

인코넬 합금과 스테인레스 강의 마찰용접 특성 연구

김의환*, 민택기**

A study on the friction weldability of inconel alloy - stainless steel

Eui-Hwan Kim*, Taeg-Ki Min**

Abstract

In this study, the friction weldability and properties of inconel alloy(IN738LC) to stainless steel(STS304) was investigated. Upset length increased according to increment of friction pressure and time. The tensile strength of the friction welding reached 85% of the STS304 base metal strength under the conditions of 8sec friction time, 50MPa friction pressure and 150MPa upset pressure. From the result of fracture surface analysis, IN738LC section can be joined with STS 304 materials in shape of a convex lens. Also, the temperature of welded interface was measured with k-type thermocouple. Finally the plastic flow confirmed at the welded interface STS304 by micro test.

Key Words : Friction welding(마찰용접), Solid state(고상상태), Plastic flow(소성유동), Friction time(마찰시간), Brake time(정지 시간)

1. 서론

마찰용접은 재료를 맞대어 가압한 상태에서 상대 운동시켜 접촉부에 발생하는 마찰열을 이용하여 고상상태⁽¹⁾(Solid state)로 압접하는 방법이다. 마찰용접은 국부적으로 마찰하는 접합부에서 만 열이 발생하므로 열 영향부(HAZ)가 좁고, 소성유동(Plastic flow)에 의한 금속원소의 확산과 이동으로 접합이 이루어지기 때문에 우수한 용접결과를 얻을 수 있다. 특히 마찰용접은 용융조직이 생성되지 않으므

로, 이종금속(Dissimilar metal)의 접합에 매우 효과적이다. 이종금속의 접합은 재질간에 물리적 또는 기계적 성질에 있어서 차이가 크므로 두 재료간에 강도와 조직학적인 측면에서 신뢰성 있는 접합이 요구된다. 마찰용접법은 소성 변형만을 고려할 때 계면의 접촉 및 기계적 결합으로 접합이 이루어진다. 그러나 미시적으로는 마찰운동에 의한 가열 및 표면 오염물질의 제거로 새로운 하부금속 표면을 생성하고, 압력에 의해 이들 표면이 원자간 견인 범위 이내로 접촉하였을 때 접합이 이루어지는 것을 기본 원리로 한다.

* 충남대학교 대학원 기계공학과(kimehwa@kepeco.co.kr)
** 충남대학교 기계공학과

마찰용접은 기계의 효율을 떨어뜨리고 재료를 손상시키는 마찰열의 결점을 역으로 이용한다는 점에서 다른 용접방법과 크게 다르다. 이종금속의 용접은 금속간 화합물 생성 여부, 상호용융도 문제와 강도 조합에 있어 경질과 경질재료, 경질과 연질재료에 따라 그 용접특성을 달리한다. 초합금과 스테인레스강의 이종금속접합은 경질과 경질간의 접합으로 비교적 충분한 강도를 얻을 수 있는 것으로 알려져⁹⁾ 있다. 본 연구에서는 가스터빈연소기 버너로 사용되고 있는 인코넬 합금과 스테인레스강과의 마찰용접을 다루었다. 인코넬(IN738LC)은 슈퍼알로이¹⁰⁾(Superalloy)라 불리는 니켈계 초합금으로서 주요 성분으로 Ni를 함유하고 있고, 많은 양의 크롬을 함유하고 있다. IN738LC는 주조합금으로서 고온에서 내열성이 우수하기 때문에 가스터빈 연소용 버너(Burner) 및 터빈 블레이드(Turbine blade) 등 고온 부품의 중요한 재료로 사용되고 있다.

특히, 가스터빈 연소용 버너의 노즐부분은 화염이 분출하는 고열에 노출되므로 고가의 인코넬 주조품으로 제작되지만, 연료인 천연가스(LNG)가 공급되는 버너 상단부는 고열에 노출되지 않으므로 값이 저렴하고 내열성이 좋은 스테인레스 재질로 제작되어 있고, 두 재료를 티그용접(Tig welding)하여 사용해 왔다. 그러나 서로 다른 이종금속을 전주용접하면 많은 용접공정이 소요되고 이종재료에 따른 용접부위에서 균열이 발생하는 등 문제점이 발생되었다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 용융용접의 결점을 보완하고자, 지금까지 거의 시도 해보지 않았던 인코넬합금과 스테인레스강의 이종금속 마찰용접을 시도함으로써 마찰용접 특성을 평가하고자 하였다.

