

A1 5052 합금 후판재의 전자빔 용접부 단면 형상과 강도에 관한 연구

김인호 · 이길영 · 주정민 · 박경태 · 천병선

大韓熔接·接合學會誌 第27卷 第3號 別冊

2009. 6

Al 5052 합금 후판재의 전자빔 용접부 단면 형상과 강도에 관한 연구

김인호* · 이길영** · 주정민** · 박경태* · 천병선*†

*충남대학교 나노공학부

** (주)엘엔

A Study on Electron Beam Weldmetal Cross Section Shapes and Strength of Al 5052 Thick Plate

In-Ho Kim*, Gil-Young Lee**, Jeong-Min Ju**, Kyoung-Tae Park* and Byong-Sun Chun*,†

*Dept. of Nano Material Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**LN co., Ltd. Daejeon 305-509, Korea

†Corresponding author : pfcbs@cnu.ac.kr

(Received November 24, 2008 ; Revised March 3, 2009 ; Accepted June 8, 2009)

Abstract

This present paper investigated the mechanical properties and the microstructures of each penetration shapes classifying the conduction shape area and the keyhole shape area about electron beam welded 120(T)mm thick plated aluminum 5052 112H. As a result the penetration depth is increased linearly according to the output power, but the aspect ratio is decreased after the regular output power. In the conduction shape area, the Heat affected zone is observed relatively wider than the keyhole shape area. In the material front surface of the welded specimen, the width is decreased but the width in the material rear surface is increased. After the measuring the Micro Vickers Hardness, it showed almost similar hardness range in all parts, and after testing the tensile strength, the ultimate tensile strength is similar to the ultimate tensile strength of the base material in all the specimens, also the fracture point was generated in the base materials of all the samples. In the result of the impact test, impact absorbed energy of the Keyhole shape area is turned up very high, and also shown up the effect about four times of fracture toughness comparing the base material. In the last result of observing the fractographs, typical ductile fracture is shown in each weld metal, and in the basic material, the dimple fracture is shown. The weld metals are shown that there are no other developments of any new chemical compound during the fastness melting and solidification.

Key Words : Electron beam welding, Aluminum alloy, Thick Aluminum plate, Vacuum chamber, Full penetration

1. 서 론

반도체 산업에서 대형 구조물의 경량화는 효율의 극대화에 가장 중요한 과제로 인식되고 있으며, 경량 구조물의 품질, 신뢰성, 안전성 등을 고려할 때 대표적인 경량화 금속인 알루미늄 합금의 적용 영역은 증가하고

있는 추세이다. 알루미늄 합금은 높은 경량화율과 고비강도 특성, 그리고 높은 재활용성 및 공해문제의 저감 등을 해결할 수 있는 가장 유력한 금속으로 합금원소와 적절한 열처리를 통해 최적의 기계적 성질이 얻어지도록 되어 있다. 그러나 알루미늄 합금은 철강 재료와 비교하여 약 43% 정도의 용점과 2배 정도의 비열, 그리고 용접잠열이 1.5배정도로 크기 때문에 국부적인 가열

이 매우 어려우며 재료의 용융을 위해 다량의 열을 급속하게 공급해야할 필요가 있다¹⁾. 이러한 이유로 후판의 알루미늄에 대해 기존의 아크용접공법 적용시 변형 등의 문제로 용접공정상에 난점을 가지고 있다.

본 연구는 이러한 알루미늄 후판재의 용접에 있어서 최소의 열 변형을 유지하면서 좁고 깊은 용융 접합이 가능한 대표적인 고밀도 에너지 용접법인 전자빔용접²⁾ (Electron Beam Welding)을 이용하여 반도체 분야의 구조물에 널리 적용되고 있는 Al 5052 H112 후판재에 대한 용접특성을 연구하였다. 실험에서 120mm 두께를 가지는 후판에 대한 완전 용입 조건을 도출하기 위해서 출력 증가에 따른 용입 깊이 변화를 측정³⁻⁷⁾ 하였으며, 도출된 용접조건을 사용하여 시험편을 제작하였다. 1pass로 완전 용입된 시험편을 이용하여 후판 용접시 발생하는 용접구조물의 폭 변화량을 관찰하였으며, 단면분석을 통하여 용입 형태를 관찰하였다. 또한 용입 형태 관찰을 통해 상이한 용입 형태를 갖는 부분 즉, 열전도 형태로 용접된 부분과 기홀 형태로 용접된 부분으로⁸⁾ 대별하여 각 용접부가 모재와 비교하여 가지는 경도시험, 인장시험, 충격시험 등의 기계적 특성과 미세조직 등에 대해서 조사하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에 사용한 후판 알루미늄 합금은 비열처리형 합금인 A5052 H112의 상용재로 일본 고베사의 제품을 사용하였다. Table 1에 연구에 사용된 합금의 화학 조성을 나타내었다.

