

틸팅차량 차체의 복합재/알루미늄 접합을 위한 접착체결기법 Adhesive Joining Technique for Composite/Aluminum Joint in Carbody of Tilting Train

윤성호* 신광복** 한성호***
Yoon, Sung-Ho Shin, Kwang-Bok Han, Seong-Ho

ABSTRACT

Adhesive joining technique is considered as one of hot issues in developing advanced composite structures. The designer should be familiar with important guidelines of fundamental principles and ideas underlying the design and application of adhesive joints for a correct joint design. This study deals with the following characteristics of adhesive joining techniques: (1) design parameters the affect the performance of joining, (2) fundamental principles and design methods of joining, (3) adhesive selection, (4) surface pre-treatment of the adherand, and (6) test methods. The results would be used to predict the performance of adhesive joints subjected to a thermal aging.

1. 서론

철도차량의 경량화 및 고속화를 위해 개발되는 복합재 전두부를 알루미늄 차체와 결합하기 위해서는 기계적 체결 및 접착체결에 의한 접합공정이 필수적이다. 특히 접착체결은 최근 우수한 구조용 접착제들이 개발됨에 따라 리벳팅, 볼팅, 용접, 피닝 등의 기계적 체결방법과 마찬가지로 철도차량의 제작에 중요한 역할을 한다. 일반적으로 접착제는 각 부재들을 영구적으로 접합하거나 드릴링이나 볼트 체결을 위한 부재의 일시적 고정용, 또는 운용 중 받은 부재들의 손상을 보수하는데 적용할 수 있다. 특히 접착체결은 체결 부위에 큰 응력이나 반복하중이 작용되거나 얇은 부재들을 서로 접합해야 하는 경우에는 기계적 체결방법보다 유리하지만 접착강도의 분산이 심하고 신뢰성이 결여될 수 있기 때문에 작업시 접착공정 절차를 철저하게 관리하여야 한다. 접착제의 내구성과 접착강도는 접착부재의 표면처리방법에 따라 달라질 수 있지만 접착체결부에 정상적인 하중상태가 작용될 경우에는 통상적인 접착부재의 표면처리방법으로도 비교적 양호한 접착성능이 얻어진다. 그러나 접착부재의 표면에 그리스, 왁스 등의 오염물, 녹과 같은 산화막이 있는 경우에는 만족스러운 접착체결부에서의 접착효율을 기대하기 어렵다. 따라서 접착성능을 극대화하기 위해서는 접착제의 선정, 접착체결부의 표면처리에 대한 명확한 이해가 요구된다.

본 연구에서는 접착체결부의 성능에 영향을 주는 설계인자, 접착체결부의 설계방법, 접착제의 선정 방법과 취급시 주의사항, 접착부재의 표면처리방법, 접착체결부의 강도해석, 접착체결부의 기계적 특성 평가방법 등을 조사함으로써 향후 틸팅차량의 접합공정의 효율을 극대화할 수 있는 접착체결부의 설계지침을 확보하는데 목적이 있다.

* 금오공과대학교 기계공학부 교수, 정회원
** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

2. 접착체결을 이용한 접합공정

접착체결방법은 기계적 체결방법과 기본적으로는 유사한 형태이지만 기계적 체결방법에 비해 체결부의 무게감소, 매끈한 표면상태, 볼트나 리벳트의 장착을 위한 구멍가공으로 인한 구조효율 감소방지, 얇은 부재간의 체결 등에 유리하며 접착체결 후에도 접착부재 간의 열차단 효과 및 절연성을 얻을 수 있는 장점이 있다.

