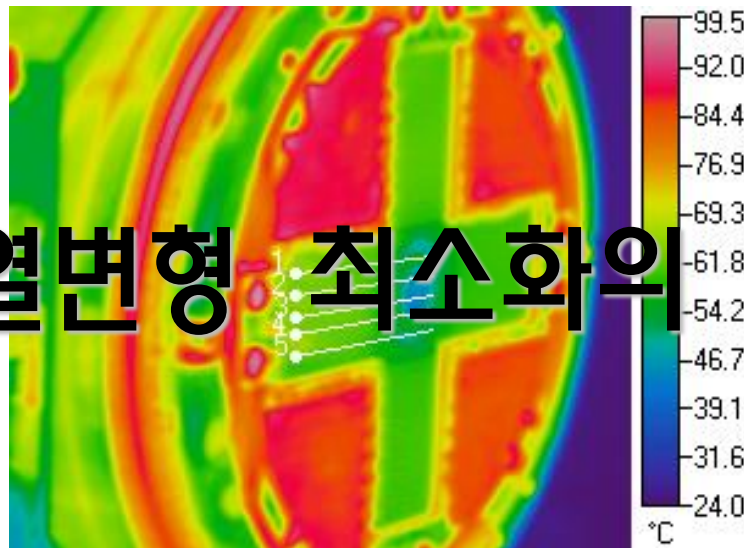


정밀공학 (Precision Engineering)

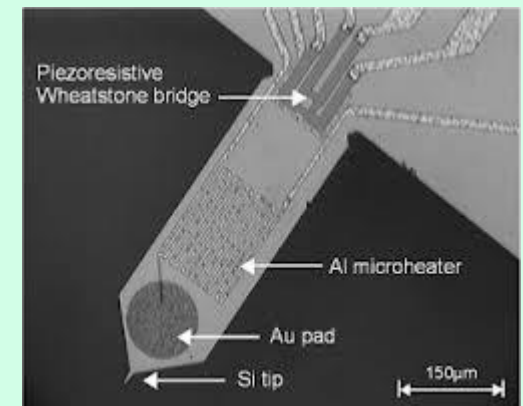
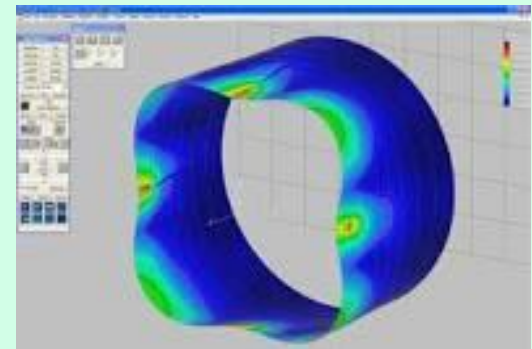
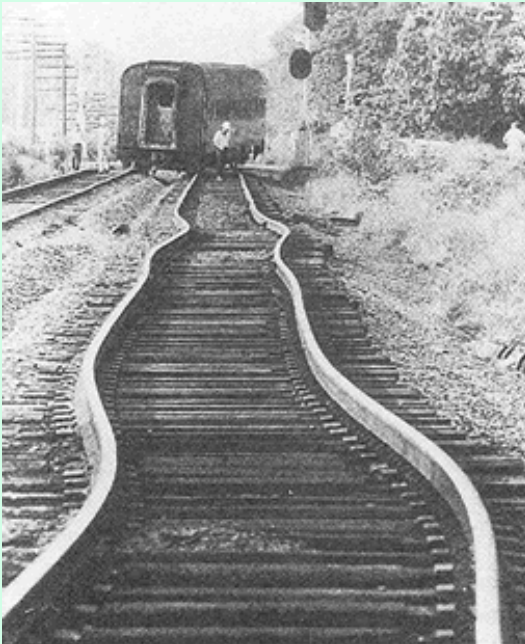
제7장 열변형 최소화와의 원리



제 7 장 수업내용

- 열변형 최소화의 원리(the principle of minimization of heat deformation)
 - 열변형의 정의
 - 열변형 최소화의 원리
 - 열변형 최소화 대책
 - 열적으로 안정한 재료의 선택
 - 열원의 분리
 - 강제 냉각
 - 열 대칭 설계

