

研 究 論 文
---------

大韓熔接學會誌  
第7卷第4號 1989年12月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol.7, No.4, Dec., 1989

## 肉盛 熔接部の 機械的 性質에 미치는 熱處理條件의 影響

李基鎬\* · 金伎徹\* · 金周學\* · 尹義博\*\*

### Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Overlay Welds

K.H. Lee\*, K.C. Kim\*, J.H. Kim\*, E.P. Yoon\*\*

**Key Words:** Overlay Welding(육성용접), Carbon Migration(탄소이동), Carbon Diffused Layer(탄소확산층), Carbon Depleted Layer(탄소고갈층), Larson-Miller Parameter(라슨-밀러 지수)

#### Abstract

Effect of heat treatment on mechanical properties of an overlay weldment was investigated. Overlay welding was carried out on the structural C-Mn mild steel substrate to take required test specimens. Shielded metal arc welding process with 13Cr-0.2Ni stick electrode was applied. The heat treatment temperatures and holding times were 450°C, 550°C, 650°C, 750°C, 850°C and 0.5hr, 2hr, 10hr, respectively. Mechanical tests and microscopic inspection were also carried out to investigate welds soundness.

Test results indicated that carbon migration was dominant near bonded zone. At temperature of around 650°C, carburized layer and decarburized layer were formed remarkably along overlay welds region and C-Mn mild steel region, respectively. The width of these layers became wider with increasing heat treatment temperature and/or holding time at the elevated temperature, and this relationship agreed well with Larson-Miller parameter. Side bending test results demonstrated that the crack free region of overlay welds could be deduced from the relationship between temperature and holding time.

\* 正會員, 産業科學技術研究所 熔接研究센터

\*\* 正會員, 漢陽大學校 工科大學 材料工學科

1. 序 言

機械裝置등의 부품은 재료의 강도를 전제로 설계되고 있으나 사용수명을 결정하는 중요한 요소 중의 하나는 材料表面의 성질이다. 설비의 어떤 부위는 필연적으로 수반되는 표면마모 현상을 해결하기 위하여 특수강재의 사용이 요구되나 이들의 대부분은 고가이므로 耐磨耗性등이 그다지 필요로 하지 않는 곳에는 일반탄소강이나 저합금강 등을 쓰는것이 경제적으로 바람직하다. 따라서 탄소강과 이러한 용도의 고합금강과의 異種金屬 熔接은 불가피하게 이루어지고 있다<sup>1)~4)</sup>. 특히 기계 장치 중에서 가장 가혹한 환경을 받는 부분의 요구조건에 적합한 고급재료를 선정할 후 접합시켜 설비전체의 건전성을 확보할수 있다면 설계의 대원칙인 안전성과 경제성 측면에서 異種金屬 熔接의 이점을 최대한 살릴수 있다고 하겠다.

그러나, 이종금속용접은 서로다른 金屬의 상호 회석, 擴散에 의해 야금학적으로 복잡한 거동을 나타내기도 하며<sup>5)</sup>, 열처리나 사용분위기 변화에 따라 제반특성이 큰폭으로 변화한다<sup>6),7)</sup>.

본 연구에 사용된 용접재료는 13%크롬이 함유된 마르텐사이트계 스테인레스 용접재료로서 내열성, 내식성 및 내마모성이 우수하기 때문에 제철 산업에 이용되는 roll을 비롯하여 터빈 날개, 교반기용 프로펠러 등의 육성용접에 이용되고 있다. 이러한 용접재료를 사용하여 구조용 탄소강 위에 肉盛 熔接을 실시한 후, 熱處理 조건변화에 따른 용접부의 야금학적 특성과 기계적 성질을 파악하므로써 고온분위기에서 사용되는 기계장치의 성능을 보장하기 위한 적정 熔接施工 條件을 제시하고자 하였다.

