

研究論文

Inconel 713C와 SCM 440의 마찰용접

조 현 수* · 서 성 재*

Friction Welding of Inconel 713C and SCM 440

H. Cho* and S. Suh*

Key Words: Friction Welding(마찰용접), Continuous Drive Friction Welding Machine(연속 구동 방식 마찰용접기), Turbine Wheel and Shaft(터빈 휠과 축), Inconel 713C(니켈기 내열합금), SCM 440(크롬-몰리브덴 합금강), Heat Affected Zone(열영향부)

Abstract

Friction welding technique was studied to weld the turbine wheel and shaft of a turbocharger. The welding parameters were selected to investigate the effects of variables on welding quality of Inconel 713C and SCM 440. Experimental results showed that the turbine wheel and shaft could be successfully welded by friction welding. The heat affected zone was identified to be 2 mm from the weld seam. After welding, the hardness profile was found to have sudden increase and decrease for Inconel 713C and SCM 440 respectively. Tensile strength of welded specimens was higher than the required strength for all of the studied welding parameters. The central portion of fracture surfaces by bending had no defects such as crack.

1. 서 론

마찰용접은 두 개의 부재를 접촉시키고 접촉면에 상대 회전 운동과 압력을 가하여 접합하는 작업을 말한다. 거시적으로 두 접합 재료의 용융이 관찰되지 않으므로 보통 고상용접으로 분류하며, 접합 강도가 매우 우수하여 모재 강도의 100% 까지

얻을 수 있고 다양한 종류의 금속 또는 비금속의 접합이 가능하다. 특히 이종 금속간 접합이 가능한 것이 많으며 비용이 매우 저렴하고 접합 조건의 재연성으로 인해 품질 신뢰도가 높다^{1,2)}. 현재 국내에서는 건설 차량의 구동축, 굴착용 파이프, 공구 등의 일부 부품에 마찰용접을 적용하여 제품을 생산하고 있으나, 소형 제품이 많고 구조용 탄소강이나 합금강에 적용한 것이 대부분이다. 뿐만

* 1997년 6월 7일 접수

* 정회원, 쌍용중공업 엔진기술연구소

아니라 용접 조건과 품질 평가 기준에 대한 자료가 체계적으로 정리되어 있지 못한 실정이다. 본 연구는 박용 또는 발전용 디젤 엔진에 부착되는 과급기 (turbocharger) 의 터빈 휠 (turbine wheel) 과 축을 마찰용접하기 위하여 계획되었다. 터빈 휠 재료는 Inconel 713C를 사용하고 있으며, 축 재료는 SCM 440을 사용하고 있다. 일부 제품과 다수의 시험편을 사용하여 마찰용접 조건을 구하였으며, 이와 동시에 인장강도, 굽힘 파단 시험, 경도 등의 기계적 성질을 평가하여 제품 신뢰성 확보 측면에서 품질 관리 방법을 확립하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 용접 시험편

용접한 제품의 개략적인 치수와 모양은 Fig. 1과 같다. 이것은 중형 디젤 엔진의 국산 과급기 로터 (rotor)로서 현재까지 적용된 마찰용접 제품들의 직경과 비교해보면 상당히 큰 편에 속한다. 제품 몇 개와 다수의 시험편을 사용한 용접 결과를 서로 비교하였는데 시험편 용접 조건을 제품 용접에 그대로 사용할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 이에 따라 여기서는 Fig. 2에 나타난 시험편을 사용한 용접 결과를 중심으로 용접 과정을 논의한다. Fig. 2의 (a)는 Inconel 713C 용접 시험편이고, (b)는 SCM 440 용접 시험편이다. SCM 440은 용접 전에 열처리 (quenching and tempering)를 실시하며 용접 중에 재료가 쉽게 밖으로 밀려날 수 있도록 Fig. 2의 (b)와 같이 환봉 끝단을 경사지게 가공한다.

