아크 열원을 이용한 스틸과 알루미늄의 이종접합에 관한 연구(Ⅲ) - 정적강도 및 파단특성 -

김 용^{*,†} · 김 철 희^{**} · 이 보 영^{***}

^{*}고등기술연구원 로봇생산기술센터

^{**}한국생산기술연구원 용접접합그룹

^{***}한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

A Study on the Dissimilar Metal Joining of Aluminum to Steel Using the Arc Heat Source (Ⅲ) - Static Strength and Fracture Behaviors -

Yong Kim^{*,†}, Cheolhee Kim^{**}, and Bo-Young Lee^{***}

^{*}Center for Robot & Manufacturing, Institute for Advanced Engineering, Yongin, 17180, Korea

^{**}Joining R&D group, Korea institute of industrial technology, Incheon, 21999, Korea

^{***}Dept. of Aerospace and Mechanical Eng. Korea Aerospace University, Goyang, 10540, Korea

[†]Corresponding author : welding@iae.re.kr

(Received June 12, 2018 ; Revised July 31, 2018 ; Accepted August 20, 2018)

Abstract

In order to commercialize the steel to aluminum joining technology using arc heat source in the automobile industry, it is the most important to secure a reliable joining strength. However, there is not enough to describe the overall static strength characteristics of dissimilar metal joints. Therefore, in this study, the tensile-shear test was performed according to the process parameters which affect the strength of the lap joint structure. As a result, the porosity of the Al-Fe dissimilar joint has a greater influence on the strength due to the vaporization of Zn present in the root zone than the geometrical shape of the bonded length or the wetting angle. In addition, it was confirmed that the crack was initiated due to the root pore, along with cracks in the vicinity of the continuous pore by fractography analysis. Decrease of the tensile strength is due to the reduction of the absolute cross-sectional area result from the pores present in the weld metal. Finally, from the results of stress analysis using FEM, it was confirmed that the pore of the root zone due to the increase of the heat input had a greater influence on the strength even though the interface bonding length was increased.

Key Words : Dissimilar metal joining, Tensile-shear strength, Zn pore, Fractography, Root zone

1. 서 론

일반적으로 아크열원을 이용한 스틸과 알루미늄의 이종접합에서 용가재에 의해 알루미늄은 용접이 이루어지고 스틸 판재는 브레이징된다. 여기서 브레이징되는 스틸 표면에 있는 아연도금층은 용융알루미늄과 스틸 모재 사이의 젖음성을 향상시키는 역할을 한다. 이러한 이종접합 기술이 상용화되기 위해서는 신뢰성있는 접합

강도의 확보가 무엇보다 중요하며, 이는 금속간화합물(IMC, Inter-metallic compound)의 형성을 최소화하여 얻을 수 있다. 이종접합에서 양호한 접합강도를 얻기 위한 금속간화합물의 두께는 대략 10 μ m 이내로 보고되고 있으며^{1,2)}, 이 범위 내에서 금속간화합물이 형성될 경우 접합강도는 대부분 알루미늄 용착부의 특성에 의해 결정되는 강도와 기공의 형태 그리고 비드 형상 및 갭 등 형상학적 요인이 복합적으로 작용하여 결정되어 진다.

이러한 이종접합부의 접합강도는 지금까지 주로 금속학적 측면에서 분석되어 왔다. 특히 알루미늄은 소재의 특성 상 열전도율 및 열팽창계수가 높고 액상 및 고상 간의 수소 용해도 차이가 큰 특성을 갖고 있으며, 용접에 있어서는 기공이나 미세한 융합 불량 및 균열, 변형 등의 발생이 쉬운 금속이다. 또한 알루미늄 합금은 냉간가공 또는 석출경화에 의해 강화되는데, 아크 열원에 의해 재가열 과정을 거치게 되면 용접 및 열영향부에서 강화효과를 잃게 되어 강도의 손실을 가져온다. 특히 6천계열 알루미늄과 같이 열처리 알루미늄합금의 접합에서는 국부적 어닐링과 시효로 인하여 강도가 저하되며, 5천계열 알루미늄과 같은 가공경화 알루미늄합금의 경우 냉간가공된 조직의 성장에 의해 강도가 저하되어 열영향부 연화가 발생한다. 이와 같이 소재의 용접 특성으로 인해 발현된 강도 저하는 이종접합의 강도를 설명할 때도 그대로 인용되어 지는데, 다수의 연구결과에서 충분히 얇은 금속간화합물층이 형성될 경우 Fe/Al 이종접합부의 강도는 열영향부의 연화에 기인하여 결정된다고 하였다³⁻⁵⁾.

알루미늄 모재 열영향부의 연화와 더불어 정적강도에 직접적인 영향을 미치는 것은 용접부에 발생된 기공의 존재이다. 이 기공은 크기, 형상, 위치 등에 따라 이음부의 강도에 큰 영향을 미치게 되나, 일반적으로 기공의 양이 합격 수준이하인 경우에는 인장강도에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 특히 이종접합부의 경우 루트부에 발생하는 기공이 강도에 큰 영향을 미치는데 이의 발생 원인과 형태에 대한 연구도 일부 진행되었다^{7,8)}. 이들 연구에서 보고된 바에 의하면, 겹치기 구조의 특성상 인장시험 시 응력집중은 계면의 루트부에 집중되게 되는데 이 위치에 발생한 기공의 크기 및 형태에 따라 인장강도가 결정되며 이러한 기공은 Zn의 기화에 의한 것이라고 하였다. 한편 이종접합부의 파단모드에 대한 연구를 통해 알루미늄 열영향부 및 용융선(Fusion line)을 따라 파단되는 경우와 용접부와 스틸의 접합계면에서 파단되는 두 가지 경우가 있다고 보고되고 있으나^{4,5)}, 아직 기공과 강도와의 관계를 정량적으로 연구한 결과는 부족하다. 파단강도를 결정짓는 요인은 적용 소재의 강도, 두께 및 이에 따른 편심하중의 영향 등의 기계적 거동에 대한 고려 없이 재료적인 측면에서만 분석되어 기존의 연구결과로 이종접합부의 파단 메커니즘을 정확하게 정의하기는 어렵다. 이와 관련하여 Lin⁹⁾은 이종접합부의 정적강도 및 파단모드에 대해 FEM을 통해 보다 해석적으로 접근한 연구결과를 발표하였다. 그는 이종접합부의 물성을 근거 있게 정의하고 그에 따른 해석 결과로서 파단모드와 접합강도는 알루미늄보다는 스틸의 강도 및 두께에 영향을

받는다고 주장하였으나 이로서 이종접합부의 전체적인 정적강도 특성을 설명하기에는 부족한 측면이 있다.