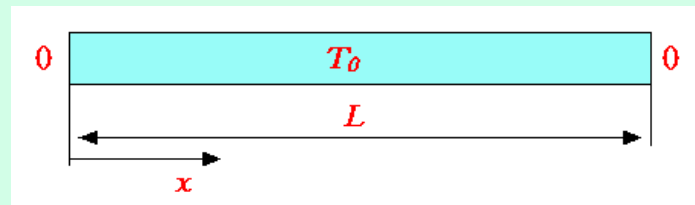
열변형 예



열변형의 정의

□ 선팅창계수와 열전도율

- 초기 온도(T_0)에서 길이가 L 인 사각보
⇒ 양단을 $t = 0$ 에서 0°C 유지
- 시간에 따른 열분포



$$T(t) = T_0 \left(\frac{4}{\pi} \right) \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{1}{n} \right) e^{-\left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \kappa t} \sin\left(\frac{n\pi x}{L} \right)$$

t : 경과시간, κ : 열전도율, L : 재료길이

- 시간에 따른 열변형 ΔL

$$\Delta L(t) = \alpha T_0 L \left[1 - \left(\frac{8}{\pi^2} \right) \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right) e^{-\left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \kappa t} \right] ; a : \text{선팅창률}$$

- ⇒ 안정상태($t \rightarrow \infty$)가 되면 최종적인 열팽창량은 $\alpha \cdot T_0 \cdot L$
- 최종적인 열팽창량은 열팽창계수 α 에만 의존하지만 과도적인 치수 변동은 열전달율 κ 의 영향을 받는다
⇒ $\alpha \cdot \kappa$ 를 열변형을 평가하는 인자로 사용

열변형 최소화의 원리

“고정밀도의 기계를 실현하기 위해서는
열변형을 최소화하지 않으면 안된다.”

- 열적으로 안정된 재료의 선택
- 열원의 분리
- 강제냉각방식
- 열대칭설계

열변형 최소화와 재료

□ 열변형 억제 대책 : “열적으로 안정된 재료의 선택”

주요 구조재료의 열팽창계수와 열전도율

재료	세라믹스 (Al_2O_3)	주철	강	인바 ¹⁾	그라나이트	레진 콘크리트 ²⁾	불팽창유리 ³⁾
열팽창계수 ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	7	12	11	0.6	8.3	12	0.05
열전도율 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	16	53.5	44	10.5	3.8	0.47	1.64

1) Invar, 불변강, 코닝사개발, Steel + Ni

2) Resin-Concrete, 합성수지와 콘크리트의 결합체,

3) Zerodur, Schott사개발, 항절력이 낮고 충격에 약하다.

- 세라믹스 : 변형면에서는 좋은 구조재

α · κ 의 곱이 큰 단점.

- 레진-콘크리트 : α 는 크지만 κ 가 작아

실제로 열적으로 안정.

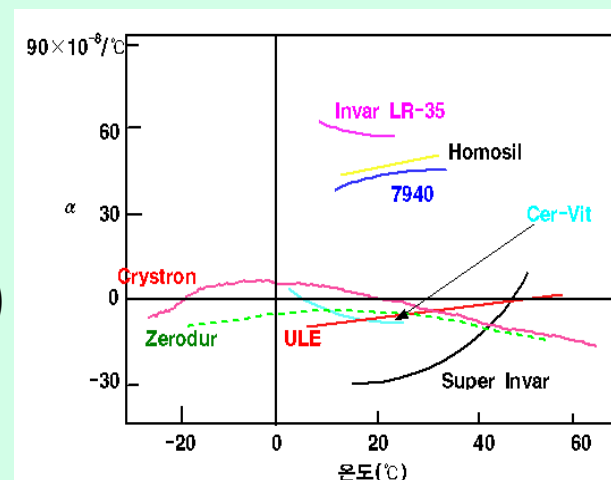
- 제로팽창 결정화유리

Zerodur(Schott), Cer-Vit(Owens-Illinois), Crystron(HOYA)

- ULE(Corning, Ultra-Low Expansion Glass)

- **Fused Silica(용융석영)** : 7940(Corning)

- 저팽창합금 : Invar, Super Invar



열변형 최소화와 열원의 분리/냉각

□ 열변형 억제 대책 : “열원의 분리”

- 열원 : actuator, 베어링, 슬라이드, 절삭점, 동력전달기구 등
- actuator의 분리 : 벨트구동방식, 마크네틱 커플링, 복사열 주의
- 기타 구동요소의 분리 : 현실적으로 어렵다.

