

# 複合構造의 結合

洪 昌 善

〈韓國科學技術院 航空工學科·工博〉

## 1. 서 론

複合材料는 在來材料에 비하여 강도대 밀도비와 강성대 밀도비가 높아 構造의 輕量化를 위한 대체 재료로 많은 관심을 끌고 있으며 이미 응용된 사례도 많이 있다. 複合材料는 等方性이 아니며, 섬유강화형 複合材料는 섬유방향에 따라 異方性인 특징이 있어 설계자는 섬유방향을 조절함으로써 강도나 강성을 조절할 수 있다.

대부분의 기계구조물은 많은 부품이 서로 결합되어 원하는 기능을 발휘할 수 있도록 설계 제작되고 있는데, 금속재료의 경우에는 서로 용접을 하여 결합할 수 있으나 複合材料는 용접을 할 수는 없고 보울트, 리벳 혹은 핀으로 결합하는 기계적 결합(mechanical joint)이나 접착재를 사용하는 접착결합(bonded joint)을 하거나 두가지 방법을 혼용하기도 한다.

일찌기 複合材料의 응용을 항공기에 적용한 압력용기나 로켓 모우터케이스등에는 비교적 결합 문제(joint problem)가 심각하지 않은 경우이다. 複合材料의 장점이 부각되고 그 기계적 거동에 대한 연구가 많은 진전을 보임에 따라 다른 구조물에서의 활용을 서두를 때 당면하는 문제가 複合構造의 부품을 어떻게 결합할 것인가이다.

설계자가 고려해야 할 複合材料의 특성은 여러가지 있겠으나 본 해설에서는 그동안 제안된

기계적 결합과 접착결합의 종류를 소개하고 각 방법의 문제점등을 비교 검토하고자 한다.

