



FSW에 의한 무산소동 접합부의 조직 및 기계적 성질

박 화 순* · 이 병 우*

*부경대학교 공과대학 신소재공학부

Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Welds of Oxygen Free Copper

Hwa-Soon Park* and Byung-Woo Lee*

*Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

Abstract

The structures and mechanical properties of friction stirred welds of oxygen free copper(OFC) sheet were investigated. Defect-free welds were obtained in a relatively wide range of the welding conditions from 1000 to 2000 rpm, and welding speed from 500 to 2000 mm/min. The microstructure of the stirred zone(SZ) showed recrystallized grains, and the grain size varied largely with the welding conditions. The SZ hardness values including those of all the optimum welding conditions were slightly lower than that of the base metal, and increased with decreasing heat input. The tensile strength of the all-SZ increased with increasing the hardness values. The Hall-Petch relationship was confirmed between the yield strength of the all-SZ and the recrystallized grain size of the SZ.

* Corresponding author : parkhs@pknu.ac.kr

(Received November 18, 2004)

Key Words : Friction stir welding, Oxygen free copper, Weldability, Microstructure, Mechanical property

1. 서 론

동 및 동합금은 전기 및 열전도성이 높고, 내식성이 우수하며, 소성가공이 용이하다는 등의 특성을 가지고 있으며, 전기·전자통신용, 화학공업용, 건축용, 일반공업용 및 수송기기 등의 분야에 폭 넓게 사용되고 있다. 그러므로 이들 재료를 구조용재로서 더욱 폭 넓게 활용하기 위해서는 용접·접합성의 확보가 대단히 중요하다 할 것이다. 그러나 동 및 동합금을 접합하는 경우, 용융용접에서는 재료의 물리·화학적 고유성질에 의하여 용합불량, 기공의 발생, 수소취화, 균열의 발생, 결정립의 조대화에 따른 기계적성질의 저하뿐만 아니라 변형량이 크다는 등의 문제가 발생하고 있어, 일반적으로 용융용접은 곤란한 것으로 알려져 있다. 그러나 마찰교반접합(Friction Stir Welding, 이하 FSW)¹⁾에 의하면 접합재를 용접 이하에서 접합하기 때문에 용융·응고에 따른 용접부의 결함을 방지할 수 있으며, 용

접부의 변형도 대단히 적다는 이점을 가지고 있다²⁻⁸⁾. 따라서 동합금에 FSW를 적용하였을 경우, 접합조건에 따라서는 결함이 없고 또한 기계적 성질이 우수한 접합부를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이들 난(難)용융용접재료에 대한 FSW의 연구는 Al 합금을 대상으로 한 것이 그 대부분이며²⁻⁸⁾, 동 및 동합금에 적용한 경우는 대단히 적다. 지금까지 동합금을 대상으로 한 FSW 연구는 핵폐기물용기나 스파터링 장치의 백킹 플레이트재인 무산소동의 접합성에 대한 보고 등⁹⁻¹²⁾이 있다. 그리고 Al 합금과 Cu 합금의 이재접합에 관한 검토¹³⁻¹⁶⁾ 및 Ni-Al 청동의 표면개질에 FS 프로세스를 적용한 예¹⁷⁻¹⁹⁾가 일부 있다.

그러므로 본 연구에서는 동 및 동합금의 FSW 접합 특성에 대하여 금속재료학적인 관점에서 계통적인 연구를 목적으로 하였으며, 우선 무산소동을 사용하여 FSW 조건에 의한 접합부의 형성 및 결함의 발생, 조직 특성 및 기계적성질 등에 대하여 검토하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

FSW에 사용한 모재는 두께가 2 mm 이며, 순도가 99.99 mass% Cu 이상(산소: 100 ppm 이하)인 무산소동(Oxygen Free Copper, OFC) C1020P-1/2H를 사용하였다.

FSW는 싱글 패스의 비드 온 플레이트(bead-on-plate)와 I 그루브 맞대기용접을 하였다. 시험편은, 비드 온 플레이트 용접에서는 50 mm(w) × 100 mm(l)의 것을, I 그루브 맞대기 용접에서는 100 mm(w) × 150 mm(l)의 길이방향으로 2장을 맞댄 것을 사용하였다. FSW는, 비드 온 플레이트의 경우, 시계역방향으로 회전하는 툴의 회전속도를 500~2000 rpm, 용접속도는 500~2000 mm/min의 범위에서 4 조건씩을 사용하였다. I 그루브 맞대기 용접은 위의 조건 중에서 툴의 회전속도를 1000 rpm으로 일정하게 하고, 용접속도를 500, 1000 및 2000 mm/min의 3 종류로 변화시켰다. 그리고 툴의 숄더(shoulder)의 직경은 12 mm, 프로브(probe)의 직경 및 길이는 각각 4 mm와 2 mm로 하였다. 이들 FSW 조건을 Table 1에 나타내었다.

접합부에서의 보이드나 미접합부와 같은 결함은 외관 검사, X-선 투과시험 및 조직검사 등으로 평가하였다. 그리고 접합부의 매크로 및 미세조직은 횡단면을 절단하여 경면연마와 에칭을 한 후, 광학현미경 및 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였다.