이에 따라 본 연구에서는 이종접합부의 정적강도 및 파단특성을 보다 명확하게 확인하기 위해 입열량, 갭 크기 및 시편 두께를 달리하며 시편을 제작하였다. 이를 통해 우선적으로 용접부에 발생하는 기공의 형태 및 발생 메커니즘을 확인하고자 하였다. 이후 겹치기 구조에서 형상학적으로 강도를 결정짓는 공정변수에 따른 인장 시험을 실시하였다. 또한 인장시험이 완료된 시험편에 대해 이종접합부에 나타나는 기공을 중심으로 파면해석을 하여 균열의 발생 및 전파 과정을 관찰하였다. 마지막으로 갭과 접합계면 길이, 소재 두께 등의 이음부 형상 차이로 인해 달리 나타나는 파단 모드에 대해 실험적 및 해석적(FEM) 접근법을 이용하여 분석하고 겹치기 구조의 인장 시험 시 형상학적 인자에 의한 재료의 거동에 대해 설명하였다.

2. 실험 및 해석방법

2.1 실험 및 분석방법

본 연구에서는 용접부의 형상학적 인자(계면접합 길이 및 갭 크기)를 중심으로 정적강도 특성을 파악하고자 다음 Fig. 1과 같은 조건으로 총 30세트 용접 후 이에 대한 분석을 실시하였다. 이 때 용접속도는 소재 두께와 상관없이 모두 0.8 mm/min으로 동일하게 하고, 전류값만 변화시켜 입열량을 조절하였다. Al 1.2mm 두께 소재 용접시에는 GI(Galvanized) 도금된 1.2 mm 두께의 DP 590강을 하판에 배치하였다. 이때 용접 전류는 각각 55 A, 70 A 및 80 A를 적용하였다. 한편 3.0 mm 두께를 갖는 Al 소재 용접의 경우 하판 스틸의 두께는 2.0 mm로 적용하였으며 이때의 용접 전류는 각각 80 A, 95 A 및 110 A로 설정하였다. 이후 인장시험을 위해 시험편은 중첩 길이와 폭을 각각 25 mm로 가공하였다. 인장시험은 조건 당 3개씩 실시하여 그 평균을 나타냈으며, 시험 속도는 모든 시편에서 1 mm/min

Heat input energy	Gap condition	Al thickness
500 J/cm; 1.2 mm or 1,000 J/cm; 3.0 mm	No gap	1.2 mm 3.0 mm
620 J/cm; 1.2 mm or 1,220 J/cm; 3.0 mm	0.2 mm	
	0.4 mm	
	0.6 mm	
	0.8 mm	
740 J/cm; 1.2 mm or 1,400 J/cm; 3.0 mm		

Fig. 1 Test conditions to observe the properties according to geometrical factors

Fig. 2 Experimental set-up for high speed camera to observe crack initiation and propagation

으로 하였다.

또한 파단의 시작점 및 균열전파 방향의 정확한 확인을 위해 인장시험 중 고속카메라를 이용하여 그 현상을 관찰하였다. 고속카메라는 Photron사의 FASTCAM APX-RS 제품을 사용하였으며 촬영주기는 초당 125프레임이다. Fig. 2와 같이 시험편의 측면 비드를 접사로 촬영하면서 다양한 접합조건에서 제작된 시험편의 파단 순간을 관찰하였다.

인장시험이 완료된 시험편의 분석을 위해 실체현미경 및 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM) 등을 사용하여 초기 균열 및 전파 방향에 대해 분석하였고 파면 해석을 위해 추가적으로 x-선 분광분석기(EDS)를 사용하여 성분분석을 실시하였다. 또한 시험편의 파단에 미치는 기공의 영향을 보다 명확하게 확인하기 위해 시험편은 Nital 4%로 에칭 후 증류수 100 ml + 불산 0.5 ml로 이중에칭을 하였다. 보다 미세한 기공의 관찰을 위해 광학현미경에서 흑백모드로 촬영하여 이미지 분석기의 선명도 조절을 통해 0.03 mm 이하의 기공까지 모두 나타낼 수 있도록 하였다.

2.2 FEM 해석방법

공정변수에 따른 이종접합부의 최대 응력 변화 및 응력집중부를 확인하기 위해 FEM 해석을 실시하였다. 시험편에 대한 형상 모델링은 실제 이종접합부의 단면을 참고하여 최대한 유사하게 비드형상을 구현해 Fig. 3과

Fig. 3 FE mesh design for a CMT brazed joint of Fe/Al

같이 CATIA로 모델링 하였으며 해석은 범용 구조해석 S/W인 ANSYS Workbench를 사용하여 선형해석을 실시하였다. 시험편에 대한 모델링은 길이 100 mm, 중첩길이 25 mm로 하였고 접합부 폭 또한 실제 시험편과 마찬가지로 25 mm로 설정하였다. 1축 인장시험 환경을 구현하기 위해 스틸 측면은 완전 구속 후 알루미늄 끝단에 0.3 mm 변위조건을 동일하게 주어 이때 나타나는 현상과 응력의 크기에 대해 비교분석하였다.

다음으로 이종접합부의 물성치를 정의하기 위해 DP 590 스틸 모재부, Al 5052 모재부 및 용접부 그리고 접합계면의 4가지 영역으로 구분하였다. 이 중 스틸과 알루미늄 모재부는 일반적으로 알려진 물성치를 적용하여 탄성계수(Young's modulus, E)를 각각 210 GPa 및 72 GPa로 적용하였다¹⁷⁾. 반면 알루미늄 용착금속의 경우 내부 기공 및 HAZ 연화 등에 의해 탄성계수를 포함한 기계적 물성치가 모재에 비해 저하된다. 이에 따라 용접부의 탄성계수 E_{weld} 는 본 해석에서 기존의 연구 결과를 근거로 아래 식 (1)을 이용하여 결정하였다⁹⁾.

$$E_{weld} = E_{Al} (1 - \alpha) \quad (1)$$

여기서 E_{Al} 는 Al 5052 모재의 탄성계수이며, α 는 용착금속의 기공률을 의미한다. 실제 이종접합부의 기공률을 이미지분석기로 측정한 결과 5~8% 정도의 분포를 나타내어 영률은 66.2 GPa로 결정하였다. 이에 따른 전단탄성률(Shear modulus) 및 체적탄성률(Bulk modulus) 또한 후크의 법칙(Hooke's law)에 의거한 관계식을 통해 유도할 수 있다. 한편 알루미늄 용착금속부의 인장강도 및 항복강도를 정의하기 위해 알루미늄 합금에서의 비커스 경도와 강도 환산 식 (2)를 적용하여 그 물성을 정의하였다¹⁸⁾. 실제 알루미늄 용착금속부의 경도 측정 결과는 55~60Hv 수준으로 이에 따른 인장강도는 식 (2)에 의해 175 MPa로 계산되었다.

$$TS(Hv) = 55.63249 + 2.173155Hv \quad (2)$$

마지막으로 접합계면은 기존의 연구결과⁹⁾를 참조하여 0.05 mm의 두께로 모델링하였다. 탄성계수는 Fe/Al 금속간화합물의 기계적 특성에 대해 연구한 Matysik²⁰⁾의 연구 결과를 인용하여 475 GPa로 정의하였고 포아송비는 0.2로 하였다. 그는 계장화 압입시험(Instrumented indentation test)을 통해 Fe_2Al_5 금속간화합물의 탄성계수는 475 GPa이며, $FeAl_3$ 의 경우 284 GPa로 구분하여 각각 정의하였으나, 그 중 Fe_2Al_5 의 형성비율이 훨씬 높다는 타 연구결과^{21,22)}에 따라 Fe_2Al_5 의 탄성계수 값을 그대로 입력하였다. Table 1에 본 해석을

위해 입력된 물성치를 나타내었다.

