

# 마찰 압접 기술



박 노 광(KIMM, 재료기술연구부)

- '93-'77 연세대 금속공학과(학사)
- '77-'79 한국과학원 재료공학과(석사)
- '83-'87 호주 Monash University(박사)
- '89-'90 미국 The University of Michigan(연구원)
- '79-현재 한국기계연구원 책임연구원

## 1. 마찰압접 개요

마찰압접은 금속을 용해하지 않고 마찰에 의해 형성되는 마찰열과 고온에서의 소성변형을 동시에 이용하는 접합방법이다. 이 방법은 접합부 표면에만 국부적으로 가열하기 때문에 화염을 이용한 용접법에 비해 에너지효율이 좋아 10~20%의 적은 에너지 사용으로도 접합이 가능하다. 또한 마찰압접은 주조조직을 만들지 않기 때문에 기계적 성질이 우수하고, 공정변수가 축하중, 회전속도, 업세트량 등으로 비교적 관리가 용이하고 자동화가 가능하다. 또한 장비가격이 저렴하고 화염용접에 비하여 금속소모량이 상대적으로 적다. 그러나 마찰압접은 용접품 형상에 제약을 받는 단점을 가지고 있다. 즉, 마찰회전에 의해서 생성되는 마찰열을 이용하기 때문에 접합부의 단면은 원이나 링의 형태를 가져야 하며 튜브류를 압접할 경우에는 그 두께에 제약을 받는다.

마찰압접 관련 연구로써는 구 소련에서 1954년에 A.I. Chudikov가 선반을 개조하여 금속환봉을 마찰압접하는데 성공한 이래, 소련연방전기용접연구소(VNIIESO)에서 1958년에 최초로 마찰압접기를 개발하였다. 그후 소련, 체코 등지에서 VNIIESO 방법을 실용화하는 연구가 수행되어, 1958년에 생산공정에 도입되었다. 서방세계에서도 관련 연구는 활발하게 진행되어 영국에서는 1961년에 B.W. R.A.(영국용접연구협회)에서 개발 연구에 착수하여 같은 해에 마찰압접기 시작품을 개발하였고, 미국에서는 1958년 부터 관련연구를 시작하여 1961년에 A.M.F.사의 Cheng이 플라이휠형 마찰압접기 시작품을 제작하였다[1]. 일본에서는 1963년도에 기계기술연구소(당시 기계시험소)에서 연구를 시

작하여, 1964년도에 생산공정에 도입과 함께 마찰압접간담회(후에 마찰압접 연구회로 개칭)가 설립되었다.

선진국에서의 마찰압접에 대한 응용확대와 함께 국내에서도 마찰압접의 중요성이 증대되어 1970년대에서 부터 자동차부품, 일반산업기계부품, 전기기계부품 등 생산에 관련기술이 이용되고 있다. 철강재 혹은 동종재의 축류 혹은 파이프류의 마찰압접에 국한하여 관련기술이 대부분 이용되고 있는 실정으로, 이종재의 접합에 관한 기술축적은 미비한 실정이다. 특히 이종재의 경우 두 소재의 고온특성이 판이하게 다를 수 있으며, 각 소재의 최적특성을 발현시키기 위해서는 적절한 전후공정 설계가 필요한 데, 이에 대한 기술개발은 매우 미흡한 실정이다.

## 2. 마찰압접 방법

마찰압접방법은 크게 나누어 브레이크법(연속 구동법 혹은 제동법)과 플라이휠법(inertia법)이 주종을 이루고 있다. Fig. 1에 브레이크법 공정을 나타내었는데, 브레이크법은 한쪽 소재를 고정시키고 다른편 소재를 동일축 상에서 회전시키며 가압하여 마찰시키는 방법으로 마찰부의 가열상

태가 적당할 때 브레이크로 급히 회전축에 제동을 걸어 정지시키고 업세트 압력을 가해 접합을 마무리하는 방법으로 이때 가하는 업세트 압력은 마찰압력에 비해 일반적으로 높게 설정한다. 이상의 과정을 시간에 따라 도식적으로 표시하면 Fig. 2(a)와 같다. 공정변수로는 회전속도, 마찰압력, 업세트압력 혹은 마찰시간 등이 있다.