2.2 실험방법

2.2.1 용접 실험 장비

120mm 두께를 가지는 Al 5052 H112 후판재의 전자빔 용접특성 평가를 위해 가속전압이 120kV이며, 최대용접전류를 1000mA까지 조절 가능한 120kW급 고출력 전자빔 용접장치를 본 실험에 사용하였다. 진공 챔버는 6m(L) × 6m(D) × 4.5m(H) 크기를 갖으며, 전자총이 진공챔버내에서 다축으로 이동 가능하도록

Table 1 Chemical composition of material used. (wt.%)

Elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
Al 5052	0.09	0.21	0.02	0.05	2.46	0.22	0.01	bal.

로 만들어진 장치이다. Fig. 1에 본 실험에 사용한 고출력 전자빔 용접 장비의 내부 모습을 나타내었다.

2.2.2 용접 실험 조건

본 연구에서는 100(W)mm×120(T)mm×1500(L)mm의 크기를 가지는 Al 5052 H112 후판재를 Butt joint 형태의3락(Burn Through)을 방지하기 위해서 동종 재료의 보조판(Back Plate)을 설치하였다. 또한 안정된 전자빔의 조사를 위해서 챔버내의 진공도는 5×10^{-5} torr정도로 유지하였으며, 용접속도는 모든 시험에서 동일하게 400mm/min.으로 진행하였다. BOP 용접된 시험의 용입 깊이를 근거로 본 연구에 적용한 최종 용접 조건은 Table 2의 No. 6 조건으로 수행하였다.

2.2.3 용접부 특성 평가 방법

Fig. 2는 120mm 두께의 Al 5052 H112재에 대해 1Pass로 제작한 Butt Joint의 전자빔 용접부 단면 형태를 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 Fig. 2에 나타낸 것처럼 열전도 형태의 용접 영역과 기홀 형태의 용접영

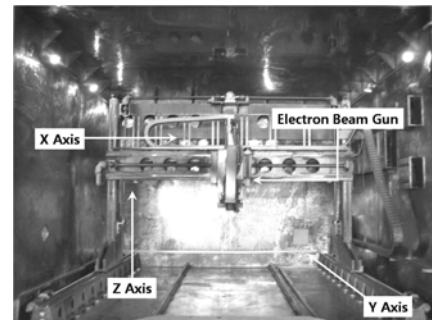


Fig. 1 The photo of the Electron beam welding machine used

Table 2 Welding parameters of EBW

NO.	Welding Current [mA]	Focusing Current [mA]	Output Power [kW]	Penetration depth [mm]	Bead Width [mm]
1	125	520	15	55	10.1
2	175	516	21	78	11.5
3	225	514	27	93	12.2
4	275	510	33	106	12.7
5	325	510	39	116	13.4
6	375	508	45	125	14.8
7	425	505	51	132	16.0

