

구조접착이음의 접합부 강도평가

Stength Evaluation for Bonded Structural Adhesive

이 원, 정 의 섭
W. Yi, E. S. Jeong



이 원
· 정회원
· 1955년 3월생
· 고체역학(피로, 파괴역학)
· 숭실대



정 의 섭
· 정회원
· 1962년 1월생
· 고체역학(파괴역학)
· 산업기술정보원

성향상을 어느 정도 만족할 수 있는 점으로 볼 때 「구조접착」의 이용에 대한 관심이 고조되고 있다. 또 미래지향적인 관점에서 비강도가 높은 알루미늄 합금이나 복합재료(FRP)를 차체구조에 적용하는 방안도 기대를 모으고 있으며 이미 실험단계를 끝내고 응용단계에 돌입한 부분도 있다¹⁾.

「구조접착」이란 용어는 자동차 차체의 주된 접합수단인 스폿용접(spot welded)을 대신하여 접착접합을 이용하고자 하는 시대적인 흐름으로부터 생겨나게 되었다. 자동차 산업계에서 스폿용접에 의한 접합은 정적하중, 피로하중, 충격하중 등 각종 하중을 박강 판간에 전달할 수 있어 충분히 신뢰할 수 있는 접합법이며, 생산성과 경제성에 대한 요구도 상당한 수준까지 만족하고 있다.²⁾

현재 사용되고 있는 강판을 대신하여 신재료를 사용하는 경우 궁극적으로는 접합법과 접합부의 강도가 문제된다. FRP를 이용하더라도 볼트 등을 이용한 기계적 결합으로는 경량화를 기대하기 어렵고 FRP/FRP접착 또는 FRP/강판의 접착을 선택하지 않을 수 없다. 지금까지 자동차에 적용되어 온 접착 또는 FRP의 활용은 부하가 크게 걸리지 않는

1. 머리말

자동차 산업은 지구환경문제, 에너지문제, 안전성문제와 같은 사회적 요구와 고성능화, 고급화, 쾌적성, 경제성, 장수명 등을 추구하는 사용자 측의 다양한 요구에 직면하고 있다. 이러한 자동차의 현안문제는 그림1과 같다. 이와 같은 배경으로부터 차체구조의 경량화 기술에 관한 여러 가지 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 연비개선을 위한 경량화, 안전성강화 및 피로수명을 향상하기 위한 차체강도 향상, 저진동 문제와 연결된 강

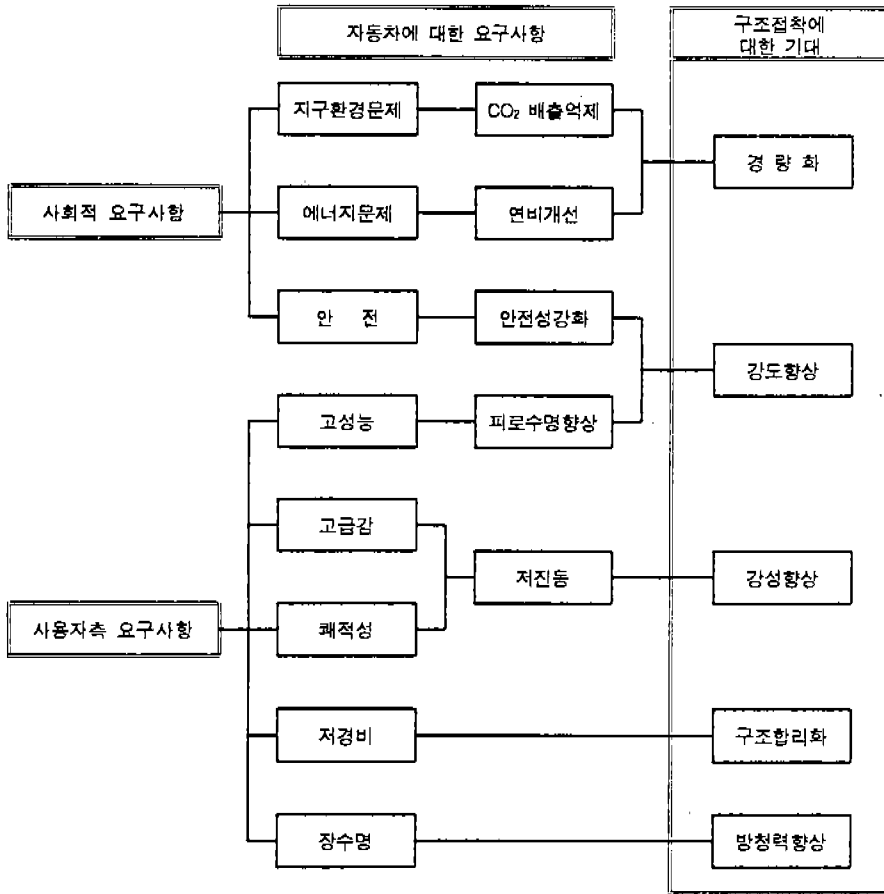


그림 1 자동차에 대한 요구사항과 구조접착에 대한 기대

내외장 부품에 제한적으로 사용되어 왔지만 구조부재에 대한 적용을 목적으로 한 접착이음의 강도시험법과 강도평가법의 확립이 앞으로의 중요한 과제라고 생각된다.