플라이휠법은 모터를 이용하여 접합시키고자 하는 한쪽 소재가 연결된 플라이휠에 회전에너지 축적시키고, 동일축상의 상대편 소재에 마찰추력을 가함으로써 플라이휠에 축적된 기계에너지를 마찰에너지로 바꾸며 접합시키는 방법이다. 플라이휠법 공정사이클을 Fig2(b)에 나타내었는데, 압접조건인자는 회전축의 초기회전속도, 관성

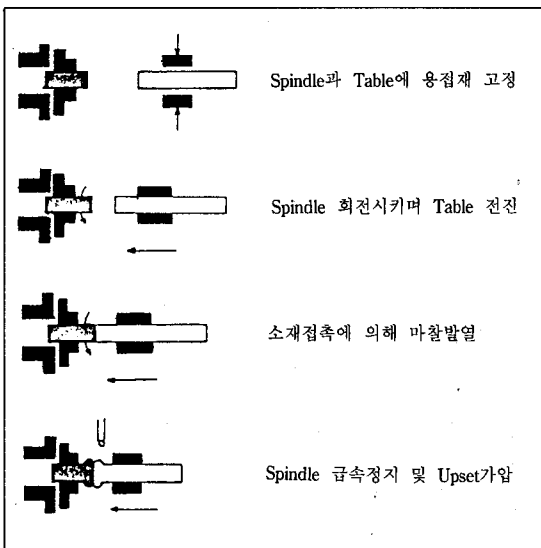


Fig. 1. Schematic diagram of friction welding procedure by the brake-type method.

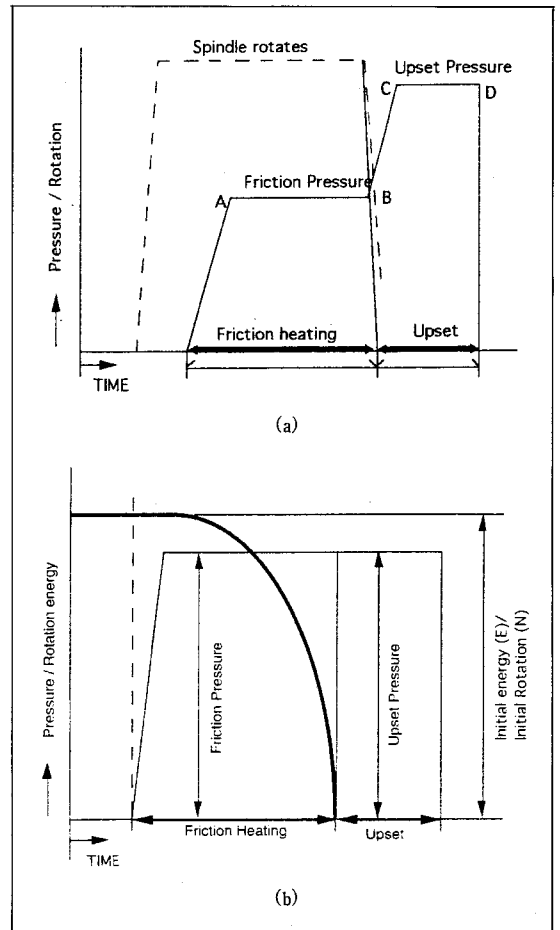


Fig. 2. Friction welding cycles : (a) Brake type, (b) Flywheel type

모멘트 혹은 마찰압력이다. 플라이휠법에서 압접에 소비되는 에너지는 다음 식에 의해서 결정된다.