2. 實驗方法

실험에 사용된 모재는 구조용탄소강이며 그위에 13%크롬이 함유된 용접재료를 써서 肉盛 熔接을

실시하였다. Table 1에 각재료의 화학조성을 나타낸다. 경도, 조직 및 마모시험을 위하여는 Fig.1(a)와 같이 육성용접을 실시한 후 시험편을 채취하였으며 (b)와 같이 맞대기 용접시험편을 이용하여 충격, 굽힘시험편을 제작하였다. 이때 사용된 熔接法은 수동용접법이며 용접 후에는 450°C, 550°C, 650°C, 750°C 및 850°C에서 각각 0.5시간, 2시간 및 10시간 유지후 공냉하는 熱處理 변화(15종류)를 실시하여 열처리를 거치지 않은 시험편과 비교하였다. EPMA를 이용한 용접 경계부의 크롬과 炭素의 擴散거동에 대하여도 실험을 행하였다.

한편 충격시험은 KS B 0809 (4호)로 제작하여 조건당 3 개씩의 Charpy 충격시험을 행하였는데 notch는 용착부와 탄소강의 용접경계부에 가공하였다. 熱處理 변화에 따른 용접부의 균열발생 감수성을 조사하기 위하여 조건당 3 개씩의, 측면 굽힘시험을 행하였으며, 대월식(大越式) 磨耗試驗機를 사용하여 열처리 조건변화에 따른 마모 특성도 조사하였다. 이때의 실험조건은 최종하중 6.3kg, 마찰거리 200m로 고정 하였으며, 마찰속도는 0.25 m/s, 0.94 m/s, 2.38m/s 및 4.39m/s로 변화시켰다. 실험시 마모량은 무게감량을 측정 하는 방법으로 磨耗特性을 조사하였다.

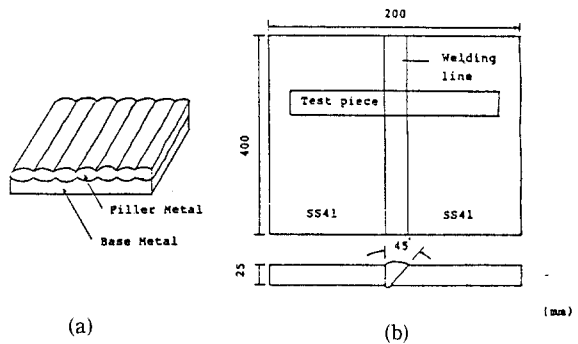


Fig. 1 Test coupon preparation scheme

Table 1 Chemical compositions of materials

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ceq.
Base Metal	0.172	0.272	0.829	0.013	0.006	0.029	0.014	0.006	0.33
Filler Metal	0.126	0.526	0.635	0.037	0.223	0.223	13.0	0.018	2.87

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1. 熔接部 組織과 熱處理

육성용접 후 열처리 조건을 변화 시켰을 때의 현미경 조직사진을 Fig. 2에 나타내고있다. 사진의 오른쪽 부분이 炭素鋼의 조직이며, 왼쪽의 흰 부분은 스테인레스강 용착금속으로서 이부분은 nital용액으로는 부식되지 않기 때문에 희게 보인다. 용접 경계부를 중심으로 熱處理 시편에서는 검은 부식층이 존재하고 있으며 그 두께는 열처리 온도가 증가할수록 넓어지는데 650°C에서 약 45μm

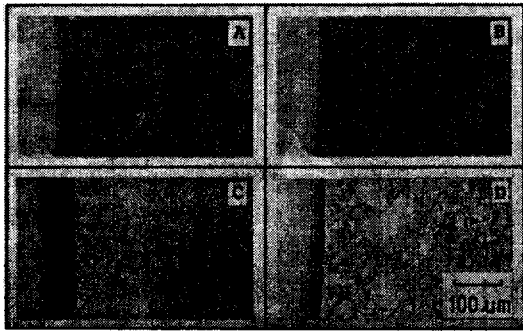


Fig. 2 Micrographs showing the effect of heat treatment temperature on bonded zone width  
A: As welded B: 450°C(2Hr) C: 650°C(2Hr) D: 850°C(2Hr)

