

研究論文
------

大韓熔接學會誌  
第8卷第3號 1990年 9月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol.8, No.3, Sep., 1990

## 업셋팅에 의한 냉간 압접의 결합 기구와 결합강도<sup>+</sup>

한 인 철\* · 김 재 도\*\*

### The Bonding Mechanism and Bond Strength of Cold Pressure Welding<sup>+</sup>

I.C. Han\*, J.D. Kim\*\*

**Key Words** : Cold Pressure Welding(냉간압접), Upsetting(업셋팅), Bonding Mechanism(결합기구), Bond Strength(결합강도), Reduciton of Height(높이 감소율).

#### Abstract

The bonding mechanism and bond strength were investigated for the cold pressure welding of Al to Al, Cu to Cu and Al to Cu by upsetting. A phenomenon of bonding between the metallic components has been observed by a scanning electron microscope and metallurgical microscope. A modified equation for bond strength with respect to the reduction of height shows reasonably a good agreement with the experimental data. When the values of the hardening factor and threshold deformation for the given materials could be determined, the theoretical bond strength can be calculated.

#### 1. 서 론

냉간 압접은 상온에서 높은 압력을 가해 금속을 서로 결합시키는 방법으로써 액상용접에 의한 다른 용접보다 여러가지 잇점이 있다. 즉 고상에서

결합이 이루어지므로 열영향부에 의한 취약부가 없고 가스 발생이 없으므로 산업 현장에서 응용할 수 있다. 또한 접합 전후의 금속 상태가 동일하므로 내식성이나 전기적 성질을 요하는 곳에 중요한 접합 방법으로 이용되고 있다. 특히 액상 용접시

+ 1989년 11월 11일 추계학술대회 발표.

\* 정회원, 한라공조(주) 설계부

\*\* 정회원, 인하대학교 공과대학

용융온도 차이로 인한 결합이 불가능한 이중 금속도 서로의 경도 차이만 유지된다면 동종 금속과 같은 견고한 결합부위를 얻을 수 있는 장점이 있다<sup>1)</sup>.

상온에서 이러한 견고한 결합을 이루기 위해서 두 금속을 원자간 거리까지 유지시켜야 한다. 그러나 금속 표면에는 접합에 방해가 되는 20~100Å 두께의 산화막(Oxide film)과 30Å 두께 이내의 오염막(Contaminant film)으로 덮혀있다. 오염막은 기계적으로 또는 화학적으로 어느 정도 제거될 수 있으나 산화막은 금속표면에 생성 속도가 매우 빠르기 때문에 제거하기 매우 어렵다. 따라서 산화막을 뚫고 금속간의 접촉이 이루어지게 하기 위해서 금속 표면에 스크래치 브러싱 작업을 하여야 한다. 스크래치 브러싱 작업 후 생성된 취성적인 산화막이 높은 압력을 받음으로써 산화막이 깨져 그 사이로 모재(Virgin material)가 압출되어 접합이 이루어진다.

접합이 이루어지는 압접기구(Bonding mechanism)에 대해 많은 연구에도 불구하고 아직 불명확한 점이 많다. 따라서 본 연구는 광학 현미경 및 주사 전자 현미경을 사용하여 Al과 Cu의 압접이 이루어지는 현상을 고찰함으로써 동종 및 이중 금속간의 압접기구를 설명하였고 이 압접기구를 바탕으로 결합 강도의 이론식을 구하였다. 이론식은 압연비에 따른 결합강도식을 제시한 Vaidyanath 식<sup>2)</sup>에 바탕을 두고, 압접에 필요한 최소 변형량(Threshold deformation)을 도입한 수정된 이론치와 실제 실험치를 비교 검토하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시험편 및 실험장치

본 연구에 사용한 시험 재료는 상용 순수 알루미늄과 구리를 사용하였고 크기는 모두 직경이 19mm인 환봉이었다. 균일한 조직을 얻기 위하여 열처리 하였는데, 알루미늄은 350°C에서 1시간 유지시킨 후 노냉 시켰으며, 구리는 550°C에서 1시간 30분 유지시킨 후 12시간 노냉 시켰다.