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{1800} I n^2 [\text{kgf} \cdot \text{m}]$$

여기에서 I : 회전축축의 관성모멘트[ $\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ ]  
 n : 회전축축의 초기회전속도[rpm]  
 $\omega$  : 회전축의 각속도(=  $2\pi n/60$ )[rad/s]

마찰압접시 청정표면을 유지하며 그들 사이에 강한 결합을 형성하는 것이 바람직하다. 실제로 마찰재 표면에는 오염물질, 표면산화물과 흡착막이 존재할 수 있고 결합형성을 방해할 수 있지만, 표면부의 상대마찰시 부서지고 접합부로부터 외부로 배출된다. 가열된 마찰부위의 소성변형에 의해 외부오염물의 파괴 및 제거는 이루어지고, 축방향 하중에 의해 burr를 형성하며 외부로 밀려나게 된다. Fig. 3에 전형적인 burr 형태를 보여주는 데, 고온강도가 낮은 소재의 burr가 상대적으로 크게 형성된다.

마찰압접시 접합효율과 압접부의 특성은 압접시의 소재온도와 부과응력 이력에 의해 결정되는데, 공정중 마찰시간, 가열시의 축방향·부과하중, 마찰표면의 상대속도 등에 따라 결정된다. 이들 변수가 주어진 금속쌍의 용접시 열발생밀도(heat power)를 대부분 결정한다. 접합부의 특성은 용접부 선단의 소성 변형량에 따라라도 변화하는데, 이 변형은 업세트라는 축방향변형에 의해 조절될 수 있다. 기타 여러가지 변수의 영향은 비교적

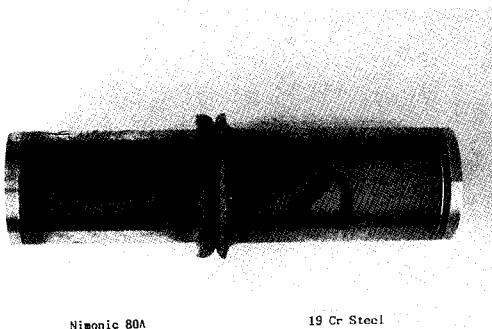


Fig. 3. Friction welded parts showing the burr formed during welding. (Nimonic 80A-19Cr steel, Dia.=42 mm)

적고 무작위적 특성을 가지고 있다. 이들 부가적인 변수로는 마모면의 청정도 및 마무리정도, 열확산에 영향을 미치는 접합재 및 접합부형상, 마찰압접이 이루어지는 매체 등이 있다.

Fig. 4는 브레이크법에서 열영향부 형상에 미치는 마찰압력과 회전속도의 영향을 도식적으로 나타낸 것으로, 마찰압력이 상대적으로 낮으면 열영향부는 거의 평행한 양상을 나타내고 그 두께는 회전속도가 낮을 수록 상대적으로 줄어드는 것을 알 수 있다[1]. 저회전속도 및 고마찰압력 하에서는 축방향으로의 온도구배가 커지게 되는데, 이는 마찰접합속도 혹은 열원(마찰면)의 이동속도가 상대적으로 커지기 때문이다[6]. Fig. 5는 플라이휠법에서 얻은 열영향부의 형상을 모식적으로 나타낸 것이다. 플라이휠이 갖는 초기에너지의 크기는 열영향부의 형상에 거의 영향을 미치지 않으나, 마찰압력과 회전속도는 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 마찰압접하는 양단의 시험편이 동일할 경우로 마찰면을 중심으로 대칭구조를