## 2. 기계적 결합(mechanical joint)

기계구조물을 결합하는 방법으로서 비교적 오랜 경험을 갖고 있는 것이 보울트나 리벳을 사용하는 기계적 결합법으로서 이 방법은 부품의

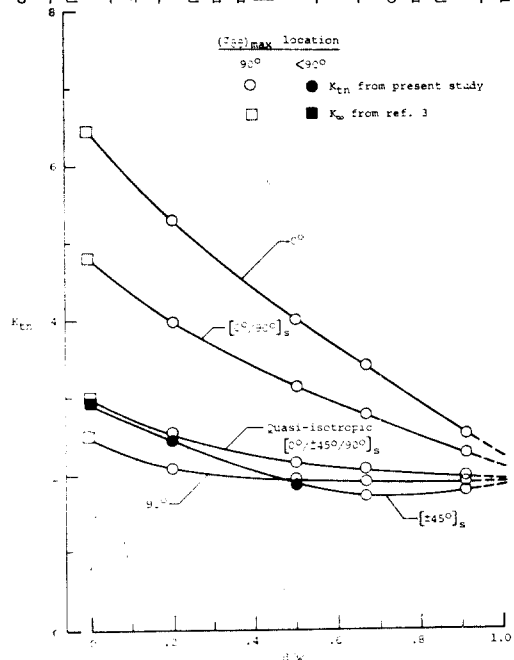


그림 1. 원공이 있는 유한 직교 이방성 적층의 응력 집중계수

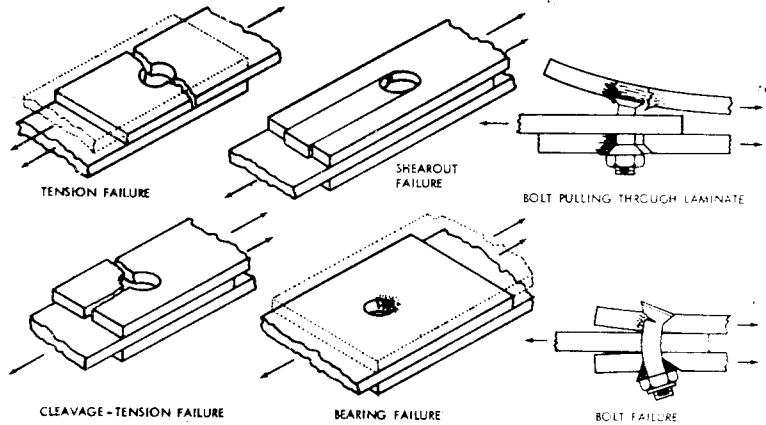


그림 2. 기계적 복합결합의 파손형태

분해 및 결합이 용이하고 결합부의 검사가 간단하며 높은 신뢰도와 함께 특별한 표면가공이 필요없다. 기계적 결합은 접착결합과는 달리 열 및 습기의 영향이 문제되지 않는다. 바람직하지 않은 점은 보울트나 핀으로 인한 무게의 증가를 가져오며 드릴구멍으로 인한 응력집중을 가져와 파손의 원인이 된다.

원공이 있는 유한 적교이방성적층판이 인장하중을 받을 때의 應力集中係數는 그림 1에 보인 바와 같이 섬유방향과 원공의 직경대 평판의 폭비(d/w)에 대한 변화가 있으며 자세한 수치적 자료는 문헌 [1, 2]에 나와 있다. 기계적 결합부의 파손형태(failure mode)는 금속재료의 경우와는 달리 그림 2에 보인바와 같이 여러가지 형태로 나타나며 적층(laminate)의 섬유방향이 어떻게 구성되었는지에 따라 순수 인장파손이나 전단파손등 각각 다르기 때문에 먼저 응력해석을 한 후에 적절한 파손이론을 적용하여 어떠한 거동을 보일 것인지를 판단해야 한다. 기계적 결합부의 파괴를 다루는 보고는 참고문헌 [3~9]에 나와 있음으로 참고하기 바란다.

복합재료를 사용할 경우의 기계적 결합에 대한 일반적인 방법은 금속을 사용할 경우와 비슷한 점이 많지만, 그림 3에 보인 바와 같이 몇 가지 고려할 점을 예를 들면, 그림 3(a)와 같이 구멍 주위로 연속적 섬유가 통과하도록 성형하는 것은 좋지 않다. 연속섬유와 하중 방향이 일

치하여 섬유들이 구멍 주위에 밀집되게 하고 수지(resin)가 많은 부분이 있어 취약하기 때문에 그림 3(b)와 같이 복합적층판에 그대로 드릴구멍을 뚫는 것이 좋다. 그림 3(c)와 같이 구멍주위를 강화시키고 싶을 때는 하중방향과 섬유방향에 같은 평판을 부착시켜 결합부의 강성만 높여 파손되기 쉬우며, 그림 3(d)와 같이  $[\pm 45^\circ]$  섬유방향을 사용함으로써 구멍주위를 부드럽게(softening)하는 것이 응력집중도 줄어 좋다고 볼 수 있다[10].

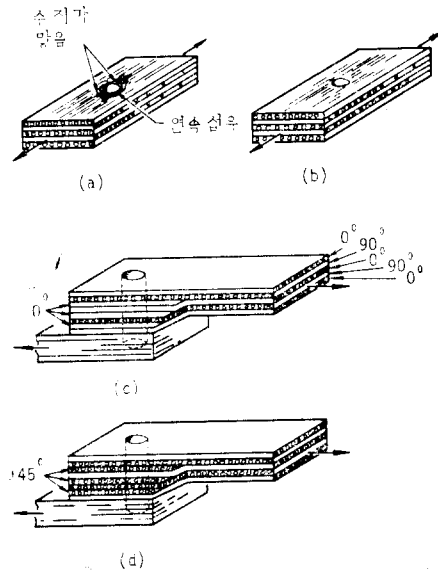


그림 3. 복합재료의 기계적 결합 예

### 3. 접착 결합(bonded joint)

복합재료의 접착결합은 구조의 경량화를 위한 효과를 성취하려고 많은 관심을 끌고 있다. 접착결합의 응용은 이제 주요구조 부분에 확대하려고 많은 연구가 진행중이며 이미 성공한 예도 많이 있다. 접착결합은 접착재를 사용하여 두개의 부품을 연결하는 것으로서 새로운 것은 아니지만 고성능의 접착재 개발과 함께 많은 활용이 기대되는 방법이다. 접착결합법의 장점으론 기계적 결합법에서와 같은 보울트, 리벳 혹은 핀을 사용하지 않기 때문에 그만큼 경량화할 수 있으며 드릴구멍으로 인한 기하학적 불연속을 초래하는 기계가공이 필요없기 때문에 응력집중을 유발하여 구조물을 약화시키지는 않는다. 접착

