



제 2 장

교정재료의 기계적 특성 시험

서론

이 장에서는 교정재료의 굽힘 변형과 비틀림 변형에 대한 개념과, 교정용 선재의 기계적 특성 평가에 사용되는 수식과 시험 방법에 관하여 설명한다. 특히 굴곡강도 및 결합강도 시험과 파괴 인성의 측정을 주로 설명하고, 간접 압축 시험과 피로의 측정도 다루기로 한다.

변형

굽힘 변형

교정용 선재를 모사한 균일한 사각 막대에 탄성 굽힘 변형을 가하였을 때를 그림 2-1에 나타내었다. 영구 변형이 일어나지 않는 탄성 한계 내의 굽힘 모멘트를 가할 때이다. 기계적으로 정적 평형을 이루기 위해서는 사각 막대의 끝에서 크기가 같고 방향이 반대인 굽힘 모멘트가 작용해야 한다. 그림 2-1에서 보면 인장 변형된 부분은 길이가 늘어나고, 압축 변형된 부분은 길이가 줄어든다. 막대가 대칭이면 그림에서 점선으로 표시한 중심면에서는 아무런 변형도 일어나지 않는다.

막대의 중심면으로부터 거리에 따른 응력의 변화를 그림 2-2에 나타내었다. 중심면에서는 응력이 0이고, 양 표면에서 최대 압축 응력 및 최대 인장 응력을 나타낸다. 응력(σ)을 굽힘 모멘트(M)와 중심축부터의 거리(y)의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

여기서, I : 관성 모멘트

관성 모멘트는 굽힘에 대한 특정 단면의 저항에 해당하는 기하학적 양이다.

$$I = \sum_i y_i^2 (\Delta A_i)$$

여기서, y_i : 중심축에서 특정 성분의 면적(ΔA_i)까지의 거리

위의 식으로부터 중심축에서 가장 멀리 떨어져 있는 성분의 면적이 관성 모멘트에 가장 큰 영향을 미친다는 것

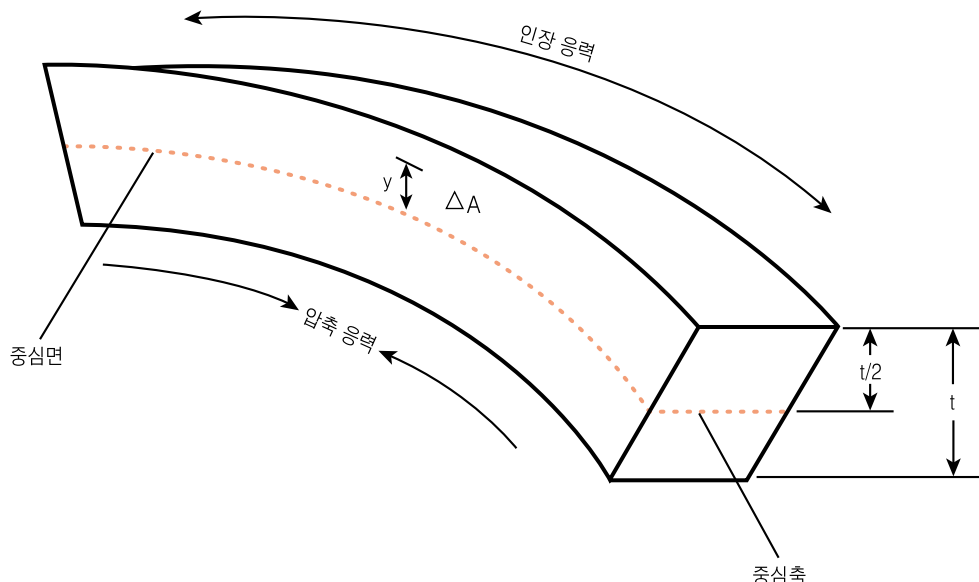


그림 2-1. 사각 막대가 탄성 굽힘 하중을 받을 때의 응력.

을 알 수 있다. y 의 최대값은 막대 표면까지 중심축에서 가장 먼 거리(c)에 해당하기 때문에 굽힘 모멘트에 의해 생긴 최대 응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{\max} = \frac{Mc}{I}$$

부분 계수(Z)는 다음과 같이 정의된다.

$$Z = \frac{I}{c}$$

따라서 막대의 최대 응력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{Z}$$

이 식은 단면적이 변하는 교정용 선재의 최대 응력을 비교할 때 편리하게 사용할 수 있다.

특성 성분의 면적이 무한대로 작아질 때까지 관성 모멘트를 적분하면 다음과 같다.