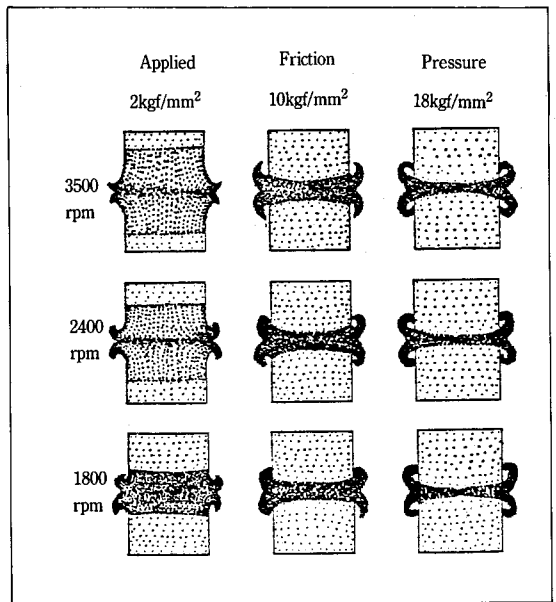


Fig. 4. Variation of the heat affected zone with rotation speed and applied pressure in the fixed pressure brake method.(S25C, Specimen dia.=18mm, Friction distance =5.5mm)

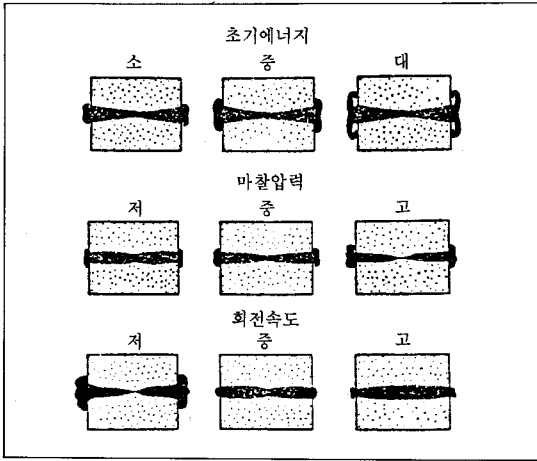


Fig. 5. Variation of the heat affected zone with initial energy, friction pressure and rotation speed in the flywheel method.

갖는다. 압접되는 소재 형상이 다를 경우에는 마찰면이 도달하는 온도는 같지만 열전달 양상이 달라지기 때문에 온도구배는 비대칭적으로 된다. 그 결과, 저회전속도로 장시간 마찰압접하는 경우에 외부에 형성되는 대부분의 burr는 소직경측에서 형성된다. 이종재간의 마찰압접의 경우에도 유사하게 양쪽 소재간의 물성치차이에 의해서 온도분포는 비대칭적으로 된다.

압접공정이 업세트 압력보다 시간에 의해 관리된다면 불완전용접이 일어나기 쉽다. 마찰면 상태를 잘 관리할 수 없는 경우 공정관리를 업세트에 의해서 하는 것이 좋다. 특히 마찰부가 오염되었거나 표면상태가 좋지 않을 경우에는 시간보다는 업세트를 관리하여야 한다. 업세트로 공정관리할 경우 다량의 burr가 형성되거나, 선단부의 축정렬이 제대로 안될 경우 압접면이 비스듬하게 형성되거나, 표면결합이 형성되는 등 문제가 있을 수 있다.

마찰부에 형성된 녹은 공정 및 용접부의 품질에 거의 영향을 미치지 않고, 마찰표면에 있는 스케일이 오히려 해롭다. 이들 시편의 경우에는 초기 가열이 불안정하기 때문에 일상적인 작업조건에 비하여 높은 축방향 압력을 요하고, 스케일이 제거되는 순간에 가열공정은 급격히 진행되며 소성변형이 급격하게 일어나 궁극적으로 용접부

성질을 저하시킨다. 따라서 마찰부는 평편하여야 하고 오염물질이 없으며 기름 등 스케일이 묻지 않도록 유의하여야 한다.

### 3. 마찰압접 현상

마찰압접은 외견상 공정이 비교적 단순하지만 여러가지 복잡한 현상을 수반한다. 즉, 마찰가열 및 압축에 따른 소성변형, 재결정, 냉간가공 등과, 금속의 상호 확산과 넓은 범위의 재료유동, 마찰면에서 반복적으로 일어나는 접합부 형성과 파괴 등의 현상이 수반된다. 압접 초기에 마찰면상의 불균일 발열 때문에 마찰면을 따라 불균일온도 분포를 나타낼 수 있으나, 가열이 진행됨에 따라 열전달과 재배치에 의해 마찰면의 온도는 점차 균일해 진다[2]. 가열부에서의 소성변형은 표면산화막의 파괴 및 제거와 중앙유착을 유발하고 단면에서 온도균일화를 촉진한다. 또한 상대속도와 축방향 하중은 발열정도를 결정하는 중요한 공정변수로 작용한다. 마찰압접 조건이 적절하지 않을 때에는 접합불량에 따른 강도저하가 예상되는 데 그 원인을 들면 다음과 같다.