□ 열변형 억제 대책 : “강제냉각”

- 기계내부의 발생열을 강제적으로 기계 밖으로 배출하는 방식
- 냉각대상

◎ 구조물 : 유체의 내부순환방식

오일샤워방식 => 사용유체의 온도변화를 $\pm 0.006^{\circ}\text{C}$ 로 제어

◎ 베어링 : 오일정압의 경우 점성으로 인한 열발생

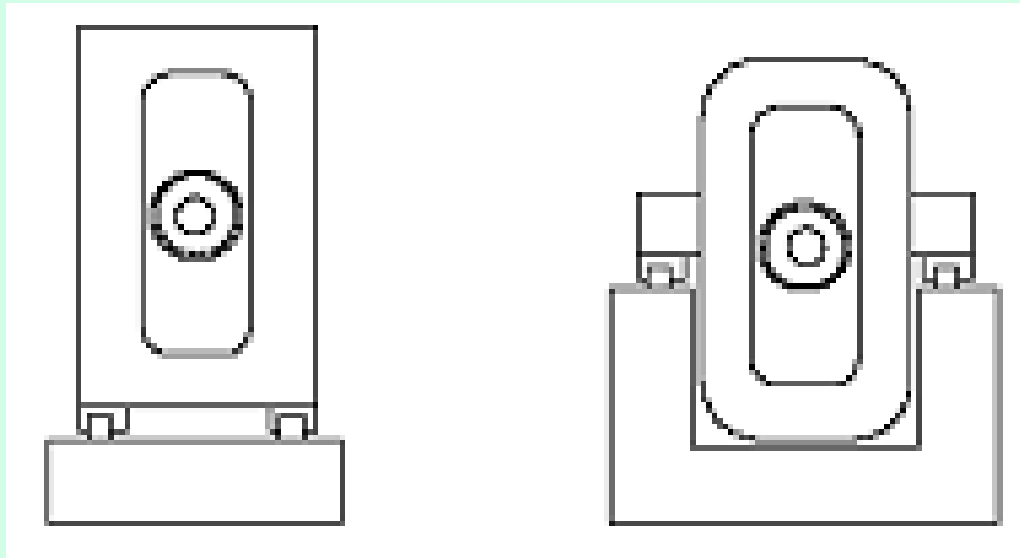
냉각오일 순환 방식

◎ 구동장치 : 오일순환방식

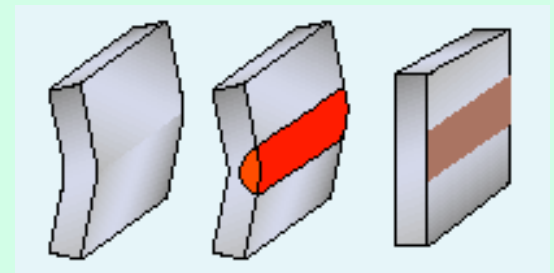
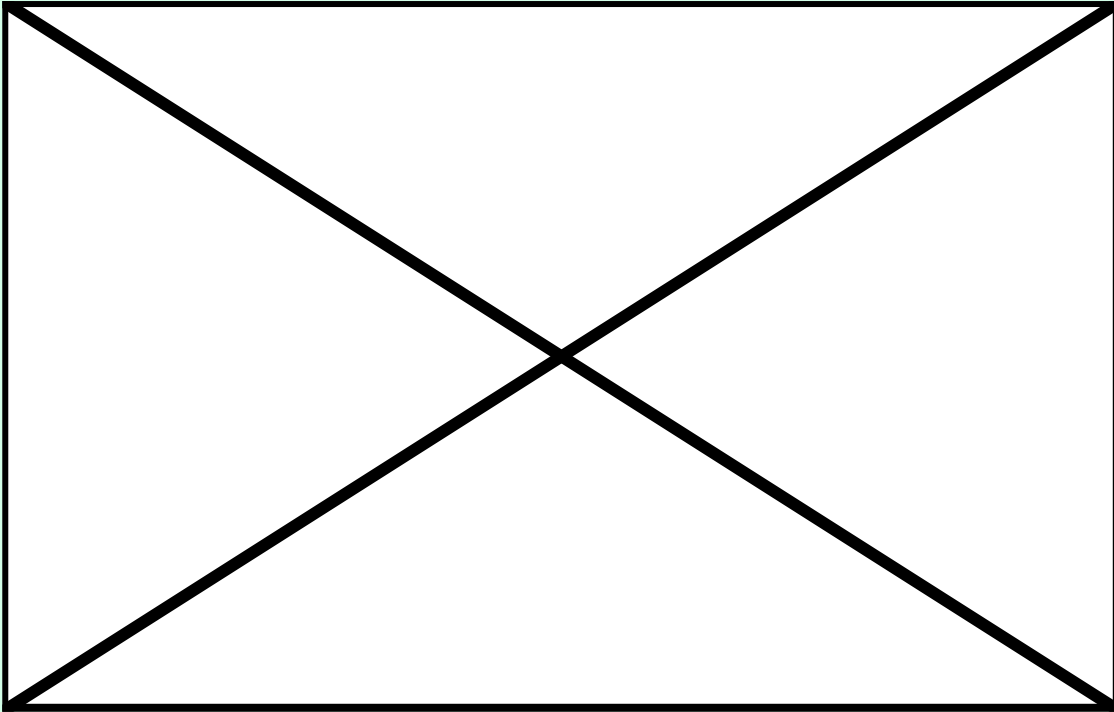
