

## 가속냉각각 GMAW 용접이음부의 강도 변화

방국수\* · 정성욱\*

\*부경대학교 재료공학부

### Variation of Welded-Joint Tensile Strength of GMA Welded Accelerated-Cooled Steel

Kook-soo Bang\* and Sung-wook Jung\*

\*Division of Materials Science and Engineering, PKNU, Pusan 608-739, Korea

#### Abstract

Variation of welded-joint hardness and tensile strength of a accelerated-cooled fine-grained ferritic-pearlitic steel with heat input was investigated. In a weld heat-affected zone, a softened zone was formed and it had lower hardness than that of a base metal. While the width of a softened zone increased continuously with an increase of heat input up to 100kJ/cm, the minimum hardness in a softened zone was almost constant after a continuous decrease up to 60kJ/cm. Because of a softened zone, the welded-joint was fractured in the HAZ and its maximum reduction of tensile strength was about 20%. Measured welded-joint tensile strength and calculated minimum tensile strength in a welded-joint was almost same, which means that the plastic restraint of a softened zone did not occur in this experiment. It is believed that as a softened zone width-to-specimen thickness ratio is as high as 2~6 in this experiment, the plastic restraint effect does not occur. Theoretical analysis shows that the plastic restraint effect occurs only when the ratio is below 0.5.

(Received July 7, 2000)

Key Words: Accelerated-cooled steel, HAZ softened zone, Welded-joint strength, Hardness, Relative thickness, Plastic restraint

#### 1. 서 론

결정립 미세화는 강의 강도와 인성을 동시에 향상시킬 수 있는 아주 유용한 방법이다. 현재까지 보고된 페라이트 크기에 따른 항복강도와 파면천이온도 변화를 페라이트 크기 1 $\mu$ m로 외연장하면 항복강도는 약 800MPa, 파면천이온도는 약 -300 $^{\circ}$ C을 나타낸다<sup>1)</sup>. 이러한 사실은 합금원소 첨가 없이 고강도·고인성 강의 제조가 가능함을 나타내어, 현재 국내외에서 연강의 성분으로 인장강도 800MPa을 갖는 미세립 구조용 고강도 강(이하 세립강)의 연구개발이 활발히 추진되고 있다<sup>2-4)</sup>.

이러한 세립강을 용접하면 열영향부(HAZ)에서 가열과정 중 결정립 성장이 일어나고, 냉각과정 중 고상

변태로 인하여 원래의 미세한 페라이트 조직이 소실된다. 그 결과 HAZ 강도가 모재보다 저하하는 소위 HAZ 연화가 문제로 된다<sup>5)</sup>. HAZ 연화는 열처리형 고장력강 용접부에서 흔히 보여지는 문제로 열처리를 통하여 형성시킨 경화조직이 용접 열에 의하여 소실되어 생긴다. Akselsen 등은<sup>6)</sup> 가속냉각 강과 퀘칭-템프링 강의 HAZ 연화를 조사하여 빠른 냉각속도에서는 연화가 발생하지 않지만 느린 냉각속도에서는 발생하여, HAZ 항복강도가 모재보다 대폭 저하한다고 보고하였다. 仁藤 등은<sup>7)</sup> 탄소당량(Ceq)이 다른 제어압연 강을 대입열 용접하면 Ceq가 0.35~0.40% 이하의 강에서만 연화가 일어나며, 연화부 강도는 모재보다 약 70MPa 정도 저하한다고 보고하였다. 저자들은 페라이트 크기가 4 $\mu$ m인 세립강의 열싸이클 재현시험 결과, 800 $^{\circ}$ C에서 500 $^{\circ}$ C까지의 냉각시간( $\Delta t_{8/5}$ )이 길어지

면 재현 HAZ 강도가 모재 이하로 저하하여, 40초 경우 모재 항복강도의 약 80%를 나타냄을 확인하였다<sup>8)</sup>.

