

工學碩士學位論文

原子力發電所用 Turning Vane Bolt의
異種材(STS316L/IN X-750) 摩擦銲接에 의한
固着防止에 관한 研究

指導教授 柳寅壹

이 論文을 釜慶大學校 産業大學院 機械設計學科 辛基碩 提出함



釜慶大學校 産業大學院

機械設計學科

辛基碩

辛基碩의 工學碩士 學位論文을 認准함

2004年 6月

主 審 河 萬 景
委 員 姜 大 敏
委 員 柳 寅 壹



目 次

Abstract	iii
Nomenclature	v
제 1 장 서 론	1
제 2 장 마찰용접의 이론적 배경	3
2.1 마찰용접의 원리	3
2.2 마찰용접 사이클	7
2.3 마찰열 발생에 대한 해석	8
2.4 마찰용접의 특성	10
제 3 장 시험편 및 실험방법	12
3.1 재료 및 시험편	12
3.2 실험장치 및 실험방법	15
3.2.1 실험장치	15
3.2.2 실험방법	16
3.2.2.1 마찰용접시험	16
3.2.2.2 인장강도시험	17
3.2.2.3 경도시험	18
3.2.2.4 현미경 조직 검사	19

제 4 장 결과 및 고찰	20
4.1 육안 및 단면 조사	20
4.2 인장과단면의 분석	22
4.3 인장강도와 용접조건과의 상관성	24
4.4 가열시간과 엷셋량과의 상관성	26
4.5 용접변수와 강도와의 상관성	28
4.6 마찰용접의 최적화	31
4.7 마찰용접부의 경도분포	33
4.8 마찰용접부의 현미경 조직	35
제 5 장 결 론	37
참 고 문 헌	38
List of Figure & Table	40

감사의 글

A Study on Sticking Prevention of Turning Vane Bolt by Dissimilar Friction Welded Joints(STS316L/IN X-750) for Nuclear Power Plant

Ki-Suk Shin

*Department of Mechanical Design Engineering
Industrial Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

Nowadays, according as the machinery industry develops, an opportunity to use of stainless steel and inconel alloy steel has been increasing in various mechanical elements such as heat exchanger, bolt materials in nuclear power plants and RCP(reactor coolant pump) components, etc. Especially, the stainless steels(STS304, 304L, 316, 316L) are used to many parts for RCP of nuclear power plant. However, sometimes they have sticking problem for long-term operation at high temperature and acid condition. So, this study tries to prevention of sticking problem of turning vane bolts by better improve material by dissimilar friction welded joints(STS316L/IN X-750).

Dissimilar friction welding was produced using 10mm and 11mm diameter solid bar in Inconel alloy(IN X-750) to Stainless steel(STS316L) to investigate their mechanical properties. The main friction welding parameters were selected to endure good quality welds on the basis of visual examination,

tensile tests, Vickers hardness surveys of the bond of area and HAZ and macro-structure investigations. The specimens were tested as welded. The tensile strength of the friction welded steel bars was increased over 95% of the STS316L base metal under the condition of all heating time.

This paper deals with investigating experimentally the effects of the weld quality such as strength, toughness, hardness and macro-structure of the welded joints in friction welding of TV(turning vane) bolt materials STS316L and IN X-750 bar to bar.

The results of this experimental investigation are summarized as follows:

- (1) It was possible that saving of working steps, cost, materials by dissimilar friction welding of very good quality strength at weld interface of STS316L and IN X-750, also it was possible that prevention of sticking problem by better improve material at a defeat area.
- (2) The heat affected zone of STS316L was fractured because of strength lower than IN X-750 and it was experimentally confirmed by considering more than joint efficiency 95%, weld strength, toughness that the optimum welding conditions were $n=2,000(\text{rpm})$, $P_1=220(\text{MPa})$, $P_2=260(\text{MPa})$, $t_1=4(\text{sec})$, $t_2=4(\text{sec})$ when the total upset length is 7(mm).
- (3) The quantitative relationship between heating time(t_1) and upset(U_1 , U_2 , U_T) of friction welding was obtained. Those U_T-t_1 relationship empirical equation was derived $U_T=2.16t_1-1.44$.
- (4) The macro-structure of the base metal, HAZ and weld interface(W.I) of friction welded joints at the optimum welding condition consists of the same structure and fined at W.I, resulting in increasing toughness as well as strength, and no macro structural defect has been found at the friction welded zone.

Nomenclature

RCP	: Reactor coolant pump
IGSCC	: Intergranular stress corrosion cracking
TV	: Turning vane
FRW	: Friction welding
B.M	: Base metal
W.I	: Weld interface
HAZ	: Heat affected zone
σ_t	: Tensile strength (MPa)
σ_y	: Yield strength (MPa)
σ_b	: Breaking strength (MPa)
ε	: Elongation (%)
ψ	: Reduction of area (%)
H_v	: Vickers hardness
\emptyset	: Diameter (mm)
R^2	: Coefficient of determination
n	: Rotating speed (rpm)
P_1	: Frictional heating pressure (MPa)
P_2	: Upsetting forging pressure (MPa)
t_1	: Frictional heating time (sec)
t_2	: Upsetting forging time (sec)
U_1	: Heating upset during t_1 (mm)
U_2	: Forging upset during t_2 (mm)
$O_{t_1}Z$: Optimum t_1 zone

제 1 장 서 론

전력산업은 국가 경제발전의 원동력이며 중요한 기초산업이다. 이러한 전력은 화력, 수력, 조력, 태양열 등의 에너지원으로부터 얻어진다. 국내의 경우 대부분이 화석에너지 자원을 이용한 화력 발전소로부터 전력을 생산하고 있다. 그러나 우리나라에서는 이러한 에너지 자원의 빈곤으로 인하여 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이며, 이러한 에너지 자원의 수입비용은 국가경제에 상당한 비중을 차지하고 있다. 따라서 이와 같은 에너지 자원의 수입대체효과를 노리고 시작한 것이 바로 원자력 발전이다. 국내에서 원자력 발전을 도입한 지는 이제 20여년이 지났으며, 국내 전력생산의 40%이상을 차지하고 있다. 따라서 이제는 원자력 발전소의 안전성과 내구성 등에 중점을 둔 원자력 발전설비 개발에 그 투자비율이 상당히 증가하고 있으며, 각 계통별 정비품질 향상 및 O/H(over haul) 공기단축을 통한 더욱더 많은 전력생산에 주력하고 있다.

원자력 발전소에서 가장 중요하게 여기는 장치가 바로 원자로이다. 원자로는 우리나라의 연소로 인한 핵분열이나 핵융합을 일으켜 에너지를 생성하는 장치이며, 이 과정에서 많은 고열이 발생하게 되는데, 이 고열을 순환시켜 발전을 할 수 있도록 도와주는 역할을 담당하고 있는 장치가 바로 RCP(reactor coolant pump)이다. 이 RCP는 오랜 기간 동안의 고방사선 1차 구역에서의 운전으로 인해 RCP자체가 방사선화 되어, O/H기간 중 RCP교체 및 완전분해 작업자들의 많은 방사선 피폭을 초래하고 있으며, 현재 화학제염 설비 및 방사선 차폐장치 개발을 통한 방사선 피폭저감^(1~3)을 위해 많은 연구가 이루어지고 있다.

RCP중 W.H(Westing house)사에서 공급한 93A형 RCP의 터닝밴(turning vane) 볼트에 대한 균열발생은 1987년 일본에서 RCP를 처음 분해하는 도중 보고⁽¹⁾ 되었으며, 이것을 분석한 결과 터닝밴 볼트의 헤드부 및 생크부에서 발생된 균열이 IGSCC(intergranular stress corrosion cracking)로 판명되었다. 이에 따라 국내 93A형 RCP모델의 터닝밴 볼트(합금강 A-286재질) 역시 제작사인 미국 W.H사로부터 터닝밴 볼트의 재질에 따른 IGSCC발생을 확인하였으며, 미국 W.H사는 각종 기술 정보⁽¹⁾를 통하여 이 같은 사실을 전 세계 각 발전소에 공포하였다. 위 사실의 확인에 따라 일본의 경우 93A형 RCP가 설치된 Takahama,

Ohi, Genkai, Mihama, Ikata 발전소의 터닝맨 볼트를 자체 설계 제작한 인코볼 X-750 재질의 터닝맨 볼트로 전량 교체하였으며, 당시 분해 된 터닝맨 볼트의 점검 결과 75%이상의 볼트에서 균열이 발견되었다. 또한 미국의 경우 Comanche peak, McGuire, Zion 등의 일부 발전소에서 W.H사에서 새로 설계, 제작한 터닝맨 볼트(STS316 재질)로 교체한 경험을 가지고 있어, 국내의 경우 이를 반영하여 모든 93A형 RCP에 New TV bolt(STS316 재질)로 교체 하였다. 또한 디퓨저 아답터를 디퓨저에 고정 시키는 DACS(diffuser adapter cap screw : AISI 302, 303, 304, 305, 384 STS) 역시 IGSCC에 의한 크랙 및 절손 사고가 North-anna, Ohi, Maansgan, 고리3, 영광1 등에서 발생하여 현재 새로 제작된 DACS (STS316 재질)로 교체한 경험을 가지고 있어 국내의 경우 이를 반영하여 STS316 재질로 교체 하였다. 그러나 최근 93A형의 RCP완전분해 작업 수행 중, New TV bolt에서 스테인레스강 볼트의 취약 현상인 고착(stuck) 현상이 발생 되었으며, 이로 인해 작업시간 지연 및 RCP작업자들의 많은 방사선 피폭을 초래^(1~4)하고 있다.

따라서 본 연구에서는 터닝맨 볼트에서 발생되고 있는 고착현상을 이중재 결합방법 중 가장 이상적인 방법으로 인식되고 있는 마찰용접(friction welding, FRW)을 적용하여 고착현상이 발생하는 부위의 재질 개선을 통한 문제해결을 시도 하였다. 마찰용접의 특성을 효과적으로 활용하고 구조물 혹은 제품의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위해서는 실용적 평가방법에 의한 마찰용접재의 강도특성 파악과 신뢰성 있는 데이터의 축적이 필요하다. 축 재료 등에 이용되는 IN X-750과 내마모성, 내피로성 등이 우수한 STS316L의 이중 금속간의 최적 마찰 용접 조건을 결정하기 위해 마찰용접 변수인 회전수, 마찰압력, 업셋압력, 가열 시간, 업셋시간 등의 상호작용에 의한 용접품질(특히 인장강도, 연성 등)과의 상관 관계를 고찰하였고, 또한 마찰용접 후 용접재의 강도특성 비교 및 현미경 조직 검사를 통해 최적조건을 도출하였다.

제 2 장 마찰용접의 이론적 배경

2.1 마찰용접의 원리

금속 결정면의 결정을 분리시키려면 접촉면의 원자 결합을 파괴시킬 정도의 큰 힘이 필요하다. Fig. 2-1은 마찰용접의 원리를 설명하기 위한 원자 사이의 거리와 힘과의 관계⁽⁵⁾를 나타내고 있다. 원자 간의 거리가 가까울수록 인력은 크게 작용하며 거리 $X=0$ 에서 쌍곡선의 모양으로 나타나며, 등가 위치 X' 는 인력과 반발력의 합이 0일 때의 위치이다. Fig. 2-1에서 인력과 반발력이 최고가 되는 A위치보다 더 근접시키는 방법이 마찰용접의 원리이고, 이러한 근접이 이루어지려면 재료가 소성 변형을 일으킬 수 있을 정도의 막대한 외력을 필요로 하게 되며, 동시에 변형 저항을 저하시켜 줌으로써 가능한데, 변형 저항을 저하시키는 데는 가열원을 필요로 한다. 이처럼 마찰용접은 마찰열을 이용하여 변형 저항을 줄이고 가압력으로 접촉면의 원자결합을 파괴시킴으로써 이루어지는 결합으로 고상용접^(5~8)의 일종이다.

