

# Ni-Cr-Mo과 SM45C의 摩擦熔接特性에 관한 研究

임형택\*, 민택기<sup>+</sup>

(논문접수일 2007. 7. 13, 심사완료일 2007. 8. 30)

## A Study on the Properties in Friction Weldability of Ni-Cr-Mo and SM45C

Hyung-Taek Lim\*, Taeg-Ki Min<sup>+</sup>

### Abstract

The present study examined the mechanical properties of the friction welding of Ni-Cr-Mo to SM45C. Friction welding was conducted at welding conditions of 2,000 rpm, friction pressure of 100MPa, friction time of 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 seconds, upset pressure of 150MPa, and upset time of 3.0 seconds. When the friction time was 1.6 seconds, the maximum tensile strength of the friction weld happened to be 1,020MPa, which is 120% of the base material's tensile strength(850MPa). At the same condition, the maximum shear strength was 438MPa, which is equivalent to 103% of the base material's shear strength(425MPa). At the same condition, the maximum vickers hardness was Hv490 at Ni-Cr-Mo nearby weld interface, which is higher Hv40 than condition of the friction time 0.8 seconds, and the maximum vickers hardness was Hv305 from weld interface of SM45C, which is higher Hv12 than condition of the friction time 0.8 seconds. The results of microstructure analysis show that the structures of two base materials have fined and rearranged along a column due to heating and axial force during friction, which has affected in raising hardness and tensile strength.

**Key Words** : Friction welding(마찰용접), Friction time(마찰시간), Friction pressure(마찰압력), Tensile strength(인장강도), Ni-Cr-Mo, SM45C

## 1. 서론

마찰 용접은 비가열식 고상(固相)용접으로 피용접재에 회전운동과 함께 가압시켜 접촉면에서 발생하는 마찰열을

이용하여 접합하는 용접방법<sup>(1)</sup>으로 접촉면이 용융되기 전 일정한 온도에 도달하였을 때, 압력을 가하면 소성변형을 일으키면서 접합되므로 접합강도가 우수하고, 신뢰성이 좋으며, 격심한 소성운동으로 결정의 조대화나 금속간 화합물이

\* 충남대학교 대학원 기계공학과 (lsuye@hanmail.net)  
주소: 305-764 대전시 유성구 궁동 220번지

+ 충남대학교 기계공학과

생기기 어렵고, 접합부에서만 발열하므로 일반 용접에 비하여 열효율이 높다. 또한, 마찰용접법은 국부적인 마찰열에 의해 접합부에서만 열이 발생하기 때문에, 타 용접에 비해 용접온도가 낮아 금속간 화합물의 발생이 적고 고온균열이 적으며, 매우 좁은 열영향부(HAZ)<sup>(2)</sup>를 만들고, 용접시 용접 변수를 적절히 조절함으로써 각 재료의 장점을 살린 매우 우수한 기계적 성질을 얻을수있어 용접품질에 대한 신뢰성이 높아 기계구조물의 안전성, 강도 및 경제적인 측면에서 많이 사용되어 왔다<sup>(3-6)</sup>. 일반적으로 Ni-Cr-Mo 강은 매우 우수한 강인강으로 구조용 Ni-Cr강에 0.3%이하의 Mo를 첨가해서 강인성을 증가시키고 담금질성을 향상시킬 뿐만 아니라 뜨임 매질성을 완화시킨 저합금강이다. 자동차의 크랭크축, 연결봉, 강력볼트, 기어 등의 중요 기계부품에 광범위하게 활용됨에 따라, 산업현장에서 SM45C<sup>(7)</sup>와의 결합의 필요성이 매우 높아졌다.

본 연구에서는 기계적 성질이 우수하고 값이 저렴한 SM45C와 보통탄소강보다 경화능이 크며 내충격성 및 내피로성이 높은 Ni-Cr-Mo 강을 마찰용접하여 용접부에 대한 접합특성 및 신뢰성을 고찰하고자 하였고, 이를 위하여 마찰 시간을 주요 변수로 하여 용접부에 대한 인장강도 시험, 전단강도 시험, 접합부의 파단형상, 현미경 조직분석, 경도시험 등을 실시하여 기계적성질의 향상과 용접결합을 극대화시킬 수 있는 최적의 마찰용접 조건을 찾아내고자 하는데 연구의 목적을 두었다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 SM45C와 Ni-Cr-Mo이며, 이 재료의 화학 성분과 기계적 성질을 Table1 과 Table 2에 각각 나타냈다. 마찰용접 시험편은 직경  $\phi 20\text{mm}$  환봉을 길이 100mm씩 절단 가공하였고, 마찰용접 직전에 용접면을 정밀하게 선삭가공하고 이물질 제거를 위해 아세톤으로 세척하였다.

