

## End mismatch를 갖는 접착이음의 강도 평가

현철승\* · 허성필\*\* · 양원호\*\*\* · 류명해\*\*\*\*

### Stress Analysis Crack of Double-lap Joint with an End Mismatch

Cheol-Seung Hyun, Sung-Pil Heo, Won-Ho Yang and Myung-Hae Ryu

**Key Words:** End Mismatch, Adherend(피착재), Adhesive(접착제), Peel Stress(박리응력), Shear Stress(전단응력), Alignment(정렬)

#### Abstract

The adhesively-bonded joints considered in this investigation include single-lap joint and double-lap joint. For an adhesively bonded double-lap joint, end mismatch between the two outer adherends(upper, lower) can not removed completely although it can be controlled within a manufacturing tolerance. This paper shows that the end mismatch introduces local bending and end mismatch affects the shear and peel stresses in the adhesive. The double-lap joint with an end mismatch is affected of adhesive thickness, material properties of adhesive and adherend etc. Also, we concluded that there are critical value of an end mismatch to provoke the interface fracture.

#### 1. 서 론

자동차 산업에 있어서 자동차 연비 개선, 차량의 안정성 향상 및 내구성 증가를 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 자동차 경량화를 목적으로 고장력 강재, 알루미늄, 복합 재료 등의 새로운 소재의 사용이 증가하면서 부품이나 차체의 제조에 있어서 접착에 의한 접합 방식이 기존의 여러 가지 접합 방법을 대체하는 수단으로 점점 그 사용 범위가 넓어져 가고 있다. 일반적으로 접착 접합의 특징은 균일한 응력분포의 상태를 유지할 수 있을 뿐만 아니라 서로 성질이 다른 이종재료의 접합이 가능하고 피착재의 변형 없이 구조 부재를 강화하고 피로강도나 강성을 증가하면서도 경량화할 수 있는 큰 장점이 있다.

접착 구조물을 사용하는 경우 접착부에서의 파

괴(failure)를 해석하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 접착부의 강도에 대한 정확한 평가는 구조물 전체의 강도평가에 결정적인 역할을 하기 때문이다.

접착의 형태는 대표적으로 단면접치기 접합이음(single lap joint), 이중접치기 접합이음(double lap joint), T형 접착이음 등이 있다.

접착이음에 관해서 많은 연구가 진행되고 있는데 주로 접합 끝단의 접합계면(interface)에 박리응력(peel stress)과 전단응력(shear stress)의 변화에 주로 관심을 두고 있다. Dillard 등은 압전센서(piezoelectric sensor)를 이용하여 단면 접치기 이음과 butt joint 접착층에서의 박리응력 측정에 대한 연구를 수행하였고, Adams 등은 단면 접치기 접착이음의 경우 유한요소법을 이용하여 접합부 필렛의 영향, 접착제의 비선형성, 접착면의 두께 방향의 응력분포 변화를 고려하는 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 이중접치기 접합이음(double adhesively lap joint)의 파괴강도 해석을 수행하였다. 일반적으로 이중 접치기 접합이음의 해석은

\* 성균관대 대학원 기계설계학과

\*\* 성균관대 대학원 기계공학과

\*\*\* 성균관대 기계공학부

\*\*\*\* 안동정보대 건축설비과

상부 피착재와 하부 피착재가 일직선상으로 완전하게 정렬(양쪽 끝단 부분의 mismatch가 없음)되어 있다고 가정하여 수행한다. 그러나 실제 가공에 있어서는 상하 피착재를 정확하게 정렬시키는 것은 불가능하다. Tong<sup>3)</sup>은 이중접치기 접착 이음의 상하 피착재 정렬(alignment) 영향에 대한 연구를 수행한 결과 접합 끝단에서의 박리응력과 전단응력이 현저하게 크게 변화한다고 하였다.