Fig. 2-2는 마찰용접의 기본적인 기구(mechanism)⁽⁸⁾를 나타낸다. Fig. 2-2에서 재료를 회전부 유압척(hydraulic chuck)에 설치하여 일정한 회전수로 돌릴 때, 다른 시험편은 고정부 유압실(hydraulic chamber)의 척에 고정 설치하며, 일정한 마찰 추력에 의하여 재료를 밀어 접촉시킨다. 양측 재료의 접촉면은 축 방향의 일정 가압 압력에 의하여 일정시간동안 가열됨으로써 접촉점이 확대되어 재료의 길이 방향으로 열이 전도됨과 동시에 고온 영역이 발생하며, 고온 영역이 용접에 필요할 정도의 높은 온도(단조 온도 정도)로 확대될 때 회전을 급정지시킴과 동시에 축 방향의 일정 압력을 일정 압력시간동안 가하여 용접을 완료한다. 마찰용접은 고온의 마찰 열원을 사용하기 때문에 접촉면의 온도는 통상 1200°C 정도이고 접촉부에서는 온도 상승에 의하여 소성 유동이 일어나며, 이때 마찰 추력을 사용함으로써 용접이 이루어지는 것이다. 마찰용접법의 유형은 크게 연속형과 관성형의 두 가지로 나눌 수 있는데 소련, 일본, 유럽 쪽은 주로 연속형을 사용하는 추세이고, 미국 쪽은 관성형을 사용하는 경향이 있으나 원리적인

면에서는 크게 차이를 볼 수 없으며 각각의 용접조건 설정이나, 재료의 선택에 약간의 장단점이 있다. 본 연구에 사용한 용접기는 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type) 마찰용접기로서 그 개략도는 Fig. 2-3과 같다.

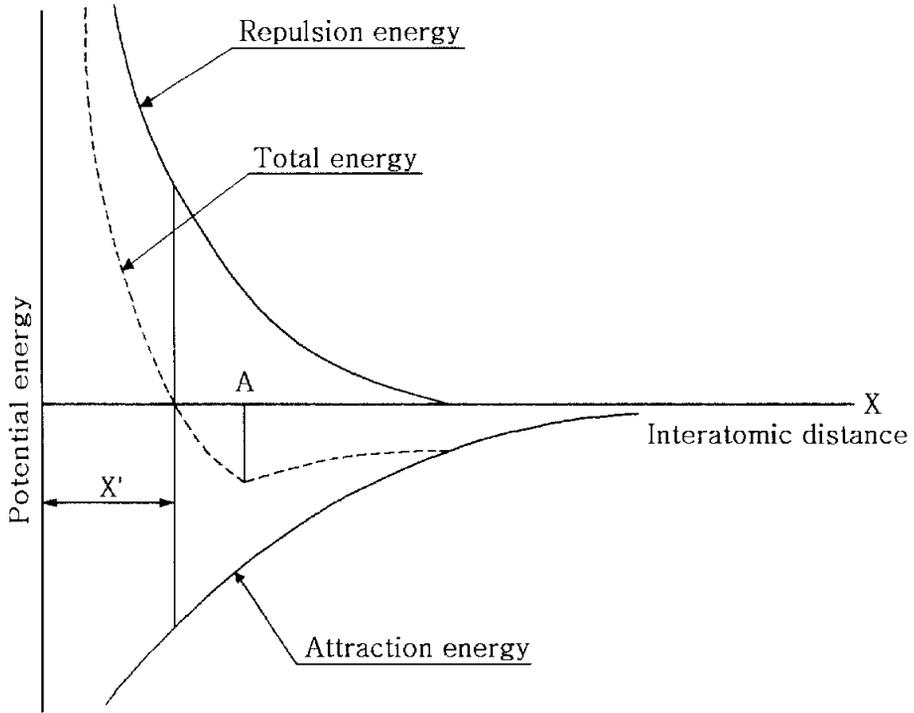


Fig. 2-1 Transformation of force in the atoms at distance

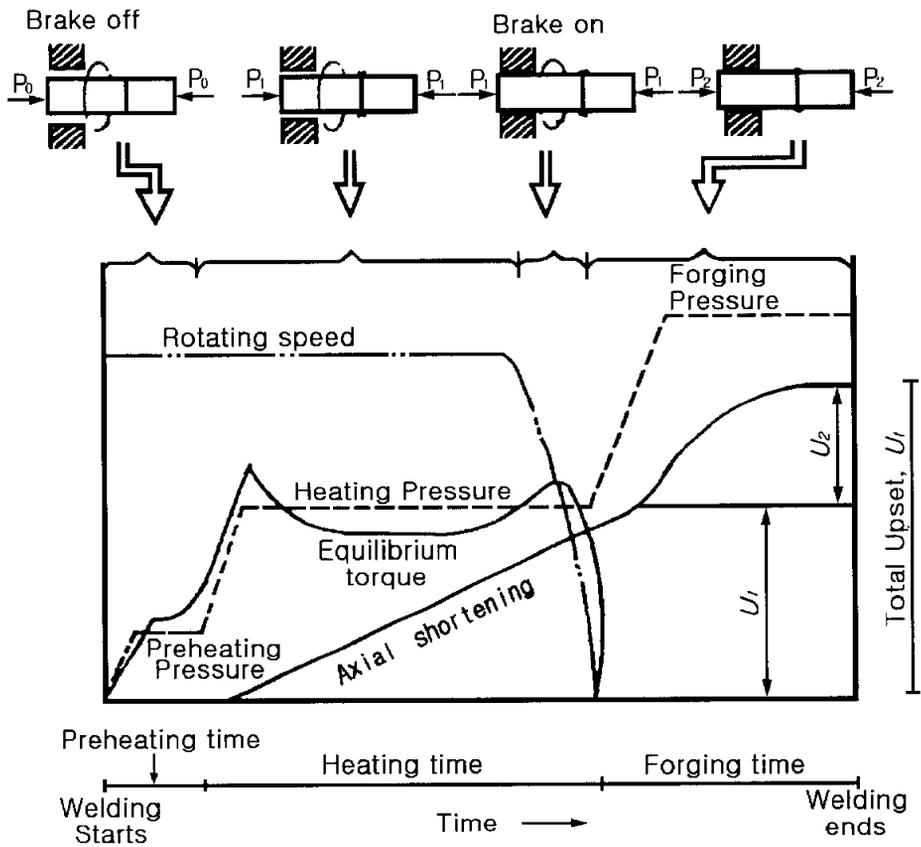
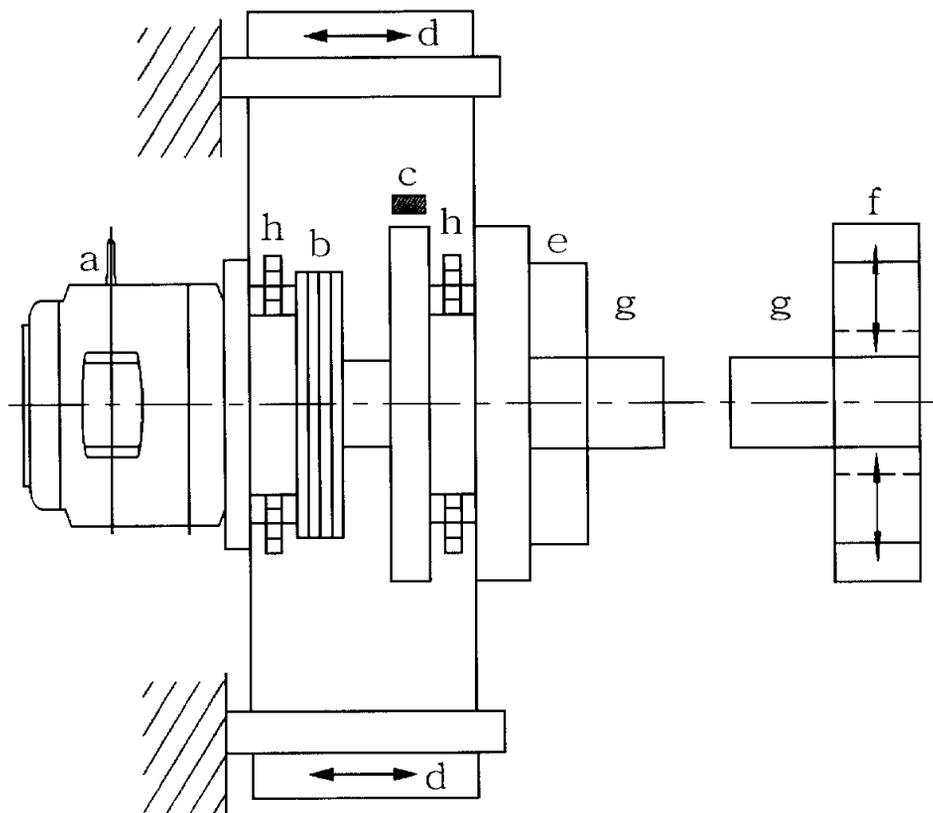


Fig. 2-2 Principle of friction welding(continuous drive brake type)



- | | |
|------------------------|-----------------------|
| a : Motor | e : Hydraulic chuck |
| b : Clutch | f : Hydraulic chamber |
| c : Brake | g : Work piece |
| d : Hydraulic cylinder | h : Bearing |

Fig. 2-3 Schematic mechanism of friction welding machine
(continuous drive brake type)

2.2 마찰용접 사이클

Fig. 2-4는 Fig. 2-2의 마찰용접의 원리에서 용접 공정에 대한 마찰용접의 사이클(cycle)을 표시한 것이다. 고정부 유압척에 설치된 재료를 일정한 속도(n)로 회전하는 회전부의 재료에 일정 가열 압력(P_1)으로 마찰가열시간(t_1)동안 가압하게 되면 마찰열이 발생하게 되며, 일정 온도(난조온도)에 도달하게 되었을 때 급정지시키고 업셋 압력(P_2)을 업셋 시간(t_2)동안 가하여 마찰용접을 완수한다. OAB 구간을 가열 과정이라 하고 OA구간은 스톱프 타임(slope time)이라고 하는데, 스톱프 타임은 마찰용접 초기에 발생하는 최대 토크(torque)를 감소시키기 위해 필요하며, 가열 압력(P_1)은 시간에 대해 직선적인 증가의 형태를 나타낸다. BCD의 구간은 가열과정 후 급정지된 B에서 가압하는 과정을 나타낸다. 마찰가열 시간(t_1)동안 P_1 으로 가압하여 생긴 업셋량을 U_1 , 업셋시간 t_2 동안 P_2 로 가압하여 생긴 업셋량을 U_2 라 하고, $U_1 + U_2$ 를 총업셋량 $U_t^{(6, 7)}$ 라 한다.