본 실험에 사용된 마찰용접기는 브레이크 타입(Model : NSF-30H, 남전기공)으로, 회전축, 고정축, 회전을 급정지시키기 위한 디스크 방식의 브레이크와 가압력을 얻기 위한 유압펌프, 유압실린더, 피스톤 등의 유압장치, 플래시 제거장치, 용접 사이클을 제어하기 위한 시간·유압 제어장치, 고정축 테이블의 운동을 제어하기 위한 리미트 스위치 등으로 구성되어 있다. 마찰용접부의 기계적 시험을 위해 최대 용량 50ton의 만능재료시험기(Model: DYHU-50-AD, Dae Yeong)를 사용하였으며, 경도시험은 마이크로 비커어즈 경도시험

**Table 1 Chemical compositions of materials (Wt. %)**

Elements	Materials	Ni-Cr-Mo	SM45C
C		0.22	0.48
Si		0.49	0.26
Mn		1.24	0.65
P		0.015	0.024
S		0.01	0.018
Ni		1.80	-
Cr		0.70	-
Mo		0.22	-
Fe		Bal.	Bal.

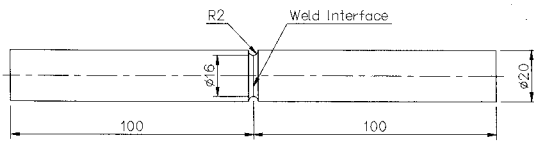
**Table 2 Mechanical properties of materials**

Materials	Mechanical properties			
	Tensile strength (MPa)	Shear strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
Ni-Cr-Mo	1,150	575	11.2	251
SM45C	850	425	17	273

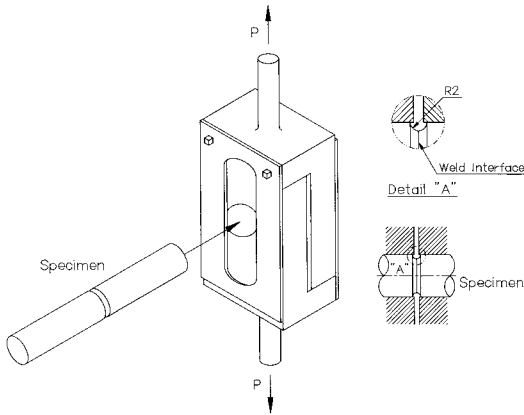
기(Model: MVK-H1, Mitutoyo Co. JP)를 사용하였다. 본 실험은 마찰용접, 인장시험, 인장 파단면 검사, 전단시험, 전단파단면검사, 조직검사, 경도시험 순으로 진행하였다. 본 실험에서 사용된 재료와 기계적 성질이 가장 유사한 재료의 마찰용접특성에 관한 문헌연구를 통하여 개략적인 최적조건을 선정한 후 회전수는 처음 고정된 용접시험편이 스펀(spun)을 일으키지 않고 충분한 발열이 일어나는 2000 rpm으로 고정하고, 마찰압력은 70MPa에서 130MPa로, 마찰시간은 0.8sec에서 2.0sec로, 업셋압력은 120MPa에서 150MPa로, 업셋시간은 2.0sec에서 4.0sec로 각각 변화시켜가면서 예비실험을 하였다. 예비실험 결과 최적조건은 마찰압력 100MPa, 업셋압력 150MPa, 마찰시간 1.4sec, 업셋시간 3sec에서 나타나는 것으로 파악되었고, 보다 상세한 조건을 찾기 위하여 마찰시간을 0.8sec에서 0.2sec씩 2.0sec까지 증가시키면서 본 실험을 하였다. Table 3과 같은 용접조건으로 본 실험을 실시하였다. 용접의 재현성을 증가시키고, 기계 각부의 원활한 작동을 위하여 용접기를 1시간 정도 워밍업 시킨 후 실험을 실시하였으며, 마찰용접부의 인장 및 전단강도를 시험하기 위하여 Fig. 1과 같은 시편 용접제면에 R2의 노치 가공을 하였고, Fig. 2에서 보여주는 것과 같은