본 연구에서는 가속냉각에 의하여 페라이트 크기를 4 $\mu$ m로 세립화한 강을 실제 용접하여 입열량에 따른 연화영역 크기와 강도 저하를 정량화하고, 연화영역이 존재하는 용접이음부의 강도를 이론적으로 계산하여 측정값과 비교하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험재

시험재는 실험실적으로 제조된 두께가 5mm이고 폭이 약 100mm인 압연강판으로 0.14%C-0.25%Si-1.10%Mn의 화학성분을 가지는 C-Mn 강이다. 세립화를 위하여서 A<sub>3</sub>온도 직상의 미재결정 영역에서 강압하 압연을 행한 후, 10 $^{\circ}$ C/s의 냉각속도로 가속냉각을 하였다. 페라이트 크기는 평균 4 $\mu$ m이며 인장강도, 항복강도, 연신율은 각각 630MPa, 480MPa, 18%이고, 평균경도는 200H<sub>v</sub>이다.

### 2.2 실험방법

압연판을 두께 4.5mm로 연삭한 후 AWS ER80S-G 와이어를 사용하여 입열량 10~100kJ/cm로 CO<sub>2</sub> 가스를 이용한 GMAW 편면 1패스 맞대기용접을 하였다. 40kJ/cm 이상에서는 용락을 방지하기 위하여 두 판을 쌓아 용접하였다. Fig. 1에 한 판 및 두 판을 사용하는 이음부 형상을 대표적으로 20kJ/cm와 40kJ/cm에 대하여 나타내었다. 용접한 후 경도 및 인장시험편을 판 두께 중앙부에서 채취하였다. 두 판을 쌓아 용접한 경우에는 아래 측 판의 판 두께 중앙부에서 시험편을 채취하였다. 경도는 용접부 단면에 대하여 1mm 간격으로 하중 1kg의 비커스 경도를 측정하

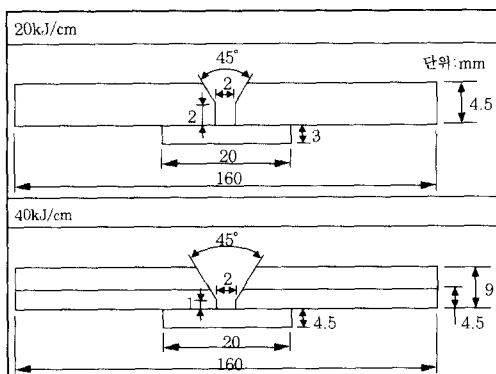


Fig. 1 Joint configurations for 20 and 40kJ/cm heat input welding.

였는데 최소 3번 이상을 측정하여 평균값을 경도로 하였다. 인장시험은 용접선에 수직으로 표점거리 50mm, 폭 10mm, 두께 3mm의 시험편으로 가공한 후 5mm/min의 cross-head 속도로 행하였다. 시험편 폭이 용접 이음부 강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여서 폭 10mm 이외에 20, 30, 50, 70mm의 시험편도 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 HAZ 연화 현상

Fig. 2에 대표적으로 20kJ/cm로 용접한 경우 용접이음부 단면의 경도변화를 나타내었다. 경도는 용접금속에서 약 200H<sub>v</sub>를 나타낸 후 HAZ에서 모재 이하로 저하한 다음 재차 상승하고 있다. 용접금속 좌우에서 다소 차이를 나타내나 모재 경도보다 저하한 연화영역 폭은 8~10mm를 나타내며, 최저 경도는 163~166H<sub>v</sub>를 나타내고 있다. 현미경 조직시험 결과, 용융선 (fusion line)에서 3mm까지는 베이나이트와 페라이트 혼합조직을 나타내나 그 이상에서는 페라이트와 펄라이트 혼합조직을 나타내었다. 하지만 페라이트는 용융선으로부터 멀어질수록 미세화 하여 8mm에서 모재와 같은 미세한 크기를 나타내었다. 따라서 이러한 경도 변화는 용접열에 따른 조직 변화와 잘 대응하고 있음을 알 수 있다.