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

여기서, d : 원형 막대의 직경

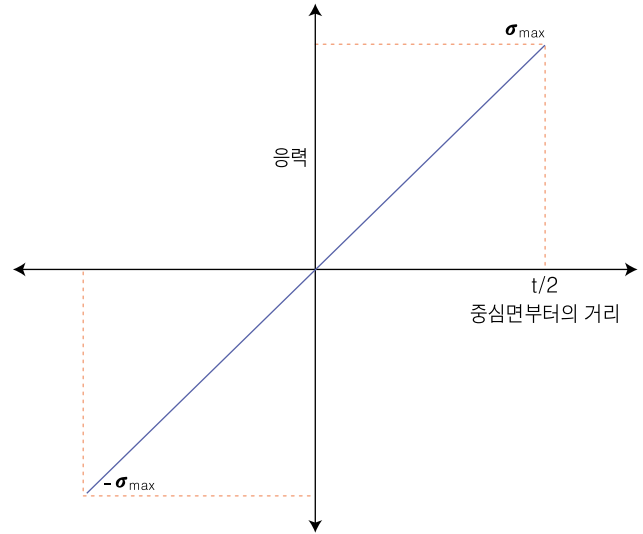


그림 2-2. 그림 2-1의 사각 막대 내의 거리에 따른 응력 변화.

폭이 w , 두께가 t 인 사각 막대의 관성 모멘트는 다음과 같다.

$$I = \frac{wt^3}{12}$$

따라서 관성 모멘트는 직경의 4승, 두께의 3승에 비례하기 때문에 교정용 선재의 크기가 변하면 굽힘 저항성은 크게 달라지게 된다. 교정용 선재의 크기에 따른 관성 모멘트를 표 2-1에 나타내었다. 원형 선재에서 크기에 따라 관성 모멘트가 큰 차이를 보이고 있으며, 단면적이 동일할 때에는 원형 선재보다 사각 선재의 관성 모멘트가 큰 것을 알 수 있다.

표 2-1. 교정용 선재의 관성 모멘트

치수(in)	치수(mm)	관성 모멘트(10^{-4} mm^4)
0.012 ^a	0.305	4.25
0.016 ^a	0.406	13.3
0.020 ^a	0.508	32.7
0.040 ^a	1.016	523
0.016×0.016 ^b	0.406×0.406	22.6
0.018×0.025 ^b	0.457×0.635	50.5 ^c
		97.5 ^d

^a 원형 선재의 직경, ^b 사각 선재의 단면적, ^c 굴곡면, ^d 굴곡 모서리

비틀림 변형

반경 c 인 원형 막대에 비틀림 하중을 가했을 때의 거리에 따른 전단 응력 분포를 그림 2-3에 나타내었다. 그림 2-2과 마찬가지로 중심면에서 응력이 0이고 거리에 따라 응력이 직선적으로 증가한다. 막대축의 수직면은 비틀림을 가할 때도 변형하지 않는다고 가정하면, 막대에 생긴 비틀림과 외부 비틀림은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\tau_{\max} = \frac{Tc}{J}$$

여기서 J 는 극성 관성 모멘트이며, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J = \sum_i \rho_i^2 (\Delta A_i)$$

여기서, ρ_i : 중심축에서 특정 성분의 면적 (ΔA_i)까지의 반경

특정 성분의 면적이 무한대로 작아지면 원형 막대의 극성 관성 모멘트는 다음과 같이 된다.

$$J = \frac{\pi c^4}{2} = \frac{\pi d^4}{32}$$

따라서 원형 막대의 비틀림 하중에 의한 극성 관성 모

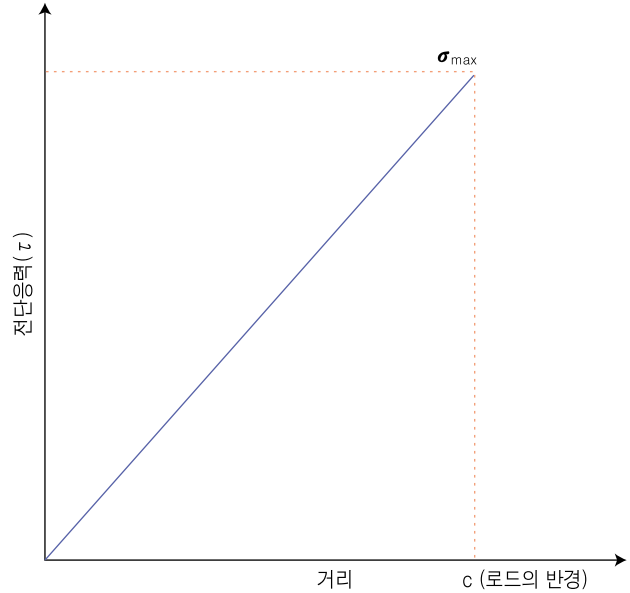


그림 2-3. 원형 선재가 비틀림 하중을 받을 때의 탄성 응력.

멘트는 굽힘 하중에 의한 관성 모멘트의 2배임을 알 수 있다. 그러므로 표 2-1에 나타낸 교정용 원형 선재의 관성 모멘트에 2배를 하면 비틀림 하중에 의한 극성 관성 모멘트가 된다.