열변형 최소화와 설계

□ 열변형 억제 대책 : 열대칭설계

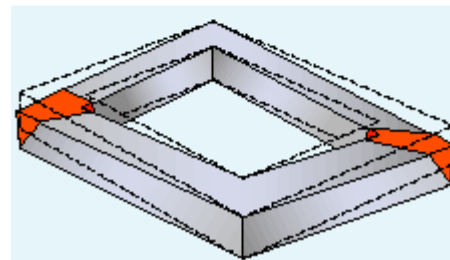
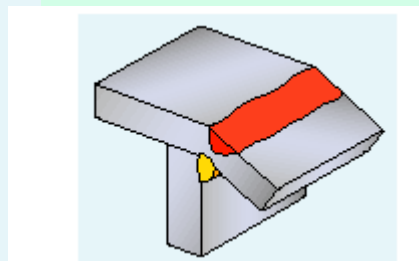
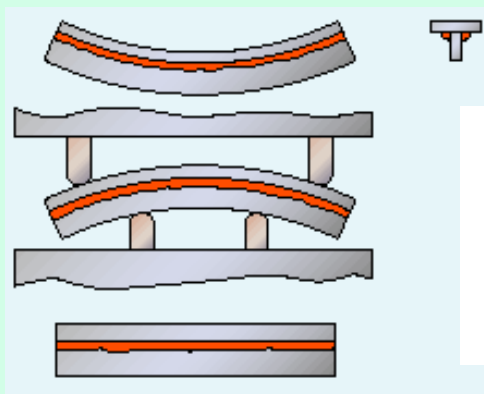
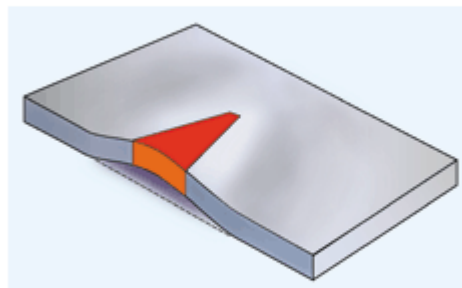
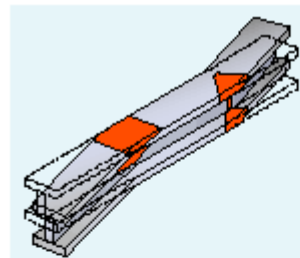
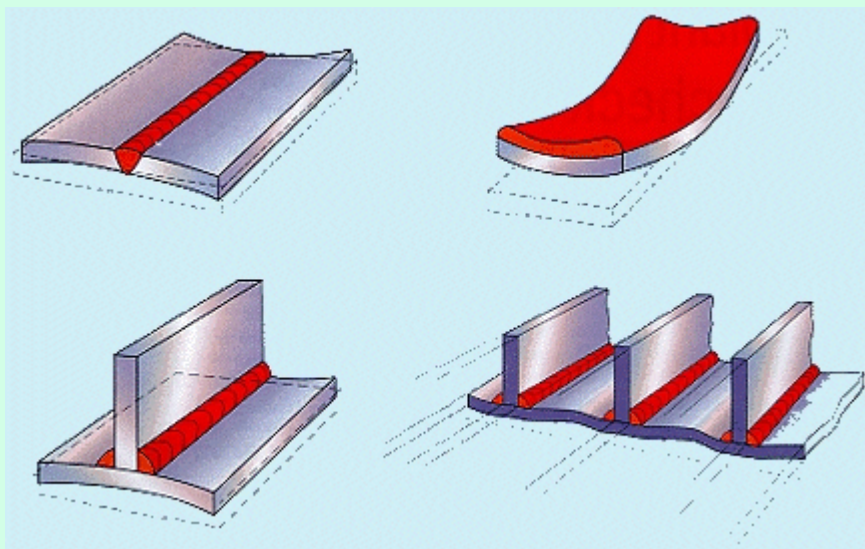
- 열팽창이 가공점에 대칭으로 발생하도록 설계
⇒ 가공포인트는 불변(교재 그림9-8 참조)



