

# Chapter 15. Composite Materials (복합재료)

오늘날의 재료 ~ 다양한 특성의 재료를 요구함

(예) 우주 항공 재료

~ 강도, 강성도 높고 밀도 낮고 충격강도 강해야 함

- 문제점:

강하고 강성도 높은 재료는 밀도 높으며 연성이 나쁨

밀도 낮고 연성이 좋은 재료는 약하고 강성도 낮음

- 해결책: 둘 이상의 재료로 장점을 조합

→ Composite (복합재료)

{ Matrix (기질, 매트릭스)

{ Dispersed phase (분산상)

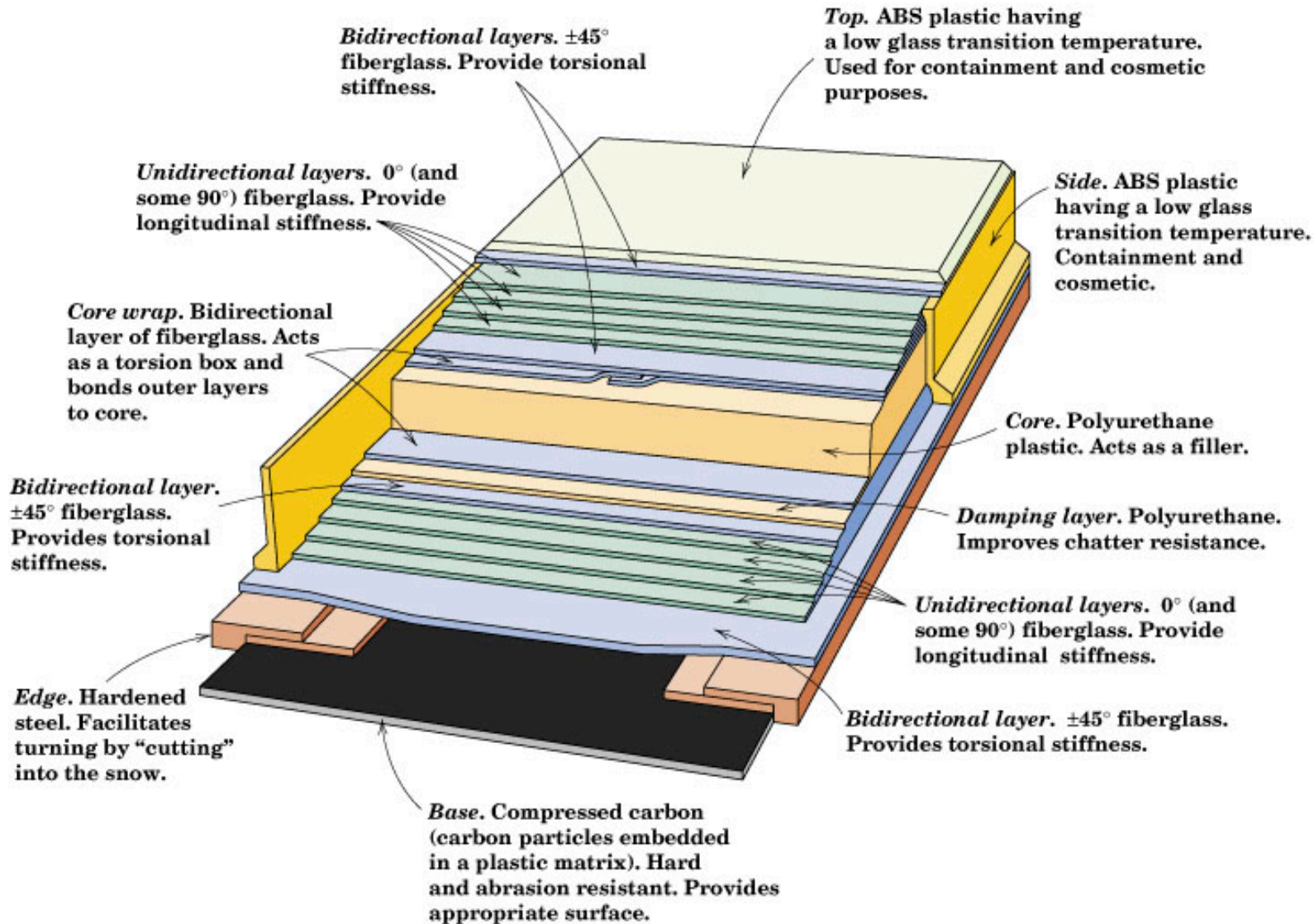


Fig. 15.0

스키의  
단면.

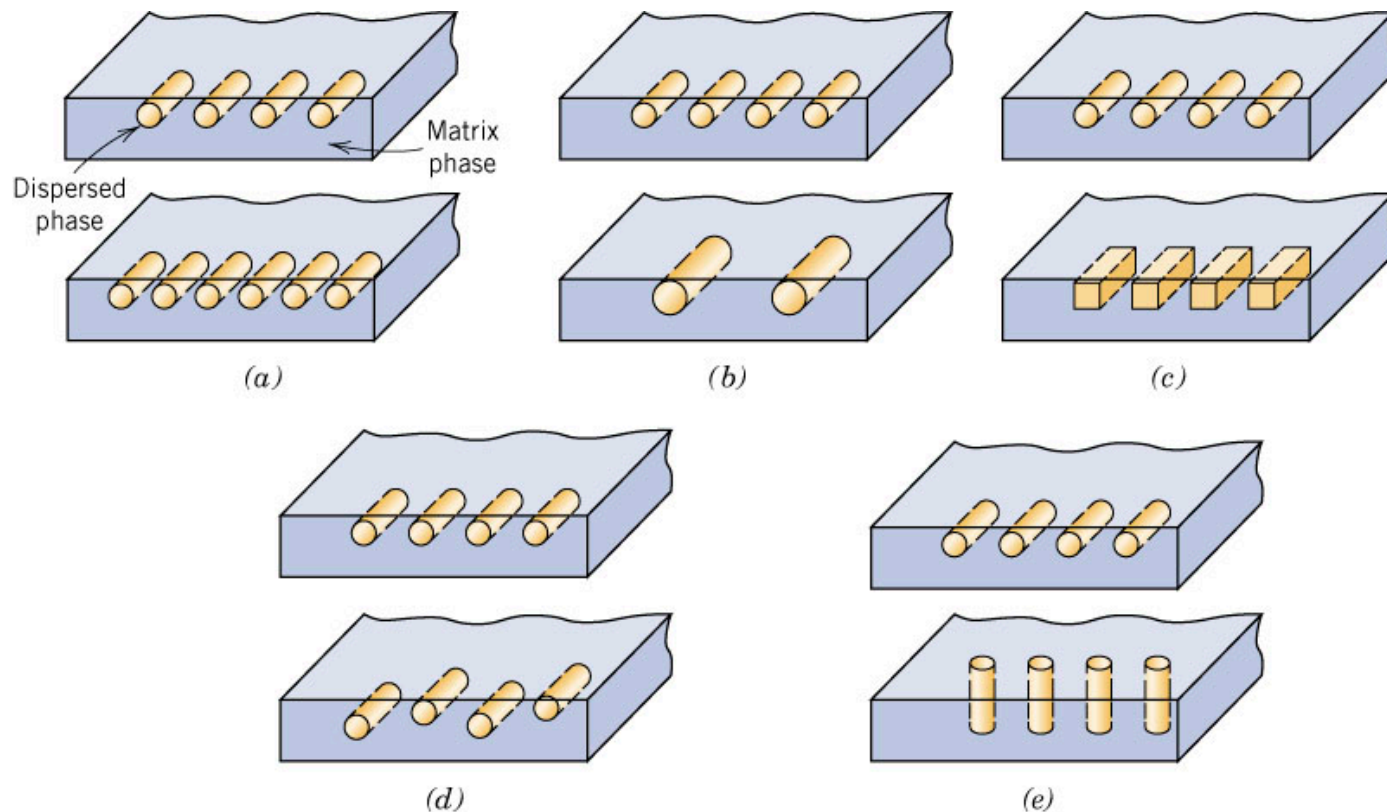


Fig. 15.1 복합재료의 성질에 영향 미치는 분산상 입자의 기하학적, 공간적 특징: (a) 함량(concentration), (b) 크기(size), (c) 형상(shape), (d) 분포(distribution), (e) 배향(orientation).

