

# 마찰 교반 용접된 철도 차량용 A6005 압출재의 기계적 성능 향상을 위한 최적 공법 설계

원 시 태\* · 김 원 경\*\*†

\*서울산업대학교 금형설계학과  
\*\*한국철도기술연구원 시험인증센터

## Optimum Design of the Friction Stir Welding Process on A6005 Extruded Alloy for Railway Vehicles to Improve Mechanical Properties

Si-Tea Won\* and Weon-Kyong Kim\*\*†

\*Dept. of Die & Mould Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 130-743, Korea  
\*\*Korea Railroad Research Institute, Uiwang 437-757, Korea

†Corresponding author : wkkim@krri.re.kr

(Received August 8, 2009 ; Revised August 28, 2009 ; Accepted October 1, 2009)

### Abstract

Recently, extruded aluminium-alloy panels have been used in the car bodies for the purpose of the light-weight of railway vehicles and FSW(Friction Stir Welding), which is superior to the arc weldings, has been applied in the railway vehicles. This paper presents the optimum design of the FSW process on A6005 extruded alloy for railway vehicles to improve its mechanical properties. Rotational speed, welding speed and tilting angle of the tool tip were chosen as design parameters. Three objective functions were determined; maximizing the tensile strength, minimizing the hardness and maximizing the difference between the normalized tensile strength and hardness. The tensile tests and the hardness tests for fifteen FSW experiments were carried out according to the central composite design table. Recursive model functions on three characteristic values, such as the tensile strength, the hardness difference( $\Delta H_v$ ) and the difference of normalized tensile strength and  $\Delta H_v$ , were estimated according to the classical response surface analysis methodology. The reliability of each recursive function was verified by F-test using the analysis of variance table. Sensitivity analysis on each characteristic value was done. Finally, the optimum values of three design parameters were found using Sequential Quadratic Programming algorithm.

Key Words : FSW, Sensitivity analysis, Tensile strength, Hardness, Normalized tensile strength, Normalized  $\Delta H_v$ , Response surface analysis methodology, Optimization

### 1. 서 론

최근 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)사에서 개발된 마찰 교반 용접 공법(Friction Stir Welding process)은 재료가 비 용융된 상태에서 접합시키는 고상 접합 기술(solid state welding technology)로 현재

알루미늄 합금을 비롯하여 기존의 아크 용접 기술로 접합하기 어려운 많은 재료의 접합에 이용되고 있다<sup>1)</sup>. 마찰 교반 용접은 용접 이하의 온도에서 재료를 접합시키기 때문에 다른 접합방식에 비해 열변형이 적어서 용접부의 기계적 강도가 우수할 뿐만 아니라, 화염이나 기공 및 잔해가 남지 않는다. 또한, 용접 후 특별한 표면처리가 필요 없고, 용접봉 등의 소모성 부재 및 차단 가스

(shielding gas)가 필요하지 않기 때문에 매우 환경 친화적이고 경제적인 공법이다<sup>2)</sup>. 이러한 장점 때문에 마찰 교반 용접 공법은 현재 항공, 조선, 자동차 및 철도 차량 등 다양한 산업분야에 적용되고 있다<sup>3)</sup>.

특히 일본에서는 철도 차량을 중심으로 마찰 교반 용접 기술의 적용 예가 활발히 증가하고 있다. Hitachi사는 마찰 교반 용접 공법을 이용하여 자기지지방식의 내장 판넬 모듈을 적용한 A-Train을 개발하였다<sup>4)</sup>. A-Train은 마찰 교반 용접을 이용하여 제작된 변형이 최소화된 정밀 이중 구조(double skin)의 차체 내부에 자기 지지 방식의 모듈화된 내장 구조를 최소한의 볼트를 사용하여 삽입 체결한 차량으로써, Life-Cycle cost가 감소되고 재활용성이 대폭 향상되는 특성이 있다. 또한, Hitachi사는 마찰 교반 용접 공법을 이용하여 차체 바닥판의 일면 용접이 가능하도록 이음부 설계 기술을 개발하여 7000계 신간선의 바닥판에 적용하였고, 실제 광폭 패널을 제작하였다<sup>5)</sup>. 유럽의 Hydro Aluminum사는 TGV 객차의 지붕을 마찰 교반 용접 공법으로 제작하여 Alstom사에 제공하고 있다. 국내 철도차량의 경우에는 아직 마찰 교반 용접 공법을 적용한 알루미늄 차체를 제작하지 못하고 있으나 이를 적용하기 위해 노력하고 있는 중이다.