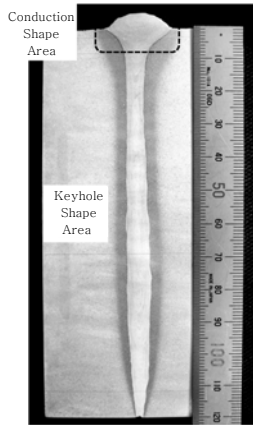


Fig. 2 Photograph showing the macro section of the EB weldment

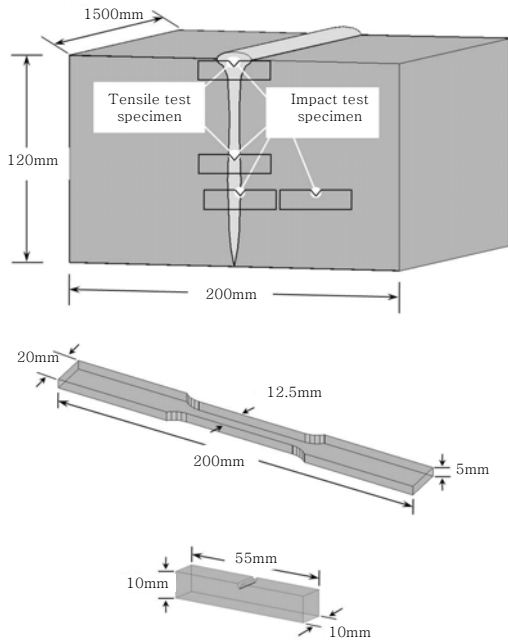


Fig. 3 Preparation of aluminum alloy samples by EBW for various inspection purposes

역을 각각 구분하여 각 영역에서의 미세조직과 기계적 성질을 조사하였다.

Fig. 3에 용접된 시편에 대한 인장시험편 및 충격시험편의 채취위치를 표시하였다. 인장시험을 위해 용접선에 수직인 방향으로 열전도 형태의 용접 영역 및 키홀 형태의 용접 영역 그리고 모재영역에 대해서 Fig. 3의 (a)와 같이 가공하였다. 또한 용접부의 인성을 평가하기 위해서 Charpy V notch 충격시험을 이용하였다. 시편의 형상은 Fig. 3의 (b)와 같다. 충격시험의 제작은 열전도 형태의 용접 영역, 키홀 형태의 용접영역, 용융선 및 모재에 대해 V notch를 위치시켜 각각 5개의 시편을 제작하여 상온에서 실험하였다. 또한

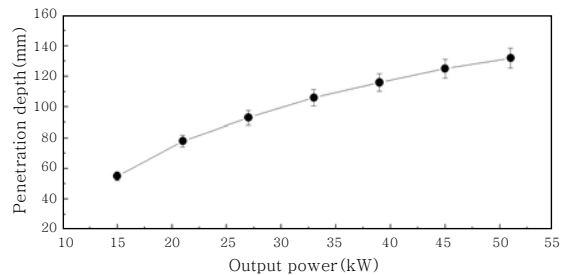
OM, SEM을 이용하여 각 영역에서의 응고조직 및 파 단면을 관찰하였다. 그리고 1500mm 길이에 대해서 전자빔용접으로 인한 시편의 폭 변화량을 관찰하기 위해서 용접 전과 후에 재료의 상단부 및 하단부에 대해서 길이방향으로 50mm간격으로 시편의 폭을 측정하여 변형량을 관찰하였다. 또한 XRD를 이용하여 용접부의 상변화를 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

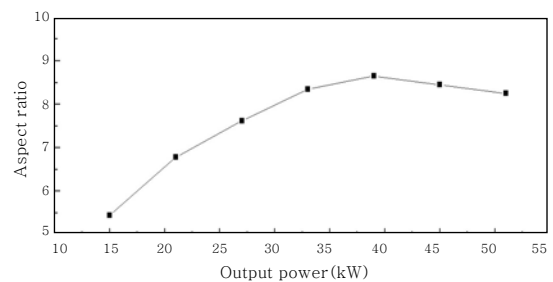
3.1 출력조건에 따른 용입 깊이 변화 및 용접부 폭 변형량 관찰

용접속도, 챔버내의 진공도를 동일하게 유지한 상태로 전자빔 출력의 증가에 따른 용입 깊이 변화 및 각 조건에서의 종횡비를 관찰하여 Fig. 4에 나타내었다. 용접시 전자빔 출사부에서 재료표면까지의 거리(300mm)를 고정변수로 하고 용접전류에 따라 변화하는 초점위치를 일정하게 유지시키기 위해서 포커싱 전류를 조절하였다. 시험 결과, 출력 증가에 따라 용입 깊이는 선형적으로 증가하였으나, 용입 깊이와 비드의 폭 비를 분석한 결과, 약 40kW 출력 영역 이후에는 용입깊이가 증가했음에도 불구하고 비드폭의 증가로 인해 종횡비가 감소하는 경향을 나타내었다. 이때 비드폭은 Fig. 5에서 나타난 것처럼 각 시편에서 0mm 위치의 측정값을 사용하였다.