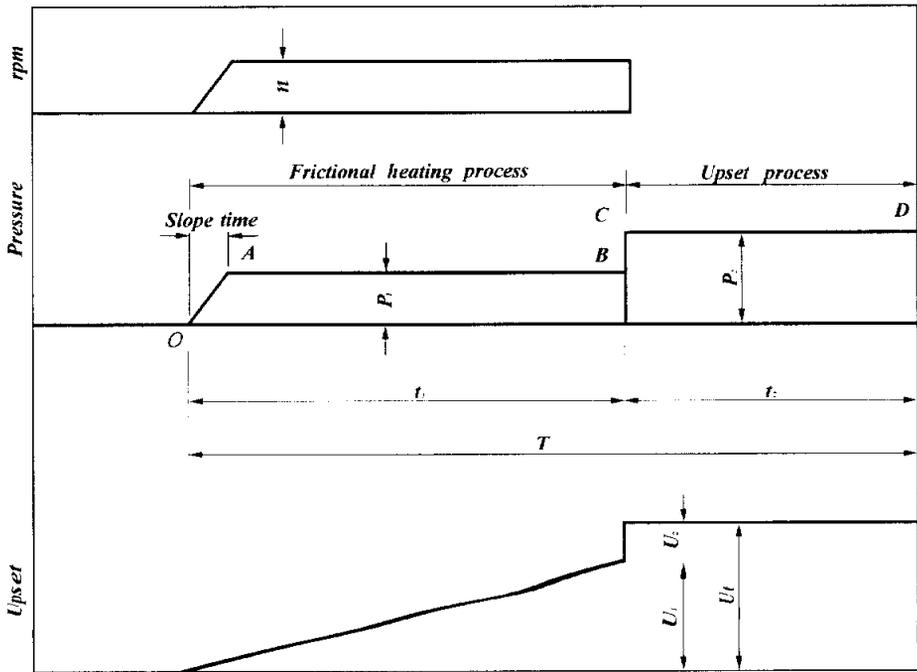


Fig. 2-4 Cycle of friction welding(continuous drive brake type)

2.3 마찰열 발생에 대한 해석

마찰용접에서 열 사이클은 표면에서 원자 결합의 파괴와 결합의 연속적인 과정⁽⁵⁾으로 간주된다. 마찰용접에서는 소성 저항을 줄이기 위한 마찰 발열량과 두 재료 표면의 원자끼리의 간격을 좁히기 위한 압력 가압력의 크기가 용접성에 주로 영향을 미친다고 알려져 있으나 더욱 더 중요한 것은 열 해방율이다. 이러한 경우 접촉면의 온도 상태는 마찰 표면에서 일어나는 현상의 총 합일뿐만 아니라, 용접 장비와 용접 부위 강도 특성 과정들의 효율성에 의하여 결정되어진다. 기본적인 마찰력은 Fig. 2-5와 같이 미소 단면적 dA 에 작용하며 dA 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$dA = 2\pi r \times dr \quad (1)$$

마찰력 dF 는

$$dF = Pf \cdot 2\pi r dr \quad (2)$$

가 된다. 이러한 단면적에 작용하는 열은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$dQ = Pf n 4\pi^2 r^2 dr \quad (3)$$

접촉면에서 발생하는 전체 에너지는 방정식(3)을 적분함으로써 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = \int_0^r Pf n 4\pi^2 r^2 dr \quad (4)$$

마찰 효율계수는 일정하지 않으며 표면의 상태, 재료의 온도구배, 표면온도와 속도에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다. f 에 관한 정확한 값을 알지 못하면 식(4)는 적분되지 않는다. 그래서 그것은 다음과 같은 식에 의하여 에너지 입력 값을 얻을 수 있다.

$$Q = 2\pi M_f n \quad (5)$$

여기서 M_t 는 토크이다. 총 에너지의 일부분만이 시험편의 소성변형의 확장을 위하여 사용되어지고, 에너지 모두는 열로 변환된다고 가정한다.

회전축(0점)주위의 이러한 힘들의 모멘트는 다음과 같다.

$$dM = r \times dF = r \times dA \times P \times f = r \times 2\pi r \times dr \times P \times f \quad (6)$$

Fig. 2-5는 모재의 마찰 면에서 반경 방향의 열 발생 분포가 포물선 상으로 되는 것을 나타내고 있다. 여기서 f 는 마찰 효율 계수이며, 압력 P 는 마찰 면에 균등하게 분포하고 있는 것으로 하면 모멘트 M 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{2}{3} \pi P f r^3 \quad (7)$$

여기서 M : 모멘트, P : 단위 압력, r : 모재의 반경

f : 마찰 효율 계수(전형적인 마찰계수와 구별하기 위하여 효율마찰 계수를 사용하였다.)

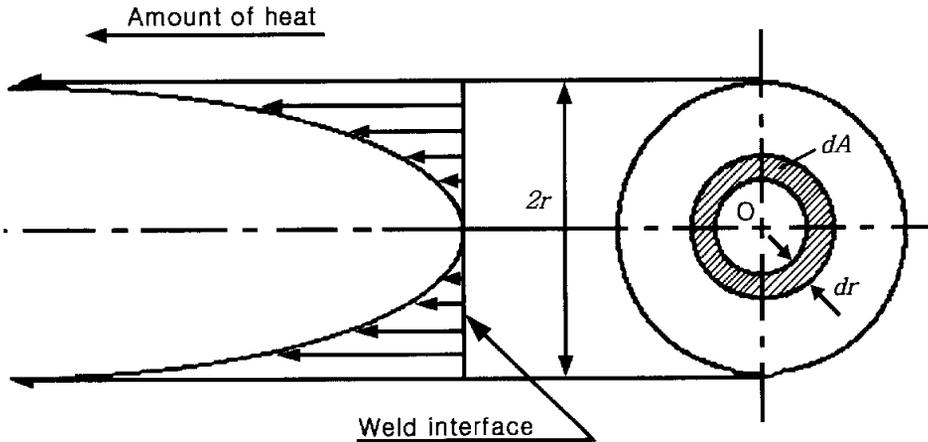


Fig. 2-5 Heat liberation diagram for friction welding

2.4 마찰용접의 특성

일반적으로 공학에서는 마찰열의 발생이 바람직하지 않지만 예외적으로 마찰용접법은 마찰열을 이용하여 재료를 용접하는 것이다. 마찰용접은 마찰열을 이용하여 변형저항을 줄이고 가압력(upsetting pressure)으로 원자간 간격을 좁혀줌으로써 이루어지는 결합이다. 두 재료가 마찰되기 앞서 회전부가 일정 속도에 도달한 다음 마찰가열이 시작된다. 정지부가 일정압력으로 회전부에 접촉되어 마찰 가열되는 동안 회전부는 일정속도를 유지하며, 마찰가열 과정이 끝나면 브레이크에 의하여 회전부는 급정지되면서 정지부는 마찰가열 압력보다 높은 압력으로 일정시간 동안 가압하게 된다. 즉, 두 접촉면이 회전수 n 인 동안에 마찰가압력 P_1 으로 마찰가압시간 t_1 동안 마찰가열이 생겨 열 U_1 의 소성유동이 플래쉬로 나선형과 같이 돌출되어 나오고, 회전수 n 이 0으로 정지되는 순간에 P_1 의 약 2배의 난조 가압력 P_2 가 가압시간 t_2 동안 작용하면 U_2 의 플래쉬가 반경방향으로 더 돌출되어 나오며 $t_2=0$ 일 때 용접이 끝난다^(6~8).

마찰용접법에 의해 압접된 경우의 접합특성^(5~8)은 다음과 같다.

- (1) 비관성 마찰용접의 용접조건(변수)이 회전속도, 가열시간, 가압시간, 가열압력 및 가압압력 등 5개인데 비해, 관성용접의 경우는 플라이휠 질량, 회전속도 및 추력의 3개 조건이 용접성능을 조절한다.
- (2) 두 용접 소재중 하나는 용접면이 원형이거나 원형에 가까운 것이라야 하며 이것이 봉이든 관이든 상관없다. 최근엔 형상에 관계없이 용접이 가능하다. 즉, 직선 왕복 마찰용접의 연구개발이 일부 완료되고, 계속 연구가 진행되고 있다.
- (3) 형성된 용접부는 강력한 고상결합을 나타내며 용융이 일어나기 직전에 소성 금속이 밀려 나온다.
- (4) 이 밀려나온 소성금속이 플래쉬(링 모양의 돌기부)를 형성하게 되는데, 이것이 본래의 용접면의 조악성을 일소하고 불순물을 용접부에서 추방해 준다.
- (5) 용접 결합부에서의 이러한 플래쉬는 경우에 따라 제거될 필요가 있다.
- (6) 용접 사이클중에는 단지 용접면에서 극히 좁은 부분만이 가열된다. 따라서, 용접부는 열강화 역할을 하는 금속 모재에 의하여 담금질이 된다. 이때

용접부의 경도나 강도가 증가되나 경도의 차나 잔류응력을 없애고 다소의 인성을 주기 위해, 경우에 따라서 적절한 열처리가 필요하다.

- (7) 마찰용접의 비용융온도와 급속한 용접 사이클 시간, 그리고 회전난조가압 등이 여러종류의 금속접합에 이상적 조건을 제공한다.
- (8) 이종재료의 우수한 용접이 경제적으로, 그리고 연속적으로 성취될 수 있다.
- (9) 조작법이 매우 간단하고 쉬우며 용접면이 청결하며, 용접봉 및 첨가재가 필요 없고 다량생산이 가능하다.
- (10) 용접부의 열영향부는 매우 좁으므로 용융 생성물이나 입자성장이 없고 두 이종재질이 보다 강력하게 혼합되어 치밀한 미세조직을 갖는다.
- (11) 최적 용접조건하에서 용접된 시편의 인장강도는 용접부가 모재보다 더욱 높고 파단은 용접면이 아닌 모재에서 일어나며, 비틀림 피로파단 역시 용접부가 아닌 모재에서 일어나므로 마찰용접에 의한 용접강도가 우수함을 알 수 있다.

제 3 장 시험편 및 실험방법

3.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 이중재 마찰용접 실험재료는 국내 C사와 K사의 제품이며, STS316L과 IN X-750 합금강재에 대한 강도와 연성, 내마모성에 중점을 두었다. STS316L과 IN X-750은 각종 내열, 내산성 재료로 많이 사용되고 있으며, 해수와 밀접한 관련이 있는 원자력 발전설비에 다양하게 사용되고 있다. 특히 해수 및 1차 계통의 밀봉장치 부분이나 각종 발전설비의 체결용 볼트 등에 많이 사용되고 있다.

Table 3-1에는 STS316L과 IN X-750재료의 화학조성을 나타내었고, Table 3-2에는 기계적 성질을 각각 나타내었다.

Table 3-1 Chemical composition of materials (wt. %)

Comp. Mat.	C	Si	Mn	P	S	Fe	Cu	Cr	Al	Ti	Nb	Ta	Mo	N	Ni
STS316L	0.023	0.48	1.37	0.027	0.004	-	0.27	16.99	-	-	-	-	2.18	0.0159	12.20
IN X-750	0.05	0.10	0.10	-	0.001	6.01	0.04	15.45	0.61	2.51	1.01	0.01	-	-	bal.

Table 3-2 Mechanical properties of materials

Prop. Mat.	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Reduction of area Ψ (%)	Elongation ϵ (%)	Hardness (Hv)
STS316L	867	684	42.4	21.4	293
IN X-750	1073	691	28	33	287

마찰 용접 시험을 위한 시험편은 Fig. 3-1의 (a)와 같은 형상과 치수로 가공하였고, 마찰용접 시험편의 강도를 알기 위한 인장 시험편의 형상과 치수는 KS규격(KS B0801 14A)에 따라 Fig. 3-1의 (b)와 같은 형상으로 CNC선반 가공 후 연삭가공 하였다. 또한 경도 및 조직 검사를 위해 마찰용접한 후 마찰용접면을 중심으로 좌우 10(mm)로 절단하였고, 중심부를 따라서 절단(wire cutting)하였다. 절단 시 열영향을 최소화하기 위하여 절삭유를 듬뿍 적용하였고, 마운팅 후 폴리싱 하였으며, 이는 Fig. 3-2와 같다.

3.2 실험장치 및 실험방법

3.2.1 실험장치

본 연구의 마찰용접시험에 사용된 마찰용접기(Model : TOHO TH-25)는 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)이며, 용량은 최대 취부 재료치수로서 회전축은 $\varnothing 25(\text{mm})$ 이고, 슬라이드축은 $\varnothing 40(\text{mm})$ 이다. 그 실험장치 사진은 Fig. 3-3과 같다.