일반적으로 마찰 교반 용접 부재는 아크 용접 부재에 비해 기계적 강도 및 피로성능이 우수하다고 알려져 있지만, 모재의 재질 및 두께에 따라, 그리고 용접 공구의 이송 속도 및 회전 속도 등 용접 조건의 변화에 따라 그 특성이 달라진다<sup>6)</sup>. 지금까지 다양한 재료에 대하여 용접 부재의 인장강도와 용접 조건과의 관계를 규명하려는 연구는 많이 이루어졌지만<sup>7,8)</sup>, 인장강도를 최대화시키기 위한 최적의 용접 조건을 찾으려는 시도는 거의 이루어 지지 않았다. 또한, 대표적 기계적 특성 중 하나인 경도에 대해선 용접 전과 후의 경도 변화만 관찰했을 뿐, 용접 조건이 경도 변화에 끼치는 영향을 알아보거나 경도를 향상시키기 위한 노력은 시도된 바가 없다.

따라서 본 논문에서는 철도차량의 차체 제작용으로 많이 활용되는 A6005 압출재에 대하여 인장강도와 경도를 향상시키기 위한 마찰 교반 용접 공정의 최적 조건을 표면 반응 분석법을 이용한 최적 설계 기법<sup>9)</sup>을 사용하여 찾아냈다. 실험계획법에 따라 3개의 용접 변수 즉, 공구 이송속도, 회전 속도, 경사각을 변화시키며 15번의 마찰 교반 용접을 수행하였고, 각각에 대해 인장 시편과 경도 시편을 제작하여 인장 강도 및 경도를 측정하였다. 측정된 인장 강도 및 경도를 바탕으로 인장 강도, 경도 감소량 및 정규화된 인장 강도와 경도 감소량을 성능지수로 하는 3개의 근사화 모델을 생성하고

이를 이용하여 인장 강도와 경도를 향상시키기 위한 용접 변수들의 최적인 값을 도출하였다.

## 2. 마찰 교반 용접 공정

Fig. 1은 마찰 교반 용접 공정을 보여주는 사진이다. 마찰 교반 용접의 기본 개념은 매우 단순하다. 특이한 형상의 핀(pin)이 장착된 공구(tool)가 회전하면서 모재의 맞대기 틈새(abutting edges of base plates)로 삽입되고, 용접선(line of joints)을 따라 움직인다. 공구의 숄더(shoulder)부는 일정 온도(200-300 °C)로 예열되어 있어서, 숄더부와 접촉하는 지점에서 모재를 국부적으로 가열시킨다. 한편, 모재의 맞대기 틈새로 삽입된 회전하는 핀에 의해 모재와 핀 사이에 마찰열이 발생하게 되고, 모재의 재질이 연화된다. 공구가 이동함에 따라 연화된 재질내부에 소성유동이 발생하게 되고, 서로 혼합되면서 결국 접합이 이루어진다. 이때 모재의 재질은 높은 온도에서 격렬한 소성 변형을 하게 되고 그 결과 미세하고 치밀한 재결정 조직(recrystallized grains)이 생성된다. 이 같은 용접부의 미세구조 때문에 마찰 교반 용접된 부재가 가스 및 아크 용접등 기존의 방법으로 용접된 부재보다 기계적 강도 및 피로 성능이 우수한 특징을 보인다<sup>10)</sup>. 한편, 접합된 모재의 두 부분 중 공구의 회전 방향과 같은 쪽에 위치한 부분을 Advancing side라 하고, 반대쪽을 Retreating side라 한다. 이러한 차이는 열전달, 재질의 흐름 및 기계적 특성 등에 있어서 비대칭성을 발생시킬 수 있다<sup>11)</sup>.

