

가속냉각형 TMCP강재 대입열 용접부의 피로특성

윤 중 근* · 김 희 진*

A Study on the Fatigue Characteristics of Accelerated Cooled TMCP Steel's Welded Joint with High Heat Input

J. G. Youn, H. J. Kim

Key Words: Accelerated Cooled Type TMCP Steel(가속냉각형 TMCP강), Fatigue Characteristics(피로특성), Softening(연화), Weld Reinforcement(용착덧붙임부), Stress Concentration Factor(응력집중계수).

Abstract

The fatigue test was carried out to evaluate the fatigue characteristics of the accelerated cooled (ACC) TMCP steel and its welded joint. From this study, it was confirmed that ACC TMCP steel has higher fatigue strength than conventional steels. After welding, however, the fatigue strength of ACC TMCP steel was deteriorated associated with HAZ softening when weld reinforcement was removed. On the other hand, with weld reinforcement, there is no effect of HAZ softening on the fatigue strength of welded joint because it is strongly dependant on the detail weld geometry i. e., stress concentration factor. Accordingly the fatigue strength of actual welded joint increases with decreasing the stress concentration factor of welded joint, regardless of HAZ softening.

1. 서 론

근래 선박 등의 대형구조물의 제작에 있어 경량화를 위하여 고장력강재의 사용량이 크게 증대되고 있으며, 생산성향상과 공기단축의 측면에서 대입열 용접이 매우 유리한 시공방법으로 평가되고 있다. 그러나 대입열 용접후 고장력강재의 열영향부는 인성이 현저히 약화되어 취성파괴로 인한 구조물의 대형 사고를 유발할 수 있으므로, 항상 고장력강재에 대한 대입열 용접시공방법은 크게 제한을 받고 있는 실정이다. 이러한 단점을 보완하고자 1970년대 말기에 개발된 제조압연방법이 가속냉각형 Thermo-Mechanical Control Process(TMCP)이다.^{1,2)} 가속냉

각형 TMCP에 의해 제조된 강재는 기존의 동급강재인 normalized강재나 제어압연강재에 비해 제반 기계적 성질이 향상되었을 뿐 아니라, 대입열 용접후에도 열영향부의 인성은 매우 우수하며, TMCP강재의 저탄소당량 특성으로 인하여 용접성도 우수하다고 평가되고 있다.^{3,4)} 따라서 종래에 불가능하였던 고장력 강재에 대한 편면 자동용접(one-side Submerged Arc Welding)과 같은 고능률 대입열 용접시공이 TMCP강재에서는 가능하게 되어, 현재 인장강도 50 kg/mm²급 TMCP강재에 용접입열량 600KJ/cm까지도 적용시켜 용접부의 제반 특성을 평가함으로써 대입열 용접시공의 타당성을 검토하고 있다.^{5,6)}

그런데 TMCP강재중 가속냉각형 강재는 제조특성

* 현대중공업(주) 용접기술연구소, 정희원

상 대입열 용접후에는 용접부의 강도가 저하되는 연화 현상이 발생하게 된다.^{3~8)} 이같은 연화현상은 가속냉각형 TMCP강재 용접부의 구조강도, 즉 인장, 피로강도 등의 감소를 야기하여 구조물의 안전성을 해칠 위험성이 있으므로 이에 대한 정량적인 평가는 매우 절실하게 요구되고있다. 이를 위해 저자들은 이미 열처리와 용접에 의한 TMCP강재의 연화현상을 평가하여 용접부의 정적강도(인장강도)감소에 대한 심각성과 정적강도의 저하로 인한 열영향부에서의 피로균열 전파속도의 증가현상에 대하여 보고하였다.^{7,8)}

본보에서는 대입열 편면자동용접에 의하여 시공된 가속냉각형 TMCP강재 용접부의 피로특성을 보다 정량적이고 현실성있도록 평가함으로써 가속냉각형 TMCP 강재용접부의 피로강도에 미치는 연화현상의 영향과 대입열용접의 타당성을 검토하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 재료 및 용접

본 연구에 사용된 강재는 선박 및 해양구조물 제작에 많이 사용되는 인장강도 50kg/mm²급 가속냉각형 TMCP강재이었으며, 강재의 두께는 25mm 이었다.