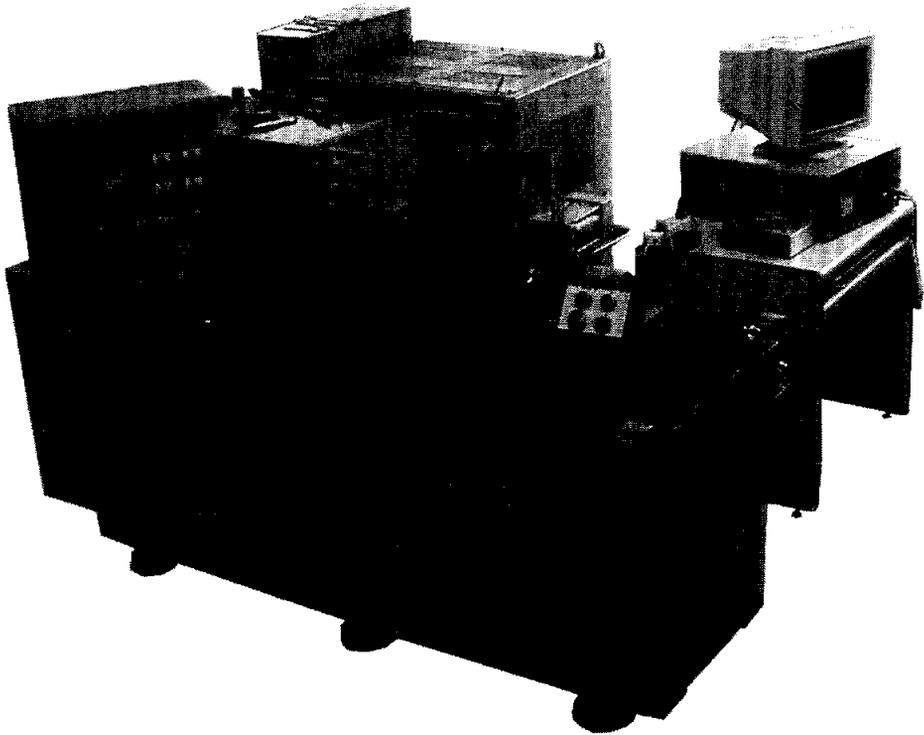


Fig. 3-3 Appearance of friction welding machine
(TOHO, TH-25 continuous drive brake type)

3.2.2 실험방법

3.2.2.1 마찰용접시험

마찰용접의 최적화 실험은 Fig. 3-1(a)과 같은 시험편으로 STS316L($\phi 11\text{mm}$)과 IN X-750($\phi 10\text{mm}$)의 이종재 마찰용접을 수행하였다. 실험에 사용한 재료는 STS316L 스테인레스 합금강 과 IN X-750 합금강 이며, 이들 재료의 적정 마찰용접 조건을 문헌^(6, 7)을 조사하여 회전수(n)를 결정한 후, 마찰 가열압력(P_1), 단조 가압력(P_2)을 계산하여 예비시험을 수행하였고, 용접조건을 선정하여 가압시간(t_2)을 선택한 후에 가열시간(t_1)을 다양하게 변화시켜서 마찰용접을 실시하였다.

Table 3-3은 마찰용접시험의 다양한 조건을 나타낸다.

Table 3-3 Various condition of dissimilar friction welding of IN X-750 to STS316L

Case	Rotation speed n (rpm)	Heating pressure P_1 (MPa)	Upsetting pressure P_2 (MPa)	Heating time t_1 (sec)	Upsetting time t_2 (sec)	Total upset U_T (mm)
1	2,000	80	100	5	4	1.6
		100	120			2.6
		140	180			4.7
		180	220			6.9
		200	240			7.6
		220	260			9.5
2	2,000	220	260	1	4	1.1
				3		4.7
				4		7
				5		9.5
				7		14

3.2.2.2 인장강도시험

마찰용접 후 Fig. 3-1의 (b)와 같은 형상의 시험편으로 선삭가공하고 연삭한 후 접합강도는 Fig. 3-4의 만능재료시험기(Model : KDU-50)를 이용하여 인장속도 2(mm/min)로 인장시험을 하였다.

Table 3-3의 용접조건에 따라 마찰용접한 용접재(STS316L/IN X-750)를 Fig. 3-1의 (b)와 같은 형상의 치수로 인장시험편을 가공한 후 인장시험을 수행하여 용접재의 인장강도를 마찰용접 조건에 따라 조사함으로써 적정 마찰용접 조건을 구하도록 하였다.

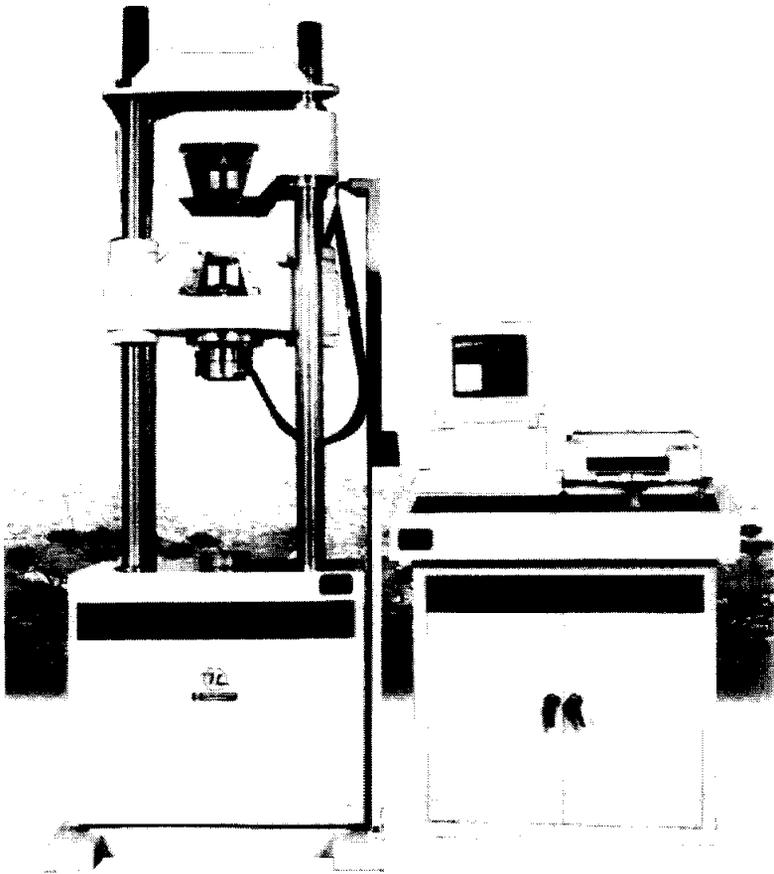


Fig. 3-4 Universal testing machine(KDU-50)

3.2.2.3 경도시험

경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(Model : MXT- α 7e)를 사용하였으며, 시험조건은 하중 1000(g)/10(sec)의 0.5(mm) 등간격으로 하여, 좌우 각각 8(mm)씩 측정하였으며, 중심부와 원주부의 경도분포를 조사하기 위해 2가지로 구분해서 조사하였다.

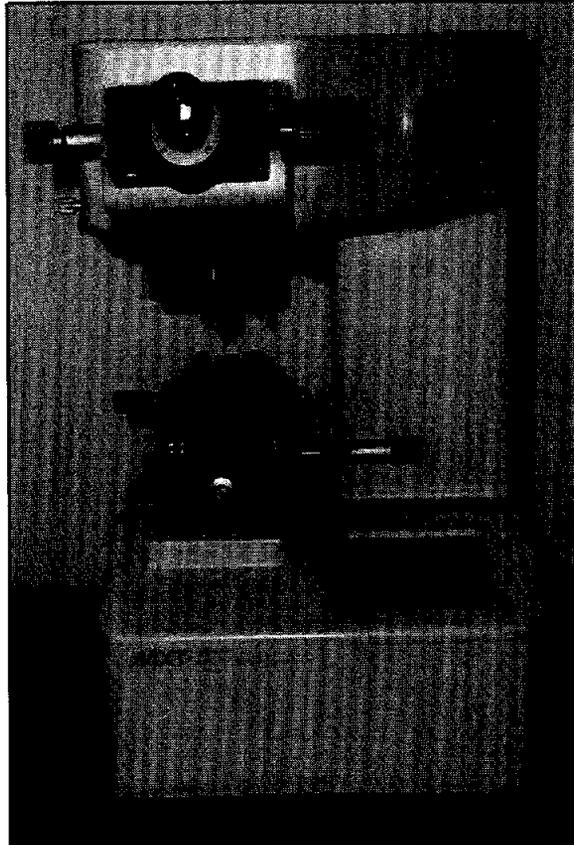


Fig. 3-5 Vickers hardness testing machine(Model : MXT- α 7e)

3.2.2.4 현미경 조직 검사

현미경 조직 검사를 하기 위한 시험편은 경도시험과 같은 적정 용접조건으로 용접한 상태의 것을 사용하였다. 부식방법으로는 켈링용액을 사용하였고, STS316L은 90(sec), IN X-750은 660(sec)으로 각각 부식하였다. 조직검사는 용접경계면, 열영향부 및 모재부분으로 하였으며, 각각 200배로 확대하여 관찰하였다.

Fig. 3-6은 조직 검사에 사용된 금속 현미경을 나타낸다.



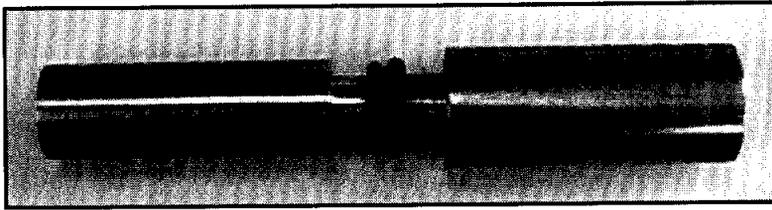
Fig. 3-6 Metallurgical microscope(OLYMPUS BX60M)

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 육안 및 단면 조사

모든 시험편은 시험 전에 육안 검사를 시행하였다. 플래쉬를 제거한 시험편의 용접 영역에서 어떠한 표면 결함도 관찰할 수 없었으며 육안으로는 잘 접합이 되었음을 알 수 있었다. 일례로 Fig. 4-1은 마찰 용접된 그대로의 사진을 보여 준다. 이전의 Fig. 3-2의 사진은 이 시험편을 길이방향으로 절단하여 나타낸 것으로 플래쉬의 형상, 용접계면 및 열영향부의 형상을 보여주고 있다. 본 사진에 의하면 열영향부의 폭은 IN X-750보다 비교적 열에 약한 STS316L에서 약간 크게 나타났다, 외주에서 중심부로 갈수록 그 폭은 감소하고 있다.

다음에 나타낸 Fig. 4-2는 $P_1=220(\text{MPa})$, $P_2=260(\text{MPa})$, $t_2=4(\text{sec})$ 의 동일 조건에서 t_1 을 1~7(sec)로 변환하여 용접한 것을 각각 인장 시험하여 파단 된 사진을 나타낸 것이다.



