

1장 서론

1장 기본사항 1-1

◆ 기계의 정의

- 기계란?
 - 저항력 있는 물체
 - 구속된 상대운동 (한정된 범위)
 - 유용한 일
- 새로운 기계의 정의 ⇨ 컴퓨터도 기계의 일부
 - 에너지 또는 물질의 변환
 - 상대적인 운동
 - 인간활동을 지원

1장 기본사항 1-2

◆ 기계 설계시 고려사항

- 원활한 기능 및 작동원리
- 안전성
- 역학적 타당성
- 생산성
- 내구성
- 경제성
- 규격화 및 표준화
- 인간공학
- 미학적 측면
- 재활용 측면

1장 기본사항 1-3

◆ 컴퓨터를 이용한 설계 및 생산

- CAD – Computer Aided Design
- CAM – Computer Aided Manufacturing
- CAE – Computer Aided Engineering
- CAT – Computer Aided Testing
- CIM – Computer Integrated Manufacturing

1장 기본사항 1-4

◆ 기계 요소의 분류

결합용 요소

- 나사(볼트, 너트)
- 리벳
- 용접

축계 요소

- 축
- 축이음(커플링, 클러치)
- 베어링
- 키, 핀, 코터

1장 기본사항 1-5

전동 요소

- 마찰차
- 기어
- 벨트
- 로프
- 체인

운동조정용 요소

- 제동요소
- 완충요소

관용 요소

- 파이프
- 파이프 이음

1장 기본사항 1-6

◆ 단체계

1. SI단위

- 단위 : 물리량을 수치로써 나타낼 때 기준
- 기본단위 : 다른 물리량과 무관 독립적으로 정해지는 단위
- 조립단위 : 기본량을 조립하여 정의된 단위

1장 기본사항 1-7

2. 단위의 환산

(1) 힘(force)

$$1(N) = 1(kg \cdot m / s^2)$$

(2) 압력 또는 응력(pressure or stress)

$$1(Pa) = 1(N / m^2)$$

1장 기본사항 1-8

(3) 일 또는 모멘트(work or moment)

$$1(J) = 1(N \cdot m)$$

(4) 각속도 및 원주속도

$$\omega(rad / s) = \frac{2\pi}{60} N(rpm)$$

$$v(m/s) = r(m) \omega(rad/s) = \frac{D(mm)}{2000} \left(\frac{2\pi N(rpm)}{60} \right)$$

1장 기본사항 1-9

(5) 일률 또는 동력(power)

- 일률 : 단위시간당 한 일의 양

$$H = F \cdot v = F \cdot \omega = T \cdot \omega = I \cdot V$$

- 동력의 단위

$$1(W) = 1(J / s) = 1(N \cdot m / s) = 1(Amp \cdot Volt)$$

$$1(PS) = 75(kg_f \cdot m / s)$$

1장 기본사항 1-10

<회전력과 점선속도로부터 동력을 구할 때 쓰는 식>

	$P(kg), v(m/s)$	$P'(N), v(m/s)$
$H'(kW)$	$\frac{P(kg_f) \cdot v(m/s)}{102}$	$\frac{P'(N) \cdot v(m/s)}{100}$
$H(PS)$	$\frac{P(kg_f) \cdot v(m/s)}{75}$	$\frac{P'(N) \cdot v(m/s)}{735.5}$

1장 기본사항 1-11

<동력과 회전수로부터 토크를 구할 때 쓰는 식>

	$T(kg_f \cdot mm), N(rpm)$
$H'(kW)$	$T(kg_f \cdot mm) = 974000 \frac{H'(kW)}{N(rpm)}$
$H(PS)$	$T(kg_f \cdot mm) = 716200 \frac{H(PS)}{N(rpm)}$

1장 기본사항 1-12

<동력과 회전수로부터 토크를 구할 때 쓰는 식>

	$T'(N \cdot m), N(rpm)$
$H'(kW)$	$T'(N \cdot m) = 9549 \frac{H'(kW)}{N(rpm)}$
$H(PS)$	$T'(N \cdot m) = 7023.5 \frac{H'(PS)}{N(rpm)}$

1장 기본사항

1-13

2장 응력과 변형률

2장 응력과 변형률 2-1

◆ 하중의 종류

하중의 종류는 하중의 작용방향, 작용시간, 분포상태 등에 따라 분류할 수 있다.