접합부의 경도는 빅커스경도계를 사용하여 하중 0.49 N으로 접합부 횡단면의 두께방향의 중심선을 측정하였다. 접합부의 인장시험은 I 그루브 맞대기시험편을 사용하여 용접선 수직방향의 접합부 및 전(全)교반부(all stirred zone, 이하 all-SZ)의 2종류를 대상으로 하였으며, 이들 시험편의 형상 및 크기를 Fig. 1에 나타내었다. 인장시험은 크로스헤드스피드 1.67×10^{-2} mm/s를 사용하여 실온에서 하였다. 그리고 인장시험 후의

Table 1 Friction stir welding conditions for the bead-on-plate and I-type groove butt welding

FSW conditions	Bead-on-plate welding	Square groove butt welding
Dimension of specimen, mm	50(w*)×100(l*)×2(t*)	2 plates of 100(w*)×150(l*)×2(t*)
Rotation speed, rpm	500, 1000, 1500 and 2000	1000
Welding speed, mm/min	500, 1000, 1500 and 2000	500, 1000 and 2000

* w: width, l: length, t: thickness

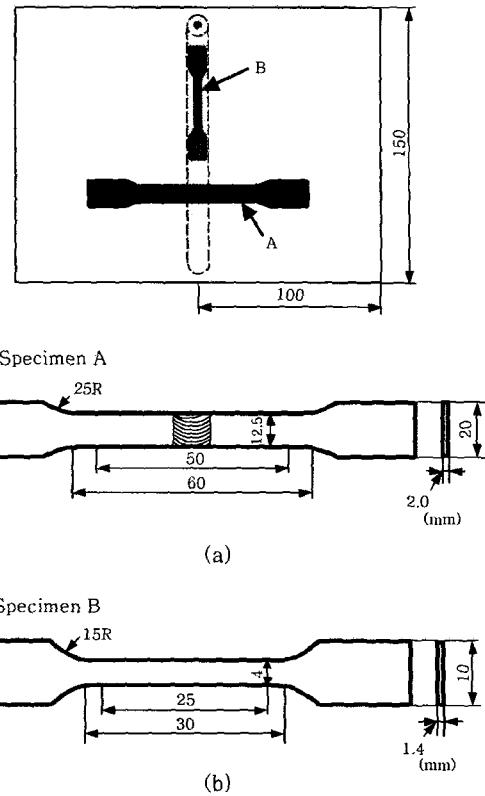


Fig. 1 Schematic of tensile test specimens for the FSW joints (a) and the all-SZ (b)

파단면에 대하여 SEM 관찰을 통하여 인장성질과의 상관성 및 그 특징 등에 관하여 검토하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부의 형성에 미치는 FSW의 조건

Fig. 2에 비드 온 플레이트 접합부의 외관사진 및 X-선 투과시험의 결과를 나타내었다. 접합부의 결함은 툴의 회전속도가 비교적 느린 500 rpm에서 용접선을 따라 어드반싱 사이드(advancing side)에서 관찰되었으며, 용접속도가 빠를수록 발생량이 증가하는 경향을 보였다. 그리고 1000 rpm 이상의 조건에서는 결함이 관찰되지 않는 건전한 접합부를 얻을 수 있었다. 즉 OFC에서는 비교적 넓은 FSW 조건에서 양호한 접합부가 얻어진다는 것을 알 수 있었으며, 이들 결과를 종합하여 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 접합부의 매크로 및 미세조직의 특징

FSW에 의한 OFC 접합부의 횡단면 매크로 조직의 예를 Fig. 4에 나타내었다. 이하 본 연구에서 나타낸 그림은 어드반싱 사이드는 오른쪽에, 그리고 리트리팅

Rotation speed, rpm	Welding speed, mm/min	Surface appearance	X-ray photograph
500	500		
	1500		
1000	500		
	2000		
2000	500		
	2000		

Fig. 2 Surface appearances and X-ray radiographs of the OFC welds

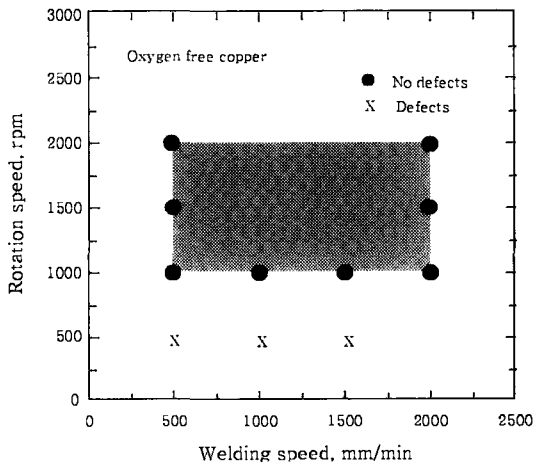


Fig. 3 Optimum FSW conditions for sound welds by bead-on-plate welding

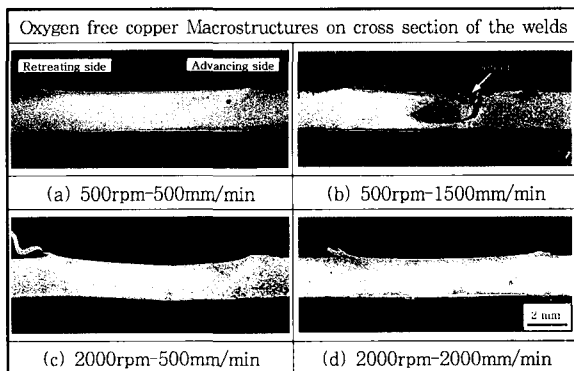


Fig. 4 Typical macrostructures in cross sections of the welds associated with the FSW conditions

사이드(retreating side)는 왼쪽에 위치하도록 통일하여 표현하였다. 교반부족에 의하여 발생하는 결함은,

틀의 회전속도가 비교적 느린 500 rpm에서 그루브 타입의 형태로 SZ와 모재의 경계부분에서 주로 발생하였다. 그리고 OFC 접합부는 전체적으로 SZ와 모재의 경계가 선명하게 구분되지 않는 특징을 나타내었다. 이것은, 후술하는 바와 같이, 접합부는 그 대부분이 동적재결정립으로 구성되는 SZ에 의한 영역이 주로 형성되고, TMAZ(Thermo-Mechanically Affected Zone)나 HAZ는 명확히 형성되지 않는 특징을 나타내는 것에 기인한다는 것을 알았다.