마찰 교반 용접 기술은 기존의 용접 기술보다 에너지의 소모가 적고 보호 가스나 용매가 필요 없으며, 용접 중 화염, 잔해 및 소음이 거의 발생하지 않는 환경친화적인 기술이다. 또한, 용접봉 등의 소모성 금속이 필요 없기 때문에 모재와 다른 금속간의 조직 용화문제가 발생하지 않는다.

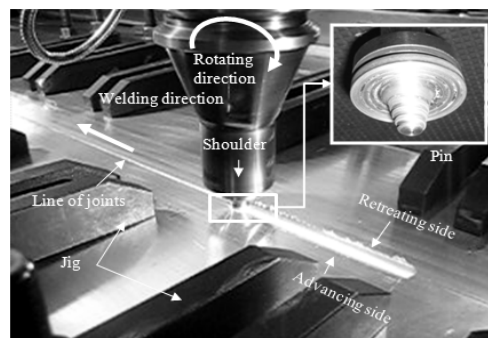


Fig. 1 Pictures of friction stir welding process

### 3. 마찰 교반 용접 시편 제작

본 연구에서는 철도차량의 바닥판(floor panel) 및 지붕판(roof panel) 또는 차체의 벽체(wall)로 사용되는 두께 4.8 mm의 A6005 압출재를 용접의 대상으로 선정하였다. A6005는 유럽에서 개발된 합금으로서 독일의 특급열차인 ICE등에 적용되고 있고, 국내에서도 KTX를 비롯한 신차종에 도입 여부가 검토되고 있는 상태이다. Table 1은 A6005 압출재의 화학적 조성을 나타낸다.

본 연구에서는 마찰 교반 용접 전문 시공 업체인 W사의 마찰 교반 용접기를 이용하여 용접을 수행하였다. 두께 1.2 mm의 박판부터 두께 50 mm의 후판까지 용접할 수 있고, 공구의 이송속도(welding speed), 회전속도(rotational speed), 삽입 깊이(insertion depth) 및 경사각(tilting angle)을 조절할 수 있다.

일반적인 마찰 교반 용접 과정에서 용접부의 기계적 특성에 영향을 미치는 요소로 공구의 회전 및 이송속도, 누름압력, 경사각, 팁의 형상, 솔더부의 지름 및 잠열량 등이 있다. 이 중에서 공구의 회전 및 이송속도, 누름압력, 경사각 및 팁의 형상이 가장 민감한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다<sup>6-8)</sup>. 본 연구에서는 팁의 형상의 경우 외형은 매우 복잡하기 때문에 외형을 구성하는 용접 변수를 설정하기 어려울 뿐만 아니라, 팁 1개에 대한 제작비가 매우 비싸고 제작 시간도 많이 소요되기 때문에 제작사의 기존 시험데이터를 반영하여 적합한 공구를 적용하고 본 연구의 용접 변수에서는 제외하였다. 누름압력의 경우는 공구의 삽입 깊이로 조절할 수 있으나 용접 대상으로 선정한 A6005 압출재가 4.8 mm인 반면에 팁의 길이는 4.6 mm로 설정하였기 때문에 고려할 수 있는 공구의 삽입 깊이는 0.2 mm에 불과하므로 용접 변수에서 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 FSW 용접의 현실성을 감안하여 공구의 회전속도, 공구의 이송속도 및 공구의 경사각을 용접 접합부의 기계적 성질을 향상시키기 위한 최적화 설계 변수로 선택하였다. Table 2는 설계 변수의 종류 및 각 수준에 해당하는 값을 보여준다. 설계 변수는 3수준으로 선정하였고, 각 수준에 해당하는 값들은 사용한 장비의 성능 및 규격을

Table 1 Chemical composition of A6005

Chemical composition (weight) (%)									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
0.6-0.9	0.35	0.1	0.1	0.4-0.6	0.1	0.1	0.1	0.05	remains

기준으로 시험재료의 특성을 고려하여 결정하였다.

