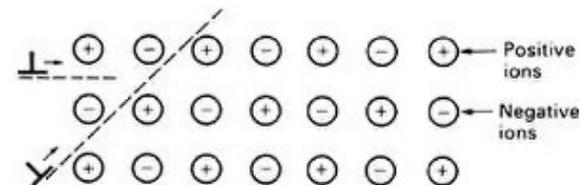
**Figure 17.2** The Roman aqueduct at Segovia, Spain. The granite is as hard as the winters (40 56 51.90 N 4 07 03.25 W).



(a) Metal



(b) Covalent ceramic



(c) Ionic ceramic

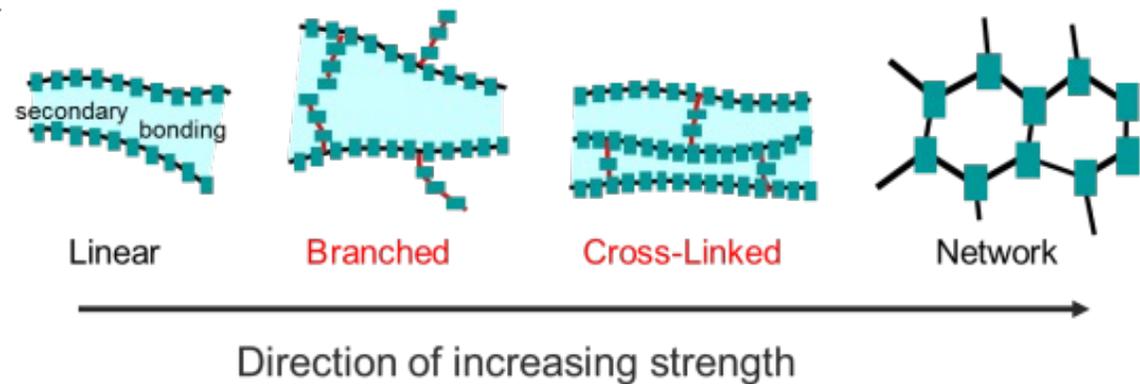
# 재료의 종류

## ○ 고분자 재료

- 고분자 재료(polymeric materials): 탄소를 포함하는 긴 사슬(chains)로 연결된 분자들로 구성된 재료.
- 기본적으로는 결정을 가지지 않는 비결정체로 존재, 강도와 인성은 큰 범위의 변화

Table 21.2 Generic thermosets or resins

Thermoset	Composition
Epoxy	$\left( \text{—O—C}_6\text{H}_4\text{—C} \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{—C}_6\text{H}_4\text{—O—CH}_2\text{—CH—CH}_2\text{—} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$
Polyester	<p>Amorphous.</p> $\left( \text{—C} \begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{—} \end{array} \text{(CH}_2\text{)}_n \text{—C} \begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{—} \end{array} \text{O—C} \begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\   \\ \text{—} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array} \right)_n$
Phenol-formaldehyde	<p>Amorphous.</p> $\left( \begin{array}{c} \text{OH} \\   \\ \text{—C}_6\text{H}_2\text{—CH}_2\text{—} \\   \\ \text{CH}_2 \end{array} \right)_n$ <p>Amorphous.</p>

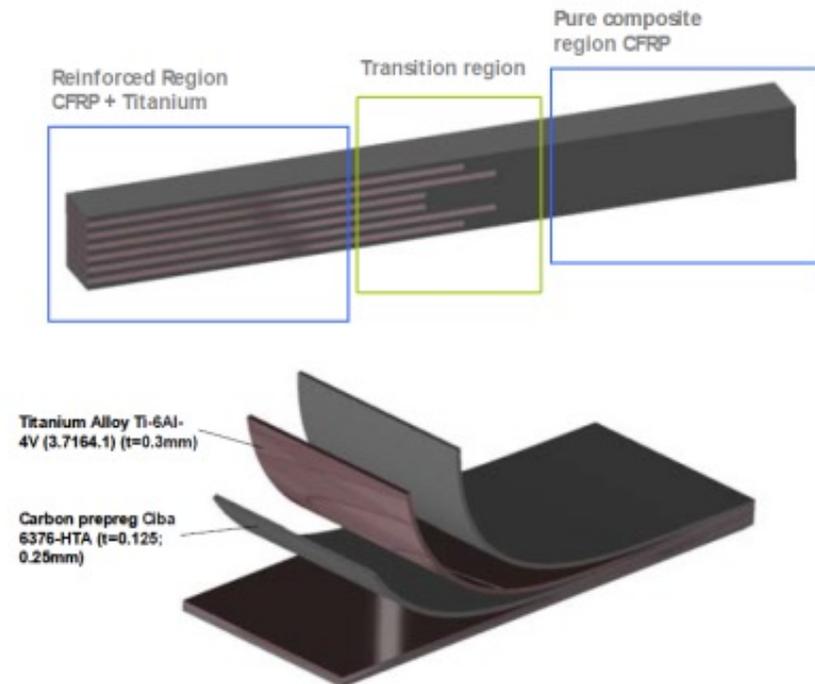
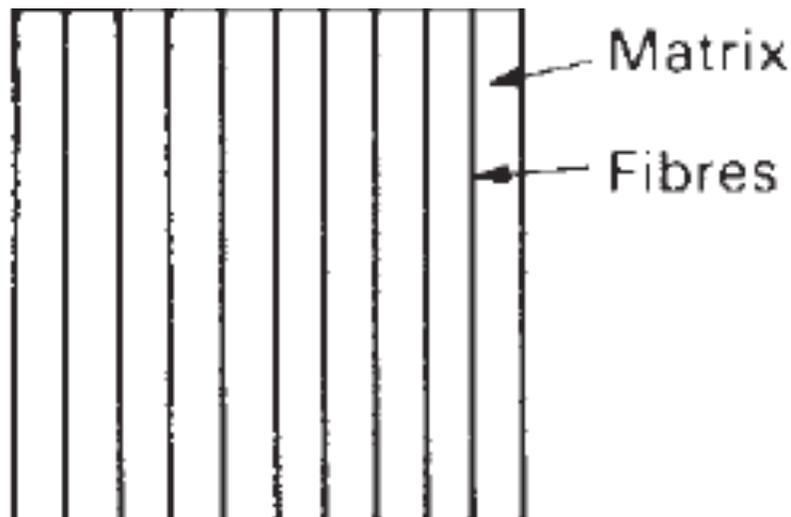