1000 rpm에서 접합속도가 500 mm/min인 접합부의 미세조직의 전형적인 예를 Fig. 5에 나타내었다. SZ의 미세조직은 재결정립으로 되어 있었으며, 이들 재결정립은 마찰에 의한 열과 변형에 기인하는 동적재결정에 의하여 생성된 것이다. SZ의 결정립의 크기는 FSW 조건에 따라 크게 변화하는 경향을 보였으며, 건전한 접합부를 형성한 FSW 조건에서 약 8.3~33.3 μm의 범위를 나타내었다. FSW에 의한 Al 합금접합부의 미세조직은 전형적으로 SZ, TMAZ, HAZ 및 모재의 형태로 나타나는 것으로 알려져 있다²⁰⁾. 그러나 OFC의 FSW 접합부에서는, 그림 (c)에 나타낸 바와 같이, 모재의 미세조직과 뚜렷한 차이를 보이는 TMAZ 및 HAZ는 관찰되지 않는 특징을 보였다.

FSW 조건에 따른 SZ의 미세조직의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. SZ의 결정립의 크기는 접합조건에 따라서 크게 변화하였으며, 틀의 회전속도의 증가 및 접합속도의 감소에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. SZ의 재결정립은 고온에서의 재료의 교반에 의한 동적재결정에 의해서 핵생성되며, 이들 재결정립의 성장은 FSW 중의 열 사이클에 의존하는 것으로 알려져 있다

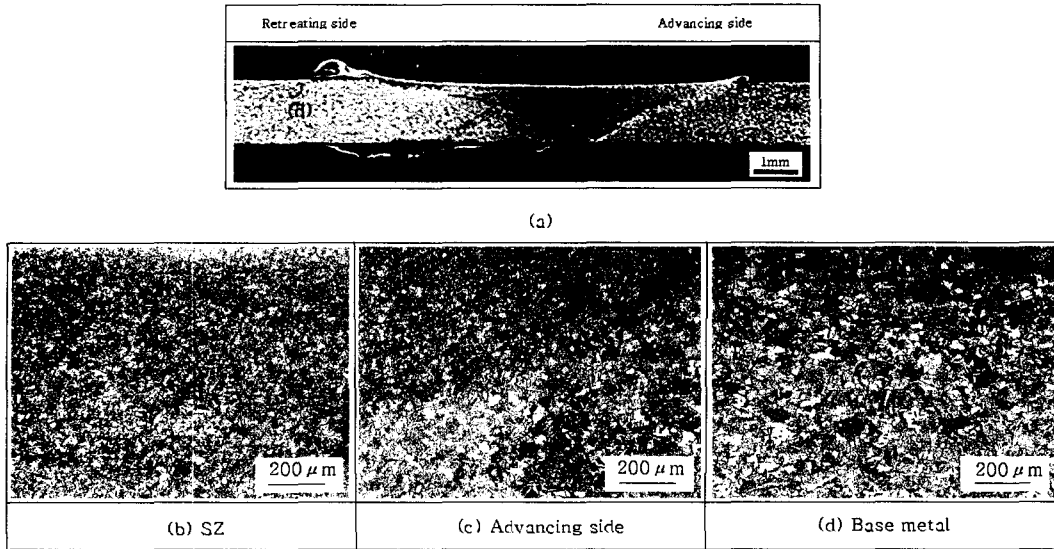


Fig. 5 Optical macro and microstructures in cross section of the welds at 1000 rpm-500 mm/min

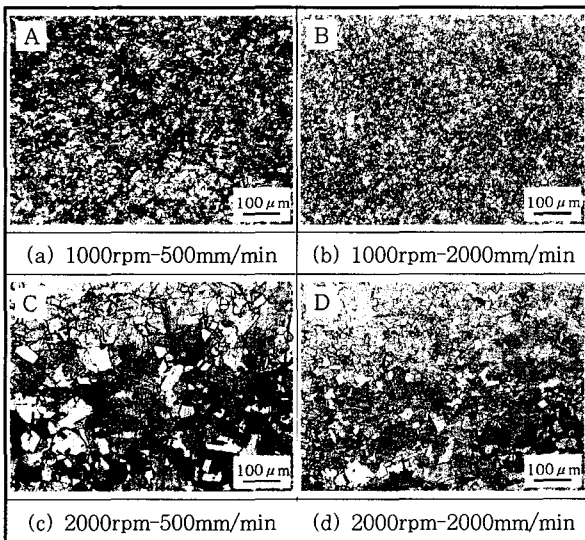


Fig. 6 Variation of microstructures of the SZ in some FSW conditions

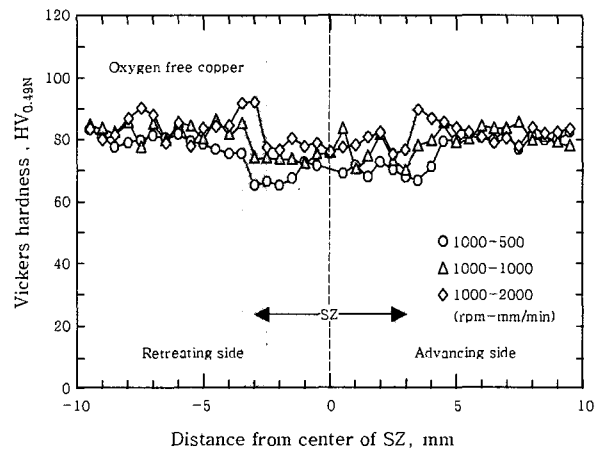


Fig. 7 Hardness profiles in cross section of the welds at the different welding speeds with constant rotation speed of 1000 rpm

6.8.21.22). 그리고 FSW의 최고가열온도는 틀의 회전속도가 증가할수록 높아지는 것으로 알려져 있다⁸⁾. 따라서 OFC의 SZ의 재결정립의 크기는 FSW 조건에 대단히 민감하다는 것을 알 수 있으며, 결정립의 성장 또한 잘 일어난다는 것을 의미하고 있다.