자동차 차체의 접합에 있어서 접착접합을 활용하는 방법으로는 스폿용접과 접착을 병용하는 방법(weld bond 등), 스폿용접을 대신하여 단독으로 접착접합을 사용하는 방법, 접착작업의 편의상 스폿용접을 임시적, 부분적으로 사용하는 방법 등이 있다.

접착접합 기술은 재료가 달성해야 할 역할을 내면적으로 지원하는, 드러나지 않는 이용 기술의 하나이다. 그러나 최종적인 제품

이 되는 기계·구조물의 입장에서 보면 접착이음의 강도가 역학, 화학, 물성, 사용환경 등과 같은 복잡한 인자의 지배를 받고 있으며, 이 중 역학적 관점에서 볼 때 계면단의 응력특이성 등과 같은 여러가지 문제가 제기되어 간단하게 평가되지 않는다. 따라서 이용 기술의 개발이 이루어지지 않고서는 재료의 역할을 충분히 달성할 수 없다. 뿐만 아니라 제품의 파손, 파괴 등과 같이 강도적인 문제는 대부분 접합부에서 발생한다. 또 접합부는 강성면에서 취약할 뿐만 아니라 구조적인 불연속부를 이루고 있으므로 강도해석이나 구조해석상 어려운 점이 많다. 접합부를

단순하게 취급하므로 인하여 구조 전체의 신뢰성이나 성능에 문제가 발생하게 되며 신제품개발이나 품질개선, 안전이나 유지보수를 위해서도 접착접합 기술의 역할은 중요하다고 생각된다³⁾.

이러한 관점에서 볼 때 자동차 산업에 있어서 접착접합은 앞으로 끊임없이 계속되는 구조경량화에 대한 요구와 다각적인 품질향상 요구를 만족시킬 수 있을 뿐만 아니라, 특히 박강판, 알루미늄 합금, 복합재료, 엔지니어링 플라스틱, 세라믹스 등의 이용을 높이고, 새로운 설계 방법이 요구되는 기술이라 생각된다.

이 글에서는 이러한 접착접합 기술의 활용 측면에서 구조접착접합의 현재 상황과, 구조접착이음의 적용을 확대하기 위해 요구되는 접착접합이음의 응력해석과 강도평가법에 대한 이해를 돕고자 한다.

2. 자동차용 구조접착접합

2.1 새로운 자동차용 강판과 접착특성

자동차 차체에 있어서 주요한 과제는 내식성 향상과 경량화이다. 내식성 향상의 대책으로 구조의 개량, 고내식성 도료의 개발, 도료막 박리를 방지하는 새로운 인산염 처리기술의 개발 등에 연구가 확대되고 있는데 최종적으로는 강판 자체의 내식성을 향상시키는 것으로 여러가지 표면처리 강판이 사용되어 왔다. 경량화 대책으로는 일부 플라스틱의 사용이 추진되어 왔지만 주요 부분은 강판의 사용이 불가피하며, 따라서 강판의 경량화 즉, 고강도화의 연구가 진행되어 각종 고강도 박강판이 개발·실용화 되었다.

구조강판의 접합방법으로는 스폿용접이 많이 사용되며, 강판의 스폿용접 특성에 관해서는 탄소량에 의해 지배된다고 알려져 있어

각종 탄소당량식이 제안되어 있다. 그러나 최근 개발된 고탄소 고강도 강판은 성형성에 대해서는 어느정도 보완되었지만 스폿용접성은 떨어진다. 그러므로 스폿용접을 최소화시키고 접착과 병행한 접합법이 필요하다.

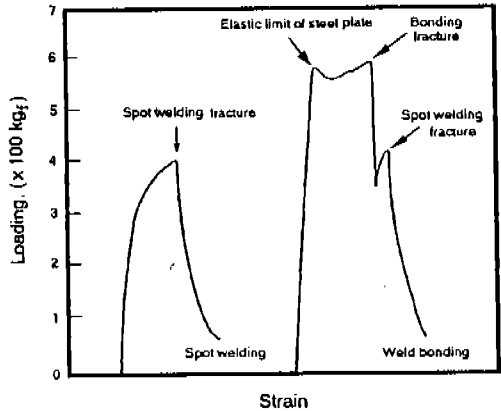


그림 2 스폿용접과 웰드본드의 파단곡선 (0.8mm 두께의 강판에 의한 인장전단 시험)