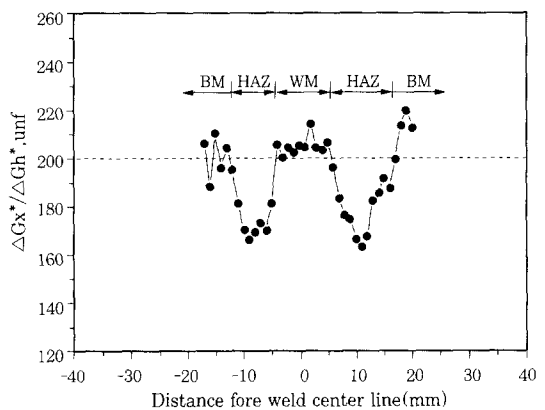


Fig. 2 Cross-sectional hardness distribution of welded joint (heat input: 20kJ/cm)

입열량 변화에 따른 연화영역 폭과 최저경도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 연화영역 폭은 10kJ/cm에서 6~8mm를 나타낸 후 지속적으로 증가하여 100kJ/cm에서 23~24mm를 나타낸다. 한편 최저경도는 10kJ/cm에서 171~174H<sub>v</sub>를 나타낸 후 저하하여 60kJ/cm에서 약 153~160H<sub>v</sub>를 나타낸 후 저하가 거의 포화하고 있다. 현미경 조직시험 결과, 최저경도

를 나타내는 곳에서의 조직은 모든 입열량에서 페라이트·펄라이트이나 페라이트 크기는 모재보다 성장하여 10, 20, 40, 60kJ/cm에서 각각 5.3, 6.1, 6.5, 6.8 $\mu$ m을 나타낸 후 더 이상 크게 성장하지 않았다. 따라서 본 실험조건에서 입열량의 증가에 따라 연화영역은 지속적으로 증대하나 정도 저하는 60kJ/cm 이상에서 거의 포화하고 있음을 알 수 있다.

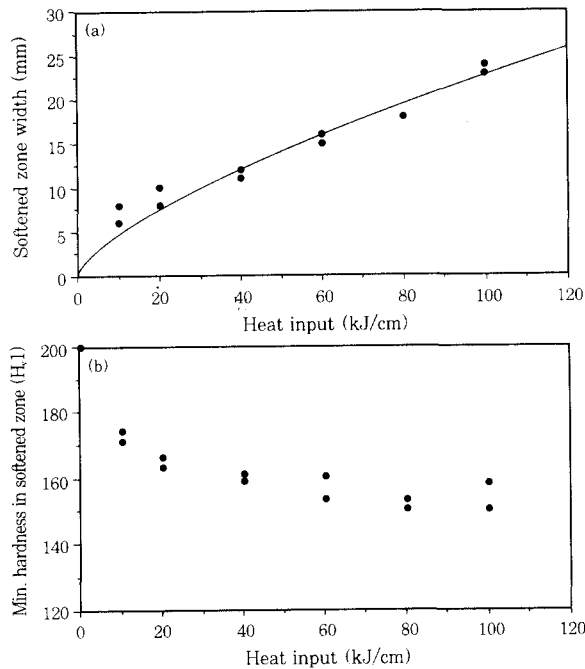


Fig. 3 Variation of (a) width and (b) minimum hardness of a softened zone as a function of heat input