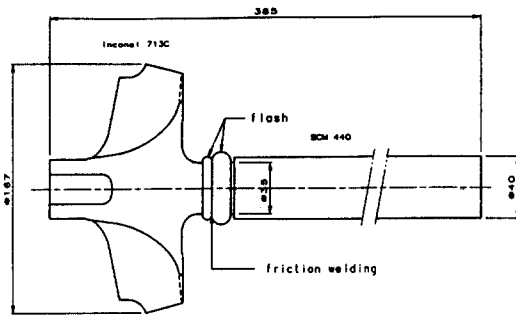


Fig. 1 Welded turbine rotor

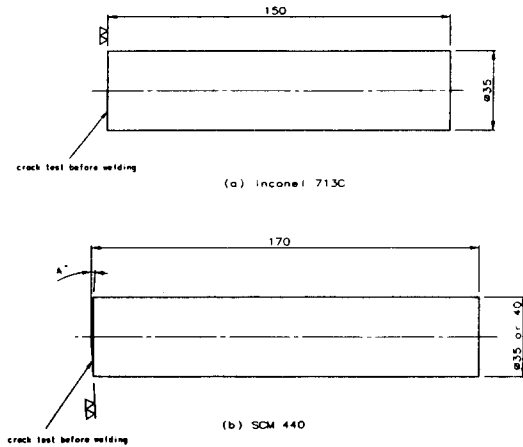


Fig. 2 Specimens to be welded

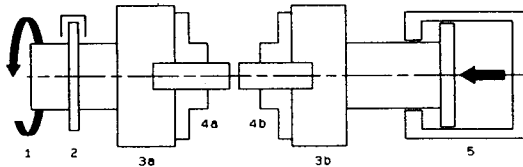
Inconel 713C는 니켈기 (Ni-base) 내열합금 가운데 대표적인 초합금 (superalloy) 의 하나로 고온에서 높은 강도를 유지하고 우수한 내식성과 내산화성을 나타낸다. 온도에 따라 강도가 감소하는 일반 금속 재료의 성질과 달리 Inconel 713C는 약 800 ℃ 까지 강도가 증가하는 현상 (temperature strengthening) 을 보여주는데 이는 γ' 석출물 (Ni₃Al) 의 온도에 따른 슬립계 (slip system) 변화에 기인한다³⁾. SCM 440은 크롬-몰리브덴 합금강 (Cr-Mo alloy steel) 으로 대략 480 ℃ 이상에서 인장강도와 항복점이 급격히 떨어지는 특성을 갖고 있다. Inconel 713C와 SCM 440의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. Inconel 713C는 고온 항복점이 SCM 440에 비해 매우 크기 때문에 고온 변형 저항이 크다.

Table 1. Mechanical properties of Inconel 713C and SCM 440

	Inconel 713C	SCM 440	Remark
Yield strength	≥ 658 MPa	≥ 835 MPa	20 ℃
	≥ 735 MPa	≤ 250 MPa	700 ℃
Tensile strength	≥ 740 MPa	≥ 980 MPa	20 ℃
Elongation	≥ 3%	≥ 12%	20 ℃

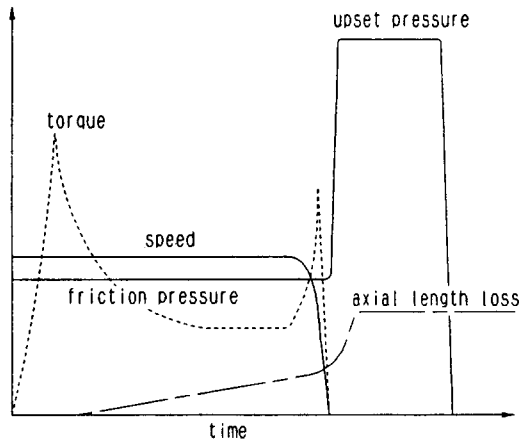
2.2 용접 과정 및 용접 조건

시험에는 연속 구동 방식 마찰용접기 (continuous drive friction welding machine)인 일본 NITTO SEIKI 사의 FF-80 II-C 모델을 사용하였다. 용접 공정은 Fig. 3과 같이 마찰 단계 (friction phase)와 업셋 단계 (upset phase)의 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 먼저 마찰 단계에서는 일정 압력 하에서 마찰계면 (faying surface)에 회전으로 인한 미



