

동종금속 및 이종금속 단일 겹침 접착 시편의 파손모드 및 파손강도에 관한 연구

박 범 철¹ · 전 흥 재^{1*} · 박 종 찬²

¹연세대학교 기계공학과, ²현대자동차 상용해석리서치팀

Failure Mode and Failure Strength of Homogeneous Metals & Dissimilar Metals Bonded Single Lap-Shear Joints

Beom Chul Park¹, Heoung-Jae Chun^{1*} and Jong Chan Park²

¹School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

²Commercial Vehicle CAE Team, Hyundai Motor Group, Hwaseong, 18280, Korea

Abstract

In this paper, the experimental study and finite elements analysis were conducted on homogeneous and dissimilar metals single lap-shear bonded joints to investigate the factor that affect the joint failure load. It was found that factors which have the significant effects on the failure load of the joint was stiffness of the adherends. And from experimental results, it can be confirmed that the failure load increases linearly with overlap length increases. And the failure load of dissimilar metal joints is approximately 1KN(10~17%) larger than homogeneous metal joints. In order to confirm this phenomenon, the stress distribution and strain distribution of the specimens were analyzed through the finite element analysis. The difference between homogeneous metals joints and dissimilar metals joints is that stress and strain in adhesive are concentrated at the end of the overlap zone close to aluminium which has lower rigidity than aluminium in case of dissimilar metals joints. From high rigidity of steel, the stress concentration in bonds are decreased and it cause increase of the failure strength at dissimilar metal joints.

Keywords : adhesive, adhesive joint, bonded joint, dissimilar metals joints, homogeneous metals joints, failure mode, failure strength, single lap-shear joint

1. 서 론

구조물의 효율적인 설계를 위해서는 조인트에 대한 정확한 해석 및 메카니즘 이해는 필수적이다. 일반적으로 구조물을 체결하는 기법에는 접착체결, 기계적 체결 및 하이브리드 체결이 이용되고 있다. 기계적 체결기법의 경우 분해가 용이하고, 표면처리가 불필요한 장점이 있지만 중량증가 및 구멍가공으로 인한 응력집중을 유발하는 단점이 있다. 따라서 이러한 기계적 체결기법은 주로 두꺼운 체결부재의 체결 시에 적용된다. 이에 반해 접착 체결부는 유지보수의 어려움 및 표면처리를 해야하는 단점이 있지만, 구멍가공이 불필요하고 무게

증가가 미미하여 얇은 구조물의 접합에 많이 적용된다. 특히, 접착 체결기법은 차량 경량화 추세에 따라 그 적용범위가 확장되고 있다. 접착요소를 포함한 구조물을 설계 및 평가 시에는 유한요소모델을 사용하여 해석을 진행하는 것이 일반적이다. 이때 파손모드 및 강도에 대한 충분한 연구를 통해 검증된 모델을 적용하여 진행하여야 한다. 하지만 현 산업에서는 변수와 상관없이 일괄 적용되는 부정확한 모델이 사용되고 있으며, 접착부에 대한 정확한 성능 예측에 대한 연구는 미비한 실정이다. 또한 경량화에 따라 기존의 금속재질을 경량금속으로 대체하는 시도들이 늘어나고 있지만, 이러한 이종접착에 대한 파손 모드 및 파손의 주요 인자를 통한 정확한 연구는 부족하다. 따라서,

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-48277; E-mail: hjchun@yonsei.ac.kr

Received September 21 2018; Revised November 12 2018;

Accepted November 13 2018

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

본 연구에서는 동종금속조인트 및 이종금속조인트의 실제 시험 데이터에 기반으로 파손강도 분석과 유한요소해석을 통한 경향 및 응력, 변형양상을 분석하여 파손의 주요 인자를 연구할 것이다. 이를 통해 파손모드와 판재종류에 따른 접착 조인트 강도 설계에 있어 기준이 될 척도를 마련하고자 한다.