3.3 접합부의 기계적성질에 미치는 FSW 조건의 영향

3.3.1 접합부의 경도

틀의 회전속도 1000 rpm에 의한 접합부의 횡단면의 경도분포를 Fig. 7에 나타내었다. SZ에서의 경도는 Hv65~75 정도로 모재의 Hv81에 비해서는 약간 낮

은 값을 나타내었다. 이것은, 본 연구에서 사용한 무산소동은 1/2H로 경화된 재료이므로, FSW로 인하여 재결정이 생성되면서 모재의 경화효과가 상실된 것에 기인하는 것으로 생각된다. 그리고 SZ에서 모재 쪽으로의 경도 값의 변화는 거의 없었다. 즉 미세조직에서도 언급한 바와 같이, TMAZ 및 HAZ의 형성을 의미할 수 있을 정도의 경도 값의 차이는 거의 나타나지 않았다.

회전속도 1000 rpm에서 용접속도가 변화한 경우의 SZ의 경도 값의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. SZ의 경도는 용접속도의 증가와 더불어 증가하는 경향을 보였으며, 이것은 접합조건의 변화에 따른 SZ에서의 미세조직의 변화에 기인하는 것으로 생각된다. FSW에 의한 총입열량 Q 는, $Q = (4/3)\pi^2\mu R_s Pr^3$ 로 나타내어진다²³⁾. 여기서, μ 는 마찰계수, R_s 는 틀의 회전속도

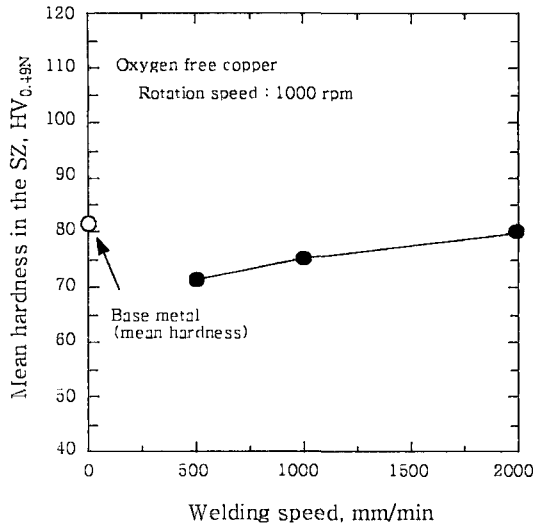


Fig. 8 Variation of mean hardness in the SZ for welding speed at the rotation speed of 1000 rpm

(rotations/s), P 는 톨의 상방향에서의 압력(Pa)이며, r 은 솔더의 반경(mm)을 의미한다. 이 식에 의하면, FSW에 의한 입열량 Q 는 톨의 회전속도에 비례하며, 접합부의 단위길이당의 입열에 대한 상대적 크기는 파라미터 R_s/W_s (W_s : welding speed, mm/min)로 나타낼 수 있다²⁴⁾. 그러므로 위에서 언급한 재결정립 성장의 정도는 입열량에 의존한다고 할 수 있다. 따라서 접합속도의 증가에 따른 경도의 증가는 입열량과 관련하여 보다 미세한 결정립이 생성된 것에 기인하는 것으로 생각된다.

3.3.2 접합부의 인장성질

톨의 회전속도를 1000 rpm으로 일정하게 하고 접합속도를 변화시켰을 때의 접합선 수직방향의 인장성질을 Fig. 9에 나타내었다. 그림 중에는 모재의 인장성질도 함께 나타내었다. 모든 접합부는 접합 조건에 관계없이 SZ의 중심 부근에서 파단하였다. 접합부는 모재와 비교하여 인장강도, 항복강도 및 연신율에서 각각 86~98%, 72~73% 및 10~25%를 나타내었다. 접합부의 인장강도는 모재와 대체로 동등하거나 약간 낮은 값을 나타내었으며, 항복강도는 모재에 비하여 전체적으로 낮은 값을 나타내었다. 따라서 이들 강도의 관점에서 보았을 때, 접합부의 효율은 비교적 양호한 것으로 판단되었다. 연신율은 모재에 비하여 상당히 낮은 값인 10~25%에 불과하였으나, 이것은, Fig. 7의 경도분포에서 나타난 바와 같이, 인장 변형이 강도가 가장 낮은 부분인 SZ에 집중하여 발생하였기 때문으로 생각된다.

그러나 이들 FSW 조건 중에서 접합속도가 가장 빠른 2000 mm/min에서는 경도에서 가장 높은 값을 나

타내었음에도 불구하고, 가장 낮은 인장강도를 나타내었을 뿐만 아니라 연신을 또한 가장 낮은 값을 나타내었다. 즉 이러한 결과는 전술한 SZ의 경도 변화 및 미세조직관찰에 대한 결과와 모순된다는 것을 알 수 있다. 따라서 맞대기 접합부의 경우에는 SZ에 강도를 저하시키는 요인이 존재한다는 것을 의미하고 있으며, 이것은 후술하는 바와 같이, 접합부의 하부에 키싱본드가 영향을 미친다는 것을 알았다.

톨의 회전속도 1000 rpm에서 접합속도를 변화시킨 경우의 all-SZ의 인장성질을 Fig. 10에 나타내었다.

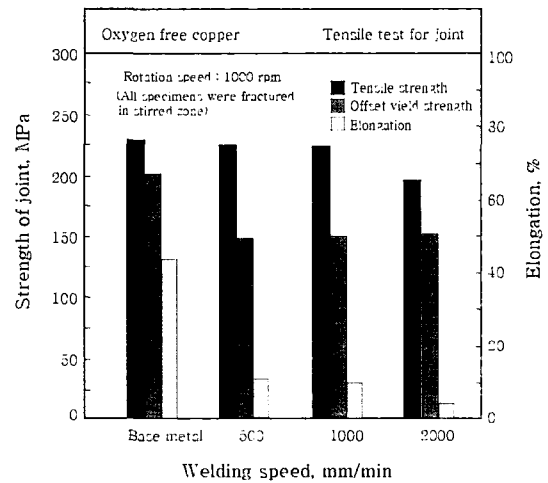


Fig. 9 Transverse tensile properties to welding direction of the weld joints at the different welding speeds with constant rotation speed of 1000rpm