(IN X-750)

(STS316L)

Fig. 4-1 Photograph showing friction welded specimen
in the as-received condition

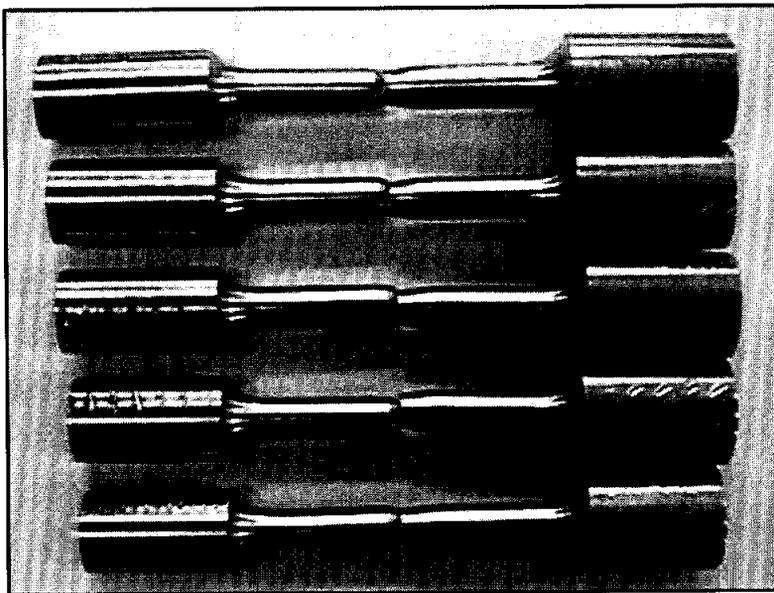


Fig. 4-2 Photograph showing fractured specimens after
tensile test in friction welded areas

4.2 인장파단면의 분석

Fig. 4-3은 $P_1=220(\text{MPa})$, $P_2=260(\text{MPa})$, $t_2=4(\text{sec})$ 의 동일 조건에서의 시간변화 ($t_1=1\sim 7\text{sec}$)에 대한 인장 파단 단면을 조사하여 나타낸 사진이다. 전체적인 형상은 STS316L의 원소가 모재에서 떨어져 나와서 IN X-750파단면에 볼록렌즈(convex lens)모양으로 부착된 것을 관찰할 수 있었다. 마찰압력이 작은 조건에서는 파단면이 중간 부분에서 초생달 모양으로 움푹 패인 것을 볼 수 있었으며, 이것은 발열이 부족하여 확산유동이 충분하지 못한 결과로 판단된다. 이에 반해 마찰압력과 마찰가열시간을 각각 $P_1=220(\text{MPa})$, $P_2=260(\text{MPa})$, $t_1=4(\text{sec})$, $t_2=4(\text{sec})$ 조건으로 한 파단면은 전체가 비교적 균일한 면을 관찰 할 수 있었다. 이것은 STS316L소재가 마찰압력의 증가에 따라서 확산 유동이 점차 증가되어 STS316L의 재질에 비하여 경한 IN X-750 쪽으로 금속 상호간 확산이 일어나 부착된 것으로 판단된다. Sada와 Bahrani⁽⁹⁾는 기계적 특성이 매우 다른 이종금속의 마찰용접에서 고경도 금속의 표면은 연질금속의 피막에 의해 용접과정 초기에 완전히 덮여지며, 이러한 현상은 마찰이 진행되는 과정에서 떨어져 나온 연질 재료가 경질금속에 확산 이동되기 때문이라고 하였다. 최대 인장강도를 보인 마찰용접 조건의 인장시편 파단면을 관찰한 결과 딩플(dimple)이 차지하는 면적은 증가되었으며 중심부를 제외한 파단면의 대부분에서 딩플이 나타났다. 중심부의 용접이 불완전한 것은 중심부로 갈수록 상대 속도가 거의 0에 가까워 마찰열 발생이 적었기 때문⁽¹⁰⁾으로 판단된다.

Rich와 Robert⁽¹¹⁾의 이론적 해석에 의하면 소성유동영역(plastic flow zone)내의 어느 한 점에서 원주방향에 대한 속도 V_p 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_p = \frac{v}{h} V_u \left(1 - \frac{x}{h}\right) \quad (8)$$

식 (8)에서 V_u 는 업셋속도, h 는 소성유동 영역의 폭, y 는 재료의 중심에서 원주방향으로의 거리(단, $y \leq r$), x 는 접합부에서 수직방향으로의 거리(단, $x \leq h$)이다. 단, 소성유동 영역의 폭은 단면에서 일정하고 원주방향에 대한 속도는 접합부로 가면서 증가하며, x 는 h 일 때 0이라고 가정한다. 위 식에서 보면 소성유동 영역

내에서 원주방향에 대한 속도는 접합면에 가까울수록 원주방향으로 갈수록 커진다. 또한 마찰압력이 증가함에 따라 h 가 감소되고, V_u 는 증가하게 되므로 접합면에 인접한 곳에서의 V_b 는 대단히 크게 증가한다. 그러나 마찰압력 증가에 따라서 접합력이 일시적으로 증가할 수 있지만 접합부에 인접한 소성유동영역에서 원주방향의 유동속도가 크게 증가함으로 접합부에 수직으로 작용하는 성분 즉, 결합력은 감소하게 된다.

t_1 (sec) type	1	3	4	5	7
As welded					

Fig. 4-3 Fracture surface of welded specimens(STS316L/IN X-750)
at $P_1=220(\text{MPa})$, $P_2=260(\text{MPa})$, $t_2=4(\text{sec})$

4.3 인장강도와 용접조건과의 상관성

Fig. 4-4는 Table 3-3의 압력변화에 따른 인장강도 결과를 나타낸다. 이 그림에서 보면 가열압력(P_1)과 업셋압력(P_2)이 각각 80, 100(MPa)에 비해 220, 260(MPa)의 인장강도가 약 176(MPa) 정도 높게 나타났으며, 이음효율이 거의 100%가 되는 인장강도 값을 보였다. 또한 본 실험 결과 치는 타 문헌^(12~15)의 결과와도 비교적 잘 일치한다. 따라서 1단계 압력변화의 최적조건으로 P_1 과 P_2 를 각각 220, 260(MPa)로 결정하였다.

이 실험에서 사용된 마찰용접의 변수는 회전수(n), 마찰가열압력(P_1), 단조가압력(P_2), 마찰가열시간(t_1), 단조가압시간(t_2)등이며, 이종재 STS316L과 IN X-750의 마찰용접을 위한 최적 가열압력 P_1 과 최적 가압력 P_2 를 결정하기 위하여 여러 가지 문헌과 실험 데이터^(6~8)를 참고로 가압시간 $t_2=4(\text{sec})$, 회전수 $n=2000(\text{rpm})$ 으로 일정하게 하고 Table 3-3과 같이 마찰용접 조건을 변화시키면서 마찰용접을 수행하였다.

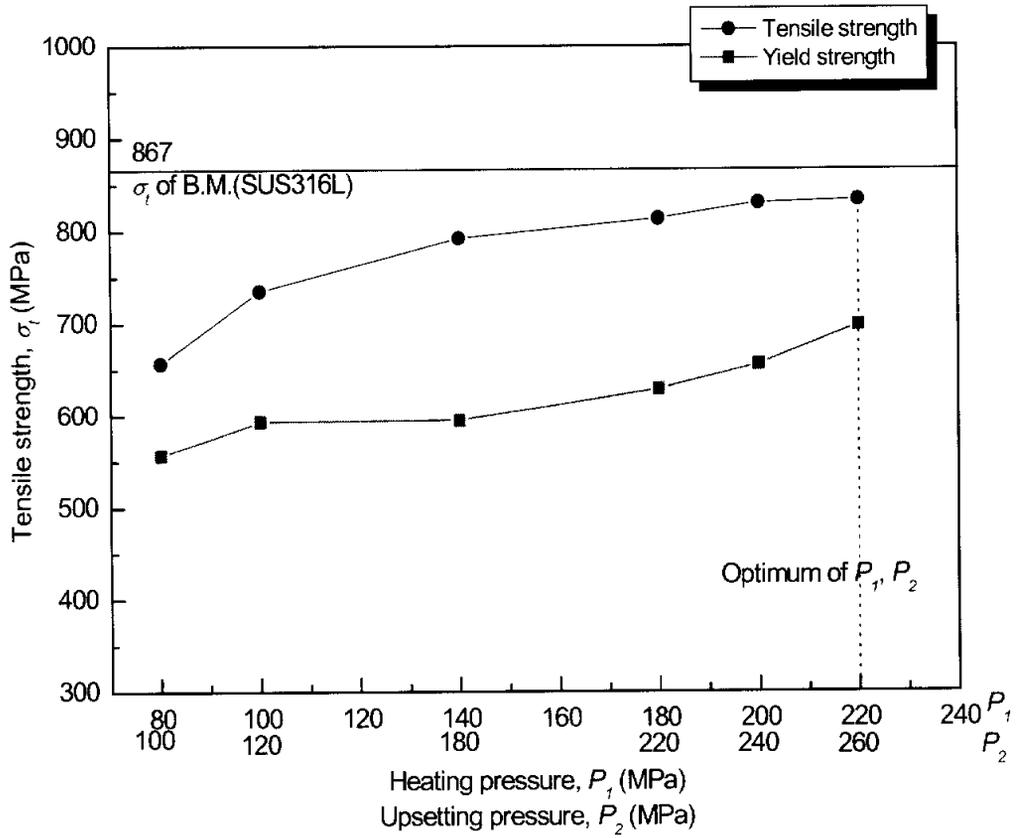


Fig. 4-4 Relationship between tensile strength and pressure in FRW of IN X-750 to STS316L

4.4 가열시간과 업셋량과의 상관성

Fig. 4-5는 STS316L(Ø11mm)과 IN X-750(Ø10mm)의 이중재 마찰용접에서 업셋량(U_1, U_2, U_T)과 가열시간(t_1)의 상관관계를 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이, 가열시간이 증가할수록 각 업셋량이 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 여기서 가열시간이 4초일 때, 총업셋량은 7(mm)로 나타났고, 7초일 때 14(mm)가 되었다. 따라서 마찰용접과정에서의 업셋길이를 조절하여 용접제품의 길이치수 정밀도 등을 요구할 때 매우 효율적인 방법이라고 판단된다.

가열시간과 각 업셋량과의 ($U_1-t_1, U_2-t_1, U_T-t_1$)의 실험적 상관관계식은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= 1.398t_1 - 0.91, (R^2=0.99) \\ U_2 &= 0.343t_1 + 0.18, (R^2=0.99) \\ U_T &= 2.16t_1 - 1.44, (R^2=0.99) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

여기서 R^2 은 데이터의 커브피팅에서 구한 기여도(coefficient of determination)로서 1에 근접하므로 실험식의 신뢰도가 매우 높다고 할 수 있다^(16~20). 타의 실험결과에서도 가열시간과 업셋량과의 사이에는 선형적인 증가관계를 나타내는 결과가 많이 보고 되고 있다.

총업셋량 U_T (mm)와 마찰가열시간 t_1 (sec)의 상관관계는 그림에서 알 수 있듯이 마찰가열시간 t_1 이 증가할수록 총업셋량 U_T 가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이 그림에서 O_tZ (optimum t_1 zone)는 $t_1=4$ sec(Fig. 4-5)이며, 이때 총업셋량은 $U_T=7$ (mm)를 나타내고 있다. U_1 는 U_T-U_2 이고, U_2 는 U_T-U_1 으로서 마찰용접 시 시간조정법 대신에 업셋조정법으로 U_1, U_2 를 최적조건으로 정하여 마찰용접 시험을 할 수 있다.