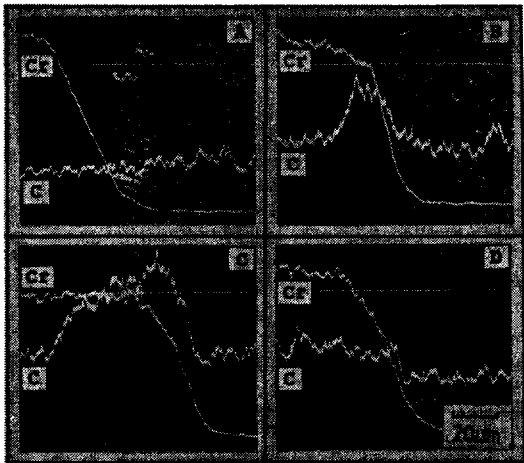


Fig. 3 Analytical result of C and Cr with EPMA  
A: As welded B: 550°C(2Hr) C: 650°C(2Hr) D: 850°C(2Hr)

정도로 가장 넓어졌음을 볼수있다. 한편 용접 경계부의 탄소강측에는 백색띠가 존재함을 볼 수 있는데 溫度가 증가함에 따라 증가하는 경향이있다. 肉盛熔接部の 검은층을 좀더 세밀하게 검토하기 위하여 각 열처리 시편의 경계부를 EPMA로 線分析한 결과가 Fig. 3이며 線分析 대상원소는 탄소와 크롬이었다.

Fig. 3에서 경계부의 좌측은 용착금속이며, 우측은 구조용탄소강 모재를 나타내고 있다. 열처리 전 시편의 결과를 보면 스테인레스강 용착금속에서는 크롬량이 매우 높게 보이는 반면, 탄소의 경우는 Table 1에서 보는 바와 같이 두재료의 炭素량이 거의 비슷하기 때문에 농도의 변화가 없었다. 모든 시료에서 크롬은 스테인레스 용착금속측으로 부터 탄소강측으로 급격한 농도구배를 나타내고 있으며 열처리 조건변화에 관계없이 거의 擴散이 일어나지 않음을 볼 수 있다.

그러나, 炭素는 열처리 조건별로 큰 차이를 나타내었다. 즉 550°C로 열처리한 시료의 경우 탄소의 peak가 확인되고 있으며 650°C에서는 그러한 경향이 매우 크고 넓게 나타났다. 온도가 더욱 높은 경우에는 炭素濃度 분석 곡선이 오히려 감소되는 경향이 있었는데, 850°C의 결과를 보면 두종류의 재료내에서 탄소의 농도변화는 거의 확인할 수 없을 정도였다.

이러한 결과를 Fig. 2의 검게 부식된 층과 대응시켜 보면 그 부분의 폭과 EPMA에 의한 炭素擴散幅이 정확히 일치하므로써 검게 부식된 부분이 탄소 확산에 의해 생성된 침탄층임을 알수있다.

한편 650°C로 열처리한 경우에 비하여 더높은 온도에서 탄소농도가 저하하는 이유로서는 경계부에서 일단 炭素物로 석출한 후 분위기 온도가 충분히 높기 때문에 이미 생성되었던 탄화물이 재분해됨과 함께 탄소가 용접금속 내부로 이동하여 농도를 낮춘 것으로 사료된다. 열처리온도 850°C의 경우에는 이상과 같은 영향 이외에도 이재료의 A1 變態點(810°C) 이상의 온도이기 때문에 용접금속과 모재 모두가 F.C.C구조를 갖는 오스테나이트이며 이러한 matrix에서는 B.C.C 구조보다 炭素擴散 속도가 느리다는 것과 F.C.C의 炭素固溶度가 높다는 것등 여러가지 요인이 복합되어 나타난 현상으로 생각된다<sup>8)</sup>.

이러한 실험결과를 550-690°C 구간에서 탄소의 高濃度化가 일어난 후 더 높은 온도에서는 오히려 감소한다는 大西<sup>9)</sup>의 보고와도 일치하는 것이다.