BOP 용접 실험 결과를 근거로 하여 120mm 두께를



(a) Penetration depths



(b) Aspect ratio

Fig. 4 Output power Vs. (a)Penetration depths and (b)Aspect ratio

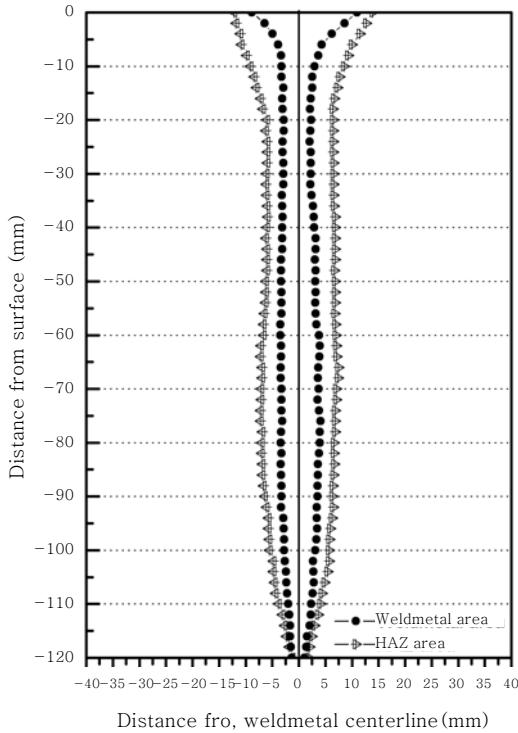


Fig. 5 The profile of weldmetal area and HAZ

가지는 Al 5052 H112재에 적용된 용접조건에 의해 형성된 용접부의 단면 프로파일을 용접금속과 열영향부를 구분하여 Fig. 5에 나타내었다. 측정방법은 표면으로부터 깊이방향으로 5mm씩 증가시키며 용융부 및 열영향부 폭을 측정하였으며, 분석결과 열전도 형태의 용입 형상은 재료 표면으로부터 약 7mm 정도로 판단하였으며, Fig. 5에서 보듯이 열전도 형태의 용입 형상을 갖는 부분은 전반적으로 키홀 형태의 용입 형상을 가지는 부분에 비해 비교적 넓은 영역의 열영향부가 존재하는 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 높은 가속전압을 가지는 전자빔이 재료에 조사될 경우, 재료의 표면에서 1차적으로 전자빔의 흡수가 발생하고 이를 통해서 재료가 용융되는데, 이 과정을 통해서 전자빔의 흡수가 더욱 가속화되어 열전달이 증가하는 현상으로 인해 나타난 결과로 판단된다. 그리고 이런 선행 과정을 통해서 Cavity가 형성되는 시점 즉, 키홀이 발생하는 시점에서는 흡수효율이 높기 때문에 상대적으로 적은 열 영향을 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 6에 1500mm 길이를 가지는 시편에 대해서 용접전과 용접 후에 대한 폭 변형량 측정 결과를 나타내었다. 그림에서 보듯이 재료 표면에서는 전체적으로 용접전의 치수와 비교하여 폭이 감소하는 경향을 나타내었으며, 재료 하단 면에서는 측정치가 용접전과 비교하여 증가하는 경향을 나타내었다.