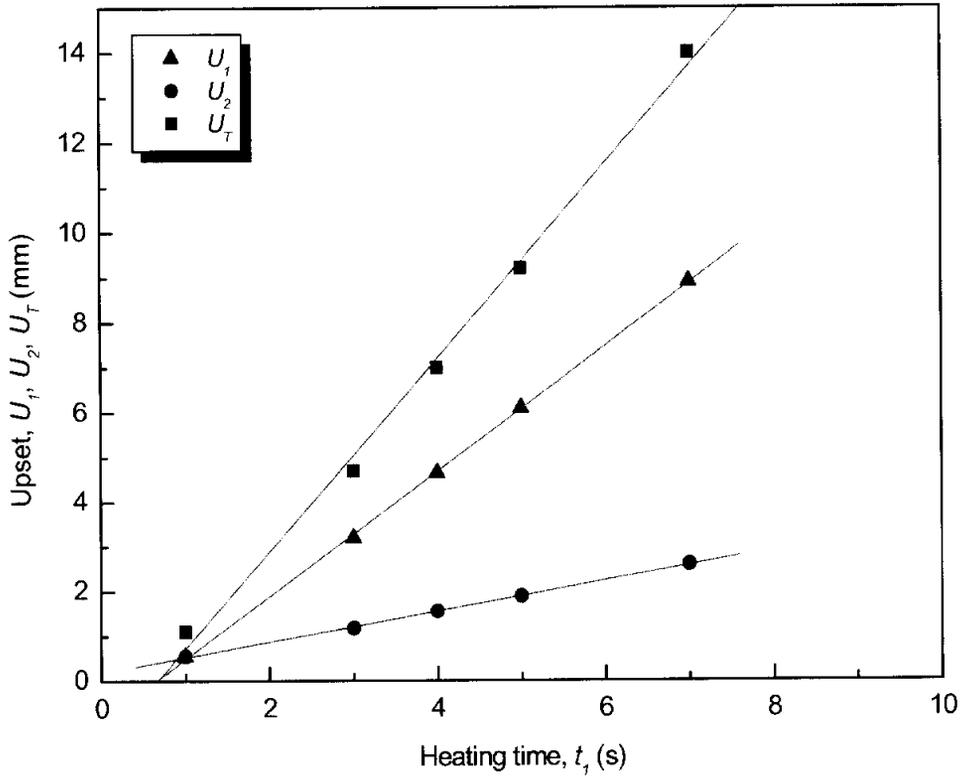


Fig. 4-5 U_1 vs. t_1 , U_2 vs. t_1 and U_T vs. t_1 for dissimilar FRW of IN X-750 to STS316L

<Welding condition : as shown in table 3-3(case2)>

4.5 용접변수와 강도와의 상관성

Fig. 4-6는 가열시간과 각종 강도(인장강도, 항복강도, 파괴강도)와의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 인장강도는 STS316L소재의 인장강도(867MPa)에 비교했을 때 $t_1=4(\text{sec})$ 조건에서 99.2% 수준으로 높게 나타났으며, 평균적으로 가열시간이 증가하면 다소 증가하는 경향을 보였다. 그러나 항복강도와 파괴강도는 가열시간이 거의 비슷한 결과를 보였고, 4초의 경우가 다소 높게 나타났다. 따라서 최적조건을 강도적인 측면에서 고려해 볼 때, 가열시간은 4초정도가 적합하다고 판단된다. 다만, 마찰용접 시 건전한 접합(인장강도만을 중심으로)이 되는 최적 조건의 범위는 비교적 넓었고, Fig. 4-4에서와 같이, 비교적 높은 용접압력에서의 결과가 실험적으로 우수하였다. 이는 타의 실험결과에서도 비슷한 결과를 보고하고 있다.

Fig. 4-7은 총업셋량과 각종 강도(인장강도, 항복강도, 파괴강도)와의 관계를 나타낸다. 그림에서의 결과 치는 Fig. 4-6과 같이 비슷한 경향을 나타내고 있다. 따라서 마찰용접 시 업셋량과 강도와의 상관성이 존재하며, 업셋량이 증가할수록 인장강도가 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 업셋량이 7mm($t_1=4\text{sec}$)일 때 각종강도 또한 비교적 높게 나타났기 때문에 4초가 적합하다고 판단된다.

Fig. 4-8은 마찰 가열시간과 연성(연신율, 단면수축율)과의 관계를 나타낸다. 그림에서 가열시간 7초의 경우를 제외한 가열시간이 1~6(sec)인 경우, 연신율은 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그리고 단면수축율도 약 20%로 비슷하게 나타나고 있다. 따라서 앞절의 강도적인 측면과 더불어 연성적인 측면에서 고려해 볼 때, 최적 마찰 가열시간은 4초가 적합하다고 판단된다. 이는 마찰용접재의 인장강도가 모재보다 높은 경우 취성의 영향이 적고, 연성이 높은 편이 우수하기 때문이다.

이상에서 알 수 있듯이, 강도적인 측면과 연성적인 측면을 조합하여 고려해 볼 때, 가열시간이 7초 이상에서는 마찰용접 조건으로 타당하지 않다고 판단된다.

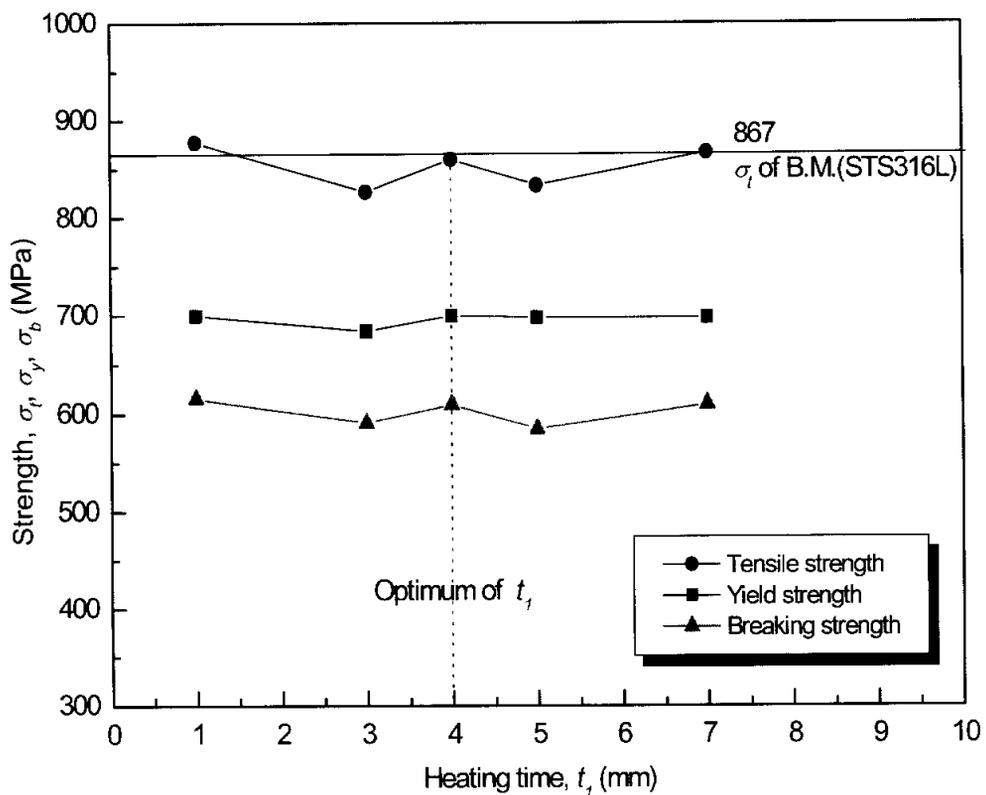


Fig. 4-6 σ_t , σ_y , σ_b vs. t_1 in dissimilar welding of IN X-750 to STS316L

<Welding condition : as shown in table 3-3>

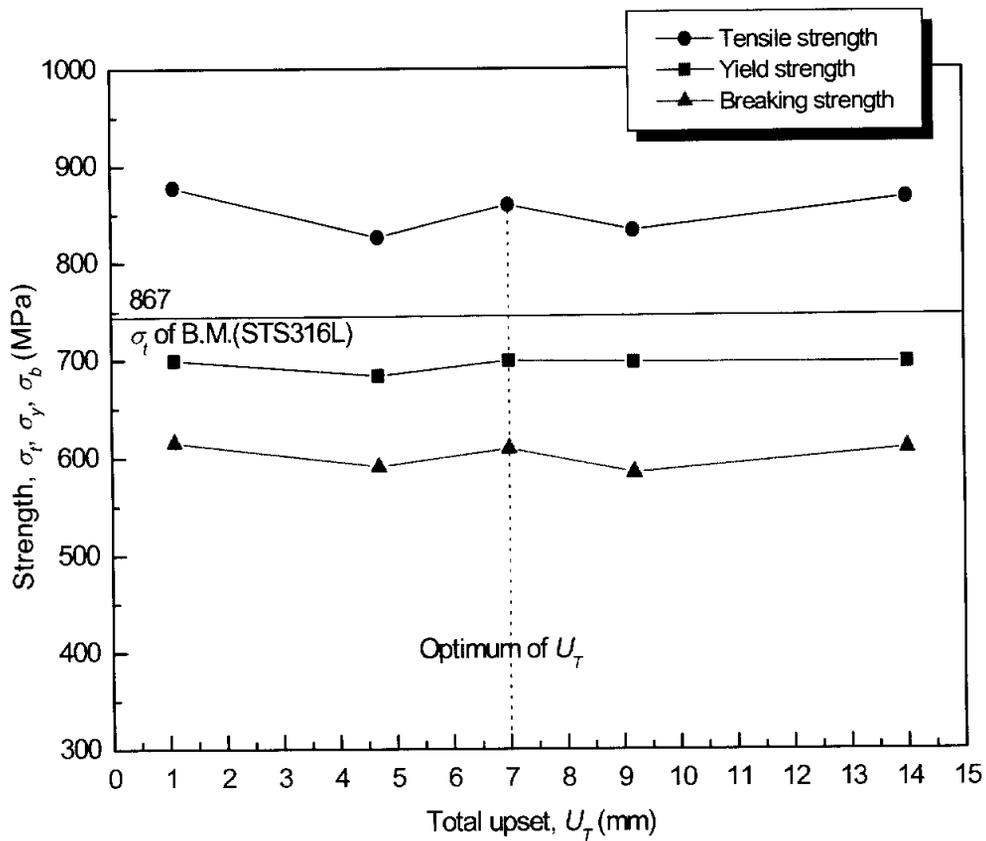


Fig. 4-7 Relationship between strength and total upset in FRW of IN X-750 to STS316L

4.6 마찰용접의 최적화

STS316L에 IN X-750의 이종재 마찰용접 최적화를 위하여 가열시간 t_1 을 변수로 하여 이음효율이 거의 100%가 되는 t_1 의 범위를 정할 수 있었다. 따라서 $O_{t_1}Z$ (optimum t_1 zone) 보다 t_1 이 낮거나 너무 높으면 인장강도가 낮아지며, 또한 이음효율이 훨씬 낮아진다. 마찰용접의 최적화를 위해 이음부의 강도와 연성(단면수축율, 연신률)의 영향을 고려할 필요가 있다. 따라서 Table 3-3(case 2)의 용접조건에 따라 용접한 용접재의 인장시험을 한 후 마찰가열시간 t_1 에 대한 용접부의 단면수축율, 연신률과의 상관관계는 Fig. 4-8과 같이 구하였다. 그림에서 알 수 있듯이 Fig. 4-6과 Fig. 4-7에서 구한 $O_{t_1}Z=4$ (sec)에서 연성(단면수축율, 연신률)이 높게 나타나므로, $O_{t_1}Z=4$ (sec)는 강도와 연성면에서 모두 우수한 t_1 범위를 알 수 있다. STS316L과 IN X-750의 이종재 마찰용접 시 인장파단부분은 STS316L측 열영향부에서 파단 되었다. 따라서 앞에서 구한 $O_{t_1}Z$ 에서 ϵ , ψ 및 σ_t , σ_y , σ_b 를 고려해 볼 때 크게 염려될 만큼 낮지 않으면 연성면에서 문제되지 않음을 알 수 있다.

Table 4-1는 STS316L($\phi 11$ mm)과 IN X-750($\phi 10$ mm)의 이종재 마찰용접의 최적 조건을 나타낸다.