열처리후 실험재료는 Fig. 1과 같이 46mm( $l$ )×15mm( $\phi$ ) 시편과 100mm( $l$ )×15mm( $\phi$ ) 시편으로 기계가공 하였다. 압접실험에 사용된 하중장치는

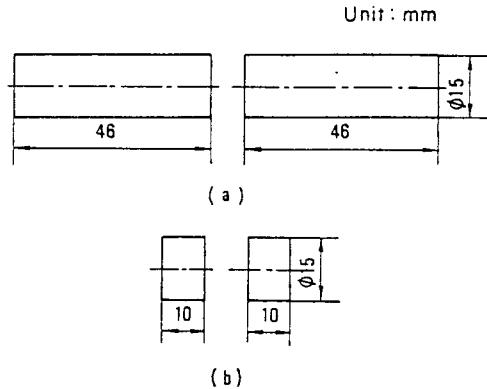


Fig. 1 Cold pressure welding specimens  
(a) Specimens for close upsetting  
(b) Specimens for open upsetting

150ton 유압프레스이다.

### 2.2. 실험방법

압접에 영향을 미치는 중요한 인자로는 하중압력, 높이 감소율 및 표면 처리로써, 특히 표면 처리는 압접을 지배하는 가장 중요한 인자이다. 따라서 두 금속을 원자간 거리까지 접근 시키기 위해서 시편을 세척한 후 스크래치 브러싱 처리하였다. 표면처리에 대해 많은 실험을 통한 연구가 수행되었는데 스크래치 브러싱작업이 가장 좋은 압접성을 준다고 보고되었다<sup>3)</sup>. 본 실험에서는 직경이 0.15mm인 stainless wire로 된 rotary brush를 사용하여 스크래치 브러싱하였다. 스크래치 브러싱 시간은 각 시편마다 6초 동안 하였다. 그리고 시편 표면의 재 오염 및 산화를 최소한으로 줄이기 위해 표면처리 후 1분 이내에 압접을 수행하였다. 변형되는 부분의 시편 길이는 좌굴(Buckling)을 방지하기 위해서 시편을 각각 10mm씩 금형 밖으로 노출시켜 변형이 생기는 부분을 20mm( $l$ )×15mm( $\phi$ )로 하였다.

실험 순서는 접합될 표면을 상온에서 사염화탄소( $CCl_4$ )로 세척 후 곧 이어 스크래치 브러싱하여 변형이 생길 부분을 제외한 부분에 그리스를 칠하여 실험이 끝난 후 금형으로 부터 쉽게 빠지도록 하였다. 이렇게 처리된 시편을 미리 설치된 금형에 넣고 유압 프레스로 압력을 가하여 압접을 하였다. 압접시 하중과 변위를 동시에 기록하였다. 높이 감소율이 큰 시편의 압접 경계면을 관찰

할 때 그 경계면이 충분히 넓어져 확실한 압접 상태를 관찰 할 수 없기 때문에 압접이 이루어지는 초기압접 변형을 보다 약간 큰 상태에서 압접 경계면을 관찰하였다. 그러나 본 실험에서는 적은 높이 감소율에서 압접이 이루어졌다 해도 압접이 끝난 후 시편이 금형에 부착되어 그 힘이 결합강도 보다 커서 압접부가 떨어지는 경우가 가끔 발생하였다. 이러한 현상을 극복하기 위해서 시편을 10mm(L)×15mm(φ)로 가공하여 평판금형에서 압접 실험을 수행하였다. 전단 변형과 산화막의 역할을 알아보기 위해 Fig.2와 같이 압접 경계면의 소성 변형을 억제하는 실험을 수행 하였다.

압접이 끝난 후 결합강도를 구하기 위해서 각각의 높이 감소율에 따른 인장시험을 수행하였다. 인장시편은 Fig.3과 가공하였다. 그러나 높이 감소율이 큰 경우 압접부가 아닌 모재부에서 파단되므로 Fig.3(b)와 같이 압접부 둘레에 홈을 내어 압접부에서 파단될 수 있게 하였다.