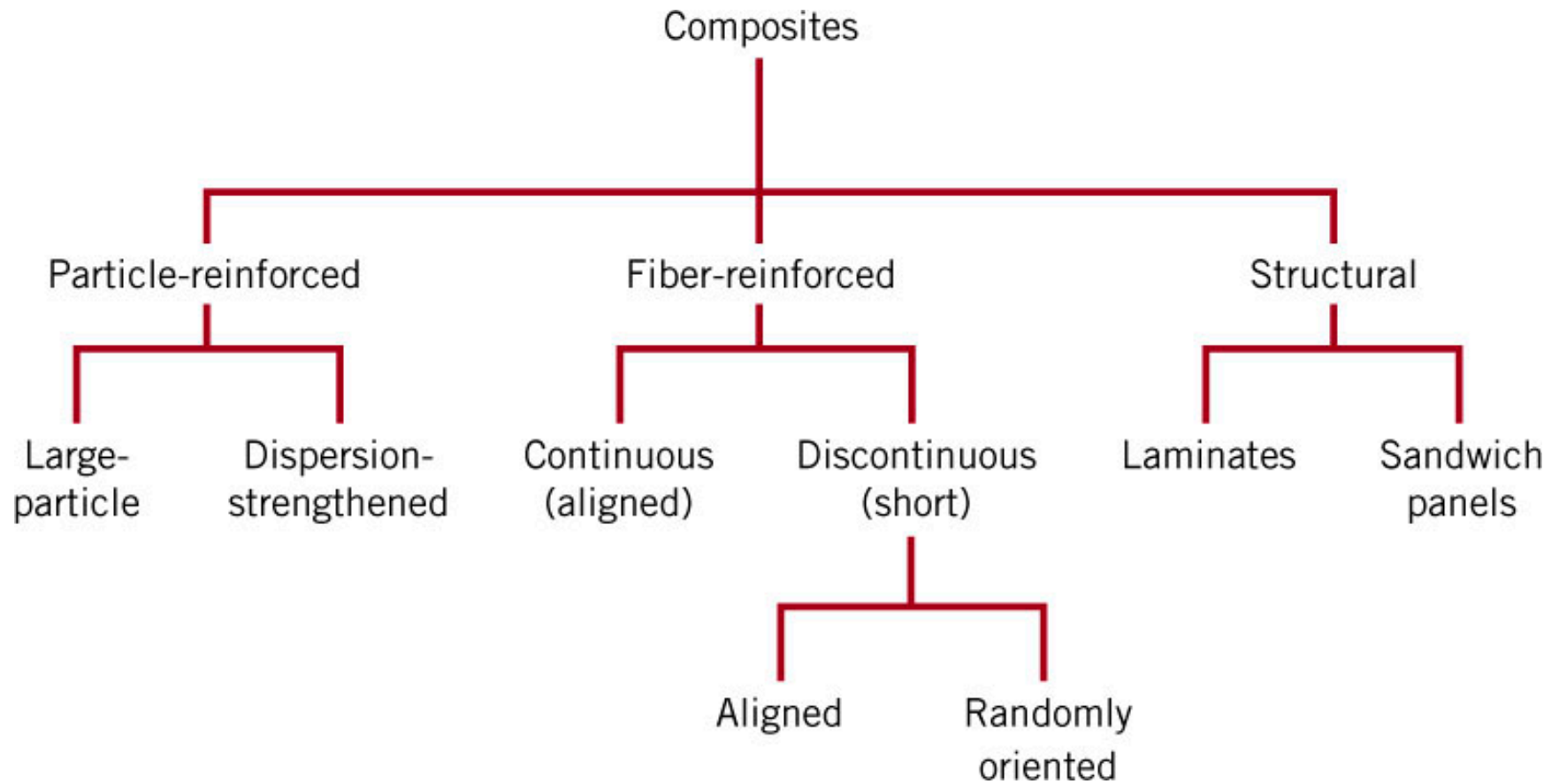


Fig. 15.2 복합재료의 분류.

## Particle-Reinforced Composites (입자강화 복합재료)

- { Large-particle composites
- { Dispersion-strengthened composites

### Large-Particle Composites (과립 복합재료)

~ 원자나 분자 수준에서 강화가 일어나는 것이 아님  
Continuum mechanics (연속체 역학) 관점에서 취급

Large particle ~ 대략 100 nm 이상의 크기

복합재료의 elastic modulus,  $E_c$ :

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \quad (\text{upper bound})$$

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad (\text{lower bound})$$

$E$ : elastic modulus,  $V$ : volume fraction

$c$ : composite,  $m$ : matrix,  $p$ : particle

→ Rule of mixtures (혼합법칙)

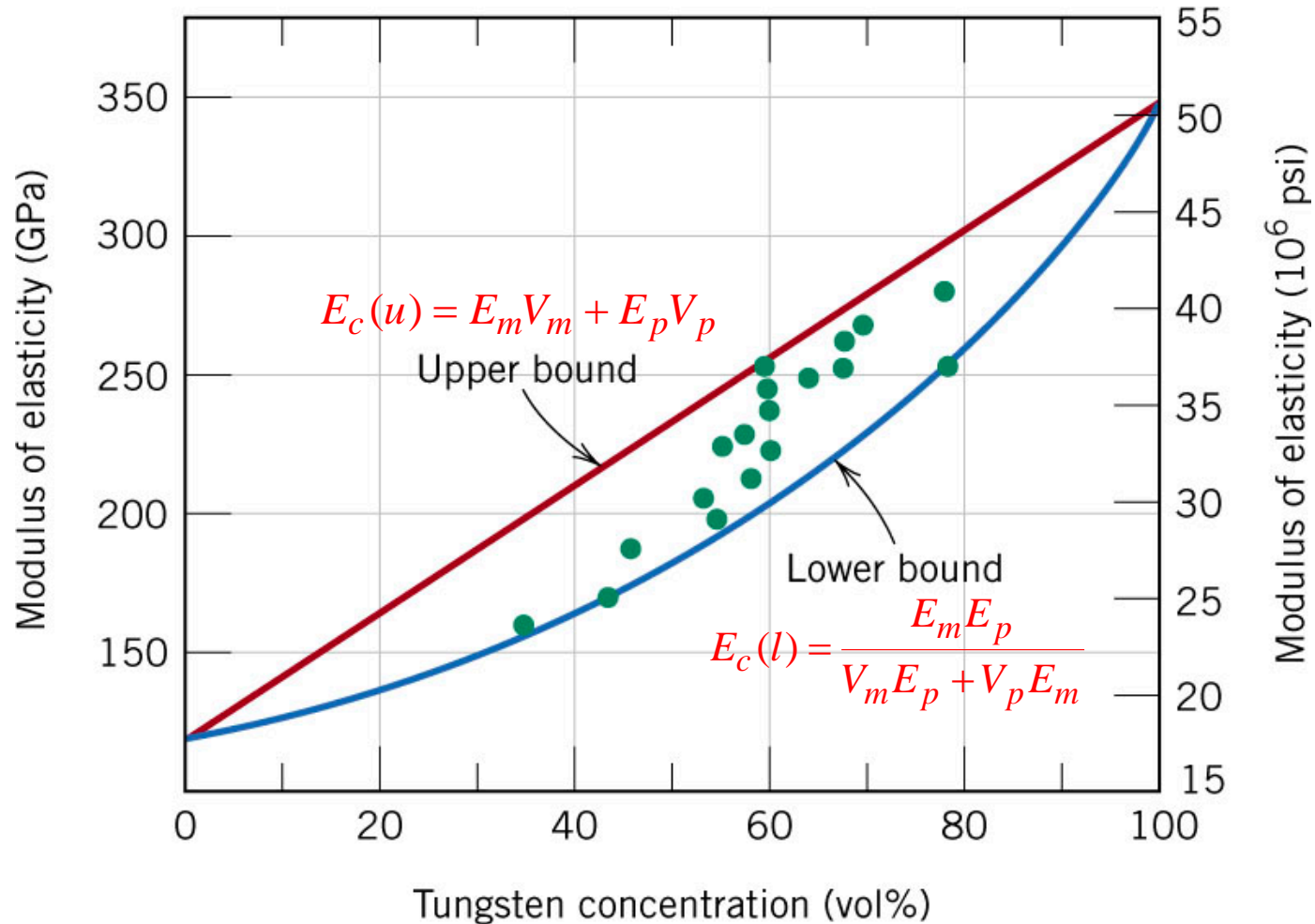
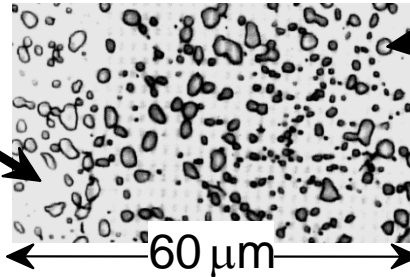


Fig. 15.3  $E$  vs.  $vol\%$  for W particles in Cu matrix (측정값은 상한값, 하한값 사이에 위치하고 있음).