접착체결방법은 lap 체결, scarf 체결, 그리고 butt 체결의 세 종류로 구분할 수 있다. 그림 1에는 lap 체결과 scarf 체결에 관한 예가 나타나 있다. 그림 1(a)의 single lap 체결은 가장 간단한 형태이지만 하중작용시 접착부위에 하중 편심에 의한 굽힘모멘트가 생기고 접착면에는 수직인 인장응력이 발생하여 상대적으로 접착효율이 낮아진다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위해 (c)의 joggle lap 체결과 (d)의 double lap 체결을 적용하거나 lap 체결의 끝단에서의 응력집중을 줄이기 위해 (b)의 tapered lap 체결을 이용하기도 한다. 또한 하중편심도 작고 응력흐름도 원활한 (e)의 stepped lap 체결과 (f)의 수정된 double lap 체결 등을 사용하기도 한다. 특히 stepped lap 체결에서 단수를 많게 하는 경우에는 (g)와 (h)의 scarf lap 체결과 유사한 형태로 되며 단면적의 변화가 없기 때문에 충격하중 하에서도 우수한 접착성능을 얻을 수 있지만 기계가공이 곤란하고 접착작업시 높은 정밀도가 요구되는 단점을 가지고 있다. 그러나 접착제와 접착부재에 적합한 scarf 각도를 선정하는 경우 충분한 접착강도를 얻을 수 있기 때문에 비용에 큰 구애를 받지 않는 항공우주 구조물에 많이 사용된다.

3. 접착체결부의 설계인자

그림 2에는 접착과정에서의 여러 가지 요인에 의해 이론적인 접착강도와 실험적인 접착강도와의 차이를 유발하는 접착 저해요인이 나타나 있다. 이때 접착체결부에 파괴를 유발하는 최대하중에 의해 결정되는 접착강도는 접착제의 선정에서 가장 중요한 인자 중의 하나로서 실험적인 접착강도는 이론적인 접착강도와는 차이가 있다. 이론적인 접착강도는 접착제가 접착부재에 완전하게 젖지 않음이 원인이 되어 B의 수준으로 접착성능이 감소하며, 접착제의 고화 과정에서 생기는 잔류응력 또는 접착부재의 표면에 존재하는 결함에 의한 응력집중으로 인해 접착성능은 C의 수준으로 저하한다. 이때 잔류 접착강도는 실제 예상되는 접착강도이지만 시편의 형상이나 시험방법에 의한 영향으로 인해 접착강도는 D의 수준으로 감소한다.

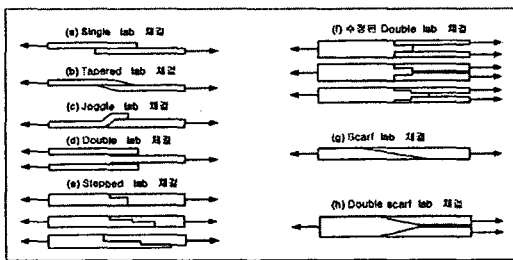


그림 1. Lap 접착체결 및 scarf 접착체결방법

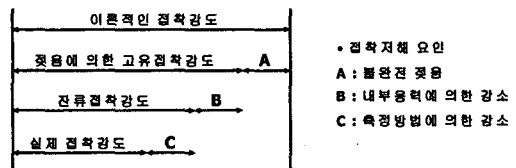


그림 2. 접착저해요인

접착부재는 표면에 요철이 있어 접착제를 도포할 경우 접착제가 요철의 구석까지 침투하지 않을 수가 있다. 접착제가 요철의 구석까지 유입되는 정도는 그림 3과 같은 요철부 형상에 대해 식(1)과 같이 표현된다.

$$Z^2 \propto \cos \theta \cdot \delta \cdot \frac{t}{\eta} \quad (1)$$

이때 Z 는 접착제의 유입되는 정도, θ 는 요철각도, δ 는 요철직경, t 는 경과시간, η 는 접착제의 점도를 나타낸다. 여기에서 보면 접착제의 점도가 낮을수록, 경과시간이 길수록, 요철직경이 클수록 접착부재의 요철에 접착제가 완전하게 유입됨을 알 수 있다.

표 1에는 접착부재의 종류와 표면처리방법에 따른 표면거칠기가 나타나 있다. 표면이 거친 접착부재에 접착제가 접착부재의 요철로 완전히 유입되면 겉보기 접착면적이 넓어져서 접착성능은 증가된다.