해석은 세 가지 관점에서 진행하였다. 첫째로는 접합 계면의 길이에 따른 강도이다. 접합계면의 길이는 입열량에 따른 비드형상을 참고하여 각각 3.0 mm, 4.0 mm, 4.5 mm 및 5.5 mm의 경우에 대해 계면 길이가 최대응력에 미치는 영향에 대해 해석하였다. 두 번째로는 갭에 따른 응력분포의 변화에 대해 확인하기 위해 접합 계면 길이를 4.5 mm로 통일하고 갭 크기만 0.2 mm, 0.5 mm 및 1.0 mm로 변화시켜가며 갭 크기에 따른 응력 변화에 대해 해석하였다. 이때 갭은 최대한 실제와 가깝게 모델링하여 갭 부위에 노치선단을 최소화하였다.

마지막으로는 이렇게 해석된 결과의 고찰을 위해 인장 시험 시 나타나는 거동에 대해 최대 비틀림 에너지 이론(Max. torsional energy theory)을 적용하여 수치해석을 실시하였다. 이를 통해 강도(응력) 변화에 영향에 미치는 인자를 도출하고자 하였다.

3. 실험결과 고찰

3.1 기공발생 메커니즘

아크열원을 이용한 Fe/Al의 이중접합 시 용접부에는 크고 작은 기공이 발생한다. 특히 루트부에 발생하는 기공에 대해 단순히 Zn의 기화에 의한 기공이라고 주장한 연구^{10,11)}도 있지만 보는 관점에 따라 Lin⁹⁾은 미용융 루트부(Unfused root)로 설명하였으며 Su¹²⁾의 경우는 이를 고온균열(Hot crack)이라고 주장하였다. 또한 일부 보고^{3,13)}에서는 이를 융합불량(Lack of fusion)이라고 하였는데 이는 Zn의 기화에 의한 원인보다는 충분치 못한 입열로 인해 발생한 것으로 설명하였다. 본 연구에서도 실제 이중접합시 루트부에 기공이 항상 발생하였으며 이는 응력집중부의 노치로 작용하여 접합강도에 악영향을 미칠 것으로 예상된다.

한편 Fe/Al 이중접합부의 인장전단강도 시험시 파단의 시작점은 루트부로 알려져 있으나 균열의 전파방향에 대해서는 주장이 엇갈린다. 대부분의 연구자들은 균열이 루트부의 미용융 접합부(기공)에서 노치선단으로 작용하여 열영향부 연화가 가장 크게 발생한 용융선을 따라 균열이 전진되어 파단이 일어난다고 주장하고 있다^{3,4,12,14)}. 반면 Yagati¹¹⁾는 알루미늄 용착금속부가 소성 변형을 일으켜 단면 수축을 수반하며 45도 각도로 균열이 전파된다고 하였으며, FEM 해석을 통해 파단 모드를 연구한 Lin⁹⁾은 일부 조건에서는 루트부가 아닌 토우부에 응력이 집중되어 Zn 집중부에서 파단이 발생한다고 하였다.

Fig. 4는 적정 조건에서 접합 후 단면, 기공분포 및

Table 1 Mechanical properties to define numerical modeling

Metal	Young's modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Bulk modulus (GPa)	Poisson ratio	Tensile strength (MPa)
Al5052	72	27	72	0.33	230
DP590	210	80	210	0.3	620
Weld metal	66.2	25	66.2	0.33	175
Intermetallic	475	198	264	0.2	-

형태 그리고 인장시험 시 파단위치에 대해 설명하고 있다. 본 연구에서는 인장시험 시 초기 균열은 항상 기공부에서 발생되며 파단은 인장하중에 수직인 방향으로 전진되어 파괴에 이른 것으로 판단된다. 이러한 기공은 방사선투과검사 결과 용착금속 전반에 걸쳐 분포되어 있으나 특히 루트부에 집중되어 있는 모습을 확인할 수 있다. 또한 실제 루트부를 확대 관찰해 보면 기공 및 미용융부가 혼재되어 있다. 이러한 기공은 원형, 선형 및 복합형으로 다양한 형태를 갖으며 알루미늄 소재가 보다 두꺼워지더라도 Fig. 5와 같이 동일한 결과를 보

Fig. 4 Detail on the porosity of the root zone at Fe/Al joint

Fig. 5 Various geometries of the porosity at weld root zone according to heat input conditions and material thickness: (a) low heat input at 1.2 mm Al (b) high heat input at 1.2 mm Al (c) low heat input at 3.0 mm Al

Fig. 6 Schematic illustration of highly pressurized zinc vapor deflects arc at no gap condition and vapor escape through pre-setting gap

인다.

이와 같이 이종접합부의 루트부에 기공이 발생되는 원인은 Fig. 6을 통해 설명할 수 있다. 스틸과 알루미늄은 용접 전 클램핑되어 이음부가 완전히 밀착된 상태에 있다. 그 상태에서 아크 발생 시 스틸에 도금되어 있던 Zn는 낮은 기화점으로 인해 강한 증기압과 함께 팽창하며 순식간에 기화된다. 이렇게 기화된 Zn는 토우부 및 루트부를 통해 배출되려 하지만 루트부의 경우 용융지로 덮이게 되며 완전히 밀착된 시편 사이의 공간에서 빠져나가지 못하고 잔류하여 응고 시 기공으로 남게 된다. 루트부는 특히 알루미늄과 스틸이 밀착된 부위로 열전도도가 좋아 용융풀의 빠른 온도 감소로 인해 가장 빨리 응고가 시작되고 이에 따라 충분한 입열이 전달되지 못한다. 이와 같은 이유로 융합불량이나 기공과 같은 형태의 결함이 루트부에 발생하게 되는 것이다.

이 경우 스틸과 알루미늄 소재 사이에 인위적인 공간을 두어 기화된 Zn가 갭 사이로 빠져나갈 수 있는 환경이 되면 Zn의 기화에 의한 기공은 현저히 감소하게 된다. Fig. 7은 갭의 유무에 따른 루트부 기공 발생에 대해 비교한 결과이다. 두께에 대한 기공 발생 영향도 같이 확인하기 위해 각각 1.2 mm 및 3.0 mm 두께의 Al 소재로 동일한 입열량을 적용하여 용접하였으며 갭은 0.4 mm로 설정하였다. 시험결과는 갭의 유무에 따라 루트부 기공 발생 측면에서 극명한 차이를 나타낸다. 뿐만 아니라 계면 길이와 젖음각에 대해서도 차이를 나타냈는데 이는 알루미늄과 스틸 사이의 갭 내에

Fig. 7 Comparison of porosity distribution at the root zone due to gap existence

발생하는 모세관 현상(Capillary force)에 의한 것으로 사료된다. 즉, 갭 사이로 빠져나가는 기화 Zn로 인해 보다 많은 아크 입열이 용가재의 용융에 사용되고 입열의 증가에 따라 용가재의 점성이 더욱 감소하여 갭 사이로의 침투가 더욱 용이해지기 때문에 전체적인 계면접합길이의 증가와 함께 젖음각이 감소된 것으로 판단된다.