**Table 3 Friction welding conditions**

Spindle revolution (N, rpm)	Friction pressure (P <sub>1</sub> , MPa)	Upset pressure (P <sub>2</sub> , MPa)	Friction time (t <sub>1</sub> , sec)	Upset time (t <sub>2</sub> , sec)
2,000	100	150	0.8	3.0
			1.0	
			1.2	
			1.4	
			1.6	
			1.8	
			2.0	



**Fig. 1 Specimen of tensile test**



**Fig. 2 Configuration of shear test**

전단 고정구를 설계 제작하였으며, 여유틈새(Clearance)는 예비시험에서 비교적 안정된 데이터를 나타냈던 1mm로 하였다. 그리고 용접계면이 정중앙에 오도록 하여 전단시험을 하였다. 경도시험과 현미경 조직검사를 위한 시험편은 폴리코트(Polycoat)로 시험편을 마운팅하고, 용접단면을 입도 #200, #800, #1,500의 샌드페이퍼로 1차 연마하였다. 그 후, 연마제로 1µm의 알루미늄 파우더를 증류수와 혼합하여 사용하였고, 폴리셔(Polisher)로 폴리싱(Polishing) 하였다. 경도시험은 시험편의 원주부에서 중심방향으로 R/2 떨어진 위치에서 용접계면에 수직방향으로 실시하였다. 측정 범위는

접합계면의 미세 정도분포를 고려하여 용접계면으로부터 0.5mm 간격으로 측정하였으며, 하중은 200 g으로 하였다. 용접부의 미세조직을 관찰하기 위하여 시험편을 피크린산(Picric acid)을 10% 희석한 부식액(HOC<sub>6</sub>H<sub>12</sub>(NO<sub>2</sub>)<sub>3</sub> 10ml + H<sub>2</sub>O 90ml)에 30sec 동안 부식시킨 후 애칭액 제거를 위하여 2분간 흐르는 물에 세척하고 드라이어로 다시 2분간 건조시켰다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 인장강도와 업셋길이

마찰압력 100MPa, 업셋압력 150MPa, 업셋시간 3.0sec의 조건하에서 마찰시간을 변수로 한 용접부의 인장강도와 업셋길이의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 마찰면의 발열량은 일정 압력 하에서 시간이 경과하면 증가하게 된다. 재료는 일정 온도에 이르면 소성 변형을 일으키게 되고 압력에 의해서 플래시로 배출이 되며 이로 인하여 마찰면의 온도가 저하된다. 이러한 온도의 저하는 소성 변형에 대한 저항을 증가시키고 이로 인하여 고상태 용접에서 기계적 힘에 의해 접합능력을 향상시킨다. 이와 같이 마찰시간의 증가에 따라 강도가 향상되는 양상을 띠었으나, 이러한 경향은 마찰시간 1.6sec를 정점으로 하여 다시 감소하는 형태를 나타내었다. 마찰시간 1.6sec에서 인장강도의 최대값 1,020MPa이 얻어졌으며, SM45C 모재 인장강도(850MPa)의 120%에 해당하는 값이다. 업셋길이의 변화를 살펴보면, 마찰시간의 증가에 따라 비례적으로 업셋길이가 증가함을 볼 수 있다. 이는 마찰시간의 증가에 따라 접합면의 발열상태가 활발해져 재료의 소성유동이 증가한 원인으로 볼 수 있는데, 인장강도의 경향과 유사하게 마찰시간 1.0sec에서 1.6sec로 증가할 때 가장 많은 업셋길이 증가를 나타내었다. 또한 마찰시간 1.6sec에서 그 이상으로 증가할 때는 업셋 기울기가 비교적 완만한 형태로 바뀌는 양상을 보였다. 이는 마찰시간과 비례적 관계로 증가한 발열량에 의해서 활발해진 소성유동의 영향 때문으로 사료된다. 위와 같은 업셋길이의 양상은 인장강도와도 연관이 있으며, 적정 마찰시간(본 실험에서는 1.6sec)에서의 최대 인장강도 값은 업셋 압력이 두 재료의 접합부에 높은 효율로서 전달될 수 있는 이상적인 조건이었을 것으로 여겨진다. 따라서 본 실험의 범위 내에서는 마찰시간 1.6sec 이상을 적용함에 따른 발열량의 증가는 오히려 접합강도를 저해하는 요소로 작용할 수 있음을 알 수 있다. 최대 인장 강도를 나타내었던 마찰시간 1.6sec에서는 덩플의 형상이 불규칙하며 Ni-Cr-Mo 강의 모재 일부가 SM45C쪽으로 달라붙