Examples



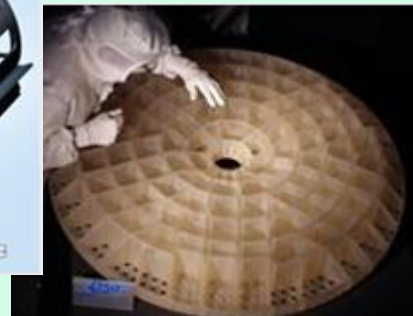
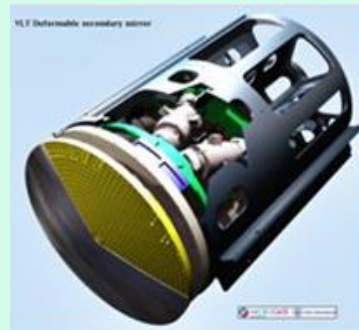
Examples – welding



The end of Ch. 7

제로더(glass ceramic)의 특징

- Density: 2.53g/cm^3 at 25°C (Al:2.7, Fe:7.86)
- Young's Modulus: 90.3Gpa
- Poisson Ratio: 0.24
- Specific heat capacity(25°C): $0.82\text{ J/g}\cdot\text{K}$ (Water: 4.1813, Cu: 0.385)
- $\alpha(20^\circ\text{ to }300^\circ\text{C}) : 0.05\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; $\kappa : 1.64\text{W/m}\cdot\text{K}$
- Maximum Temperature: 600°C
- Application
 - ✓ Optics: telescopes, optical cavities etc require a substrate material with a near-zero coefficient of thermal expansion/excellent thermal shock resistance.
 - ✓ Microlithography: Zerodur is used as a movable mechanical part in wafer stepper and scanner machines
 - ✓ Measurement Technology: The extremely low thermal expansion and proven long-term dimensional stability



인바(invar)의 특징

- Invar, also known generically 64FeNi, is a **nickel steel alloy**

- α (20~100°C) : $1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

- Some formulations display negative thermal expansion

- Application

- ✓ precision instruments such as clocks,
- ✓ physics laboratory devices
- ✓ Seismic creep gauges, shadow-mask frames
- ✓ valves in motors, and antimagnetic watches,

- It has a propensity to **creep**.

- Variations of the original Invar material

- **Inovco**: Fe-33Ni-4.5Co; α (20–100 °C) of $0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
- **FeNi42**: $5.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (matches that of silicon and therefore is widely used as lead frame material for electronic components, integrated circuits)
- **FeNiCo alloys (Kovar)**: have the same expansion behavior as glass, and because of that are used for optical parts in a wide range of temperatures and applications, such as satellites.