결합 기구를 규명하기 위해 압접부의 파단면과 압접 경계면의 결합 상태를 주사 전자 현미경과 광학 현미경으로 관찰하였다. 압접경계면을 관찰하기 위해 압접된 시편을 밀링으로 접합 경계면을 수평으로 가공 후 가공면을 폴리싱하여 부식시킨

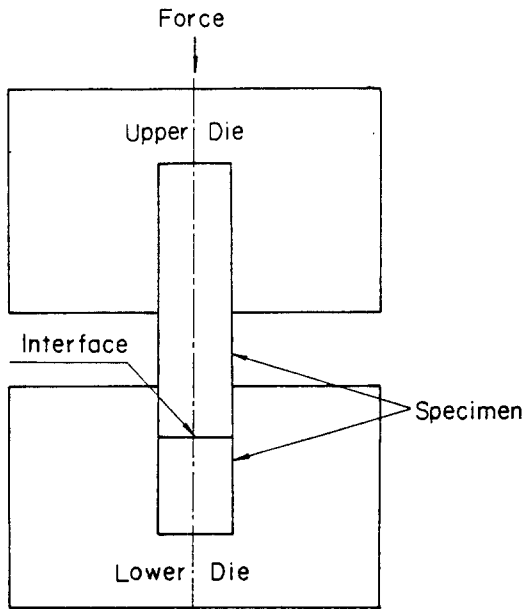
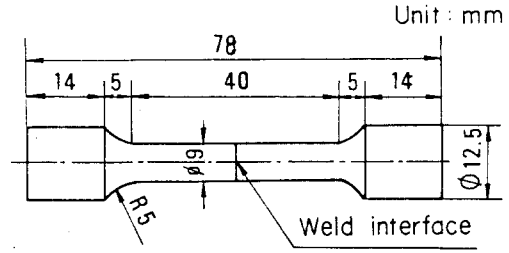
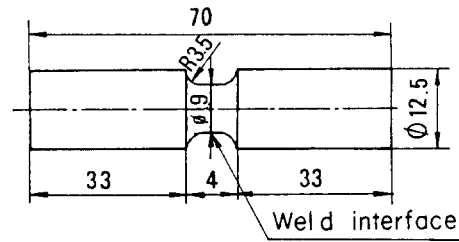


Fig. 2 Schematic illustration to prevent plastic flow at the weld interface



(a)



(b)

Fig. 3 The specimens for bond strength test (a) General case, (b) Special case

후 광학 현미경으로 관찰하였다. 부식액은 Al-Al의 경우 H<sub>2</sub>O-190ml, HNO<sub>3</sub>-5ml, HCl-3ml, HF-2ml를 혼합하였고, Cu-Cu경우는 H<sub>2</sub>O-80ml, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-5ml, HCl-3ml, HF-2방울을 혼합하여 사용하였다. 또한 Al-Cu면은 압접 경계면을 중심으로 각각의 부식액을 사용하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 압접 실험 결과

Al-Al의 압접은 높이 감소율이 54%에서 이루어졌고 Cu-Cu는 60%, Al-Cu는 56%에서 압접이 이루어졌다. 그러나 그 이하의 높이 감소율에서는 압접이 이루어졌으나 금형구멍에서 들어붙음이 발생하여 압접이 끝난 후 상부 금형을 상승시킬때 압접부가 떨어지는 경우가 있었다.

압접된 시편을 인장 시편으로 가공하여 시험한 결과 Al-Al의 경우 70%, Cu-Cu의 경우 78%, Al-Cu의 경우 72%에서 Photo.1과 같이 압접부 위치 밖의 기존 금속에서 파단이 일어났다. 이와

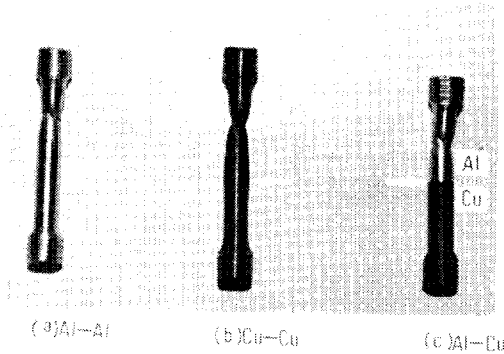


Photo. 1 Examples of tensile test (Arrow: weld line)

같이 모재에서 파단이 일어나는 것은 결합 강도가 모재의 인장 강도보다 크를 보여 준다.