A schematic diagram illustrating design and arrangement of a continuous drive friction welding machine:

- 1 - spindle drive
- 2 - brake
- 3a - clamping device, rotating
- 3b - clamping device, non-rotating
- 4a - component part, rotating
- 4b - component part, non-rotating
- 5 - hydraulic cylinder



continuous drive friction welding : process parameter data, real time dependent.

Fig 3. continuous drive friction welding and process parameters⁴⁾

끄럼 운동을 발생시킨다. 이때 발생하는 마찰열에 의해 재료는 국부적으로 연성이 상당히 증가하고 가압력에 의해 밀려나 점차 부재의 길이가 짧아진다. 마찰 단계 후 업셋 단계에서는 매우 짧은 시간 동안 미끄럼 운동을 정지시키면서 가압력을 크게 증가시킨다. 이 때도 부재의 길이가 짧아지는데 가압 정지 후에 약간의 스프링 백 (spring back)이 발생한다. 마찰용접 과정 자체는 입력과 출력 사이의 구체적인 양적 대응 관계를 수학적으로 기술하기 어려운 미지 함수로 볼 수 있다. 미지 함수인 마찰용접 과정은 용접기 변수로서 간접적으로 표현되며, 입력은 용접 부재의 종류와 형상으로 출력은 용접 제품의 품질로서 접합 강도와 용접부 결함으로 각각 나타낼 수 있다.

용접을 완료하면 곧바로 플래시를 제거하고 공기중에서 냉각시켜 시험편 중 일부는 응력 제거 열처리 (stress relief annealing)를 한 후 Fig. 4와 같이 가공하여 인장강도와 경도를 측정하였다. 열처리

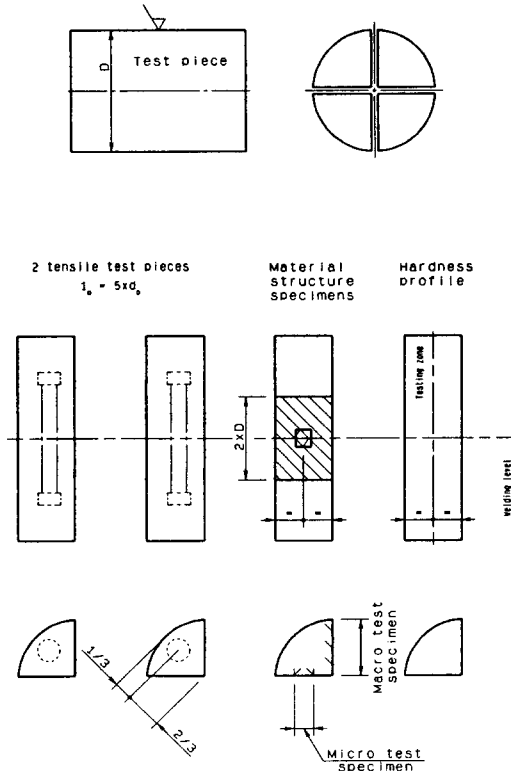


Fig 4 Specimens for inspection⁵⁾

하지 않은 시험편은 굽힘 파단 시험을 실시하였다. 인장강도와 경도는 접합 본연의 목적 달성 여부 즉 접합 강도를 평가하고, 굽힘 파단면 관찰은 용접 결함을 평가한다. 인장 시험과 굽힘 파단 시험에는 ZWICK 1494 만능 시험기를 사용하였다. 마이크로 비커스 경도(micro Vickers hardness) 측정에는 MATSUZAWA SEIKI DMH-1 경도 시험기를 사용하였고, 브리넬 경도(Brinell hardness) 측정에는 AMSLER DIA-TESTER 3-B 경도 시험기를 사용하였다.