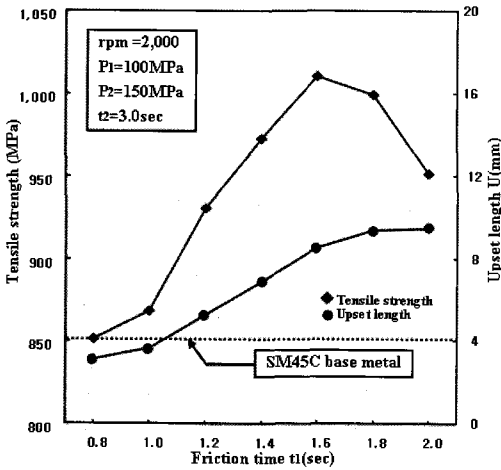


Fig. 3 Relationship between friction time and tensile strength

어 있는 형상을 보였다.

Photo 1은 인장 파단면을 나타낸 것으로 1.6sec에서 딥플이 뚜렷하게 나타났다.

### 3.2 전단시험

마찰시간 변화에 따른 전단강도 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 일반적으로 마찰용접 접합부에서는 재료의 섬유조직이 업셋과정에서 소성변형 때문에 플래시로 배출하게 되는데 이 때 용접계면에 대하여 평행하게 재배열된다. 이러한 조직의 재배열은 축에 대한 수직방향의 부하(Load)시 취약한 성질을 띠는 것으로 여겨지고 있다. 이러한 수직방향의 기계적 성질을 고찰하기 위해 전단시험을 수행하였다. 도표에서 보여 주듯이 마찰시간의 증가에 따라 전단강도가 증가하다가 마찰시간 1.6sec를 기준으로 다시 감소하는 양상을 나타내었다. 최대 전단강도는 마찰시간 1.6sec에서 438MPa로 SM45C의 모재강도 425MPa에 약 103%에 해당되는 강도를 나타내었다. 이 강도는 Ni-Cr-Mo의 모재(575MPa)에 비하여는 낮은 수치이나, SM45C 모재에 비해 높은 수치로, 일반적으로 마찰 용접물이 가지는 용접계면에 대한 수평 하중의 취약성을 고려해 볼 때, 양호한 용접결과로 사료된다. 전체적인 전단강도의 경향은 인장시험과 유사한 경향을 보였는데, 이와 같이 마찰시간 1.6sec를 정점으로 포물선 형태이고, 인장시험 때와 같이 마찰시간 1.6sec 이상의 과도한 마찰열의 발생은 오히려 업셋압력의 효율을 떨어뜨려 용접성을 저해하는 요소로 작용하였다. Photo 2는 전단 시험에서 최대 강도와 최소 강도를 나타내었던 조건의 전단 파단면

