

特輯 : 고상용접의 원리와 응용

마찰용접의 이론과 실제의 적용

정 호 신* ·篠 田 剛**

Fundamentals and Basic Application of Friction Welding

Ho-Shin Jeong* and Takeshi Shinoda**



정호신/부경대학교/
1954년생/TLP, 마찰
용접, 용접부의 균열,
오스테나이트계 스테
인리스강의 용접



시노다/나고야대학/
1942년생/용접부의
균열, 마찰용접, 오버
레이

1. 마찰용접의 개요

마찰용접은 재료를 맞대어 가압한 상태에서 상대(회전) 운동시켜 접촉부에 발생하는 마찰열을 이용, 압접하는 방법이다. 이 현상은 기계의 효율을 떨어뜨리고 또 손상시키는 것으로 취급되어온 마찰현상을 역으로 이용한 독특한 용접법이다. 이 방법은 접합부 표면만을 국부적으로 가열하기 때문에 아크를 이용한 용접법에 비해 에너지 효율이 좋아 10~20%의 적은 에너지로도 접합이 가능하다. 또한 마찰용접은 구조조직을 만들지 않기 때문에 기계적 성질이 우수하고, 공정변수가 축하중, 회전속도, 압셋량 등으로 비교적 관리가 용이하고 자동화가 가능하다. 또한 장비가격이 저렴하고 아크용접에 비하여 금속소모량이 상대적으로 적다^{1,2)}.

AWS C6.1-89 "마찰용접의 작업 표준"의 마찰용접에 관한 정의를 보면 "마찰용접은 모재의 접합면에 발열을 야기하여 소성변형시킴으로써 모재의 접합면에서 재료를 배출시키기 위하여 상대적으로 회전 또는 상호 운동하는 모재를 압축력에 의해 일

체화시키는 고상접합법이다. 정상적인 조건하에서는 모재의 접합면은 용융되지 않는다. 용가재나 플럭스, 차폐 가스등은 필요하지 않다"고 정의되어 있다³⁾.

마찰용접 관련 연구로는 구 소련에서 1954년에 A. I. Chudikov가 선반을 개조하여 금속환봉의 마찰용접에 성공한 이래, 소련연방전기용접연구소(VNIESO)에서 1958년에 최초로 마찰용접기를 개발하였다. 그 후 소련, 체코 등지에서 VNIESO방법을 실용화하는 연구가 수행되어, 1958년에 생산공정에 도입되었다. 서방 세계에서도 관련 연구가 활발하게 진행되어 영국에서는 1961년에 BWRA(영국용접연구협회)에서 개발 연구에 착수하여 같은 해에 마찰용접기 시제품을 개발하였고, 미국에서는 AMF사 및 미국 캘리포니아 공대에서 1958년부터 관련연구를 시작하여 1961년에 AMF사의 Cheng이 플라이휠형 마찰용접기 시제품을 제작하였다. 일본에서는 1963년도에 기계기술연구소(당시 기계시험소)에서 연구를 시작하여, 1964년도에 생산공정에 도입함과 더불어 마찰용접간담회가(후에 마찰용접 연구회로 개칭) 설립되었다. 서독에서는 아헨 공과대학을 중심으로 연구가 진행되

어 1977년 Drews등이 프로세스컴퓨터에 의한 마찰 압접의 제어방식을 개발하였다.

그림 1은 일본에서의 마찰용접기의 현장 생산 라인에의 도입에 대한 추이를 나타내고 있다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 일본에서의 마찰용접기의 채용은 매년 일정한 수준으로 증가되고 있음을 알 수 있다. 특히 1995년도까지의 누적 대수는 2,035대로서 한국과는 비교할 수 없을 정도로 많은 것을 알 수 있다.

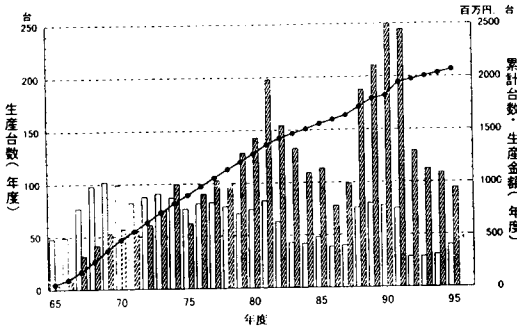


Fig 1. 일본의 마찰용접기 생산추이

이와 같이 선진국에서의 마찰용접의 적용 분야 확대와 더불어 국내에서도 마찰용접의 중요성이 증대되어 1970년대부터 자동차부품, 일반산업기계 부품, 전기기계부품 등의 생산에 관련기술이 이용되고 있다.

철강재 혹은 동종재의 축류 혹은 파이프류의 마찰용접 관련기술이 대부분 이용되고 있으며, 특히 이종재의 용접의 경우에는 두 소재의 고온특성이 판이하게 다를 수 있기 때문에 각 소재의 최적의 물성적인 특성을 얻기 위해서는 적절한 공정설계가 필요하며 현재 이에 대한 기술 개발이 진행되고 있다.

최근에는 마찰용접에 의한 재료의 표면 물성을 향상시키기 위하여 Friction surfacing, Linear Friction welding 등의 적용 가능성이 확대됨과 아울러 통상의 용융용접으로는 용접이 불가능하거나 매우 어려운 이종재료의 용접이나 각종 금속간 화합물의 용접에 마찰용접이 적용되고 또한 최적의 접합 방법으로 인정받기에 이르러 마찰용접이 새로운 관점에서 주목을 받고 있다.

2. 마찰용접의 원리

금속결정면에 힘을 가할 때 결정을 분리 시키기 위해서는 접촉면의 원자간의 결합력을 파괴시킬 정도의 큰 힘이 필요하다.

그림 2는 마찰용접의 원리를 설명하기 위하여 원자 사이의 거리와 힘과의 관계를 나타내고 있다. 원자간의 거리가 가까울수록 인력은 크게 작용하며 $X=0$ 에서 쌍곡선의 모양으로 나타내며, 등가위치 X 는 인력과 반발력의 합이 0일 때의 위치이다. 이 그림에서 인력과 반발력이 최고가 되는 A보다 더 근접시키는 것이 마찰용접의 원리이며, 이렇게 근접시키기 위해서는 재료가 소성변형을 일으킬 수 있을 정도의 막대한 외력을 필요로 하며, 동시에 변형저항을 저하시켜야 가능한데, 변형저항의 저하에는 가열원이 필요하다. 이와 같이 마찰용접은 마찰열을 이용하여 변형저항을 줄이고 가압력에 의해 접촉면의 원자결합을 형성시킴으로써 이루어지는 결합이다.