한편, 熱處理時間이 탄소확산에 미치는 영향을 조사하기 위하여 각각의 열처리 온도 변화 시편에 대하여 열처리 시간을 변화시켜 용접 경계부를 관찰하였다. Fig. 4는 炭素擴散현상이 가장 뚜렷한 650°C 열처리재의 실험결과를 例示한 것이다. Fig. 4에서 검게 보이는 침탄층의 우측에 백색의 결정 입도가 큰 부분이 탈탄층 즉, 탄소결핍 영역인데 0.5 시간에서 10시간으로 증가하면서 탈탄영역이 넓어져 0.5 시간에서는 약 0.12mm 정도였으나 2시간의 경우는 0.20mm로 확대되었으며,

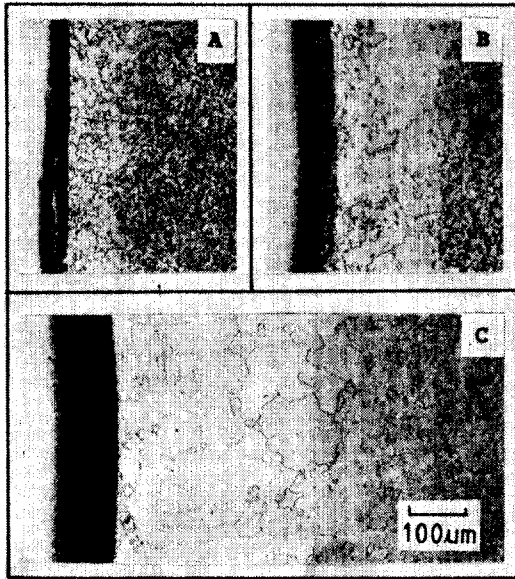


Fig. 4 Change of decarburized band width vs. heat treatment time (650°C)  
A: 0.5Hr B: 2Hr C: 10Hr

10시간에서는 그 幅이 0.43mm까지 넓어졌다. 粗粒領域은 탄소결핍에 의하여 생성된 純鐵에 가까운 탄소조성을 갖는 페라이트 조직이며 이러한 현상을 일으키는 주요 원인은 고온으로 장시간 가열에 의해 스테인레스 용접부 층의 크롬이 주위의 炭素와 결합하여 크롬 炭化物(주로 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>)을 형성하게 되면서 低 크롬 층의 탄소가 계속 高 크롬 층으로 빠져나가 결국 탄소농도가 매우 낮은 페라이트 층을 형성한다는 說에 기인한다.

이러한 페라이트 층의 형성을 방지하기 위하여는 탄소편석 방지를 위한 냉각속도의 조정, 粗大化 방지를 위한 熱處理 溫度 저하 및 페라이트 생성원소가 적을것 등이 거론되고 있다<sup>8)</sup>.

이상과 같은 실험결과에 의하여 침탄층, 탈탄층의 폭 변화를 열처리 조건 변화에 따라 열처리 시간과 온도의 함수인 라슨-밀러 지수 P(식 1)<sup>10)</sup>로 정리할수 있으며 그 결과를 Fig. 5에 나타낸다.

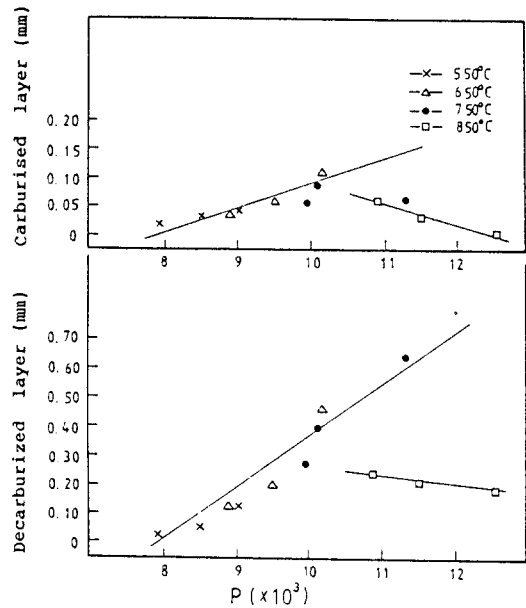


Fig. 5 Relation between width of decarburized layer, carburized layer and Larson-Miller parameter(P)

$$P = T(10 + \log t) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, T = 절대온도 (K)

t = 열처리 시간 (Hr)

도표에 의하면 열처리 온도와 시간이 증가할수록 즉, 지수 P가 증가할수록 그 폭은 넓어지고 있는데 그러한 상관 관계는  $P < 10 \times 10^3$ 의 구간에서 최소자승법을 이용하여 다음과 같은 일차 함수(실험식)로 표시가 가능하였다.