본 연구에서는 이중접치기 접합이음의 강도 평가를 위해 피착재 두께, 접착층 두께, 접착제 종류 등 물성과파라미터와 형상파라미터 변화에 대한 End Mismatch 영향에 대해 해석을 수행하였으며 또한 파괴역학적 관점에서 기초 연구를 수행하였다.

## 2. 해석 모델 및 방법

Fig. 1은 이중접치기 이음의 End mismatch 영향을 알아보기 위한 형상을 나타내는 것으로서 내부 피착재 두께는  $t_i$ , 상하 피착재 두께는  $t_o$ , 접착제 두께는  $t_a$ , 랩 길이는  $L$ 로 표시하였다. 상부 피착재와 하부 피착재 끝단 차이를 End mismatch 거리  $d$ 로 표시하였다. 하중은 10kN/mm의 인장하중을 작용하였다. 접착제의 종류에 따른 응력 분포를 분석하기 위해 FM300K, Epoxy, cemedine 1500을, 또한 피착재는 Al 5052, Al 6061, Al 2024-T3를 적용하였다. 시편 재료의 물성치는 Table 1과 같다.

접착제와 피착재는 선형탄성 특성을 가진다고 가정하고 해석을 수행하였으며 해석에 사용한 경계 조건과 하중 조건은 Fig. 1에 나타내었다.

이중접치기 접착이음의 경우 접착층 두께, 접착제 및 피착재의 물성치 변화에 대해 End mismatch가 어떤 영향을 미치는지를 분석하기

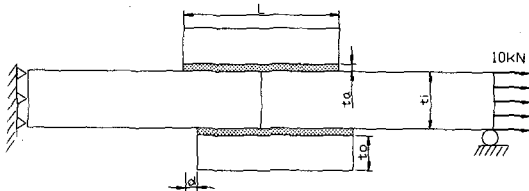


Fig. 1 Configurations and dimension of double-lap joint with an end mismatch

Table 1 Mechanical properties of the adherends and adhesives

	Al 5052	Al 6061	Al 2024-T3	FM 300K	Epoxy	cemedine 1500
Elastic Modulus E (GPa)	65.47	57.26	70.34	2.515	2.07	1.16
Poisson's ratio $\nu$	0.34	0.35	0.3	0.36	0.37	0.39

위해 해석은 2차원 평면변형을 상태에서 8절점 등매개요소(8node isoparametric quadrilateral element)로 하고 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS ver5.8를 사용하였다.

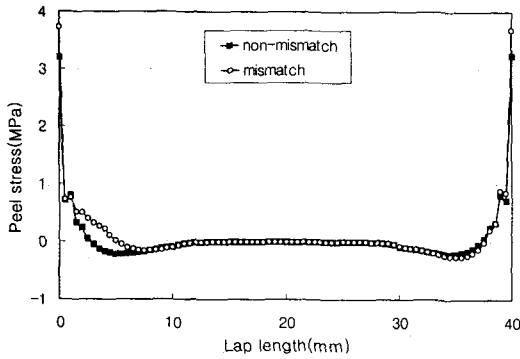
## 3. 접합이음의 강도해석

### 3.1 End mismatch의 영향

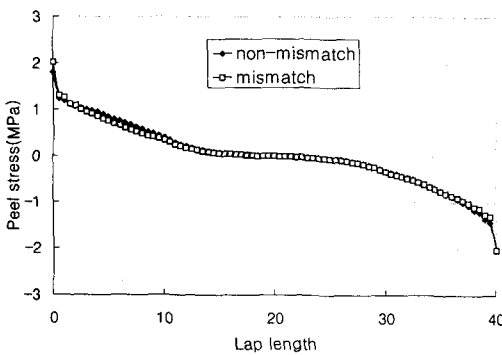
Fig. 2는 end mismatch의 영향을 알아보기 위해 End mismatch가 전혀 없는 경우(완전한 정렬 상태), end mismatch 길이가 1mm인 경우의 박리응력(peel stress)을 비교하였다. End mismatch 거리가 1mm인 경우 완전 정렬(mismatch  $d=0$ mm)상태에 비해 접착이음 끝단에서의 최고응력(peak stress)이 20% 증가한 것으로 나타났다. Fig. 3은 같은 조건에서 전단응력(shear stress)분포를 나타낸 것으로서 비정렬 상태(mismatch distance 1mm)인 경우가 완전 정렬 상태에 비해 응력이 10% 증가하는 것으로 나타났다. End mismatch는 국부적으로 굽힘 모멘트(bending moment)를 일으켜 이중접치기 이음의 박리응력과 전단응력의 최고응력(peak stress)을 크게 변화시키고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 접착층 및 피착재 두께의 영향