Adapted from Fig. 14.7, Callister 7e.

# 재료의 종류

## ○ 복합재료

- 두 가지 이상의 다른 재료를 섞어서 하나의 통합된 성질을 나타내는 새로운 재료.
- 거시적으로 볼 때 구성된 재료들의 성분이 화학적으로 결합되는 것이 아니라 각 재료의 특성을 유지한 채로 물리적으로 혼합되어 있는 상태
- 복합재료는 높은 강도와 낮은 체적대비 중량으로 인해서 강도와 중량을 중요시하는 각종 분야에서 널리 사용됨.



# 재료의 파손 (Failure)

## ○ 파손의 정의

- 재료가 더 이상의 기대되는 기능을 수행하기가 불가능할 때 파손(failure)
- 단순히 재료가 파괴되어 두 조각이 났다는 것을 의미하는 것은 아님.
- 재료가 파괴되지 않았더라도 더 이상 의도된 특성을 발휘하지 못한다면 파손
- 재료의 파손 그 종류가 매우 다양하며 설계 시의 관점에 따라서 파손 여부를 판단
- 파손 (failure) 은 파괴 (fracture) 보다 큰 범위

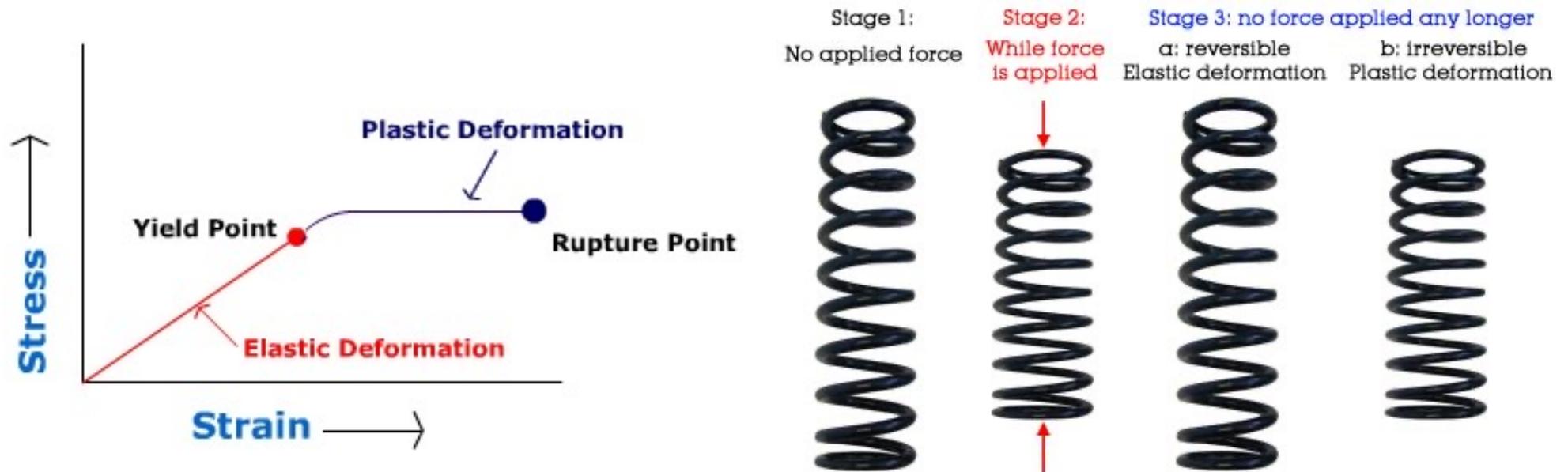
표 1.2 재료의 파손 모드

파손 모드	파손 내용
소성변형	재료의 항복에 의한 과도한 소성변형으로 인한 파손
취성파괴	미소한 소성변형과 작은 파괴인성의 특성
연성파괴	많은 소성변형과 큰 파괴인성의 특성
피로	반복하중에 의한 재료 내부의 손상 누적으로 인한 파손
크리프	고온에서의 장기간 노출시 과도한 변형으로 인한 파손
열충격	급격한 온도 변화의 반복으로 인한 충격으로 파괴
좌굴	압축하중으로 인한 기둥이나 박판의 파손
마모	베어링, 기어 등의 마찰로 인한 파손
부식	환경으로 인한 균열발생과 하중의 작용으로 파손

# 파손 (Failure) 모드의 종류

## ○ 소성변형 (Plastic deformation)

- 탄성을 가진 물체: 힘을 가하면 형상이 바뀌었다가 힘을 제거하면 원래 상태로 돌아간다. (**탄성변형, Elastic deformation**)
- 하지만 금속 등의 많은 고체재료는 탄성한계가 작아 강한 힘을 주면 돌아오지 않는 **영구변형**. 이렇게 힘을 주어 모양을 바꿀 수 있는 성질을 가소성(Plasticity) 이라고 하고 이러한 **영구변형을 소성변형** 이라고 한다.