2. 실험재료 및 실험기기

2.1 실험재료

본 실험에 사용된 재료는 초합금인 IN738LC와 STS304로서 두 재료 모두 직경이 20mm, 길이는 100mm의 환봉 형태이며, 용접 전에는 모든 시험편의 용접면을 선삭 가공하였다. 또한 기름과 같은 이물질의 영향을 배제하기 위하여 용접면을 아세톤으로 세척하였다. 이들 재료의 화학조성과 기계적 성질은 Tables 1, 2에 각각 나타내었다.

2.2 실험기기

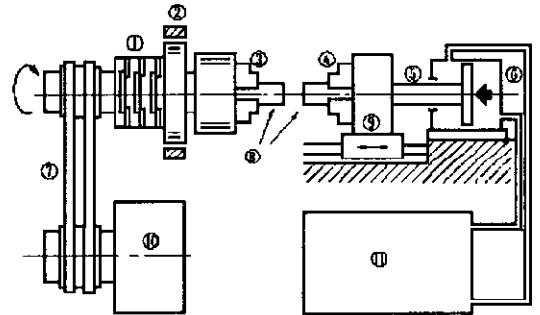
본 실험에서 사용한 마찰용접기는 Fig. 1과 같이 NSF-

Table 1 Chemical compositions of materials (wt.%)

Materials	Ni	Cr	Co	W	Mo	Ti			
IN738LC	Bal	16	8.5	2.6	1.7	3.4			
Materials	Al	Cb	C	B	Ta	Zr			
IN738LC	3.4	0.9	0.11	0.01	1.7	0.05			
Materials	C	Cr	Ni	Mn	P	S	Si	Fe	Al
STS304	0.08	18.1	9.1	2.1	0.04	0.03	0.9	Bal.	-

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_v (MPa)	Vickers hardness (Hv)
IN738LC	1,060	918	-
STS304	650	360	224



- ①clutch ②brake ③rotation chuck ④fixed chuck ⑤piston
- ⑥hydraulic cylinder ⑦drive belt ⑧specimen
- ⑨reciprocal table ⑩electric motor
- ⑪hydraulic system

Fig. 1 Schematic diagram of conventional brake type friction welding machine

30H의 브레이크 타입(Brake type)으로서 회전축과 고정축, 업셋압력(Upset pressure)이 작용하기 이전에 회전을 급정지시키기 위한 브레이크 장치, 가압력을 얻기 위한 유압장치 등으로 구성되어 있다. 마찰용접부의 온도를 측정하기 위하여 K-Type 열전대를 사용하였으며, 마찰용접부의 인장시험은 INSTRON 인장시험기(Model : INSTRON, UK)를 사용하였으며, 인장시험편은 Yashan¹¹⁾ 등이 사용했

던 방법과 같이 용접경계면에서 멀리 떨어진 스테인레스강 모재에서 파단이 일어나는 것을 방지하고, 접합면에 인접한 스테인레스강의 소성변형을 제한하여 정확한 인장강도를 얻어내도록 Fig. 2와 같이 설계하였다. 용접부의 금속조직을 관찰하기 위한 부식액⁽⁶⁾으로는 초산 10cc, 염산 25cc, 글리세린 20cc를 혼합하여 사용하였으며, 용접부의 조직은 전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

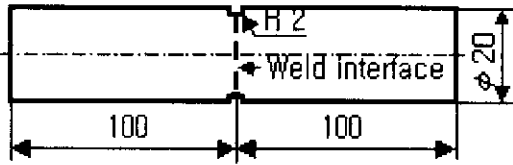


Fig. 2 Schematic of the tensile test specimen

2.3 실험방법

본 실험에서는 용접부의 강도를 향상시키기 위하여 최적조건을 찾을 수 있는 시간 규제법⁽⁶⁾을 사용하였다. 시간 규제법은 시간변수를 일정하게 변화시키므로써 재현성이 좋은 용접 결과를 얻을 수 있기 때문이다. 예비실험을 통해서 적절한 용접조건을 선정한 다음, Table 3에서 보여주는 바와 같이 마찰시간 t_1 을 2초에서 12초까지 2초 간격으로 변화시키고, 마찰압력 P_1 은 30MPa, 50MPa, 60MPa 조건으로 3가지로 정하였고, 업셋압력 P_2 는 150MPa로 고정된 상태에서, 회전수 2000rpm에서 마찰용접을 실시하였다. 회전축에는 IN738LC시편을, 고정축에는 STS304시편을 물리고, 양 축으로부터 돌출된 재료들의 길이는 30mm가 되도록 하였다.