- 방향에 따라
 - 인장하중
 - 압축하중
 - 전단하중
- 시간에 따라
 - 정하중
 - 동하중
 - 충격하중
 - 반복하중
 - 변동하중
 - 이동하중
- 분포상태에 따라
 - 집중하중
 - 분포하중

양진(=교번)
편진
부분편진

2장 응력과 변형률 2-2

◆ 하중의 종류

표.2.2 하중과 응력

힘 또는 모멘트	발생응력	관계식	비고
축방향 하중 (인장, 압축)	인장 또는 압축응력	$\sigma = \frac{F}{A}$	A는 인장 또는 압축단면의 면적
전단하중	직접 전단응력	$\tau = \frac{F}{A_s}$	A _s 는 전단면의 면적
비틀림 모멘트	비틀림 전단응력	$\tau = \frac{F \cdot r}{I_p} = \frac{\sigma}{2}$	$I_p = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{32}$ (원형단면)
굽힘 모멘트	굽힘응력 (인장, 압축)	$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_{xx}} = \frac{M \cdot b}{I_{xx}}$	$I_{xx} = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{64}$ (원형단면) $I_{xx} = \frac{b \cdot h^3}{12}$ (사각단면)

주: Z는 단면계수(section modulus), Z_p는 극단면계수(polar modulus of section), I_{xx}는 단면2차모멘트(moment of inertia of area or second moment of area), I_{yy}는 단면2차 극모멘트(polar moment of inertia of area)이다.

2장 응력과 변형률 2-3

◆ 응력과 변형률

OA: 비례한도
OB: 탄성한도
Y₁: 상한비점
Y₂: 하한비점
C: 극한강도
C': 진입력에서의 극한강도
F: 파단
F': 진입력에서의 파단

경사 = 탄성계수 E

변형률 ϵ (대수 눈금)

연강에서 인장응력과 인장변형률과의 관계

2장 응력과 변형률 2-4

◆ 응력과 변형률

A: 고강도강
B: 주철

항복점 불분명
0.2% offset

취성재료의 인장응력에 대한 인장변형률의 변화

2장 응력과 변형률 2-5

◆ 응력과 변형률

표.2.3 각종 금속의 기계적 성질

구분	재료명	밀도 [kg/m ³]	탄성계수(E) [GPa]	항복응력 [MPa]	인장강도 [MPa]	취성비	인장률 [%]
철	일반소강 (AISI 1020)	7850	207	130	300	0.30	45
	중탄소강 (AISI 1040)	7850	207	305	385	0.30	37
	고탄소강 (AISI 1080)	7840	207	380	530	0.30	30
	스테인리스강	-	-	-	-	-	-
알루미늄	알루미늄, STS440	2700	300	345	552	0.30	25
	(오스카-카프, STS350)	8000	158	207	552	0.30	60
	(이브덴사이드, STS430)	7800	200	276	483	0.30	30
	외계알루미늄	7100	-	-	135	-	-
	구상흑연주철	7130	165	225	415	0.28	18
	기타주철	7300-7450	172	250	345	0.30	10
강철	인공합금 (>90.5%Ni)	8210	69	17	55	0.53	25
	알루미늄 합금 A3014	2800	72	97	196	0.33	18
	구리 합금(90%Ni)	8940	110	69	220	0.35	45
	황동(Cu=80%Ni)	8530	110	75	303	0.35	68
	청동(Cu=85%Sn)	8800	110	152	380	0.35	70
비철	마그네슘 (>98%Ni)	1740	45	41	165	0.29	14
	알루미늄 (>99%Ni)	3020	204	905	625	-	35
	니켈 (>98%Ni)	8900	207	138	483	0.31	40
	은 (>99%Ni)	10490	76	55	125	0.37	48
티타늄 (>99%Ni)	4510	107	340	530	0.34	30	

주: 1) N/mm² = 1 MPa, 1 GPa = 1000 MPa
2) 항복강도 재료에서는 $\sigma = \frac{F}{A}$ 가 성립한다.
3) AISI(American Iron and Steel Institute)는 인장강도(항복점)를 의미하고, AISI 1020의 항복강도는 KS 규격의 SM40C의 항복강도 유사하며, AISI 1040은 SM40C와 유사하다.

2장 응력과 변형률 2-6

◆ 응력과 변형률

- **공칭응력과 공칭변형률**
- 공칭응력
최초 단면의 면적에 대한 하중의 비
$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$
- 공칭변형률
여기서 A_0 는 최초 단면의 면적
최초 길이에 대한 늘어난 길이의 비
$$\epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$
- 여기서 L_0 은 최초 길이
 L_f 는 변형 후의 길이

2장 응력과 변형률 2-7

◆ 응력과 변형률

- **진응력과 진변형률**
- 진응력(true stress)
변화된 단면에 대한 하중의 비
$$\sigma_T = \frac{F}{A_f} = \frac{F}{A_0(1+\epsilon)} = \sigma(1+\epsilon) = \sigma R$$
- 진 변형률(true strain)
변화된 길이에 대해 늘어난 길이의 비
$$\epsilon_T = \int_{L_0}^{L_f} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_f}{L_0} = \ln \frac{L_0(1+\epsilon)}{L_0} = \ln R$$