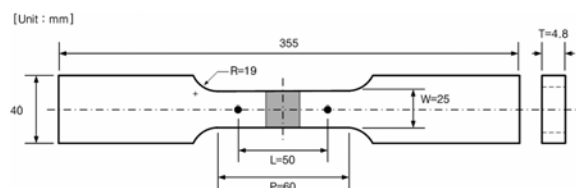
Table 2 Design parameters for FSW

Design parameters	Levels		
	-1	0	1
Rotational speed( $\omega$ , rpm)	1,000	1,250	1,500
Welding speed( $v$ , mm/min)	300	475	650
Tilting angle( $\theta$ , degree)	2	2.5	3

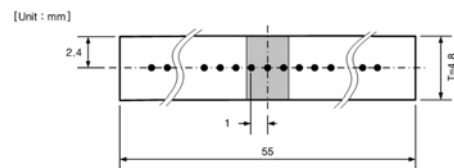
반응표면분석법을 통해 설계 변수와 목적함수와의 관계를 알아내기 위해 3수준의 설계 변수가 3개일 때의 중심합성 실험 계획표(Central composite design table)<sup>9)</sup>를 생성한 후 총 15가지 경우에 대하여 마찰 교반 용접을 실시하였다. Table 3은 설계 변수가 3개인 경우에 생성되는 중심 합성 실험계획표이며, 이를 통해 용접 조건에 대한 세부 정보를 확인할 수 있다. 길이 1,000 mm, 너비 180 mm로 가공된 A6005 압출 판재 2장에 대해 맞대기 용접으로 용접 시편이 제작되었다.

### 4. FSW 접합부 기계적 특성시험

용접 접합부의 기계적 특성을 파악하기 위해 제작된 용접 시편에 대해 Fig. 2와 같이 KS규격의 인장 시험용 시편과 경도 시험용 시편을 제작하였다. Fig. 2(a)에서 W는 나비, T는 두께, L은 표점거리, P는 평행부 길이, R은 어깨부 반지름을 나타낸다. 실험의 정확성을 위해 15가지 용접 조건에 따라 제작된 용접 시편에서 용접 도입부와 마무리부를 제거하고, 용접부의 표면상태가 고른 부위를 골라 시편을 제작하였다.



(a) For the tensile test



(b) For the hardness test

Fig. 2 Test specimen

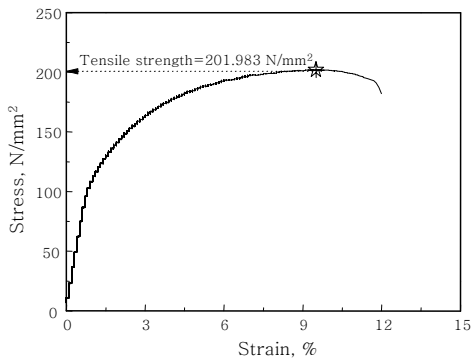
4.1 인장시험

Fig. 2 (a)와 같이 인장 시편을 5개 제작한 후 만능재료시험기(INOVA, 1030S)로 1,800 N/min의 인장하중을 시편에 가하여 인장강도 및 연신율 등을 측정하였다. 5개의 측정결과에서 최소값과 최대값을 제외한 나머지 3개 결과의 평균값을 대표값으로 사용하였다. Fig. 3(a)는 Table 3에서 모든 설계 변수가 0수준일 때, 즉 회전속도는 1,250 RPM, 이송속도는 475 mm/min, 경사각은 2.5°일 때 얻은 용접시편에 대한 인장실험 결과이다. 그림에서 가로축은 변형율(strain)을, 세로축은 응력(stress)을 의미한다. 그림에서 인장강도는 약 201.98 MPa, 연신율은 약 12 % 정도임을 알 수 있다. Fig. 3 (b)는 모든 용접 시편에 대한 인장 강도 측정 결과를 보여준다. 각 경우에 대한 인장 응력 값은 Table 3에서 확인할 수 있다.