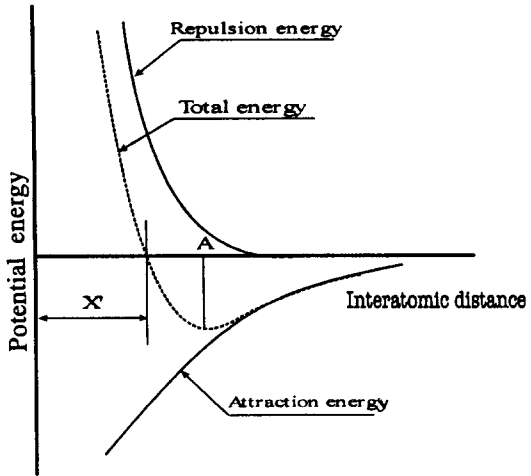


Fig 2. 원자간의 결합력의 변화

3. 마찰용접 방법 및 각 구동 방식의 특징

마찰용접 방법은 운동과 구동(또는 에너지)에 따라 분류하고 또한 그 명칭도 달라진다. 크게 나누어 Direct Drive 방식(브레이크 방식)과 Inertia

Drive 방식 (플라이휠 방식) 이 있다.

마찰용접시의 기본적인 과정을 그림3에 나타낸다. 먼저 한쪽의 재료를 회전시키고 다른 쪽은 고정하여 (A) 적당한 회전속도에 도달하면 축방향으로 힘을 가한다 (B). 계면에서의 마찰에 의해 국부적으로 온도가 상승되고 업셋팅이 시작된다 (C). 최종적으로 회전이 정지되고 업셋팅이 종료된다 (D). 이 때 얻어지는 용접부는 열영향부가 좁고 플래쉬 주위에 소성변형된 흔적이 남게 되며 용

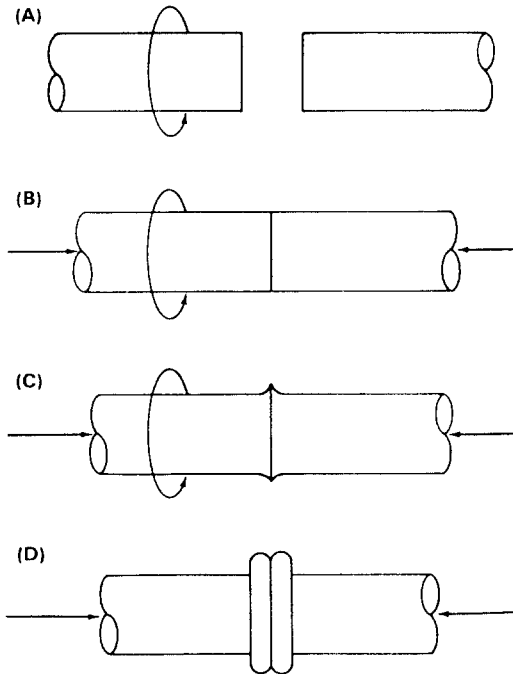


Fig 3. 마찰용접의 기본 과정

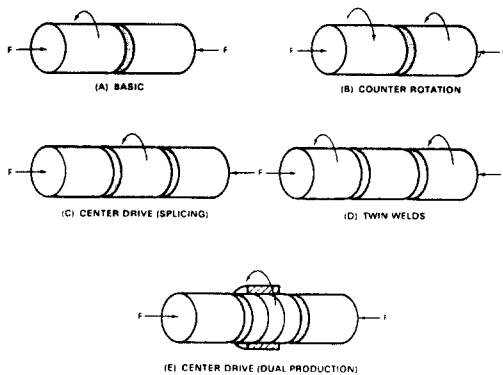


Fig 4. 마찰용접시의 소재의 상대 운동 방식

용역이 없는 특징을 갖게 된다. 재료의 상대운동에는 몇가지 방식이 있는 데 이것을 모식적으로 그림 4에 나타낸다.

- ① 접합면을 맞대어 어느 한 쪽만 회전시키는 방법
- ② 두 소재를 서로 역방향으로 회전시키는 방법
- ③ 소재가 길 때 양쪽 소재 사이에 끼운 작은 재료를 회전시켜 양단을 용접하는 방법
- ④ 상하로 진동시키는 방법 등이 있지만 가장 많이 사용되고 있는 방법은 ①의 1축 회전 방식이다.

마찰용접시에는 맞댐면 (mating surface, faying surface) 과 그 근방이 마찰열에 의해 연화되어 압접온도에 도달하면 상대 운동을 정지시키게 되지만, 현재 사용되고 있는 방법을 압접완료시의 상대 운동 정지방식으로 구분해 보면 브레이크 방식과 플라이휠 방식으로 나눌 수 있다. 이 두 방식에는 각각 장단점이 있지만 브레이크 방식은 주로 일본에서, 플라이휠 방식은 주로 미국에서 사용되고 있다.

브레이크 방식에서는 한 쪽의 모재는 전동 구동 장치에 고정되고, 다른 쪽의 모재는 회전운동이 구속된다. 전동 구동되는 모재는 미리 정해진 일정한 회전수로 회전한다. 모재는 서로 합체되는 방향으로 운동하고 그 후 마찰 가압력이 부가되어 발열된다. 이것은 미리 정해진 시간 또는 미리 정해진 업셋량에 이르기까지 계속된다. 그 후 브레이크가 가동되어 회전구동력은 공급되지 않고 회전하고 있던 모재는 정지하게 된다. 이 때 업셋 힘은 일정시간 유지되거나 회전이 정지된 후 미리 설정한 시간 동안 증가하게 된다.

플라이휠 방식에서는 한 쪽의 모재는 플라이휠에 접속되어 있고 다른 쪽의 모재는 회전이 구속되어 있다. 플라이휠은 미리 정해진 회전수로 가속되어 필요한 에너지를 축적하게 된다. 구동전동기는 결합이 해제되고 모재에는 마찰 추력이 부가된다. 이에 따라 모재의 접합면은 일정한 압력하에서 서로 마찰된다. 회전하는 플라이휠에 저장된 에너지는 플라이휠의 회전수가 저하함에 따라 마찰계면에서는 마찰에 의해 열로 방산된다. 마찰추력은 회전이 정지되기 전에 추가되는 경우도 있다. 업셋힘은 회전 정지후 미리 설정해 둔 시간 동안 부가된다. 이 두 방식 모두 우수한 고상접합 방법이지만 두 방식에는 미묘한 차이가 있다. 플라이휠 방식은 위상제어가 불가능하고 또한 마찰용

접착이 요구되는 정밀도보다 큰 오차를 가질 때 규정된 최종 길이가 되도록 마찰용접하기 위한 정교한 제어를 하기가 어렵다. 브레이크 방식의 경우에는 이동대의 운동을 측정하므로써 간단히 전체 길이를 제어할 수 있다. 또한 플라이휠 방식은 중실재의 경우 브레이크 방식에 비해 높은 압력이 요구된다.

브레이크 방식의 경우에는 7가지의 용접변수를 사용함에 반하여 플라이휠 방식은 2가지의 변수만을 사용하기 때문에 마찰용접 인자를 모니터링하기 쉽다.