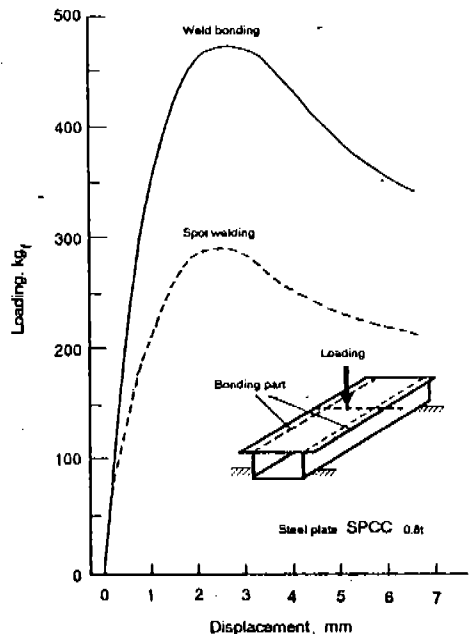


그림 3 상자형부재의 좌굴강도

자동차 차체의 각 부위에 대해서 결합강성이나 차체 강성의 향상 등을 목적으로 스폿용접과 접착을 병행한 웰드본드법이 개발되어 활용되고 있다. 그림2, 3과 같이 스폿용접만을 사용한 경우보다 접착접합과 스폿용접을 병행한 경우의 접합강도가 크다는 것을 확인할 수 있다. 박강판 구조에서는 접착층의 전단변형보다 판의 외면 굽힘 변형쪽이 구조물 전체의 변형에 영향을 주기 때문에 접착접합 구조물이 용접구조물보다 고강성을 갖는다고 보고되어 있다.⁴⁾ 또한 재료의 비선형성과 비대칭 형상의 영향으로 하중과 변형간에는 그림3과 같이 비선형 관계가 나타난다. 이러한 접착특성을 자동차 차체의 구조에 적용할 경우 강성향상은 물론 충돌 안전성의 개선에도 상당한 도움이 된다.

최근 가공기술, 용접기술, 도장기술 등 주변 기술이 발달함에 따라 접착접합기술에 대한 관심이 급격히 높아지고 있다. 이것은 두 가지면에서 생각할 수 있는데, 하나는 용접성이 극히 떨어지는 고강도 박강판에 용접을 대신하여 적용할 수 있을 뿐만 아니라 여러 가지 이종재료 및 FRP와 같은 복합재료에 대한 접합방법으로 기대가 크다는 것이고, 또 다른 측면은 접착이 면접합이라는 것을 이용하여 판두께 감소에 따른 강성 및 충격성 등의 구조강도 저하를 막아준다는 것이다.

2.2 구조접착 실용화를 위한 과제

자동차 산업에 있어서 지금까지 구조접착의 사용은 접착제의 시공성과 강도와의 관계나 사용환경에 대한 신뢰성 및 접착접합 강도의 정량화 등이 충분히 이루어지지 않아 차량개발 단계에서 국부적으로 적용되어 왔다.

그러나 최근에는 고강성화·경량화·품질향

상 등의 요구로 접착접합의 장점을 적극적으로 활용하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 구조접착의 실용화 및 적용성을 확대하기 위해서는 다음의 세 가지 관점에서 검토할 필요가 있다.

- (1) 경년신뢰성의 확보
- (2) 제조라인에서의 적용성 확보
- (3) 접착접합에 대한 장점의 명확성

이 중에서 경년신뢰성의 확보를 위해서는 강판의 종류와 접착강도, 강판의 두께와 접착강도, 접착층 두께와 접착강도, 잔류응력과 접착강도, 비파괴검사법 등이 검토되어야 할 과제다.

그 밖의 접착접합의 과제와 적용상의 유의점은 표 1과 같다⁵⁾.

2.3 구조접착의 효과 및 적용예

자동차에 적용되고 있는 접착구조로는 그림4와 같이 차체강성의 향상·내구성의 향상·스폿용접흔적의 제거에 의한 외관 향상·이종재료의 접합 등 여러 가지 효과가 기대된다.

그림5는 차체구조의 중심이 되는 부재 및 박판류의 접합에 대해 접착이음과 스폿용접을 병용하여 사용한 예이다. 스폿용접만의 차체에 비해 비틀림강성이 41%, 굽힘강성이 18% 향상되었다. 또, 차체강성 향상의 결과로 각 공진주파수가 8~20% 상승한 보고도 있다⁶⁾.

그림6은 루프레일(roof rail)에 접착을 이용하여 구조의 합리화를 이룬 예이다. 종래의 구조에서는 구조판넬을 포함하여 세 부품으로 구성되어 있지만, 접착에 의한 구조에서는 루프판넬(roof panel)과 루프레일이너(roof rail inner)의 두 부품으로 폐단면을 형성하여 강성을 증가시키고 경량화가 가능하게 한 것이다¹⁾.