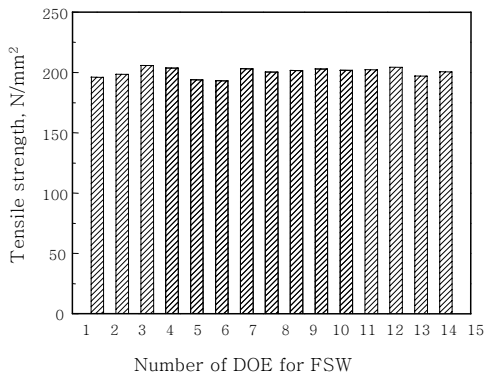
4.2 경도시험

Fig. 2 (b)와 같이 제작된 경도 시편에 대해 마이크로 비커스 경도계(HM-124)로 경도시험을 수행하였다. 경

도시험기의 배율은 ×50으로 크기의 피라미드형 압자를 적용하여 시험하중 100 gf, Dwell Time 30 초를 적용하여 측정하였다. 경도는 접합부의 중심을 기준으로 시편의 횡단면의 중앙을 1 mm 간격으로 증가시키면서 측정하였다. Fig. 4 (a)는 Table 2에서 모든 설계 변수가 0 수준일 때 얻은 용접시편에 대한 경도 측정 결과를 보여준다. 그림에서 접합부 중심을 기준으로 오른쪽이 Advancing side이고, 왼쪽이 Retreating side이다. Advancing side의 전체적인 경도의 크기가 Retreating side쪽보다 약간 큼을 알 수 있다. 또한, 모재부(base metal)보다 용접부(welded region)의 평균 경도가 많이 낮음을 확인할 수 있고, 이때 경도 감소량의 최대값은 42.7 Hv, 평균 경도 감소량(ΔHv)은 32.37 Hv이다. 여기서 경도 감소량의 최대값은 모재부 경도의 최대값에서 용접부 경도의 최소값을 뺀 값이고, 평균 경도 감소량은 모재부 경도의 평균값에서 용접부 경도의 평균값을 뺀 값이다. Fig. 4(b)는 모든 용접 시편에 대한 평균 경도 감소량 측정 결과를 보여준다. 각 경우에 대한 감소량의 정확한 값은 Table 3에서 확인할 수 있다.

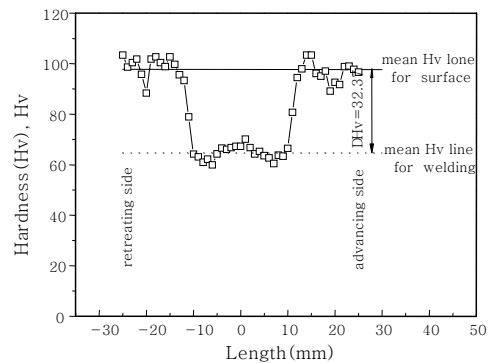


(a) When levels of all design parameters equal zero

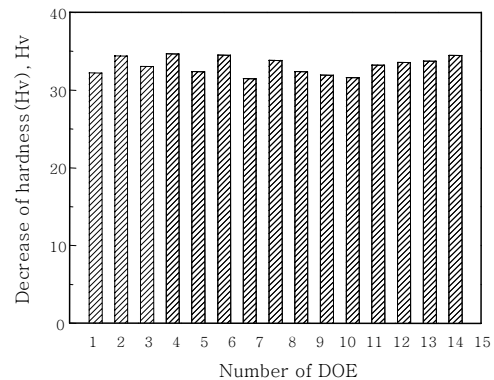


(b) For all cases

Fig. 3 Tensile strengths



(a) When levels of all design parameters equal zero



(b) For all cases

Fig. 4 Decreases of hardness

### 5. 반응 표면모델 형성 및 최적화

#### 5.1 반응 표면모델 형성

Table 3은 15가지 용접 조건에 대한 인장 및 경도 실험결과를 보여준다. 표에서  $\omega$ 는 공구의 회전속도,  $\nu$ 는 공구의 이송속도,  $\theta$ 는 공구의 경사각을 의미한다. 실험 결과로서  $\sigma_T$ 는 인장 강도를  $\Delta H_v$ 는 평균 경도 감소량을 보여준다.