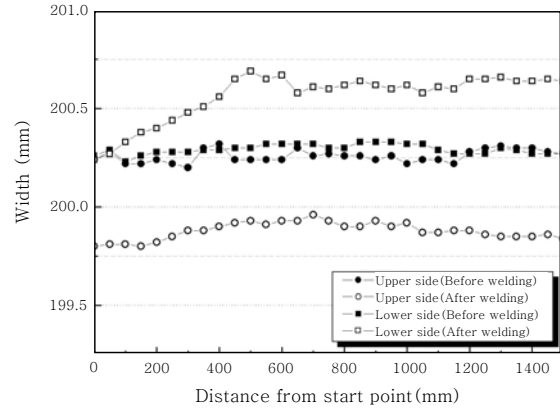


Fig. 6 Comparison of width variation for before welding Vs. after welding

3.2 용접부 기계적 특성

전자빔 용접된 알루미늄합금의 용접부에 대해 열전도 형태의 영역, 열전도 형태와 키홀 형태로 전이되는 영역, 키홀 형태의 영역 및 루트부에 대한 마이크로 비커스 경도를 Fig. 7에 나타내었다. 각각 구분되어 측정된 영역 모두에서의 경도 값은 용접부, 열영향부 및 모재 모두 커다란 차이를 보이지 않는 유사한 결과를 나타내고 있다. Al 5052 H112재는 가공경화 처리된 합금이나 용접금속은 급속 용융 및 급속 응고 냉각을 통해 형성된 조직으로 가공경화 효과의 소멸이 예상되고, 5052합금의 주 강화기구인 고용강화 효과도 고에너지 열원을 통해 증기압이 높은 Mg 원소 등의 일부 손실이⁹⁾ 예상되나 급속 응고 냉각을 통해 형성된 용접금속의 커다란 강도 저하는 관찰되지 않았다.

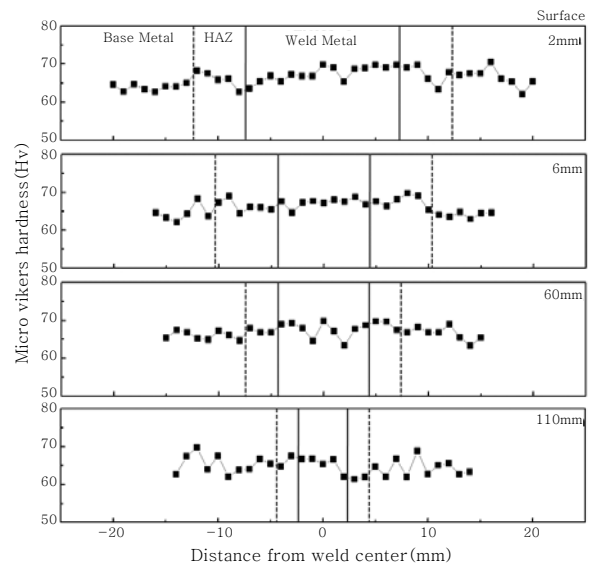


Fig. 7 Comparison of hardness distribution between conduction shape area and keyhole shape area

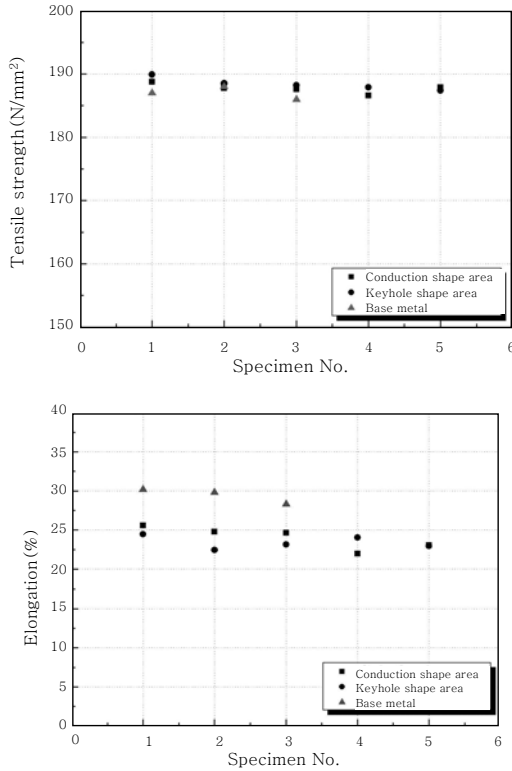


Fig. 8 Comparisons of tensile strength and elongation in electron beam welds and base metal