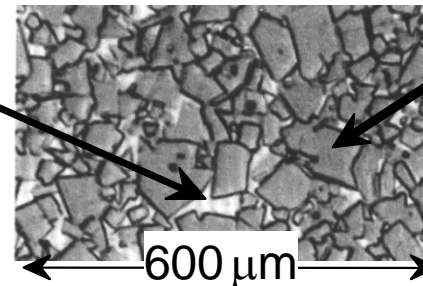
## (Examples)

## - Spheroidite steel

matrix:  
ferrite ( $\alpha$ )  
(ductile)particles:  
cementite  
(Fe<sub>3</sub>C)  
(brittle)

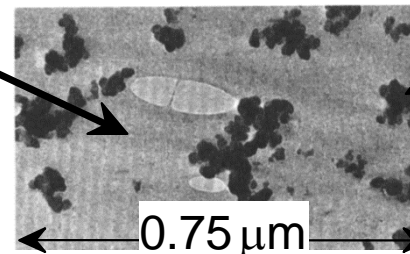
(Fig. 11.19)

## - WC/Co cemented carbide

matrix:  
cobalt  
(ductile, tough)particles:  
WC  
(brittle, hard)

(Fig. 15.4)

## - Automobile tire rubber

matrix:  
rubber  
(compliant)particles:  
carbon  
black  
(stiff)

(Fig. 15.5)



## Dispersion-Strengthened Composites (분산강화 복합재료)

- ~ 원자나 분자 수준에서 강화가 일어남
- 입자 크기가 대략 100 nm보다 작음
- 주로 미세 금속입자를 첨가한 금속합금

(예)

Thoria-dispersed nickel (TD nickel):

Thoria ( $\text{ThO}_2$ ) 미세 입자를 3% 분산시킨 Ni 합금  
→ 고온 강도 ↑

Sintered aluminum powder (SAP):

Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )를 코팅한 미세 Al 분말을 소결한 재료  
이것을 Al matrix 내에 분산시키면 강도 ↑

# Fiber-Reinforced Composites (섬유강화 복합재료)

## Influence of Fiber Length (섬유 길이의 영향)

~ 복합재료의 strength & stiffness 증가 위해선 critical fiber length  $l_c$  이상이 되어야 함

→ 이 길이 이하에선 결합이 섬유의 끝에서 끝나 충분한 하중 전달을 하지 못함

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c}$$

$d$ : fiber diameter,  $\sigma_f^*$ : fiber ultimate strength  
 $\tau_c$ : shear strength of fiber-matrix interface

- { Continuous fibers (or long fibers):  $l > 15l_c$
- { Discontinuous fibers (or short fibers):  $l < 15l_c$

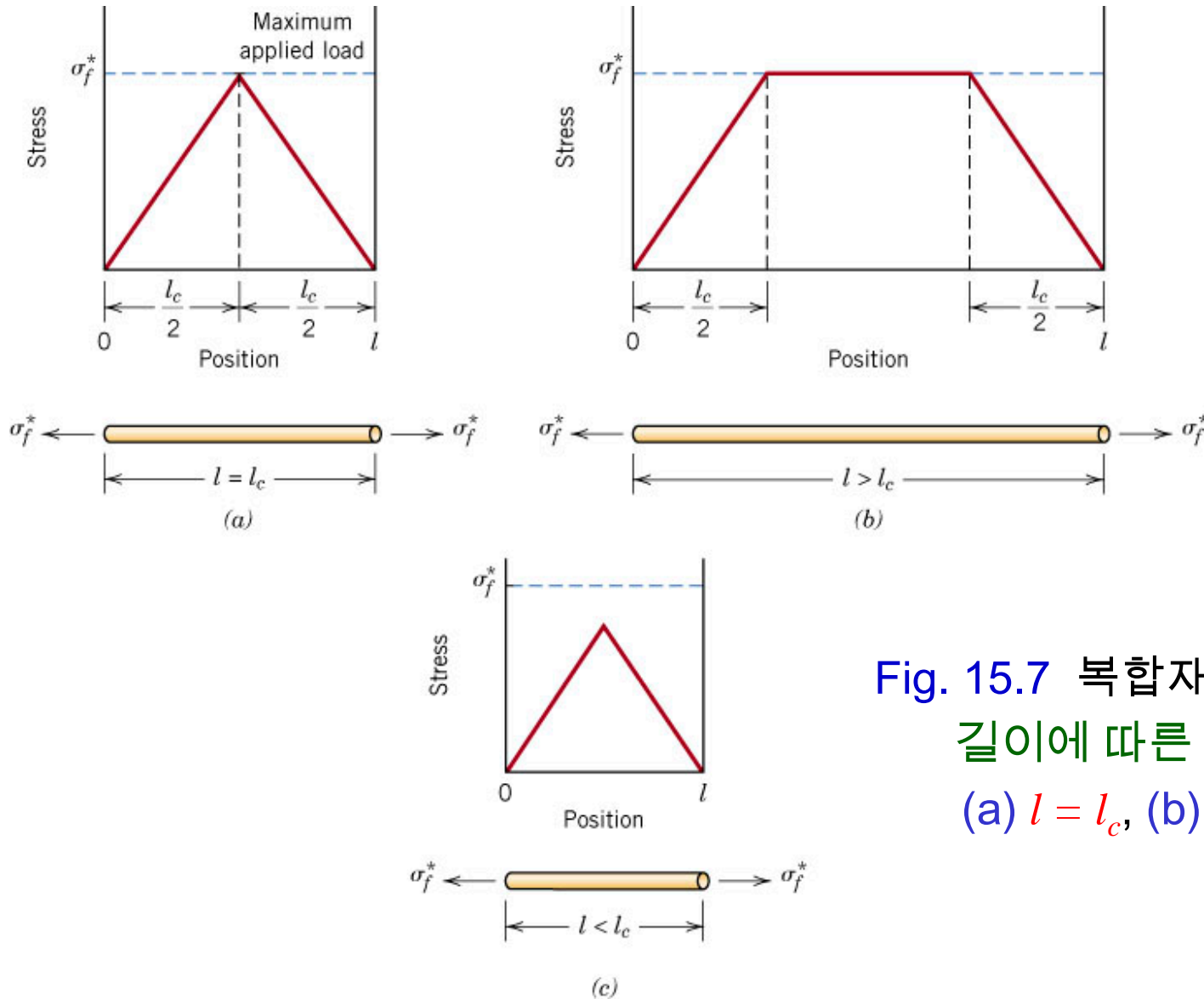


Fig. 15.7 복합재료에서 섬유 길이에 따른 응력 분포:  
 (a)  $l = l_c$ , (b)  $l > l_c$ , (c)  $l < l_c$ .