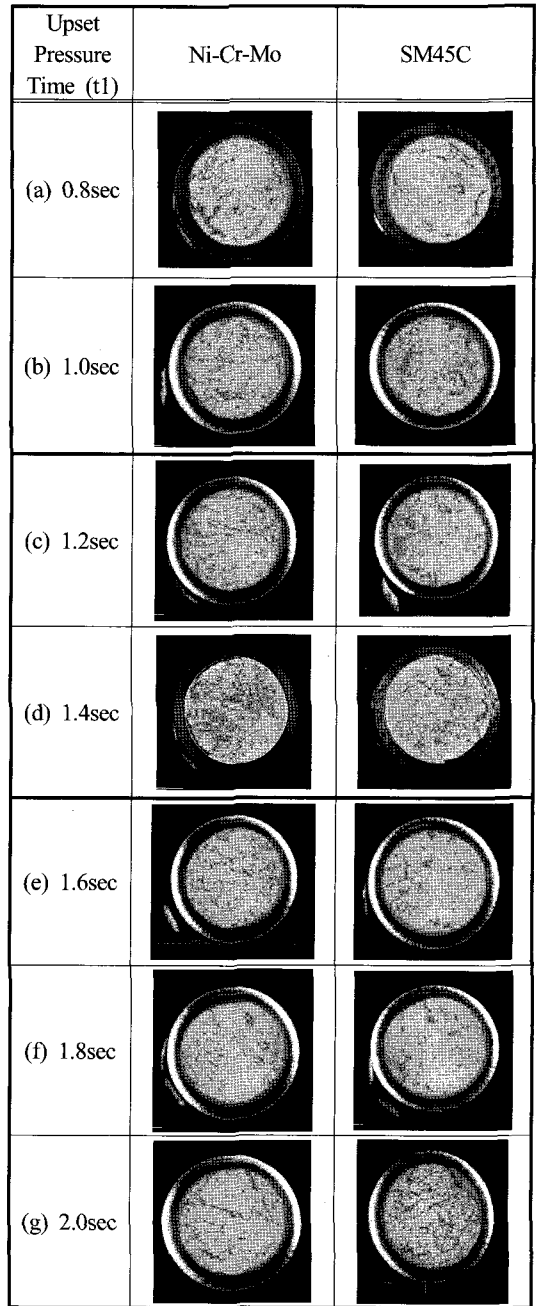


Photo 1 Tensile fracture surface

으로, 파단면의 형태는 탄소강에서 흔히 볼 수 있는 전단파단의 형태를 띠고 있다. 이러한 전단파단의 형태가 전단강도의 측면에서는 긍정적 영향을 끼친 것으로 사료된다.

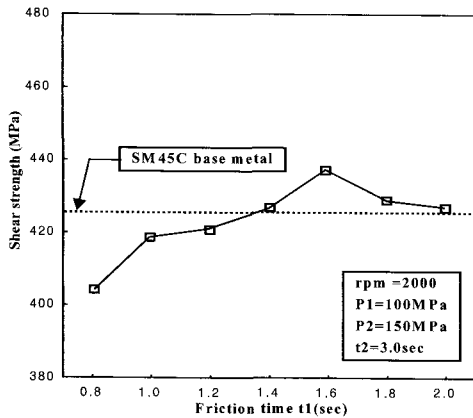


Fig. 4 Relationship between friction time and shear strength

### 3.3 용접부의 플래시 형성

Photo 3은 마찰압력( $P_1$ ) 100MPa, 업셋압력( $P_2$ ) 150MPa, 업셋시간( $t_2$ ) 3.0sec 일 때, 마찰시간( $t_1$ )이 0.8sec, 1.6sec, 2.0sec 일때 플래시 형상이다. 이 사진에서 볼 수 있듯이 마찰시간의 증가함에 따라 플래시가 증가하였고, 강도가 낮은 SM45C측의 플래시가 크게 발생한 반면, 강도가 높은 Ni-Cr-Mo 강측의 플래시는 작게 발생하였다. Ni-Cr-Mo 강은 보통의 탄소강에 비하여 높은 강도를 가지며, 절삭성이 보통의 탄소강에 양호하지 않고, 용접성이 떨어지는데, 이것 또한 용접과정 중 마찰시간의 증가에 따라 플래시 주변에서의 고온균열 발생이 그 원인으로 생각되어진다. 접합부의 단면사진으로 알 수 있듯이, Ni-Cr-Mo 강측은 용접시 발생하는 열에 의하여 용접부 주위에 산화막이 형성되어 있다. SM45C 쪽에서 관찰할 수 있는 것은 압연방향으로 늘어서 있는 모재 조직이 접합면을 기준으로 하여 원주방향으로 밀려나가는 형상을 띠고있다. 또한 용접계면 근처에서는 마찰과 가압력에 의해 일반적으로 미세화 되는 조직의 영역이 육안으로도 확인되었다. 또한 중심부에 나타난 미세한 경계층이 마찰시간이 적은 쪽에서, 충분히 밖으로 방출되지 못하여, 다른 조건보다 두텁게 나타남을 보였다.