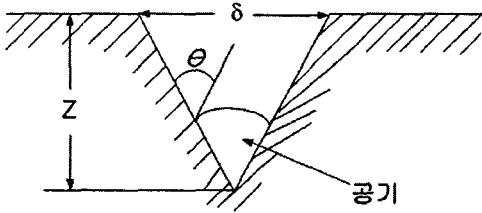


그림 3. 접착부재의 요철부 형상

표 1. 접착부재에 따른 표면거칠기

접착부재 종류	표면거칠기 (μm)
열간 압연판	12~100
냉간 압연판	0.4~12
드루잉, 압출	3~35
연마	0.4~0.6
샌드브라스팅	12~50
다이캐스팅	12~25

일반적으로 접착층 두께가 두꺼워지면 접착체결부의 인장강도와 전단강도는 저하되나 박리강도는 증가한다. 그림 4과 그림 5에는 각각 접착층 두께에 따른 접착체결부의 인장강도 및 박리강도 변화가 나타나 있다. 인장강도는 20~80 μm 정도의 접착층 두께에서는 충분한 접착체결부 강도를 얻을 수 있지만 이러한 접착층 두께를 초과하면 급격히 저하된다. 접착체결부의 박리강도는 접착층이 두꺼울수록 증가한다.

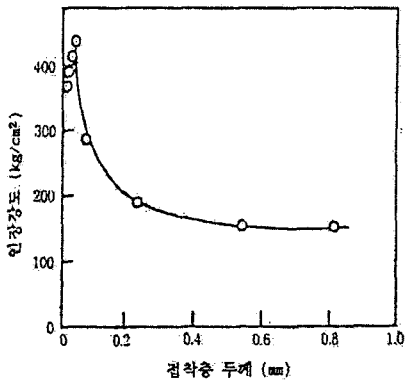


그림 4. 접착층 두께에 따른 인장강도 변화

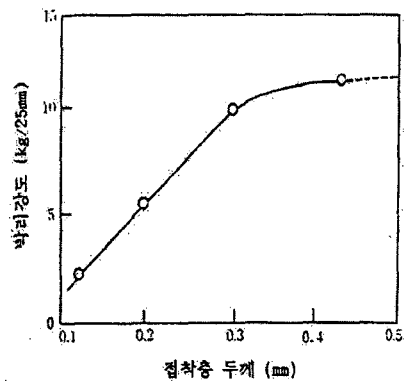


그림 5. 접착층 두께에 따른 박리강도 변화

접착력을 저하시키는 인자는 시간경과에 따른 접착제의 상변화, 온도변화, 잔류응력 등으로 이들의 크기는 접착제와 접착부재의 탄성계수 차이, 접착제와 접착부재의 열팽창 계수 차이, 접착층 두께, 접착부재의 표면상태 등에 따라 달라진다. 접착부재는 접착제에 비하여 열팽창계수가 작기 때문에 경화온도와 실온과의 차이가 클수록 열팽창계수의 차이에 의해 접착층의 내부에는 식(2)와 같은 잔류응력이 발생한다.

$$\sigma_i = E \times \Delta T \times \Delta \alpha \quad (2)$$

이때 σ_i 는 접착층의 단위면적당 잔류응력, E는 접착제의 탄성계수, ΔT 는 경화온도와 실온과의 차이, $\Delta\alpha$ 는 열팽창계수의 차이를 나타낸다. 여기에서 보면 잔류응력은 접착제의 탄성계수가 큰 경우 접착제의 열팽창계수가 작아도 커지기 때문에 잔류응력을 최소화시키기 위해서는 접착제의 열팽창계수를 접착부재의 열팽창계수와 비슷하게 하든지, 탄성계수가 작은 접착제를 선정하는 것이 바람직하다.