- 표면산화막의 불완전한 파괴 및 배출
- 불충분한 소성변형시 형성되는 용접부표면에서의 불균일 온도분포
- 금속의 과열현상
- 접합부와 열영향부에서의 결정립조대화

마찰압접시 접합불량을 방지하기 위해서는 다음 사항에 유의하여야 한다.

- 압접조건은 브레이크법의 경우에는 Table 1을, 플라이휠법의 경우에는 Table 2를 참고로 하여 최적조건을 결정한다. Table 1은 직경 50mm의 여러 종류의 합금강에 대해서 브레이크법에 의해 마찰압접할 경우에 적절한 압접조건을 제시하고 있다. 그러나 접합부의 상태를 최종적으로 점검하기 위해서는 인장시험, 굴곡시험, 충격시험 등의 기계적 특성검사를 통하여 확정한다.

- 마찰압접시 부과하는 축방향 응력은 마찰압력과 업세트압력의 2단계로 나누어 가해지는 데 적절한 조건을 선정하는 것이 중요하다.

2단계 압접방법은 작업시간이 증가되고 열영향부의 폭이 증대될 수 있으나, 적은 에너지를 사용하여 발열시키고 업세트시 고온노출부위를 burr 형태로 밀어내게 된다. 실제적으로

마찰압력  $P_1$ 과 업세트압력  $P_2$ 사이에는 대략  $P_2=(1\sim3) P_1$ 의 관계가 성립된다. 직경이 작아질 수록 마찰압접  $P_1$ 을 업세트압력  $P_2$ 에 유사하게 하고 마찰시간을 단축하는 것이

Table 1. Typical friction welding parameters for the brake method.

소재	직경 (mm)	마찰압력 (kgf/mm <sup>2</sup> )	업세트 압력 (kgf/mm <sup>2</sup> )	마찰 시간 (s)	업세트 시간 (s)	회전 속도 (rpm)	업세트 길이 (mm)	비고
S35C-S35C	19	4	8	6	4	1800	4	열간압연재
〃	50	4	8	30	8	1200	5	
S45C-S45C	10	4	8	2	2	2750	5	
〃	20	4	8	7	4	1800	5	
〃	40	4	8	22	6	1800	5	
SCM3-SCM3	18	4	12	6	4	1800	5	
SCM3-S45C	16	4	12	5	4	1800	5	
SUS27-SUS27	8	4	12	1	2	2750	3	
SUS27-S30C	16	8	20	4	4	2500	7	
SCM4-21-12	32	8	20	22	6	1800	7	
Stellite-Stellite	7.5	8	16	13	3	2750	4	
SKH9-S55C	12	4	20	15	3	2500	8	
SKH3-S55C	22	6	20	25	10	1800	11	
SS41-BsBF	7-11.5	4	10	3	3	2500	5	
SUS27-SS41	15-20	6	19	6.5	5	1800	6.5	
SUS22-SUS22	52-32	6	20	35	7	1800	6.2	
STKM55-STKM38	외경 40	2	8	9	3	1800	6	
	내경 31							
봉 강-Pipe SS41 STKM38	SS41 28	2	6	1.1	3	2250	1.5	
	외경 28							
봉 강-Pipe SUS27 SUS27	내경 18	6	14	3.5	3	1800	5	
	강관 3.2							
봉 강-Pipe SPC1 STKM38	외경 34	2	5	9	5	1500	6	
	내경 28							
봉 강-Pipe SPC1 SS41	강관 4.5	2	5	3	3	1500	2	
	외경 42							
봉 강-Pipe SPC1 SS41	내경 25	2	5	3	3	1500	2	
	강관 3.2							
봉 강-Pipe SPC1 SS41	외경 46	2	5	3	3	1500	2	
	내경 22							

\*재료표기는 JIS 규격임.