먼저, 인장 강도와 설계 변수들간의 관계를 분석하기 위해 반응표면분석법<sup>9)</sup>에 따라 인장강도에 대한 회귀 모형 함수를 유도하면 식 (1)과 같다.

$$\sigma_T = 202.74 - 1.38\omega + 3.10\nu + 0.11\theta - 0.44\omega^2 + 0.05\nu^2 - 2.81\theta^2 + 0.18\omega\nu - 0.78\nu\theta - 0.52\omega\theta \quad (1)$$

식 (1)에서 각 계수는 해당 변수들이 인장강도의 변화에 영향을 미치는 크기, 즉 민감도의 크기를 나타낸다. 식 (1)에 보는 바와 같이 공구의 이송속도, 회전 속도 및 경사각 순으로 인장강도에 영향을 끼침을 알 수 있다. 또한, 공구 회전 속도의 계수가 음수이므로 회전 속도가 감소할수록 인장강도가 증가할 것이라고 예상할 수 있으며, 공구 이송속도의 경우 계수가 양수이므로 이송 속도가 증가할수록 인장강도도 증가할 것이라고 예상할 수 있다. 그러나 경사각의 경우, 회전 속도 및 이

송 속도에 비해 민감도의 크기가 매우 작기 때문에 경사각의 변화는 인장강도의 변화에 거의 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다.

한편, 평균 경도 감소량에 대해 동일한 방법으로 모형 함수를 유도하면 식 (2)와 같다.

$$\Delta H_v = 32.64 - 0.23\omega - 0.004\nu + 0.83\theta - 0.65\omega^2 + 0.44\nu^2 + 0.92\theta^2 - 0.33\omega\nu - 0.05\nu\theta + 0.09\omega\theta \quad (2)$$

식 (2)에서 보는 바와 같이 평균 경도 감소량의 경우 인장강도와는 달리 경사각이 가장 큰 영향을 주고 있으며, 공구의 이송속도는 평균 경도 감소량 변화에 거의 영향을 끼치지 않음을 확인할 수 있다.

인장강도는 재료의 파괴 및 피로한도와 밀접하게 연관되어있는 특성으로써 일반적으로 인장강도가 크면 클수록 재료가 강건하고, 피로 한도 및 피로 수명이 증가한다. 경도의 경우 재료의 긁힘(scratch) 및 마모(wear)와 연관이 있고, 용접부와 모재의 경도 차이가 작을수록 좋다. 식 (1)과 식 (2)에서 추정된 모형함수를 바탕으로 인장강도와 경도를 독립적으로 향상시킬 수 있는 설계 변수들의 최적값을 찾아낼 수도 있지만, 두 가지의 성능을 동시에 향상시키기 위한 새로운 모형함수를 유도할 필요가 있다. 인장 강도를 향상시키는 동시에 평균 경도 감소량을 저감시키는 설계 변수들의 조건을 찾기 위해 Table 3의 결과에서 인장강도와 평균 경도감소량을 각각의 최대값에 대해 정규화(normalization)시킨 후, 정규화된 인장 강도( $\sigma'_T$ )와 평균 경도 감소량( $\Delta H'_v$ )의 차이 값을 식 (3)과 같이 구하였다.

$$\sigma'_T - \Delta H'_v = \frac{\sigma_T}{\sigma_T^{max}} - \frac{\Delta H_v}{\Delta H_v^{max}} \quad (3)$$

여기서  $\sigma_T^{max}$  와  $\Delta H_v^{max}$ 는 15번의 실험에서 측정된 인장강도와 평균 경도감소량의 최대값이다. 식 (3)에서 구한 정규값의 차이에 대한 모형함수를 구하면 식 (4)와 같다.

$$\sigma'_T - \Delta H'_v = 0.044 - 0\omega + 0.015\nu - 0.023\theta + 0.016\omega^2 - 0.013\nu^2 - 0.041\theta^2 + 0.010\omega\nu - 0.00\nu\theta - 0.005\omega\theta \quad (4)$$

식 (4)의 결과치( $\sigma'_T - \Delta H'_v$ )가 클수록 인장강도는 크고, 평균 경도 감소량은 작게 됨을 의미한다.