## Influence of Fiber Orientation & Concentration (섬유 배향 및 농도의 영향)

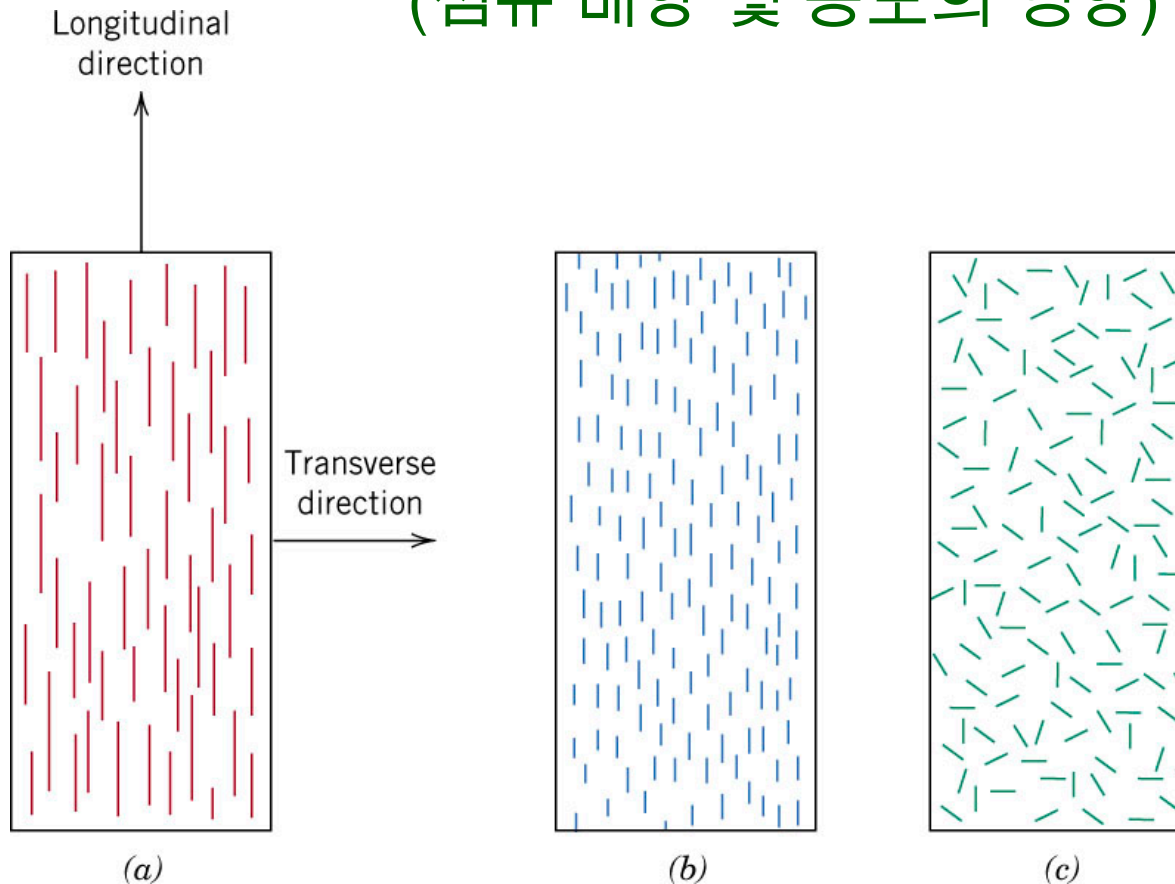


Fig. 15.8 섬유강화 복합재료의 배향: (a) 정렬된 장섬유, (b) 정렬된 단섬유, (c) 임의배향 단섬유.

## Continuous and Aligned Fiber Composites

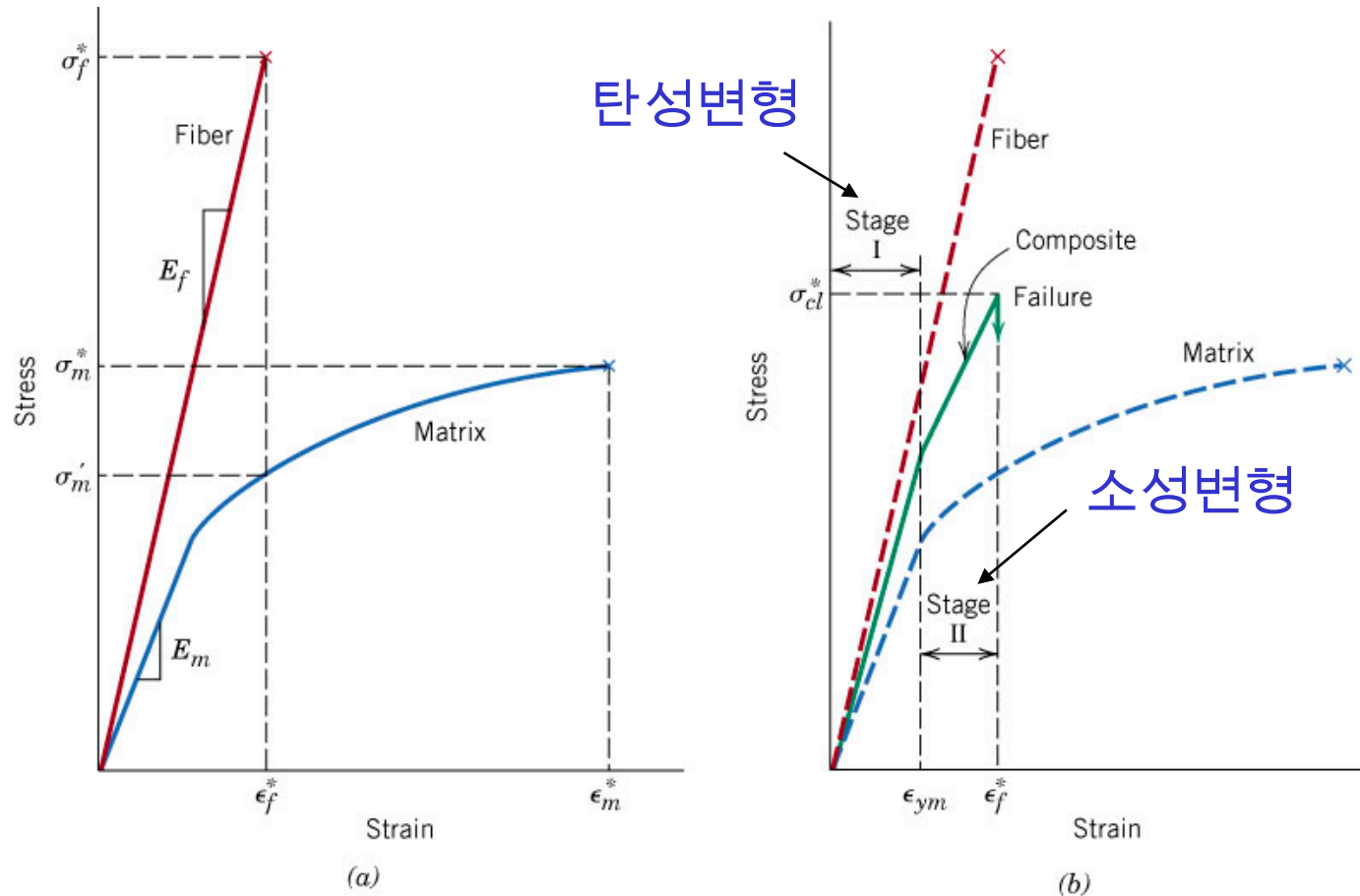
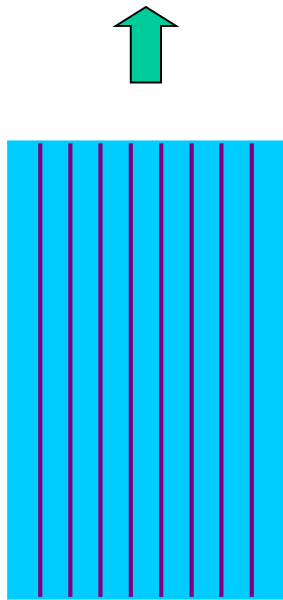


Fig. 15.9 (a) brittle fiber와 ductile matrix 재료의 응력-변형률 거동, (b) 복합재료에서 섬유 정렬방향으로 응력을 가한 경우.