Fig. 4는 Al5052/Epoxy 접합이음의 경우 end mismatch 거리가 1mm, 안쪽 피착재 두께 2mm, 상하단 피착재 두께가 각각 1mm일 때 접착층 두께를  $t_a=0.15, 0.19, 0.29, 0.39$ mm로 변화시켰을 때 박리응력 분포를 나타내는 것이다. 접착제(adhesive) 두께가 얇아질수록 접착이음 끝단에서의 박리 응력이 증가함을 알 수 있다. 이는 접착



**Fig. 2** Effect of an end mismatch on peel stress along the over lap length of the Al5052/Epoxy ( $t_a=0.19\text{mm}$ ,  $t_i=2\text{mm}$ ,  $t_o=1\text{mm}$ ,  $d=0, 1\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ )



**Fig. 3** Effect of an end mismatch on shear stress along the over lap length of the Al5052/Epoxy ( $t_a=0.19\text{mm}$ ,  $t_i=2\text{mm}$ ,  $t_o=1\text{mm}$ ,  $d=0, 1\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ )

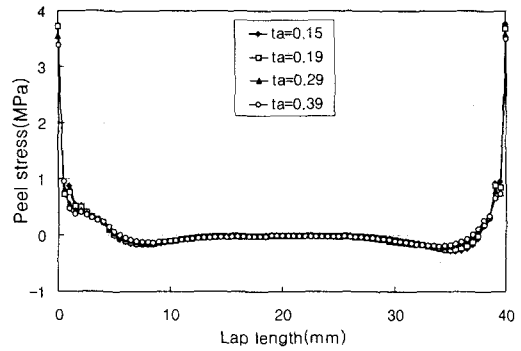
층 두께의 증가는 접착이음의 접착 강도를 개선시킨다고 할 수 있다.

피착재 두께의 영향을 알아보기 위해 상단부 피착재, 하단부 피착재, 안쪽(inner) 피착재 두께를 각각 증가시켰다.

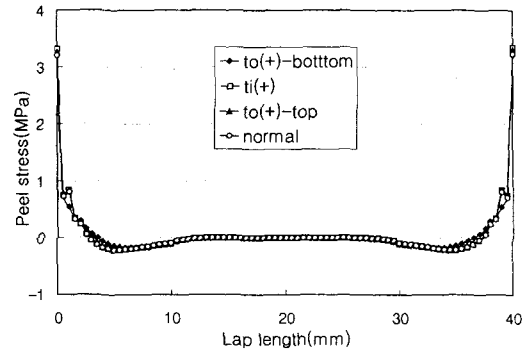
Fig. 5는 이에 대한 영향을 나타내는 것으로서 안쪽 피착재의 두께를 증가시킬 경우 응력이 높게 나타나며, 바깥쪽 상, 하단부 피착재의 두께를 증가시킨 경우에는 응력변화가 거의 나타나지 않았다.