용접이음부에 연화영역이 존재하면 인장시험시 연화영역이 먼저 변형되어 그곳에서 파단이 일어날 것으로 생각된다. 이런 점을 확인하기 위하여 인장시험편을 마크로 부식하여 HAZ를 시험편에 표시한 후 인장시험하여 파단위치를 확인하였다. Fig. 4에 대표적으로 20kJ/cm로 용접한 시험편의 파단 모습을 나타내었는데 HAZ에서 파단되었음을 확인할 수 있다. 이러한 HAZ 파단은 10~80kJ/cm로 용접한 모든 시험편에서 나타나 연화영역의 영향을 확인할 수 있다. 100kJ/cm로 용접한 시험편은 용접금속에서 파단하였는데 이것은 과도한 입열량으로 용접금속 정도 (약 140HV)가 연화영역 최저경도 (150~158HV)보다 더욱 낮은 값을 나타내기 때문이다. Fig. 5에는 측정된 이음부 인장강도를 입열량의 변화에 따라 나타내었다. 입열량의 증가와 함께 인장강도는 저하하여 10kJ/cm에서 564~568MPa를 나타낸 후 60kJ/cm에서 507~514MPa로 저하한 다음 거의 포화하고 있다. 이러한 경향은

Fig. 3에 나타난 최저 경도의 변화와 동일함을 알 수 있다. 모재의 인장강도 630MPa를 감안하면 본 실험에서 최대 연화의 정도는 약 20%임을 알 수 있다.

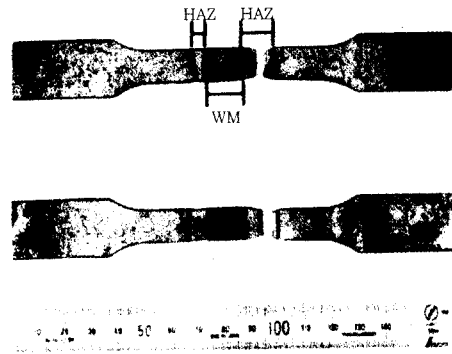


Fig. 4 Fracture appearance of welded-joint tensile specimens

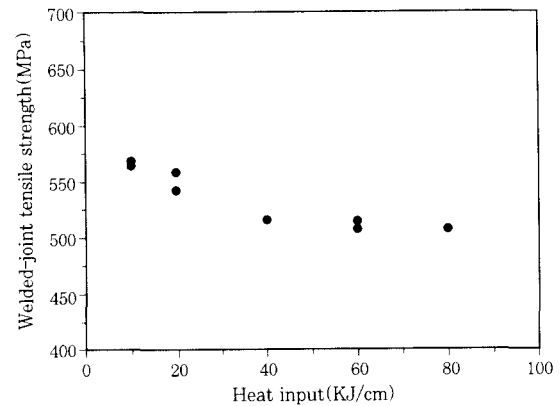


Fig. 5 Variation of a welded-joint tensile strength as a function of heat input

### 3.2 연화영역을 포함하는 이음부 강도 예측

HAZ에서 경도가 아닌 강도의 변화를 연속적으로 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 본 실험에서는 재현 열사이클 인장시험편을 사용하여 먼저 경도와 강도의 상관관계를 구한 후, 실제 용접이음부 정도값에 대입하여 연속적인 강도변화를 유추하였다. 먼저 12×100×5mm의 시험편에 열사이클을 부여한 후, 두께 1.5mm의 ASTM E8 subsize 인장시험편으로 가공하여 경도와 인장시험을 행하였다. 열사이클은 열사이클 재현장치를 사용하여 가열속도 135℃/s로 750~1,350℃로 가열한 다음, 800~500℃ 구간을 5~40s로 냉각하여 재현하였다. Fig. 6에 재현 HAZ 인장강도와 경도의 관계를 나타내었는데 두 사이의 관계식은 다음과 같다.