Table 4-1 Optimum condition for friction welding of IN X-750 to STS316L

Dissimilar FRW	STS316L($\phi 11$ mm) \times IN X-750($\phi 10$ mm)
Rotating speed, n (rpm)	2,000
Heating pressure, P_1 (MPa)	220
Upsetting pressure, P_2 (MPa)	260
Heating time, t_1 (sec)	4
Upsetting time, t_2 (sec)	4

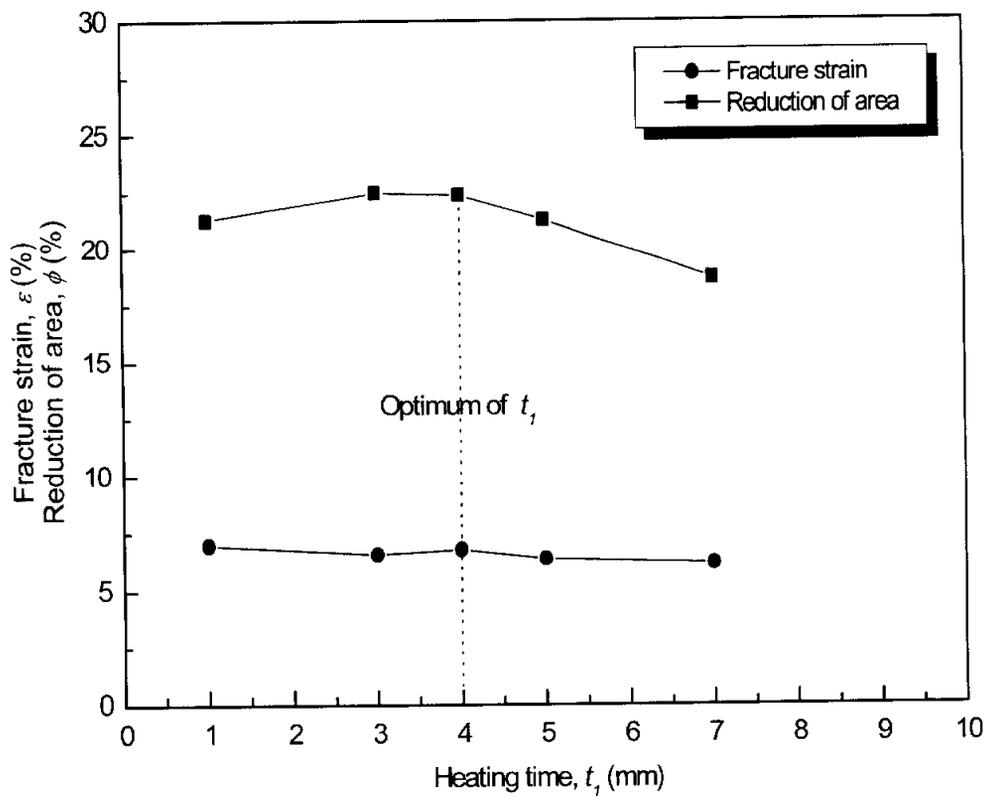


Fig. 4-8 Ψ , ε vs. t_1 in dissimilar friction welding
of IN X-750 to STS316L
<Welding condition : as shown in table 3-3(case2)>

4.7 마찰용접부의 경도분포

Fig. 4-9는 최적의 마찰용접 조건 [$n=2000(\text{rpm})$, $P_1=220(\text{MPa})$, $P_2=260(\text{MPa})$, $t_1=4(\text{sec})$, $t_2=4(\text{sec})$]하에서 용접한 시험편의 경도분포를 나타낸 것이다. 경도 측정은 용접계면에서 0.5(mm) 등간격으로 하여, 좌우 각각 8(mm)씩 중심부와 원주부의 경도분포를 조사하기 위해 2가지로 구분해서 조사하였다. 첫 번째는 시험편 직경의 중심부(#1), 두 번째는 센터에서 3mm인 지점(#2)에서 각각 조사하였다.

모재의 경도는 IN X-750이 Hv 287로 STS316L의 Hv 293보다 다소 낮은 편이며, 이들 재료의 용접계면(weld interface, W.I)의 경도는 Hv 225로서 두 재료의 모재보다 낮게 나타났다. 그리고 IN X-750측 열영향부 이후에서는 다소 차이가 있으나 모재와 비슷한 경도 값을 나타내고 있다. 그 이유는 용접경계면 부근에서 마찰용접 시 국부가열온도가 풀림온도범위^(15, 17) 내에 위치해 있었던 것으로 사료된다. 또한 열영향부(heat affected zone, HAZ)를 두 가지로 구분해서 조합해 보면, STS316L측 2.5mm+IN X-750측 1.0mm=3.5mm로 판단된다. 여기서 열영향부가 중심부와 원주부의 경도치가 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있었다. 대부분의 마찰용접에서는 원주 속도가 중심부보다 원주부에서 빠르고, 이로 인해 마찰온도가 높으며, 또 원주부의 마찰열이 중심부로 전달되어 풀림을 촉진하여 원주부의 경도치가 높게 나타나지만, 여기서는 직경이 비교적 작기 때문에 영향을 받지 않은 것으로 판단된다.

경도시험에서 특이한 사항은, 대부분은 용접계면에서 피크치를 유지 후 급격히 저하하는 현상을 나타내는데 비해, 그래프에서 알 수 있듯이 HAZ부의 경도가 일반적인 이종재 마찰용접 시 나타나는 경향과 반대 현상을 나타내고 있다. 이는 국부가열과 마찰압접 시 인장강도가 높은 STS316L과 IN X-750의 이종재간 접합성에 따른 특성이라 생각되며, 추가 실험을 통해 원인 규명이 필요할 것이다.

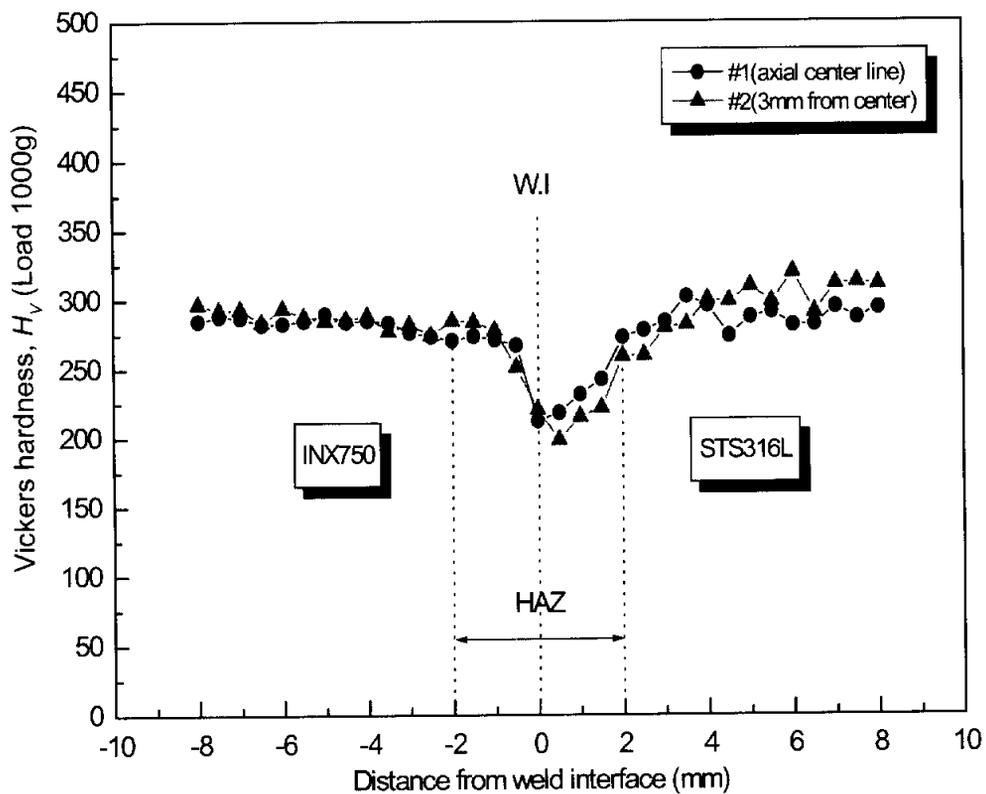


Fig. 4-9 Hardness distribution near the weld interface of friction welded joints of IN X-750(ϕ 10mm) to STS316L(ϕ 11mm)

<Welding condition : $n=2,000$ (rpm), $P_1=220$ (MPa), $P_2=260$ (MPa), $t_1=4$ (sec), $t_2=4$ (sec)>

4.8 마찰용접부의 현미경 조직

Fig. 4-10은 모재와 열영향부(HAZ) 및 마찰용접계면의 조직을 검사하기 위하여 중심축선으로 절단한 종단면에서 마찰용접경계면(W.I) 좌우 8(mm) 부근의 조직 사진이다. 현미경 조직 검사를 하기 위한 시편편은 경도시험과 같은 적정 용접 조건으로 용접한 상태의 것을 사용하였다. 부식방법으로는 켈링용액을 사용하였고, STS316L은 90(sec), IN X-750은 660(sec)으로 각각 부식하였다.

조직검사는 두 이종재의 용접계면(W.I), 열영향부(HAZ) 및 모재부(B.M)로 하였으며, 각각 200배로 확대하여 관찰 하였다. 그림에서 용접계면(b)은 두 재료가 강렬히 혼합되어, 계면의 형태가 단조롭고 직선상에 가깝게 나타났다. (c)는 STS316L 열영향부로 조대한 결정립 구조이며, (e)는 STS316L 모재부로 오스테나이트조직을 나타내고 있다. 또한 그림 (a)는 IN X-750 열영향부로써 마차 단조한 조직과 같은 치밀한 미세조직을 나타내며, (d)는 IN X-750 모재부로 마르텐 사이트조직을 나타내고 있다.

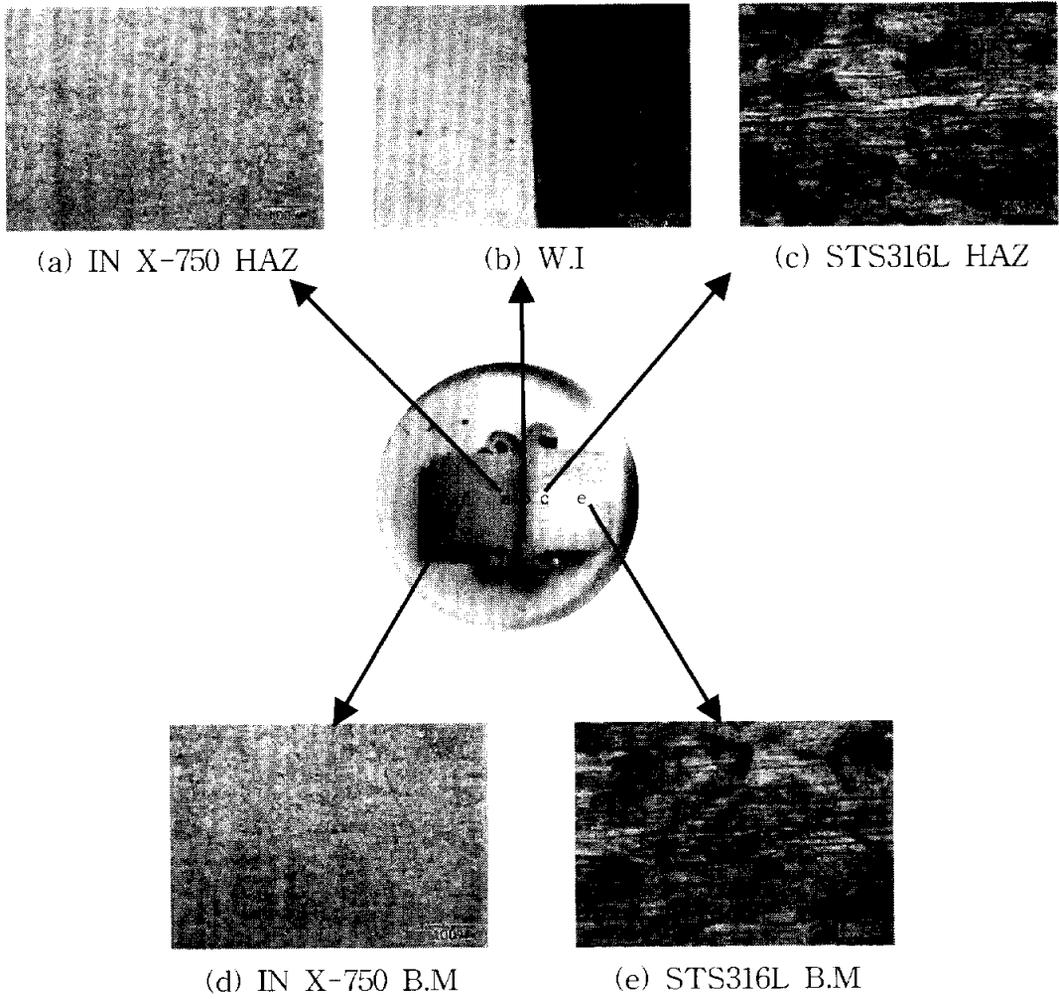


Fig. 4-10 Macro-structures of B.M, HAZ and weld interface

of friction welded joint($\times 200$) of IN X-750 to STS316L

<Welding condition : $n=2,000(\text{rpm})$, $P_1=220(\text{MPa})$, $P_2=260(\text{MPa})$, $t_1=4(\text{sec})$, $t_2=4(\text{sec})$ >