현저히 감소된 기공에 의해 접합부의 인장강도는 증가한다. Fig. 8 및 Fig. 9는 동일 조건에서 각각 알루미늄 소재 두께 및 갭 크기에 따른 인장전단강도 변화를 보여준다. 갭은 0.2 mm 단위로 최대 0.8 mm 까지 인가하였다. 그 결과, 0.4 mm의 적정 갭 크기에서 최대 강도를 나타내었으며 이후 서서히 감소되는 경향이 나타났다. 여기서 흥미로운 사실은 갭에 의해 파단 모드가 변화된 것이다. 갭이 없어 루트부에 기공이 존재하던 시편은 기공이 응력집중부의 노치로 작용하여 이를 따라 수직으로 균열이 진전되어 용착금속에서 파

Fig. 8 Variation of joint strength with different heat input energy and gap size in the Al of 1.2 mm thickness

Fig. 9 Variation of joint strength with different heat input energy and gap size in the Al of 3.0 mm thickness

단 발생하지만, 갭이 존재하는 시편에서는 계면에서 파단이 발생한다. 이렇게 파단모드가 변하게 되는 이유는 갭에 의해 증가되는 편심 하중에 의해 전단응력과 인장응력 값이 변화되기 때문이다.

3.2 공정변수와 정적강도

접치기 구조를 갖는 이종접합부에서 형상학적으로 강도를 결정짓는 공정변수는 크게 입열량과 갭이 있다. 일반적인 아크 용접 이음부에서의 강도는 각장과 목두께 그리고 용입 깊이 등에 영향을 받는데, Fe/Al 이종접합부는 엄밀히 말해 계면접합에 의한 브레이징 공정이기 때문에 계면접합 길이가 강도를 최우선적으로 결정짓는 형상학적 인자로 판단할 수 있다. 이에 따라 모재가 충분한 젖음성을 갖는 경우 CMT 프로세스를 이용한 이종접합에서는 입열량에 따라 계면의 길이가 결정되어진다.

접합계면 길이(입열량) 및 갭 크기와 접합강도 간 연관성을 보다 자세히 확인하기 위해 Fig. 1에 제시된 조건으로 총 30세트의 용접 후 형상 분석 및 인장시험을 실시하였다. 이에 따른 인장전단시험 결과는 Fig. 8 및 Fig. 9에 각각 제시하였다. 시험 결과를 분석해보면 일단 갭의 유무에 따른 인장강도가 큰 차이를 보인다. 또한 일정 크기 이상의 갭은 접합강도를 증가시키나 일정 수준을 초과한 크기의 갭은 다시 접합강도가 감소되는 경향이 나타난다. 갭이 없는 상태에서는 저입열 조건에서 비교적 강도가 높지만 갭이 존재하게 되면 그 강도는 입열에 비례하여 증가한다. 시험결과는 모두 0.4 mm 크기의 갭을 주었을 경우 가장 높게 나타났다.

형상학적 인자에 대한 확인을 위해 입열 및 갭 조건을 배제하고 접합계면 길이와 젖음각의 상관성에 대해 분석하였으며, 이는 Fig. 10에 제시하였다. 이때의 계면 길이는 갭 사이로 침투하여 미용용 접합된 부위를 제외한 실제 접합길이를 측정하였다. 분석 결과 계면접합 길이의 증가에 따라 젖음각이 감소되며, Al 1.2 mm

Fig. 10 Relationship between wetting angle and bonding length

Fig. 11 Relationship between bonding length and tensile strength

Fig. 12 Relationship between wetting angle and tensile strength

두께 시편에서 보다 완만한 형상의 접합부가 얻어지는 것을 확인할 수 있다.

이후 젖음각과 접합계면 길이가 각각 인장강도에 미치는 영향을 각각 확인하기 위해 시험결과로부터 데이터를 추출하여 각각 Fig. 11 및 Fig. 12에 도시하였다. 먼저 Fig. 11에 나타난 계면접합 길이와 인장강도 간의 관계를 살펴보면, 인장강도는 접합계면 길이의 증가에 따라 약간 증가되나 그 영향이 크지 않는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 데이터의 산포는 갭 크기에 대한 고려가 되지 않기 때문에 편심으로 발생할 수 있는 강도 차이에 의한 것으로 사료된다. 젖음각의 크기 또한 접합강도에 직접적인 영향을 거의 주지 않는 것으로 나타났으며, 그 결과는 Fig. 12에 나타내었다. 이상과 같은 결과를 통해 이종접합부의 접합강도는 접합계면의 길이나 젖음각 등의 형상학적 영향보다는 알루미늄이 갖는 고유의 용접특성(용착금속의 강도)과 접치기 이음 구조에서의 편심 하중에 의한 이음부 끝단 루트부의 응력집중이 보다 큰 영향력을 미칠 수 있으며 이때의 응력집중은 루트부 기공의 존재유무에 따라 강도에 극명한 차이를 나타낸다. 실제 알루미늄 합금의 GMA 용접에서는 입열이 증가될수록 열영향부의 연화 영역이 넓어지나 수소에 기인한 기공의 발생은 감소되는 것으

로 알려져 있다⁶⁾. 그러나 Fe/Al의 이종접합부에서는 앞서 언급한 바와 같이 수소로 인한 미세기공과 더불어 Zn 기화에 의한 기공이 루트부에 더해진다. 또한 Zn에 의한 루트부의 기공은 특히 Fig. 7과 같이 입열량의 증가에 비례하여 형성된다. 이러한 사실은 갭이 없는 상태에서 용접 시 저입열 조건에서 상대적으로 높은 인장강도 값을 나타내는 사실을 통해 충분히 입증된다.

한편 인장시험 시 소재의 파단모드는 갭 크기에 따라 변화하는 것을 관찰할 수 있었으며, 특히 1.2 mm 두께 알루미늄 접합부에서 파단모드의 변화 경향이 뚜렷하게 나타났다. 갭이 없는 상태에서는 모두 용착금속에서 파단이 발생하였지만 갭이 0.2 mm에서는 용착금속과 계면파단 발생이 혼재하여 나타났으며, 갭이 0.4 mm 이상에서는 대부분 계면파단이 발생하였다.