그림7은 센터필러(center pillar)의 상하결

표 1 구조접착 실용화를 위한 과제와 검토사항

공 정		검 토 과 제	검 토 사 항
차 체 공 정	A. 도포공정	<ul style="list-style-type: none"> 강판의 종류 강판의 성질, 두께 기름의 종류와 양 접착제의 유동성 토출량(정량도포성) 노즐에서의 흘러내림성 	<ul style="list-style-type: none"> 강판의 종류와 접착강도 강판의 성질, 두께와 접착강도 기름의 종류·양과 접착강도 도포면의 상태, 각도와 정착성 접착제 점도와 온도 접착제 물성과 유동성
	B. 접착공정	<ul style="list-style-type: none"> 접착제의 흘러내림성 접착제의 세정성 접착두께의 산포 접착길이(접착면적) 	<ul style="list-style-type: none"> 흘러내림에 대한 대책 세정방법검토, 접착제 개발 접착제 두께와 접착강도 접착면적과 접착강도
	C. 용접공정	<ul style="list-style-type: none"> 접착체의 전성, 연성 접착부의 스폿용접성 용접시 접착체의 가연성 용접시의 발연, 냄새 용접열에 의한 접착부의 경화 스폿 팁의 마모 스폿부의 방청성 저하 스폿부의 변형률의 확대 저온 스폿용접성(온도의존성) 	<ul style="list-style-type: none"> 가압력과 전성, 연성 스폿용접성→최적용접조건 연소성(불연성접착제개발) 인체에 대한 영향과 발연대책 용접열의 영향조사 팁의 손상대책 스폿용접과 방청성 접착두께와 스폿변형률 저온 스폿용접성→최적용접조건
도 장 공 정	D. 전처리공정	<ul style="list-style-type: none"> 접착제의 유실 접착제의 처리액 오염성 접착제의 내처리액성 	<ul style="list-style-type: none"> 물성과 쏟아짐 접착제조성과 처리액오염성의 관계 접착제의 내처리액성(내약품성)
	E. 경화공정	<ul style="list-style-type: none"> 경화온도, 시간 경화시의 유동성, 흘러내림 경화수축에 의한 부품 변형률 경화수축에 의한 잔류응력 미경화된 상태에서의 방치 	<ul style="list-style-type: none"> 경화온도·시간과 접착강도 경화온도·시간과 유동성 접착제의 물성과 경화변형률 잔류응력과 접착강도 미경화방치조건과 접착강도
F. 기타		<ul style="list-style-type: none"> 저장 중의 열화(저장안정성) 비파괴검사법 	<ul style="list-style-type: none"> 보관조건과 접착제물성, 강도 비파괴검사법의 검토

합부에 접착을 이용한 예이다. 스폿용접판의 경우에 비해서 피로수명이 10배이상 향상되고 특히 결합강성은 30% 향상되었다¹⁾.

이외에도 접착이음의 특징을 수지부품의 접착이나 이종재료의 접착 등에 적용한 예는 많이 있다^{4),7)}.

3. 접착이음의 응력해석과 강도평가

3.1 응력해석방법

접착접합을 구조체에 응용하기 위해서는 접착이음의 응력해석과 강도평가 기술의 개발은 불가피하게 되었다. 접착이음에 대한 응력해석 방법은 크게 재료역학, 탄성론에