재현 HAZ 인장강도,  

$$MPa = 11.24(\text{재현 HAZ 경도}, H_v)^{0.76} \quad (1)$$

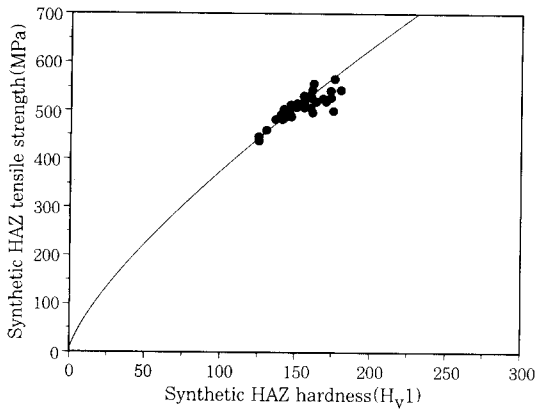


Fig. 6 Variation of a welded-joint tensile strength as a function of heat input

이 관계식을 연속경도 측정값에 대입하면 용접이음부 인장강도의 연속적인 변화를 알 수 있다.

Fig. 7에는 이렇게 계산한 각 입열량에서의 인장강도 최저값과 실제 측정된 인장강도의 상관관계를 나타내었다. 두 사이에는 거의 1:1의 관계가 있음을 알 수 있다. 이런 점은 연화영역을 포함하는 이음부가 소성 변형 되면 주위의 강도가 큰 부분이 변형을 구속하여 강도가 연화영역 자체의 강도보다 높아진다는 佐藤의 발표와 차이가 있다<sup>9,10)</sup>. 이런 이유를 佐藤의 이론을 사용하여 본 실험에서와 같은 연화영역을 가지는 용접이음부 인장강도를 계산한 후 실측값과 비교하여 살펴 보았다. 佐藤 등은 연질부 (연화영역)를 포함하는 용접이음부 정적강도를 계산한 결과, 연질부 강도는 판 두께에 대한 연질부 두께의 비, 즉 상대두께, X가 작을수록 증가한다고 하였다. 또 동일 상대두께에서는 판 폭이 판 두께보다 커질수록 폭 방향 구속이 작용하여 강도가 증가한다고 하였다<sup>9,10)</sup>. 본 계산에서는 폭 방향 구속 효과가 작은 정방형 단면의 시험편을 가정하여 계산하였다.

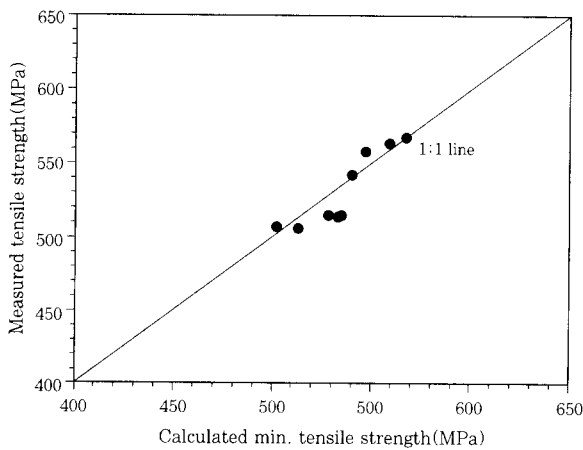


Fig. 7 Comparison of calculated minimum tensile strength and measured tensile strength of a welded-joint

실제적으로는 본 실험에서 사용한 인장시험편 두께와 폭은 각각 3mm와 10mm로 정방형 단면이 아니라, 나중에 보는바와 같이 본 조건에서 폭 방향 구속효과는 나타나지 않아 정방형 단면의 가정이 가능하다.