사각 막대에 비틀림 하중을 가했을 때는 그림 2-4와 같이 막대축의 수직면이 변형되기 때문에 매우 복잡해진다. 비틀린 사각 막대의 전단 응력 분포를 그림 2-5에 나타내

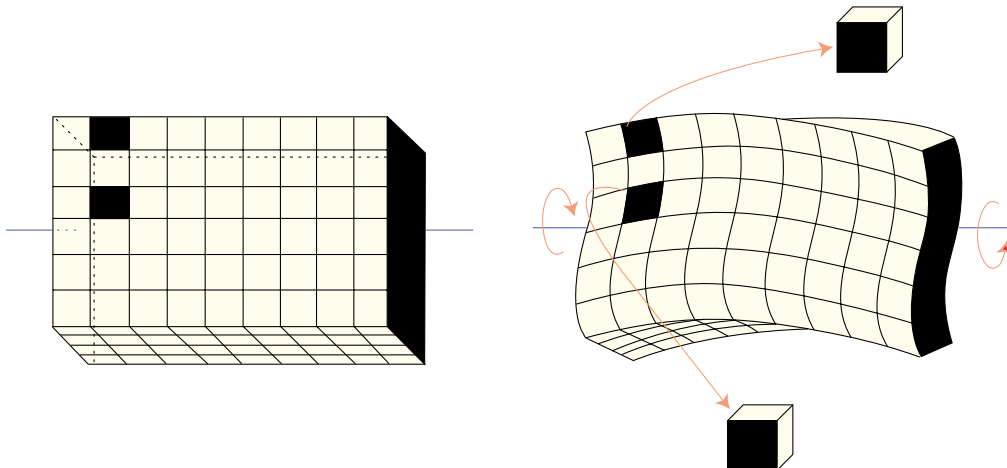


그림 2-4. 사각 선재가 비틀림 하중을 받을 때의 탄성 응력.

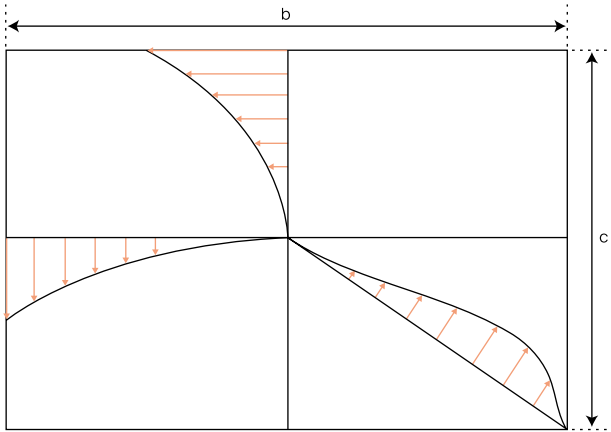


그림 2-5. 사각 선재가 비틀림 하중을 받을 때의 전단 응력 분포.

었다. 이 경우에는 모서리에서 전단 응력이 0이 되고, 장축의 가운데서 최대값을 나타낸다.

비틀림 T 를 가했을 때 사각 막대에 생긴 최대 전단 응력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_{\max} = \frac{T}{\alpha bc^2}$$

여기서, b : 장축의 길이

c : 단축의 길이

α : b/c 비에 따른 변수

b/c 비에 따른 대표적인 α 값을 표 2-2에 나타내었다.

표 2-2. b/c 비에 따른 α 값

α	b/c
0.208	1.0
0.231	1.5
0.246	2.0

기계적 시험 방법

만능 시험기

- 하중 인가 방법: 인장, 압축, 굽힘, 비틀림 시험 등

모두 가능

- 분류 - 기계식: crosshead에 달린 나사축으로 시편에 하중을 전달하는 방식
- 유압식: 유압 펌프의 압력으로 crosshead를 이동시키는 방식
- ※ 하중을 반복적으로 가하는 피로 시험은 유압식으로만 가능

Crosshead

- 이동 속도: mm/sec의 단위로 표시
- 변형률: (mm/mm)/sec 또는 sec⁻¹의 단위로 표시

표 2-3. 일반적인 crosshead의 이동 속도 및 상응하는 변형률

Crosshead의 이동 속도	변형률
0.1~1 mm/min	10 ⁻⁵ ~10 ⁻¹ /sec

일반적으로 금속과 세라믹의 기계적 성질은 crosshead의 이동 속도, 즉 하중 속도에 큰 영향을 받지 않지만, 고분자 재료는 하중 속도에 따라 크게 변할 수 있다. 또한 고분자 재료의 기계적 성질은 온도에 따라 크게 변하기 때문에 상온에서 측정된 결과로 37°C의 임상 결과를 예측하기 어렵다. 따라서 고분자 재료의 기계적 특성을 측정할 때에는 시편을 챔버에 넣고, 챔버를 항온조에 연결하여 온도를 37°C로 유지하는 것이 바람직하다.