## Elastic Behavior-Longitudinal Loading (탄성거동-길이방향 하중)

Isostrain condition :  $\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$   
(등변형률)



$$F_c = F_m + F_f$$

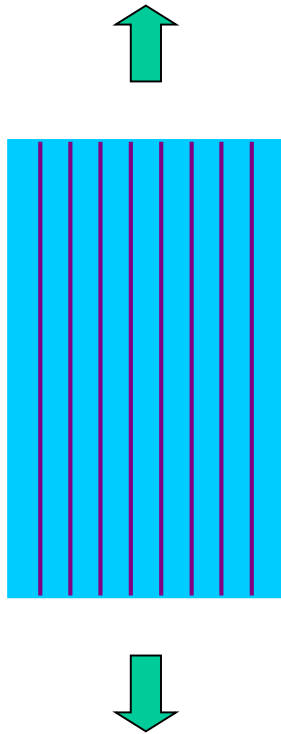
(식 유도)

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \sigma A \\ \sigma = E\varepsilon \\ V_m + V_f = 1 \end{array} \right.$$

$$E_{cl} = E_m(1 - V_f) + E_f V_f$$

복합재료의 길이방향 인장 탄성률

Ex. 15.1) Continuous & aligned glass fiber-reinforced composite



40% glass fibers,  $E_f = 69$  GPa

60% polyester resin,  $E_m = 3.4$  GPa

(a) Elastic modulus of this composite  
in the longitudinal direction ?

$$\begin{aligned} \text{(Ans.) } E_{cl} &= E_m(1 - V_f) + E_f V_f \\ &= (3.4)(0.6) + (69)(0.4) \\ &= 30 \text{ GPa} \end{aligned}$$

## Elastic Behavior-Transverse Loading (탄성거동-폭방향 하중)

Isostress condition :  $\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$   
(등응력)

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f$$

(식 유도)

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \sigma / E \\ V_m + V_f = 1 \end{array} \right.$$

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + V_f E_m}$$

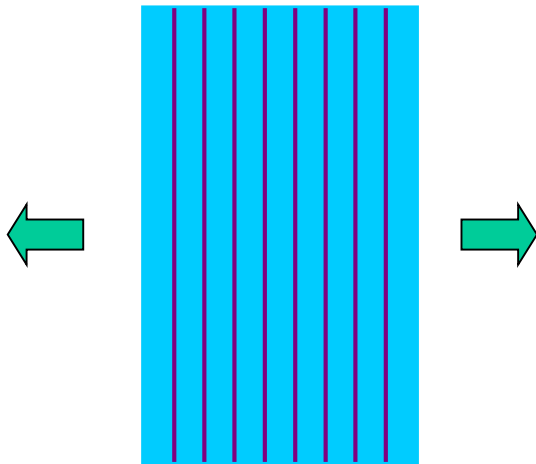
복합재료의 폭방향 인장 탄성률



Ex. 15.2) Continuous & aligned glass fiber-reinforced composite

40% glass fibers,  $E_f = 69$  GPa

60% polyester resin,  $E_m = 3.4$  GPa



(a) Elastic modulus of this composite in the transverse direction ?

$$\begin{aligned} \text{(Ans.) } E_{ct} &= \frac{E_m E_f}{(1 - V_f)E_f + V_f E_m} \\ &= \frac{(3.4)(69)}{(0.6)(69) + (0.4)(3.4)} \\ &= 5.5 \text{ GPa} \end{aligned}$$

## Longitudinal Tensile Strength (길이방향 인장강도)

$$\sigma_{cl}^* = \sigma_m' (1 - V_f) + \sigma_f^* V_f$$



복합재료의 길이방향 파단 인장강도  
→ 극한강도 (ultimate strength)

## Transverse Tensile Strength (폭방향 인장강도)

폭 방향의 강도는 여러 **요인**에 따라 다름  
(경우에 따라서는 기질 강도보다 낮음)

- { 섬유와 기질의 성질
- { 섬유와 기질의 결합강도
- { 기공의 존재

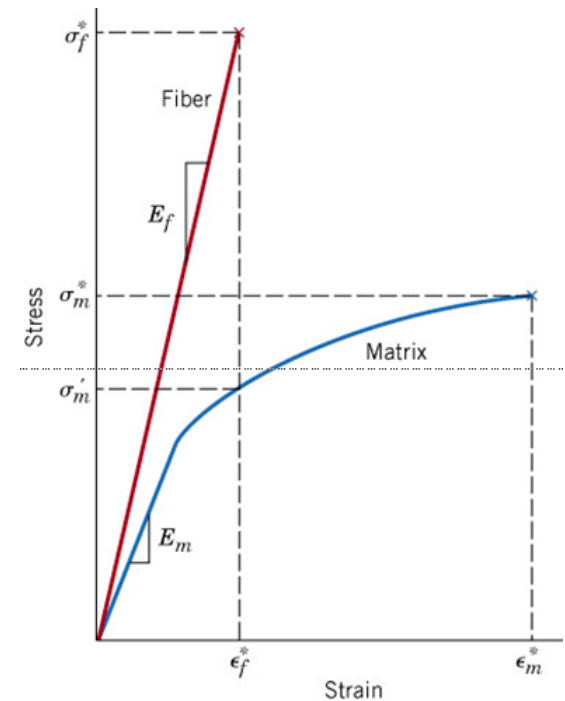


Fig. 15.9 (a)

**Table 15.4** Characteristics of Several Fiber-Reinforcement Materials

Material	Specific Gravity	Tensile Strength [GPa ( $10^6$ psi)]	Specific Strength (GPa)	Modulus of Elasticity [GPa ( $10^6$ psi)]	Specific Modulus (GPa)
		<b>Whiskers</b>			
Graphite	2.2	20 (3)	9.1	700 (100)	318
Silicon nitride	3.2	5–7 (0.75–1.0)	1.56–2.2	350–380 (50–55)	109–118
Aluminum oxide	4.0	10–20 (1–3)	2.5–5.0	700–1500 (100–220)	175–375
Silicon carbide	3.2	20 (3)	6.25	480 (70)	150
		<b>Fibers</b>			
Aluminum oxide	3.95	1.38 (0.2)	0.35	379 (55)	96
Aramid (Kevlar 49™)	1.44	3.6–4.1 (0.525–0.600)	2.5–2.85	131 (19)	91
Carbon <sup>a</sup>	1.78–2.15	1.5–4.8 (0.22–0.70)	0.70–2.70	228–724 (32–100)	106–407
E-glass	2.58	3.45 (0.5)	1.34	72.5 (10.5)	28.1
Boron	2.57	3.6 (0.52)	1.40	400 (60)	156
Silicon carbide	3.0	3.9 (0.57)	1.30	400 (60)	133
UHMWPE (Spectra 900™)	0.97	2.6 (0.38)	2.68	117 (17)	121
		<b>Metallic Wires</b>			
High-strength steel	7.9	2.39 (0.35)	0.30	210 (30)	26.6
Molybdenum	10.2	2.2 (0.32)	0.22	324 (47)	31.8
Tungsten	19.3	2.89 (0.42)	0.15	407 (59)	21.1

(섬유상 재료)

nm 수준의 직경,  
단결정, 고가

다결정 or 비정질,  
 $\mu\text{m}$  수준의 직경

수백  $\mu\text{m}$  수준의  
직경, 금속선 재료

<sup>a</sup> The term “carbon” instead of “graphite” is used to denote these fibers, since they are composed of crystalline graphite regions and also of noncrystalline material and areas of crystal misalignment.

## Polymer-Matrix Composites (PMC) (고분자 기질 복합재료)

~ 고분자 수지가 기질, 섬유가 강화재로 구성

가장 많이 사용  
제조 용이  
가격 저렴

## Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Composites

분산상: glass fiber (유리섬유의 조성은 Table 13.10 참조)

기질: unsaturated polyester

용도: 자동차 & 보트 body, plastic pipe, 저장 탱크

## Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Composites

↓ 결정질 흑연과 비정질 상이 혼재한 섬유  
(or graphite fiber)

탄소섬유의 전구물질(precursor): rayon, PAN, pitch

용도: 스포츠 용품 (테니스채, 낚싯대, 골프채), 항공기 날개 & 부품

## Aramid Fiber-Reinforced Polymer Composites

↓ Kevlar & Nomex ← aromatic polyamide  
(glass fiber, carbon fiber와는 달리 고분자 섬유임)

Kevlar의 화학구조 (Fig. 15.10)

용도: bullet-proof vest, 스포츠 용품, tire cord, missile case, 압력용기, 브레이크의 석면 대체재, clutch lining, gasket