# 파손 (Failure) 모드의 종류

- 취성파괴 (Brittle fracture), 연성파괴 (Ductile fracture)
  - 취성파괴: 외력에 의해 거의 소성 변형을 동반하지 않고 파괴.
  - 취성 파괴는 불안정적이며, 고속으로 진전한다.
  - 일반적으로 고강도 재료일수록 취성적 파괴.
  - 또 철강 재료 등에서는 연성-취성 천이온도가 있으며, 그 온도보다 높은 온도에서는 연성 파괴, 낮은 온도에서는 취성 파괴
  - 연성 파괴에 대한 상대적 호칭.

Brittle Fracture



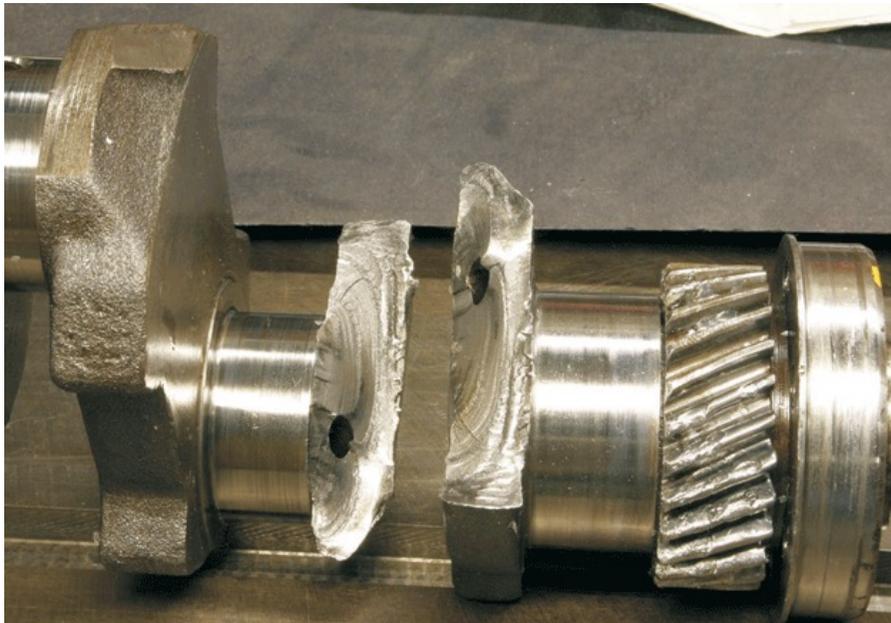
Ductile Fracture



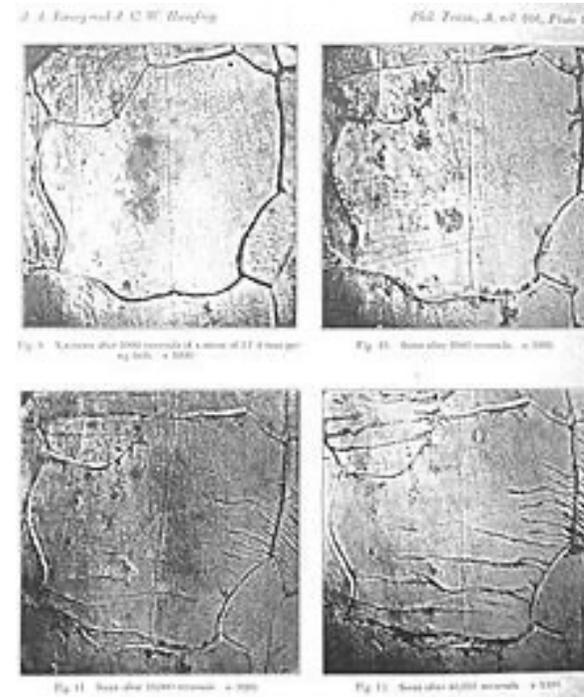
# 파손 (Failure) 모드의 종류

## ○ 피로 (Fatigue)

- 재료에 **반복 응력 (진동, 회전)**을 가하면 비례 한도 또는 탄성 한도 이하의 **작은 응력에서도 파괴되는 경우**
- 이때의 파괴를 **피로 파괴**.
- **미끄럼에 의해 미세 균열 → 응력 집중 --> 반복 응력 → 균열이 확대 → 파괴**