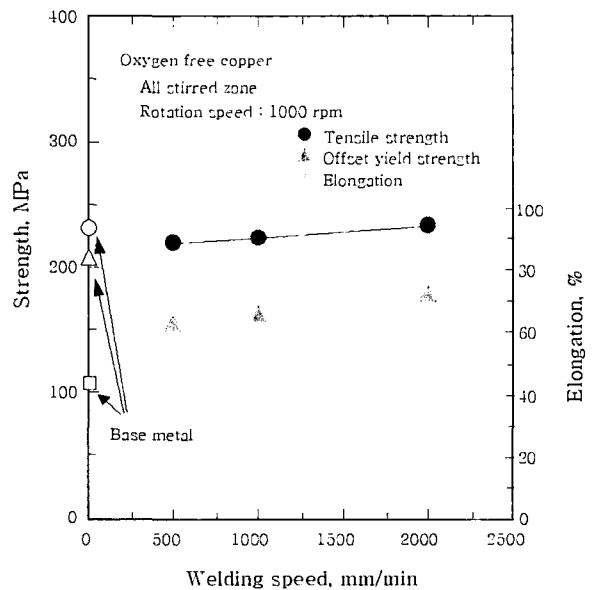


Fig. 10 Tensile properties of the all-SZ at the different welding speeds with constant rotation speed of 1000 rpm

All-SZ의 인장강도는 모재와 거의 동등하거나 약간 낮은 값을 나타내었으며, 항복강도는 모재의 약 75~85%를 나타내었다. 그리고 인장강도는 접합속도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 이러한 경향은 항복강도에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 그리고 이러한 경향은 Fig. 8에 나타난 경도의 변화에 대한 결과와 잘 일치하였다.

위에서도 서술한 바와 같이, 접합부와 all-SZ의 인장성질에서는 약간의 상이가 있다는 것을 알았다. 즉 접합속도가 가장 빠른 2000 mm/min에서의 접합부의 인장강도는 197 MPa로 동일한 접합속도에서의 all-SZ에서의 인장강도 233 MPa보다 훨씬 낮은 값을 나타내었다. 이들 결과는 접합속도가 빠른 접합부에서는 접합강도가 낮은 영역 또는 결함부가 존재한다는 것을 시사하고 있다. 따라서 접합선 수직방향의 접합부와 all-SZ의 인장성질의 변화에 따른 원인을 밝히기 위하여 SEM에 의한 인장시험 후의 파면을 관찰하였다. 모재의 파면은 Fig. 11 (a)에 나타난 바와 같이, 최종 파단부에 소수의 큰 덩플들만이 관찰되었다. 이러한 파면은 고연성을 가지는 순금속재료에서 잘 관찰되는 것으로, 인장변형의 대부분이 국부적인 수축에 의해 최종 파단에 이르는 파면의 특징을 보여주는 것이다. 1000 rpm-500 mm/min의 접합조건에 의한 시험편에서는 모재와 유사한 파면의 형태를 보였다. 그러나 1000 rpm의 1000 및 2000 mm/min의 접합조건에 의한 파면은 모재 및 500 rpm의 경우와는 다른 형태를 보

였다. 파면은, (c)에 나타난 바와 같이, 접합부의 표면 부분과 이면부분인 C와 B의 두 영역으로 크게 구분되는 특징을 보였다. 접합부의 표면부분의 파면 (C)에서는 대부분이 덩플로 이루어진 파면을 보였으며, 부분적으로 평탄한 파면이 혼재하였다. 이면부의 (B)에서는 대체로 평탄한 파면을 나타내었으며, 부분적으로 덩플이 혼재하는 형태를 보였다. 이것은 파단이 이면부에서 시작하였다는 것을 의미하고 있으며, 접합부의 횡단면 조직을 관찰한 결과에 의하면, Fig. 12에 나타내는 바와 같이, 접합부의 이면 부근에서 키싱본드가 관찰되었다. 그리고 이들 파면으로부터는, Fig. 13 (b)에 나타난 바와 같이, 산소의 농도가 높은 부분을 확인할 수 있었다. 그러므로 접합속도가 빠른 조건에 의한 접합부에서 인장강도의 감소는 이면 근방에 존재하는 키싱본드의 존재에 기인하는 것으로 판단되었다. 이러한 키싱본드의 존재는 빠른 접합속도에서는 단위길이당의 입열이 작기 때문에 프로브의 팁 근방에서의 소성유동이 불충분하고, 따라서 맞대기 면의 초기산화물이 잔존하여 생성되는 것으로 알려져 있다²⁵⁾. 그러나 all-SZ의 파면에서는 모든 접합조건에서 모재와 유사한 파면의 형태를 나타내었다. 이것은 all-SZ의 시험편에서는 키싱본드의 부분이 제거되어 SZ 만의 인장성질을 나타내었기 때문이다.

위에서 서술한 바와 같이, 접합속도가 증가할수록 all-SZ의 경도와 항복강도가 증가하는 것은 입열량이 적어지기 때문에 SZ에서 더욱 미세한 결정립이 생성되