2. 본 론

2.1 기준 시편

본 연구에서 접착조인트의 파단예측 및 파손모드 연구를 위해 단일 겹침 시편(single lap shear joint)을 이용하여 해석을 실시하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 본드와 판재 조합의 변화에 따른 파손모드 및 파손하중의 변화를 관측하기 위해 복합재료와 알루미늄, 스틸을 이용하여 시험을 진행하였다. 시편의 형상은 단일 겹침 조인트(single lap-shear joint)로 ASTM-D5868에 근거하여 설계 및 진행하였다. 강도의 변화를 관측하기 위해 조인트의 치수를 바꾸기며 제작하였으며, 제작순서는 ① 판재의 제작 및 가공을 시작으로 ② 판재 접착부 전처리 ③ 본드 도포 및 열경화 ④ 탭 부착 ⑤ 후처리 순으로 진행하였다. 탭은 판재 두께와 동일한 사이즈로 제작하여 조인트부에 굽힘력이 작용하지 않도록 제작하였으며, 판재 접착부 전처리는 Sand paper 메시 수 #320을

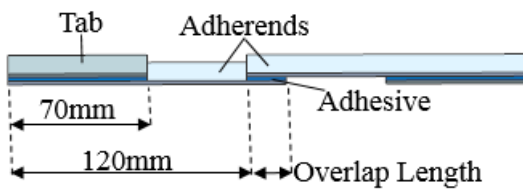


Fig. 1 Single lap shear joint specimen



Fig. 2 Test specimens and experiment

이용한 표면처리 및 Acetone을 이용한 Degreasing 과정을 의미한다. 인장시험에는 만능재료시험기(universal testing machine, UTM)인 MTS(material test system) 810 (MTS systems Co.)이 사용되었으며, 0.5mm/min의 속도로 인장시험을 진행하였다. 해당 장비로부터 Load-Displacement curve를 구하여 접착조인트의 파손모드 및 파손하중을 분석하였다. 시편의 형상 및 실험 설정을 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다.

2.3 동종금속 실험결과

동종재료 간 접착시의 파손강도 및 파손모드를 살펴보기 위해 AA6061-T6 알루미늄과 AV138/HV998 본드를 이용하여 시험을 실시하였다. 시험은 총 5 Case를 진행하였으며 시편의 Overlap length와 Width, Adherend thickness를 바꾸기며 진행하였다. 각 케이스의 치수 및 파손강도는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Design variables for homogeneous metal bonded joints

Adherend	Overlap length (mm)	Adherend thickness (mm)	Width (mm)	Failure load (N)
AA6061-T6	20	2	25.4 (1 inch)	5,989
AA6061-T6	40	2	25.4 (1 inch)	9,334
AA6061-T6	60	2	25.4 (1 inch)	11,864
AA6061-T6	40	2	12.7 (0.5 inch)	4,532
AA6061-T6	40	4	25.4 (1 inch)	9,262

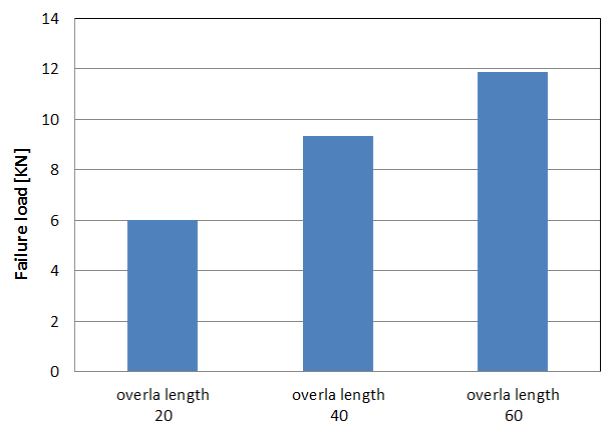


Fig. 3 Failure load according to changing overlap length in homogeneous metals joints