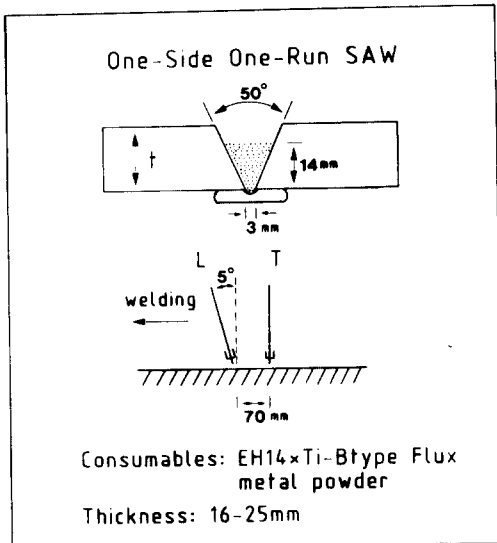


Fig. 1. Schematic diagram for one side one run SAW process

Table 1에 시험 강재와 용접후 형성된 용착금속의 화학성분들을 나타내었다. 용접은 Fig. 1에서 보여주듯이 one pass에 용접이 완료되도록 금속분말과 backing재를 사용한 편면자동용접(one side one run SAW)시공법으로 실시하였으며, 용접재료는 AWS EH 14급 wire와 bonded type flux를 사용하였다. 용접조건은 Table 2에 나타내었듯이 78-174kJ/cm의 대입 열범위로 설정하였다. 용접은 25mm 두께의 강재를 용접입열에 적합한 두께로 기계 가공하여, 16 mm 두께인강재의 경우에는 1 pole용접으로 78kJ/cm의 입열을 사용하였으며, 19mm 이상의 두께에서는 2pole one pass 용접으로 실시하였다.

Table 2 Welding condition

Thickness (mm)	Amp.	Volt.	Speed (cm/min.)	H. I. (kJ/cm)
16	830	35	22	78*
19	L 840	34	33	98
	T 650	37		
22	L 815	35	24	132*
	T 650	37		
25	L 920	35	20	174
	T 650	37		

L : Leading electrode T : Trailing electrode
* : fatigue test

2.2. 기계적 시험

용접후 인장강도와 피로강도에 미치는 용접부의 연화현상의 영향을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같이 시편을 제작하였다. Fig. 2의(a)는 표점거리를 변화시킨 장표점 인장시편과 단표점 인장시편으로, 용접부의 연화현상에 따른 용접부의 강도변화를 평가하고자 하였다. 피로시편은 Fig. 2의(b)에서 보여주는 바와 같이 실 butt용접부와 용착덧붙임부(weld reinforcement)를 제거한 용접부 시편으로 나눠 제작하여, 용접부의 피로강도에 미치는 연화현상의 영향 및 용접부의 피로강도를 결정하는 주된 인자를 평가하고자 하였다. 피로시험은 입열량이 78과 132 kJ/cm인 용접부에 대해서만 실시하였다.

한편 용접부의 응력집중계수를 산출하고자 아래의 (1)식을 사용하였으며, 식(1)내의 기호들은 Fig. 3

Table 1 Chemical compositions of steel plate and weld deposit, wt%

	Chemical compositions										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Ni	Ti	Nb Ceq.	
Steel plate (API-2H Gr50)	0.08	0.20	1.35	0.011	0.001	0.20	0.024	0.24	0.012	0.014	0.33
Weld deposit	0.07	0.29	1.36	0.016	0.008				0.010		