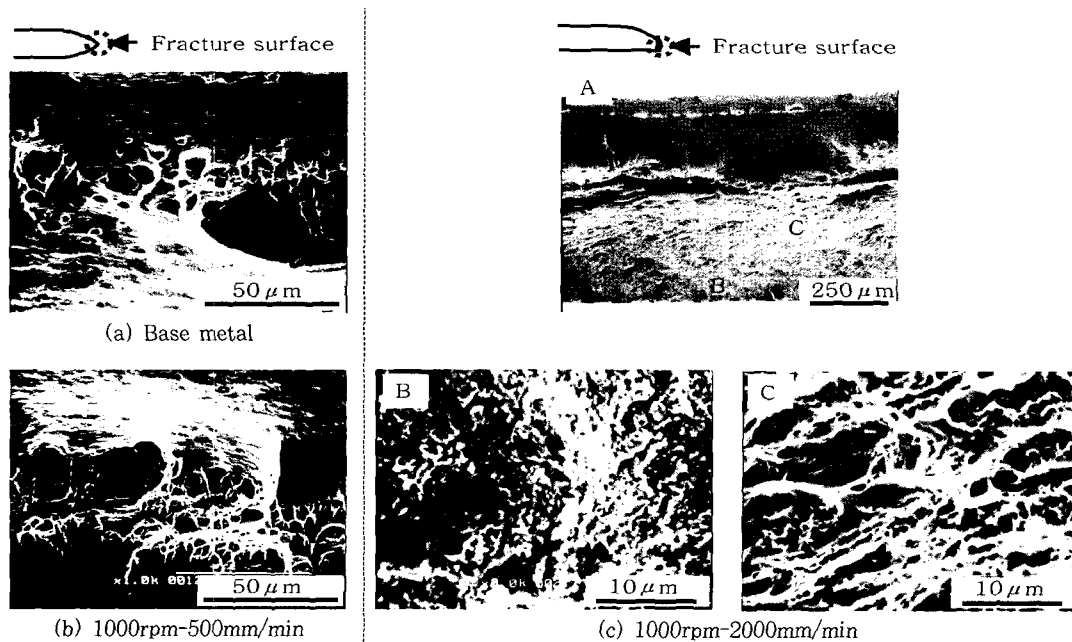


Fig. 11 SEM microfractographs of the tensile fracture surfaces: the base metal (a), the weld joint at 1000rpm-500mm/min (b), and 1000rpm-2000mm/min (c); high magnification of weld root side (B) and weld face side (C) in low magnification of the fracture surface (A)

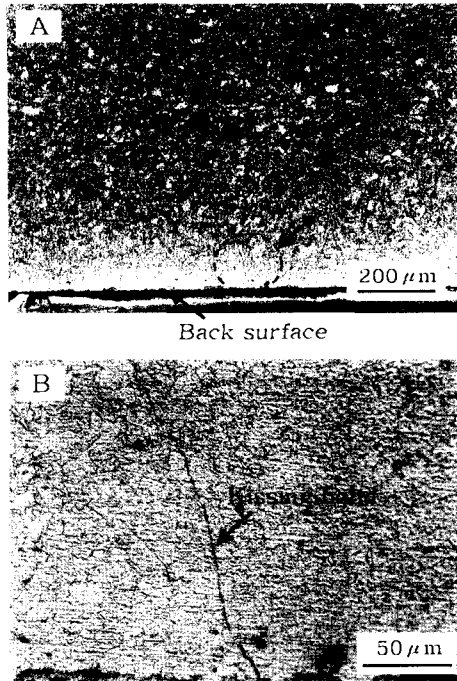


Fig. 12 Optical microstructures showing kissing bond near back surface of the welds at 1000rpm-2000mm/min, low magnification (A) and high magnification (B) of circular region arrowed in (A)

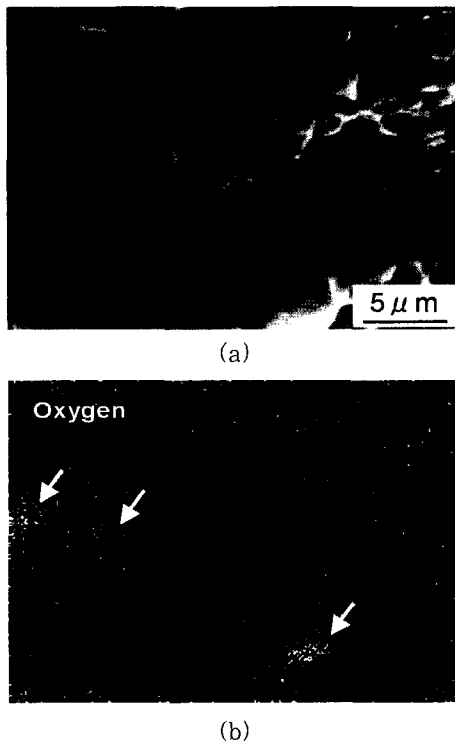


Fig. 13 SEM microfractograph (a) and EDX mapping of oxygen (b) of the tensile fracture surface near back surface of the welds at 1000rpm-2000mm/min

는 것에 기인하는 것으로 판단되었다. 이것을 명확히 하기 위하여, 항복강도 σ_y (MPa)에 미치는 결정립 크기 d (mm)의 영향에 대하여 Hall-Petch의 관계식을 사용하여 검토하였다. Hall-Petch의 관계식은 $\sigma_y = \sigma_o + k_y d^{-1/2}$ 으로 나타내어지며, 여기서, σ_o 는 단결정에서의 항복강도, k_y 는 스트레인의 영향을 받는 Hall-Petch 상수를 나타낸다. All-SZ의 항복강도와 결정립의 크기와의 관계를 Fig. 14에 나타내었으며, Hall-Petch의 관계식에 잘 따른다는 것을 알 수 있다. 그럼 중에는 어닐링한 99.999%Cu에 대한 결과²⁶⁾도 함께 표시하였는데, 본 연구에서 사용한 무산소동 접합부의 k_y 값은 어닐링한 Cu의 값에 비하여 약간 큰 값을 나타내었다. σ_y 와 k_y 는, 지금까지의 연구결과에 의하면, 전위 셀 구조와 관련한 경화기구의 차이에 기인하는 스트레인 의존성을 나타내는 것으로 보고되어 있다^{26,27)}. 한편 FSW 접합부에 관해서는, Al 합금 접합부의 SZ에서는 교반에 의해서 형성되는 동적 재결정립의 일부에 고전위밀도를 가지는 결정립이 혼재한다는 보고^{22,28,29)}가 다수 있으며, 그것이 k_y 에 영향을 미침으로서 그 값이 증가하는 것으로 설명하고 있다. 그러므로 본 연구에서 사용한 무산소동의 경우에도 고전위밀도를 가지는 재결정립 또는 격자결함 등이 부분적으로 혼재하여 k_y 가 보다 큰 값을 나타낸 것으로 추찰된다. SZ의 경도와 재결정립의 크기 d 와의 관계를 Fig. 15에 나타내었다. 이 결과에 의하면, $d^{-1/2}$ 이 증가할수록 경도가 직선적으로 증가하는 경향을 나타내고 있으며, SZ의 결정립의 크기와 경도와의 관계에 있어서도 양호한 상관성을 나타낸다는 것을 확인하였다. 따라서 OFC의 SZ에서의 강도와 경도는 마찰교반에 의하여 형성되는