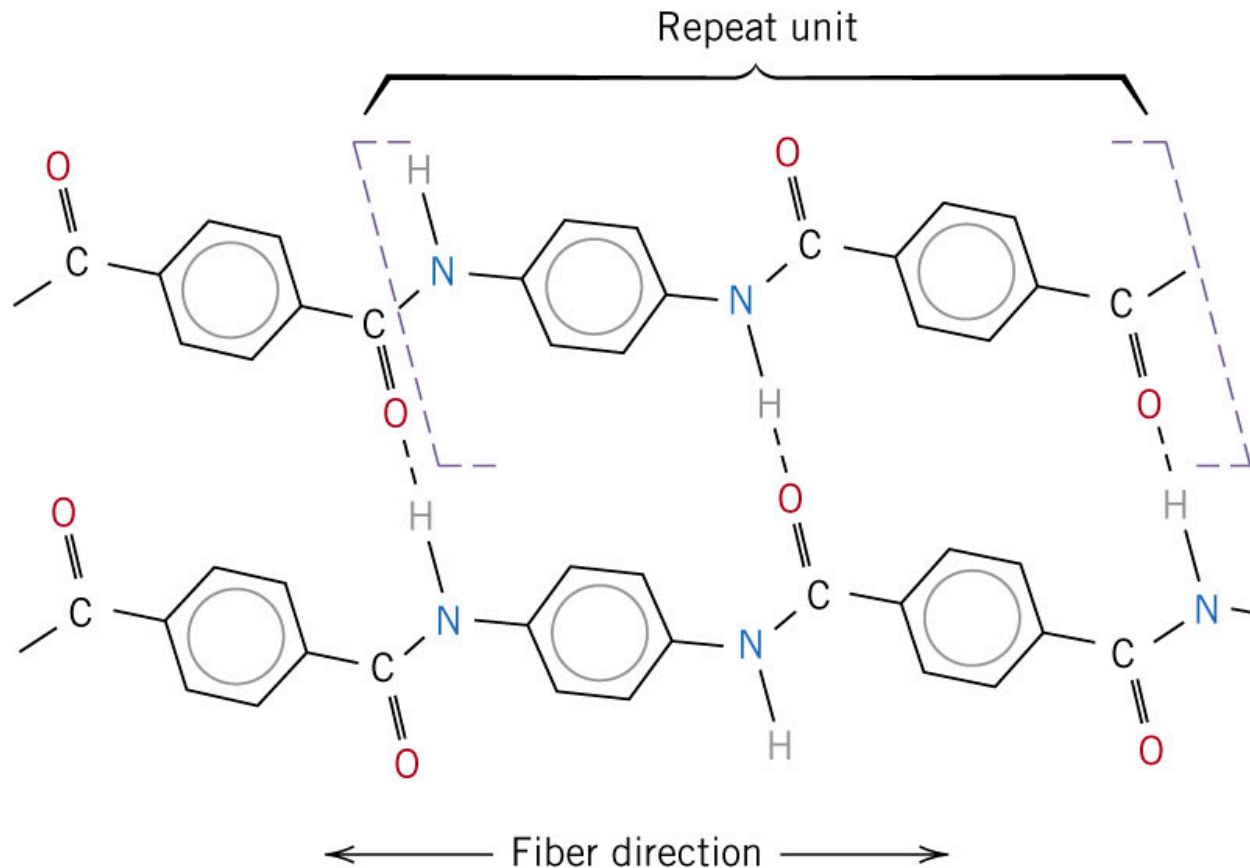


Fig. 15.10 Aromatic polyamide (Aramid) 섬유 중의 한 종류인 Kevlar의 화학구조.

**Table 15.5 Properties of Continuous and Aligned Glass-, Carbon-, and Aramid-Fiber Reinforced Epoxy-Matrix Composites in Longitudinal and Transverse Directions. In All Cases the Fiber Volume Fraction Is 0.60**

<i>Property</i>	<i>Glass (E-glass)</i>	<i>Carbon (High Strength)</i>	<i>Aramid (Kevlar 49)</i>
Specific gravity	2.1	1.6	1.4
Tensile modulus			
Longitudinal [GPa ( $10^6$ psi)]	45 (6.5)	145 (21)	76 (11)
Transverse [GPa ( $10^6$ psi)]	12 (1.8)	10 (1.5)	5.5 (0.8)
Tensile strength			
Longitudinal [MPa (ksi)]	1020 (150)	1240 (180)	1380 (200)
Transverse [MPa (ksi)]	40 (5.8)	41 (6)	30 (4.3)
Ultimate tensile strain			
Longitudinal	2.3	0.9	1.8
Transverse	0.4	0.4	0.5

**Source:** Adapted from R. F. Floral and S. T. Peters, “Composite Structures and Technologies,” tutorial notes, 1989.

## Metal-Matrix Composites (MMC) (금속 기질 복합재료)

**Matrix:** ductile metal  
(초합금, Al, Mg, Ti & Cu alloys)

**Reinforcement:** 입자 or fiber 형태, 10~60 vol % 첨가  
(SiC, B, C, Alumina 입자, 내화금속)

**용도:** 항공우주분야 등 특수분야의 재료로 사용  
(열 저항성 ↑, 뒤틀림 저항성 ↑, 고온 산화 저항성 ↑,  
충격강도 ↑)



## Ceramic-Matrix Composites (CMC) (세라믹 기질 복합재료)

세라믹 재료의 장점: 고온 산화 및 열화 저항성 우수  
단점인 취성 파괴 특성을 향상시키기 위해 고안됨

**Matrix:** 세라믹 재료

**Reinforcement:** 세라믹 입자, fiber or whisker 형상

**예:**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina) or  $\text{ZrO}_2$  (zirconia) matrix 속에  
안정화된 zirconia 입자 분산