결합의 문제점은 분해 및 결합이 자주 필요한 부분에 곤란하며 접착부의 품질상태를 검사하기 어려운 점이 있다. 또한 열중이나 습기에 따라 접착제의 성능저하를 가져올 가능성이 높고, 신뢰도가 좀 떨어지고 있다. 더우기 접착결합을 하려면 피접착물의 표면을 완전히 세척해야하는 표면준비작업이 필요하다. 그러나 접착결합은 외형표면을 미끄럽게 할 수 있고 기계적 결합보다 구멍이 많은 구조일 경우에 결합공정을 신속히 할 수 있다.

접착결합을 할 때 고려해야할 섬유방향은 그림 4(a)에 보인 바와 같이 접착층에 접촉되어 있는 적층판의 섬유방향이 하중방향에 수직인 것은 섬유의 높은 강도 및 강성을 활용하지 못하고 있다. 그림 4(b)는 섬유방향이 하중방향과 일치하고 있어 좋은 설계방법이다. 섬유방향과 그

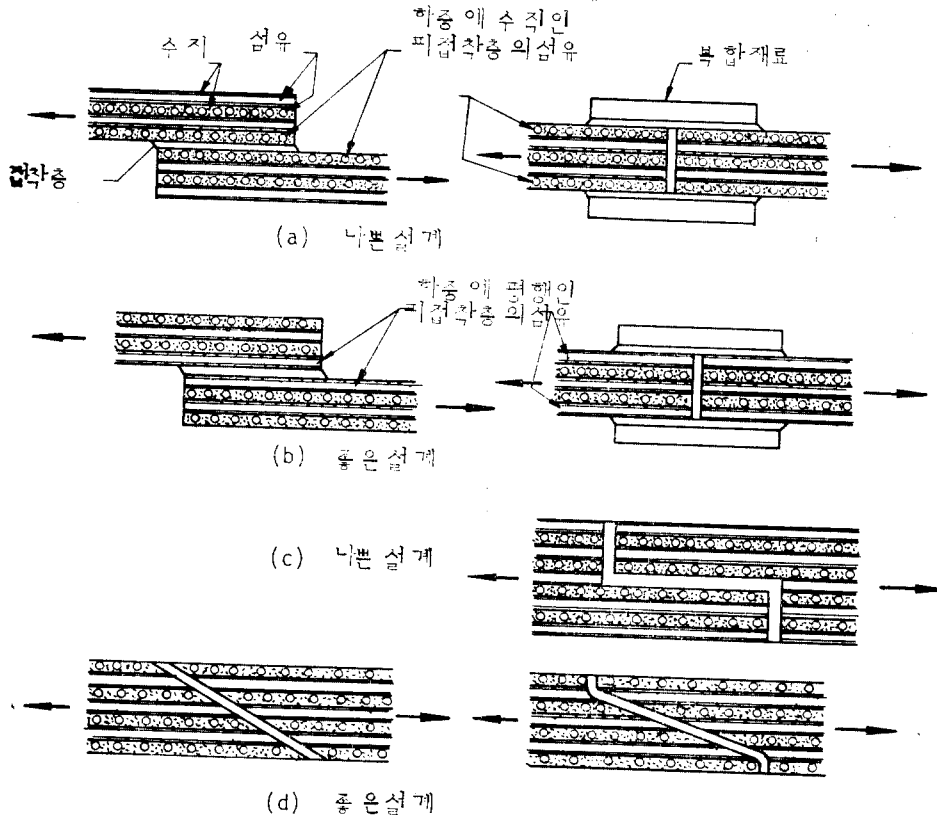


그림 4. 복합재료의 접착결합 예

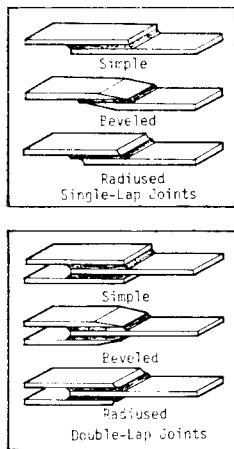


그림 5. 접착결합의 종류

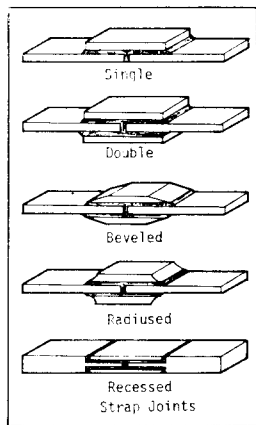


그림 6. 접착결합의 종류

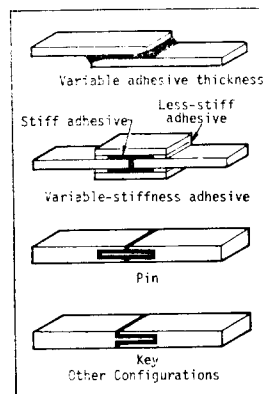
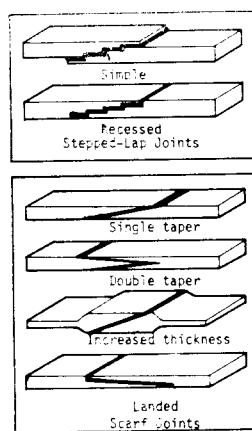


표 1. 상업용 접착제의 종류

*Thermosetting Adhesives*

Epoxy resins

- Epichlorohydrin-bisphenol A
- Cycloaliphatics
- Epoxy-novolacs
- Epoxy-nitriles
- Epoxy-phenolics
- Epoxy-polyamides
- Epoxy-polysulfides

Polyester resins

- Polyester-DAP
- Polyester-TAC

Phenolic resins

- Phenol-formaldehyde
- Vinyl-phenolics
- Nitrile-phenolics
- Polyamide-phenolics