선정해야 하는 용접 조건은 넓게 보아 접합부 모양, 마찰계면 오염 등을 포함하고 있으나 여기서는 시험편 직경, 마찰압력, 업셋압력, 마찰 단계에서 줄어드는 길이와 같은 마찰용접기 조작 변수에 한정하였다. Table 2에 용접 조건을 나타내었다. 주축 회전수는 1340 rpm으로 여섯가지 시험 조건 모두 동일하다. 4번과 6번 시험 조건에서 SCM 440 직경이 Inconel 713C 직경 보다 5 mm 더 큰 것은 SCM 440의 마찰계면 부근의 변형 저항을 증가시키기 위한 것이었다. 마찰압력은 4.51 MPa로 서로 같게 하고, 주로 업셋압력과 마찰 단계에서의 길이 소모량(axial length loss or burn-off length)을 바꿔 시험하였다.

용접 전 각 부재의 길이를 일정하게 가공하였을 경우 회전속도, 마찰압력, 업셋압력, 전체 길이 소모량이 일정하면 용접 조건으로서 대표성이 있다고 할 수 있다. 왜냐하면 상기 네 가지 값이 일정할 때 마찰 단계에서의 길이 소모량을 줄이면 전체 길이 소모량도 같이 줄고, 반대로 마찰 단계 길

이 소모량을 늘이면 전체 길이 소모량도 같이 늘기 때문이다.

3. 용접 결과 및 고찰

용접한 시험편에는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 압착에 의해 재료가 밀려나 플래시(flash)가 생긴다. 용접 중과 직후의 플래시를 관찰해 보면 Inconel 713C 쪽이 SCM 440 보다 훨씬 밝다. 용접을 완료한 후 플래시의 크기를 비교하여 보면 SCM 440 쪽이 Inconel 713C 쪽 보다 훨씬 크다. 이와 같은 플래시의 밝기와 크기의 차이는 Table 2의 모든 용접 조건에 대하여 동일한 양상으로 나타나는데 Inconel 713C가 SCM 440에 비하여 매우 큰 고온 강도를 갖는다는 사실로 설명될 수 있다. 즉 고온에서 소성 변형에 대한 저항이 Inconel 713C 쪽이 SCM 440 보다 크기 때문에 Inconel 713C 쪽 플래시 생성량이 작고, 따라서 열전달 계수가 유사할 경우^{6,7)} 마찰열의 소산(dissipation)이 Inconel 713C 쪽이 보다 작게되므로 플래시의 온도 또한 높아 밝게 보인다. 그리고 Inconel 713C 쪽 플래시에는 축방향 균열이 관찰되는데 이 균열은 마찰 단계에서는 나타나지 않고 가압력이 짧은 시간 동안 급격히 증가하는 업셋 단계에서 만들어졌다. 이것은 평단조에서 원주형 시험편을 고압하에서 큰 변형을 속도로 업셋팅(upsetting)할 때 생기는 압축방향 균열과 동일한 기구에 의해 만들어지는 것으로 생각된다.

인장 시험은 용접 전후의 Inconel 713C 성질 변화와 접합 강도를 평가하기 위한 것이다. 접합부의 강도는 Inconel 713C의 인장강도가 기준이 된

Table 2. Welding conditions

No.	Diameter (mm)		Friction pressure (MPa)	Upset pressure (MPa)	Burn-off length (mm)
	Inconel 713C	SCM 440			
1	35	35	4.51	14.12	12.0
2	35	35	4.51	14.82	14.9
3	35	35	4.51	14.02	22.5
4	35	40	4.51	14.02	22.5
5	35	35	4.51	16.17	22.5
6	35	40	4.51	16.17	22.5