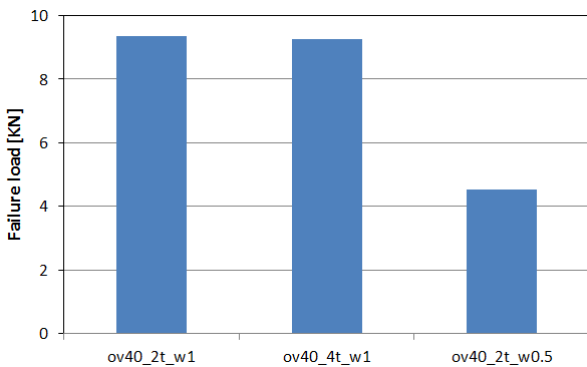


Fig. 4 Failure load according to changing adherend thickness and width

Fig. 3은 Overlap length의 변화에 따른 파손하중의 변화를 보여주고 있다. 파손하중이 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. Fig. 4는 동일 Overlap length에서 Width와 Adherend thickness 변화에 따른 파손하중을 보여주고 있다.

Width의 변화에 따라서 파손하중은 선형적으로 나타나지만 Adherend thickness의 변화에는 큰 차이를 나타내지 않았다. 본드접착부 파손부에서 뚜렷한 라인을 관찰할 수 있는데, 이는 본드접착부 양 끝단에서의 소성변형으로 인한 Bondline failure zone과 이후 급진적인 파단으로 이어지는 Cohesive failure zone의 경계이다. 이를 통해 본드 접착부의 양 끝단에서 Out of plane 방향 응력이 집중되어 접착면을 따라 소성변형이 일어나고 일정 이상 변형 이후에 급진적 변형으로 인해 파손이 일어나고 있음을 확인할 수 있다.

2.4 이종금속 실험결과

강성이 다른 두 금속 판재를 이용한 접착 조인트에서의 파손 모드 및 파손강도를 분석하기 위해 AA6061-T6 알루미늄과 ss400 스틸, 그리고 AV138/HV998 본드를 이용하여 시험을 진행하였다. 두 판재의 강성은 각각 68.9GPa, 490GPa으로 약 3배 정도 차이를 가진다. 시험은 총 3Case를 진행하였으며, 시편의 Overlap length를 바꿔가며 진행하였다. 각 케이스의 치수 및 파손강도는 Table 2에 나타내었다. 파손강도는 동종 재료 금속과 비교하였을시 전반적으로 약 1kN, 즉 10~17% 정도 증가하였으며, 동종재료와 마찬가지로 Overlap length 증가와 함께 파손강도는 선형적으로 증가하였다. 파손강도의 증가는 AA6061-T6보다 강성이 강한 ss400을 함께 사용함으로써 판재의 굽힘변형이 상대적으로 줄어들었고 이로 인해 본드의 응력집중이 줄어들었기 때문이다.

동종재료 조인트와 마찬가지로 본드접착부 파손부에서 뚜렷한 라인을 관찰할 수 있는데, 본드접착부 양 끝단에서의 소성 변형으로 인한 Bondline failure zone과 이후 급진적인 파단

Table 2 Design variables for dissimilar metal bonded joints

Adherend	Overlap length (mm)	Adherend thickness (mm)	Width (mm)	Failure load (N)
AA6061-T6 & SS400	20	2	25.4 (1 inch)	7,050
AA6061-T6 & SS400	40	2	25.4 (1 inch)	10,245
AA6061-T6 & SS400	60	2	25.4 (1 inch)	13,196

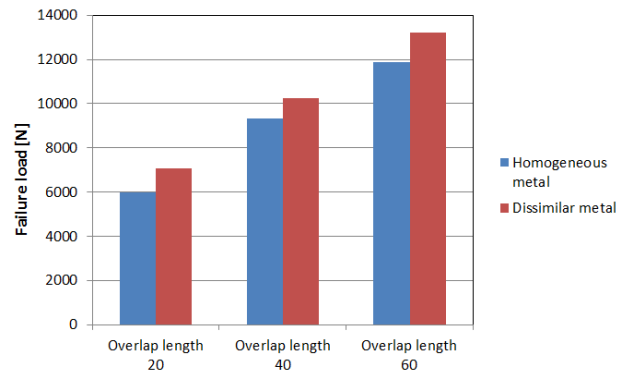


Fig. 5 Failure load according to changing overlap length in homogeneous & dissimilar metals joints

으로 이어지는 Cohesive failure zone의 경계이다. 이 경계의 크기가 강성이 작은 알루미늄 쪽의 본드부에서 더 크게 나타났는데, 이는 강성의 차이로 인해 알루미늄 쪽 본드부에서 더 큰 응력집중이 일어났기에 나타난 현상으로 분석되고, 이에 따른 파단강도의 차이는 이종재료가 약 10~17% 높게 나오는 것으로 나타났다(Fig. 5).