### 3. 2. 결합기구 (Bonding mechanism)

표면을 세척한 후 스크래치 브러싱을 하면 Photo. 2와 같이 재료 표면에 Tearing이 일부 발생 하지만 대부분 일정한 방향성을 가진 홈과 돌기로 이루어지고, 공기 중에서 산화층의 형성속도가 매우 빠르기 때문에 그 위에 하얗게 덮인 산화층을 볼 수 있다. 가는 선으로 둘러싸인 부분은 스크래치 브러싱에 의해 경화된 층인 취성층이며 시편 표면에 약 60%정도 존재한다.

산화층이 깨어지는 정도는 금속과 그 금속 산화물의 상대적 경도에 따라 다른데, 그 상대적 경도 비는 Al의 경우 약 120배이고, Cu의 경우는 약 3배 정도이다. 따라서 Al의 취성층이 Cu의 취성층보다 더욱 더 취약하다. Photos. 3, 4, 5는 인장 시험 후 파단면의 주사 전자 현미경 사진인데, 압점이 시직되는 최소 높이 감소율 이하에서 취성층의 파괴 형태를 보여 주고 있다. Photo. 3에서는 취약하게 파괴된 틈을 통해 기존금속의 압출 상태를 볼 수 있다. Photo. 4의 Cu-Cu의 파단면에서는 Al-Al의 파단면보다 취성층이 보다 연하게 파괴 됨을 볼 수 있다. Photo. 5는 Al-Cu 파단면의 취성층의 파괴 형태를 보여주고 있는데, Al이 Cu보다 취성층이 먼저 파괴 되고, 상대적으로 취약하게 파괴됨을 알 수 있다. 따라서 이종금속간의 압접시 취성층이 독립적으로 파괴되고 어느 한쪽만의 취성층이 먼저 파괴되더라도 압접은 이루어 지지 않는다. 이와 같이 취성층은 적은 변형율에

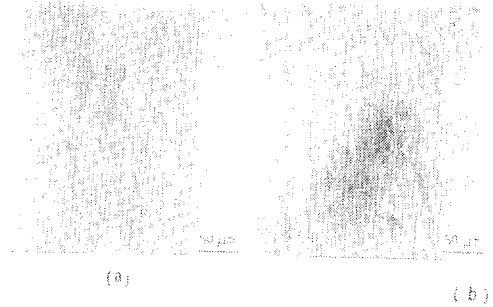


Photo. 2 SEM photographs of scratch-brushed surfaces (a) Al, (b) Cu

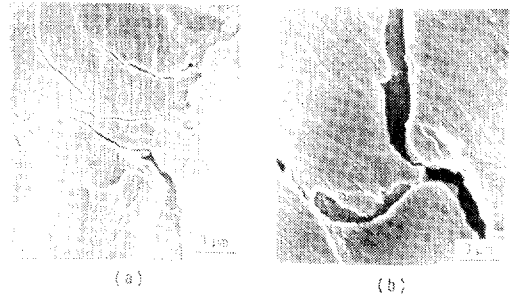


Photo. 3 SEM photographs of the weld interface surfaces of Al-Al after fracture (a) R=6%, (b) R=25%