$$W1 = 0.046 P - 0.367 \dots\dots\dots (2)$$

$$W2 = 0.177 P - 1.400 \dots\dots\dots (3)$$

여기서, W1 = 침탄층의 폭 (mm)

W2 = 탈탄층의 폭 (mm)

$P = \text{라슨-밀러 지수} (\times 10^3)$

그러나 열처리 온도 850°C의 경우에는 상기 (2), (3)식을 만족하지 않고 식 (4), (5)와 같은 또다른 함수로 표시되고 있었다.

$$W3 = -0.033 P + 0.419 \dots\dots\dots (4)$$

$$W4 = -0.029 P + 0.551 \dots\dots\dots (5)$$

여기서,  $W3 = 850^\circ\text{C}$  경우의 침탄층 폭(mm)

$W4 = 850^\circ\text{C}$  경우의 탈탄층 폭(mm)

단,  $P > 10.9 \times 10^3$

이와같은 결과는 전술하였듯이 이온도 구간이 A1 變態點 이상이기 때문에 생기는 효과와 관련이 있는 것으로 사료되었는데 라슨-밀러 지수로 예측 가능한 탈탄층, 침탄층의 幅은 재료에 따라 變態溫度라는 하나의 요소를 반드시 고려해야 한다는 사실을 제시하고 있다.

### 3.2. 熔接部 機械的 性質과 熱處理

#### 3.2.1. 硬度 測定 結果

경도 분포의 가장 큰 특징은 모든 열처리시편에서 경계부를 중심으로 심한 경도의 불연속이 존재하고 있는데 이는 근본적으로 두 재료의 物性 차이에 기인하기 때문이나 열처리에 따라 그 양상은 다소 차이가 있었다. Fig. 6은 熔接後 650°C로 열처리를 실시한 시편의 경도 분포를 비교한 그림이다. 먼저 용접후 열처리를 받지 않은 시편의 경우 용착부에서는 대략 460Hv 정도를 나타내고 있으나 경계부를 지나면서 급격히 저하하여 탄소강 모재에서 190Hv 정도를 나타내고 있다. 이에 대한

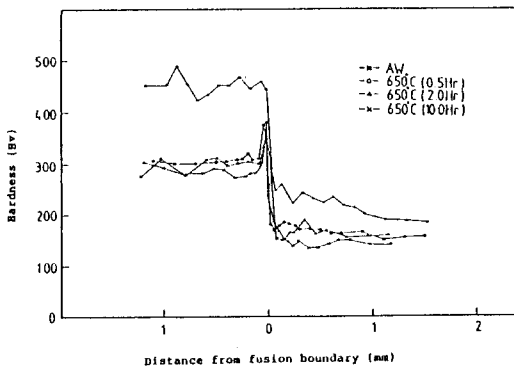


Fig. 6 Effect of heat treatment on hardness distribution of the overlay weldment

여 650°C 열처리재의 경우 스테인레스강 용접금속 내부에서는 280-320Hv를 보이고 있으나 용접 경계부에서는 최고경도 390Hv 전후의 경도 peak치를 보이고 있는데 이는 炭素의 이동에 의한 炭化物 생성때문으로 여겨진다.

한편 탄소강측의 탈탄층 영역에서는 급격한 경도저하 현상이 일어남을 볼 수 있다. 경도저하 현상은 열처리 시간이 증가할수록 저하하고 있으며 그 범위는 0.5 시간의 경우 0.12mm, 2 시간의 경우 0.20mm 및 10 시간의 경우 약 0.45mm 정도로서 앞서의 탈탄층인 페라이트 영역과 일치하였다. 이러한 경도저하 부분에서는 應力이 작용할 경우 균열이 발생하기 쉽게 되는 등 매우 취약한 부분으로 존재하기 때문에 많은 주의를 요한다.

#### 3.2.2. 側面 굽힘試驗 結果

열처리 조건변화에 대한 측면 굽힘시험후의 균열 발생상태를 Fig. 7에 정리하여 나타냈다. 전체적으로 열처리 온도와 시간과의 관계를 도식화 해본 결과 일정범위내에서 균열이 발생되지 않는 영역이 있음을 알 수 있다. 즉, 도표에서 점선으로 표시된 좌측하단은 균열 발생 영역으로 650°C의 0.5 시간 이하와 550°C의 0.5 시간이하 및 450°C의 5시간 정도 이하가 여기에 속한다. 한편, 熱處理 과정에서 일정량 이상으로 많은 에너지를 받은 우측 상단 영역에서도 균열이 발생되므로써 이 영역 역시 균열 안전지대가 아님을 알 수 있다.