Table 3. Tensile strength of welded specimens

No.	Tensile strength (MPa)	Fracture position	Remark
1	869	Inconel 713C	
2	-	-	product
3	791	weld seam	
4	898	Inconel 713C	
5	846	Inconel 713C	
6	872	Inconel 713C	

다. 그 이유는 Inconel 713C 인장강도가 SCM 440 인장강도 보다 작기 때문이다. Table 3에 인장강도 측정값을 나타내었다. 대부분 모재 인장강도 740 MPa 보다 크고 Inconel 713C 쪽에서 파단되어 만족스러운 결과를 얻었다. 그러나 3번 인장 시험의 경우는 인장강도가 791 MPa로 모재 인장강도 보다 크지만 용접선에서 파단되었다. 이 경우 파단면을 관찰해보면 거의 단면 전체가 매끈하게 보인다. 이 부분은 전 용접면 가운데 물질 전달(material transfer)이 불충분하거나 거의 없는 부분으로서 용접 전의 표면 상태에 가까우며, 준용접부 또는 유사 용접부(pseudo-welded or quasi non-welded portion)라 부르고 용접 결합으로 본다⁹⁾.

굽힘 파단 시험은 응력 제거 열처리를 하지 않은 시험편을 환봉 상태로 양단 지지하고 용접선에 굽힘 하중을 가하여 부러뜨려 얻는다. 파단면을 육안으로 관찰하여 용접 품질을 평가하기 때문에 판정하는 것 자체가 문제로 된다. 따라서 표준 시험편을 만들어 비교하는 것이 바람직하다. 이 굽힘 파단면 검사는 앞서 언급한 유사 용접부의 존재 유무를 확인하여 장기간에 걸친 실제 운전에서 나타날 수 있는 용접부 결합에 의한 파손을 방지하는데 목적이 있다. 유사 용접부는 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 원호 모양의 무늬가 보이고, 표면이 매끄러워 주변 보다 밝게 보인다. 또 유사 용접부는 단면 가장자리 쪽으로만 나타나는데 Fig. 5에서 처럼 중심부 쪽으로 점차 넓어진다. 따라서 Table 2에 나타낸 용접 조건에 대하여 유사 용접부가 최종 제품에 포함되지 않도록 하기 위해서는 가공 여유를 고려하여 용접 부재의 치수를 결정해야 한다. 허용할 수 있는 유사 용접부 면적을 50%로 하면 용접 부재의 직경은 최종 제품의 1.4배 이상으로 된다. 많은 시

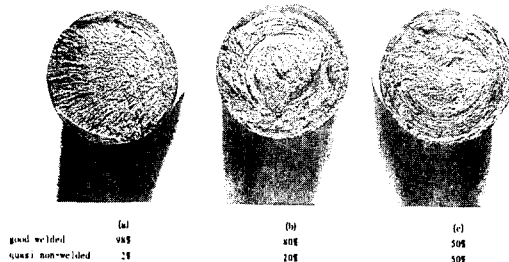


Fig 5. Many fracture surfaces have the quasi non-welded portion from 20% to 50%.

험편의 파단면에서 유사 용접부가 Fig. 5의 (b)와 (c)의 중간 정도, 즉 파단면 전체 단면적에 대하여 20%~50% 정도로 나타났다. 그리고 시험편 외경을 가공한 후 P. T. (penetration test) 실시하여 조사해 본 결과 유사 용접부에 크랙(crack)이 존재하는 것으로 판명되었다.