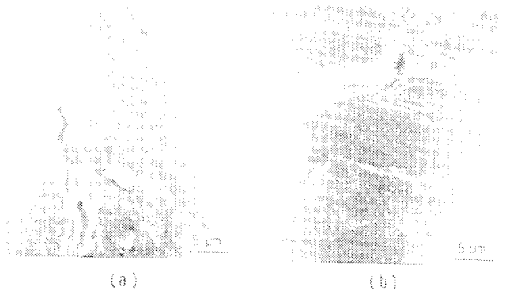
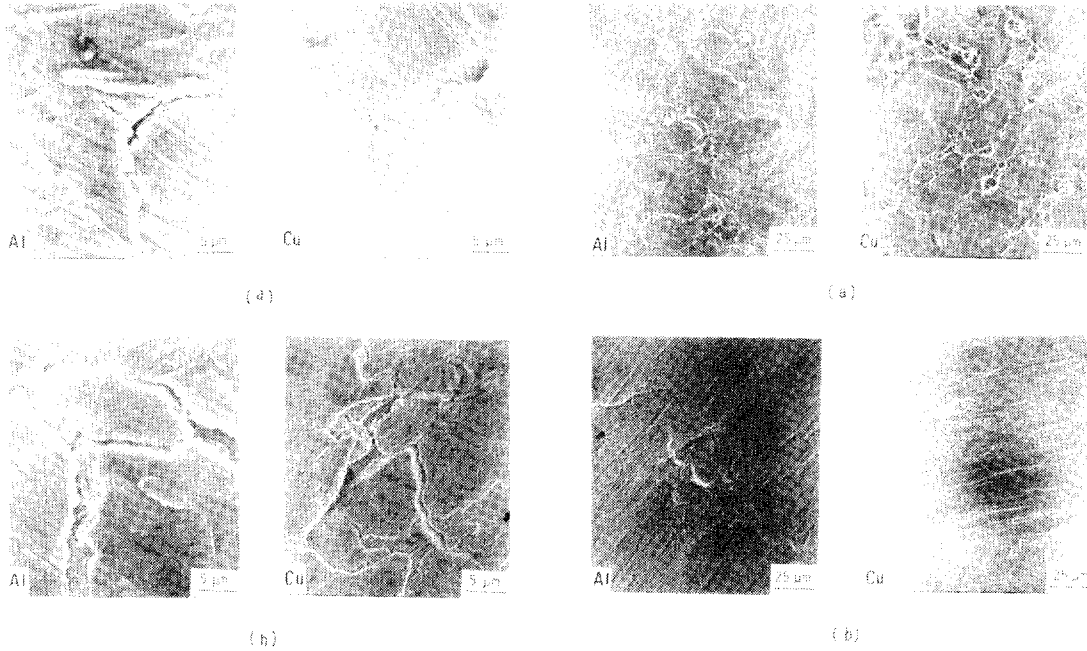


Photo. 4 SEM photographs of the weld interface surfaces of Cu-Cu after fracture (a) R=7%, (b) R=28%

서 비록 파괴 되었더라도 기존 금속이 틈을 통해 압출이 안된 상태이다. 틈을 통해 기존금속이 압출되더라도 동종 금속의 경우 오염 물질로 인해 압접이 방해되고, 이종금속의 경우는 취성층이 독립적으로 파괴되어 기존 금속간의 접촉이 쉽게 이루어지지 않는다. 따라서 압접이 이루어 지기 위해서는 그 이상의 압력과 변형을 충분히 주어 기



**Photo. 5** SEM photographs of the weld interface surfaces of Al-Cu after fracture (a) R=10%, (b) R=27%

**Photo. 6** SEM photographs of the weld interface surfaces of Al-Cu after fracture (R=65%) (a) The specimens to allow flesh at the weld interface, (b) The specimens to prevent plastic flow at the weld interface

존 금속끼리 서로 접촉해야 하므로 전단 변형으로 인한 산화막 파괴 및 오염물질을 분산 시켜야 한다.

Photo. 6은 Al-Cu의 높이 감소율 65%인 시편의 인장 시험에 의해서 생긴 파단면을 보여주고 있다. (a)는 접합면에서 횡방향으로 소성 변형을 억제하지 않고 만든 시편으로부터 얻은 것이고, (b)는 압접 경계면의 소성 변형을 억제하여 얻은 시편으로부터 얻은 것이다. 압접부의 전단 변형이 없을 때는 취성층의 산화막이 Photo. 2와 같은 스크래치 브러싱한 표면과 같이 파괴가 앞된 상태로 그대로 남아있는 것을 보여주고 있다. 만약 산화막이 압접하는데 장애 요소가 없된다면 이러한 상태로 충분한 변형을 주면 압접이 이루어 질 것이다. 그러나 압접 경계면의 전단 변형을 억제한 상태로 압접하면 전단변형에 의한 산화막 파괴 및 오염물질 분산이 없으므로 접합이 이루어 지지 않음을 알 수 있었다. 따라서 압접을 수행할 때 산

화막과 오염 물질이 압접에 방해가 되므로 표면에 충분한 변형을 주어 표면에 있는 산화막을 파괴시키고 오염 물질을 분산시켜야 한다.

압접 현상은 Photo. 7과 같이 압접 경계면을 관찰 함으로써 확실해 진다. Photo. (a), (b)에서 Al과 Cu에 대해 압접 경계면을 비교해 볼 때 Al의 취성층이 Cu의 취성층보다 더 취약하고 취성층이 많이 파괴되어 기존 금속의 접촉 영역이 많음을 알 수 있다. 그리고 Photo. 7(b)에서 취성층의 틈을 통해 기존 금속이 압출되는 현상을 명확히 볼 수 있다. Al-Al과 Cu-Cu의 취성층은 동시에 Break-up되어 높이 감소율이 증가 함에 따라 전단 변형이 커져 취성층이 파괴되어 기존 금속의 접촉영역이 증가함을 알 수 있다. Al-Cu와 같은 이종 금속간의 압접때는 두 금속간의 상대 경도차로 인해 취성층이 독립적으로 파괴됨을 알 수 있다.