熱處理 조건이 적당한 시편은 용접부가 어느 정도 연화되어 굽힘시편이 smooth하게 roll에 접촉되면서 굽힘응력을 받으므로써 균열이 발생되지 않았다. 그러나 입열량이 지나치게 증가한 경우에

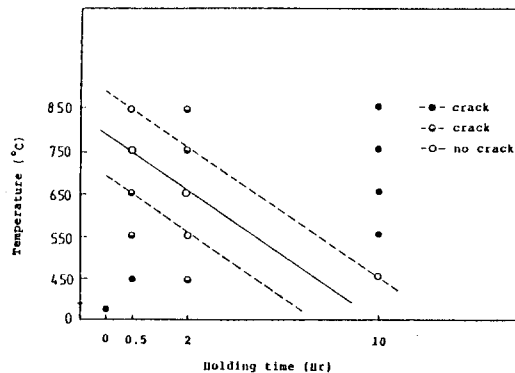


Fig. 7 Result of side bend test

는 다시 균열이 발생되었는데 이러한 이유는 탈탄층인 페라이트 영역이 확대되면서 이음부에 균열 발생이 용이한 취약부로 존재하기 때문으로 여겨진다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 본 연구과 같은 실험조건에서 용접부 균열이 발생되지 않는 적정 熱處理領域이 발견되었는데 이것은 실제 용접현장에서 매우 중요한 의미를 가지고 있다 하겠다.

3.2.3. 衝擊試驗 結果

硬化 肉盛熔接은 그 본래의 목적이 耐磨耗性 향상에 있으나 사용장소의 특성에 따라서는 내충격성 또한 중요한 성질이 된다. Fig. 8은 열처리변화와 취성파면율과의 관계를 나타낸다.

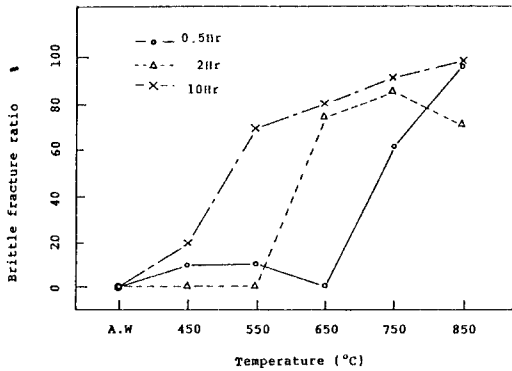


Fig. 8 Impact test result

취성파면율은 고온 장시간의 열처리와 저온단시간의 열처리로 대별되며 전자는 60% 이상, 후자는 30% 이하를 나타내고 있다.

破壞의 양상을 보면 고온 장시간에서는 용접금속과 탄소강 모재의 경계부근을 따라 파괴가 시작되고 진전되었으나 비교적 저온에 해당되는 450°C의 전구간, 550°C의 0.5 시간, 2 시간 및 650°C의 0.5 시간 등에서는 경계부에 notch를 주었음에도 불구하고 연강의 HAZ를 따라 파괴되었다. 이러한 현상은 저온의 熱處理에서는 충분한 탄소의 확산이 이루어지지 않아 경계부의 인성이 상대적으로 연강의 HAZ 보다 인성이 높기때문으로 여겨진다. 한편 그 이상의 온도에서는 모두 경계부를 따라 파괴가 이루어졌는데 衝擊値는 매우 낮았다.

실험결과에 의하면 충격력이 비교적 크게 작용하는 부재에서는 安全度 면에서 취성파면율이 50% 이하로 되는 부분 즉, 450°C 전구간, 550°C의

0.5 시간, 2 시간 및 650°C의 0.5 시간 등이 적정한 것으로 여겨진다.