2.5 Finite element method

파손하중에서의 시편의 내부 응력분포 및 변형률을 분석하기 위해 유한요소해석(finite element method, FEM)을 이용하였다. 프로그램은 상용해석패키지인 ABAQUS 6.14 (dassault systems Co.)를 사용하여 진행하였다.

금속 및 본드의 경우 8노드 솔리드 요소인 C3D8R(An 8-node linear brick element)을 이용하여 메시를 구성하였고. 판재와 본드는 Perfect bonding 조건으로 지정하였다. 경계조건은 실제 시험과 동일하도록 모델링하였으며 Fig. 6에 도식화하였다.

유한요소해석에 앞서 본드의 정확한 소성거동을 묘사하기 위해 인장시험을 통한 Stress-Strain curve를 확보하였다. 해당 물성을 확보하기 위해 ASTM D638(standard test method for tensile properties of plastics)을 기준하여 본드 인장시험을 진행하였다. ASTM D638을 기준으로 하여

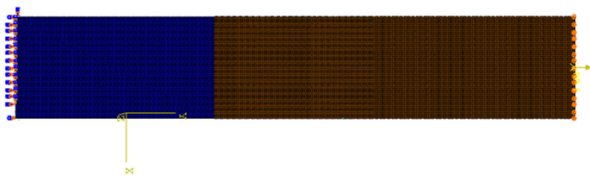


Fig. 6 Boundary and loading conditions

Table 3 Mechanical properties

Material	Elastic modulus (GPa)	Ultimate strength (MPa)	Poisson's ratio
AV138/HV998	4.5	41.039	0.35
AA6061-T6	68.9	310	0.33
SS400	190	400	0.26

시편몰드를 제작하였고, MTS(material test system) 810 (MTS system)을 사용하여 0.3mm/min의 속도로 인장실험을 진행하였다.

해석에 사용하기 위해 측정된 재료의 기계적 물성 값들을 위의 Table 3에 나타내었다.

2.6 Finite element analysis results

시편 파손의 인자를 확인해 보기 위해 유한요소해석을 통해 응력분포 분포를 확인해 보았다. Overlap length 40mm를 기준으로 하여 응력분포를 Fig. 7에 나타내었다.

응력집중이 동종재료와 이종재료 조인트 모두 본드 양 끝단에 집중되는 현상을 확인할 수 있다. 하지만 동종재료와 다른 점은 강성이 적은 판재 쪽 본드부에서 응력과 변형이 집중되는 점이다. 이는 시험에서 나타난 파손부 현상과 동일하다. 응력집중의 주요 인자를 확인하기 위해 동종재료 조인트를 기준으로 하여 본드의 각 성분 별 응력 값을 측정해 보았다. 이는 Fig. 8에 나타내었다. 길이방향 응력성분인 ss1과 Out of plane 방향 응력성

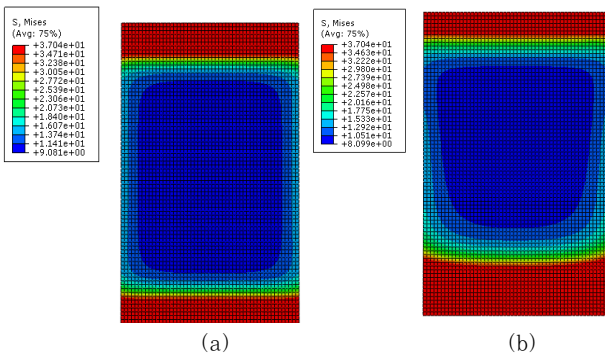


Fig. 7 Stress distributions of bonds
 (a) Homogeneous metal
 (Upper side : Steel / Lower side : Steel)
 (b) Dissimilar metal
 (Upper side : Steel / Lower side : Al)