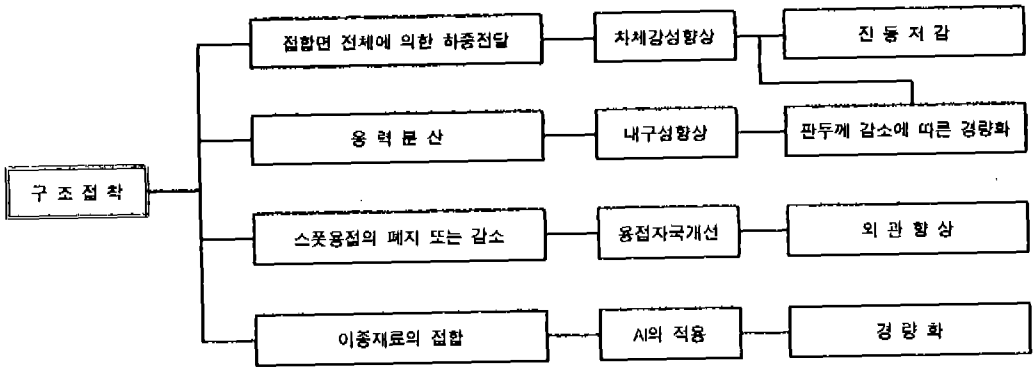


그림 4 접착구조의 효과

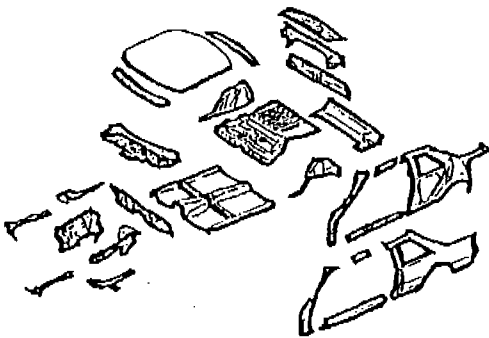


그림 5 차체 접합부에서의 응용⁶⁾

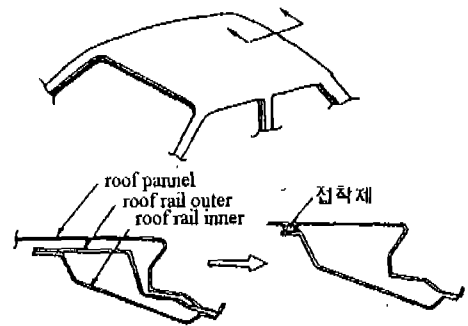


그림 6 루프레이일(roof rail)에의 응용¹⁾

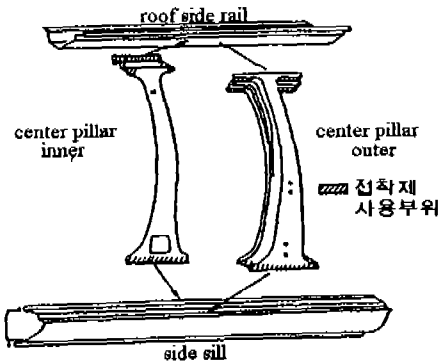


그림 7 센터필러(center pillar)에의 응용¹⁾

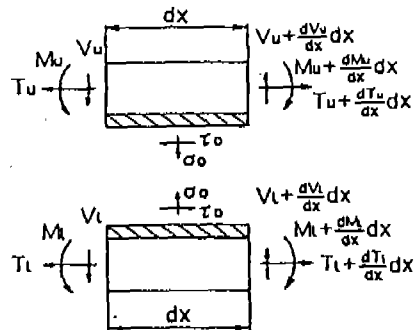


그림 8 접합부의 평형⁹⁾

기초한 이론해석 및 유한요소법, 경계요소법 등을 이용한 수치해석의 두 가지로 나눌 수 있다.

접착이음에 대한 연구로서 재료역학에 기초한 응력해석으로는 1938년 Volkerson⁸⁾이 단순접치기 이음에 대해서 접착층의 전단변형만을 고려하여 해석을 수행하였고, 그림8과 같이 Goland⁹⁾는 접착단부에 발생하는 굽힘모멘트를 함께 고려하여 해석한 바 있다. 또한 Lubkin¹⁰⁾, Hart-Smith¹¹⁾, Delale¹²⁾, 能野¹³⁾ 등에 의해 각종 이음의 응력분포가 해석됨으로 비선형 접착제 재료 및 시간의존성 등을 고려한 해석도 수행되었다.

탄성론에 기초한 응력해석으로는 澤¹⁴⁾은 맞대기 겹치기 이음(2차원, 3차원), 볼트-접착 병용이음에 대해 복소응력함수를 이용하여 해석을 수행한 바 있다.

수치해석에 의한 방법은 주로 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM)에 의해서 수행되었으며, FEM에 의한 해석으로는 Wooley¹⁵⁾에 의해 그림9와 같이 Goland해석의 타당성이 확인되었고, 피착체 강성, 치수 등의 파라미터를 바꾸어 해석을 수행하여 각 파라미터와 응력분포의 관계를 밝힌바 있다. 이후 山口¹⁶⁾, 池上¹⁷⁾ 등에 의해 많은 해석이 수행되어 단

순접치기이음을 중심으로 각종 형상의 이음해석, 이종재료이음의 해석, 열응력해석 등이 수행되었다.

BEM에 의한 해석결과는 FEM에 비해 상대적으로 적지만, 이종재료 접착계면의 완전접합조건을 만족하는 응력해석이 가능하므로 FEM보다 유력한 해석방법이라 보고되었으며, Yuuki¹⁸⁾, 西川¹⁹⁾, 이원²⁰⁾ 등에 의해 접착 접합이음에 대한 응력해석이 수행된 바 있다. 그림10은 경계요소법에 의한 이종재료 접합 잔류열응력 해석결과를 나타낸 것이다.