Fig. 8은 Al 5052 H112재에 대해 열전도 형태의 용접부, 키홀 형태의 용접부 및 모재에 대해 각각 5개씩 수행한 결과를 나타내었다. 인장강도의 평균치는 열전도 형태의 용접부가 187.7 N/mm² 키홀 형태의 용접부가 188.4N/mm² 모재가 187 N/mm²로 세 영역 모두 유사한 값을 나타내고 있으며, 이는 모두 모재의 인장강도와 유사한 값이다. 또한 모든 인장시편에서 파단은 모재부에서 발생되었다. 고용강화형 알루미늄 합금에 대한 전자빔 용접시 강도저하를 유발할 수 있는 요인 즉, 용접동안의 높은 증기압을 가지는 Mg 원소의 소실 및 가공경화 효과의 소실이 발생되었다라도 용접부에서 파단이 발생하지 않은 이유는 급속 용융 및 급속 응고 냉각에 의해서 형성된 조직인 용접부내에 기계적 성질에 영향을 줄 정도의 기공이나 균열 등의 결함이 존재하지 않음을 나타낸다.¹⁰⁾ 연신율의 경우는 모재에서 측정된 결과가 약 29% 정도이며, 열전도 형태의 용접영역에서 채취한 시편과 키홀 용접 영역에서 채취한 시편의 평균값이 모재보다 약 5~6% 정도 감소됨을 확인할 수 있었다.

충격시험은 열전도 형태의 용접부 및 키홀용접부 그리고 fusion line, 모재의 4개 부분에 대해서 각각 5

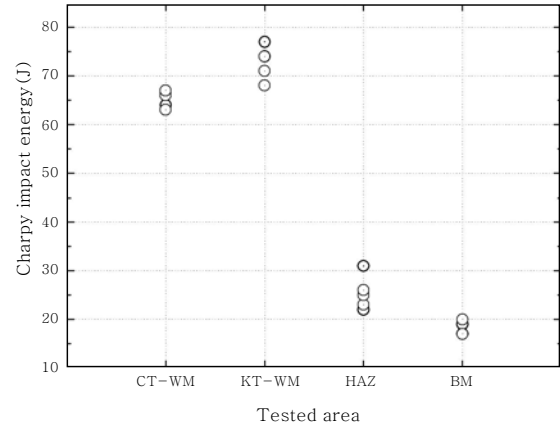


Fig. 9 Comparisons of impact properties in electron beam welds and base metal

개의 시편을 제작하여 상온에서 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

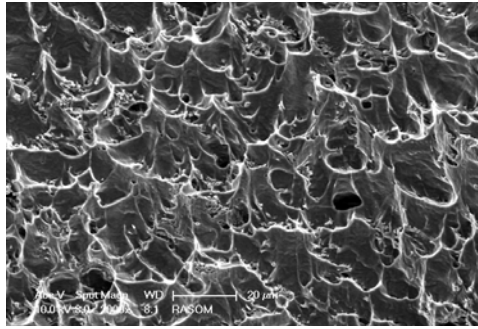
충격 흡수 에너지 값은 열전도 형태의 용접부가 평균 약 64.8J의 값을 가지며, 키홀 형태의 용접부가 평균 72.8J로 가장 높은 충격 흡수 에너지 값을 나타내었다. 용융선에서 채취한 시편의 충격 흡수에너지 값은 약간의 편차를 가지나 약 25.4J 정도의 평균값을 가지며, 이는 키홀 용접부와 비교하여 약 35% 정도로 용접부에 비해 큰 감소 결과를 나타내었다. 또한 모재에서는 키홀 용접부와 비교하여 약 25% 정도 수준의 충격 흡수 에너지 값을 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 10에 각 충격시편에 대한 파단면 사진을 나타내었다. 열전도 형태의 용접부와 키홀형태의 용접부에서는 전형적인 딴플 파단면을 나타내고 있으며, 용융선에서 채취한 시편의 경우 파단은 모재 쪽으로 진행되었으며, 딴플 파단면과 입계 및 입내 파단면의 혼합조직을 나타내고 있다.

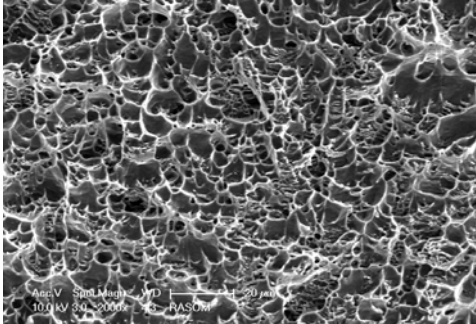
또한 모재에서는 전형적인 취성적 입계 및 입내파단면을 관찰할 수 있었다. 충격 인성치의 경우, 앞의 인장특성 및 경도 특성과는 달리 각 영역에서 현저한 차이를 나타내며, 전자빔 용접에 의해 생성된 알루미늄 합금의 용접부는 인성측면에서 매우 유용한 프로세스라고 판단된다.