설계자는 접착체결부를 설계하는 경우 접착부재간의 인장강성을 조화시켜 가능한 높은 체결강도를 얻을 수 있도록 하여야 하며 접착층이 아닌 접착부재에서 접착체결부의 파손이 발생하도록 하여야 한다. 효율적인 접착체결부의 설계를 위해서는 접착체결부에 대한 응력분포에 대한 고찰이 필요하다. Double lap 체결부에서 lap 길이에 따른 접착층에서의 전단응력 분포는 식(3)에 의해 예측할 수 있으며 그림 6에는 lap 길이에 따른 전단응력 분포가 나타나 있다.

$$\tau = \frac{(P/l) cl [E_1 t_1 \cosh cx + E_2 t_2 \cosh c(l-x)]}{(E_1 t_1 + E_2 t_2) \sinh cl} \quad (3)$$

$$c^2 = (G_a/h) [(1/E_1 t_1) + (1/E_2 t_2)]$$

여기에서 보면 lap 끝단에서 접착층에 발생하는 전단응력이 매우 크게 나타나며 이들 응력집중의 크기는 lap 길이에 따라 달라진다. 이때 lap 길이가 긴 경우에는 평균전단응력은 감소하지만 lap 끝단에서의 응력집중의 정도는 반대로 증가한다. 접착강도를 lap 끝단에서의 전단응력에 의해 결정하는 경우 규정된 범위 이상으로 lap 길이를 증가시키더라도 접착면적의 증가만큼 접착강도의 증가는 기대하기 어렵다. 전단응력의 분포는 접착제의 전단탄성계수가 작고 접착층의 두께가 커서 상수 c가 작아지는 경우에는 lap 길이방향으로 균일하게 되며 접착부재의 탄성계수와 두께를 증가시켜도 상수 c는 작아지게 되어 lap 길이방향으로 균일하게 된다.

그림 7에는 접착층 내의 응력집중을 완화시키는 방법이 나타나 있다. 여기에서 보면 (a)와 같이 접착부재를 tapered, stepped, scarf 등의 형상으로 개선하거나, (b)와 같이 lap 끝단에 낮은 탄성계수의 접착제를 사용하거나, (c)와 같이 lap 끝단의 단면적 변화를 줄일 수 있도록 귀퉁이살을 부착한다.

4. 접착체결부의 설계방법

(a) 설계목표와 개념설계

체결하중과 체결시의 기하학적 제한조건을 고려하여 접착체결부의 설계개념을 설정하고 접착체결부에 대한 근사해와 강도역학적인 방법을 설계지침으로 활용하여 개념설계를 수행한다. 표준체결부 형상에 대해서는 접착면의 최대전단응력과 평균전단응력과의 비인 응력집중계수를 구한다. 만약 충분한 시험자료가 데이터베이스화 되어 있다면 응력집중계수는 수명요구조건을 고려하여 결정한다. 접착체결부를 포함한 구조물의 형상을 규명하기 위한 정보들은 유한요소 모델링에 적용될 수 있도록 수집되어야 한다.

(b) 설계하중의 결정

접착체결부의 하중을 결정하기 위해 작용하중들을 각각 분리하여 구조해석을 수행하고 접착체결부에 가장 치명적인 영향을 주는 하중 상태를 규명한다. 구조물에서 유사 체결형태가 반복되어 있는 경우라면 경제적인 측면에서 substructure 또는 superelement를 사용하여 접착체결부를 모델링하는 것이 바람직하다.

(c) 체결부 반복설계

(b)단계에서 얻어진 정보에 근거하여 접착체결부의 상세설계를 행한다. 어떤 영역에서의 하중이 (a) 단계에서 추정된 것보다 훨씬 낮은 경우 접착부재의 두께를 줄이거나 접착체결부의 형상을 단순화시킨다. (a)단계에서 제시된 설계지침을 활용하여 원하는 파손양상이 발생하도록 하며 각 접착체결부의 상세 유한요소 모델링을 형성하기 위한 충분한 정보를 얻는다.