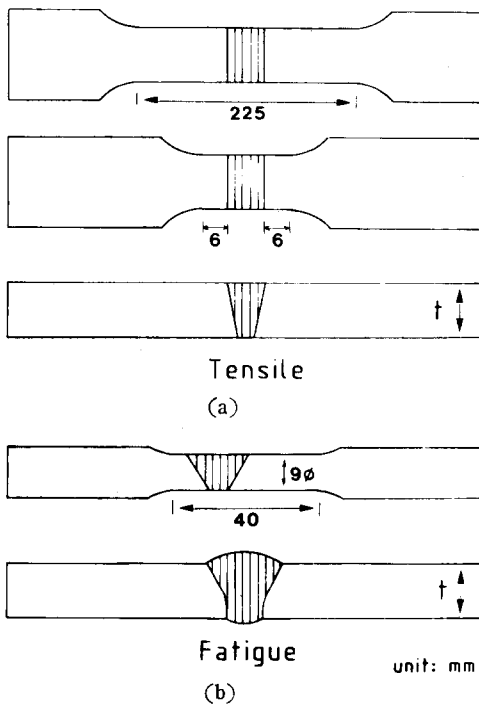


Fig. 2. Specimen geometry of (a) tensile and (b) fatigue specimens

에서 정의된 바와 같다.

$$Kt = 1 + \left[\frac{1 - \exp\{-0.9\sqrt{T/h} \cdot (\pi - \theta)\}}{1 - \exp\{-0.9\sqrt{T/h} \cdot \pi/2\}} \right] \cdot \left(\frac{1}{2.8T/t - 2} \cdot \frac{h}{p} \right)^{0.65} \quad (1)$$

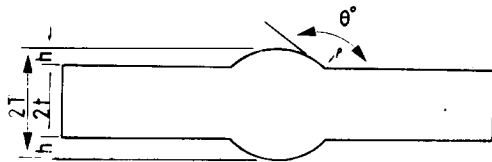


Fig. 3. Definition of variables for the calculation of stress concentration factor, Kt

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 용접부의 인장강도

Fig. 4에 가속냉각형 TMCP강재의 편면자동용접부들에 대한 경도분포를 도시하였다. 입열량이 78과 132 kJ/cm인 양용접부 모두에서 모재의 경도값보다 경도가 현저하게 낮아지는 연화현상이 열영향부에서 발생되었으며, 최저경도값은 fusion line에서 약 10 mm정도 떨어진 위치에서 관찰되었다. 그런데 입열

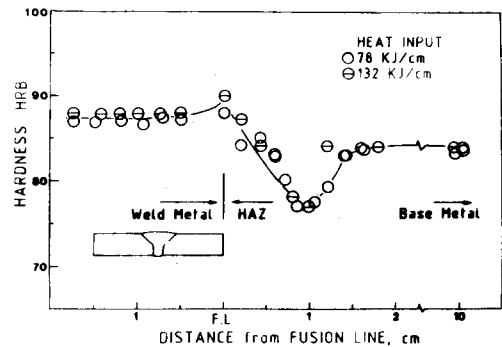


Fig. 4. Hardness profiles of ACC TMCP steel welded joint

량차이로 인한 최저경도값이나 연화된 영역의 크기 등의 변화는 Fig. 4에서 인정되지 않았다.

Fig. 5에 용접입열량 변화에 따른 가속냉각형 TMCP 강재의 편면 자동용접부의 인장강도 변화를 도시하였다. Fig. 5에서 보여주듯이 용접후의 연화현상에 기인되어 용접부의 인장강도는 전반적으로 저하되었으나 입열량 증가에 따른 용접부 강도의 저하정도는 심각하지 않았다. 따라서 Fig. 4와 5의 결과는 용접에 의한 연화현상은 한계성이 존재한다는 전보의 결과를 재확인하여 주고 있다.^{7,8)}