Table 2. Typical friction welding parameters for the flywheel method.

소재	직경 (mm)	마찰압력 (kgf/mm <sup>2</sup> )	초기 에너지 (kgf/mm <sup>2</sup> )	마찰 시간 (s)	회전 속도 (rpm)	업셋 길이 (mm)	비고	
S45C-S45C	20	7	1570	1.6	1700	2.0	다른 직경	
S45C-S45C	40	7	6280	6.5	1800	3.0		
S55C-SKH9	12	30	1020	3.5	1700	10.0		
S55C-SKH9	22	30	3420	4.0	2400	10.0		
S55C-SKH2	40	25	10050	12.0	1800	8.5		
S45C-SCM3	25	10	2940	3.2	2400	2.0		
SCM21(침탄소입)-S45C	19	10	1700	4.0	2400	6.0		
SNC2-S33C	19	12	2270	1.6	1700	4.5		
S45C-SUS27	25	10	3430	4.5	2400	2.0		
SUS27-Hastelloy C	15	25	2820	8.4	2400	8.5		
SUH33-S20C	32-50	20	7240	9.8	1800	3.0		
봉 강-Pipe S 55C STKS 1	S55C 외경	35	10	2600	2.0	2400		2.0
	내경	35						
동 판-Pipe SS 41P S 55C	강판	5	10	7550	2.5	1800		2.0
	외경	50						
	내경	30						
동 판-Pipe SPC 1 SS 41	강판	23	5	5640	3.0	1800	2.0	
	외경	103						
Pipe - Pipe STKS1 STKS1	내경	97	10	1950	2.0	1800	2.5	
	외경	35						
CuB2-CuB2	30	15	3670	0.5	2400	5.0		
AIB1-CuB2	20	20	600	1.3	1700	9.0		
AIB3-SUS27	50	6	3730	1.6	1800	10.0		
동 봉 - 동 판 CuB2 CuP2	동봉	19	15	1470	1.4	1700	7.0	
	동판	10						
동 봉 - 황동 판 CuB2 BsP3	동봉	19	15	1640	1.2	1700	7.0	
	황동판	10						

\* 재료표기는 JIS 규격임.

좋다. 이러한 방법은 열영향부의 폭을 좁게 하거나 생산성을 향상시키기 위한 경우에도 이용된다. 단 업셋압력을 너무 높게 하면 용접부 금속이 대부분 burr로 밀리고 저온도 부위가 상호 접합하는 양상이 되어 궁극적으로 강도가 저하될 수 있으므로 주의하여야 한다. 압접면에 가해지는 압력은 용접단면적과는 거의 무관하게 결정되는 것으로 알려져 있으나, 실제 작업시 단면의 증가할수록 그 크기를 크게 조정할 필요가 있다[3].

-압접재간의 상대 회전속도는 공정변수로서 기계적 성질에 미치는 영향이 상대적으로 적다. 과열에 민감한 소재의 경우에는 특히 용접공정의 심화와 용접부의 품질제고를 위해서 상대적으로 낮은 회전속도를 유지하는 것이 좋다.

마찰압접시 마찰면이 도달하는 상한온도는 소재의 용점에 의해서, 이종재의 마찰압접의 경우에는 저용점소재의 용점에 의해 결정된다. 브레이크법에서 탄소강과 니켈합금의 마찰압접시 도달하는 온도는 약 1000~1400°C 정도이다[3, 4, 5]. 한편 이종재의 마찰압접의 경우에 회전속도가 커질수록 마찰면의 최고 도달온도는 대체로 높아지는 경향을 나타낸다.