갭 유무에 따른 파단모드의 변화에 대해 보다 정확한 확인을 위해 인장시험 중 고속카메라를 이용하여 그 현상을 관찰하였다. Fig. 13은 갭 유무에 따른 고속카메라 측정에서 초기, 파단직전 및 파단 직후의 영상을 캡처한 결과이다. 우선 갭이 없는 시편에서는 루트부에서의 결함(기공)이 쉽게 관찰된다. 이와 같은 상태에서 1축 인장시험에 의한 편심하중이 발생하게 되면 루트부에 응력집중이 일어나고 순식간에 균열이 진전되어 용착금속이 파단된다. 이때 스틸 모재의 변형은 거의 일어나지 않으며, 이에 따라 파단 발생 시점에서의 변위(Displacement)도 0.4 mm 이내로 크지 않다. 반면에 갭이 존재하는 시편에서의 파단은 루트부가 아닌 토우부에서 시작되는 것을 고속촬영을 통해 확인하였다. 시편의 변형이 진행될수록 스틸 모재의 변형은 점차 증가되며 응력집중은 토우부 쪽으로 이동한다. 스틸 모재는 파단직전 4.7도까지 변형되었으나 탄성영역 내 변형으로 계면파단 발생 직후 복귀한다. 마찬가지로 파단은 균열의 진전영역 없이 순식간에 발생하게 된다. 이러한 차이는

Fig. 13 Observation of the failure mode using high speed camera with gap existence

Fig. 14 Effects of gap on joint strength and displacement

Fig. 15 Various failure mode in 3.0 mm thick Al specimen

Fig. 14를 통해 보다 명확히 구분할 수 있다. 갭 유무에 따라 접합강도는 20% 이상 차이가 나며 변형률 또한 이와 비교한다.

반면 3.0 mm 두께의 Al 소재는 루트부의 기공 및 갭 유무 등과 상관없이 계면파단과 용착금속의 파단이 동일한 접합조건에서 랜덤하게 나타나는 경향을 보였다. Fig. 15는 이러한 현상에 대해 설명하고 있는데 루트부에 발생한 기공의 유무와 상관없이 용착금속에서 파단이 발생하는 경우도 있고 큰 기공이 존재하는 경우라도 계면파단이 발생하는 경우도 존재한다. 특히 계면파단과 용착금속의 파단에서 모두 Al 1.2 mm 두께의 소재와 비교해 0.3 mm 이하의 낮은 변위영역에서 파단이 발생하였는데 이는 스틸 및 알루미늄 소재 두께 증가로 인해 보다 큰 편심 하중에 의한 영향을 받기 때문으로 사료된다.

3.3 파면 해석(Fractography)

용접금속의 인장강도에 영향을 미치는 인자로서 응고 조직, 결정립도, 결정결함, 화학조성, 석출물의 양과 그 분포형태 등을 들 수 있다. 또한 용접부에 포함된 기공이 용접부 강도에 미치는 영향은 알루미늄 합금에 따라 다르나, 미세한 기공이 균일하게 분포될 경우는 인장 및 피로강도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다¹⁵⁾. 알루미늄 용접부의 기공과 기계적 성질에 관한 일

부 연구에서는 기공의 크기가 0.4 mm 이하의 경우 신율만 약 10% 저하될 뿐 강도에는 큰 변화가 보이지 않지만 루트부에서의 큰 기공은 인장강도가 약 16%, 신율은 약 40%의 저하를 나타낸다는 보고도 있다⁶⁾. 이러한 주장은 앞선 3.2절의 연구 결과와 상당히 일치한다. 루트부의 기공 유무에 따라 Fig. 14와 같이 20% 이상 강도차이를 나타낸다.

이와 같이 강도에 영향을 미치는 기공의 형태는 일반적으로 핀홀(Pin hole), 블로우홀(Blow hole) 및 웜홀(Worm hole)의 세 가지 형태로 구분할 수 있다¹⁶⁾. 기공의 성장속도보다 계면의 성장속도, 즉 응고속도가 대단히 빠르면 비드표면에 침으로 찌른 것과 같이 크기가 매우 작은 핀홀이 생성된다. 이보다 응고속도가 느리면 기공이 성장한 상태로 응고하므로 구상의 블로우홀이 생성된다. 이와 같은 블로우홀 중에서 형태가 길고 좁은 형상의 기공을 웜홀이라고 정의된다. Fig. 5에는 이종접합 루트부에 나타나는 다양한 기공의 형태에 대해 보여주고 있다. 이와 같이 루트부의 기공에서 시작된 균열의 생성, 진전 및 파단에 대한 정보는 Fig. 16 및 Fig. 17에 각각 제시하였다.

우선 Fig. 16은 Al 1.2 mm 두께 소재에 대해 갭이 없는 상태에서 접합한 시편에서 인장시험 후 단면을 보여준다. 루트부에는 좁고 가느다란 핀홀 형태의 기공이 발견되며, 용착금속 내 전체적으로 0.1 mm 이하의 미세기공이 상당히 분포되어 있다. 균열은 가느다란 핀홀 결합의 끝단에서 시작되어 주변의 미세기공을 따라 진전되며 최종적으로 인장하중의 수직방향으로 파단이 발생되었다. Fig. 16의 SEM 거시조직 관찰로부터 접합부의 루트부는 핀홀 결합이 연속적으로 발생되어 있음을 확인할 수 있으며 그 크기는 약 0.3 mm로 관찰되었다. 파단면에는 응력 파단에 의해 형성된 연성파단임을 알려주는 딴플(Dimple)이 형성되어 있으며, 큰 기공은 발견되지 않았고 대부분 지름 0.1 mm 이하의 매우 미세한 기공만이 연속적으로 관찰된다. 또한 SEM

Fig. 16 OM and SEM image of the crack propagation after tensile shear test specimen of 1.2 mm thick Al

거시조직에서의 기공은 비드 단면에서의 기공보다 훨씬 많이 발견되는데 이는 파단경로에서 기공을 많이 포함하는 면을 택하기 때문에 나타나는 현상이다.

Fig. 17은 Al 3.0 mm 두께 소재에서 마찬가지로 갭이 없는 상태에서 접합한 시편의 인장시험 후 단면을 보여준다. 루트부에서의 결합은 Fig. 16과 달리 블로우홀 형태의 구형 기공으로 형성되어 있는데 이는 알루미늄 소재의 두께 증가에 따라 보다 높은 입열 조건에서 접합되어 용융지의 응고속도가 상대적으로 느려져 기공의 성장이 보다 진행되었기 때문으로 보인다. 균열은 마찬가지로 인장하중의 수직방향으로 진전되어 파단에 이르렀으며 인근의 연속적인 기공을 따라 균열이 진전되고 있다. Fig. 17의 SEM 거시조직으로부터 루트부 기공의 크기는 지름이 최대 1.4 mm 정도로 시편 두께의 거의 절반을 차지하고 있어 절대 단면적의 감소로 인장강도가 Al 1.2 mm 소재의 인장강도에 비해 보다 낮게 나타난다. 또한 단면 관찰 결과에 비해 루트부의 기공이 보다 크게 보이는데 이는 마찬가지로 인장 파단에서 기공을 최대로 포함하는 면에서 파단되었기 때문이며 여기서도 응력파단면에는 딴플이 발견되었다.