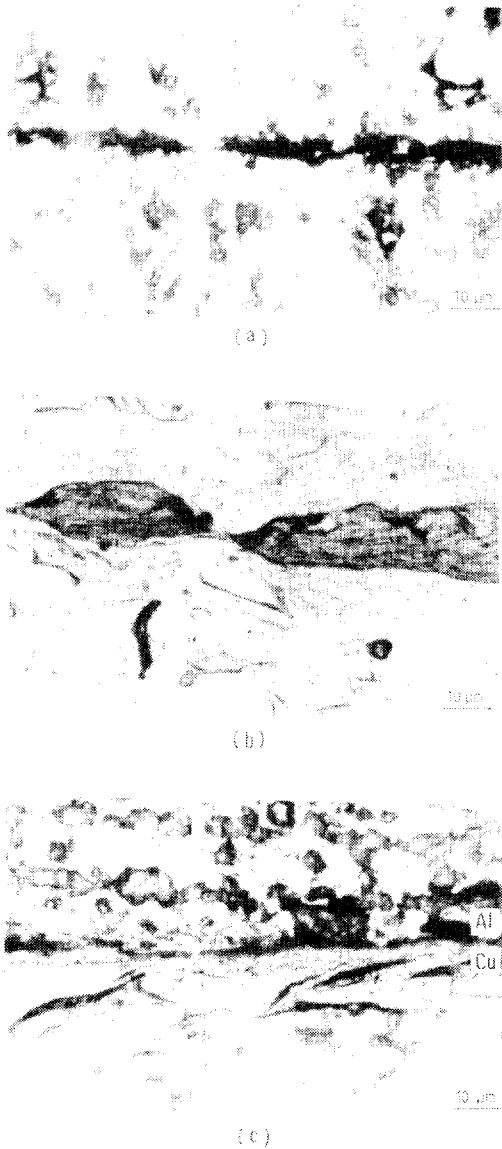


Photo. 7 Micrographes of weld interfaces (a) Al-Al, R=35%, (b) Cu-Cu, R=42%, (c) Al-Cu, R=45%

### 3.3. 결합 강도

업셋 실험에 대한 결합강도의 이론식을 구하기 위해 Vaidyanath<sup>2)</sup>에 의해 발표된 압연에 의한 이론 결합 강도식을 도입하여 수정된 식을 유도하였다. 즉 취성층이 하나로 Break-up된다는 가정하에 다음과 같은 식을 얻었다.

$$\frac{\text{접합의 최대 전단강도}}{\text{기존금속의 최대 전단강도}} = R(2-R) \quad (1)$$

여기서 R은 압연비이다.

식(1)은 접합에 대한 이론식이며 실제 어떤 변형 전에는 접합이 이루어 지지 않는 최소 변형량 (Threshold deformation)이 존재 하게 된다. 최소 변형량 보다 적은 변형에서 압접이 이루어 지지 않는 이유는 첫째로, 적은 변형에 의해 산화막이 깨진다 하여도 산화물 이외의 다른 불순물에 의해 접합이 방해되고, 산화층이 취약하여 그 사이로 금속이 뚫고 나갈 어떤 최소 압력이 존재하게 된다<sup>2,8,9)</sup>. 둘째로, 하중을 풀면 잔류응력이 걸려서 파괴응력을 넘어서야 압접이 가능하기 때문이다<sup>8)</sup>. 식 (1)은 압접에 필요한 최소 변형량을 고려하지 않는 식으로 납과 주석과 같은 최소 변형량이 작은 금속에만 적용 할 수 있다. 따라서 압접이 시작되는 최소 변형율을 고려한 새로운 이론 결합 강도식을 구하였다.