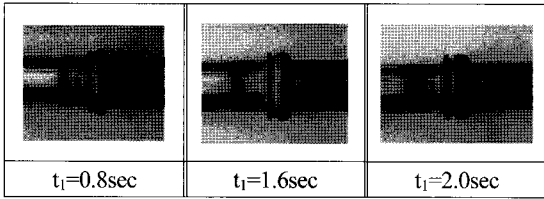
### 3.4 경도시험

용접부의 경도시험은 인장시험에서 최대 인장강도를 얻은 조건( $t_1=1.6sec$ )과 가장 낮은 인장강도를 나타내었던 조건( $t_1=0.8sec$ )에서의 시험편을 가지고, 용접계면에서 축방향으로 측정하였다. 이 경우, 용접부의 경도분포를 관찰하기

Upset Pressure Time ( $t_1$ )	Ni-Cr-Mo	SM45C
(a) 0.8sec		
(b) 1.0sec		
(c) 1.2sec		
(d) 1.4sec		
(e) 1.6sec		
(f) 1.8sec		
(g) 2.0sec		

Photo 2 Shear fracture surface

위하여 용접계면에서 축방향으로 0.5mm의 등간격으로 측정하였다. 최대 경도값은 Ni-Cr-Mo 강측에서 나타났는데,



(Left : Ni-Cr-Mo, Right : SM45C)

Photo 3 Appearance of welded joint

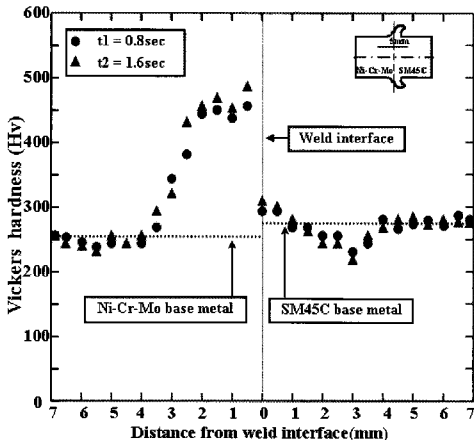


Fig. 5 Hardness distributions of friction weld

$t_1=1.6\text{sec}$  조건에서 Hv490이었고, 이것은  $t_1=0.8\text{sec}$  조건의 최대 경도값 Hv450에 비해 Hv40정도의 차를 보였다. SM45C의 최대경도는  $t_1=1.6\text{sec}$  조건에서 Hv305,  $t_1=0.8\text{sec}$  에서 Hv293으로 나타나 Hv12정도의 차를 보였다. 최대 인장강도를 얻은 조건( $t_1=1.6\text{sec}$ )에서의 경도분포의 특징은 Ni-Cr-Mo 강과 SM45C 모두 용접계면 근처에서 열영향부로 인하여 경도값이 상승하는 현상이 나타났는데, Ni-Cr-Mo 강측의 경우 상승하는 구간이 용접면으로부터 3.5mm까지 나타나, 2mm나타난 SM45C측 보다 넓게 형성되었다. 경도 상승량은 Ni-Cr-Mo 강쪽에서 현저했는데, Ni-Cr-Mo강 쪽 최대경도는 모재경도(Hv251)보다 Hv239 높은 Hv490까지 나타났는데 비하여 SM45C쪽에서의 최대경도는 Hv305로써 모재경도(Hv273)보다 Hv32정도 상승하는데 그쳤다. 용접계면 근처에서의 이러한 경도상승은 업셋압력에 의한 기계적 단절효과 등으로 설명할 수 있으며, 경도상승 폭이 큰 Ni-Cr-Mo 강쪽의 취성파괴가 우려된다. 용접부에서 경도가 상승하기 직전에 경도가 낮아지는 연화역도 나타나는데, Ni-Cr-Mo 강의 경우 용접계면으로부터 3.5mm에서 6mm 구간으로 비교적 넓게 나타났고, SM45C의 경우 2mm에서

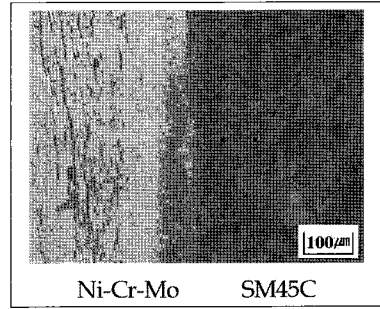


Photo 4 Microstructure of weld interface (Mag. 100)