2장 응력과 변형률 2-8

◆ 응력의 합성

- **평면응력**

기존 단면(x,y좌표로 표시)에 대하여 반시계 방향으로 각도 θ 만큼 회전한 단면 ($X'Y'$ 좌표로 표시)에서의 응력상태를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta$$

여기서 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 는 xy 평면에서 미소요소의 응력

2장 응력과 변형률 2-9

◆ 응력의 합성

평면응력을 받는 단면

2장 응력과 변형률 2-10

◆ 응력의 합성

모어 원(Mohr circle)

2장 응력과 변형률 2-11

◆ 응력의 합성

- **모어 원으로 나타낸 식**
$$\left(\sigma' - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2$$

$$\left(\sigma' - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2$$
- **주응력(principal stress)**
$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$
- 이때의 실제면의 회전각
$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

2장 응력과 변형률 2-12

◆ 응력의 합성

- 최대전단응력 (maximum shear stress)

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

- 최대인장응력 σ_{\max} , 최대전단응력 τ_{\max}

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_b}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

2장 응력과 변형률 2-13

◆ 상당 모멘트

- 원형단면에 순수 굽힘모멘트만 작용하는 경우

$$\sigma_b = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (\text{원형 단면으로서 } I_{yy} = \frac{\pi}{64} d^4 \text{인 경우})$$

- 원형단면에 순수 비틀림모멘트만 작용하는 경우

$$\tau_{\text{av}} = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (\text{원형 단면으로서 } I_p = \frac{\pi}{32} d^4 \text{인 경우})$$

2장 응력과 변형률 2-14

◆ 상당 모멘트

- 굽힘모멘트와 비틀림모멘트가 동시에 작용하는 경우

- 최대 굽힘응력 $\sigma_{\max} = \frac{\sigma_b}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2}$
- 굽힘모멘트만 작용하는 식의형태

$$\sigma_{\max} = \frac{32}{\pi d^3} \left(\frac{1}{2} (M + \sqrt{M^2 + T^2}) \right) = \frac{32M_e}{\pi d^3}$$

- 상당 굽힘 모멘트 $M_e = \frac{1}{2} (M + \sqrt{M^2 + T^2})$

2장 응력과 변형률 2-15

◆ 상당 모멘트

- 굽힘모멘트와 비틀림모멘트가 동시에 작용하는 경우

- 최대 전단응력 $\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2}$
- 비틀림모멘트만 작용하는 식의형태

$$\tau_{\max} = \frac{16}{\pi d^3} (\sqrt{M^2 + T^2}) = \frac{16T_e}{\pi d^3}$$

- 상당 비틀림 모멘트 $T_e = \sqrt{M^2 + T^2}$

2장 응력과 변형률 2-16

◆ 응력집중

- 국부적으로 특별히 큰 응력이 발생하는 현상
- 단면이 크게 변하는 부분

(예) 축의 키홈, 구멍, 단이 진 부분

2장 응력과 변형률 2-17

◆ 응력집중

- 응력집중계수(stress concentration factor) : α
- 단면부의 평균응력에 대한 최대응력의 비

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}$$

σ_{\max} : 최대응력
 σ_n : 평균응력

2장 응력과 변형률 2-18

◆ 응력 집중

■ 판에서의 응력 집중

무한 평판에 타원구멍이 있는 경우의 응력 집중계수

$$a = 1 + 2\frac{a}{b} = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (\because \rho = \frac{b^2}{a})$$

여기서 a 는 타원에서 장반경
 b 는 타원에서 단반경
 ρ 는 노치부에서 곡률반경이다.

2장 응력과 변형률 2-19

◆ 응력 집중

■ 판에서의 응력 집중

(a) 균일단면 (b) 노치부분 (c) 구멍부분

평판의 응력 집중

2장 응력과 변형률 2-20

◆ 응력 집중

■ 판에서의 응력 집중

반무한 평판에 V자 노치가 있는 경우의 응력 집중계수

$$a = 1 + 2\frac{a}{r}$$

여기서 a 는 파여진 길이, r 은 홈끝의 반경이다.