굽힘 시험

교정용 선재의 기계적 특성은 임상 조건과 유사한 굽힘 시험이 가장 널리 사용된다. 굽힘 시험에는 그림 2-6에 나타낸 것과 같이 3 가지 방법이 있다.

- 3점 굽힘 시험
- 4점 굽힘 시험
- 2축 굽힘 시험

3점 굽힘 시험은 가장 간단히 측정할 수 있는 방법이지만 그림 2-7에 나타낸 것과 같이 시편에 가해지는 굽힘 모

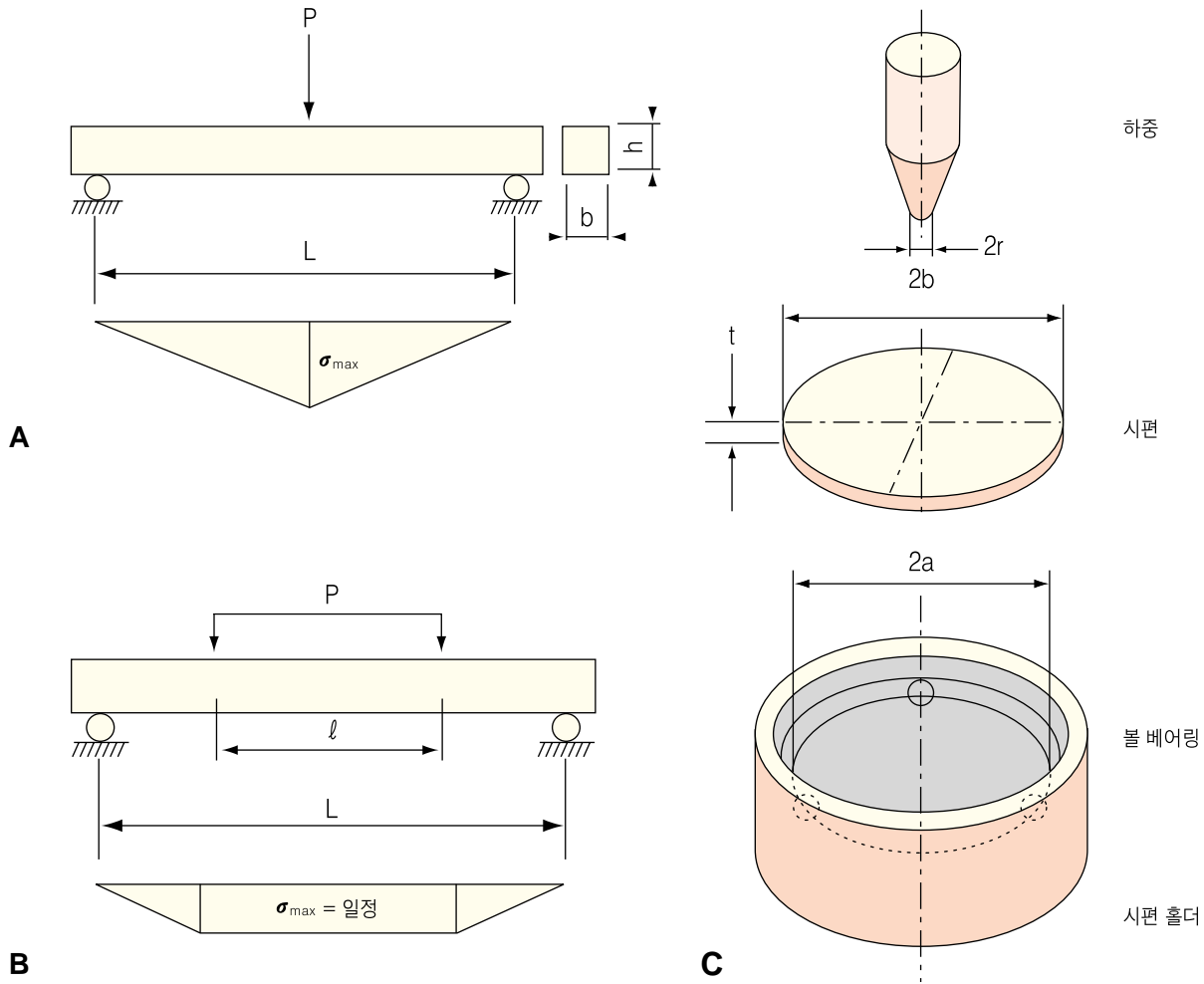


그림 2-6. 교정용 선재의 굽힘 시험 방법. A, 3점 굽힘 시험. B, 4점 굽힘 시험. C, 2축 굽힘 시험.

멘트가 하중을 가하는 부분에서 최대이고, 양쪽의 지지대에서는 굽힘 모멘트가 0이 되는 형태의 매우 불균일하다는 단점이 있다. 반면 4점 굽힘 시험은 양쪽 지지대 사이에서 굽힘 모멘트가 일정하여 시편의 가장 취약한 부분에서 파절된다는 것이 장점이다.