- Resorcinol-formaldehyde
- Melamine-formaldehyde

Silicon resins

- Dimethyldichlorosilanes
- Phenyl-silicons
- Silicon-alkyds
- Silicon-epoxies
- Elastomeric silicons(RTV)

Polyimides

- Dianhydride-diamine(PI)
- Polybenzimid-azole(PBI)

*Thermoplastic Adhesives*

Acrylic resins

- Methylmethacrylate

Cellulosics

- Cellulose Acetate
- Acetate-butylate
- Cellulose nitrate
- Ethyl cellulose

Vinyl resins

- Acetal
- Acetate
- Alcohol
- Chloride-acetate

*Rubber-Base Adhesives*

Rubber resins

- Natural
- Reclaimed
- Butyl
- Butadiene-nitrile
- Butadiene-styrene
- Polysulfides

*Miscellaneous Adhesives*

Inorganic resins

- Sodium silicate
- Magnesium oxychloride
- Cement
- Plaster

Natural resins

- Asphalts
- Ester gum
- Rosin/casein

에 수직인 방향의 탄성계수 및 강도가 매우 다른 이방성을 생각하면 쉽게 이해할 수 있는 사실이다. 그림 4(c)는 미끄러운 표면이 요구될 경우에 사용되는 예로서 하중방향과 섬유방향의 일치한 층에서 꺾이어 접착층이 있어서 좋지 않으며, 접착층을 한층 올리든지 혹은 내려서 접착층에 이웃하는 피접착표면의 섬유방향을 하중방향과 일치시키는 것이 바람직스럽다. 그림 4(d)는 그림 4(c)의 방법에 비하면 섬유방향과 하중방향을 타협한 채택할 수 있는 방법이라 하겠다.