이상은 접착단부의 응력특이성 혹은 균열

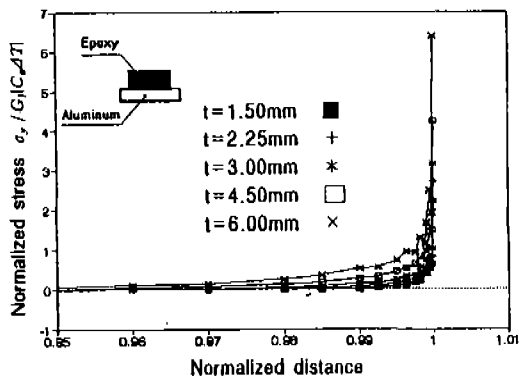


그림 10 계면수직응력과 접착두께와의 관계²⁰⁾

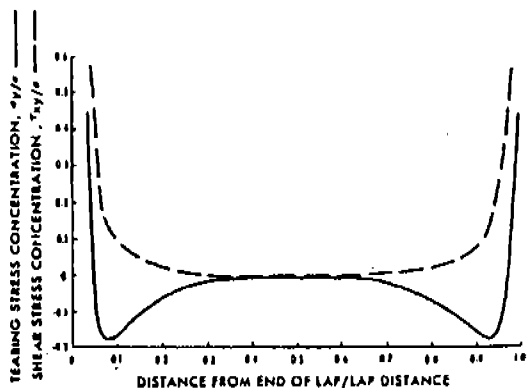


그림 9 Wooley의 해석결과 예¹⁵⁾

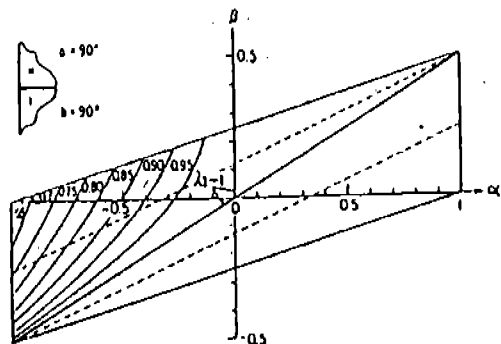


그림 11 접합계면단부의 응력특이성²¹⁾

의 존재를 고려하지 않고 접착층을 중심으로 한 응력분포의 해석 흐름에 대하여 서술하였다. 접착부와 같은 재료상수의 불연속으로 계면단부에서 현저한 응력집중, 응력특이성이 존재하는 것이 지적되어 Bogy²¹⁾에 의해 응력특이성의 해석이 수행되었다. 그림 11은 계면단의 응력특이성과 재료상수와의 관계를 나타낸 것이다. 또 접합계면에 계면균열이 존재하는 경우 파괴역학에 의한 해석이 필요하다. 이러한 계면균열의 탄성해석에 대해서는 Erdogan²²⁾, Rice²³⁾, Sih²⁴⁾, 結城²⁵⁾에 의해 기초적인 연구가 수행되었다.

3.2 강도평가의 중요성

현재 구조부재에 있어서 접착층의 강도시험은 수행되고 있지만, 사용상태에 따른 구조접착이음강도의 평가에는 이음의 형상이나 접착체의 종류, 두께 등 접착강도에 영향을 주는 요인이 복잡하기 때문에 이러한 인자를 모두 고려하여 평가하는 것이 곤란하여 접착이음 강도평가법이 확립되어 있지 않은 실정이다. 따라서 각 강도평가법의 적용범위를 명확히 하는 것이 가장 중요하며, 접착강도의 영향 인자에 대한 통일적 평가방법의 확립이 요구된다.

자동차 차체의 개발에 있어서 접착부 강도 평가의 정밀도를 향상시키는 것은 설계단계, 시작단계의 양면에서 많은 효과를 기대할 수 있다. 예를 들면 설계단계에서는 내구성에 대한 신뢰성의 향상이나 구조의 최적화, 시작단계에서는 시행오차의 횟수를 줄이거나 판정기준에 대한 안전율의 적정화 등이 가능하다. 결과적으로 개발기간의 단축과 비용의 절감, 신뢰성의 향상이 얻어짐과 더불어 차체의 경량화나 강도-강성 향상에 기여하고, 전체적으로는 연비의 개선, 안전성 강화, 고품질·고성능 자동차의 단기개발이 가능하게 된다.