2장 응력과 변형률 2-21

◆ 응력 집중

■ 봉에서의 응력 집중

(a) 비록된 모면의 작용 (b) 인장하중, 횡단면의 작용

단이진 원형봉의 응력 집중

2장 응력과 변형률 2-22

◆ 응력 집중

■ 응력 집중 경감대책

- 필렛 반지름 크게
- 제1, 제3의 단면변화형상 설치
- 보강재 결합
- 열처리

2장 응력과 변형률 2-23

◆ 응력 집중

(a) 굽어진 홈의 초음변화(봉) (b) 홈의 초음변화(단면) (c) 홈의 초음변화> 굽어짐(봉)

(d) 홈의 초음변화 적용(양면) (e) 홈의 초음변화 적용(단면)

응력 집중 완화를 위한 형상의 변형

2장 응력과 변형률 2-24

◆ 크리프 (creep)

고온, 일정하중 아래서 장시간 방치하면 변형률이 시간에 따라 증가

예: Jet Engine, Gas Turbine, Rocket, 고압발전 Boiler

ε₀ : 하중이 최초 작용시 변형률

크리프 곡선 (고온 고하중의 경우)

2장 응력과 변형률 2-25

◆ 크리프 (creep)

(a) 온도가 높고, 하중이 큰 경우
(b) 온도가 낮고, 하중이 작은 경우
(c) (a)와 (b)의 중간
ε₀ : 하중이 최초 작용시 변형률

온도, 하중의 변화에 따른 크리프 곡선

2장 응력과 변형률 2-26

◆ 재료의 파손이론

▪ 최대 주응력설

인장응력이나 압축응력에 의하여 재료가 파손된다는 이론

• 3차원인 경우 최대 주응력

$$\sigma_{\max} = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|)$$

• σ₃ = 0 인 2차원의 경우

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

2장 응력과 변형률 2-27

◆ 재료의 파손이론

▪ 최대 전단응력설

전단응력에 의하여 재료가 파손된다는 이론

• 3차원인 경우 최대 전단응력

$$\tau_{\max} = \max\left(\left|\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right|, \left|\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}\right|, \left|\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}\right|\right)$$

• σ₃ = 0 인 2차원 평면응력의 경우

$$\tau_{\max} = \max\left(\left|\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right|, \left|\frac{\sigma_2}{2}\right|, \left|\frac{\sigma_1}{2}\right|\right)$$

2장 응력과 변형률 2-28

◆ 재료의 파손이론

▪ 최대 전단응력설

• 2차원 응력이 동시에 작용하는 경우

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

만약 σ₂ = σ₃ = 0인 1차원 응력의 경우 τ_{max} = σ₁/2이 된다.

2장 응력과 변형률 2-29

◆ 재료의 파손이론

▪ 전단변형에너지설 → von Mises condition

변형에너지 = 전단변형에너지 + 체적변형에너지

파손 — 전단변형에너지 = 인장상의 항복점에서의 변형에너지

→ 항복

2장 응력과 변형률 2-30

◆ 재료의 파손이론

- 총변형에너지 $U = \frac{1}{2} \sigma_1 \epsilon_1 + \frac{1}{2} \sigma_2 \epsilon_2 + \frac{1}{2} \sigma_3 \epsilon_3$
- 응력과 변형률과의 관계

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [(\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3))]$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} [(\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1))]$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} [(\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2))]$$
- 총변형에너지 $U = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]$

2장 응력과 변형률 2-31

◆ 재료의 파손이론

- 체적변형률 Δ

$$\Delta = (1 + \epsilon_1)(1 + \epsilon_2)(1 + \epsilon_3) - 1 \approx \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$$
- 체적변형에너지 (U_v)

$$U_v = \frac{1}{2} p \Delta = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right) \times (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)$$

$$= \frac{1}{6E} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right) \times (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1))$$

단, p : 평균응력

2장 응력과 변형률 2-32

◆ 재료의 파손이론

- 전단변형에너지 (U_s) = 총변형에너지 - 체적변형에너지
- $$U_s = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

여기서 ν 는 포와슨 계수
 E 는 세로탄성계수

2장 응력과 변형률 2-33

◆ 재료의 파손이론

- 전단변형에너지 (U_s)
- 단순인장을 받는 경우 ($\sigma_1 = \sigma_{VM}, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$)

$$U_s = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_{VM} - 0)^2 + (0 - 0)^2 + (0 - \sigma_{VM})^2]$$

단, σ_{VM} 는 인장시 항복응력

2장 응력과 변형률 2-34

◆ 재료의 파손이론

- σ_{VM} 는 인장시 항복응력
- $$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}}$$

단, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 주응력

2장 응력과 변형률 2-35

◆ 재료의 파손이론

- 파손이론의 비교
- (a) 최대 주응력 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$
 (b) 최대 전단응력 $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$
- 2차원 평면에서 파손이론 ($\sigma_2 = 0$ 의 경우)

2장 응력과 변형률 2-36

◆ 재료의 파손이론

■ 파손이론의 비교

(c) 전단 변형 에너지지점 $\sigma_2 = -\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}$

2차원 평면에서 파손이론($\sigma_3 = 0$ 의 경우)

2장 응력과 변형률 2-37

◆ 재료의 파손이론

■ 파손이론의 비교

파손이론과 실험결과($\sigma_3 = 0$ 의 경우)