식(1)의 압연비 R은 단위 면적당 생성된 기존 금속의 면적과 같아서 모두 접합한다는 가정하에 세워진 식이다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 어떤 변형전에는 접합이 이루어지지 않는 최소 높 이 감소율이 존재한다. 이것을 업셋 압접에서 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\text{압접되지 않은 기존금속의 면적}}{\text{단위 면적}} = \frac{h_0 - h_t}{h_0} = R_t \quad (2)$$

여기서  $h_0$ 는 시편의 초기 높이이고,  $h_t$ 는 압접이 시작되는 최초의 높이이다. 그리고  $R_t$  이상의 변형을 주면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\text{기존금속의 접촉면적}}{\text{단위 면적}} = \frac{h_t - h}{h_t} \quad (3)$$

그런데  $R_t = (h_0 - h_t)/h_0$ 이고,  $R = (h_0 - h)/h_0$  이므로  $h_t$ 와  $h$ 에 관한 식을 식(3)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{\text{기존금속의 접촉면적}}{\text{단위 면적}} = 1 - \left[ \frac{(1-R)}{(1-R_t)} \right] \quad (4)$$

식(1)의 압연비 R은 단위면적당 생성된 기존 금속의 면적과 같아서 모두 접합한다는 가정하에 세워진 식이다. 그러나  $R_t$  이상의 변형을 하여야

금속이 접합한다는 새로운 가정하에 식(1)의 R 대신 식 (4)를 대입하면 다음과 같은 결합강도 (S)의 이론식을 세울수 있다.

$$S = 1 - \left[ \frac{(1-R)^2}{(1-R_t)^2} \right] \quad (5)$$

압접 실험한 결과 Fig. 4, 5, 6은 Al-Al의 경우 70%, Cu-Cu의 경우 78%, 그리고 Al-Cu의 경우 72% 이상에서 모재의 인장 강도보다 결합 강도가 커짐을 알 수 있다. 이와 같이 결합 강도가 모재의 인장 강도 보다 커지는 이유는 2가지로 설명할 수 있다. 첫째로 취성층의 틈을 통해 기존 금속이 압출되는 동안 가공 경화 되고 둘째로 시편이 변형을 크게 받을때 압접 경계면에서 재료 자체가 가공 경화 된다고 볼 수 있다. 따라서 높이 감소율이 큰 상태에서 S 값은 1보다 크게 되므로 식 (5)를 수정할 필요가 있다. 식(5)에 상수 H를 도입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

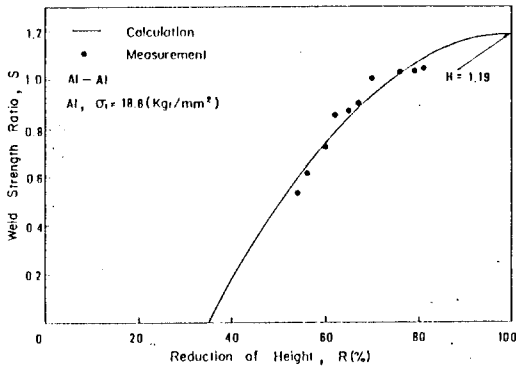


Fig. 4 Bond strength ratio as a function of reduction of height in Al-Al

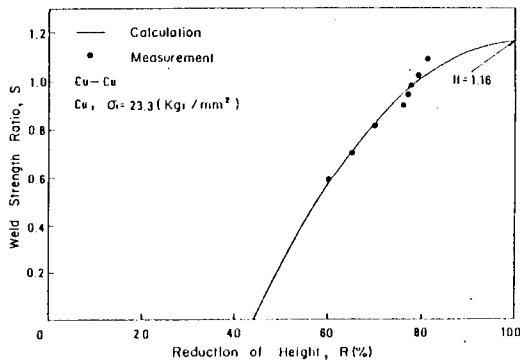


Fig. 5 Bond strength ratio as a function of reduction of height in Cu-Cu

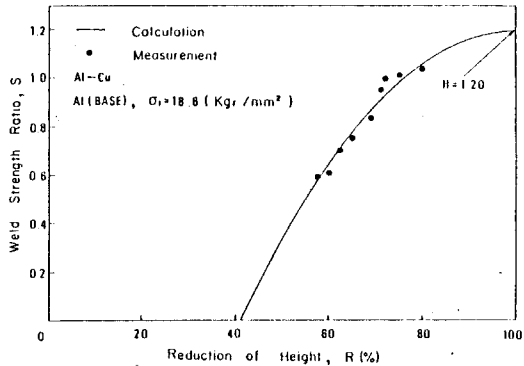


Fig. 6 Bond strength ratio as a function of reduction of height in Al-Cu

즉,

$$S = H \left[ 1 - \left\{ \frac{(1-R)^2}{(1-R_t)^2} \right\} \right] \quad (6)$$