Table 3 Central composite design table and test results

Doe no	$\omega$	$\nu$	$\theta$	$\sigma_T$ (MPa)	$\Delta H_v$ (Hv)
1	-1	-1	-1	196.15	32.21
2	-1	-1	1	198.65	34.41
3	-1	1	-1	205.84	33.07
4	-1	1	1	203.87	34.64
5	1	-1	-1	194.06	32.36
6	1	-1	1	193.13	34.50
7	1	1	-1	203.12	31.49
8	1	1	1	200.44	33.83
9	0	0	0	201.98	32.37
10	-1.216	0	0	202.95	31.91
11	1.216	0	0	201.87	31.60
12	0	-1.216	0	202.30	33.21
13	0	1.216	0	204.24	33.54
14	0	0	-1.216	197.12	33.74
15	0	0	1.216	200.68	34.44

### 5.2 최적화

FSW의 최적화를 수행하기 전에 추정된 모형함수, 즉 식 (1), 식 (2) 및 식 (4)의 유효성을 검증하기 위해 Table 4와 같이 분산 분석표(analysis of variance table)를 기반으로 하는 F-검증(F-test)을 실시하였다. Table 4에서 각 경우에 대한  $F_0$ 값이  $F(0.01)$ 보다 크므로 추정된 3개의 모형함수 모두 유의수준(Significance level) 1 %안에서 유의함을 알 수 있으며, 이는 추정된 모형함수들이 신뢰구간 99 %영역 내에서 최적화를 위한 목적함수로 사용이 가능하다는 것을 의미한다<sup>9)</sup>. 목적함수를 최소화 시키는 설계 변수들의 최적값을 찾기 위한 최소화 알고리즘으로 목적함수 및 구속조건이 비선형 함수 일 때 효율적인 성능을 발휘하는 SQP (Sequential Quadratic Programming)법을 사용하였다. Table 5는 SQP를 사용하여 각 경우에 대해 얻은 설계 변수들의 최적값 및 최적화 이전과 이후의 목적함수의 값의 변화를 나타낸 것이다.

Table 5에서 인장 강도만 고려했을 때 최적화 결과 인장 강도가 약 2.3 % 증가하였고, 평균 경도 감소량을 고려했을 때 평균 경도 감소량이 약 3.5 % 감소하였다. Table 3에서 실험결과 얻은 인장강도 크기의 최대 변화량이 약 6.3 %, 평균 경도 감소량의 경우 약 9.7 % 변화하는 것을 고려했을 때, 최적화 결과 인장 강도와 평균 경도 감소량이 각 2.3 %와 3.5 % 변화한 것은 매우 양호한 결과이다. 인장강도를 증가시키는 동시에 평균 경도 감소량을 감소시키기기 위해 식 (4)에 대한 최적화를 수행한 결과값( $\sigma'_T - \Delta H\nu'$ )은 약 68 % 증가

하였다. 이에 해당하는 설계 변수들의 값을 식 (1)과 식 (2)에 대입했을 때 인장 강도는 약 204.33 MPa, 평균 경도 감소량은 약 31.66 Hv가 될 것으로 예상된다. 이 같은 결과는 인장 강도나 평균 경도 감소량만 최적화시켰을 때에 비하면 만족스러운 결과라고는 볼 수 없지만, 현재 값과 비교했을 때 인장 강도는 증가시키고 평균 경도 감소량은 감소하려는 두 가지 목표를 동시에 달성하였으므로 최적화가 성공적으로 수행되었다고 판단된다. Table 5에서 각 목적함수를 최대 또는 최소화시키는 설계 변수들의 최적값의 분포를 분석해 보면 3 가지 목적함수에 대하여 설계 변수들의 최적값들이 일정한 경향성을 갖지 못한 채 산포되어 있음을 알 수 있다. 따라서 마찰 교반 용접시 용접부의 어떤 특성에 관심을 기울일 것 인지, 한 개 혹은 두개 이상의 성능을 동시에 향상시킬 것인지 여부에 따라 적절한 용접 조건의 선정이 필요하다.