두께가 얇은 세라믹 재료의 굽힘 강도 측정에는 2축 굽힘 시험이 사용된다. 일반적으로 원판 형태의 시편을 그림 2-6과 같이 3 지점에서 지지하고 중앙부에서 하중을 가하는 ball-on-three-ball 법이 사용된다. 이 방법은 중앙의 하중점에서 최대 인장 응력이 발생하기 때문에 부적절한 선단의 파절의 적고, 약간 굽은 시편도 쉽게 측정할 수 있다는 장점이 있어서 최근 치과재료의 굽힘 시험에 많이

이용되고 있다.

교정재료는 시험 방법에 따라 영구 변형이 시작되는 점도 달라지게 된다. 그림 2-8에 인장 시험과 굽힘 시험을 비교하여 나타내었다. 굽힘 시험시의 기울기가 인장 시험보다 더 작은 것을 볼 수 있으며, 따라서 굽힘 변형을 가할 때에 변형이 비교적 서서히 발생된다는 것을 알 수 있다.

결합 강도

교정재료 가운데 가장 활발하게 연구되는 분야가 브라켓과 범랑질 간의 접착 강도이다. 그림 2-9에 발거한 치아

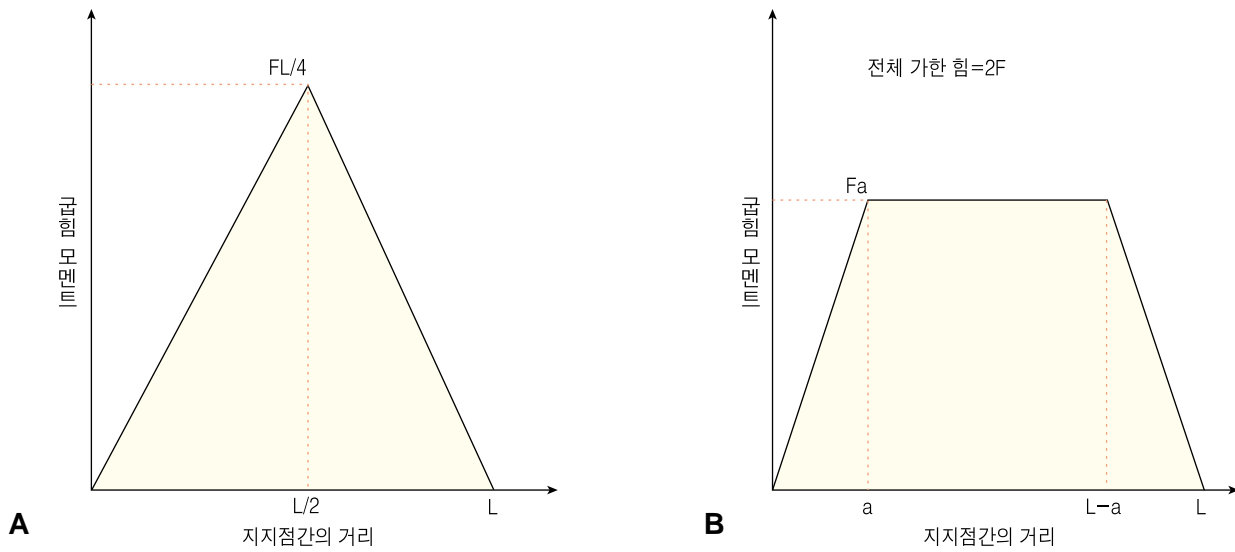


그림 2-7. 굽힘 시험시의 굽힘 모멘트의 분포. A, 3점 굽힘. B, 4점 굽힘.