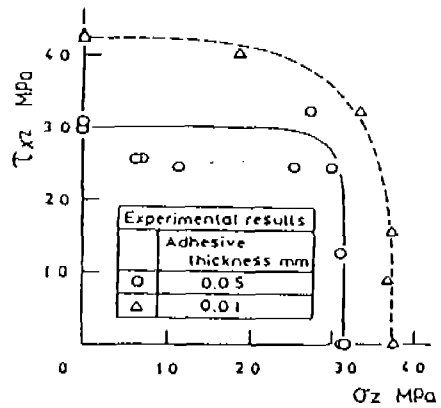


그림 12 접착강도법칙의 측정예²⁶⁾

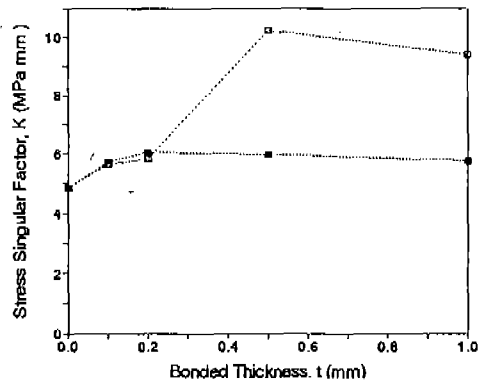


그림 13 접착층 두께와 응력특이성계수와의 관계²⁹⁾

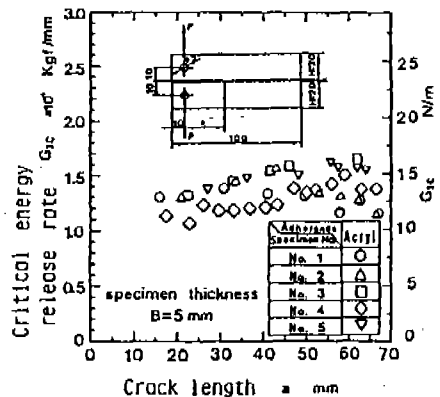


그림 14 DCB시험편의 파괴인성²⁵⁾

3.3 강도평가방법

강도평가방법을 크게 나누면 다음과 같다.

- (1) 최대응력에 의한 방법
- (2) 에너지원리에 의한 방법
- (3) 응력특이성 파라미터에 의한 방법
- (4) 파괴역학적 파라미터에 의한 방법

최대응력에 의한 방법의 예로는 池上²⁶⁾가 접착이음을 피착체, 접착층, 접착체면의 세 가지로 나누어 피착체와 접착층은 Mises의 상당응력으로 평가하는 것을 제안하고, 이종 재료를 포함한 금속접착이음의 강도평가 및 FRP접착이음에도 적용한 바 있다. 그림12는 피착체 두께에 따른 접착강도의 측정예를 나타낸 것이다.

에너지원리에 의한 방법의 예로는 河田²⁷⁾가 접착이음의 박리강도, 전단강도의 양자에 대하여 에너지균형(energy balance)에 따른 평가방법을 제안하였다.

服部²⁸⁾, 이원²⁹⁾ 등은 응력특이장 파라미터를 이용한 강도평가법을 제안하고, 전자디바이스의 계면강도 및 구조접착이음에 대하여 적용하였다. 그림13은 응력특이성파라미터 해석예를 나타낸 것이다.

파괴역학적 파라미터에 의한 강도평가방법으로는 結城²⁵⁾가 계면균열의 응력세기계수를 이용하여 계면강도 평가법을 제안하였으며, 특히 크랙진전의 평가기준으로 σ_0 기준을 제안하였다. 또 크랙전파에 대해서도 에너지해방률 g 에 의해 평가될 수 있음을 나타내었다. 그림14는 에너지해방률과 크랙길이에 대한 DCB(double-cantilevers beam) 시편에 대한 파괴인성을 해석한 예이다.

4. 맺음말

자동차 차체에 구조접착접합을 적용하는 것은 시대적인 흐름으로 볼때 지극히 당연한

것으로 생각된다. 자동차는 머리말에서 언급한 사회적 요구와 사용자측 요구 그리고 기술적인 측면이 서로 미묘한 조화를 이루면서 만들어진다. 구조접착접합을 적용하는 기술상의 변혁은 처음에는 조금씩 점진적으로, 주의 깊게 진행하는 것이 바람직할 것이다. 검토해야 할 여러 가지 문제가 쌓여있고, 앞으로의 기술개발을 큰 과제로 하고 있지만, 자동차 기술을 담당하고 있는 기술인들의 능력으로 볼 때 대부분의 문제들은 해결가능할 것으로 전망된다.

구조접착접합은 용접성이 떨어지는 고강도 박강판이나 이종재료·복합재료의 접합법으로 기대가 크다는 것을 전반적으로 살펴보았다. 또한 박강판, 알루미늄합금, 엔지니어링 프라스틱, 세라믹스 등의 이용도를 높이기 위해서도 접착접합의 응력해석과 강도평가는 필수적이므로 접착접합에 대한 강도평가의 확립이 시급한 실정이다.

따라서 접착접합 기술의 활용측면에서 「구조접착」의 신뢰성을 높이기 위한 접착이음의 응력해석과 강도평가법에 대한 관심과 연구개발을 통해 현재의 접착강도평가 문제를 풀어나가야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 三浦, 小野, 城井, 畑, “自動車車體の輕量化手法,” 自動車技術, Vol.38, No.4, pp. 446~453, 1984.
2. 中侯, “自動車組立生産技術者かり見な接着技術の展望と課題,” 日本接着協會誌, Vol.26, No.6, pp.232~238, 1990.
3. 鈴木, 三宅, “構造接着劑の信頼性検討(耐水劣化メカニズムについての一考察),” 日本機械學會材料力學 講演會論文集, No.900-86, pp. 254, 1990.