SCM 440 쪽의 용접 후 경도 허용 범위는 강재의 인장강도-경도 대응 관계를 이용하여 구하였다^{8,9)}. 접합된 SCM 440의 인장강도가 적어도 Inconel 713C 인장강도 보다 커야한다는 용접 설계 조건으로부터 SCM 440의 경도 하한을 구할 수 있는데, Inconel 713C 인장강도 740 MPa에 대응하는 SCM 440의 경도는 240 HB 또는 255 HV(0.5 kg) 이다. SCM 440의 경도 상한은 용접 전 경도를 그대로 적용할 수 있으나 용접 후 열처리(annealing) 과정에서 경도 하락이 발생하므로 이를 고려하여야 한다. Table 2에 주어진 용접 조건에 대하여 반복 시험한 결과 용접 전의 SCM 440 경도 상한은 337 HB 또는 355 HV(0.5 kg)가 적절하였다. 따라서 SCM 440 쪽의 용접 후 경도는 240~337 HB 또는 255~355 HV(0.5 kg) 범위에 들어야 한다.

용접 조건에 대한 용접 후 경도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. SCM 440 쪽은 1~3번 용접 조건에서 경도가 하한 보다 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 그리고 측정값 중 가장 큰 쪽의 몇 개가 337 HB 를 크게 상회하는 것을 볼 수 있는데 이는 풀림 효과(annealing effect)가 충분하지 않은 것으로 생각된다. 몇 차례 시험하여 조사해본 결과 용접 전 SCM 440 시험편의 표면부 경도를 280~330 HB 로 약간 하향 조정하여 충분치 못한 풀림 효과를 보상할 수 있었다. 4~6번 용접 조건에서는 제한 범위의 중간에 비교적 고르게 분포하고 있으며, 하한을 만족하지 않는 가장 작은 값들은 각각 한 개의 측정점에만 나타났기 때문에 무시할 수 있다. Inconel 713C 쪽은 1~6번 용접 조건 모두에서 용접 전 보다 경도가 약간 증가하는 경향을 볼 수 있다.

모든 용접 조건에 대한 Fig. 6의 경도 분포는 용접선을 중심으로 Inconel 713C 쪽으로는 경도가 증가하였다가 감소하고, SCM 440 쪽으로는 경도가 다소 감소하다가 용접 이전의 경도로 복귀되는 경향을 공통적으로 보여준다. 이러한 경도 분포는 용접선을 중심으로 Inconel 713C와 SCM 440 양쪽으로