→ Transformation toughening (변태 강화)를 통해 균열 방지

**용도:** 고온 프레스, 절삭 공구 등

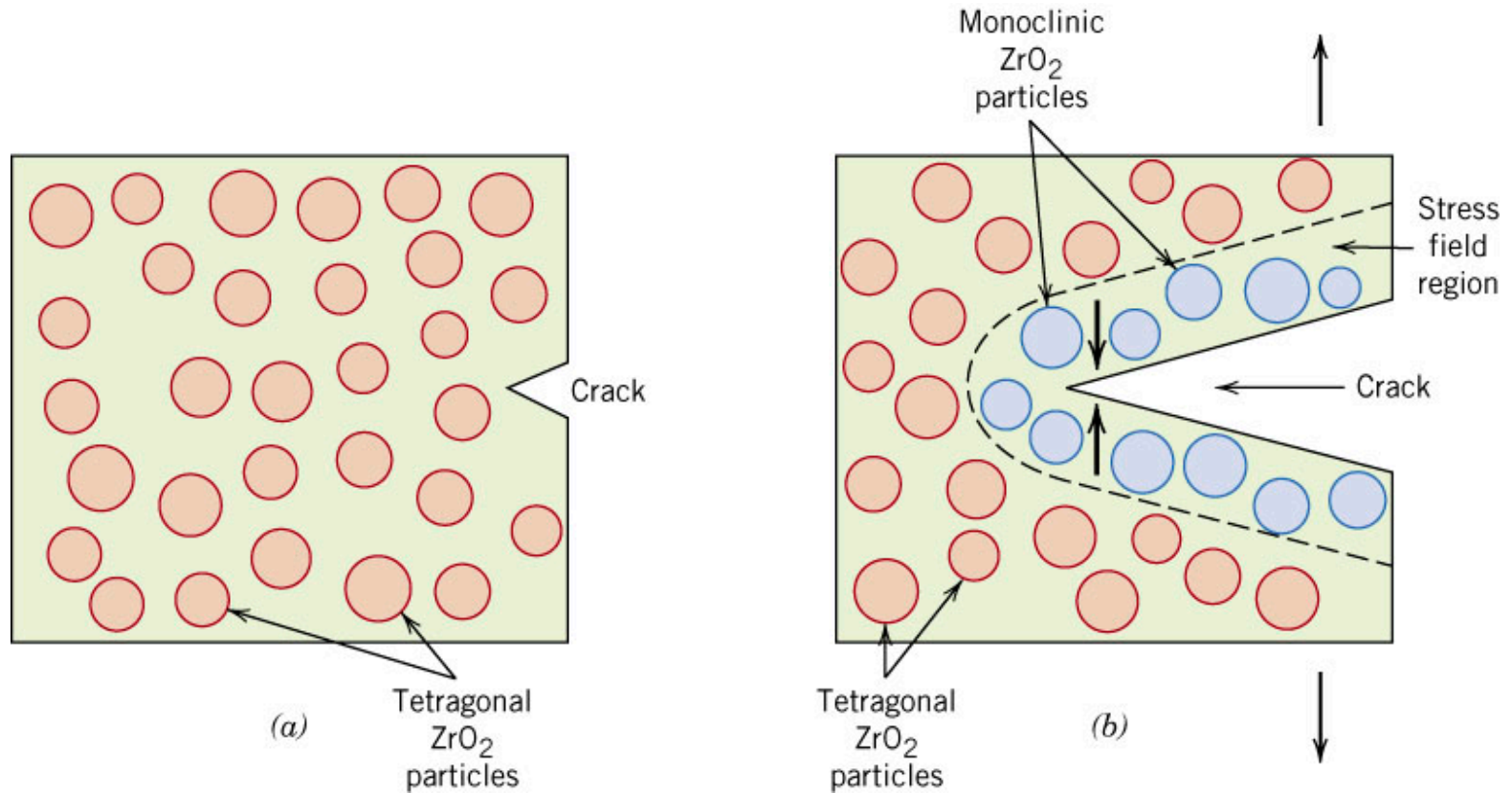


Fig. 15.12 Transformation toughening에 대한 모식도: (a) 변태 이전의 균열, (b) 응력에 의해 야기된 변태에 의한 균열 억제 (monoclinic  $ZrO_2$  상이 tetragonal  $ZrO_2$  상보다 부피가 큼  $\rightarrow$  crack 억제).

## Processing of Fiber-Reinforced Composites

← 연속 섬유강화 plastic composite 가공 방법

### Pultrusion (인출 성형, 끌어당김 성형)

~ glass fiber, carbon fiber, aramid fiber를 polyester, epoxy resin에 함침시킨 후 다이를 지나면서 경화

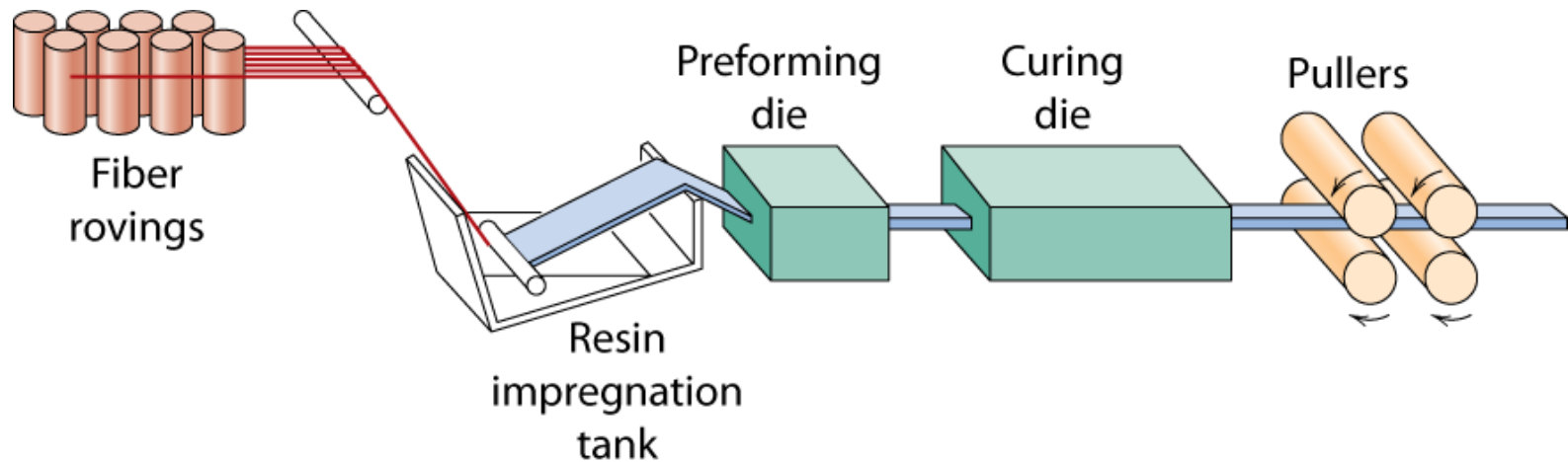


Fig. 15.13 Pultrusion 공정에 대한 모식도.

## Prepreg Production Process (Prepreg 제조 공정)

경화성 고분자 수지로 함침시킨 연속섬유 강화재

- ~ tape 형태로 제조, 구조용 복합재료로 사용, 필요시 잘라서 가열, 가압하여 경화시켜 사용, 원하는 두께만큼 적층으로 조절

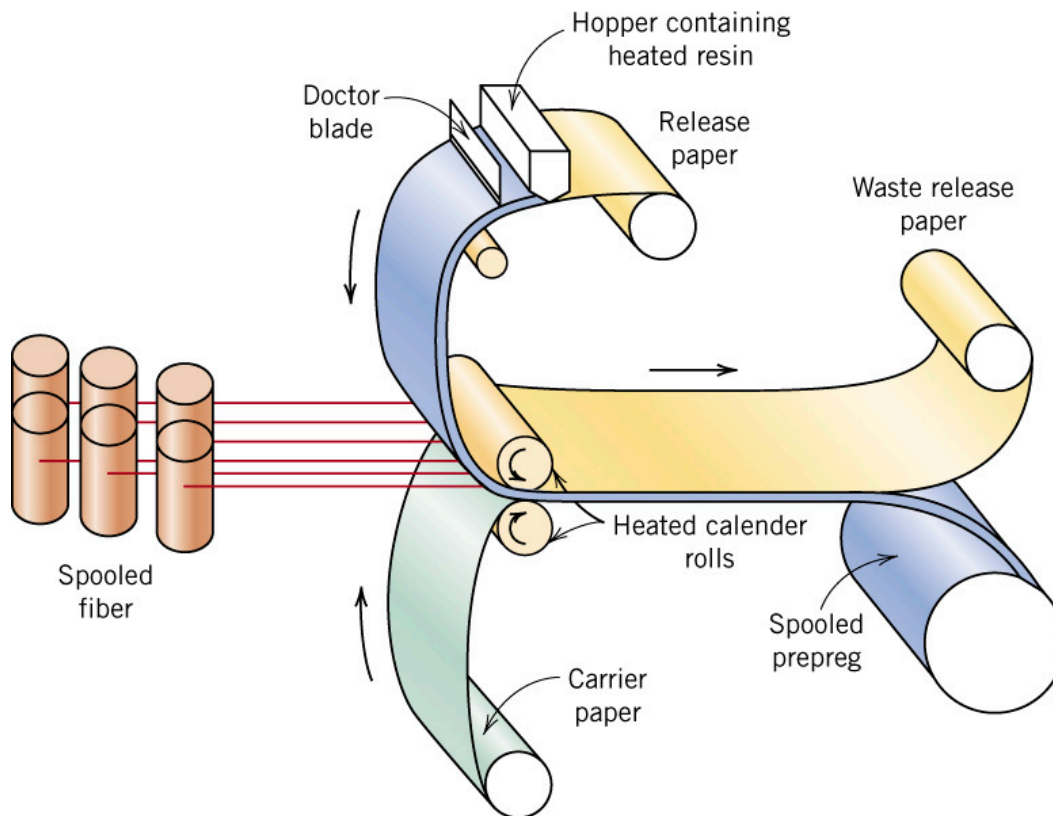


Fig. 15.14 Prepreg 제조 공정에 대한 모식도.