제 5 장 결 론

원자력 발전소의 RCP용 터닝밴 볼트에 적용되는 STS316L과 IN X-750의 이종 금속간의 최적 마찰용접 조건을 결정하기 위해 마찰용접 변수인 회전수, 마찰 압력, 업셋압력, 가열시간, 업셋시간 등의 상호작용에 의한 용접품질(특히 인장강도, 연성 등)과의 상관관계, 마찰용접 후 용접재의 강도적인 특성을 비교한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) STS316L과 IN X-750의 이음부 강도가 아주 양호한 이종재 마찰용접이 가능하게 되어, 재료의 기계가공에 따른 공정수와 비용 및 재료의 절감이 가능하게 되었으며, 고착부위의 재질개선으로 고착문제를 해결할 수 있을 것으로 생각된다.
- (2) 이종재 마찰용접 후 인장시험에서 인장강도가 비교적 낮은 STS316L측의 열 영향부에서 파단이 되었고, $n=2,000\text{rpm}$, $P_1=220\text{MPa}$, $P_2=260\text{MPa}$, $t_1=4\text{sec}$, $t_2=4\text{sec}$ 의 최적 마찰용접 조건에서 용접부 이음효율은 모재의 강도와 비교해 볼 때 95%이상 나타났다.
- (3) 가열시간(t_1)에 대한 업셋량(U_1 , U_2 , U_T)을 구할 수 있었고, 이는 마찰용접과정에서의 업셋길이를 조절하여 용접제품의 길이치수 정밀도 등을 요구할 경우에 효율적인 방법이라고 판단된다. 여기서 U_T-t_1 의 관계식은 $U_T=2.16t_1-1.44$ 와 같이 도출되었다.
- (4) 최적조건에서 마찰용접 한 용접부의 미세조직을 관찰한 결과 두 이종재가 강렬히 혼합하여 용융물이나 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 이룬 조직상으로 아주 양호한 상태임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) KPS/NTSC-RCP 02/98 KORI 2/RCP-1, "공사 수행 보고서", pp. 1~24, 1998.
- 2) ASME SA-479/SA-479M : Specification for stainless steel bars and shapes for USE in boilers and other pressure vessels.
- 3) ASTM A 276-88a : Standard specification for stainless and heat-resisting steel bars and shapes.
- 4) Tsuchiya, K., h. Kawamura, "Mechanical Properties of Cu-Cr-Zr alloy and STS316 Joints Fabricated by Friction Welding Method," Journal of Nuclear Materials, pp. 233~237, pp. 913~917, 1996.
- 5) Vill, V.I., "Friction Welding of Metals", pp. 1~114, 1962.
- 6) 摩擦壓接研究會, "摩擦壓接," コロナ社, pp. 32~34, p. 46, pp. 145~150, p. 184, 1979.
- 7) 日本摩擦壓接協會, "摩擦壓接協會 20年誌", p. 31, 1984.
- 8) AWS, "Welding Handbook-Vol.1, Fundamentals of Welding", 7th edition, Vol.1, pp. 153~220, 1981.
- 9) 박화순, 김우열, 강정윤, "강/비철금속 이종금속 간의 용접 및 접합", 대한용접학회지, 제14권, 제6호, 1996.
- 10) 김의환, 민택기, "인코넬 합금과 스테인레스강의 마찰용접 특성 연구", 한국공작기계학회논문집 Vol.10 No.2 2001.4, pp. 73~78.
- 11) T. Rich, R. Robert, "The forge phase of friction welding" Welding research supplement, March, pp. 137~145, 1971.
- 12) S. K. Oh, Y. S. Kong, I. J. Yoo and I. S. Kim(2000). "Creep Life Prediction for Dissimilar Friction-Welded Joints of Turbine Impeller Heat Resisting Steels and AE Evaluation(1)-FRW and AE Evaluation", Proc. of International Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Seattle, USA, pp. 203~207, 2000.
- 13) 대한용접학회, "용접 · 접합편람", pp. 663~664, 1998.
- 14) 변권수, "자동차 Shock Absorber용 강재의 이종재 마찰용접의 최적화와 실시간 AE 평가에 관한 연구", 부경대학교 공학석사학위논문, pp. 21~24, 2000.
- 15) H. S. Cho and S. J. Suh, "Friction Welding of Inconel 713C and SCM440",

Journal of KWS, Vol. 15, No. 6, pp. 78~84, 1997.

- 16) 오세규, 장홍근, 이향동, 신국식, 정문식, 송운섭, “로켓모터용 노즐의 동종재 마찰용접의 최적화와 고온 크리프 예측 및 AE평가(2)-고온 크리프 예측 및 AE평가”, 한국해양공학회 추계 학술강연 논문집, pp. 90~96, 1996.
- 17) 오세규, 장홍근, 장지훈, “Cr-Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출법에 의한 실시간 비파괴적 평가”, 한국비파괴 검사학회지, 제 15권 제 4호, pp. 511~519, 1995.
- 18) S. K. Oh, H. K. Chang and J. W. Oh, “Development of Real Time Quality Evaluation of Friction Welding by Acoustic Emission ; 2nd Report - Effects of Welding Parameters on Weld Strength and AE”, Proc. Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, pp. 177~184, 1996.
- 19) S. K. Oh, H. K. Chang, H. D. Park and B. S. Lee, “Development of Real-Time Quality Evaluation of Friction Welding by Acoustic Emission ; 3rd Report. Effects of Initial AE Counts during Plastic Deformation in FRW”, Proc. The 7th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE. Vol.4-S37, pp. 11~17, 1997.
- 20) S. K. Oh and K. K. Wang, “Effect of Welding Parameters on Weld Strength and Acoustic Emission in Friction Weld”, J. of Korea Soc. of Marine Engineers. 7(1), pp. 22~33, 1983.

List of Figure & Table

List of Figure

Fig. 2-1 Transformation of force in the atoms at distance	4
Fig. 2-2 Principle of friction welding(continuous drive brake type)	5
Fig. 2-3 Schematic mechanism of friction welding machine (continuous drive brake type)	6
Fig. 2-4 Cycle of friction welding(continuous drive brake type)	7
Fig. 2-5 Heat liberation diagram for friction welding	9
Fig. 3-1 Shape and dimension of specimens (unit : mm)	14
Fig. 3-2 Photograph showing section through FRW specimen	14
Fig. 3-3 Appearance of friction welding machine (TOHO, TH-25 continuous drive brake type)	15
Fig. 3-4 Universal testing machine(KDU-50)	17
Fig. 3-5 Vickers hardness testing machine(Model : MXT- α 7e)	18
Fig. 3-6 Metallurgical microscope(OLYMPUS BX60M)	19
Fig. 4-1 Photograph showing friction welded specimen in the as-received condition	21
Fig. 4-2 Photograph showing fractured specimens after tensile test in friction welded areas	21
Fig. 4-3 Fracture surface of welded specimens(STS316L/IN X-750) at $P_1=220(\text{MPa})$, $P_2=260(\text{MPa})$, $t_2=4(\text{sec})$	23
Fig. 4-4 Relationship between tensile strength and pressure in FRW of IN X-750 to STS316L	25
Fig. 4-5 U_1 vs. t_1 , U_2 vs. t_1 and U_T vs. t_1 for dissimilar FRW of IN X-750 to STS316L	27
Fig. 4-6 σ_t , σ_y , σ_b vs. t_1 in dissimilar welding of IN X-750 to STS316L	29

Fig. 4-7 Relationship between strength and total upset in FRW of IN X-750 to STS316L	30
Fig. 4-8 ψ, ε vs. t_1 in dissimilar friction welding of IN X-750 to STS316L	32
Fig. 4-9 Hardness distribution near the weld interface of friction welded joints of IN X-750(\varnothing 10mm) to STS316L(\varnothing 11mm)	34
Fig. 4-10 Macro-structures of B.M, HAZ and weld interface of friction welded joint(\times 200) of IN X-750 to STS316L	36

List of Table

Table 3-1 Chemical composition of materials (wt. %)	12
Table 3-2 Mechanical properties of materials	12
Table 3-3 Various condition of dissimilar friction welding of IN X-750 to STS316L	16
Table 4-1 Optimum condition for friction welding of IN X-750 to STS316L	31

감사의 글

학부 졸업 후 직장생활과 병행하여 시작한 대학원 학업이 이제 서야 결실을 맺게 되었습니다. 그동안 많은 실패와 좌절을 겪기도 했지만 여러 교수님들의 관심과 질책, 그리고 많은 격려 속에서 이렇게 한 편의 논문을 완성할 수가 있었습니다. 저의 논문이 완성되기까지 학문적인 지도를 아낌없이 해주신 여러 교수님께 먼저 깊은 감사를 드립니다. 특히 세심한 지도로 본 논문이 완성되기까지 시종일관 관심과 격려를 기울여 주시고 충분한 가치를 지닐 수 있도록 여러 모로 지적을 아끼지 않으신 유인일 지도교수님께 고개숙여 감사의 말씀을 올립니다. 그리고 논문의 심사를 맡아주신 하만경 교수님과 강대민 교수님의 관심에도 감사드립니다. 여러 교수님께서 주신 아낌없는 지도를 영원히 잊지 않고 간직하도록 하겠습니다.

바쁘신 와중에도 여러모로 이 후배에게 많은 도움과 신경을 써주신 공유식 박사님과 시험편 제작과 가공에 많은 도움을 주신 세성정밀 김형해 사장님께 감사드립니다. 그리고 원자력 정비기술 센터 정진태 팀장님, 강정갑 과장님, 엄익철 주임님, 한일이 주임님 그리고 RCP팀원 모든 분들께 감사드리며 이 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

오늘이 있기까지 끊임없는 교육열과 사랑으로 항상 저의 뒷바라지를 해주신 부모님의 은혜에 무엇보다도 감사드리며, 이 모든 영광을 돌리고 싶습니다. 항상 아들의 의견을 존중해주시고, 관심을 두심에 있어서 모자람 없이 보살피 주신 부모님의 은혜는 평생 잊지 않고 보답해 드리겠습니다. 그리고 거제도 신현교회에서 목회하시느라 바쁘신 와중에도 항상 기도로서 후원해 주신 형님과 형수님, 그리고 전방에서 통신장교로서 열심히 군복무 중인 동생 기완에게도 감사드리며 이 기쁨을 함께 나누고 싶습니다. 사랑스런 두 조카 현균 이와 세은 이와도 이 기쁨을 함께 하고 싶습니다. 또 항상 곁에서 물심양면으로 걱정해주고, 많은 도움을 준 경화에게도 감사를 드리며 이 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

2004年 8月

辛基碩 拜上