Fig. 4, 5, 6에 나타난 실험값을 식 (3)에 대입하여 최소 자승법을 사용하여 H값을 구한 결과, Al-Al의 경우 1.19, Cu-Cu의 경우 1.16 그리고 Al-Cu의 경우 1.20이 되었다. H 값을 구할 때 R<sub>t</sub> 값을 상수로써 주어지는데 일반적으로 고유값인 Al-Al의 경우 0.35, Cu-Cu의 경우 0.44 그리고 Al-Cu는 0.41로 주어진다. Fig. 4, 5, 6에서 보는 바와 같이 이론식과 실험값이 실험범위 내에서 잘 일치하고 있어 앞에서 제시한 결합 기구를 뒷받침해 준다. 본 연구에서 제시한 식(6)은 R<sub>t</sub> 값에 영향을 주는 표면처리, 압력 그리고 압접 방법에 따라 약간 차이가 있겠으나 재질에 따른 R<sub>t</sub>와 H의 값을 구하면 변형에 따른 결합력을 쉽게 구할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

알루미늄과 구리를 사용하여 업셋팅에 의한 냉간 압접을 수행한 결과 결합강도와 결합기구에 대해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 높이 감소율이 Al-Al의 경우 70%, Cu-Cu의 경우 78%, 그리고 Al-Cu의 경우 72%부터 압접부의 결합강도가 모재의 인장강도보다 크게 나타났다.

(2) 산화막과 오염막은 압접에 방해가 되므로 압접이 이루어지기 위해서는 표면에 취성층을 형성시켜 충분한 전단변형을 주어 취성층을 파괴 시

커야 하고 이러한 취성층의 파괴는 압접이 이루어지는 최소 높이 감소율 이전에 파괴됨을 알 수 있었다.

(3) Al-Al의 경우 취성층은 취약하게 압접 경계면을 따라 단일체로 파괴 되고 Cu-Cu는 취성층이 Al-Al에 비해 연성파괴로 파괴되나 압접 경계면을 따라 역시 단일체로 파괴됨을 알 수 있었고, Al-Cu의 경우 Al의 취성층보다 먼저 파괴되고 압접경계면을 따라 독립적으로 파괴됨을 알 수 있었다.

(4) 재료에 따른 가공경화 상수  $H$ 값과 압접이 이루어지는 최소높이 감소율  $R_c$  값이 실험을 통해 구해진다면 압접 재료의 변형에 따른 결합력을 제시된 식에서 쉽게 구할수 있다.

#### 참고문헌

- 1) R.F. Tylecote : Pressure Welding, Metal Industry, July(1952), p.43.
- 2) L.R. Vaidyanath, M. G. Nicholas and D. R. Milner : Pressure welding by rolling, British Welding Journal, Jan.(1959), p.13
- 3) L.R. Vaidyanath, D. R. Milner : Significance of surface preparation in cold pressure welding, British Welding Journal, Jan.(1960) p.1.
- 4) N.Bay : Mechanism producing metallic bonds in cold welding, Welding Journal, May (1983), p.137.
- 5) H.A. Mohamed and J. Washburn : Mechanism of solid state pressure welding, Welding Journal, Sep. (1975), p.302.
- 6) M.G. Nicholas and D.R. Milner : Roll bonding of aluminium, British Welding Journal, Aug. (1962), p.469.
- 7) W.C. Sherwood and D.R. Milner : The effect of vacuum machining on the cold welding of some metals, Journal of the Institute of Metals, Vol.97 (1969), p.1.
- 8) L.R. Butler : Journal of Institute of Metals, Vol. 101, (1973), p.203.
- 9) K.J. B. Mctals and D.R. Milner : Pressure welding of dissimilar metals, British Welding Journal, July (1962), p.406.
- 10) P.K. Wright, D.A. Snow and C.K. Tay : Interfacial conditions and bond strength in cold pressure welding by rolling, Metals Technology, Jan. (1978), p.24.