佐藤 등은 정방형 단면을 가지는 시험편의 강도는 정방형 단면에 내접하는 원을 단면으로 하는 환봉 시험편의 강도와 동일하다고 하였다<sup>9,10)</sup>. 이때 Fig. 8에 나타낸 것처럼 반경  $a_0$ 의 환봉 중간에 두께  $2h_0$ 인 연질부가 있는 용접이음부가 축 방향 인장하중을 받는 경우 연질부 축방향 평균응력과 변형의 관계를 다음과 같이 계산하였다. 먼저 강도가 높은 모재에 의하여 연질부 변형이 구속되어 연질부에서 넥킹이 생기면 넥킹부분의 축 방향 공칭응력,  $\sigma_z$ 와 공칭변형,  $\epsilon_z$  사이에는 다음과 같은 관계식을 가진다고 하였다.

$$\sigma_z = \frac{K[\ln(1 + \epsilon_z)]^n (1 + Y)}{1 + \epsilon_z} \quad (2)$$

여기서 K와 n은 연질부만의 일축 인장에서 얻어지는 진응력, s와 진변형, e의 관계식,  $s = Ke^n$ 에서 주어지는 재료정수이고  $Y = a/4R$ 이다. 한편  $\epsilon_z$ 와 Y 사이에는 다음과 같은 관계식을 가진다고 하였다.

$$X = \frac{1}{3} \sqrt{(1 - \epsilon_z) \left( \frac{\epsilon_z}{2Y} - 1 + \epsilon_z \right) [2\epsilon_z + \epsilon_z^2 - 4(1 - \epsilon_z)Y]} \quad (3)$$

여기서 X는  $h_0/a_0$ 로 주어지는 시험편 형상에 관련된 일정한 값이고,  $\epsilon_z$ 는  $1/(1 + \epsilon_z)^{1/2}$ 이다. 따라서  $\epsilon_z$ 에 대응하는 Y를 식 (3)을 이용하여 구하여 그것을 식 (2)에 대입하면 연질부 평균 축방향 응력과 변형의 관계를 구하는 것이 가능하다.

佐藤 등의 이론에서는 연질부의 기계적 성질이 균일한 것을 가정하고 있으나, 본 실험에서는 이음부 경도

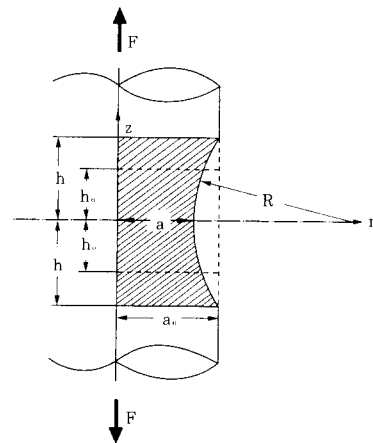


Fig. 8 Deformation of a welded-joint with a soft interlayer

변화에서 보는바와 같이 (Fig. 2 참조) 연화영역 기계적 성질이 균일하지 않고 연속적으로 변화하며, 또한 입열량에 따라 변화의 정도도 다르다. 식 (1)을 사용하여 계산한 결과 10~80kJ/cm 입열량에서 연화영역 최저 인장강도는 대략 500~560MPa를 나타내어, 편의상 인장강도 500MPa급의 균일한 연질부가 인장강도 630MPa인 모재에 끼여져 있는 상태를 가정하였다. 먼저 인장강도 500MPa급인 일반 AH32강을 인장시험하여 재료정수인 K와 n을 구하였다. Fig. 9에 AH32강의 진응력-진변형 곡선을 log-log 그래프에 표시하였다. n은 기울기에 해당하며 K는 진변형이 1인 점에서의 진응력이다. 그림에서 보는바와 같이 500MPa급인 일반 AH32강의 n은 0.21이고 K는 953MPa이다.

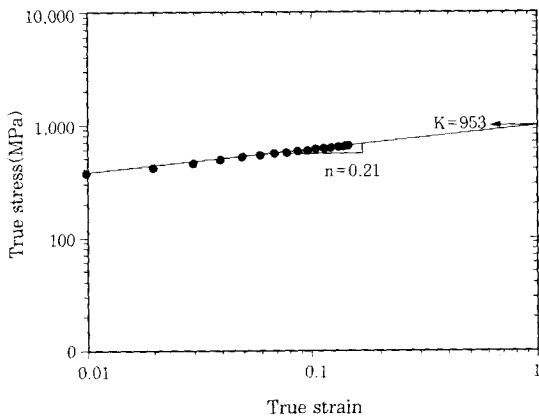


Fig. 9 A typical true stress-strain curve of 500MPa grade high tensile strength steel