이와 같은 약간의 차이는 존재하지만 양 방식의 차이는 근본적인 문제는 아니므로 목적이나 용도를 고려하여 기종을 선정하여야 할 것이다. 마찰용접기의 도입시에 주의하여야 할 점은 마찰용접기의 가격이다. 마찰용접기의 최대의 핸디캡은 가격으로서 직경 1"의 마찰용접 능력을 갖는 수동공급의 기본적인 사양일 경우의 가격은 약 20만 달러 정도로서 그 가격은 자동화, 플래쉬 제거 가공, 컴퓨터 모니터링과 같은 추가 사양에 따라 가격은 점점 더 비싸지게 된다. 기본적으로 수동 탈착 마찰용접기의 용접 능력과 가격 사이의 관계는 대체적으로 그림 5와 같다.

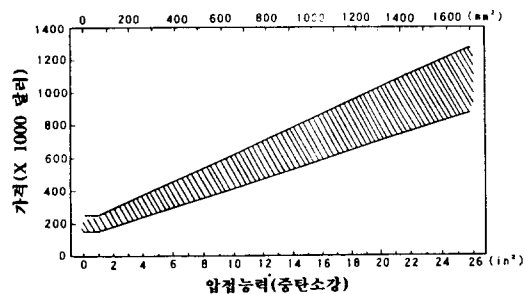


Fig 5. 마찰용접기의 용접 능력과 가격파괴의 관계

4. 마찰용접법의 특징

마찰용접은 두 모재를 격렬하게 상대운동시키면서 접합이 이루어지는 것으로 종래의 용접에서는 상상하기도 어려웠던 독특한 접합방법이며 그 메카니즘에는 기계적 인자가 많이 포함되어 있고 기계부품의 제작에 특히 유용하다는 특징이 있다.

또한 마찰용접한 제품은 용융된 부분이 없고 열영향부의 폭이 좁으며 마찰용접부 주위에 소성변형된 재료인 플래쉬가 만들어진다. 마찰용접부의 품질은 재료나 이음부의 설계, 마찰용접 조건, 마찰용접후의 열처리 조건의 선정 등에 따라 결정된다. 설계와 생산기술적인 측면에서 마찰용접의 특징, 특히 주요한 장 단점을 검토해본다.

4.1 마찰용접법의 장점

① 높은 에너지 효율 : 마찰용접은 가압하에서 모재의 접촉부에 발생하는 마찰열을 이용하여 재료를 접합하는 방법이다. 따라서 접합하고자 하는 면과 그 근방에만 열이 발생하므로 그것을 유효하게 이용할 수 있다. 이 접합법과 유사한 용도인 업셋 용접에서는 모재를 통해 용접전류가 공급되므로 모재에도 접합에 필요하지 않는 저항발열이 생겨 에너지 효율이 낮아진다. 마찰용접은 전기저항 용접에 비해 접합에 필요한 에너지가 1/5~1/10 정도로 충분하다.

② 용접변수 제어 용이 : 용접조건으로서 설정하여야 할 인자는 브레이크식의 경우, 회전수, 마찰압력, 마찰시간, 업셋 압력, 업셋 시간이다. 플라이휠식의 경우에는 설정인자는 회전수, 플라이휠의 회전에너지 및 마찰압력이다. 이러한 여러 가지 인자는 모두 가장 간단한 기본적인 기계적인 양으로서의 소기의 값을 쉽고 정확하게 재현할 수 있을 뿐 아니라 정밀도 높게 제어, 감시할 수 있다. 이것은 생산 가공 공정에서 용접의 기계화, 자동화 측면에서 매우 유리하다.

③ 높은 작업 능률 : ①에서 설명한 바와 같이 접합하고자 하는 부분에서의 에너지 효율이 높기 때문에 그 부분을 단시간에 소요의 가열 상태에 도달시켜 용접할 수 있다. 또 용접기에 모재를 장착하거나 떼어내는 작업의 자동화가 간단하며 용접작업을 고능률적으로 수행할 수 있다.

④ 높은 용접 정밀도 : ②에서 설명한 바와 같이 용접조건의 인자를 정밀도 높게 감시할 수 있다. 모재가 동일할 때 회전수, 마찰압력을 일정하게 설정하면 업셋 속도는 이들 인자에 의해 결정되는 값으로 항상 재현할 수 있기 때문에 마찰 시간과 업셋 압력을 규정하면 용접재의 길이에 대한 높은 정밀도가 확보된다. 또 칫수 정밀도를 높이고자

할 때에는 마찰시간이 아니라 마찰발열 단계 및 업셋 단계에서 길이를 조정하면 된다. 특히 용접 조건의 제어에 따라 용접재의 치수 정밀도는 $\pm 0.1\text{mm}$ 정도까지 얻을 수 있다.

더욱이 모재 단면의 마찰열은 회전축대칭으로 발생되고, 가압력(마찰압력, 업셋압력)은 축방향으로 부가되고, 플래쉬는 원주방향으로 균등하게 배출되므로 용접이 전면적에 걸쳐 동시에 이루어지기 때문에 각변형이 매우 적다. 따라서 이미 마무리 가공한 소재를 용접하여 플래쉬를 절삭한 상태만으로도 충분히 요구되는 가공조건을 만족시킬 수 있다. 따라서 최종제품의 설계와 가공의 합리화에 매우 유리하다.

⑤ 이종재료의 용접 : 동종재료의 용접은 물론 이종재료의 용접도 용이하다. 이종재료의 용접이 가능하고 또 용융을 동반하지 않는다는 측면에서 특히 이종재료 및 세라믹의 용접에 마찰용접이 많이 채용되고 있다. 어떤 측면에서는 바로 이 점이 마찰용접의 최대의 장점이 될 수도 있을 것이다. 용접과정에서 마찰부의 도달온도 상한은 모재의 용접이나 그 보다 낮기 때문에 용융되면 취약한 합금 또는 화합물을 형성하는 재료의 용접에서도 이러한 문제점을 해결하여 접합할 수 있다. 또 재료를 과열시키거나 연소시키지 않는다. 이러한 용접현상은 이종재료의 접합에 특히 유리하다.

⑥ 기타 : 용접작업중에 아크, flame, flash, fume등이 발생하지 않기 때문에 작업환경이 양호하다. 따라서 용접기를 다른 공작기계와 함께 설치할 수 있고, 가공 line에서 다른 기계의 배치를 방해하지 않는다.

상황을 고려하면 모재 형상에 제한이 있어도 마찰용접이 이용될 분야는 넓다.

또 강재에 대해 알루미늄과 같은 연질의 각재 모재를 용접한 경우에는 마찰과정에 있어서 알루미늄 모재에서 발생하여 확대된 플래쉬부의 마찰면의 내접원이 모재의 외접원보다 커진 후에 업셋하는 방법을 써서 접합한 예가 있다.