피로파괴된 크래프 샤프트 축

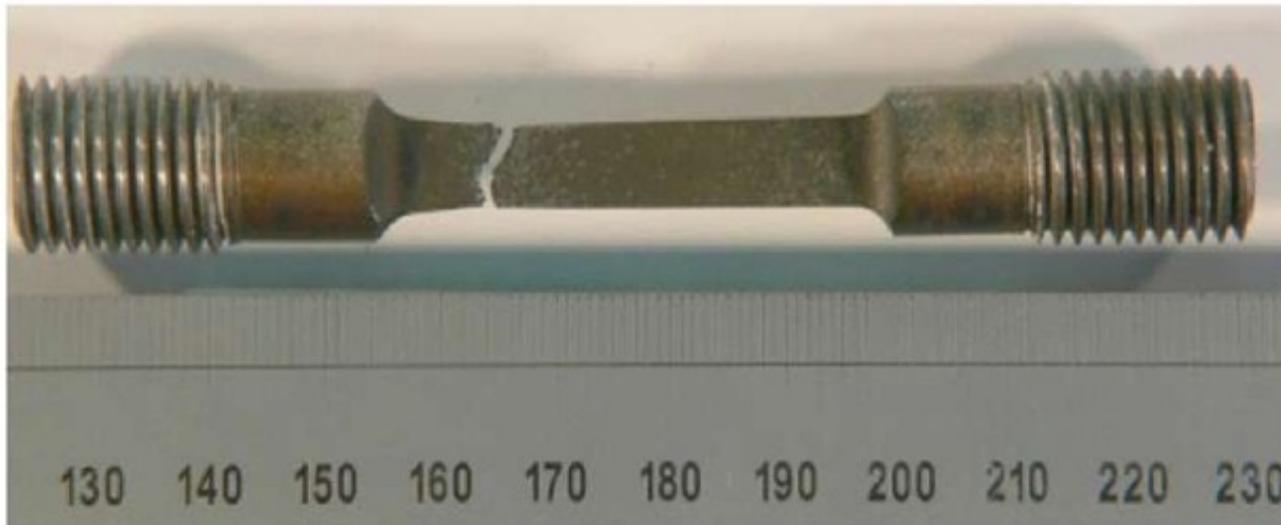


균열 (crack)이 진행되는 양상을 보여주는 그림

# 파손 (Failure) 모드의 종류

## ○ 크리프 (Creep)

- 고무줄에 추를 매달면 순간적으로 고무는 늘어나고, 그대로 방치해두면 시간이 흐름에 따라 고무는 서서히 더 늘어남. 고분자물질에서는 많이 나타남.
- 철강과 같은 금속재료 또는 콘크리트 등에서도 일어남. **금속재료에서는 상온에서는 거의 X, 고온 (용해점의 1/2이상)에서는 무시할 수 없음.**
- **고온-고하중**의 경우에 처음 변형이 급속도로 진행, 다음에는 변형의 시간적인 변화가 거의 일정, 최후에는 다시 변형이 급속도로 진행하여 파단.



680 도에서 진행한 크리프 테스트에서 파괴가 된 시편

# 파손 (Failure) 모드의 종류

## ○ 열충격 (Thermal shock)

- 갑자기 가열/냉각 등 급격한 온도 변화 → 비정상적인 온도 분포, 그 때문에 커다란 열응력(Thermal stress)이나 열변형 (Thermal deformation)
- 이것을 열충격. 이때 **취성(brittle) 재료**에 있어서는 그것이 흡수할 수 있는 **열변형이 적기 때문에** 종종 1회 또는 몇 번의 열응력 반복에 의해 파괴. 이것을 열충격 파괴.

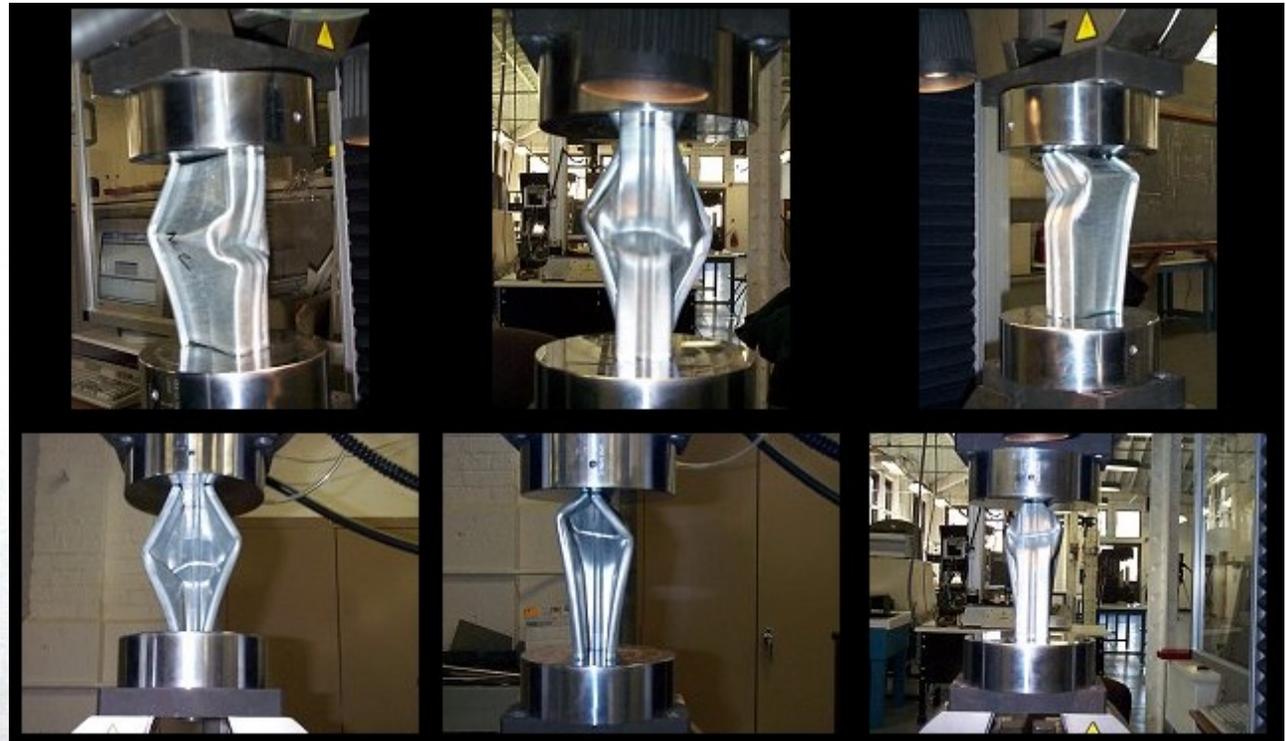
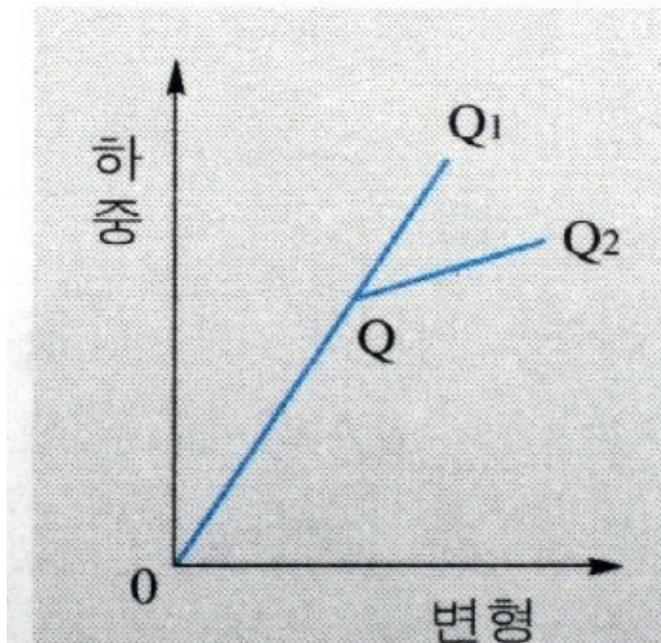