2장 응력과 변형률 2-38

◆ 안전계수(safety factor)

■ 기준 강도

표2.5 기준강도와 설계응력

하중조건	피괴형태	기준강도	목적용어
재료변화	정하중 상온 파단	항복점 극한강도	연성재료(인장) 취성재료(우월)
순도변화	정하중 고온 크리프 변형	크리프 한도	타인 스프링 및 날개자
시간변화	정하중 저온 저온취성	저온취성강도	LPG저장탱크
하중변형	반복하중 피로파괴	피로강도(노치, 치수, 표면상태, 온도 등의 효과를 고려)	철도차량 바퀴
충격하중	충격파괴	충격강도	
충격하중	충격파괴	충격강도	
하중변형	충격하중 파괴	파괴강도	단면에 비해 길이가 긴 기둥

2장 응력과 변형률 2-39

◆ 안전계수(safety factor)

■ 허용응력(σ_a : allowable stress)

부품설계시 사용하는 응력의 최대 허용치

■ 안전계수 또는 안전률 (S)

허용응력에 대한 기준강도

$$S = \frac{\sigma_s}{\sigma_a}$$

여기서 S는 안전계수(또는 안전율)
 σ_s 는 기준강도
 σ_a 는 허용응력

2장 응력과 변형률 2-40

◆ 피로파손(fatigue failure)

정의

반복 동하중 작용하에서 인장강도 혹은 항복응력보다 낮은 응력에서 재료가 갑자기 파괴되는 현상

반복응력의 종류

2장 응력과 변형률 2-41

◆ 피로파손(fatigue failure)

■ 피로한도 곡선(S-N 곡선)

강이 양진응력을 받는 경우

2장 응력과 변형률 2-42

◆ 피로파손(fatigue failure)

▪ 피로한도 선도

σ_T : 항복 응력
 σ_Y : 극한 응력
 σ_E : 피로 한도

헤이그 선도

2장 응력과 변형률 2-43

◆ 피로파손(fatigue failure)

▪ 피로한도 선도

스미스 선도

2장 응력과 변형률 2-44

◆ 피로파손(fatigue failure)

▪ 피로한도 선도

여러 가지 내구선도의 비교

2장 응력과 변형률 2-45

◆ 피로파손(fatigue failure)

▪ 조더버그선(Soderberg line)

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_Y} = 1$$

안전계수 S를 고려한 설계는 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_a/S}{\sigma_e/S} + \frac{\sigma_m/S}{\sigma_Y/S} < 1$$

▪ 굿맨선(Goodman line)

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1$$

안전계수 S를 고려한 설계는 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_a/S}{\sigma_e/S} + \frac{\sigma_m/S}{\sigma_u/S} < 1$$

2장 응력과 변형률 2-46

◆ 피로파손(fatigue failure)

▪ 거버선(Gerber's line)

$$\sigma_a = \sigma_e \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 \right\}$$

안전계수 S를 고려한 설계는 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_a/S}{\sigma_e/S} + \left(\frac{\sigma_m/S}{\sigma_u/S} \right)^2 < 1$$

▪ 미국기계학회 표준선도(ASME)

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_e} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_Y} \right)^2 = 1$$

안전계수 S를 고려한 설계는 다음과 같다.

$$\left(\frac{\sigma_a/S}{\sigma_e/S} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_m/S}{\sigma_Y/S} \right)^2 < 1$$

2장 응력과 변형률 2-47

◆ 피로파손(fatigue failure)

▪ 실제 부품의 피로한도

노치효과

반복하중인 경우 노치부문에 금(crack)이 발생하여 피로한도가 작아지는 현상

노치계수(β_k)

$$\beta_k = \frac{\sigma_{e0}}{\sigma_{ek}}$$

여기서 σ_{e0} 는 노치가 없는 시편의 피로한도
 σ_{ek} 는 노치가 있는 시편의 피로한도
 윗식을 다시 쓰면 노치가 있는 경우 피로한도는 다음과 같이 나타낸다.

$$\sigma_{ek} = \frac{\sigma_{e0}}{\beta_k}$$

2장 응력과 변형률 2-48

◆ 피로파손(fatigue failure)

• 실제 부품의 피로한도

치수효과
 치수가 다르고 형상이 같은 여러 물체의 경우
 가장 큰 치수의 물체가 더 적은 피로한도 값을 갖는 현상

표면효과
 표면조도, 부식, 표면경화 등에 의한
 피로한도의 변화 현상

2장 응력과 변형률 2-49

◆ 피로파손(fatigue failure)