② 정위상 용접이 곤란: 마찰용접의 최종과정에서 모재 사이의 상대운동 정지시의 위상, 즉 양쪽 모재 사이의 용접위상을 일정하게 하는 것은 통상의 용접기로는 곤란하다. 그러나 컴퓨터의 발달로 위상을 제어할 수가 있어서 이러한 문제점이 점차 해결되고 있다.

③ 용접부의 인성 : 마찰용접부의 인장강도와 피로강도는 일반적으로 모재와 동등하거나 그 이상이지만 충격인성은 낮은 경우가 많다. 특히 용접입열향부의 비틀림, 압축변형에 의해 플래쉬가 생기기 때문에 그 배출 방향, 즉축에 수직방향으로 모재의 섬유조직이 유동되기 때문에 인성이 낮아진다.

예를 들면 STS304의 용접부의 저온($0\sim 200^{\circ}\text{C}$)에서의 샤르피 흡수 에너지는 용접한 상태(as-welded)에 있어서 모재의 $1/3\sim 1/4$ 이고, 용체화처리하여도 충분한 회복은 생기지 않는다. 더욱이 이 경우 흡수 에너지가 저하하는 것은 용접면을 중심으로 양측 0.5mm 범위(모재 직경: 19mm)이다.

부품설계시에는 이러한 사항을 고려하여 압접부의 위치 및 형상, 치수를 결정하면 이와 같은 결점은 쉽게 해결할 수 있다.

4.2 마찰용접의 단점

① 모재 형상의 제한 : 일반적으로 마찰용접에서는 한 쪽의 모재를 회전시키기 때문에 길이가 긴 모재, 고정하고 있어서 회전시킬 수 없는 모재 또는 큰 질량부, 비대칭 질량부를 갖는 모재는 용접이 곤란하다. 그러나 길이가 긴 파이프를 용접하는 radial 마찰용접기의 개발에 의해 이러한 단점도 점차 해결되고 있다. 이러한 모재 형상에 대한 제한은 다른 접합법에서는 찾아볼 수 없는 단점이다. 그러나 기계가공부품의 형상을 조사한 결과를 보면 회전형상의 부품이 상당히 많다. 이와 같은

5. 마찰용접장치

① 제동식 마찰용접기(Direct Drive Friction Welding, Conventional Friction Welding)

모재의 일단을 고정하고 다른 쪽을 구동축에 결합된 축에 부착하여 일정한 회전수로 회전을 계속하여 축 방향으로 가압하면서 마찰시켜 마찰부가 적당한 온도로 가열되었을 때 브레이크에 의해 회전축을 급정지시킨다. 그 때 압력을 일정하게 유지하는 일정가압방식과 더 높은 업셋압력을 가하는 가변가압방식이 있다. 브레이크 방식의 용접인자는 회전수, 가압력 및 마찰시간을 설정하므로써

제어할 수 있기 때문에 업셋량 대신 마찰시간을 제어인자로 할 수도 있다.

② 플라이휠식 마찰용접(Inertia Drive Type, Flywheel Type)

플라이휠에 회전 에너지가 축적되어 자유회전하고 있는 축에 부착된 모재의 단면을 정지된 모재면 쪽으로 가압하면 플라이휠의 관성에 의한 회전에너지는 마찰면에서 열을 발생시킴으로써 소모되며 급속히 회전운동이 감속되어 자연히 정지되므로써 압접이 완료된다.

플라이휠식에서의 용접 인자는 회전축의 초기 회전수, 투입에너지 및 마찰압력이다. 업셋량 또는 마찰시간은 이들 세 가지 인자에 의해 결정된다.

그림 6은 압접 사이클을 비교한 것으로 플라이휠식은 가압력을 크게 하여 용접을 1~2초의 극히 짧은 시간에 완료하는 방식임에 반하여 브레이크식은 비교적 낮은 가압력으로 수~수십초의 긴 시간에 용접하는 방식이다.

③ 2축 회전식 용접기

이미 설명한 용접기는 한 쪽 소재는 정지된 상태에서 다른 한쪽 만 회전하는 방식이었다. 고정축도 회전시키고 이 축에 관성판을 붙여서 최종적으로 두 축이 회전하도록 한 것이 이 방식의 특징이다.

지금 적당한 회전 질량을 갖는 중동축에 부착된 모재를 구동축의 회전 모재쪽으로 밀게 되면 접촉면의 마찰력 때문에 중동축은 회전하고 또 가속되어 구동축의 회전수까지 상승되면 모재 사이의 마찰발열 과정이 끝나고 용접이 된다. 이 방식은 앞에서 설명한 두 방식과 달리 플래쉬 발생시에 두 모재가 회전하므로 바이트로 플래쉬를 제거할 수 있는 이점이 있다. 따라서 용접이 끝났을 때 기계 가공이 끝난 용접부가 얻어진다.

④ 위상제어 마찰용접기

종래의 용접기에서는 일정한 위치에서 회전을 정지시킬 수 없기 때문에 용접후 소재 사이의 상대 위치가 정해져야 되는 제품의 용접이 불가능하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 위상제어가 가능한 마찰용접기도 개발되어 있다.

6. 용접변수

① 회전속도

용접품질 측면에서 회전속도는 일반적으로 중요한 인자는 아니다. 철강의 경우 속도가 1.3m/s 정도이어야 한다. 속도가 이것보다 낮으면 torque가 매우 커지기 때문에 재료의 고정, 불균일 업셋팅 및 소재의 파손 등과 같은 문제가 생긴다.

실제 생산에 사용되는 용접기는 통상 300~650rpm의 속도로 가동되게 설계되어 있다. 일반적으로 경화능이 높은 재료에는 높은 회전속도와 낮은 입열량이 요구된다. 가열시간이 길어지면 예열 효과 때문에 냉각속도가 늦어지며 담금질 균열을 방지할 수 있다. 또 이와 반대로 이종재료 용접시에는 저속(즉 짧은 가열시간) 회전하므로써 취약한 금속간 화합물의 형성을 방지할 수 있다. 그러나 실제로는 마찰용접기의 가압력을 변화시킴으로써 가열시간을 조절할 수 있다.

② 압력

가열과 가압에 의한 단조라는 측면에서 유효압력의 범위도 매우 넓다.