# 파손 (Failure) 모드의 종류

## ○ 좌굴 (Buckling)

- 좌굴은 탄성불안정현상의 일종이며, 변형양식에 아래 그림과 같이 분기점  $Q$ 가 있어서, 그 이상의 하중에 대해서는  $QQ_1, QQ_2$ 의 2개의 평형상태가 있으며, 보통  $0Q$ 의 연장인  $QQ_1$ 의 변형양식이 아니고  $QQ_2$ 와 같은 새로운 변형양식을 취하기 쉽다. 이 분기점  $Q$ 에서의 하중을 좌굴하중. (압축응력이 작용할때)

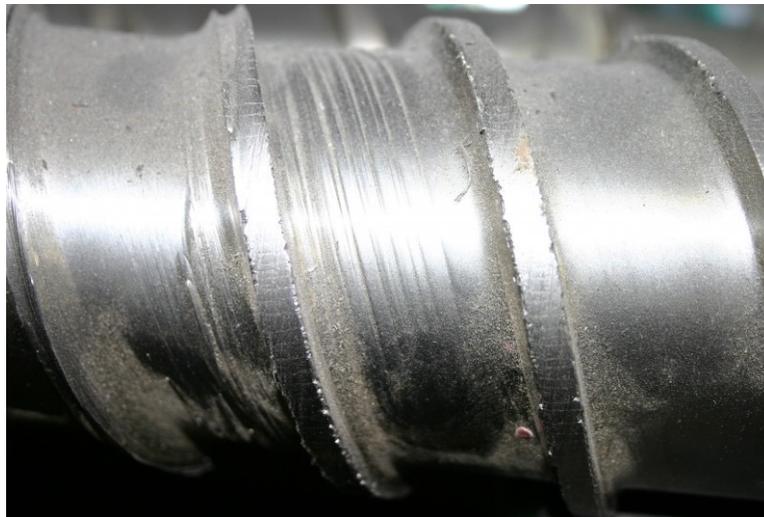
좌굴현상



# 파손 (Failure) 모드의 종류

## ○ 마모 (Wear)

- 일반적으로 **재료가 닳아 없어지는 현상**, 세 가지로 구별.
- **고체 간의 스침에 의해 생기는 경우는 마모**
- **사포나 슛돌 등의 연마 입자나 산화 금속 분말, 그외 마모 분말, 자갈 등에 의한 것을 연마(abrasion)**
- **바람, 물, 눈, 얼음 등 유동체에 의한 것을 침식 (erosion)**
- 보통 이들 세 가지를 총칭해서 **마모**라고 함.
- 침식을 제외하면 마모는 **마찰과 밀접한 관계**, **마찰열에 의한 온도 상승이 마모에 큰 영향**.



# 파손 (Failure) 모드의 종류

## ○ 부식 (Corrosion)

- 금속이 외부로부터의 **화학적 작용**에 의해 소모되어 가는 현상
- 습식과 건식으로 크게 구별.
- 부식은 계속적으로 일어나는 성질
- **도금, 도장, 표면 산화피막의 형성, 전기방식 등의 부식 방지법.**



# 재료의 파손 이론

다양한 하중 조건과 복잡한 환경 속에서 안전하고 신뢰성 있는 부품이나 구조물을 설계하기 위해서 가장 중요한 질문은 재료 거동학의 측면에서 본다면 두 가지로 압축

- 1) 설계된 부품이 실제 환경에서 **하중을 잘 견딜 수** 있을 것인가?
- 2) 그러한 환경에서 부품의 **수명**은 어느 정도 될 것인가?