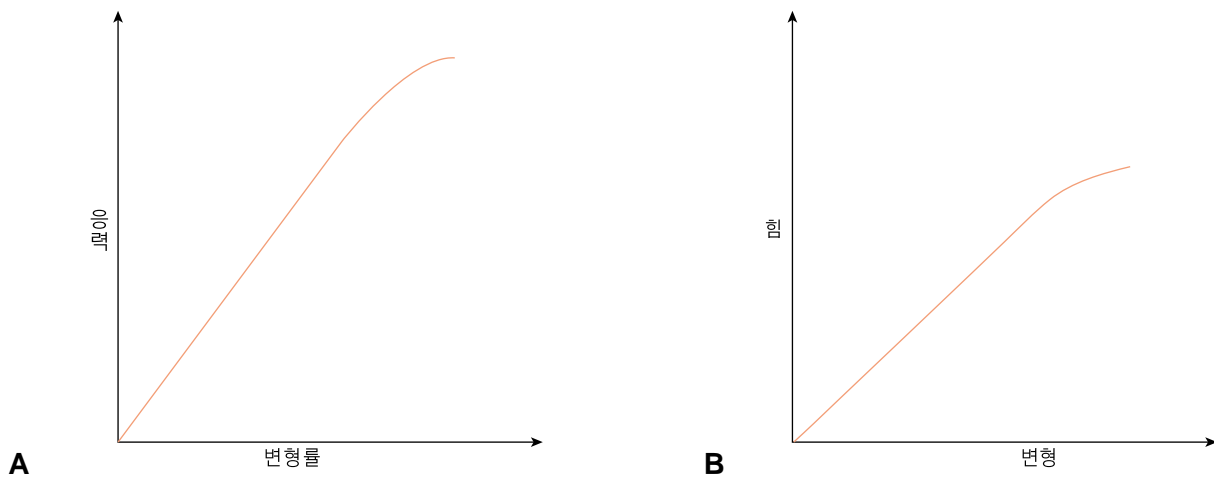


그림 2-8. A, 인장 시험. B, 굽힘 시험의 분포.

의 법랑질 표면에 결합된 브라켓의 결합 강도를 측정하는 방법을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 인장, 전단, 박리 또는 비틀림 등의 다양한 방법으로 하중을 가하여 결합 강도를 측정할 수 있다.

현재까지 교정용 접착제의 결합 강도 측정 방법은 확립되지 않았으며, 일반적으로 다음과 같은 인자를 고려해야 한다.

- 하중 인가 방법
- 시험기의 crosshead 이동 속도
- 브라켓의 형태
- 자료의 통계 분석

특히 결합 강도의 측정과 실제 임상에서의 차이는 crosshead의 이동 속도이다. 일반적으로 측정시에는 표 2-3에 나타난 것과 같이 crosshead의 이동 속도가 느리기

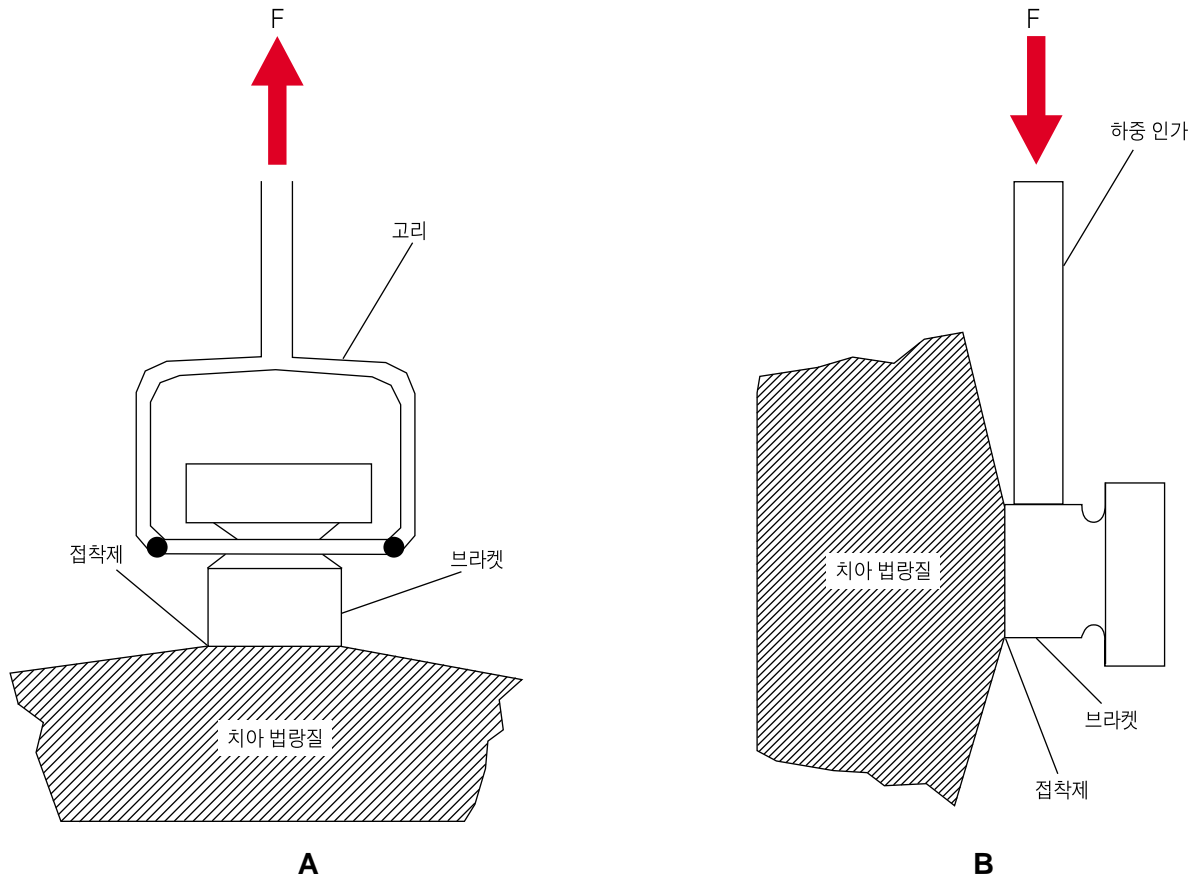


그림 2-9. 브라켓과 법랑질의 결합 강도 측정 방법. A, 인장력에 의한 결합강도 측정. B, 전단력에 의한 결합강도 측정.