압력은 용접부의 온도 기울기, 소요의 구동력 및 축 방향의 길이 감소량을 지배하게 된다. 이 때

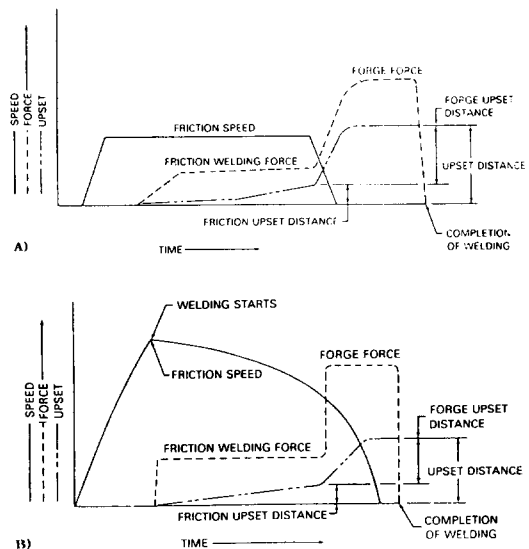


Fig 6. 제동식 마찰용접(A) 및 플라이휠 방식(B)의 용접 사이클의 비교

의 비압력은 용접대상 재료와 이음부의 형상에 따라 달라진다. 특히 튜브와 판의 용접시에는 압력을 조절하므로써 체적이 큰 재료에 의한 열손실을 보상할 수 있다.

가열시의 압력은 산화를 방지하기 위하여 맞댐면을 충분히 밀착시킬 수 있을 정도로 높아야 한다. 어떤 일정한 spindle속도에서 압력이 낮으면 충분한 발열이 생기지 않게 된다. 압력이 높으면 국부적으로 고온으로 가열되며 급속히 재료의 축방향 길이가 짧아지게 된다.

연강의 경우, 축방향의 길이 감소량은 그림 7과 같이 대체로 가열시의 압력과 비례관계에 있다. 또 이 그림에서는 가열과정중의 압력에 대하여 축방향의 길이 감소량은 고속회전시보다 저속회전의 경우가 더 커짐을 알 수 있다.

철강재료를 포함하여 많은 금속의 경우, 가열 종료 단계에 가압력을 증가시킴으로써 용접부의 특성이 향상된다.

철강재료의 경우 건전한 용접부를 얻기 위한 적절한 압력 범위가 매우 넓다. 연강의 경우, 가열단계의 압력은 4500~8700psi(30~60MPa), forging 단계의 압력은 11000~22000psi(76~152MPa)가 적절하다. 통상적으로 사용되는 압력은 각각 8000psi(55MPa), 20000psi(138MPa)이다. 스테인리스강이나 Ni기 합금과 같은 고온강도가 높은 재료에서는 forging 단계의 압력은 이것보다 더 높아야 한다.

만약 냉각속도를 낮추어 예열효과를 얻고자 하면 용접 초기 단계에서 약 3000psi(21MPa)의 압력을 가하면 된다. 또 이런 경우에는 이것보다 더 높은 마찰압력이 필요하다.

③ 가열시간

가열시간이 너무 길면 생산성이 떨어지고 재료의 손실이 많아진다. 또 가열시간이 짧으면 불균일하게 가열됨과 동시에 산화물이 잔류하며, 계면상에 접합되지 않은 부분이 생기게 된다.

환봉의 마찰용접시의 불균일 가열 상황을 보면 회전하는 봉재의 중심 근방에서는 마찰용접에 적당한 마찰열이 발생되기 어렵게 된다. 그러므로 맞댐면의 외주부에서의 열적확산이 일어나야만 전 단면에 걸쳐 건전한 용접부가 얻어진다.

가열시간은 두 가지 방법에 의해 조절할 수 있다.

1) 시간제어 : 미리 설정한 가열시간 종료시에 회전을 정지시키는 적절한 장치를 사용하는 것이다. 예열과 forging기능은 타이머를 사용하여 가열시간과 연계시키는 것이다.

2) 업셋 제어 : 미리 설정한 축 방향의 길이 수축 이후에 회전을 정지시키는 방법이다. 이 방법은 업셋팅하기 전에 적절한 온도로 가열되도록 재료의 길이 감소량을 충분하게 하는 방법이다.

용접성을 손상시키지 않게 하기 위하여 재료의 표면 조건도 변화시킬 수 있다.

이상을 요약하면 연강을 용접할 경우, 어떤 주어진 축방향의 길이 감소량에 대하여 가열시간은 가열시의 압력과 회전속도에 큰 영향을 받는다. 가열압력이 높을 때에는 가열시간이 짧아진다.

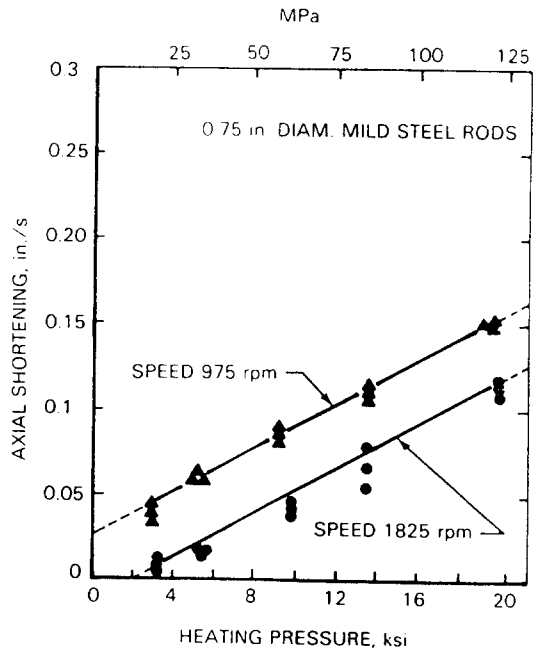


Fig 7. 마찰압력과 길이 변화량과의 관계

7. 마찰용접이 적용가능한 재료

마찰용접은 광범위한 동종재료 및 이종재료, 예를 들면 금속, 금속기 복합재료, 세라믹, 플라스틱 등의 용접에 적용될 수 있다.

상대적인 용접성은 합금의 화학조성, 용접변수, 부품의 설계 및 사용환경등 많은 인자에 의존한다.

원칙적으로 열간 가공 가능한 재료는 거의 대부분 마찰용접할 수 있다. 몇몇 금속은 심한 소성변형이나 용접계면에서의 담금질 경화의 영향을 제거하기 위하여 후열처리가 요구되기도 한다. 특히 패삭강의 경우에는 용접부에 취약한 부위를 형성하게 되는 개재물의 재분배 때문에 특히 주의하여 용접하여야 한다. 이러한 용접부는 강도, 연성 및 노치 인성이 낮다.

일반적으로 용접부에 개재물이 재분배되면 용접부의 연성과 인성은 모재의 압연 방향과 직각 방향(Transverse direction)의 특성치와 거의 유사한 값을 갖게 된다. 만약 이러한 요구 조건이 엄격할 경우에는 불순물 농도가 낮은 재료를 사용하여야 한다.

각종의 이중금속의 용접도 실시되고 있으나 특히 열전도도의 차이나 forging 온도의 차이가 큰 경우 또는 취약한 금속간 화합물이 생성되기 쉬운 경우가 많다. 그 대표적인 예는 Al-Cu, Al-Fe, Ti-Stainless 강인 경우이다.