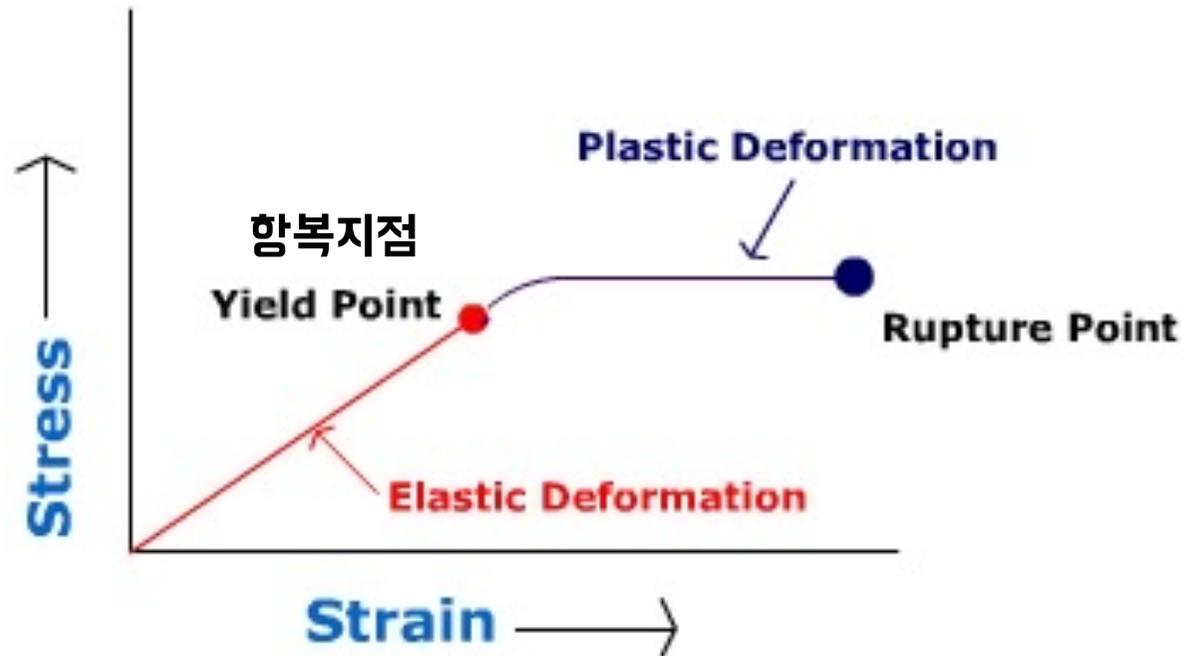
이러한 가장 기본적인 중요한 질문에 답하기 위해서는 재료의 거동을 잘 설명해줄 수 있는 다양한 실험 자료와 물리적인 현상에 맞는 이론이 있어야 한다.

재료의 파손 이유는 일반적으로 다음과 같이 세 가지 정도로 분류될 수 있다.

- **항복에 의한 파손**
- **피로에 의한 파손**
- **파괴에 의한 파손**

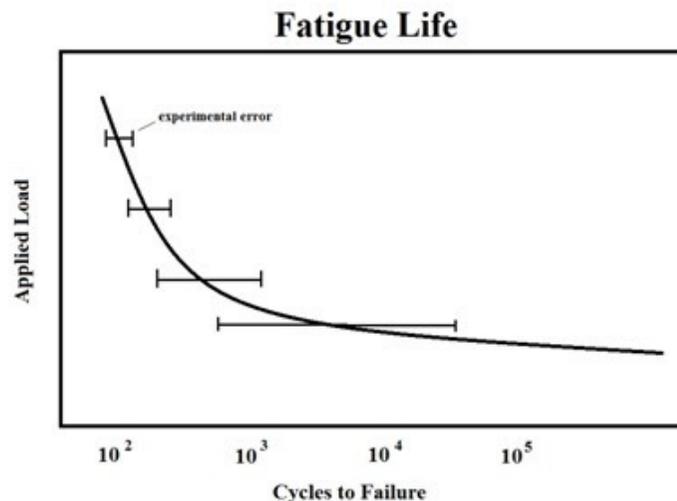
# 재료의 항복

- 항복을 고려한 설계는 학부 과정에서 배우는 재료역학에서 기본적인 내용.
- 재료역학에서는 결함이 전혀 없는 이상적인 재료를 고려.
- **항복이 일어나면 소성변형 → 원래의 설계에서 영구변형.**
- 재료의 항복기준은 단축 하중(uniaxial loading)에서는 응력을 사용, 다축 하중인 경우에는 등가 응력(effective stress)을 사용하여 환산하는 방법을 사용.
- 항복에 의한 파손은 **소성변형을 일으키는 하중의 영향으로 기계 부품이나 구조물이 더 이상 설계 시에 설정한 능력을 발휘할 수 없는 상황.**



# 재료의 피로

- **반복 하중** 작용 → 재료에 피로가 누적,
- 피로를 감안한 설계가 필요 → 먼저 **균열이 성장 사실을 인지**가 중요.
- 즉, 반복 하중 → 균열성장 → 전파되어 결과적으로는 부품이나 구조물을 파손
- 재료의 피로에 의한 파손을 **피로파손(fatigue failure)**이라고 한다.
  
- 피로파손을 막기 위해서는 → 안전한 **균열 크기**를 계산
- 일단 임계 균열 크기가 정해지면 **초기 균열 길이**를 상정하고 균열이 성장하여 **임계 균열 길이까지 되는 시간**을 예측.
- 이를 통해서 부품이나 구조물에 대한 검사 주기를 확정.