### 3.2 접착부 길이의 영향

접착부 길이와 박리응력과 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 이때 사용한 접착제는 에폭시, 접착 두께는 0.19mm, 피착재는 Al5052이며, 상하단부



**Fig. 4** Effect of the adhesive thickness on peel stress along the over lap of the Al5052/Epoxy double-lap joint ( $t_i=2\text{mm}$ ,  $t_o=1\text{mm}$ ,  $d=0, 1\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ )

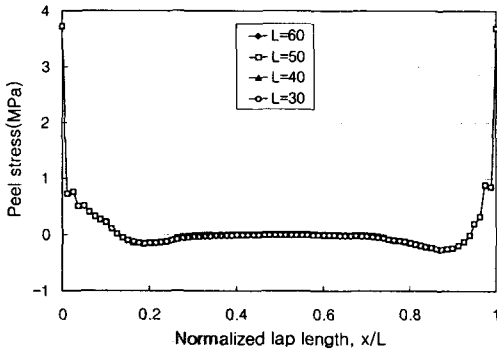


**Fig. 5** Effect of the adherend thickness on the peel along the over lap length of the Al5052/Epoxy double-lap joint ( $t_a=0.19\text{mm}$ ,  $t_i=2\text{mm}$ ,  $t_o=1\text{mm}$ ,  $d=1\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ )

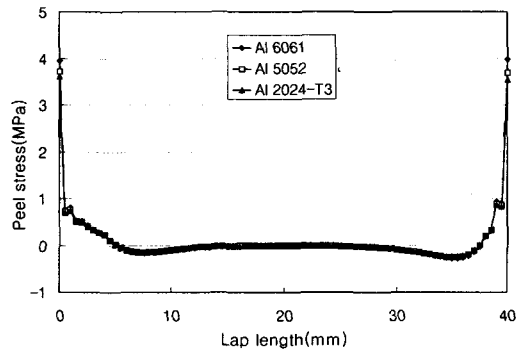
두께는 각각 1mm, 안쪽 피착재 두께는 2mm로 일정하게 하고 접착 길이  $L$ 을 30, 40, 50, 60mm로 변화하였다. 접착길이가 길수록 접착이음 끝단에서의 박리응력은 감소하지만 그 변화값은 미약하여 거의 동일한 수준을 유지하고 있었다. 모든 피착재 및 접착제의 종류에 관계없이 이러한 현상은 동일하게 나타났다.

### 3.3 탄성계수의 영향

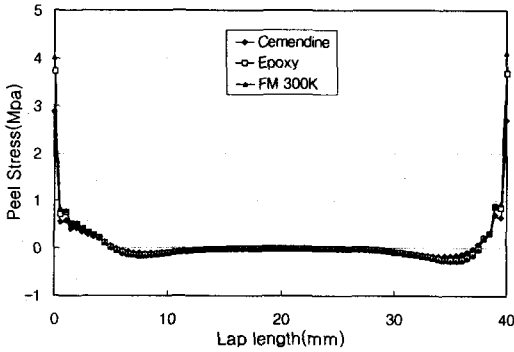
접착 이음 강도에 있어서 접착제의 종류는 중요하다. 본 연구에 있어서는 end mismatch를 갖는 이중접착기 접착이음의 접착재 탄성계수를 변화시켜 접착 끝단에서의 응력을 계산하였다. 접착재 탄성계수의 영향을 알아보기 위해 해석에 사



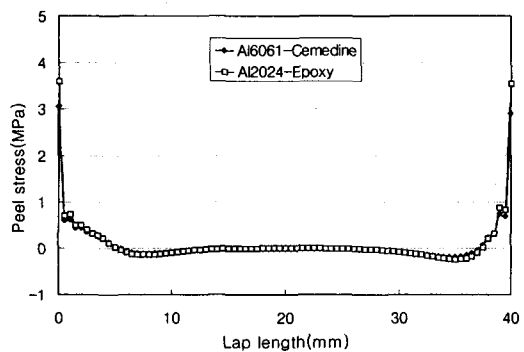
**Fig. 6** Effect of the lap length on peel stress along the over lap of the Al5052/Epoxy double-lap joint  
( $t_a=0.19\text{mm}$ ,  $t_i=2\text{mm}$ ,  $t_o=1\text{mm}$ ,  $d=1\text{mm}$ )