#### 4. 마찰압접부의 기계적 성질

마찰압접은 그 특성상 압접부위에 용융에 의한 응고조직이 형성되지 않는다. 따라서 아크용접에서와 같이 슬래그, 기공의 발생, 응고시 형성되는 수축공 등이 없다. 반대로 용가제를 이용하여 용접금속부의 기계적 성질을 향상시킬 수 있는 방법이 없다. 또한 이종금속간에 접합할 경우에 취약한 합금층생성을 방지할 수 있어 이종금속간의 접합에도 유효하다. 또한 구조상 접합면과 인접한 소성변형을 받는 부분에 와류양상의 집합조직을 생성하기 때문에 비금속재물을 다량함유하는 불량재질을 접합할 경우에 연성 혹은 인성이 저하될 위험성이 높다.

완전한 마찰압접부를 만들기 위해서는 접합면을

청정하게 하고 적절한 온도조건으로 마찰가열하며 접합면 전면을 밀착하지 않으면 안된다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 다음의 두가지를 고려하여야 한다. 첫번째로는 마찰과정(회전운동이 계속되는 과정)에 있는 소재면의 청정화와 가열을 행하고 회전정지후의 업셋과정에서 마찰전면의 밀착을 피한다. 또 다른 방법으로는 마찰과정의 역할은 동일하나 회전정지와 동시에 압접을 완성한다. 전자는 브레이크법에 의한 2단계 가압식의 경우이고 후자는 플라이휠법 혹은 정가압방식의 브레이크법에 해당한다.

마찰압접 조건이 부적절할 경우에는 압접면 혹은 열영향부에 여러가지 결함이 발생할 수 있다. 우선 마찰압력 혹은 마찰시간이 불충분하여 소재가 충분히 가열되지 않았을 경우에는 육안으로 확인할 수 있을 정도의 마크로균열이 내부에 형성될 수 있다. 이 마크로균열은 대개 외부쪽 보다는 온도가 상대적으로 낮고 burr의 형태로 외부로 배출되기 어려운 내부쪽에 존재하기 때문에 시험편전체에 대한 특성시험 혹은 단면에 대한 조직시험을 통하지 않고 발견하기 어렵다[3].

압접부가 완전하게 이루어졌을 경우에도 압접부의 기계적 성질은 재료별로 달라지게 된다. 그 한 예로써 브레이크법을 사용하여 마찰압접시켰을 때 얻은 압접부 주변의 경도변화를 Fig. 6에 나타내었다[7]. 여기에서 압접부 원편은 19%

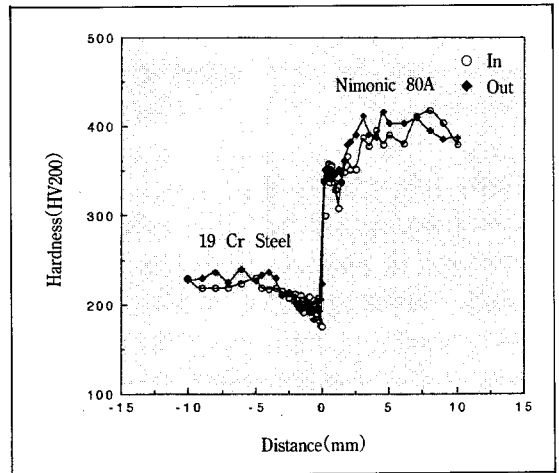


Fig. 6. Variation of microhardness near weld joint. (Nimonic 80A-19Cr steel, Dia.=42mm)

Cr-9.5% Ni을 기초로 한 내열강이고 오른편은 Ni-monic 80A 합금이다. 주어진 마찰압접 이력에 있어서 오스테나이트 기지의 양 소재는 각기 다른 양상을 나타내고 있다. 즉 내열강쪽은 압접부로부터 떨어질수록 소성변형에 의한 전위집적 및 불완전 재결정에 의해 경도는 증가하나 시편두께에 따라 2~5mm 떨어진 부위부터는 내부기지로 갈수록 다소 떨어지는 양상을 나타낸다. 그러나 Nimonic 80A 쪽은 고온노출에 따른 강화상  $\gamma$ 의 용해와 재결정립의 성장으로 인해 압접부에 인접한 부위에서 급격하게 경도가 저하하며 압접부에서 떨어질수록 다시 원래 경도로 환원되는 양상을 나타낸다.