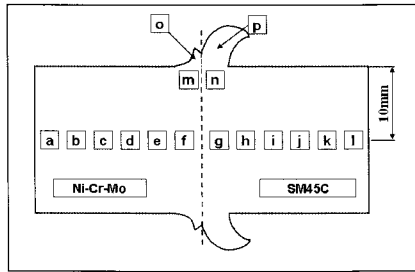
4mm구간으로 좁게 나타났다. 연화역에서의 경도감소는 Ni-Cr-Mo강이 모재경도(Hv251)보다 Hv20정도 적게 나타났는데 비하여, SM45C는 모재경도(Hv273)보다 Hv40정도 적게 나왔다. SM45C의 경도감소가 Ni-Cr-Mo강보다 큰 것으로 나타났고, 이러한 연화역에서의 경도 감소는 어닐링 효과에 기인한 것으로 사료된다.

### 3.5 용접부의 미세조직

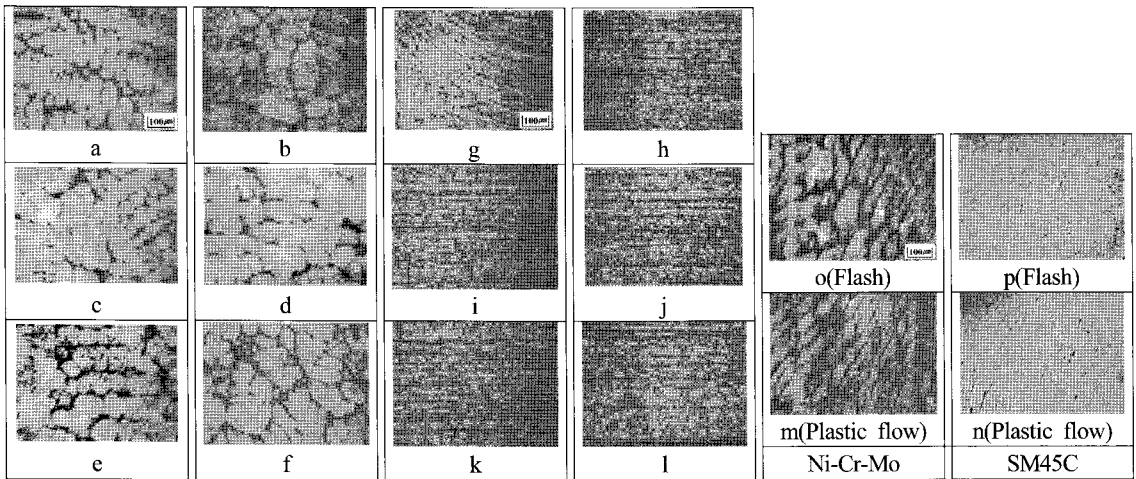
Photo 4는 Ni-Cr-Mo과 SM45C 용접계면의 사진이다. 이 사진에서 알 수 있는 바와 같이 SM45C쪽이 Ni-Cr-Mo 강쪽에 비해 과 부식된 것을 볼 수 있다. 이는 Ni-Cr-Mo 강재료가 SM45C재료에 비해 내식성 원소인 니켈(Ni), 크롬(Cr)을 많이 함유하여 내식성이 강하기 때문으로, 니켈(Ni), 크롬(Cr)을 포함하지 않은 SM45C는 부식이 많이 되었다. 또한 모재의 섬유조직 배열이 미세한 형태로 계면 근처에 분포되어 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 마찰과정과 업셋과정시 열에 의한 소성변형, 가압력에 의한 기계적 단절현상 등에 의해 조직이 미세화 된 것으로 사료된다.

Ni-Cr-Mo과 SM45C의 용접계면은 거의 직선적이고, 두 재료가 혼합되어 생기는 혼합층(Mixed layer)은 잘 나타나지 않았다.