때문에, 임상에서 발생하는 빠른 하중 속도에 의한 결합 파절을 직접적으로 예상하는 데에는 한계가 있다.

표 2-4에 화학 중합형 교정용 접착제를 사용하여 상악 전치 법랑질 표면에 부착한 3종의 세라믹 브라켓에 대한 전단 결합 강도를 나타내었다. 탈착력과 평균 결합 강도의 통계적 유의차가 상이하게 나타나고 있으며, 이는 다음과 같은 원인에 근거한다.

- 접착제와 접촉하고 있는 브라켓 베이스 표면의 정확한 사각형 여부
- 브라켓과 접착제의 복잡한 계면 특성과 형태 차이로 인한 응력 집중의 차
- 브라켓 베이스 표면의 거칠기 차이에 의한 접착제의 두께 차이

- 접착제의 유동성 차이에 의한 미세 기공의 형성 여부

표 2-5는 통계 방법에 따라 결과가 달라지는 것을 보여 주고 있다. 표 2-4에 나타난 3종의 세라믹 브라켓의 평균 탈착력을 비교하기 위해 일원분산분석(ANOVA) 후에 Tukey 검정법 대신 Duncan 검정법을 사용했을 때의 결과를 비교하여 나타내었다.

파괴 인성

파괴 인성은 균열 전파에 대해 저항하는 힘 또는 에너지이다. 치과 재료의 파괴 인성 측정에는 압침 방법, 낫치 막대 방법, 이중 비틀림 방법, 짧은 로드 방법 및 이중 외 팔보 방법 등의 다양한 시험 방법이 있다.

표 2-4. 세라믹 브라켓의 전단 결합 강도(n=10)

측정 항목	브라켓 1	브라켓 2	브라켓 3
탈착력(N)	17.9±0.9 ^a	15.2±1.0 ^b	14.1±0.6 ^b
베이스의 표면적(mm ²)	1.6	1.4	1.8
평균 결합 강도(MPa)	11.4 ^a	10.9 ^a	7.8 ^b

^a 임의의 힘을 이용한 가설 모델. 브라켓 베이스의 넓이는 대표적인 전치 세라믹 브라켓의 크기를 이용하여 계산하였다. 이때 브라켓이 단순 직육면체라고 가정하였다.

^b 같은 알파벳은 Tukey 다중 검정법의 $\alpha=0.05$ 수준에서 유의차가 없음을 표시한다.

표 2-5. 두 가지 검정법에 의한 표 2-4에 나타낸 탈착력의 유의차의 비교

브라켓 형태	평균±표준편차(N)	Tukey 검정	Duncan 검정
1	17.9±0.9	a	a
2	15.2±1.0	b	b
3	14.1±0.6	b	c

^{a,b,c} 같은 알파벳은 $\alpha=0.05$ 수준에서 유의차가 없음을 표시한다.

파괴 인성 시험에 사용되는 3가지 균열 개시 방법을 그림 2-10에 나타내었다.

- 형태 I: 균열에 수직인 인장 응력을 가하는 경우
- 형태 II: 균열에 수직인 전단 응력을 가하는 경우
- 형태 III: 균열에 평행한 전단 응력을 가하는 경우

일반적으로 치과재료의 파괴 인성 측정에는 형태 I의 시험 방법이 이용되고 있다. 따라서 파괴 인성의 크기를 나타내는 응력 확대 계수(K)는 다음과 같이 표시한다.

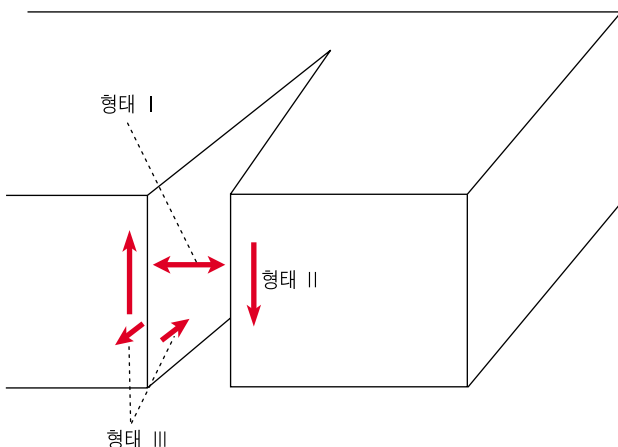


그림 2-10. 파괴 인성 측정에 사용되는 균열 개시 방법.