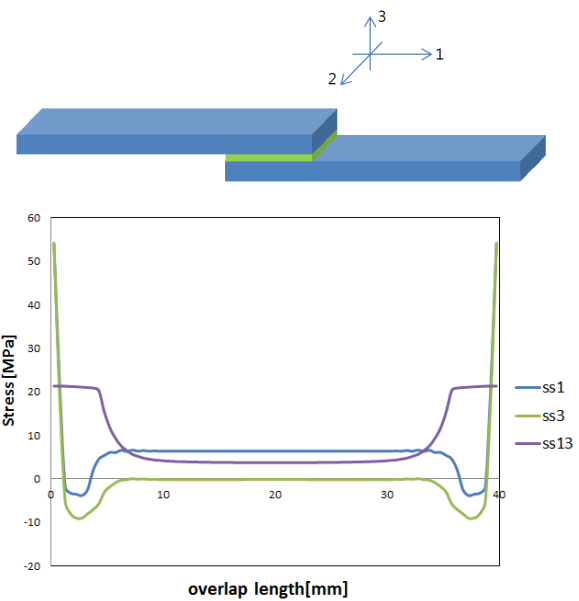


Fig. 8 Stress distributions in longitudinal direction

분인 ss3, 그리고 1-3방향 전단응력인 ss13 모두 양 끝단에서 집중되었으며, 응력 및 변형 집중의 가장 큰 요인은 판재의 굽힘변형으로 인한 1-3방향 전단응력 ss13으로 분석되었다.

3. 결 론

본 연구는 접착조인트의 파손모드 및 파손강도 연구를 위해 단일 겹침 시편(single lap shear joint)을 이용하여 해석을 실시하였다. 알루미늄과 스틸, Araldite 접착제를 이용, 시편을 제작하여 인장시험을 진행하였으며, 시험데이터를 이용, 유한요소해석 결과와 비교·분석하였다. 알루미늄과 스틸, 접착제 모두 비선형해석을 통해 정확한 거동을 묘사하고자 하였다. 시험 결과 파단강도는 Overlap length와 Width가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 또한 이종재료 조인트의 경우 동종재료 조인트와 비교 시 10~17% 정도의 파손강도 증가를 보였다. 이는 강성이 강한 스틸을 함께 사용함으로써 판재의 굽힘변형이 줄어들고 이를 통해 본드의 응력집중을 막는 효과를 가져왔기에 나타난 현상으로 분석된다. 하지만 미미한 정도의 강도증가이므로 강도증가의 목적으로 이종재료 조인트를 설계한다면 정확한 예측이나 실험을 통한 확인이 필요하다. 유한요소해석을 통한 응력분포 및 변형률 분포를 분석한 결과 동종재료의 경우 본드 양 끝단, 이종재료의 경우 강성이 약한 판재와 가까운 부분에서 집중이 발생하였다. 이는 시험에서 관찰한 조인트 파손부에서 나타나는 경계선과 동일한 현상이다. 응력 집중 및 파손의 주요 인자를 확인하기 위해 본드의 각 성분 별 응력 값을 측정해 보았다. 길이방향 응력성분인 ss1과 Out of plane 방향 응력성분인 ss3, 그리고 1-3방향 전단응력인