이상과 같은 인장시험 파면해석 결과로부터 루트부 기공에 의한 균열 개시와 함께 절대단면적의 축소로 인해 인장강도가 저하됨을 확인하였다. 앞선 일부 연구에서는 Fe/Al 이종접합부의 강도를 결정짓는 큰 요인이 열영향부 연화에 의한 것으로 주장하고 있으나^{3,5)}, 파단면의 분석결과로부터 파단은 열영향부가 아닌 용착금속에서 수직방향으로 발생함을 확인함으로써 이러한 주장은 설득력이 없음을 입증하였다.

한편 파단면을 통해 확인된 용접부의 미세기공과 루트부의 큰 기공이 각각 수소와 Zn에 의한 것인지 확인하기 위하여 각 위치에서의 EDS 성분분석을 실시하였다. Fig. 18은 미세기공을 포함한 응력파단부의 성분과 루트부에서의 기공에서의 성분을 측정된 결과를 나

Fig. 17 OM and SEM image of the crack propagation after tensile shear test specimen of 3.0 mm thick Al

Fig. 18 EDS spectrum of matrix and porosity

타내고 있으며, 이러한 결과는 3.1절의 주장을 명확히 뒷받침한다. 루트부 기공에서는 Zn 성분이 10wt.% 이상 검출되나 미세기공부를 포함한 단면에서는 Zn가 거의 검출되지 않았으며, 이는 Zn 기화에 의한 기공은 루트부에 집중됨을 의미한다. 또한 루트부의 기공에서는 용착금속부의 기공과 달리 산소가 대량 검출되었는데 이는 이종접합 시 용가재와 모재가 충분히 융합되지 못하면서 대기 중의 산소에 의해 산화되었음을 의미한다. 이와 같은 현상은 융합불량에 해당하는 용접결합에서 때때로 발견되며¹⁶⁾ 루트부의 급속한 냉각으로 인한 미용융부가 존재함을 뜻한다.

루트부에 발생하는 기공의 감소를 위해 Al 3.0 mm 소재에서 갭을 0.6 mm 인가한 시편의 단면 및 파단면은 Fig. 19에 제시하였다. 균열은 마찬가지로 인장하중의 수직방향으로 발생되었으나 Fig. 17과 달리 루트부에 큰 기공은 발견되지 않았으며 이는 SEM 거시조직 관찰 결과에서도 확인할 수 있다. 루트부는 0.2 mm 정도의 연속적인 미용융부가 발견되었는데 이는 갭 사이

Fig. 19 OM and SEM image of the crack propagation after tensile shear test specimen of 3.0 mm thick Al with 0.6 mm gap

Fig. 20 Case of the interface fracture in 3.0 mm thick Al specimen

로 흘러들어간 용융지의 빠른 응고로 인해 발생한 미접합부이다. 이와 같이 확연히 줄어든 기공으로 인해 접합부는 Fig. 14과 같이 20% 이상 강도가 증가된다.

마지막으로 Fig. 20은 계면파단이 발생한 경우에서의 단면이다. 본 단면 관찰 결과로부터 균열의 시작점이 어디인지는 정확히 확인되지 않으나 3.2절의 고속카메라 관찰결과를 토대로 토우부에서 시작됨을 주장할 수 있다. 이와 같이 계면파단이 진행되는 경우에도 편심으로 인해 발생하는 전단응력과 인장응력의 동시 작용으로 인해 그림과 같이 수직방향으로의 균열도 동시에 진행된다. 겹치기 구조에서 인장시험 시 편심하중이 발생하게 되면 초기에는 전단응력이 주응력으로 작용하지만 시편의 변형이 진행될수록 전단응력의 감소와 함께 인장응력이 증가되게 된다. 이에 계면이 용착금속보다 먼저 항복할 경우 계면파단이 발생하게 되는 것이다.

3.4 응력 해석

앞서 이종접합부의 접합강도에 영향을 미치는 인자에 대해 실험 결과를 토대로 분석하였다. 이에 본 절에서는 ①접합계면의 길이, 즉 입열량에 의해 결정되는 용착금속의 양과 ②이음부 갭 조건 그리고 ③소재 두께와 같은 형상학적인 관점에서 인장시험 시 나타나는 현상에 대해 해석적으로 접근하고자 하였다.

첫째로 접합계면의 길이가 정적강도에 미치는 영향을 확인하기 위하여 계면의 길이를 각각 3.0~5.5 mm로 달리한 후 0.3 mm의 동일한 변위조건으로 해석하였다. 그 결과 Fig. 21과 같이 최대응력은 루트부에서 작용하고 있으며 계면의 중앙부에는 응력이 높지 않고 토우부에서 다시 응력이 집중되는 것을 볼 수 있다. 또한 접합계면 길이(면적)의 증가에 따라 응력의 분산을 가져와 루트부 및 토우부에 발생하는 최대응력이 비교적 선형적으로 감소하는 해석 결과로부터 접합계면 길이의 증가에 따라 더 높은 접합강도를 확보할 수 있음을 확인하였다.

그러나 불행히도 해석 결과와 실제 인장실험 결과는

Fig. 21 FEM result for stress distribution at Fe/Al joint of 1.2 mm thickness

일치하지 않았다. 갭이 없는 시편의 인장시험 결과는 Fig. 8 및 9에 제시된 것과 같이 입열량(접합계면 길이)이 증가할수록 인장강도가 감소한다. 이렇게 상반된 결과가 나타난 이유는 우선적으로 접합부에 대한 열적 및 역학적 특성을 고려하지 않고 형상에 대한 선형 응력해석만을 실시하였기 때문이다. 또한 해석상의 한계에 의한 원인도 존재한다. 실제 해석에서는 루트부 기공과 같은 예측 불가능한 변수에 대한 해석 조건의 반영이 매우 어렵다. 따라서 이와 같은 해석 결과는 계면 접합 길이의 증가에 따라 루트부에 발생하는 최대응력이 감소되는 효과에 비해, 입열 증가에 따른 루트부의 기공 성장으로 인한 노치효과와 증가가 보다 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다.

다음으로 갭의 유무에 따른 응력집중 변화에 관해 해석하였다. Fig. 22는 마찬가지로 Al 1.2 mm 두께에서 동일한 계면접합 길이로 모델링한 상태에서 스틸과 알루미늄 사이의 갭만 0.5 mm로 띄운 뒤 0.3 mm의 변위조건에서의 응력 분포를 나타낸다. 이때 갭은 Fig. 3과 같이 최대한 실제와 가깝게 모델링하여 갭 부위에

Fig. 22 FEM result for stress distribution at Fe/Al joint of 1.2 mm thickness with 0.5 mm gap

Fig. 23 Variation of max. stress due to gap size

노치선단을 최소화하였다. 갭 조건에서의 해석결과 응력집중부의 위치는 루트부가 아닌 토우부에서 발견되었다. 정확히는 스틸과 접합계면 간 토우부 끝단에서 응력이 최대로 되었는데 갭이 없는 Fig. 21의 결과와 비교하여 최대응력은 94 MPa 수준으로 낮게 나타났다. 한편 Fig. 23은 접합계면 길이를 4.5 mm로 통일하고 갭 크기만 0, 0.2 mm, 0.5 mm 및 1.0 mm로 변화시켜가며 갭 크기에 따른 응력 변화에 대해 해석한 결과를 보여준다. 갭의 존재로 인해 응력집중부의 위치는 루트부에서 토우부 쪽으로 변화되며 최대응력은 갭이 없을 때 151 MPa에서 갭이 0.2 mm일 때 94 MPa로 약 30% 정도 감소된다. 그러나 갭의 크기가 계속적으로 증가되어도 이후의 감소폭은 크지 않음을 확인할 수 있다.