$$K_{IC} = Y\sigma\sqrt{c}$$

여기서, Y : 기하학적 인자

σ : 응력

c : 균열의 길이

압침 방법

- 브라켓과 같이 크기가 작은 시편의 파괴 인성에 유용
- 측정은 간편하지만 측정값의 신뢰성이 낮음
- 보통 비커스 경도 시험기를 이용하여 브라켓 표면에 압흔 형성(그림 2-11)
- 주의 - 시편의 표면에 수직으로 압침
- 압침 후 바로 균열의 길이 측정
- 계산식

$$K_{IC} = 0.018 \sqrt{\frac{E}{H}} \sqrt{\frac{P}{c}}$$

여기서, H : 비커스 경도

P : 압자 하중

c : 균열 선단에서 압흔 중심점까지의 평균 거리

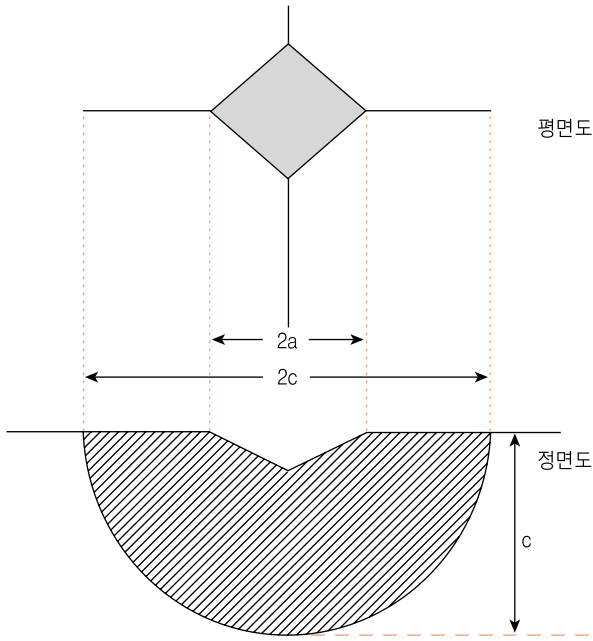


그림 2-11. 파괴 인성 측정을 위한 비커스 압침 방법.

-notch method

- 치과재료의 파괴 인성에 널리 사용
- 길고 가는 시편의 파괴 인성에 유용: 통상적으로 $S = 4W$ (그림 2-12)
- 시편 가운데에 notch를 만든 후 굽힘 하중을 가하여 균열 성장
- 사용 조건

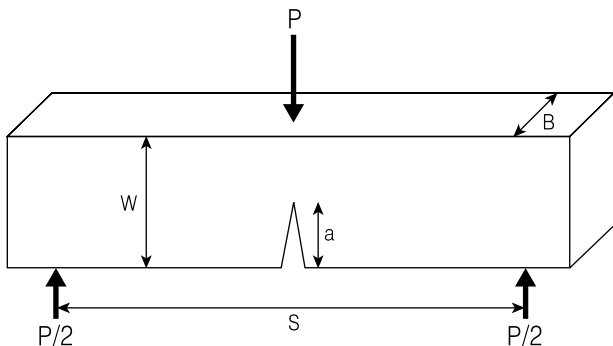


그림 2-12. 파괴 인성 측정을 위한 notch 막대 방법.

- 시편의 높이(W)와 폭(B)의 비 = 2
- 균열 길이(a)와 높이(W) 비 = 0.45~0.55
- 균열 길이(a) $> 2.5 \times K_{IC}/Y^2$
- 시편의 폭(B) $> 2.5 \times K_{IC}/Y^2$

• 계산식

$$K_{IC} = \left(\frac{PS}{BW^{3/2}} \right) Y$$

여기서, S : 지지점 간의 거리

Y : a/W에 따른 보정 계수

이중 비틀림 방법

- 시편의 두께(d)가 폭(W)에 비해 매우 작을 때 유용한 방법
- 시편 가운데에 notch를 만든 후 굽힘 하중을 가하여 균열 성장
- 시편 준비와 측정이 까다롭지만, 측정값의 신뢰성이 매우 높음
- 다른 방법의 측정치보다 일반적으로 낮은 값을 나타냄
- 복합 레진의 파괴 인성에 유용
- 계산식

$$K_{IC} = PW_m \sqrt{\frac{3(1+\nu)Y}{Wd^3hn}}$$

여기서, Y : 시편의 크기에 따른 보정 계수

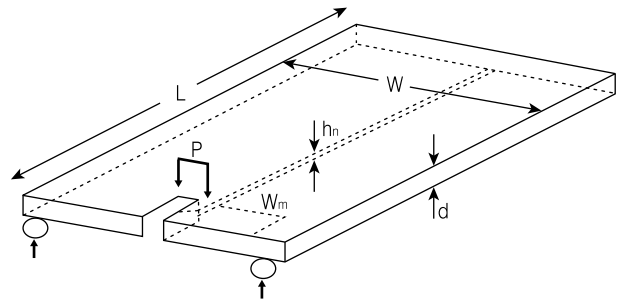


그림 2-13. 파괴 인성 측정을 위한 이중 비틀림 방법.