3.2.4. 磨耗試驗 結果

열처리 조건변화에 따른 摩擦速度와 磨耗量의 관계를 보면 Fig. 9와 같이 마모량은 0.25m/s 보다 속도가 증가한 0.94m/s에서 최소치를 나타내었다. 이후 속도가 증가하면서 마모량이 증가하였는데 1m/s 부근에서 최소 마모량을 나타내는 현상은 대기중의 鋼의 磨耗에서 일반적으로 보여지는 현상으로, 이러한 부분을 附着限界라고 하며 그 이하를 非附着域, 그 이상을 附着域(溶着域)이라 한다<sup>11)</sup>.

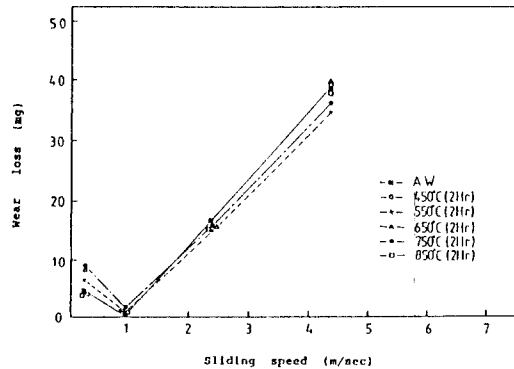


Fig. 9 Effect of sliding speed and heat treatment on wear loss

본 실험의 경우 비부착역에서는 미세한 磨耗粉이 탈락하였는데 대하여 고속의 부착역에서는 흡착시간이 짧게되기 때문에 응착이 일어나기 쉬운 마모분이 큰 金屬粉으로 발생하였다. 이러한 결과와 磨耗痕을 비교조사하여 본 결과 본 실험의 저속측은 일반적으로 알려진 非附着域에 해당하는 것이며, 고속측은 응착이 주체로 되어 마모가 진행되는 附着域으로 판단되었다<sup>12)</sup>.

Fig. 10은 마모량과 열처리온도 및 마찰속도와의 관계를 보인것이다. 마찰속도 0.25m/s에서의 磨耗量은 경도분포에 반대되는 현상을 보이므로서 비부착역 영역에서는 경도가 증가하면 마모량은 감소하고 경도가 감소하면 마모량은 증가한다는 사실을 알 수 있다. 그러나 속도가 증가하면서 나타나는 양상은 달라지는데 부착 한계속도로 여겨지는 0.94m/s와 고속영역(응착영역)인 2.38m/s에서는 硬度變化에 관계없이 마모량은 거의 일정

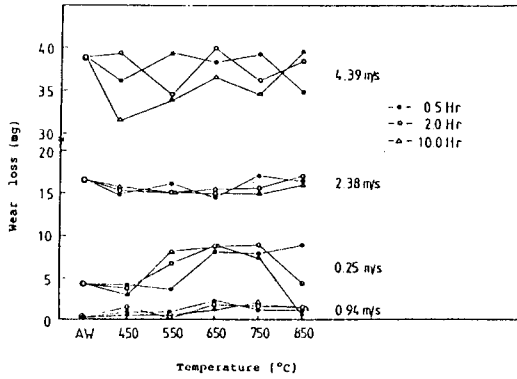


Fig. 10 Correlation of wear loss, sliding speed and heat treatment

하였다. 한편 속도가 더욱 증가된 4.39m/s에서는 뚜렷한 경향이 없이 산포가 매우 심하였다.

Fig. 11은 열처리변화에 따른 경도변화를 횡축으로 하고 이에따른 마모량의 변화를 종축으로 하여 각 속도별로 정리한 결과이다. 경도가 증가함에 따라 마모량은 속도별로 그 경향이 다름을 알 수 있는데 0.25m/s의 저속에서는 경도가 증가함에 따라 마모량은 큰 폭으로 저하하고 있으며, 속도가 0.94m/s로 증가하면서는 거의 비슷한 마모량을 나타내고 있다. 그러나 속도가 고속으로 되면서는 경도가 증가함에 따라 오히려 마모량은 증가하였으며, 4.39m/s에서는 그 경향이 매우 뚜렷함을 알 수 있다. 마모현상에 관하여는 마모량이 壓力과 硬度的 비에 비례한다는 소위 Holm의 법칙이 존재하여 경도가 높을수록 마모량은 적어지나 본 연구 결과 주목되는 것은 이 법칙이 저속에서만 성립됨을 알 수 있다.