**Fig. 8** Relationship between the peel stress and material of adherend of the double-lap joint (adhesive : Epoxy)  
( $t_a=0.19\text{mm}$ ,  $t_i=2\text{mm}$ ,  $t_o=1\text{mm}$ ,  $d=1\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ )



**Fig. 7** Relationship between the peel stress and material of adhesive of the double-lap joint (adherend : Al6061)  
( $t_a=0.19\text{mm}$ ,  $t_i=2\text{mm}$ ,  $t_o=1\text{mm}$ ,  $d=1\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ )



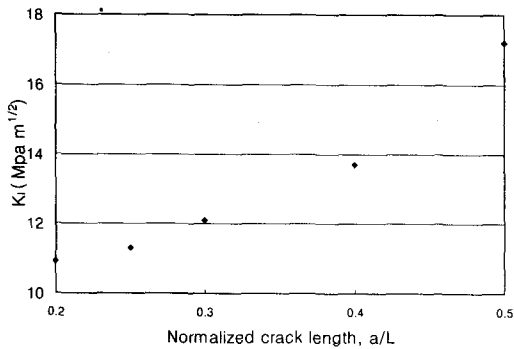
**Fig. 9** Evaluation of the Al6061-cemedine and Al2024-T3/Epoxy lap joint on peel stress along the over lap length  
( $t_a=0.19\text{mm}$ ,  $t_i=2\text{mm}$ ,  $t_o=1\text{mm}$ ,  $d=1\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ )

용된 접착제는 FM300K, 에폭시, 세메딘1500이다.

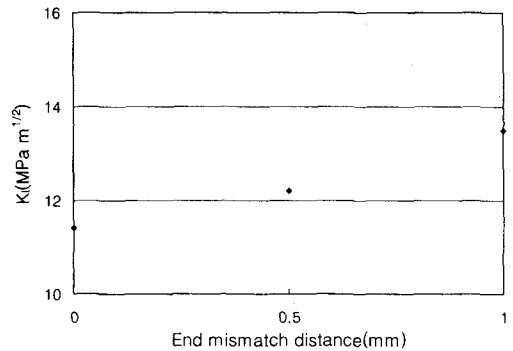
Fig. 7에 나타난 것처럼 탄성계수가 낮은 세메딘1500의 경우에 접착이음 끝단에서의 박리응력이 가장 작았으며 탄성 계수가 가장 큰 FM300K의 경우 응력이 제일 크게 나타났다. 접착제의 탄성계수가 클수록 박리응력이 높게 나타나고 있으며 이는 유영철<sup>9)</sup>의 연구에서 접착제 탄성계수가 이음강도의 지배적인 인자로 작용한다는 것과 일치하고 있다. 또한 피착재(adherend) 탄성계수 변화에 따른 영향을 알아보기 위해 피착재의 종류를 Al5052, Al6061, Al2024-T3로 적용하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 탄성계수가 클수록 박리응력이 작게 나타나고 있음 알 수 있다.

Fig. 9는 접착제의 탄성계수와 피착재의 탄성계수 영향을 분석하기 위해 접착제로는 에폭시, 피착재는 Al2024-T3로 결합한 경우와 접착제는 세메딘(cemedine)과 피착재로는 Al6061을 결합한 경우를 비교한 결과이다.

Al2024/에폭시 접착이음에 비해 Al6061/세메딘 접착이음의 경우가 접착이음 끝단에서의 박리응력이 낮게 나타나고 있다. 이는 피착재 탄성계수보다는 접착제의 탄성계수에 의한 영향이 접착이음의 강도에 크게 작용하고 있음을 나타내는 것이다.