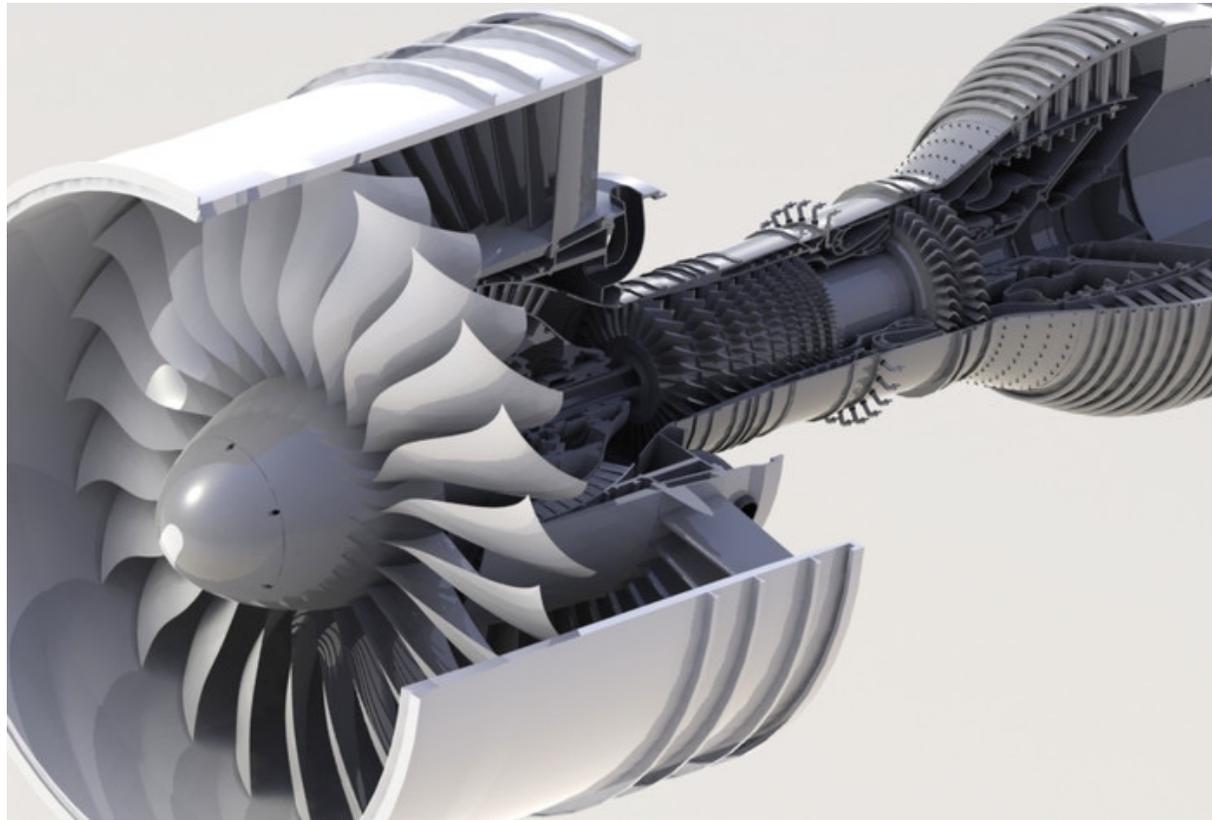


# 재료의 파괴

- 재료의 파괴는 피로와 분리될 수 없는데 이는 궁극적으로 재료 내부의 균열이 성장하기 위해서는 끊임없는 외부의 간섭이 있어야 하기 때문.
- 재료 내부로 외부 하중의 작용에 의한 에너지가 공급되는 가장 간단한 예는 반복적으로 하중이 작용하는 경우이며 이로 인하여 균열이 성장하게 된다.
- 하중의 반복은 그 빈도와 강도에 따라 재료에 미치는 영향이 달라지기 때문에 이를 표준화하여 다양한 하중의 종류와 반복의 회수와의 연관성을 찾아내야 한다.
- 안전한 설계를 위해서는 하중으로 인한 **응력이 항복 점에 도달하지 않도록** 해야 하며,
- 주어진 하중에서 **파괴에 이르지 않을 균열의 크기를 가늠하는 것이 중요.**
- 일단 안전한 균열의 크기가 계산에서 정해지면 해당 부품이나 기계에 대한 다양한 검사를 통해서 **안전 여부를 판단.**
- 만일 하중이 반복되게 작용하는 피로를 감안한 설계가 필요하다면, **균열이 성장할 수 있다는 사실을 인지하는 것이 중요.**

# 터빈엔진 파손요인

- 앞에서 설명한 다양한 파손의 형태가 가장 잘 나타나는 분야중의 하나
- 터빈 엔진(turbine engine) 분야 → 고온-응력이 작용하는 대표적인 부품 중 하나이며, 고가이며 생명과 직결된 분야로 많은 연구가 진행되어 왔음.



Engine Alliance Gp7200(Airbus A380)

# 터빈엔진 파손요인

- 터빈 엔진의 각 부품에 대한 다양한 형태의 파손 모드에 대하여 표 1.3에서 나타내었으며 그 내용은 다음과 같다.