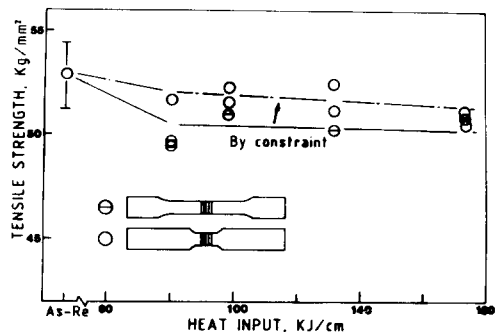


Fig. 5. Variation of the joint strength with welding heat input

Fig. 5에서 주목할 사항은 용접부의 강도가 시편의 표점거리 차이에 의하여 변화된다는 사실이다. 단표점거리인 시편의 경우 인장시험중 연화된 열영향부가 necking할 때 열영향부 주위의 경한 용착금속에 의한 억제력이 발생되고, 실제 가장 연화현상이 심한 지점이 시편표점부에 존재하게 되므로(Fig. 4) 장표점거리 시편에 비하여 인장강도값이 높게 나타나고 있다. 더우기 인장시편을 순수하게 연화된 열영향부에서만 채취하게 되면 인장강도값이 약 4-5kg/mm²만큼 더욱 저하된다는 보고도 있으므로,⁸⁾ 용접

후 가속냉각형 TMCP강재에서 발생하는 연화의 크기를 정량적으로 평가할 때 시편형상이나 채취위치 등은 매우 중요하다고 하겠다.

3.2. 용접부의 피로 특성

3.2.1. 피로균열 전파속도

Fig. 6은 일정 응력확대계수 ($\Delta K = \text{const.}$) 조건하에서의 가속냉각형 TMCP강재 용접부에서 얻어진 피로균열 전파속도를 나타낸 것이다. Fig. 6내의 삽입 그림에서 도시하였듯이 피로균열은 용착금속내에서 개시되어 fusion line에 수직하게 전파되는 경우이다.

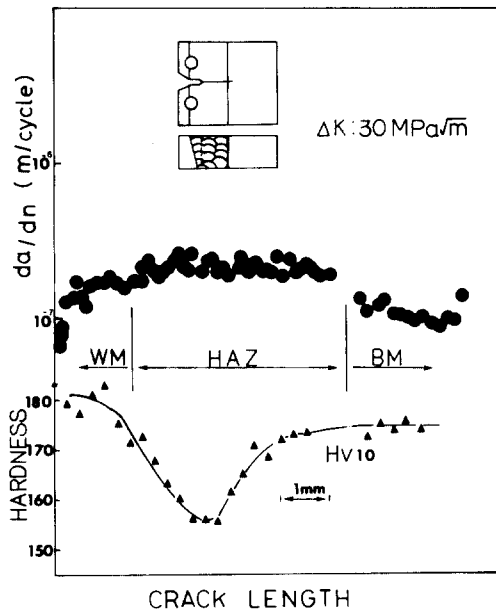


Fig. 6. Effect of HAZ softening on fatigue crack growth rate under constant stress intensity factor condition in ACC TMCP steel welded joint⁷⁾

Fig. 6에서 보여주듯이 연화된 열영향부에서의 피로균열 전파속도는 모재에 비하여 빠른 것으로 평가되었다. Fig. 7은 일정 하중조건하에서의 피로시험 결과로써, 피로균열은 fusion line에서 2mm 떨어진 열영향부에서 개시되어 fusion line과 평행하게 전파되는 경우이다. 전 응력확대 계수범위에서 모재에 비하여 연화된 열영향부에서 피로균열의 전파속도는 증가되었음을 Fig. 7에서 보여주고 있다.