이러한 n과 K 값을 가지고 식 (2)와 (3)을 사용하여 계산한 상대두께, X에 따른 연화영역 공칭응력-공칭변형 곡선을 Fig. 10에, 그리고 각 X에 있어서 최대 인장강도를 Fig. 11에 각각 나타내었다. Fig. 11에서보는바와 같이 연화영역 인장강도는 X가 약 0.5 이하에서 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉 본 실험조건에서 소성구속 효과에 의한 연화영역 강도증가는 X가 약 0.5 이하에서 나타남을 알 수 있다. 그림에는 측정된 이음부 인장강도를 함께 나타내었다. 입열량을 10~80kJ/cm로 변경함에 따라 연화영역 폭은 6~18mm로 변하며 그에 따라 X는 2~6의 범위를 가진다. 이 범위에서는 소성구속 효과가 나타나지 않아 연화영역 강도가 증가하지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서는 시험편 두께가 얇고 연화영역 폭이 커 연화영역 강도 증가의 효과가 없는 것으로 생각된다.

판 폭의 증가에 따른 연화영역 강도 상승을 확인하기 위하여 입열량을 20kJ/cm로 일정하게 한 다음 시험편 폭을 20, 30, 50, 70mm로 증가시켜 인장시험을 하였다.

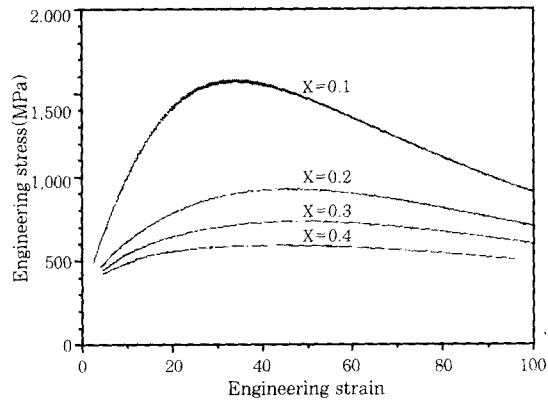


Fig. 10 Several examples of engineering stress-strain curve of a soft interlayer

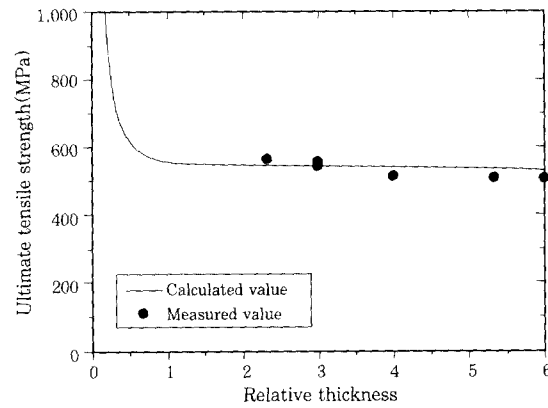


Fig. 11 Variation of ultimate tensile strength of a soft interlayer as a function of relative thickness

Fig. 12에 이음부 인장강도 변화를 시험편 폭에 따라 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 시험편 폭이 증가하여도 인장강도는 540~558MPa로 큰 변화가 없다. 그리고 이러한 값들은 폭 방향 구속이 없는 정방향 단면을 가정하여 계산한 값과 큰 차이가 없었다.

따라서 본 실험에서와 같이 두께 3mm, 폭 10~70mm의 시험편에서는 두께나 폭 방향 구속에 의한 강도 증가 효과는 나타나지 않음을 알 수 있다.