• 실제 부품의 피로한도

압입효과
 부품을 조립하는 과정에서 발생하는 압입과 열박음으로
 응력이 발생하여 피로한도가 저하되는 현상

$$\sigma_{pk} = \frac{k_1 k_2}{\beta_k} \sigma_{p,0}$$

여기서 β_k 는 노치계수
 k_1 는 치수 효과에 의한 피로한도 저하율
 k_2 는 다듬질 효과에 의한 피로한도 저하율
 $\sigma_{p,0}$ 는 원래 피로한도(양질의 경우)
 σ_{pk} 는 수정된 피로한도(양질의 경우)

2장 응력과 변형률 2-50

◆ 피로파손(fatigue failure)

• 수정된 피로한도로 보정된 조더버그 내구선도

$$\frac{\sigma_a}{\frac{k_1 k_2}{\beta_k} \sigma_{p,0}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_Y} \leq 1$$

(a) 수정 전 조더버그선
 (b) 수정 후 조더버그선

2장 응력과 변형률 2-51

3장 기계재료의 선정

3장 기계재료의 선정 3-1

◆ 기계재료

→ 금속 및 비금속 재료를 총칭

- ▶ 기계적 성질
 - 강도, 경도, 연성, 전성, 탄성계수, Poisson 비 등
- ▶ 물리적 성질
 - 밀도, 열전도율, 전기전도율, 열팽창계수 등
- ▶ 화학적 성질
 - 부식성, 용해잠열 등

3장 기계재료의 선정 3-2

기계재료 선정시 고려사항

- 물리적 성질 - 밀도, 열전도성, 전기도전율 등
- 사용환경 - 내식성, 고온, 저온, 크리프 등
- 기계적 성질 - 내충격성, 내피로성, 내마모성 등
- 가공성 - 주조, 용접, 절삭 등
- 기타 - 경제성, 상품성 등

3장 기계재료의 선정 3-3

◆ 재료 호칭법

재료의 성분, 제품규격, 강도, 경도, 제조방법을 표시

예)

```

    graph TD
      A[SM 20C] --> B[강]
      A --> C[기계구조용]
      A --> D[탄소함유량 0.2%]
    
```

3장 기계재료의 선정 3-4

<재료를 표시하는 기호>

- 첫 번째 문자 - 재질의 성분을 표시하는 기호
원소기호 또는 영어 머리문자로 표기
- 두 번째 문자 - 제품의 규격을 표시하는 기호
제품의 형상과 용도를 표시
- 세 번째 문자 - 재료의 최저인장강도, 재질의 종류기호
- 네 번째 문자 - 제조법을 표시
- 다섯 번째 문자 - 제품의 형상기호를 표시

3장 기계재료의 선정 3-5

(1) 재질의 성분을 나타내는 기호

기 호	재 질	기 호	재 질
AlA	알루미늄 합금	NiS	양은
HBs	고강도 황동	GC	회주철
HMn	고강도 망간	SC	탄소주강
MgA	마그네슘 합금	SF	단조강
MS	연강	SNC	니켈 크롬강

3장 기계재료의 선정 3-6

(2) 제품의 규격을 나타내는 기호

기 호	규격명, 제품명	기 호	규격명, 제품명
Au	자동차용	KH	고속도 공구강
BC	형동주물	MC	가단 주철품
DC	다이캐스팅	SW	강선
F	단조품, 박판형	W	선(wire)
HR	열간압연	WR	선재

3장 기계재료의 선정

3-7

(3) 재료의 최저 인장강도 또는 재료의 종류기호

- 인장강도의 단위 변경 → (N/mm²)사용
- 숫자 뒤의 기호의 의미
 - A : 연질, B : 반경질, C : 경질
- 괄호 안에는 단위길이당 무게 기입

3장 기계재료의 선정

3-8

< 제품의 강도 또는 재료의 종류를 나타내는 기호 >

기호	의미	예	기호	의미	예
A	A종	SW-A	5A	5종 A	SPS 5A
B	B종	SW-B	150	최저인장강도 150(N/mm ²)	GC 150
1	1종	SHP 1	330	최저인장강도 330 (N/mm ²)	SS 330
2	2종	SHP2	12C	탄소함유량 (0.10~0.15%)	SM 12C

3장 기계재료의 선정

3-9

(4) 제조법의 표시

기본기호	기본 가공방법	상세기호	상세가공방법
C	주조(casting)	CP	정밀주조
		CD	다이캐스팅
P	소성가공	F	단조
		R	압연
M (기계가공)	C (절삭) G (연삭) SP (특수가공)	L	선삭

3장 기계재료의 선정

3-10

(5) 제품의 형상기호

P : 강판, ● : 둥근강, ◎ : 파이프
□ : 각재, ⊞ : 채널, ⊥ : I형 강

3장 기계재료의 선정

3-11

< 재료기호 표시 예 >

기호	명칭	용도	구기호	참고
SF 340A	탄소강 단강품	S - 강 F - 단조품 340 - 최저인장강도	SF 34	KS D 3710
GC 150	회주철품	GC - 회주철 150 - 최저인장강도	GC 15	KS D 4301