4. 芦田, “自動車用接着剤の動向,” 日本接着協会誌, Vol.25, No.12, pp. 572~578, 1989.
5. 藤當, “自動車, 電機に見る接着剤活用術,” ニツケイ・ニコマテリアルズ, Vol.10, No.22, pp.11, 1990.
6. 丹羽, “鋼板接着継手の試験方法と静的強度,” 自動車技術會 新時代を擔う構造接着技術, pp.12~19, 1991.
7. 田野, “自動車における接着,” 接着, Vol. 33, No.2, pp. 71~77, 1989.
8. Volkersen, V. O., “Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten,” *Luftfahrtforschung*, Vol. 15, pp. 41~47, 1938.
9. Goland, M., and Reissner, E., “The Stresses in Cemented Joints,” *Trans. ASME J. Appl. Mech.* pp. A-17~27, 1944.
10. Lubkin, J. L., and Reissner, E., “Stress Distribution and Design Data for Adhesive Lap Joints Between Circular Tubes,” *Trans. ASME J. Appl. Mech.*, pp. 1213~1221, 1956.
11. Hart-Smith, “Analysis and Design of Advanced Composite Bonded Joints,” *NASA CR 2218*, 1974.
12. Delale, F., Edogan, F., “Time-Temperature Effect in Adhesively Bonded Joints,” *J. Compos. Mater.* Vol.5, pp. 561~581, 1981.
13. 能野, 永弘, 池上, “組合せ應力状態での接着継手の破壊,” 日本接着協会誌, Vol. 19, NO.8, pp. 324~332, 1983.
14. 澤, 岩田, 石川, “引張荷重を受けるバツト接着継手の二次元應力解析,” 日本機械學會論文集 A編, Vol.52, No.476, pp. 919~925, 1986.
15. Wooley, G. R., and Carver, D. R., “Stress Concentration Factors for Bonded Lap Joints,” *J. Aircr.* Vol.8, No.10, pp. 817~820, 1971.
16. 山口, 松田, “有限要素法と接着部の應力解析,” 日本接着協会誌, Vol.15, No.8, pp. 277~283, 1979.
17. 池上, 杉木, 白鳥, “圓筒突合せ試験片による接着強度試験法(第2報 試験法と試験片寸法の提案),” 日本接着協会誌, Vol.17, No.4, pp. 136~143, 1981.
18. Yuuki, R., and Cho, S. B., “Efficient Boundary Element Analysis of Stress Intensity Factors for Interface Cracks in Dissimilar Materials,” *Eng. Fract. Mech.*, Vol.34, No.1, pp. 179~188, 1989.
19. 西川, 原賀, “境界要素法による接着継手の應力解析と破壊強度試験,” 日本接着協会誌, Vol.22, No.5, pp.244~249, 1986.
20. 이원, 정의섭, 유영철, 윤인식, “경계요소법에 의한 이종재료 접합 잔류열응력의 해석,” 비파괴검사학회지, Vol.15, No.4, pp. 540~548, 1995.
21. Bogy, D. B., “On the Plane Elastostatic Problem of a Loaded Crack Terminating at a Material Interface,” *Trans. ASME J. Appl. Mech.* pp. 911~918, 1971.
22. Erdogan, F., “Stress Distribution in a Nonhomogeneous Elastic Plane With Cracks,” *Trans. ASME J. Appl. Mech.* pp.232~236, 1963.
23. Rice, J. R., and Sih, G. C., “Plane Problems of Cracks in Dissimilar

- Media," *Trans. ASME J. Appl. Mech.* pp. 418~423, 1965.
24. Sih, G. C., and Rice, J. R., "The Bending of Plates of Dissimilar Materials With Cracks," *Trans. ASME J. Appl. Mech.* pp. 477~482, 1964.
25. 結城, 鄭, 石川, 中野, "接着継手の強度評価への破壊力學の應用(第2報 各種接着継手の疲労き裂傳ば特性), 日本機械學會論文集 A編, Vol.55, No.517, pp. 1984~1991, 1989.
26. 池上, "構造接着の機能性と強度特性," 日本接着協會誌, Vol.25, No.10, pp. 438~442, 1989.
27. 河田, 福田, "接着破壊-剝離強度の統一的解析," 日本複合材料學會誌, Vol.4, No.4, pp. 150~156, 1978.
28. 服部, 坂田, 初田, 村上, "應力特異場パラメータを用いた接着継手の強度評価," 日本機械學會論文集 A編, Vol.54, No. 499, pp. 597~603, 1988.
29. 이원, 정의섭, 유영철, "단순접치기 접촉이음에 대한 응력특이성 파라미터해석," 대한기계학회 '95년도 춘계학술대회 논문집(I), pp. 139~144, 1995.