3.3 용접부 미세 조직 관찰

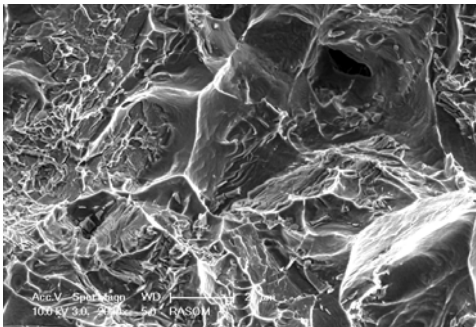
전자빔 용접으로 형성된 알루미늄 합금의 용접부에 대해 열전도형태로 용접된 부분과 표면으로부터 약 60mm 정도에 위치한 키홀 형태로 용접된 부근에 대해 용접급속, 용융선 및 열영향부 에 대한 단면 분석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 두 영역 모두 용융선 부근



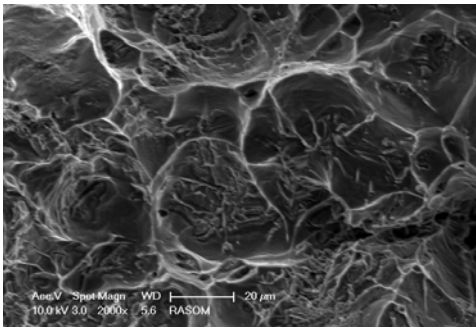
(a) Conduction shape area



(b) Keyhole shape area



(c) Fusion line



(d) Base metal

Fig. 10 SEM fractographs of impact test specimen

에서 셀형 수지상응고형태를 관찰할 수 있었으며, 열전도 형태로 용접된 영역과 비교하여 키홀 형태로 용접된 부분에서 더욱 치밀해진 셀조직이 형성되었음을 관찰할 수 있었다. 이는 전자빔의 흡수가 재료 표면에서부터 진행되기 때문에 용접부가 급속응고를 하더라도 상대적으로 많은 입열량을 가지는 열전도 형태의 용접영역과

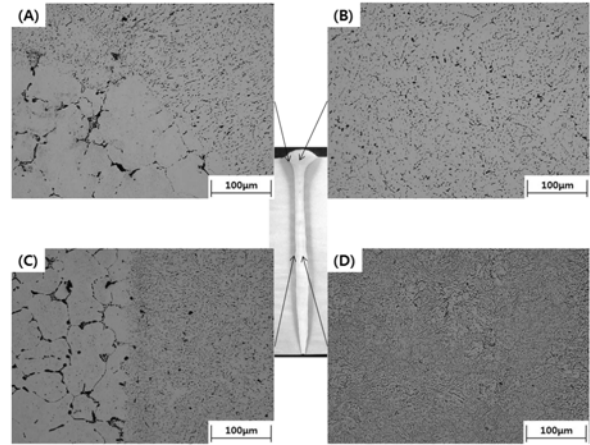


Fig. 11 Micrographs of fusion zone and weldmetal of conduction shape area(A,B) and keyhole shape area(C,D)

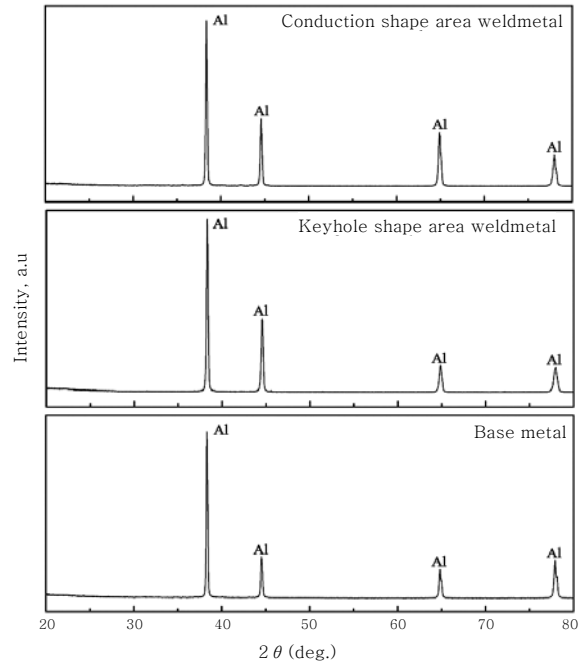


Fig. 12 XRD results of weldmetals and base metal

비교하여 키홀 형태로 용접된 부분에서는 열 방출이 비교적 빠르기 때문에 상대적으로 더욱 급속 응고 냉각된 결과라고 판단된다.