이상의 결과로부터 피로균열의 전파속도에 미치는 연화현상의 중요성을 알 수 있으며, 이에 따른 용접부의 피로강도 감소가 예측된다. 한편 가속냉각형

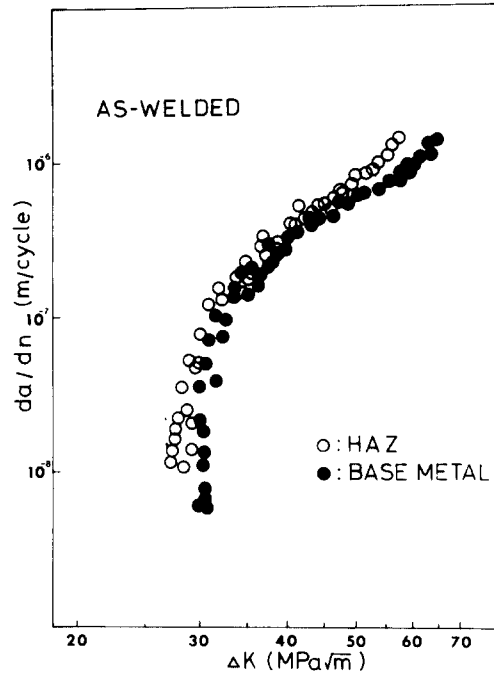


Fig. 7. Effect of HAZ softening on fatigue crack growth rate under constant load condition in ACC TMCP steel welded joint⁷⁾

TMCP강재의 용접 열영향부에서의 피로균열 전파속도 증가에 대한 원인은 거의 연화현상에만 의존된다는 것은 전보에서 상세하게 보고하였으므로 본보에서는 이를 생략하기로 한다.

3.2.2. 피로 강도

Fig. 8에 가속냉각형 TMCP강재와 그 용접부의 피로하중에 따른 피로강도변화들을 도시하였다. 용접부의 경우 용착금속의 덧붙임부를 완전히 제거함으로써, 피로강도에 미치는 용접부의 기하학적 형상효과를 배제하여 순수한 연화현상에 의한 가속냉각형 TMCP

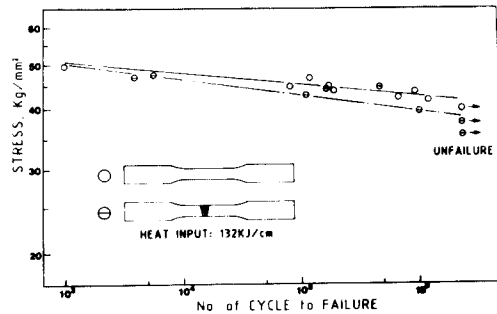


Fig. 8. Effect of HAZ softening on fatigue strength of ACC TMCP steel welded joint without reinforcement

강재 용접부의 피로강도 변화를 평가한 것이다. Fig. 8에서 보여주듯이 모재의 경우 피로강도는 약 40kg/mm²으로 상당히 우수한 것으로 평가되었으며, 용접부의 피로강도는 용접 열영향부의 연화현상으로 인하여 모재에 비하여 전반적으로 감소되었고 피로파단도 후기된 Photo. 2에 나타낸 바와 같이 연화된 열영향부에서 발생되었다.

Fig. 9에는 입열량이 서로 다른 가속냉각형 TMCP 강재의 실 용접부의 피로강도를 도시한 것으로 외형적으로 입열량이 적은 78kJ/cm의 경우가 입열량이 큰 용접부(132kJ/cm)보다 피로강도가 낮은 것을 보여 주고 있다. 그런데 전술한 바와 같이 양 용접부의 경도분포나 인장강도의 차이는 거의 없으므로 양 용접부의 피로강도차이는 입열량 변화에 따른 연화현상에 기인된 것이 아니라고 평가된다.

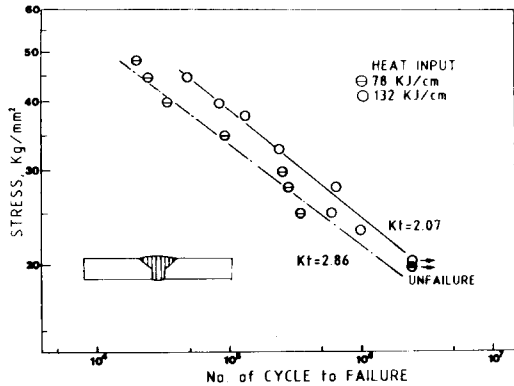


Fig. 9. Variation of the fatigue strength of ACC TMCP steel welded joint with reinforcement