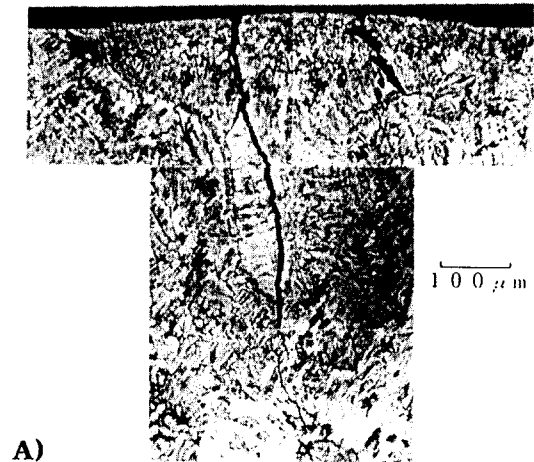
마찰용접에 의해 생성되는 조직은 일반적으로 고온에서의 변형에 기인한다. 고온 가열시간은 짧고 최고 도달온도는 일반적으로 용접보다 낮다.

연강과 같은 비경화성 재료에서는 용접부의 물성 변화를 무시할 수 있다. 그러나 경화능이 높은 재료에서는 열영향부의 조직에 변화가 생긴다. 이러한 경우에는 상대적으로 가열시간을 길게 하여 냉각속도를 낮추어 인성을 확보할 수 있게 하여야 한다.

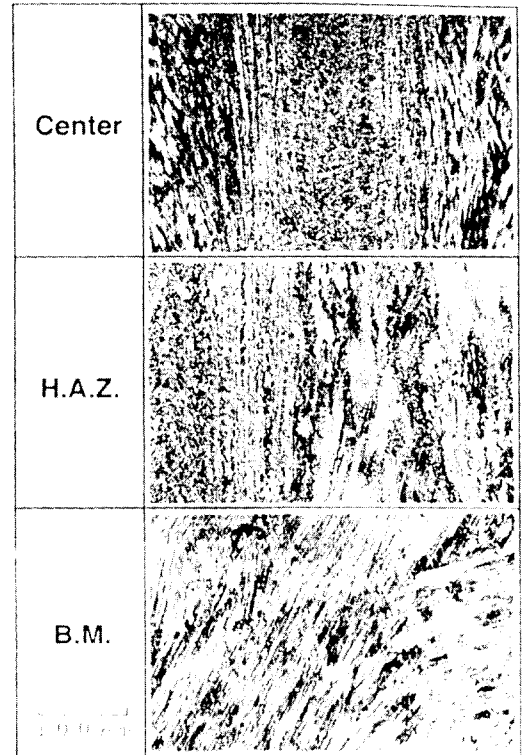
이중금속 용접계면의 조직은 용접조건에 따라 큰 영향을 받는다.

용접시간이 길면 계면을 통한 확산을 반드시 고려하여야 한다. 용접조건이 적당하면 바람직하지 않은 확산이나 금속간 화합물의 생성을 최소화할 수 있다. 어떤 경우에는 이중재료 용접계면에는 기계적인 혼합이 생기는 경우도 있다.

최근에는 용융용접하기 어려운 각종의 금속간 화합물의 용접에 마찰용접이 적용되어 마찰용접의 적용 범위는 점점 더 확대될 것으로 기대된다. T. Shinoda⁹⁾에 의하면 구조용 재료로서의 용도가 기대되고 있는 TiAl의 용접에 마찰용접을 적용하여 건전한 용접부가 얻어지고 있다. 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 TiAl을 레이저 용접한 경우에는 용접부에 균열이 많이 발생하지만 마찰용접하면 균



A)



B)

Fig 8. TiAl의 용접금속 현미경 조직
A) 레이저 용접부 B) 마찰용접부

열이 존재하지 않는 건전한 용접부가 얻어지고 있다.

8. 용접조건 및 용접부의 성능

접촉면 사이의 상대속도의 분포로부터 마찰면의 발열은 중심부에서 0, 원주방향으로 갈수록 포물 선적으로 증가될 것이다. 그러나 실제의 발열 상태는 복잡하며 용접초기에는 부분적인 온도 차이가 있어도 용접의 진행과 더불어 온도 차이가 적어져 균열화되는 것으로 간주할 수 있으며 용접부 단면의 관찰로부터도 이상과 같은 경향을 알 수 있다.

마찰면을 효과적으로 가열하기 위해서는 마찰 torque와 회전수의 곱이 커지는 회전수와 마찰압력을 설정할 필요가 있다.

실험에 의하면 동종재료끼리의 용접에서는 마찰부의 온도가 그 재료의 용점 아래까지 상승되는 데 이 온도는 연강의 용점시에는 1250~1300℃ 정도로 추정되고 있다. 회전수의 증가는 마찰면의 도달온도를 높이는 작용을 한다. 용접부의 도달온도의 상한은 소재의 용점이지만 회전정지시에는 일반적으로 용점 이하로 간주할 수 있기 때문에 마찰용접은 고상용접이라고 할 수 있다.

이종재료의 용점시에는 용점이 낮은 쪽의 용점으로, 또 그 재료 사이에서 공정반응이 있을 경우에 마찰면의 일부는 공정점에 도달하는 것으로 추정된다.

마찰과정이 적절한 상태이면 용접을 방해하는 용접단면의 산화물, 흡착물, 오염등은 마찰중에 분해되거나 플래쉬로서 용접부에서 배출되며 용융용접시에 나타나는 주조조직, 결정립의 조립화는 생기지 않는다.

이종재 용접에서는 일반적으로 연한 재질쪽의 압력량이 크다. 또 철강과 티타늄, 알루미늄과 구리, 알루미늄과 강등 취약한 금속간화합물을 생성하는 이종재의 용접에서는 회전수, 마찰압력과 더불어 마찰시간이 중요하게 된다. 특히 회전정지시에 가압력을 증가시켜 취약한 금속간 화합물을 접합계면으로 방출하거나 낮은 회전수, 높은 마찰압력으로 단시간에 압접하여 이러한 취약층의 생성을 억제하는 등 적절한 용접조건을 선정하면 상당히 높은 강도의 이음부가 얻어진다.

압력량의 부가는 용접부의 강도를 지배하는 큰 요인이 된다. 일반적으로 인장강도는 마찰압력과 압력량에는 거의 무관하며 압력량에 의존하는 경향을 나타내므로 최소량 이상의 압력이 필요하다.

탄소강에 대하여 일반적으로 확립되어 있는 사항은 다음과 같다.

압연강의 용접부에서는 인장, 굽힘 피로특성등은 모재와 동등한 강도가 얻어진다. 또 열간 압연재의 경우 거의 경도의 변화가 없으나 냉간 압연재에서는 약간 낮아진다.