접착결합에 대한 광범한 연구는 소위 PABST 프로그램 [11]에 의하여 진행되었으며 응력해석에 관하여 흥미가 있는 독자는 문헌을 참조하길 바라며 본란에서는 전문적인 해석에 관한 것을 피하려 한다.

접착결합의 설계방법은 기계적 결합에 비하면 여러가지가 제안되어 있으며 결합효율을 비롯하여 파괴수명을 고려한 여러가지 변수인 재료의 성질, 하중의 종류등에 따라 어느 한가지를 아주 좋다고 지적할 수 없으며 각 경우에 따라 선택하는 수밖에 없다. 그림 5와 6은 대표적인 접착결합 설계방법으로 제안된 예를 보인 것이다. 그림 5는 결합부의 강도를 중요시할 때 사용되는 경우로서 접착층의 전단응력의 집중을 완화시키기 위하여 피접착물의 끝이 경사진 것과 또 반경을 갖은 것등 여러가지이며 가공의 가격문제등을 고려해서 너무 복잡한 형상은 피한다. 그림 6은 피접착물이 서로 겹치지 않고 단면의 경사를 이용하여 접착층을 크게하는 방법으로 된 통형 구조물체의 응용이 가능함을 알수 있다.

접착재의 종류를 표 1에 보인 바와 같이 종류가 다양하며 일반적으로 복합재료에 흔히 사용하는 것으로 epoxy 를 들 수 있으며 사용온도가 더 높은 것으로 polyimide 를 사용하기도 한다. 보통 접착층의 두께는 0.004-0.008 인치로 하면 최대의 결합효율을 가져올 수 있다.

#### 4. 결 언

복합재료를 이용하여 부품제작을 한 후 어떠

한 결합방법을 채택할 것인가를 결정할 때 고려해야할 점을 기계적 결합법과 접착결합법을 비교하여 검토하였다. 기계적 결합은 하중을 많이 받고 분해 및 결합이 자주 예상되는 부품에 채택해야할 것이며 복합재료의 특성을 고려하여 보강시에 부착하는 평판의 섬유방향은 가급적 드릴구멍주위를 부드럽게 하여 응력집중을 낮출 수 있으며 하중의 종류에 따라 적층의 섬유방향을 조절함으로써 응력집중을 조절할 수 있다. 드릴구멍 주위의 파손은 평판의 폭과 구멍의 직경등 기하학적 형상에 따라 다르며 섬유방향의 영향이 크게 작용하므로 강도해석을 할 경우에 응력해석을 한 후 허용응력등을 결정해야할 것이다.

접착결합법은 작업이 간단하나 신뢰도가 떨어지므로 하중을 많이 받는 구조물체의 사용에 주의할 요하며 설계방법도 매우 다양하게 제안되어 있어 선택함에 있어 하중 환경조건등을 점검해야할 것이다. 접착결합법은 드릴구멍같은 불연속성을 갖지 않기 때문에 응력집중이 생기지 않으나 접착층의 전단응력이 피접착층의 탄성계수, 접착층의 길이등 기하학적 형상에 따라 다르게 나타남으로 접착층의 분리가 일어나지 않도록 설계되어야 한다. 특히 복합재료의 이방성인 성질을 감안하여 접착층에 이웃하는 피접착층의 섬유방향에 주의해야 하며 층간응력이 파손에 미치는 영향을 고려하여 설계에 임해야 한다.

복합재료의 결합을 위한 수단으로서 가급적 접착결합법을 이용하려는 추세이며 그동안 많은 연구가 진행되었으나 아직도 신뢰도를 높이기 위한 연구보고서는 계속 나오고 있으며 기계적 결합을 함께 사용하는 것이 안전하다고 알려져 있다. 관심있는 독자들을 위하여 본 해설을 위해 직접 혹은 간접으로 인용된 대표적인 문헌을 부기한다.

#### 참 고 문 헌

1. C.S. Hong and John H. Crews, Jr., "Stress Concentration Factors for Finite Orthotropic