ss13 모두 양 끝단에서 집중되었으며, 응력 및 변형 집중의 가장 큰 요인은 판재의 굽힘변형으로 인한 1-3방향 전단응력 ss13으로 분석되었다. 파손강도 분석과 유한요소해석을 통한 경향 및 응력, 변형양상을 분석하여 파손의 주요인자 판재의 굽힘변형으로 인한 1-3방향 전단응력 ss13이 용하여 파손모드와 판재종류에 따른 접착 조인트 강도 설계에 있어 기준으로서 사용가능 한 주요인자로 사용가능 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 현대자동차 상용해석리서치팀의 지원을 받아 수행되었습니다. 본 연구는 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소 기술 특화 연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Aydin, M.D., Özel, A., Temiz, Ş. (2005) The Effect of Adherend Thickness on the Failure of Adhesively-bonded Single-lap Joints, *J. Adhes. Sci. & Technol.*, 19(8), pp.705~718.
- Ban, C.S., Lee, Y.H., Choi, J.H., Kweon, J.H. (2008) Strength Prediction of Adhesive Joints using the Modified Damage Zone Theory, *Compos. Struct.*, 86(1), pp.96~100.
- Choi, J.I, Chun,H.J., Park, J.C. (2016) Failure Mode of Metals Bonded Single Lap-shear Joints, *2016 COSEIK Annual Conference*, Computational Structural Engineering Institute of Korea, p.130.
- Da Costa Mattos, H.S., Monteiro, A.H., Palazzetti, R. (2012) Failure Analysis of Adhesively Bonded Joints in Composite Materials, *Mater. & Des.*, 33, pp.242~247.
- Kim, K.S., Yi, Y.M., Cho, G.R., Kim, C.G. (2008) Failure Prediction and Strength Improvement of Uni-directional Composite Single Lap Bonded Joints, *Compos. Struct.*, 82(4), pp.513~520.
- Kim, T.H., Kweon, J.H., Choi, J.H. (2008) An Experimental Study on the Effect of Overlap Length on the Failure of Composite-to-Aluminum Single-Lap Bonded Joints, *J. Reinf. Plast. & Compos.*, 27(10), pp.1071~1081.
- Pak, B.J, Chun, H.J., Park, J.C. (2017) Failure Mode of Single Lapped Adhesive Joint of Dissimilar Metal, *2017 COSEIK Annual Conference*, Computational Structural Engineering Institute of Korea, p.90.
- Qin, M., Dzenis, Y.A. (2003) Analysis of Single Lap Adhesive Composite Joints with Delaminated Adherends, *Compos. Part B: Eng.*, 34(2), pp.167~173.
- Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M., Antunes, F. (2011) Effect of Adherend's Rigidity on the Shear Strength of Single Lap Adhesive Joints, *Int. J. Adhes. & Adhes.*, 31(4), pp.193~201.
- Seong, M.S., Kim, T.H., Nguyen, K.H., Kweon, J.H., Choi, J.H. (2008) A Parametric Study on the Failure of Bonded Single-Lap Joints of Carbon Composite and Aluminum, *Compos. Struct.*, 86(1), pp.135~145.
- Sheppard, A., Kelly, D., Tong, L. (1998) A Damage Zone Model for the Failure Analysis of Adhesively Bonded Joints, *Int. J. Adhes. & Adhes.*, 18(6), pp.385~400.

요 지

본 연구는 접착조인트의 파손모드 및 파손강도 연구를 위해 단일 겹침 시편(Single lap shear joint)을 이용하여 해석을 실시하였다. 알루미늄과 스틸, Araldite 접착제를 이용, 시편을 제작하여 인장시험을 진행하였으며 시험데이터를 이용, 유한요소해석 결과와 비교·분석하였다. 알루미늄과 스틸, 접착제 모두 비선형해석을 통해 정확한 거동을 묘사하고자 하였다. 시험 결과 파단강도는 Overlap length와 Width가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 또한 이종재료 조인트의 경우 동종재료 조인트와 비교 시 10~17% 정도의 파손강도 증가를 보였다. 이는 강성이 강한 스틸을 함께 사용함으로써 판재의 굽힘변형이 줄어들고 이를 통해 본드의 응력집중을 막는 효과를 가져왔기에 나타난 현상으로 분석된다. 유한요소해석을 통한 응력분포 및 변형률 분포를 분석한 결과 동종재료의 경우 본드 양 끝단, 이종재료의 경우 강성이 약한 판재와 가까운 부분에서 집중이 발생하였다. 응력집중 및 파손의 주요 인자를 확인하기 위해 본드의 각 성분 별 응력 값을 측정해 본 결과 1-3방향 전단응력이 파손의 가장 큰 인자로 분석되었다.

핵심용어 : 접착조인트, 단일 겹침 조인트, 접착, 파손모드, 이종 재료, 이종 접착, 이종 조인트