노치 인성은 모재보다 약간 낮아지지만 그 원인은 flow line의 존재로 생각된다. 그러나 실제로 이 노치 인성의 저하가 실용적인 측면에서 문제를 일으키는 경우는 거의 없고 실시 시험에서도 충분히 내구성이 있음이 입증되고 있다.

열처리강의 경우, 용접후의 냉각속도에 따라 조직과 강도가 변한다. 용접후열처리(postweld heat treatment)하면 모재와 동등한 성능이 얻어지므로 문제는 없지만 후열처리하지 않을 경우에는 마찰시간을 길게 하거나 열영향부를 크게 하여 용접부의 냉각속도를 늦추어 경도가 높아지지 않도록 하여야 노치 인성의 저하를 방지할 수 있다.

9. 마찰용접의 실제의 적용

마찰용접의 실제적인 생산에의 응용은 중요 부품의 용접에 그 적용이 검토되었지만 마찰용접의 실적이 적었기 때문에 다른 각종의 용접법과 용접부 특성을 비교 확인할 정도이었을 뿐 마찰용접을 본격적으로 도입하는 데에는 많은 저항이 있었다. 그러나 각종 시험을 되풀이하고 확고한 근거가 마련된 단계에서도 품질에 대한 불안이나 일반화되어 있지 않다고 하는 관점에서 마찰용접이 갖는 매력 때문에 도입이 시도되었다. 따라서 마찰용접품의 관리에 대해서도 비정상적일 정도로 배려를 거듭하여 초창기에는 전체를 비파괴 시험하거나 sample 파괴 시험하는 등의 상당히 번잡한 검사를 거쳤다.

그러나 마찰용접품의 불량률이 격감하였다는 것과 검사결과가 양호하다는 등 종래의 용접법에 비해 용접부의 품질이 매우 우수하고 또 재현성이 높

다는 점이 증명된 이후 급속히 마찰용접이 각 산업 분야에 도입되었다.

9.1 실용화되어 있는 주요 부품의 예

마찰용접이 널리 실용화되어 있는 일반적인 경우의 예를 다음과 같다.

① steering shaft

종래에는 flash용접하였으나 품질 향상, 용접후의 길이의 산포, 동심도, 굽힘등의 치수 정밀도 개선을 위하여 마찰용접하며 용접기 자체에 flash 제거기가 장착되어 flash를 자동적으로 제거한다.

마찰용접의 도입으로 종래의 방법보다 불량률이 1/10 이하로 저하되었다.

② engine valve

이 경우도 ①의 경우와 마찬가지로 플래쉬 용접에 의한 강도, 치수 정밀도, 생산원가 및 line의 자동화 개선의 필요성에 따라 마찰용접이 채용되었다.

③ tulip shaft

전륜 구동 자동차의 증가에 따라 마찰용접을 제작공정에 도입한 경우가 증가하고 있다. 현재 일본에서는 설계 단계에서부터 마찰용접을 전제로 샤프트를 냉간 단조하여, 마찰용접은 최종 공정으로서 강도의 보충은 물론 특히 치수 정밀도의 확보와 유지를 위해 마찰용접한다.

상기의 세 case는 모두 자동차 부품 중에서 안전과 직결된 매우 중요한 부품으로서 품질관리도 매우 엄격하게 이루어지고 있다.

④ 유압용 piston rod

이 부품의 경우, 종래에는 머리부분을 단조 가공하여 일체 단조품을 제작하여 기계가공하여 완성품으로 하는 경우와 머리 부분만을 단조하여 접합부분에 groove를 가공하여 CO₂ 용접하는 경우가 많았다.

이 경우 마찰용접을 채용한 경우를 대별하면 두 가지 방식이 있는 데

ⓐ 머리부분은 단조 가공하지만 접합면이 되는 단면만을 절삭하여 환봉을 마찰용접하는 경우로서 접합전의 가공 공수의 절감, 용접전의 예열의 생략, spatter 제거 작업 불필요 등의 목적이 있다.

ⓑ 머리부분은 단조 가공하지만 측면 및 구멍 부분은 소정의 거칠기 및 치수로 가공하고 축 부분도

마루리 가공하고 또 경질 크롬 도금하여 완성된 부품을 마찰용접하기도 한다. 이 경우의 중요한 요점은 도금부에 상처가 생기지 않도록 할 것과 머리부와 축부의 동심도를 좋게 할 것 또는 열영향부가 작아지는 조건을 찾아 용접할 것 등이다.

⑤ Aluminum guide roller

이종재료의 마찰용접에서 가장 긴 역사를 갖는 것이 알루미늄 가이드 로울러이다. 이것은 인쇄기에 사용되는 고급품으로서 마찰용접을 채용함으로써 품질과 원가의 문제를 동시에 해결할 수 있게 되었다.

⑥ track roller

이것은 건설기계의 caterpillar부에 들어가는 것으로 복잡한 하중을 받는 중요부품이다. 종래에는 단조하여 groove가공하여 아크용접하였지만, 마찰용접으로 전환된 큰 이유는 품질이 안정적인 점, groove가공이 불필요한 점, 자동화가 용이한 점, 작업환경이 개선된다는 장점 때문이다.

⑦ gear coupling body

종래에는 단조품을 절삭가공하여 최종제품으로 하였으나 내부치차의 부분에서 선단부의 seal 부분의 내경이 작기 때문에 절삭분이 seal부를 막히게 하는 등의 결점이 있고 기계 가공 공수도 많았다. 이것을 3 piece로 나누어 마찰용접하여 완성품으로 하고 있다.

⑧ flange 치차

이 경우에도 대부분 단조 가공한 후 기계 가공하였으나 치차 가공에 많은 시간이 소요된다. 따라서 치차부와 flange부를 분리하여 마찰용접하므로써 공수를 절감할 수 있다.

10. 마찰용접의 최근의 동향

마찰용접은 비교적 공정이 단순하고 제어가 간단하다는 측면에서 그 중요성이 지금까지 간과되어 온 점이 적지 않다. 그러나 마찰용접부의 신뢰성 향상과 다른 용접법과는 비교되지 않을 정도로 높은 생산성과 경제성 및 저 에너지가 요구된다는 점 뿐 아니라 효율적인 생산 수단이 될 수 있기 때문에 국제 경쟁력의 확보라는 측면에서도 적용 범위가 현저하게 확대될 전망이다.