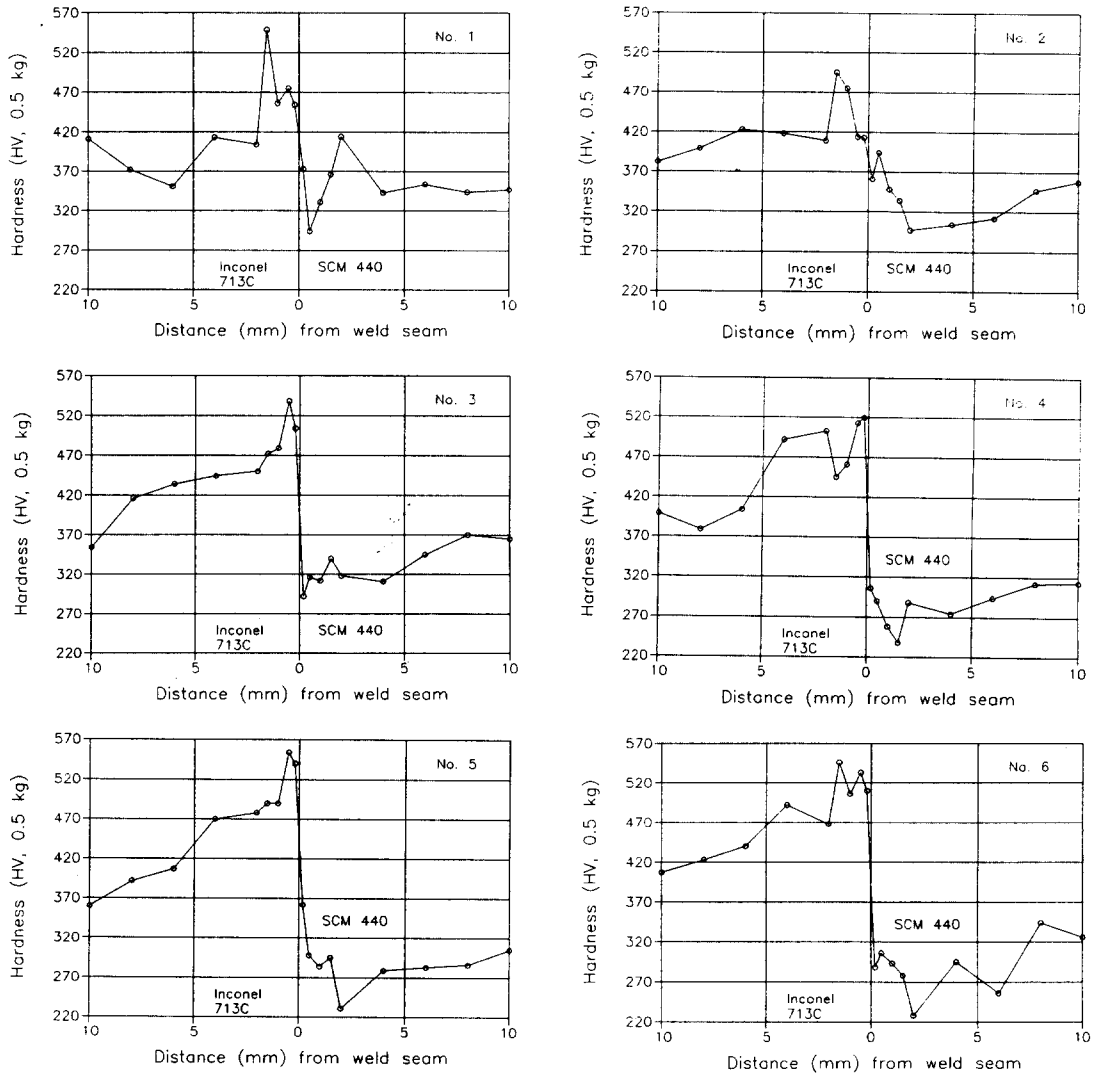


Fig 6. Hardness distribution after welding: all profiles show sudden increase for the part of Inconel 713C and decrease for the part of SCM 440 near the weld seam.

각각 2 mm 정도 되는 열영향부 (heat affected zone) 와 관련되어 있다. Inconel 713C 쪽의 경도 증가는 마찰용접에 의한 γ' 석출물 (Ni_3Al) 의 γ 기지 (matrix) 로의 국부적인 용해 (dissolution) 와 연관지어 설명할 수 있다^{10,11)}. 즉 마찰용접 중에 부분적으로 용해된 γ' 석출물이 마찰용접 후 공냉시킬 때 마찰용접 전 주조 상태의 γ' 석출물보다 더 미세하게 석출된다. 석출물 크기가 미세해지는 현상은 냉각 초기 온도와 관련될 수 있는데 용융 상태에서

냉각될 때 보다 낮은 온도에서 냉각될 때 더 미세해지기 때문이다. 따라서 마찰용접 후 Inconel 713C 쪽 열영향부에는 원래 크기의 석출물과 용접 과정에서 형성된 미세한 석출물이 공존하게 되며 용접 후 경도 증가의 원인이 된다. SCM 440 쪽에서 관찰되는 약간의 경도 감소는 마찰열에 의한 상변태로 설명할 수 있다. Fig. 7의 (a) 는 용접선에서 멀리 떨어진 곳으로 마르텐사이트 (martensite) 조직이며, (b) 는 열영향부로 페라이트 (ferrite) 와