Table 3 Friction welding conditions

Items	Conditions	Items	Conditions
Friction pressure P_1 (MPa)	30, 50, 60	Upset pressure P_2 (MPa)	150
Friction time t_1 (sec)	2~12	Upset time t_2 (sec)	3

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰용접부의 총업셋길이

마찰용접은 용가제 없이 두 소재간의 마찰발열을 이용, 가압하여 접합이 이루어지기 때문에 비교적 경한 재질의 마찰용접에서도 업셋량은 접합부에서 플래시(Flash)가 배출되어 업셋길이의 변화가 발생하게 된다. 업셋길이는 용접조건 및 재료의 특성에 따라서 변화되기 때문에 업셋길이를 분석함으로써 용접특성을 유추할 수 있다. Fig. 3에서 마찰용접 업셋길이는 1.0mm미만으로 STS304 축에서만 매우 짧게 나타났다. STS304 재질에 비하여 상대적으로 경한 재질인 IN738LC 축은 거의 업셋이 발생되지 않았다. 업셋길이를 분석하기 위한 용접조건은 업셋압력이 150MPa, 마찰압력은 30MPa, 50MPa, 60MPa로, 마찰시간은 2초~12초까지 2초 간격으로 변화시킨 경우의 총업셋길이를 나타내었다. 총업셋길이는 마찰압력과 마찰시간이 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 마찰용접에서 흔히 볼 수 있는 전형적인 현상⁽⁷⁾이다. 브레이크 방식의 마찰용접에서 업셋 제어법은 사전에 설정한 업셋량에 도달하면 용접이 완성되므로 용접 치수가 정밀한 제품을 대량생산할 수 있다. 따라서 최대 인장강도를 얻는 업셋길이를 규제함으로써 용접 품질이 우수한 규격품을 대량생산할 수 있기 때문에, 업셋길이는 재료의 질약, 품질 및 생산성에 있어서 중요한 인자로서 활용될 수 있다.

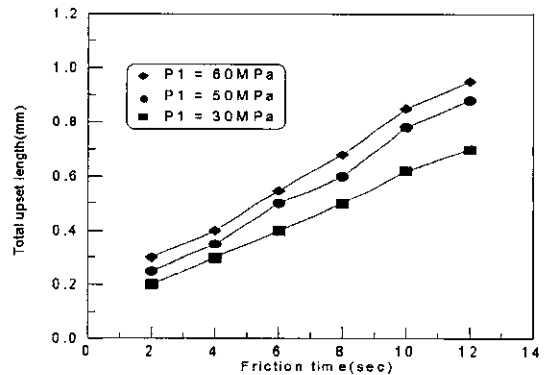


Fig. 3 Relationship between the total upset length of friction time and pressure

3.2 마찰용접부의 온도측정

용접시험편의 축방향 온도분포 및 용접부의 최고온도를 추정하기 위해 마찰열에 의하여 발생하는 온도를 측정하였다. 열 전대는 마찰면으로 부터 STS304 쪽으로 각각