## Filament Winding (필라멘트 감기 공정)

~ 연속 섬유를 정해진 pattern으로 감는 공정

용도: 고압 파이프, 저장 탱크, 압력 용기 등

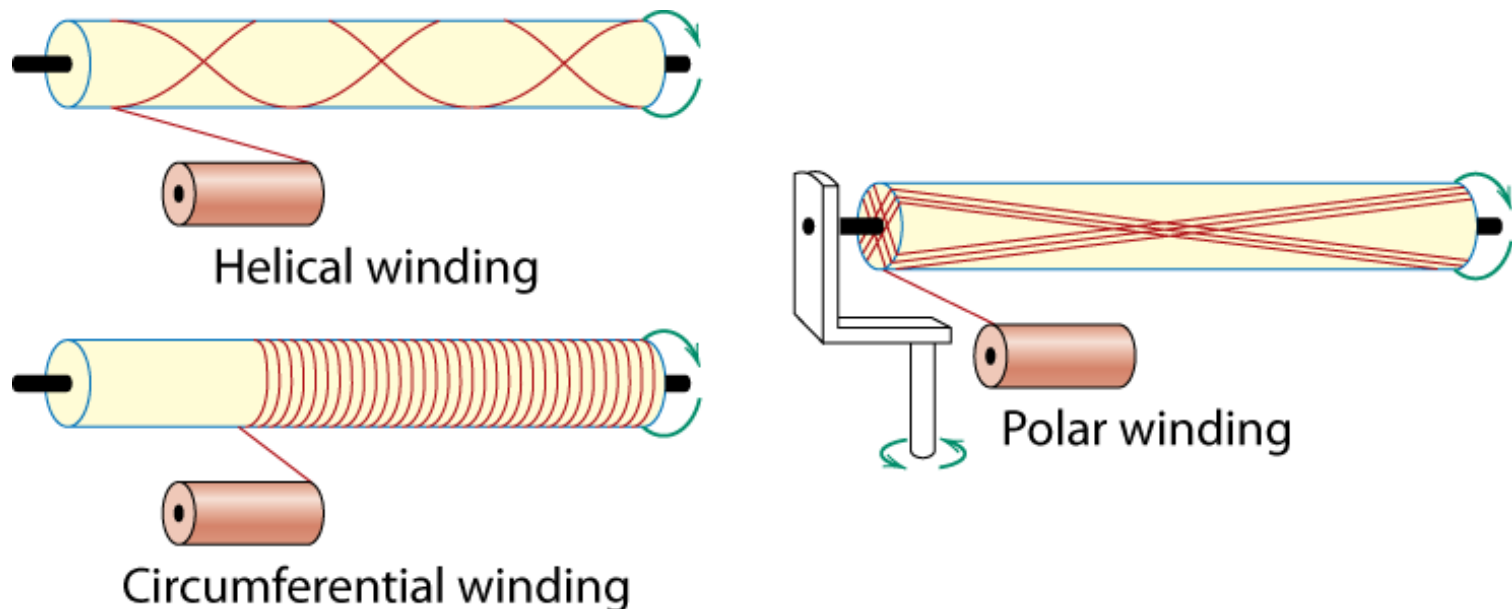
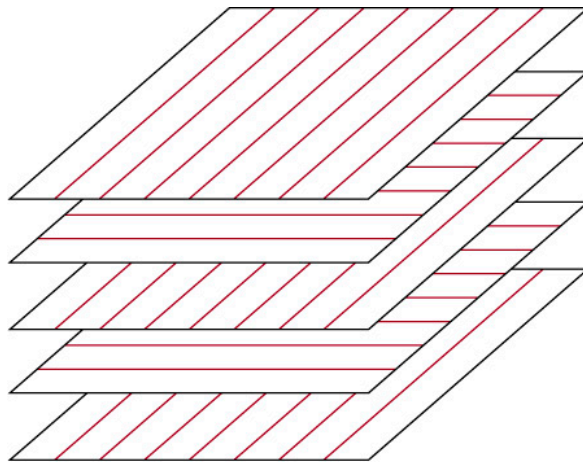


Fig. 15.15 다양한 filament winding 공정에 대한 모식도.

## Structural Composites (구조용 복합재료)

### Laminar Composites (층상 복합재료)

~ 2차원의 sheet or panel을 적층시켜 구성



예) plywood (합판), ski

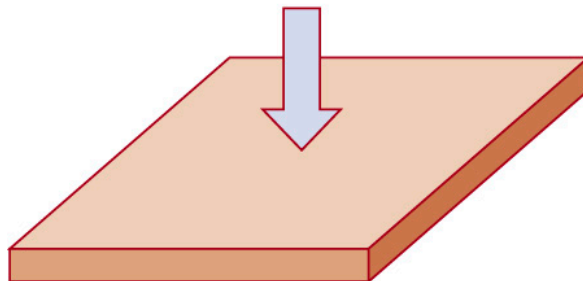


Fig. 15.16 층상 복합재료 제조 시의 섬유배향층의 적층 예.

## Sandwich Panels

~ 강도 높은 두 개의 외부 sheet와 강도 낮은 중간층으로 구성

**Face materials:** Al 합금, FRP, Ti, steel, plastics

**Core materials:** 발포 고분자, 합성 고무, 시멘트, balsa tree,  
honeycomb 구조재 (foil형 재료가 육각형 cell을  
형성하여 수직으로 놓인 구조)

**용도:** 지붕, 바닥, 벽, 비행기 동체 및 날개

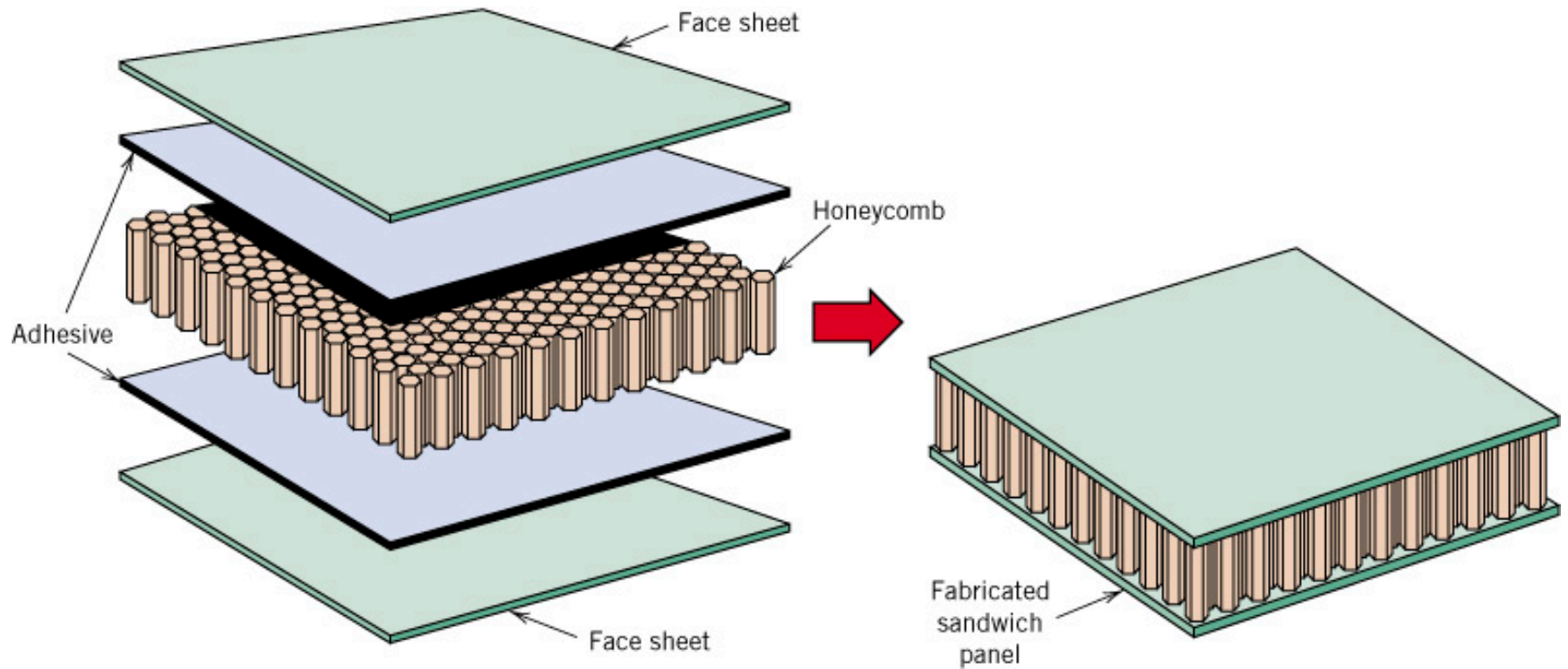


Fig. 15.18 Honeycomb core sandwich panel의 제조 방법 모식도.



(Probs.)

15.1, 15.3, 15.8, 15.10, 15.12,  
15.15, 15.23 & 15.28.