### 6. 결 론

본 연구에서는 철도차량의 차체 제작용으로 많이 활용되는 A6005 압출재에 대한 마찰 교반 용접부의 기계적 성능을 향상시키기 위해 공구의 회전속도, 공구의 이송속도 및 공구의 경사각을 실험계획법에 따라 15개의 용접 조건에서 용접을 실시하였으며, 제작된 용접시편으로 인장시험 및 경도시험 시편을 제작하여 인장시험 및 경도시험을 실시하였다. 용접접합부에 대한 인장 강도 및 경도 감소량과 용접 변수들과의 관계를 알아보기 위해 반응표면 분석법으로 시험데이터에 대한 회귀모델을 작성하였으며, 이를 바탕으로 민감도 해석 및 최적화를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 인장강도를 향상시키기 위해선 공구의 회전속도는 감소시키고, 이송 속도는 증가시켜야 한다.
- 2) 용접부의 경도에 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 공구와 모재 사이의 경사각이고, 경사각을 증대 시키면 평균 경도 감소량 또한 증가하는 경향이 있다.
- 3) 3가지의 목적함수에 대하여 최적화를 수행한 결과, 최적화 이후 모든 목적함수에 대하여 초기 조건 보다 인장강도와 경도가 향상되었다. 그러나 인장 강도와 경도를 독립적 또는 동시에 최적화 할 때 도출되는 설계 변수들의 값은 다르다. 따라서 마찰 교반 용접 접합부에 대해 필요한 요구 성능에 따라 적절한 용접 조건을 설정하는 것이 필요하다.

Table 4 F-test results

Objectives	$F_0$	$F(0.01)$
$\sigma_T$	18.1592	6.22
$\Delta H\nu$	37.3434	
$\sigma'_T - \Delta H\nu'$	23.1321	

Table 5 Optimization results

Objectives	Design parameters			Value of objective function	
				Current	Optimization
$\sigma_T$	-1	1	0.07	201.98	206.69
$\Delta H\nu$	1	0.42	-0.44	32.37	31.23
$\sigma'_T - \Delta H\nu'$	1	1	-0.38	0.047	0.079

### 참 고 문 헌

1. Kumbhar, N.T. and Bhanumurthy, K.: Friction Stir Welding of Al 6061 Alloy, *Asian J. Exp. Sci.*, 22-2 (2008), 63-74
2. Mishra, R.S., Ma, Z.Y.: Friction Stir Welding and Processing, *Materials Science and Engineering, R*, 50 (2005), 1-78
3. Thomas, W.M. and Nicholas, E.D.: Friction Stir Welding for the Transportation Industries, *Materials and Design*, 18-4/6 (1997), 269-273
4. Ohaba, H, Uedd, C. and Agatsuma, K.: Innovative Vehicle - the A-train, *Hitachi Review*, 50-4, (2001), 130-133
5. Seo, S.I.: Introduction of Friction Stir Welding and its Application to Aluminum Rolling Stock, *Spring Conf. Proc.*, Korean Society for Railway, (2007)
6. Elangovan, K. and Balasubramanian, V.: Influences of Pin Profile and Rotational Speed of the Tool on the Formation of Friction Stir Processing Zone in AA2219 Aluminum Alloy, *Materials Science and Engineering, A*, 459 (2007), 7-18
7. Balasubramanian, V.: Relationship between Base Metal Properties and Friction Stir Welding Process Parameters, *Materials Science and Engineering, A*, 480 (2008), 397-403
8. Fujii, H., Cui, L., Maeda, M. and Nogi, K.: Effect of Tool Shape on Mechanical Properties and Microstructure of Friction Stir Welded Aluminum Alloys, *Material Science and Engineering, A*, 419 (2006), 25-31
9. Jung, S.P., Jun, K.J., Park, T.W. and Ahn, I.C.: An Optimum Design of a Gas Circuit Breaker Using Design of Experiments, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 36 (2008), 346-363
10. Munoz, C.A., Ruckert, G., Huneau, B., Sauvage, X. and Marya, S.: Comparison of TIG Welded and Friction Stir Welded Al-4.5Mg-0.26Sc Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 1, 97 (2008), 337-343
11. Nandan, R., Debroy, T. and Bhadeshia, H.K.D.H: Recent Advances in Friction Stir Welding Process, Weldment Structure and Properties, *Progress in Materials Science*, 53 (2008), 980-1023