갭에 의한 영향에 대한 해석결과는 실제 Fig. 8의 인장시험 결과와도 일부 유사한 경향을 보인다. 단 실제 시험에서는 0.2 mm가 아닌 0.4 mm 이상의 갭에서 인장강도가 크게 증가하였는데 이는 0.2 mm의 갭이 루트부의 기공을 완전히 제거하기에는 어렵기 때문에 발생한 차이로 판단된다. 실제로 갭이 존재함에 따라 변화되는 응력집중부의 위치는 앞선 Fig. 13의 고속카메라를 통한 균열 시작점 관찰 결과와도 일치한다. Fig. 24에는 갭의 유무에 따른 파단면의 위치 변화에 대한 실험결과와 해석결과를 비교하였다.

마지막으로 소재 두께 변경에 따른 응력 변화에 대해 확인하고자 기존 Al 1.2mm 두께 시편에 대해 스틸을 2.0 mm, 알루미늄을 3.0 mm로 두께를 각각 변경한 뒤 구조해석을 진행하였다. 그 결과 최대응력 집중부는 두께 변화와 무관하게 마찬가지로 토우부에서 관찰되었으나, 그 응력의 크기는 Fig. 21의 Al 1.2 mm 해석결과와 비교하여 큰 폭으로 증가한 268.8 MPa의 결과가 나왔다.

Fig. 24 Comparison of the stress concentrated location between FEM and experimental result

Fig. 25 Schematic of deformation of the lap joint due to eccentric loads

이상의 FEM 해석결과에서 겹 및 소재 두께 변화에 의해 최대응력이 달라지는 이유를 설명하기 위해 최대 비틀림 에너지 이론을 적용하여 싱글 랩 조인트 시편의 응력 변화에 대한 수치해석을 실시하였다. Fig. 25와 같이 인장시험편은 편심에 의해 점점 변형되며 계면접합부에 걸리는 하중은 인장하중과 전단하중의 복합적인 작용에 의해 최종적으로 파단에 이르게 된다. 이에 따라 겹치기 구조의 시편 접합부에서 발생하는 각각의 응력은 다음의 식(3)으로 표현될 수 있으며, 이는 널리 알려진 폰 미세스(Von-mises stress) 응력 공식이다.

$$2\sigma_e^2 = (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2 \quad (3)$$

Fig. 25의 형태를 갖는 구조에서 Z축에 걸리는 응력은 매우 작으므로 $\sigma_z = 0$ 이라고 하고, 각각 $\sigma_x = \tau$, $\sigma_y = \sigma$ 라고 한 후 σ_x 및 σ_y 는 변형각도가 θ 만큼 발생된 경우 싱글 랩 조인트 구조에서 최종적으로 편심하중에 의한 응력 변화에 대해 다음과 같은 관계를 도출할 수 있다.

$$\frac{\sigma_e^2}{\sigma^2} = \sqrt{1 - \sin\theta \cos\theta} \quad (4)$$

이상과 같이 편심을 받는 겹치기 구조에서의 응력 분포는 이상적인 하중조건($\sigma_e/\sigma = 1$, $\theta = 0$)에서는 응력이 모두 전단응력으로 작용하지만, 변형이 진행됨에 따라 하중이 점점 분산되어 작용한다. 식(4)의 θ 는 회전각도(Rotation angle)로 이것은 소재 두께와 폭, 길이, 탄성계수, 하중 및 겹 등의 영향을 받아 결정되는 함수이며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f(\theta) = (L \cdot b \cdot h \cdot t_{gap} \cdot P \cdot E) \quad (5)$$

여기서, L =시편 길이, b =시편 폭, h =시편 두께, t_{gap} =갭 크기(mm), P =인장하중(N), 그리고 E =탄성계수(N/mm^2)를 의미한다. 이후 $f(\theta)$ 에 대한 관계식 도출을 위해 캔틸레버(Cantilever)보의 처짐 및 변형 이론을 적용하였다. 겹치기 시편에서 하중의 증가에 따라 편심에 의한 변형이 진행되면 순수 하중은 모멘트와 횡하중(Lateral load)으로 분리되며 수식의 단순화를 위해 겹치기 용접부의 상/하판 두께가 동일하다고 가정할 경우 최종적으로 $f(\theta)$ 는 다음 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = \frac{h + t_{gap}}{L \times \left[1 + \frac{E b h^3}{6 P L^2} \right]} \quad (6)$$

상기 과정으로 도출된 식 (6)으로부터 겹과 소재 두께에 따른 해석결과 고찰이 가능하다. Fig. 26은 식 (5)를 대입하여 소재 두께와 겹 존재에 따른 회전각도의 변화에 대해 계산한 결과이다. 이때의 탄성계수는 알루미늄 탄성계수를 적용하였으며, 시편의 폭과 하중은 실제 인장조건을 고려하여 각각 25 mm, 5 kN으로 입력하였다. 계산결과 소재 두께가 4 mm가 될 때까지는 두께 변화에 따른 회전각이 증가하는 경향을 나타냈으며 그 이후부터는 다시 감소하였다. 또한 식(6)을 통해 동일한 형상조건에서 하중의 증가에 따른 회전각의 변화에 대해 계산하면, 하중의 증가에 비례하여 회전은

Fig. 26 Elastic rotation of lap joint with different sheet thickness or gap size

증가하다가 그 회전각은 점차 수렴되는 것을 확인할 수 있으며 이러한 경향은 갭 크기에 비례하여 나타났다.

이상과 같은 계산 결과를 이용하여 Fig. 23의 갭 크기에 따른 최대응력 변화에 대한 고찰이 가능하다. 우선 Fig. 26을 통해 동일 두께에서 갭이 있는 경우 회전이 더욱 많이 발생함을 확인할 수 있다. 회전각도는 결국 시편의 변형량(Deflection)과 관계되고 이러한 변형량은 회전각도에 대한 결과를 적분함으로써 얻을 수 있다. 이것은 다시 말해 동일한 회전량에서는 갭이 있는 시편에서의 응력이 모멘트와 횡하중으로 분산됨으로서 더욱 적게 걸리게 됨을 의미하는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 이종접합부의 정적강도 및 파단특성을 보다 명확하게 확인하기 위해 겹치기 구조에서 형상학적으로 강도를 결정짓는 공정변수에 따른 인장 시험을 실시한 후 이 때 나타나는 기계금속학적 현상에 대한 연구를 진행하였다. 균열의 생성 및 전파경로 확인을 위해 파면해석을 포함한 금속학적 분석과 함께 FEM 해석 및 수치해석을 통한 역학적 특성에 대해 연구하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) Fe/Al 이종접합부의 접합강도는 접합계면의 길이나 젖음각 등의 형상학적 영향보다는 루트부에 존재하는 Zn의 기화에 의한 기공이 보다 큰 영향을 미친다. 따라서 접합강도 향상을 위해서는 적절한 크기의 갭을 부여해야 하며, 실험결과 소재 두께와 무관하게 0.4 mm 갭이 존재할 때 가장 높은 인장강도를 나타내었다.