(d) 체결부의 상세해석과 응력집중 규명

실제 구조물에 적용되는 접착체결부는 표준화되어 있지 않기 때문에 이론적으로 제시된 닫힘해로는 접착체결부의 국부적인 응력집중과 변형을 정량적으로 평가하기는 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 상세 유한요소 구조해석을 수행하여 접착체결부의 국부적인 응력집중과 변형을 정량적으로 평가하는 과정이 필요하다. 이 단계에서는 전체적인 구조해석을 반복하여 수행하고 접착체결부의 하중도 수정하는 절차가 행해진다. 접착체결부의 전단강도는 접착부재의 두께가 클수록 증가하며 lap 길이가 길수록 감소한다. 이 두 요인의 영향은 Bruyne's design factor f에 의해 식(4)와 같이 나타난다.

$$f = \sqrt{\frac{s}{l_0}} \tag{4}$$

여기에서 s는 접착부재 두께, l_0 는 overlap 길이를 나타낸다.

접착부재 두께, 접착제 종류, 접착층 두께 등의 시험조건이 동일한 경우 Bruyne's design factor f가 같다면 파괴시의 평균전단응력은 같아진다.

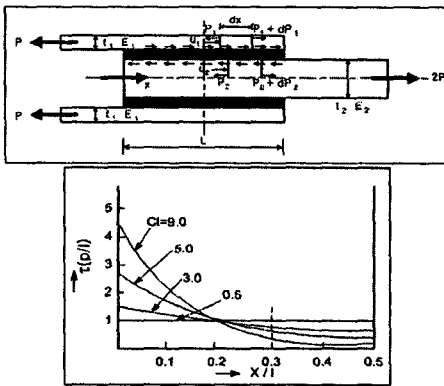


그림 6. Double lap 체결부의 전단응력분포

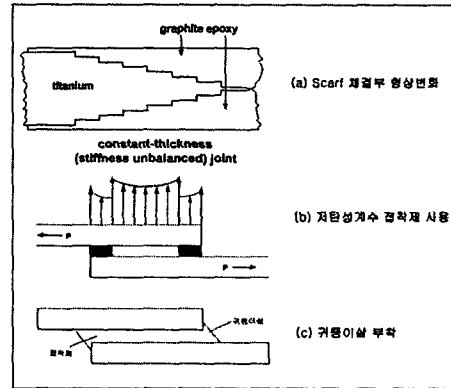


그림 7. 체결부의 응력집중 완화방법

5. 접착체결부의 표면처리

접착체결부의 강도는 접착제의 내부 응집력, 접착제와 접착부재간의 접착력에 의해 결정된다. 접착부재의 표면에는 그리이스, 왁스, 이형제 등의 오염물이 있거나 녹과 같은 산화막이 있는 경우 접착부재에 따라 적절한 표면처리방법을 적용해 이들을 완전하게 제거한 다음 접착을 수행해야 한다. 접착부재의 표면처리방법은 크게 degreasing, 기계적 표면처리, 화학적 표면처리 등으로 구분된다. Degreasing을 위해서는 접착표면에 존재하는 기름, 그리이스, 왁스, 이형제 등을 제거하여 접착제가 접착부재에 완전히 젖도록 하여 우수한 접착력을 갖도록 한다. 기름이나 그리이스는 trichlorethylene이나 tetrachlorethylene의 증기탕에 담구어 제거하거나 접착표면을 깨끗한 용제에 담긴 형깊이로 닦아낸다. 이때 용제는 접착제를 바르기 전에 완전히 증발시켜야 하며 접착표면에는 습기가 없도록 해야한다. 접착표면은 그리이스 세척액으로 닦고 깨끗한 물로 씻어낸 다음 오븐에서나 뜨거운 공기로 말린다. 표면상태가 거친 접착부재는 접착시 접착면적을 증가시킬 수 있기 때문에 연마된 접착부재의 경우보다 우수한 접착성능을 얻을 수 있다. 그러나 접착표면에 흠집을 낸다고 해서 접착성능이 향상되지는 않는다. 기계적 표면처리를 위해서는 사포질 등으로 표면을 다듬질한 후 적절한 용제를 사용하여 표면에 붙어 있는 미세 입자를 완전히 제거해야 한다. 녹과 같은 산화막이 형성된 금속부재의 표면은 샌드 브라스팅으로 조심스럽게 표면처리를 한다. Degreasing과 기계적 표면처리는 대부분의