표 1.3 터빈 엔진에서의 파손 요인[11]

ER(erosion, 침식), CO(corrosion, 부식), HCF(high cycle fatigue, 고 사이클 피로), LCF(low cycle fatigue, 저 사이클 피로), TF(thermal fatigue, 열피로), W(wear, 마모)

Engine section	Component	Failure
압축기(compressor)	blade	ER, CO, HCF
	vanes	ER, HCF
	discs	LCF, HCF
터빈(turbine)	blade	TF, LCF, HCF, CO
	vanes	TF, CO, HCF
	discs	LCF, CO, HCF
축(shaft)		LCR, W

# 터빈엔진 파손요인

- 고 사이클 피로(high cycle fatigue, HCF): 주로 탄성변형에 국한되는 작은 변형에서 장기간의 반복하중에 대한 파손을 의미. 항공기 엔진에서는 반복되는 많은 작은 하중의 작용으로 인하여 기존의 결함들이 성장하여 파손.
- 저 사이클 피로(low cycle fatigue, LCF): 반복되는 상대적으로 큰 하중의 작용으로 인하여 소성변형이 발생하여 손상을 입히게 되며 균열의 생성이나 진전에 직접적인 영향을 끼치는 피로 파손의 형태. 터빈 엔진에서는 큰 하중이 반복해서 작용하는 디스크, 축, 압력용기 등이 모두 주로 LCF에 의해서 파손.
- 크리프 (Creep) : 크리프는 금속이나 합금에서 용해점의 1/2이상의 온도에서 발생하는 비탄성 변형을 의미한다. 고온과 큰 하중이 걸릴수록 크리프 변형의 속도는 증가.

# 터빈엔진 파손요인

- 열피로 (Thermal fatigue) : 엔진 부품에서의 온도의 구배로 인하여 반복되는 열응력의 작용으로 말미암아 발생하는 피로. 엔진이 가동되면 **블레이드의 바깥 부분과 중심부분의 온도 차로** 인하여 압축응력을 반복하여 받게 되어 피로파손.
- 부식 (Corrosion) : 주위 환경으로 인하여 엔진 부품에 심대한 손상을 주게 되며 **엔진에 유입되는 연료의 화학성분, 공기 중의 불순물, 염분, 기타 화학성분**을 지닌 입자들로 인하여 부식.
- 침식 (Erosion) : 엔진에서의 침식은 흡입되는 **공기 중의 작은 입자들에 의하여 누적된 손상**의 결과. 침식은 사막 등의 먼지와 모래가 많은 열악한 환경에서 작동하는 회전익 항공기의 로터나 압축기 등에서 발생.
- 마모 (Wear) : 두 개의 이상의 부품이 결합되어 움직이는 베어링, 실링 부분 등에서 발생되며 **마찰되는 부위가 손상**되어 기능을 상실.

# 파손과 설계

- 다양한 종류의 파손 원인을 잘 이해 → 방지할 수 있는 통합적인 지식과 경험 필요
- 이 책에서 설명하고자 하는 기본적인 파손의 요소 (항복, 피로, 파괴) 는 독립적으로 일어나는 현상이 아니라 상호간에 복잡하게 얽혀있는 과정
- 재료의 파손을 고려한 설계는 단일 인자 설계(single parameter design)와 다인자 설계(multi-parameter design)로 나누어 질 수 있으며
- 파손 이론들과 인자들의 관계를 표 1.4에서 표시.

표 1.4 단일 인자 설계와 다인자 설계

설계 구분	설계 명칭	설계 인자
단일 인자 설계	항복설계	항복강도 $\sigma_Y$
	파괴설계	파괴강도 $K_{Ic}$
다인자 설계	HCF 설계	피로강도 $S_e$ , 최대강도 $S_u$ , 평균응력 $\sigma_m$ , 응력비 $R$ , 기타 재료 상수
	피로-파괴 설계	파괴강도 $K_{Ic}$ , 피로강도 $S_e$ , 평균응력 $\sigma_m$ , 응력비 $R$ , 기타 재료 상수
	LCF 설계	피로 연성계수 $\epsilon'_f$ , 피로 강도계수 $\sigma'_f$ , 평균응력 $\sigma_m$ , 응력비 $R$ , 기타 재료 상수

# 파손과 설계

- 파손을 고려한 설계는 설계의 관점에 따라서 시대별로 또는 목적 별로 발전/개선
  - 파손 방지 설계의 종류에는 무한 수명 설계(Infinite life design), 안전 수명 설계(safe-life design), 파손 방지 설계(fail-safe design), 손상 한도 설계(damage tolerant design) 등.
- 
- 무한 수명 설계 (infinite life design): 내구한도 내에서의 사용을 전제로 하여 설계하는 개념이며 **기본적으로 파손되지 않는** 무한 수명을 목표.
  - 안전 수명 설계 (safe-life design): 설계시에 **수명을 설정**하고 그 수명에 도달하면 부품을 **교체** 하는 방식.
  - 파손 방지 설계 (fail-safe design): 개별 요소나 부품이 파손되더라도 **전체 구조물의 파손을 방지**하도록 설계.
  - 손상 한도 설계 (damage tolerant design): **주기적인 검사**를 통하여 **임계 균열 길이와 비교**하여 부품의 교체 여부를 결정하게 하는 설계 방식.

# Chapter 1 요약

---

- 재료역학: 외부에서의 힘에 의해서 변형을 공부하는 학문
- 재료의 파손 (Failure)
  - 소성변형 (Plastic deformation)
  - 취성파괴 (Brittle fracture)
  - 연성파괴 (Ductile fracture)
  - 피로 (Fatigue)
  - 크리프 (Creep)
  - 열충격 (Thermal shock)
  - 좌굴 (Buckling)
  - 마모 (Wear)
  - 부식 (Corrosion)
- 재료의 파손 이론
  - 항복, 피로, 파괴
  - 서로 복합적으로 작용
- 파손 방지 설계
  - 무한 수명 설계
  - 안전 수명 설계
  - 파손 방지 설계
  - 손상 한도 설계