고용강화형 합금인 Al 5052 H112재에 대해 전자빔 용접시 재료는 고밀도 에너지원에 의한 재용융 및 급속응고를 거치게 된다. 따라서 그 과정 동안 형성된 반응생성물을 확인하기 위해서 X선 회절실험을 행한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 분석 결과, 열전도 형태의 용접급속 및 키홀 형태의 용접급속에서는 모재와 동일하게 Al이 주 피크로 관찰되었으며, 새로운 화합물은 형성되지 않았다.

4. 결 론

120mm 두께를 가지는 Al 5052 H112재에 대한 전자빔 용접 후, 용접부의 변형량, 각 부분에 대한 미세조직 및 기계적 특성 평가 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 전자빔 출력의 증가에 따라 용입 깊이는 선형적인 증가를 보이나, 약 40kW 이상에서 비드폭이 증가하여 종횡비가 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 용접부 폭 변화량 관찰 결과, 본 이음부에서는 약 0.5mm이내의 용접부 변형이 발생하였다.

2) 인장시험 결과, 열전도 형태의 용접부 및 키홀 형태의 용접부의 인장강도는 모재의 인장강도와 유사함을 관찰할 수 있었으며, 파단부위는 모든 시편에서 모재부에서 파단 하였다. 또한 연신율은 용접부가 모재부에 비해 약 5~6%정도 낮은 값을 갖는 것으로 관찰되었다.

3) 충격시험 결과, 키홀 영역의 용접부에서 채취한 시편이 가장 높은 충격 흡수 에너지 값을 가지는 것으로 나타났으며, 모재와 비교하여 약 4배 정도의 인성 향상 결과를 나타내었다. 용접금속에서는 전형적인 딤플 파단면을 가지며, 모재부에서는 취성적 입계 및 입내 파단면을 갖는 것으로 관찰되었다.

4) 미세조직 분석 결과, 용접금속은 모재와 비교하여 상당히 치밀한 형태를 나타냈으며, 열전도 형태의 영역보다 키홀 형태의 영역에서 더욱 치밀한 조직을 나타내었다.

5) XRD분석 결과, 모든 용접부에서는 새로운 화합물의 형성되지 않고 모재와 동일한 상을 갖고 있다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 산학 공동기술개발 지원사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. K.H. Youn, Y.S. Han: Gas metal arc welding of aluminum alloys, *Journal of KWS*, **12-1** (1994), 16-27 (in Korean)
2. Rykalin N., Uglov A., Zuev I., and Kokora A. : Laser and Electron beam treatment of materials, *Mashinostroeni, Moscow*, 1985, 495
3. P.J. Konkol, P.M. Smith, C.F. Willebrand, L.P. Corner: Parameter study of electron-beam, welding *Journal*, **50** (1971) 695-755
4. M.J. Adams: High voltage electron beam welding, *Brit. Welding Journal*, **57** (1968), 451-467
5. W.H. Giedt, L.N. Tallerico: Prediction of electron beam depth of penetration, *Welding Journal*, **67** (1988), 299s-305s
6. J.W. Elmer, W.H. Giedt, T.W. Eagar: The transition from shallow to deep penetration during electron beam welding, *Welding Journal*, **69** (1990) 259s-266s
7. P.S. Wei, T.H. Wu, Y.T. Chow: Investigation of high-intensity beam characteristics on welding cavity shape and temperature distribution, *Trans. ASME Journal Heat Transfer* **112** (1990), 163-169
8. Dipl.-Ing. H. Schultz: *Electron beam welding*, Abington publishing, 1993, 33-37
9. Yoshiaki Arata: *Plasma, Electron & Laser beam Technology* (ASM, 1986), 441
10. S.R. Koteswara, G. Madhusudhan Reddy: Reason for superior mechanical and corrosion properties of 2219 aluminum alloy electron beam welds, *Materials Characterization*, **55** (2005), 345-354