3.0mm, 6.0mm, 12.0mm 떨어진 위치에 크로멜-아루멜 열전대(K-type)를 삽입하였다. 적용된 마찰시간은 8초였고, 측정된 브레이크 타임(t_b)은 3초, 마찰압력은 50MPa, 엽셋압력은 150MPa이었다. Fig. 4에서 보여주는 바와 같이, 용접계면으로부터 가장 가까운 3.0mm 떨어진 위치에서의 온도는 마찰의 시작과 함께 급격히 상승되었고, 마찰압력이 끝나고, 엽셋압력이 시작되는 9초 후가 최고 684℃에 도달하였다. 용접계면으로부터 6.0mm 떨어진 위치에서는 온도 상승과 최고 온도에 있어서 3.0mm 떨어진 곳에 비해 약간 낮았으나, 온도추세곡선은 비슷한 형상으로 나타났으며, 역시 엽셋압력이 작용되는 9초 후에 최고 632℃까지 도달하였다. 그리고 용접계면으로부터 12.0mm 떨어진 위치에서는 온도 상승추세는 이 보다 완만하였고, 마찰면과의 거리차이에 의한 열 전도의 시간지연으로 마찰이 시작되고 5초가 경과된 이후부터 서서히 상승하다가 25초 후에야 최고 237℃에 도달되었으며, 그 이후는 비슷한 수준을 유지하다가 미소하게 저하되었다. 주어진 마찰시간과 브레이크 타임(감속과정)을 고려해 볼 때, 각 마찰압력 별로 측정된 최고 온도는 마찰압력이 끝나고, 엽셋압력이 작용하는 과정중의 온도이다. 마찰압력에 상관없이 엽셋압력이 작용하는 과정중의 시간에 온도가 상승된 것으로 미루어 보아, 브레이크 타임 바로 전 까지 온도가 상승되었다고 생각된다. 만일, 긴 마찰시간을 적용하여 용접부의 온도가 정상상태에 도달했다면, 마찰시간의 종료와 함께 최고온도가 얻어지며, 엽셋압력의 변화에 따른 온도분포의 차이는 크게 줄어들 것으로 생각된다. 온도실험 결과 STS304의 열전도 특성 상 용접계면으로부터 3.0mm와 6.0mm 떨어진 곳에서도 온도차이가 발생하였으며, 12mm가 떨어진

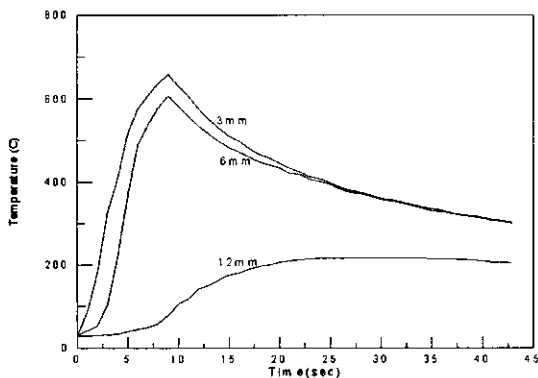


Fig. 4 Temperature distributions of axial direction in the STS304(3mm, 6mm, 12mm)

곳에서는 온도곡선의 형상이 다르게 나타난 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 접합면의 온도는 STS304 시편의 세 지점 온도곡선을 고려해 볼 때, 용접계면에서의 최고 온도는 약 730℃ 근처일 것으로 예상된다.

3.3 마찰용접부의 인장강도

마찰용접부에 대한 인장강도를 평가하기 위하여 인장파단되는 면이 용접경계면에서 파단이 일어나게 하여 정확한 인장강도를 측정할 수 있도록 용접경계면에 반지름이 2mm 되게 홈을 내어 인장시험을 하였다. Fig. 5는 인장시험결과로써 마찰용접 후에 마찰시간(t_f)과 인장강도와의 관계를 나타낸 것이다. 마찰용접부의 인장강도는 마찰시간이 증가함에 따라서 함께 증가하다가 마찰시간이 10초 이상에서는 미소하게 감소되는 것으로 나타났다. 이와같이 마찰시간과 인장강도의 관계에서 볼 때, 마찰시간이 작아서 발열이 부족했던 2초에서 가장 낮은 인장강도를 보이다가 마찰시간이 증가함에 따라 인장강도도 점점 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 8초에서 10초대에서 최대의 인장강도를 나타내었다. 이때의 인장강도값은 553MPa로 STS304 모재의 인장강도 650MPa 값의 85.0%에 도달하였다.