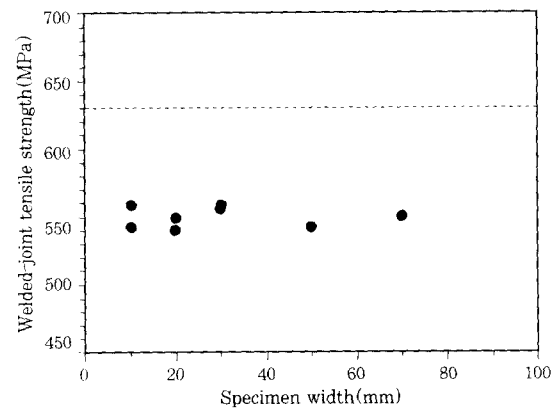


Fig. 12 Variation of welded-joint tensile strength as a function of specimen width (heat input: 20kJ/cm)

## 4. 결 론

강압하-가속냉각에 의하여 제조된 페라이트 크기 4  $\mu\text{m}$ 의 세립강을 10~100kJ/cm로 V-groove CO<sub>2</sub> 용접하여 입열량에 따른 연화영역 크기와 강도 저하를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열영향부에는 경도가 모재 보다 낮은 연화영역 존재한다. 이때 연화영역 폭은 입열량의 증가와 함께 지속적으로 증가하나 경도 저하는 입열량 60kJ/cm 이상에서 거의 포화하였다.

(2) 연화영역의 존재에 의해 용접이음부는 열영향부에서 파단하며, 인장강도 저하는 최대 약 20%를 나타내었다.

(3) 모재보다 낮은 경도를 나타내는 부분을 연화영역으로 하고 연화영역이 540MPa의 균일한 인장강도를 가진다고 가정하여 佐藤의 모델을 적용한 결과, 연화영역 폭이 시편 두께에 비하여 2~6배로 매우 커 소성구속 효과에 의한 용접이음부 강도 증가는 보이지 않았다.

(4) 시험편 폭을 10에서 70mm로 증가하여도 용접이음부 인장강도는 연화영역 최저 인장강도와 큰 차이를 나타내지 않아 본 시험조건에서 폭 방향 소성구속 효과도 나타나지 않았다.

## 후 기

본 연구는 1999년 포항제철의 "차세대 구조용강 개발 연구"의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 志賀, 平岡: STX-21 フォロジ"ェクトにおける高張力鋼の開発とその熔接の課題, 熔接技術, Vol.47(1998), pp.81~87
2. 佐藤: フロンティア構造材料研究フォロジ"ェクト, 熔接學會誌, Vol.66, No.8(1997), pp.31~34
3. 高橋: 超鐵鋼材料研究のめ"さす高強度化, 熔接學會誌, Vol.66, No.8(1997), pp.35~38
4. 방국수, 박봉규, 정호경: 세립 페라이트-펄라이트강 용접열영향부 특성 (I), 대한금속학회지, Vol.37, No.12(1999), pp.1544~1549
5. 志賀 外: フロンティア構造材料の熔接, 熔接學會誌, Vol.66, No.8(1997), pp.43~48
6. O. Akselsen et al: Assesement and Predictions of HAZ Tensile Properties of High-Strength Steels, Welding Journal, Vol.68(1989), pp.356-s~363-s
7. 仁藤 外: TMCP型HT50鋼板熔接継手の引張強さに關する評價, 日本造船 學會論文集, Vol.157(1988), pp.304~311
8. 방국수, 정호경: 세립 페라이트-펄라이트강 용접열영향부 특성 (II), 대한금속학회지, Vol.37, No.12(1999), pp.1550~1555
9. 佐藤 外: 機械的性質の不連續部をふくむ材の靜的引張強度に關する基礎的研究, 熔接學會誌, Vol.40, No.8(1971), pp.885~900
10. 佐藤 外: 軟層を含む熔接継手の靜的強度に關する寸法效果, 熔接學會誌, Vol.37, No.11(1968), pp.1214~1226