특히 이종재료의 접합에 있어서는 현존하는 용

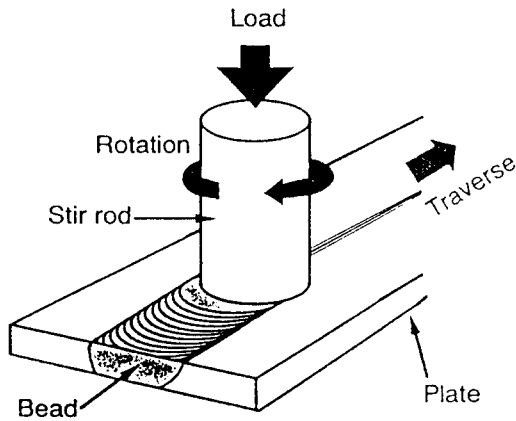


Fig 9. 계면 활성화 접합법의 도해

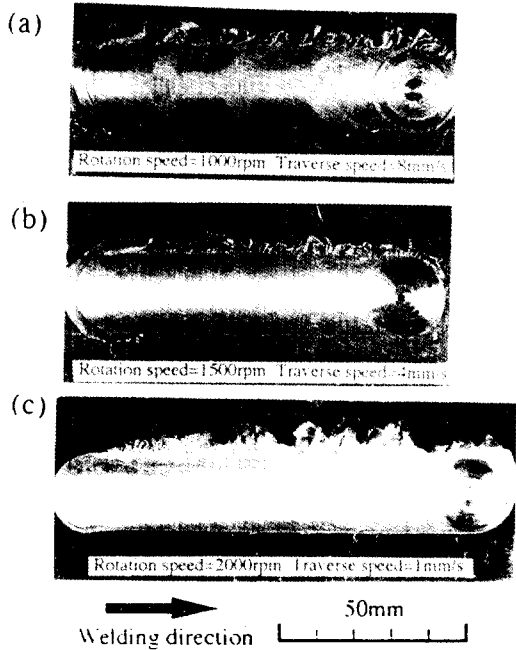


Fig 10. 비드 온 플레이트 마찰용접부의 외

접 방법중에서 가장 적합한 용접법으로 자리할 가능성이 매우 높다. 또한 각종 복합재료, 예를 들면 Al계 복합재료- Al의 용접, Ti-Al의 용접, 탄소강-Al의 용접, 마그네슘 합금의 용접, Al-Ceramics의 용접, ODS Al합금의 용접, TiAl의 용접, TiAl-SUH재의 용접, 지르코니아-Al-탄소강의 용접,

Al-Cu의 용접, 초합금-저합금강의 용접, 마그네슘 합금-스테인리스강의 용접, 각종 급랭용고금속의 용접 등 거의 모든 재료의 용접에 마찰용접이 적용되고 있다. 이러한 측면에서 각종 이종재료의 용접과 각종 재료의 살붙이기 (overlay)에 까지 마찰용접의 적용이 시도되고 있다. 그림 9에 그 예를 나타낸다. 이 방법은 계면 활성화 접합법(Friction stir welding)으로서 각종 재료의 용접이나 살붙이기 용접에 적용되고 있다.

그림 10은 Friction stir용접시의 비드 온 플레이트의 비드 외관을 나타낸 것이다. 이와 같은 계면 활성화 접합법은 각종 연질 재료의 표면에 경질 재료나 내식성이 요구되는 재료를 살붙이기 용접하는 데에 주로 응용되고 있고 특히 유럽 제국과 일본에서 많은 연구가 진행되고 있고 향후 많은 결과가 얻어질 것으로 사료된다.

결 론

마찰용접은 자동차공업의 발전과 더불어 발전되어 왔다고 할 수 있다. 특히 자동차 공업 분야에서 마찰용접의 대상이 된 것은 중요 안전부품이었다. 한편 산업기계분야의 부품은 자동차 부품에 비해 종류가 많고 수가 적기 때문에 향후 냉간 및 열간 단조로 이행될 분야는 적을 것이며 일단 마찰용접이 채용되면 그 수명도 길 것이다.

특히 이종재료의 용접이나 전체적인 가공이 끝난 부품을 마찰용접하는 고정밀도 마찰용접이 적용되면 대폭적인 원가절감이 가능하리라고 생각된다. 마찰용접의 적용분야는 매우 넓고 생산성 향상에도 크게 기여할 수 있다. 최근의 신소재 연구 동향에 따라 새로운 접합 방법도 요구되고 있으며 마찰용접에 의한 신소재의 접합도 많이 연구되고 있다. 따라서 마찰용접은 완성된 기술이 아니라 앞으로 더욱 그 적용범위가 확대될 것이다.

참 고 문 헌

1. AWS, Welding Handbook, 8th ed., vol. 8, 739-782
2. 摩擦壓接協會, 摩擦壓接, コロナ(1982)

3. AWS, Recommended practices for friction welding, ANSI/AWS C6.1-89(1989)
4. 摩擦壓接協會, 鐵筋用 FW카프라 繼手の實用化, 摩擦壓接, vol. 1. 1(1995), 15-19
5. 摩擦壓接協會, 摩擦壓接の適用擴大のための基礎知識, 摩擦壓接, vol. 1. 2(1995), 21-28
6. D. E. Spindler, What industry needs to know about friction welding, W. J., vol. 73-3(1994), 37-42
7. K. Okita et al, Friction welding of pure aluminium to austenitic stainless steel, J. of JFWA, vol. 1. 4(1995), 123-126
8. T. Shinoda, Y. Kondoh, Friction stir welding of aluminium plate, J. of JFWA, vol. 2. 4(1996), 173-178
9. T. Shinoda et al, Friction welding of TiAl intermetallic compound, J. of JFWA, vol. 3. 1(1996), 25-31
10. M. B. D. Ellis et al, Joining of aluminium base metal matrix composites, TWI, Dec, 1994, 501-504
11. A. Hasui et al, Friction welding of aluminium and carbon steel, J. of JWS, vol. 46-12(1997), 858-862
12. O. T. Midling et al, A first report on the microstructural integrity and mechanical performance of friction welded Al-SiC composites, M. G. C., 1991, 529-534
13. H. H. Koo et al, Solid-phase welding of a rapidly solidified dispersion strengthened Al-Fe-V-Si alloy-FVS1212, Low density, high temp. powder metallurgy alloys, Mineral. Metals & Material. Society, 1991, 183-196
14. T. Shinoda et al, Friction welding of new advanced materials, DVS, vol. 5-6(1991), 50-56
15. H. Horn, Hamburg et al, Friction welding of metals with ceramics, DVS, vol. 5-6(1991), 15-17
16. M. Aritoshi et al, Friction welding of copper-tungsten sintered alloy to pure titanium, J. of JWS, vol. 9-4(1991), 17-24
17. M. Aritoshi et al, Friction welding of oxygen free copper to pure aluminum, J. of JWS, vol. 9-4(1991), 3-10
18. K. Ikeuchi et al, Friction welding of silicon carbide to nickel with intermediate layer, Trans. of JWRI, vol. 20-2(1991), 77-84
19. J. A. Fernie et al, Progress in joining of advanced materials, W&MF. vol. 5(1991), 179-184
20. G. P. Rajamani et al, Dissimilar friction welding of alloy 800 and 2.25Cr-1Mo steel, J. for the Joining of Materials, vol. 3 (1991), 25-31