**Fig. 10** Stress intensity factor of the crack in Al 5052/ Epoxy double-lap joint ( $d=1\text{mm}$ ) ( $t_a=0.19\text{mm}$ ,  $t_i=2\text{mm}$ ,  $t_o=1\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ )



**Fig. 11** Effect of the end mismatch distance on stress intensity factor of the crack in Al 5052/ Epoxy double-lap joint ( $t_a=0.19\text{mm}$ ,  $t_i=2\text{mm}$ ,  $t_o=1\text{mm}$ ,  $a=10\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ )

#### 4. 파괴역학적 고찰

계면 균열의 응력확대계수  $K$ (stress intensity factor)는 균열진전력을 평가하고 균열선단근방의 응력장에 대한 파라미터가 된다. 본 연구에서는 계면균열 선단에서는 응력의 진동 특이성 (oscillation singularity)이 존재하므로 계면 균열선단에서의 복소응력 확대계수를 구하기 위해서 외삽법을 사용하였다. 본 연구에서의 응력확대계수 계산은, 유한요소법에서 먼저 변위를 계산하고 이로부터 응력을 계산하기 때문에 변위외삽법을 적용하였다.

Fig. 10은 이중접치기 접착 이음 끝단의 비정렬 정렬상태( $d=1$ )에서 계면균열의 길이  $a/L$ 을 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5로 변화시켰을 때의 응력확대계수를 나타낸 것이다. 잔류응력과 계면에서의 마찰은 없다고 가정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 균열길이가 증가할수록 응력확대계수가 아주 높아지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 균열길이  $a$ 는 10mm, 접착부 길이  $L$ 은 40mm인 이중접치기 접착이음에 대해 end mismatch 거리  $d$ 를 0, 0.5, 1mm로 하여 응력확대계수를 계산하였다. 그림에서 나타난 것처럼 End mismatch 길이가 1mm인 경우가 완전 정렬상태 ( $d=0$ )에 비해 응력확대계수가 18% 증가하였다.

계면 균열이 존재하는 경우 접착층 두께, 피착재 두께 등에 의해 End mismatch가 응력확대계수에 영향을 미치는 정도와 접합과정에서 온도에 의한 잔류응력과 계면에서의 접착제와 피착재 사

이의 마찰에 의한 응력을 고려하는 경우에는 추가 해석이 요구된다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 이중접치기 접합이음의 강도 평가를 위해 피착재 두께, 접착층 두께, 접착제 종류 등 물성 파라미터와 형상 파라미터 변화에 대한 End Mismatch 영향에 대해 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 이중접치기 접착 이음에서 End mismatch는 계면에서의 박리응력과 전단응력을 증가시켰다.
- (2) 접착층의 두께가 얇은 경우 응력은 크게 나타나며 안쪽(inner) 피착재 증가는 박리응력을 증가시키나 상하단부 피착재 두께 증가는 응력 변화에 거의 영향이 없었다. 또한 접착부 길이 변화에 대해서는 길이에 상관없이 동일한 수준으로 나타났다.
- (3) 접착제의 탄성계수 값을 크게 하였을 때 박리응력은 감소하지만, 피착재 탄성계수의 증가는 박리응력을 증가시켰다. 또한 피착재에 의한 영향보다는 접착제의 탄성계수에 의한 영향이 지배적이다.
- (4) 파괴역학적 관점에서 end mismatch 영향에 대해 분석한 결과 완전하게 정렬되어 있는 경우가 그렇지 않는 경우에 비해 응력확대

계수 값이 작게 나타나고 있어 제작시 End mismatch에 대한 영향을 최소화시켜야할 것이다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Shinuh-Chuan Her, 1999, "Stress analysis of adhesively-bonded lap joints," *Composite Structures*, Vol. 46, pp. 673~678.
- (2) Y. Baziard, 1995, "Study of critical failure parameters for an adhesive-bonded single lap joint with ceramic adherends," *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol 15, No. 3, pp. 155~160.
- (3) L. Tong, 1996, "The effect of adherend alignment on the behaviour of adhesively bonded double lap joints," *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol 16, No.14, pp. 241~247.
- (4) A. J. Kinloch, 1987, *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*, Chapman and Hall, pp188~339.
- (5) 유영철, 1998, "자동차용 구조접착이음의 응력해석과 강도평가에 관한 연구," 대한기계학회 논문집 A권 제22권 제4호, pp. 905~915.