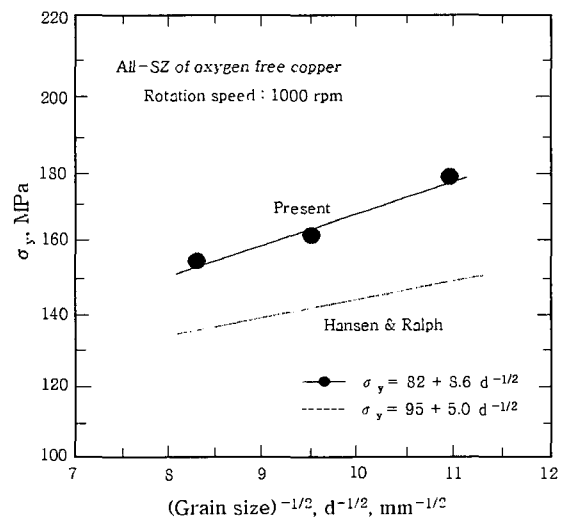


Fig. 14 Relationship between the offset yield strength and the grain size in the SZ

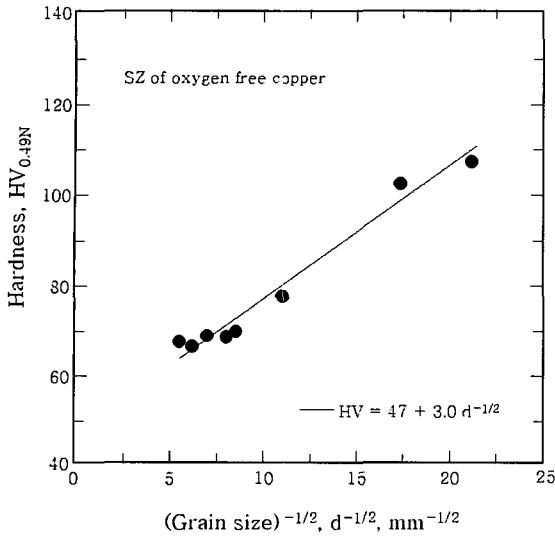


Fig. 15 Relationship between the hardness and the grain size in the SZ

재결정립의 크기에 주로 의존한다는 것을 알았으며, 이들 관계는 Hall-Petch의 관계식으로 정리할 수 있었다.

4. 결 론

FSW에 의한 무산소동(OFC) 접합부의 조직 및 기계적성질에 대하여 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) FSW에 의한 무산소동 접합부는 틀의 회전속도가 1000~2000 rpm, 접합속도는 500~2000 mm/min의 비교적 넓은 범위의 접합조건에서 건전한 접합부가 형성되었다.

2) 접합부의 결합은 틀의 회전속도가 비교적 느린 500 rpm의 조건에서 어드반싱 사이드에서 그루브 타입의 형태로 형성되었으며, 접합속도의 증가와 더불어 증가하는 경향을 보였다.

3) SZ는 FSW에 의한 동적재결정에 의하여 생성된 재결정립으로 이루어져 있었다. 이들 재결정립의 크기는 FSW 조건에 의하여 크게 변화하였으며, 접합부의 단위길이당의 입열량이 적을수록 결정립이 미세하였다. 그러나 모재의 조직과 비교하여 뚜렷한 조직적 차이를 보이는 TMAZ 및 HAZ는 명확히 형성되지 않는 경향을 나타내었다.

4) 건전한 접합부를 형성하는 FSW 조건의 범위 내에서, SZ의 경도 값은 모재보다 약간 낮은 값을 나타내었으며, 경도 값은 입열량이 감소할수록 증가하는 경향을 나타내었다.

5) 접합속도를 변화시킨 1000 rpm의 접합부에 대한 인장시험결과에 의하면, 모든 접합부는 모재보다 낮

은 경도를 나타낸 SZ에서 파단하였다. 그리고 접합속도가 2000 mm/min로 가장 빠른 경우에는 접합부의 이면 근방에서 키싱 본드가 관찰되었으며, 이로 인하여 인장강도 값도 저하하였다.

6) 접합속도를 변화시킨 1000 rpm의 접합부의 all-SZ에 대한 인장시험결과에 의하면, 인장강도는 모재의 86~98% 정도로 모재와 유사한 값을 나타내었는데, 항복강도는 약 74~85%로 비교적 낮은 값을 나타내었다. 이들 인장강도와 항복강도는 접합속도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 이러한 경향은 경도에서의 결과와 일치하였다.

7) FSW에 의한 무산소동의 all-SZ에서의 항복강도와 경도는 결정립의 크기에 의존하는 결과를 나타내었으며, 이들 관계는 Hall-Petch의 관계식으로 정리할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 1학기 부경대학교 연구년 교수 지원에 의하여 이루어 졌으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith and C.J. Dawes, International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8, 6 Dec. 1991.
2. C.J. Dawes and W.M. Thomas, Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys, *Welding Journal*, Vol. 75-3 (1996), 41-45
3. C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling and C.C. Bampton, Effect of Friction Stir Welding on Microstructure of 7075 Aluminum, *Scripta Materialia*, Vol. 36 (1997), 69-75
4. M.W. Mahoney, C.G. Rhodes, J.G. Flintoff, R.A. Spurling and W.H. Bingel, Properties of Friction-Stir-Welded 7075 T651 Aluminum, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 29A (1998), 1955-1964
5. L.E. Murr, G. Liu and J.C. McClure, A TEM Study of Precipitation and Related Microstructures in Friction-Stir-Welded 6061 Aluminum, *Journal of Materials Science*, Vol. 33 (1998), 1243-1251
6. O.V. Flores, C. Kennedy, L.E. Murr, D. Brown, S. Pappu, B.M. Nowak and J.C. McClure, Microstructural Issues in a Friction-Stir Welded Aluminum Alloy Dislocation Cell Structure, *Scripta Materialia*, Vol. 38 (1998), 703-708
7. T. Hashimoto, S. Jyogan, K. Nakata, Y.G. Kim and M. Ushio, FSW Joints of High Strength Aluminum Alloy, 1st International Symposium on Friction Stir Welding, 14-16 June 1999, Rockwell Science Center,