2) 파면해석을 통해 루트부 기공에 의한 균열 개시와 함께 인근의 연속적인 기공을 따라 균열이 진전되며 파단에 이르렀으며, 인장강도의 저하는 용착금속부에 존재하는 기공으로 인한 절대단면적의 축소로 인한 것임을 확인하였다. 또한 파단은 열영향부가 아닌 용착금속에서 수직방향으로 발생함을 확인함으로써 기존에 발표된 열영향부 연화에 의한 영향은 없는 것으로 밝혀졌다.

3) FEM을 이용한 선형응력해석 결과는 실제 실험결과와는 상이하게 나타났는데, 이는 우선적으로 접합부에 대한 열적 및 역학적 특성을 고려하지 않고 형상 변수에 의해서만 해석을 진행했기 때문이며, 또한 용접 시 발생할 수 있는 기공에 대한 해석적 반영이 어렵기 때문이다.

4) 갭 및 소재 두께 변화에 의해 최대응력이 달라지는 이유를 설명하기 위해 수치해석을 실시한 결과 겹치기 구조에서 동일한 변위조건(회전각도)에서 갭이 증가될수록 하중이 적게 걸린다는 사실을 보의 처짐 및 변형 이론 적용을 통해 확인하였다.

ORCID: Yong Kim: <https://orcid.org/0000-0002-7181-5851>

References

1. J. Bruckner, Cold metal transfer has a future joining steel to aluminum, *Welding Journal*, 84(6) (2005), 38-40
2. H.T. Zhang, J.C. Feng, P. He and H. Hackl, Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminum zinc coated steel joints made by modified metal inert gas welding-brazing process, *Materials Characterization*, 58(7) (2007), 588-592
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.07.008>
3. Shanglu Yang, Jing Zhang, Jin Lian and Yongpin Lei, Welding of aluminum alloy to zinc coated steel by cold metal transfer, *Materials & Design*, 49 (2013), 602-612
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.045>
4. Hongtao Zhang and Jiakun Liu, Microstructure characteristics and mechanical property of aluminum alloy / stainless steel lap joints fabricated by MIG welding - brazing process, *Materials Science and Engineering: A*, 528(19-20) (2011), 6179-6185
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.039>
5. R. Cao, Gang Yu, J.H. Chen and Pei-Chung Wang, Cold metal transfer joining aluminum alloys to galvanized mild steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(10) (2013), 1753-1763
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.004>
6. 정점진, 오동수, 알루미늄 용접의 현장기술, *기전연구사*, (2013), 362
7. Sushovan Basak, Hrishikesh Das, Tapan Kumar Pal and Mahadev Shome, Characterization of intermetallics in aluminum to zinc coated interstitial free steel joining by pulsed MIG brazing for automotive application, *Materials Characterization*, 112 (2016), 229-237
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.12.030>
8. M. Cremer, M. Zimmermann and H. J. Christ, High-frequency cyclic testing of welded aluminum alloy joints in the region of very high cycle fatigue, *International Journal of Fatigue*, 57 (2013), 120-130
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.10.012>
9. Jian Lin, Ninshu Ma, Yongping Lei and Hidekazu Murakawa, Shear strength of CMT brazed lap joints between aluminum and zinc coated steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(8) (2013), 1303-1310
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.02.011>
10. Honggang Dong, Wenjin Hu, Yuping Duan, Xudong Wang and Chuang Dong, Dissimilar metal joining of aluminum alloy to galvanized steel with Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu and Zn-Al filler wire, *Journal of Materials Processing Technology*, 212(2) (2012), 458-464
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.10.009>
11. Krishna P. Yagati, Ravi N. Bathe, Koteswararao V. Rajulapati, K. Bhanu Sankara and Rao G. Padmanabham, Fluxless arc weld-brazing of aluminum alloy to steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12) (2014), 2949-2959

- <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.017>
12. Yongchao Su, Xueming Hua and Yixiong Wu, Quantitative characterization of porosity in Fe/Al dissimilar materials lap joint made by gas metal arc welding with different current modes, *Journal of Materials Processing Technology*, 214(1) (2014), 81-86
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.08.002>
 13. Ali Mehrani Milani, Moslem Paidar, Alireza Khodabandeh and Saeed Nategh, Influence of filler wire and wire feed speed on metallurgical and mechanical properties of MIG welding-brazing of automotive galvanized steel / 5754 aluminum alloy in a lap joint configuration, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(9-12) (2016), 1495-1506
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7505-4>
 14. Song Niu, Su Chen, Honggang Dong, Dongsheng Zhao, Xiaosheng Zhang, Xin Guo and Guoqiang Wang, Microstructure and properties of lap joint between aluminum alloy and galvanized steel by CMT, *Journal of Material Engineering and Performance*, 25(5) (2016), 1839-1847
<https://doi.org/10.1007/s11665-016-2035-2>
 15. C. H. Lee, and R. W. Chang, Weldability of Al alloy, Part 1: Cracking and porosity, *Journal of KWS*, 10(3) (1992), 1-11
 16. 이병훈, 용접입열량과 인장속도 변화에 따른 2519 알루미늄 용접부 파괴에 관한 연구, *충남대학교 박사학위 논문*, (2003)
 17. <http://www.matweb.com>, Material Property Data
 18. G. L. Lin, Linear relationship between vickers hardness and strength of 6063 aluminum alloy profile, *Light Alloy Fabrication Technology*, 30(1) (2002), 29-31
 19. Liu Jia, Jiang Shichun, Shi Yan, Ni Cong, Chen Junke and Huang Genzhe, Effects of zinc on the laser welding of an aluminum alloy and galvanized steel, *Journal of Material Processing Technology*, 224 (2015), 49-59
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.017>
 20. Piotr Matysik, Stanisław Józwiak and Tomasz Czujko, Characterization of Low-Symmetry Structures from Phase Equilibrium of Fe-Al System-Microstructures and Mechanical Properties, *Materials*, 8(3) (2015), 914-931
 21. Yongchao Su, Xueming Hua and Yixiong Wu, Influence of alloy elements on microstructure and mechanical property of aluminum-steel lap joint made by gas metal arc welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 214(4) (2014), 750-755
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.11.022>
 22. L. Shao, Y. Shi, J. K. Huang and S. J. Wu, Effect of joining parameters on microstructure of dissimilar metal joints between aluminum and galvanized steel, *Materials & Design*, 66 (2015), 453-458
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.026>