### 5. 마찰압접의 적용

마찰압접의 적용은 일반 자동차 부품, 선박용 부품, 산업용 기계부품, 유압부품, 전기관련부품, 항공우주부품에 이르기까지 광범위하게 이용되고 있으며, 철강재료는 물론이고 동합금, 티타늄합금, 니켈합금, 알루미늄합금 등 거의 모든 금속소재에 대해 적용할 수 있다. 열 및 물리적 특성이 전혀 다른 이종금속 간에도 어려움이 있으나 금속에 따라서 관련기술을 적용할 수 있다. 마찰압접을 공정중에 도입하여 재료비 혹은 가공비의 절감에는 많은데, 자동차용 크랭크샤프트의 경우 전체길이를 단조 후 기계가공을 수행하는 공정 대신에 머리부분을 단조한 후 샤프트를 마찰압접하여 약 25%의 원가절감 효과가 있어 현재는 대부분 이 방법을 표준공정으로 이용하고 있다[1].

동일한 직경의 동일소재간에는 용접부 양단의 열이력이나 소성변형이 동일하게 일어나며 별문제없이 접합될 수 있기 때문에 그 응용에는 전혀 문제가 없으나, 이종소재 간에는 각기 열용량, 열전도율, 온도별 경도 혹은 항복강도가 다르기 때문에 접합부를 기점으로 양단간에 소성변형이 다르게 일어날 수 있고 이에따라 그 응용에 제한받는다. 한쪽 시편의 소성변형이 불충분하게 일어나면 표면산화막의 파괴와 외부로의 유출이 불완전하게 되기 때문에 궁극적으로 기계적 성

질이 저하된다. 이종재 간에 합금을 접합시킬 경우에는 이러한 점을 감안하여 저강도 부위를 고강도 부위에 비하여 단면을 증가시키거나 고강도 부위를 추가로 가열하기도 한다.

마찰압접에 의해서 잘 접합된 금속재에는 미세결정립이 생성되고 내부응력이 일부만 제거된 상태로 되어 용접부의 기계적 성질은 상대적으로 올라가게 된다. 이와같이 마찰압접 계면에서의 우수한 기계적 특성으로 말미암아 현재 고온구조재로서 고온강도와 피로강도를 요하는 항공기 엔진용 샤프트와 디스크의 용접 등에 광범위하게 이용되고 있다.

최근에 마찰압접기술을 석출경화형 알루미늄합금인 Al-Ce, Al-Fe-Mo-V, Al-Fe-V-Si, SiC 강화 알루미늄 복합재료, 분산강화형 철합금 등에 적용하여 기존 화염용접법으로 얻을 수 없는 우수한 접합특성을 얻을 수 있었다[8, 9]. 또한 드라이브 샤프트 개발목적으로 10 vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 강화 6061-T6 합금을 6061-T6 합금과 마찰압접시켜 용접상태에서 접합효율 80% 이상을 얻을 수 있음이 보고되었다.

### 참 고 문 헌

- [1] 마찰압접, 마찰압접연구회, 1979.
- [2] V. I. Vill, Friction welding of Metals(Translated version), American welding Society, Inc., New York, 1962.
- [3] 박노광 외, 미발표 자료.
- [4] 蓮井, 福島, 衣川, 금속재료기술연구소 연구보고, 11-2, 1968, 203.
- [5] I. F. Squires, British Welding J., 13-11, 1966, 652.
- [6] 大橋, 立山: Toyota기술, 15-4, 1964, 340.
- [7] 박노광, 구윤근, 신영우, 제8회 재료강도 심포지움, 1994, 101.
- [8] W. A. Baeslack III and F. H. Froes, JOM, 1995, 13.
- [9] Y. Nakao, Private Communication.