- Thousand Oaks, CA, USA
8. Y.S. Sato, M. Urata and H. Kokawa, Parameters Controlling Microstructure and Hardening during Friction-Stir Welding of Precipitation-Hardenable Aluminum Alloy 6063, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **Vol. 33A** (2002), 625-635
 9. C-G Andersson and R.E. Andrews, Fabrication of Containment Canisters for Nuclear Waste by Friction Stir Welding, 1st International Symposium on Friction Stir Welding, 14-16 June 1999, Thousand Oaks, CA, USA
 10. C-G Andersson, R.E. Andrews, B.G.I. Dance, M.J. Russel, E.J. Olden and R.M. Sanderson, A Comparison of Copper Canister Fabrication by the Electron Beam and Friction Stir Processes, 2nd FSW Symposium, 26-28 June 2000, Gothenburg, Sweden
 11. K. Okamoto, M. Doi, S. Hirano, K. Aota, H. Okamura, Y. Aono and T.C. Ping, Fabrication of backing plates of copper alloy by friction stir welding, 3rd International Symposium on Friction Welding, 27-28 Sep. 2001, Kobe, Japan
 12. K-S Bang, W B Lee, Y-M Yeon and S-B Jung, Study on Weldability of Cu (OFC) by Friction Stir Welding, International Welding/Joining Conference-Korea 2002, 28-30 Oct. 2002, Gyeongju, Korea, 522-527
 13. L.E. Murr, Y. Li, R.D. Flores, E.A. Trillo and J.C. McClure, Interaction Vortices and Related Microstructural Features in the Friction-stir Welding of Dissimilar Metals, *Materials Research Innovations*, **2-3**(1998), 150-163
 14. L.E. Murr, Y. Li, R.D. Flores, E.A. Trillo and J.C. McClure, Microstructures in Friction-stir Welded Metals, *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*, **7-2**(1998), 145-161
 15. N. Oiwa, K. Tsuchiya, Y. Ishii and K. Ishikawa, Development of Dissimilar Material Joining by Friction Stir Welding (in Japanese), Preprints of the National Meeting of J.W.S., **No. 70**(2002), pp. 194-195
 16. H. Okamura, K. Aota and Y. Aono, Friction Diffusion Welding of Dissimilar Material with Friction Stir Method (in Japanese), Preprints of the National Meeting of J.W.S., **No. 71**(2002), 442-443
 17. M.W. Mahoney, W.H. Bingel, S.R. Sharma and R.S. Mishra, Microstructural Modification and Resultant Properties of Friction Stir Processed Cast NiAl Bronze, *Materials Science Forum*, **Vols. 426-432**(2003), 2843-2848
 18. K. Oh-ishi, A.M. Cuevas, D.L. Swisher and T.R. McNelley, The Influence of Friction Stir Processing on Microstructure and Properties of Cast Nickel Aluminum Bronze Material, *Materials Science Forum*, **Vols. 426-432**(2003), 2885-2890
 19. W.A. Palko, R.S. Fielder and P.F. Young, Investigation of the Use of Friction Stir Processing to Repair and Locally Enhance the Properties of Large Ni Al Bronze Propellers, *Materials Science Forum*, **Vols. 426-432**(2003), 2909-2914
 20. T. Fukuda, Friction Stir Welding (FSW) Process (in Japanese), *Journal of the Japan Welding Society*, **69-7** (2000), 560-564
 21. G. Liu, L.E. Murr, C.S. Niou, J.C. McClure and F.R. Vega, Microstructural Aspects of the Friction-Stir Welding of 6061-T6 Aluminum, *Scripta Materialia*, **Vol. 37** (1997), 355-361
 22. K.V. Jata and S.L. Semiatin, Continuous Dynamic Recrystallization during Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys, *Scripta Materialia*, **Vol. 43** (2000), 743-749
 23. O. Frigaard, O. Grong, B. Bjorneklett and O.T. Midling, Modeling of the Thermal and Microstructure Fields during Friction Stir Welding of Aluminum Alloys, 1st International Symposium on Friction Stir Welding, 14-16 June 1999, Thousand Oaks, CA, USA
 24. K. Nakata, Y.G. Kim, M. Ushio, T. Hashimoto and S. Jyogan, Weldability of High Strength Aluminum Alloys by Friction Stir Welding, *The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ) International*, **Vol. 40** (2000), S15-S19
 25. P.L. Threadgill, Terminology in Friction Stir Welding: Revision 3, April 2002, p. 4
 26. N. Hansen and B. Ralph, The Strain and Grain Size Dependence of the Flow Stress of Copper, *Acta Metallurgica*, **Vol. 30** (1982), 411-417
 27. H. Conrad, Grain Size Dependence of the Plastic Deformation Kinetics in Cu, *Journal of Materials Science and Engineering A*, **Vol. 341** (2003), 216-228
 28. K.V. Jata, K.K. Sankaran and J.J. Ruschau, Friction-Stir Welding Effects on Microstructure and Fatigue of Aluminum Alloy 7050-T7451, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **Vol. 31A** (2000), pp. 2181-2192
 29. Y.S. Sato and H. Kokawa, Microstructural Factors Governing Hardness in Friction-Stir Welds of Solid-Solution-Hardened Al Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **Vol. 32A** (2001), 3033-3042