접착체결에 적용되는 방법이지만 체결부 강도의 극대화, 재현성, 노화방지를 얻기 위해서는 화학적 표면처리가 필요하다. 화학적 표면처리를 수행하기 위해서는 화학약품을 다루게 되기 때문에 화학약품을 배합하거나 취급시에는 보안경이나 장갑을 착용하여 안전에 유의해야 한다. 이때 화학약품의 적절하지 못한 배합은 화학적 표면처리를 하기 전보다 접착성능을 저하시킬 우려가 있기 때문에 주의한다.

6. 접착체결부의 평가방법

접착체결부의 시험결과는 접착과정이 행해진 상태에 따라 크게 달라질 수 있기 때문에 제작자와 사용자가 공히 인정한 접착절차의 규정이 필요하며 이에 는 다음의 사항들이 포함되어 있어야 한다.

첫째, 접착제를 적용하기 전에 행해지는 접착부재의 표면처리, 접착부재의 세척 및 건조, 특수표면처리 방법이 명시되어야 한다. 둘째, 접착제의 혼합방법에 대한 절차가 명시되어야 한다. 셋째, 접착층 두께, 코팅방법, 코팅시의 건조조건 등의 접착제 적용조건이 명시되어야 한다. 넷째, 온도와 상대습도 등의 작업조건이 명시되어야 한다. 다섯째, 작용압력크기, 압력작용시간, 압력작용방법, 온도상승속도, 경화온도 등의 조건이 명시되어야 하며 특히 경화온도는 접착부위에 가해지는 온도인자 대기 중의 온도인자의 여부가 명시되어야 한다.

이상과 같은 접착절차를 포함하고 있는 표준화된 시험규격은 설계자, 제작자, 사용자 간의 의사를 전달하는 합리적이고 규칙적인 절차로서 접착제 제작사에서 제공하는 자료처럼 간단한 형태부터 항공회사, 국가공인기관, 국방관련기관에서 만든 매우 복잡한 형태까지 여러 가지가 있다. 접착체결부의 성능을 정량적으로 평가하기 위해서는 ASTM 등의 공인기관에서 제시하고 있는 표준화된 시험규격이 필수적이다.

7. 결 론

본 연구에서는 철도차량의 접합공정의 효율을 극대화할 수 있는 접착체결부의 설계지침을 확보하기 위해 접착체결부에 영향을 미치는 설계인자, 접착체결부의 설계방법 및 설계지침, 접착제 선정방법, 접착부재의 표면처리, 접착체결부의 기계적 특성 평가방법을 조사하였다. 특히 접착체결부는 접착부재간의 강성의 차이에 의해 응력집중이 발생하기 때문에 가능한 응력집중을 줄일 수 있는 접착체결 형태가 바람직하다. 체결부의 설계를 위해서는 목적, 예상하중, 설계제한조건, 그리고 비용 등을 고려하여 적절한 방법이 선택되어야 한다. 접착제의 선정을 위해서는 접착체결부에 작용되는 하중상태, 운용 중의 환경조건, 실용성 등을 고려하여야 하며 접착공정에 따라 달라질 수 있는 접착체결부의 성능을 평가하기 위해서는 공인기관에서 제시하고 있는 표준화된 시험규격을 적용하여야 한다.

후 기

본 연구는 철도청 철도기술연구개발사업으로 지원된 “철도차량의 FRP 전두부와 알루미늄 차체와의 접합방안 연구”과제의 연구결과의 일부입니다.