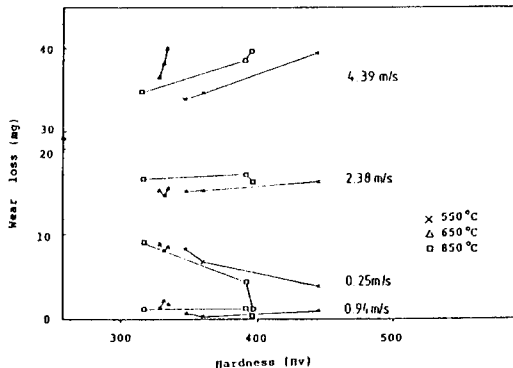


Fig. 11 Trend of wear loss with sliding speed and heat treatment

#### 4. 結 論

구조용 탄소강 모재에 마르텐사이트계 스테인레스 용접재료를 사용하여 용접한 후 熱處理 조건변화가 肉盛熔接部の 조직과 기계적성질에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 용접후 열처리조건 변화에 의해 구조용탄소강 측에는 脫炭層이, 스테인레스 강 용착금속 측에는 侵炭層이 발생하였는데 그러한 경향은 650°C 장시간 열처리 시험재에서 가장 뚜렷하였다.
- (2) 침탄층과 탈탄층의 폭은 열처리온도가 증가하고 시간이 길어지면서 증가하였는데 이를 라슨-밀러 지수로 정리한 결과 A1 變態點 이하에서 직선적인 관계를 나타내었으나 재료에 따라 變態溫度를 고려하여야 할것으로 사료된다.
- (3) 측면 굽힘시험결과 일정범위의 열처리 조건에서 균열이 발생되지 않는 영역이 존재하였으며 衝擊試驗에서는 열처리온도와 열처리시간이 증가할수록 취성과면율이 증가하므로써 충격력이 요구되는 부재의 경우에는 취성과면율이 낮은 구역의 열처리가 요구된다.
- (4) 肉盛熔接部の 마모특성은 열처리조건 변화에 따른 용접부 경도 및 摩擦速度와 직선적인 관계가 있었다. 즉, 저속인 경우에는 경도가 증가함에 따라 마모량은 감소하였으며 고속인 경우에는 경도가 증가함에 따라 마모량은 증가하는 경향을 나타내었다.

#### 參考文獻

- 1) 五代友和 :肉盛溶接の現象と問題點, 溶接技術, Vol. 24, No.10, (1976), p. 19
- 2) 勝森茂明 : 製鐵用部品の肉盛溶接におけるプラズマアーク溶接の適用, 溶接技術, Vol. 28, No. 11, (1980), p. 82
- 3) G.M.Slaughter : The welding of ferritic steel to austenitic stainless steels, W.J., Vol. 43 No. 10, (1964), p. 454s
- 4) R.B.Dooley Ontario hydro experience with dissimilar metal welds in boiler tubing, W.J, Vol.61, No.2, (1982), p. 45s

- 5) R.J.Christoffel: Carbon migration in welded joints at elevated temperatures, W.J., Vol. 35, No.9, (1956), p. 457s
- 6) D.Peckner: Handbook of stainless steel, McGraw-Hill, (1977), p. 26, 2
- 7) 水野政夫: 表面硬化肉盛溶接の溶接割れに関する研究, 溶接學會誌, Vol. 37, No. 10, (1968), p. 1062
- 8) 浜田普作: 異種金屬溶接のかんどころ, 現代溶接技術大系(27), 産報出版, (1980), p. 139
- 9) 大西: ステンレス鋼オーバレイ溶接部の剝離現象に関する研究(第3報), 溶接學會全國大會講演概要集, Vol.31, (1982), p. 90
- 10) F.R.Larson: Trans. A.S.M.E., 74(1982)
- 11) 笹田: 潤滑, Vol. 9, No. 2, (1964), p. 89
- 12) 新井秀: 高速度鋼における熱處理條件, 組織と内磨耗性の關係, 鐵と鋼, Vol. 59, No. 6, (1973), p. 48