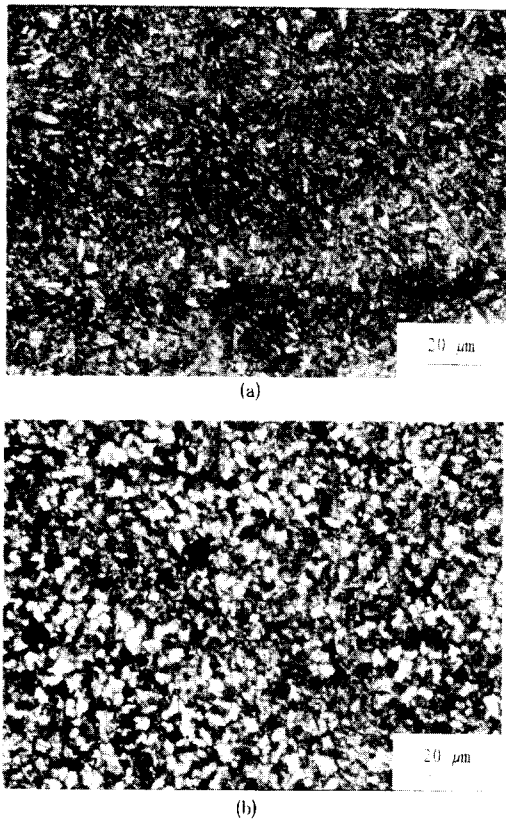


Fig 7. Microstructure of SCM 440 part after welding: (a) shows martensite far from the weld seam and (b) shows the mixture of ferrite and pearlite in the heat affected zone.

펄라이트(pearlite) 조직이 혼합되어 나타나고 있다.

4. 결 론

이상의 시험을 통해 용접기 변수 등의 용접 조건과 품질 관리에 관련하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 주축 회전수 1340 rpm, 마찰압력 4.51 MPa, 업셋압력 14.02 MPa, 마찰 단계에서의 길이 소모량 22.5 mm, SCM 440 마찰계면 직경 35 또는 40 mm, Inconel 713C 마찰계면 직경 35 mm를 용접 조건으로 하여 적합한 기계적 성질의 접합부를 얻었다.

(2) 경도, 인장강도, 굽힘 파단면 상태는 시험편

직경, 업셋압력, 마찰 단계에서의 길이 소모량 변화에 민감하지 않았다.

(3) 위의 용접 조건에서 SCM 440의 용접 전 경도 범위를 280~330 HB 로 하였을 때 용접 후의 요구 경도를 만족시킬 수 있었다.

(4) SCM 440의 용접 전후 경도 변화가 분명하게 나타나는 열영향부는 용접선으로부터 2 mm 이내 한정되었다.

참 고 문 헌

1. D. E. Spindler, "What Industry Needs to Know about Friction Welding," *Welding Journal*, March 1994, pp. 37-42
2. *Source Book on Innovative Welding Processes*, ASM, 1981
3. P. H. Thornton, R. G. Davies, and T. L. Johnston, *Met. Trans.*, Vol. 1, 1970, pp. 207-218
4. DVS 2909, *Deutscher Verband für Schweisstechnik e. V.*, 1980
5. "Friction Welded Joints on Rotors of Radial-Flow Turbines," *Quality Standard Q10*. 09455-5610, MAN-B&W Diesel, June 1986
6. M. F. Rothman, *High-Temperature Property Data: Ferrous Alloys*, ASM International, 1988, p. 310
7. 일본 특수강가이드 편집위원회, 특수강 가이드 제2편, 1984, p. 154
8. 大和久 重雄 저, 한국공업표준협회 편저, 철강재료 선택 포인트, 1988, pp. 76-77
9. 일본규격협회, JIS 핸드북 1: 철강, 1993, pp. 1828-1831
10. C. T. Sims, N. S. Stoloff, and W. C. Hagel, *The Superalloys II*, John Wiley & Sons, 1987, p. 125
11. Peter Adam, "The strength of flywheel friction-welded joints in high-temperature alloys," *Schweissen Schneiden Translation*, 1981, pp. E41-E42