3장 기계재료의 선정

3-12

< 주요 철강재료의 기호 >

분류	KS 번호	규격명	기호
일반용	D 3501	열간 압연 강판 및 강대	SHP
강관	D 3507	배관용 탄소강	SPP
합금강	D 3708	니켈크롬강재	SNC
압력용기용	D 3521	압력용기용 강판	SPPV
특수용도강	D 3701	스프링 강재	SPS
공구강	D 3751	탄소공구강재	STC
탄소강/주철	D 3710	탄소강 단강품	SF

4장 공차와 끼워맞춤

4장 공차와 끼워맞춤 4-1

◆ 공업규격(engineering standards)

표4.1 각국의 공업규격

규격 기호	규격명칭	제정 년도
ISO	국제 표준화 기구(International Organization for Standardization)	1948
KS	한국 공업규격(Korean Industrial Standards)	1962
BS	영국 공업규격(British Standards)	1901
DIN	독일 공업규격(Deutsches Institute für Normung)	1917
ANSI	미국 공업규격(American National Standards Institute)	1918
SNV	스위스 공업규격(Schweizerish Normen-Vereinigung)	1918
NF	프랑스 공업규격(Norme Francaise)	1918
CSA	캐나다 공업규격(Canadian Standards Association)	1918
JIS	일본 공업규격(Japanese Industrial Standards)	1921

주 미국규격은 1969년에 ASA(American Standard Association)에서 USAS(United States of America Standards Institute)로 변경되었다가 1993년 현재의 ANSI로 변경됨.

4장 공차와 끼워맞춤 4-2

◆ 공업규격(engineering standards)

표4.2 KS의 부분별 기호

분류기호	부 문	분류기호	부 문
KS A	기본(종직)	KS K	식유
B	기계	L	요철
C	전기	M	회박
D	금속	P	회로
E	광산	R	수송기계
F	도목, 건축	V	조선
G	일용품	W	항공
H	식료품	X	정보통신

표4.3 기계부분(KS B)의 분류번호

분류번호	기계부분의 상세분류
KS B 0001 - B 0905	기계기본
KS B 1001 - B 2809	기계요소
KS B 3001 - B 4000	기계장구
KS B 4001 - B 4600	공작기계
KS B 5001 - B 5601	특정제철용 기계기구, 플리기계
KS B 6001 - B 6601	일반기계
KS B 7001 - B 7999	산업기계
KS B 7101 - B 7500	농업기계
KS B 8000 - B 8994	열아동 및 가스기기

4장 공차와 끼워맞춤 4-3

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

- 치수용어
- 실제 치수(actual size)
- 허용 한계치수(limit of size)
- 최대 허용치수(maximum limit of size)
- 최소 허용치수(minimum limit of size)
- 치수공차(tolerance)
- 기준 치수(basic size)
- 위 치수 허용차(upper limit deviation)
- 아래 치수 허용차(lower limit deviation)

4장 공차와 끼워맞춤 4-4

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

4장 공차와 끼워맞춤 4-5

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

- IT(ISO tolerance)기본 공차의 정밀도 등급

01급, 0급, 1급, 2급, ..., 18급
공차 작아짐 ← → 공차 커짐

정밀도	치수의 종류	속	구멍
정밀	계이지수 제차공차 (고 정밀도 공차)	IT 1 ~ IT 4	IT 1 ~ IT 5
일반	일반 끼워맞춤 부분 공차	IT 5 ~ IT 9	IT 6 ~ IT 10
거친	거친 부분(끼워맞춤이 없는 부분)	IT 10 ~ IT 18	IT 11 ~ IT 18

위 구멍의 공차등급과 속의 공차등급보다 큰 이유는 구멍의 내면가공 및 측정의 속의 치면보다 어렵기 때문이다.

4장 공차와 끼워맞춤 4-6

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

■ 공차역(tolerance zone)

영문자로 제품의 공차위치를 표기한다.
구멍과 같이 안치수를 나타내는 경우에는 대문자를,
축과 같이 바깥치수를 나타내는 경우에는 소문자를 사용한다.