Photo 5는 용접 경계면을 중심으로 각각 1mm간격으로 횡단[Point a~l]하고, Flash[Point o, p] 및 Plastic flow [Point m, n]를 광학현미경(100배율)으로 관찰한 것이다. Ni-Cr-Mo 강 모재의 경우 부식에 의한 입계 구별이 현저하지 않는데, 이것은 Ni, Cr의 영향으로 생각된다. 업셋과정시 모재가 플레시로 배출되는 과정이 소성유동 사진을 통하여 확연하게 구분할 수 있다. 일반적으로 업셋과정시 모재 조직은 용접계면에 대해 수평한 방향으로 재배열이 이루어지게 되고, 내부의 이물질들은 플레시로 방출되게 된다. 이러한 재배열은 접합물이 수직하중에 대해 취약한 기계적 성질을



(a) General view



(b) Point a~p

Photo 5 Microstructure of friction weld (Mag. 100)

가지게 되는 원인이 되기도 한다. 두 재료의 열영향부(HAZ)는 압연방향의 모재조직이 원주방향으로 재배열, 조직의 미세화가 중복되어 발생하는 부분으로, 열영향부의 경계부 주위에서 일반 용접물의 파단이 발생되곤 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Ni-Cr-Mo과 SM45C를 브레이크형 마찰 용접기로 마찰용접을 하였다. 최적의 용접조건을 찾기 위한 예비실험 결과, 『회전수 2000 rpm, 마찰압력( $P_1$ ) 100MPa, 업셋압력( $P_2$ ) 150MPa, 마찰시간( $t_1$ ) 1.4sec, 업셋시간( $t_2$ ) 3.0sec』에서 우수한 용접특성이 나타났다. 이조건에서 마찰시간( $t_1$ )의 영향을 보다 상세하게 분석하기 위하여 마찰시간( $t_1$ )을 0.8sec에서 2.0sec까지 0.2sec씩 변화시키면서, 마찰시간( $t_1$ )이 강도에 미치는 영향과 인장 파단면 및 용접부의

조직 변화를 비교·고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 마찰시간 1.6sec에서 용접부의 최대 인장강도는 1,020MPa로 SM45C의 모재 인장강도(850MPa)의 120%에 해당되었고, 동일조건에서 용접부의 최대 전단강도는 438MPa로 SM45C모재 전단강도(425MPa)의 103%를 얻었다.
- (2) 마찰시간 1.6sec에서 Ni-Cr-Mo 강 용접부의 최대경도는 Hv490으로 마찰시간 0.8sec조건에 비해 Hv40 정도 높았으며, SM45C의 최대경도는 마찰시간 1.6sec에서 Hv305, 마찰시간 0.8sec에서 Hv293으로 나타나 Hv12정도의 차를 보였다.
- (3) 현미경 조직 관찰 결과, 용접계면 부근의 두 모재 조직은 마찰 과정상의 마찰열과 가압력 등에 의해 미세화되었고, 원주방향으로 재배열되었다. 이는 접합부의 경도 상승과 인장강도에 영향을 끼친 것으로 생각된다.

## 참고 문헌

- (1) Min, T. K., 1992, *Properties of Friction Welding Between the Back Metal of Bushing Part and Flange Part in A-Sn Alloy Metal Bearing*, Dong-A University, Busan, Korea, pp. 4~5.
- (2) Lee, S. Y. and Yun, B. S., 2001, "Heat Transfer Analysis of Friction Welding of A2024 to SM45C," *Transaction of KSMTE*, Vol. 10, No. 1, pp. 65~70.
- (3) Spindler, D. E., 1994, "What Industrial Needs to Know about Friction Welding," *Welding Journal*, Mar, pp. 37~42.
- (4) Nicholas, E. D., 1997, "Where Industry Uses Friction Welding," *Welding Design and Fabrication*, Aug., pp. 74~76.
- (5) Toms, H. H., 1962, "Properties of Friction Welds between and Dissimilar Metals," *Welding Research Supplement*, Oct. pp. 448~450.
- (6) Vill, V. I., 1957, "Friction Welding of Metals," *Svarochne Proizvodstvo*, Vol. 3, No. 9, pp. 8~23.
- (7) Park, K. H., Min, T. K., Yoon, Y. J. and Park, C. S., 2006, "A Study on the Joint Properties according to the Friction Welding Area Change of Carbon Steel(SM45C)," *Transaction of KSMTE*, Vol. 15, No.1, pp. 102~107.