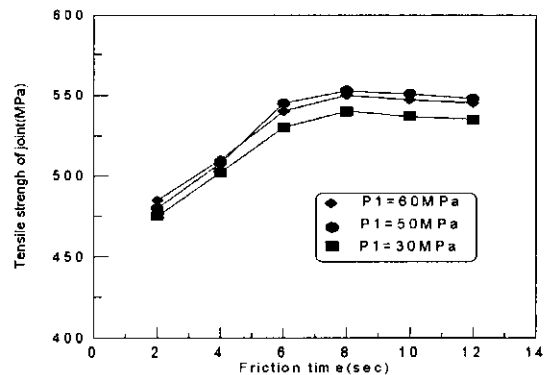


Fig. 5 Tensile strength of IN738LC-ST304 welded interface

3.4 인장파단면의 분석

Photo 1은 마찰시간 8.0초, 엽셋압력 150MPa인 조건으로 마찰용접한 IN738LC 축을 나타낸 것이다. 전체적인 형상은 STS304 원소가 모재에서 떨어져 나와서 IN738LC 파단면에 볼록렌즈(Convex lens)모양으로 부착된 것을 관찰할 수 있다. 마찰압력이 작은 30MPa 조건에서는 파단면이 중간부분에서 초생달 모양으로 움푹 패인

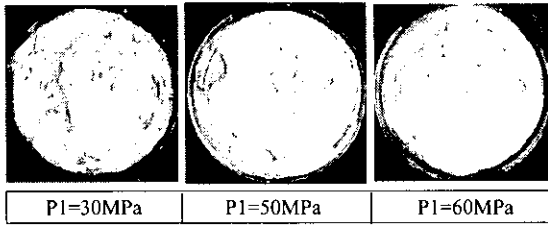


Photo 1 Fracture surface of IN738LC -ST304 welded specimens

것을 볼 수가 있는데, 이것은 발열이 부족하여 확산유동이 충분하지 못한 결과이다. 50MPa 조건의 파단면은 초생 달형태의 페인부분이 작아진 것을 볼 수 있으며, 이에 반하여 마찰압력이 가장 높았던 60MPa 조건의 파단면은 전체가 비교적 균일한 평활한 면을 관찰할 수 있다.

이것은 STS304 소재가 마찰압력의 증가에 따라서 확산유동이 점차 증가되어 STS304의 재질에 비하여 경한 IN738LC 쪽으로 금속간 확산이 일어나 부착된 것으로 판단된다. Sada와 Bahrani⁶⁾는 기계적 특성이 매우 다른 이종금속의 마찰용접에서 고 경도 금속의 표면은 연질금속의 피막에 의해 용접과정 초기에 완전히 덮여지며, 이러한 현상은 마찰이 진행되는 과정에서 떨어져나온 연질재료가 경질금속에 확산 이동되기 때문이라고 하였다. 최대 인장강도 값을 보인 마찰용접 조건의 인장시편 파단면을 Photo 2와 같이 전자현미경(SEM)으로 관찰결과 딴플(Dimple)이 차지하는 면적은 증가되었으며 중심부를 제외한 파단면의 대부분에서 딴플이 나타났다.

중심부의 용접이 불완전한 것은 중심부로 갈수록 상대속도가 거의 0에 가까워 마찰열 발생이 적었기 때문으로 생각된다.

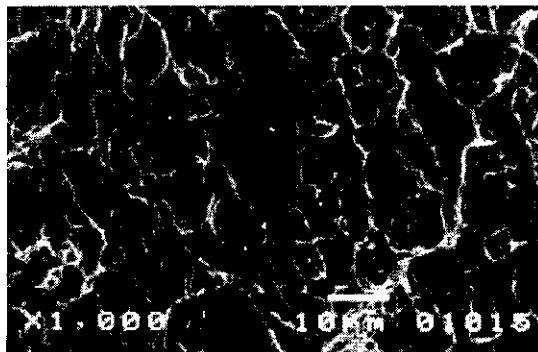


Photo 2 Microstructure of tensile fracture surface

Rich와 Robert⁹⁾의 이론적 해석에 의하면 소성유동영역(Plastic flow zone)내의 어느 한 점에서 원주방향에 대한 속도 V_p 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_p = \frac{y}{h} V_u (1 - \frac{x}{h}) \quad (1)$$

식 (1)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 영역내에서 원주방향에 대한 속도는 접합면에 가까울수록 원주방향으로 갈수록 커진다. 또한 마찰압력이 증가함에 따라 h 가 감소되고, V_u 는 증가하게 되므로 접합면에 인접한 곳에서의 V_p 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.