구멍 기호	A B C D D E F F G G H J J S K M N P R S T U V X Y Z Z A Z B Z C
	(+ 치수허용차) 여기서 최소 허용치수가 (- 치수허용차) 구멍의 크기가 커질 기준치수와 일치한다. 구멍의 크기가 작아질
축 기호	a b c d d e f f g g h j j s k m n p r s t u v x y z z a z b z c
	(- 치수허용차) 여기서 최대 허용치수가 (+ 치수허용차) 축의 크기가 작아질 기준치수와 일치한다. 축의 크기가 커질

4장 공차와 끼워맞춤 4-7

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

구멍

기공선

기준치수

구멍의 공차역

4장 공차와 끼워맞춤 4-8

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

축

기공선

기준치수

축의 공차역

4장 공차와 끼워맞춤 4-9

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

■ 공차표기법(치수기입법)

• 일반공차에 의한 표기법
(일반공차에 의한 공차표기의 예)
표기요령: 기준치수 ^{허용차}/_{허용차}
표기예: $\phi 50_{-0.025}^{+0.025}$

• 기호에 의한 표기법
(기호에 의한 공차표기의 예)
표기요령: 기준치수 공차영역 정밀도
표기예: 25h6, 36s7, 13H9, 65G7

4장 공차와 끼워맞춤 4-10

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

■ 공차표기법(치수기입법)

• 한계치수공차에 의한 표기법
(한계치수에 의한 공차표기의 예)
표기요령: (최대허용치수)
 (최소허용치수)
표기예: ($\phi 50_{-0.025}^{+0.025}$)
 $\phi 50$

4장 공차와 끼워맞춤 4-11

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

■ 끼워맞춤(fits)

구멍

축

홀세 (a)

축세 (b)

틈새와 쪼매

4장 공차와 끼워맞춤 4-12

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

▪ 끼워맞춤(fits)

- 헐거운 끼워맞춤(clearance fit)
 - 항상 틈새가 있는 끼워맞춤
 - 최소 틈새 = 구멍의 최소 치수 - 축의 최대 치수
 - 최대 틈새 = 구멍의 최대 치수 - 축의 최소 치수
- 억지 끼워맞춤(interference fit)
 - 항상 침새가 있는 끼워맞춤
 - 최대 침새 = 축의 최대 치수 - 구멍의 최소 치수
 - 최소 침새 = 축의 최소 치수 - 구멍의 최대 치수

4장 공차와 끼워맞춤 4-13

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

▪ 끼워맞춤(fits)

- 중간 끼워맞춤(slide fit)
 - 틈새나 침새가 생기는 끼워맞춤

(a) 헐거운 끼워맞춤 (b) 억지 끼워맞춤

끼워맞춤의 종류

4장 공차와 끼워맞춤 4-14

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

▪ 끼워맞춤(fits)

끼워맞춤된 제품의 공차기입법

(끼워맞춤의 표시 예)

$H8/f6$ ($H8-f6$ 또는 $\frac{H8}{f6}$)

4장 공차와 끼워맞춤 4-15

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

▪ 끼워맞춤(fits)

끼워맞춤방식

끼워맞춤을 할 때 어느 한 쪽의 공차역과 정밀도를 정하여 가공한 후 다른 쪽은 원하는 끼워맞춤에 따라 공차역과 정밀도를 정한다.

구멍기준 끼워맞춤 축기준 끼워맞춤

4장 공차와 끼워맞춤 4-16

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

사용하는 구멍기준 끼워맞춤(KS B 0401)

기준구멍	축의 공차역												
	헐거운 끼워맞춤			중간끼워맞춤			억지끼워맞춤						
H5				g4	h4	js4	k4	m4					
H6				f6	g6	h6	js6	k6	m6	n6	p6		
H7				f7	g7	h7	js7	k7	m7	n7	p7	s7	x7
H8				f8	g8	h8							
H9				f9	g9	h9							
H10				f10	g10	h10							

주: 끼워맞춤 구분은 치수구분에 따라 예외가 생긴다.

4장 공차와 끼워맞춤 4-17

◆ 치수공차(tolerances)와 끼워맞춤(fits) (KS B 0401)

사용하는 축기준 끼워맞춤(KS B 0401)

기준축	구멍의 공차역															
	헐거운 끼워맞춤			중간끼워맞춤			억지끼워맞춤									
h4				H5	JS5	K5	M5									
h5				H6	JS6	K6	M6	N6	P6							
h6				F6	G6	H6	JS6	K6	M6	N6	P6					
h7				F7	G7	H7	JS7	K7	M7	N7	P7	R7	S7	T7	U7	X7
h8				E7	F7	H7										
h9				D8	E8	F8	H8									
h10				D9	E9	F9	H9									
				D8	E8	F8	H8									
				C9	D9	E9	H9									
				B10	C10	D10	H10									

주: 끼워맞춤 구분은 치수구분에 따라 예외가 생긴다.

4장 공차와 끼워맞춤 4-18

◆ 표면 거칠기(surface roughness)

표면거칠기는
가공법과
가공비용 등을 감안하여 설계

4장 공차와 끼워맞춤 4-19