3.5 전자현미경 금속조직

Photo 3에서 알 수 있는 바와 같이 IN738LC의 경계면 우측에 STS304 원소가 확산유동되어 IN738 표면에 부착된 STS304 재료의 부착층을 관찰할 수 있다. 이 부착층의 두께는 약 0.3mm로서 STS304 열향부의 금속조직과는 확연하게 구별되는 마찰에 의한 확산유동층임을 관찰할 수 있다. 또한 STS304 조직이 미세화된 현상을 관찰할 수 있으나, IN738LC에서는 상대적으로 미세화현상이 미소한 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 용접이 훨씬 높고, 경한 IN738LC는

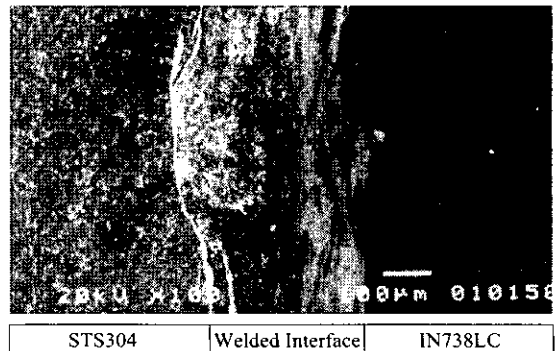


Photo 3 Microstructure of IN738LC-ST304 welded interface

소성변형이 거의 발생되지 않은 것으로 나타났다. 특히 STS304의 소성변형은 IN738LC 재질에 비하여 상대적으로 연질재질로서 소성변형이 용이¹⁰⁾하기 때문에 IN738LC에서는 볼 수 없는 소성유동 현상이 용접경계면을 지나 열영향부(HAZ)에서 금속조직변화가 이루어진 것을 관찰할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 IN738LC와 STS304 소재를 마찰용접 한결과 우수한 접합결과를 얻었으며, 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 마찰용접 업셋길이는 마찰시간 증가에 따라 증가되는 것으로 나타났으며, 플래시는 상대적으로 경도가 낮은 STS304 시편에서 만 나타났다.
- (2) 마찰용접 기간동안의 접합부의 온도상승은 마찰시간이 끝나는 9초후에 최고 684℃ 나타났으며, 접합부에서 6mm 떨어진 곳은 632℃에 도달하였다.
- (3) IN738LC-ST304 접합부의 최고 인장강도는 회전수 2000rpm, 마찰시간 8.0~10.0sec, 마찰압력 50MPa의 조건에서 STS304 모재의 인장강도 대비 약 85%수준인 553MPa로 나타났다.
- (4) 인장파단면을 분석한 결과 소성유동에 의하여 상대적으로 경도가 높은 IN738LC 파단면에 볼록렌즈형상으로 스테인레스 원소가 약 0.3mm 두께로 부착되어 있으며 부착두께는 마찰시간과 마찰압력의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- (1) 마찰압접협회, "마찰압접" 코나 제1장, pp. 1~2, 1979.
- (2) 대한용접학회 "용접, 접합편람" pp. 663~664, 1998.
- (3) Elihu F. Bradley, "Superalloys" pp. 5~6, 1989.
- (4) D. Yahan S. Tsang, W. L. John, M. W. Doughty, "Inertia friction welding of 1100 aluminium to type 316 stainless steel" welding journal, pp. 27~37, August, 1987.
- (5) 한상옥역 "금속현미경 해설" pp. 53~54, 1987.
- (6) Yu. D. Potapovetal., "Scope for temperature regulation in the friction welding of dissimilar materials", Svar. proiz., No. 2, pp. 1~3, 1971.
- (7) 윤병수, 강성보 "마찰용접에서 A2024와 SM45C의 삽입재에 관한연구", 한국공작기계학회지, 제7권 제6호, pp. 21~22, 1998.
- (8) 박화순, 김우열, 강정윤, "강/비철금속 이종금속 간의 용접 및 접합", 대한용접학회지, 제 14권, 제6호, 1996.
- (9) T. Rich, R. Robert, "The forge phase of friction welding" Welding research supplement, March, pp. 137~145, 1971.
- (10) Thomas H. Hazlett, "Prooerties of friction welds between dissimilar metals" Welding research supplement pp. 415~416, October, 1962.