가속냉각형 TMCP강재 용접부의 피로거동에 미치는 연화현상의 영향을 보다 명확히 규명하기 위하여 후열처리를 실시하였으며, 후열처리 전·후에 평가된 용접부의 피로하중에 따른 피로강도 변화를 Fig. 10

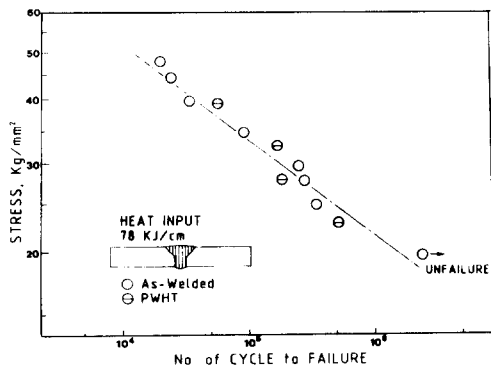


Fig. 10. Effect of PWHT on fatigue strength of ACC TMCP steel welded joint with reinforcement

에 도시하였다. 전보에서 보고한 바와 같이^{7,8)} 용접부의 후열처리 후에는 용접에 의한 1차 연화와 후열처리에 의한 2차 연화로 인하여 용접부의 강도가 현저하게 감소된다. 그런데 후열처리에 의한 2차 연화현상에도 불구하고 Fig. 10에 도시된 바와 같이 후열처리 전·후에 평가된 용접부의 피로강도 변화는 인정되지 않으므로, 가속냉각형 TMCP강재 용접부의 피로강도는 연화현상에 관계없이 판명된다. 더우기 Photo. 1의 가속냉각형 TMCP강재 용접부의 피로파단 양상에서 보여주듯이, 용접부에서 가장 강도가 낮은 영역이 fusion line에서 약 10mm 떨어진 곳임에도 불구하고(Fig. 4), 양 용접부의 피로균열은 동일하게 용접부의 하단 toe(Photo. 1의 화살표)에서 개시 및 전파되어 최종 피로파단이 발생되었다.

Photo. 1의 (a)는 입열량이 78kJ/cm인 용접부에서의 피로파단을, (b)는 입열량이 132kJ/cm인 용접부에서의 피로파단 양상을 나타낸 것이다. 따라서 양 용접부의 피로 강도변화는 가속냉각형 TMCP강재의 연화현상과는 관계없이 용접부의 세부 기하학적 형상의 차이에 기인된 것이라고 결론을 지을 수 있다.

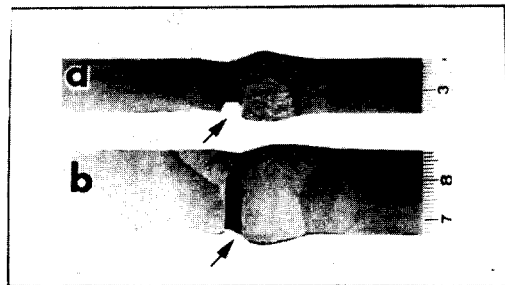


Photo. 1. Fractured specimen after fatigue test; (a) heat input = 78 kJ/cm, (b) heat input = 132 kJ/cm

한편 용접부의 세부 기하학적 형상은 응력집중계수로 정량화시킬 수 있으므로, 피로균열이 발생된 용접부의 하단 toe에서 전술한 식(1)을 이용하여 산출한 양 용접부의 응력집중계수를 Fig. 11에 도시하였다. Fig. 11에서 보여주듯이 실용접부는 용접선의 불균일성으로 인하여 용접선의 각 위치마다 용접부의 응력집중계수를 결정하는 용접부의 세부형상, 즉, 용착급속의 덧붙임부높이, 덧붙임부와 모재간의 접촉각도 및 toe의 곡률반경 등이 각각 다르므로 산출된 용접부의 응력집중 계수는 용접선을 따라 불균일하게 분포되게 된다. 입열량이 78kJ/cm인 가속냉각형 TMCP 강재 용접부의 경우 용접부의 하단 toe에서의 응력집중계수는 평균 2.36으로 산출되었으나 최저 1.83

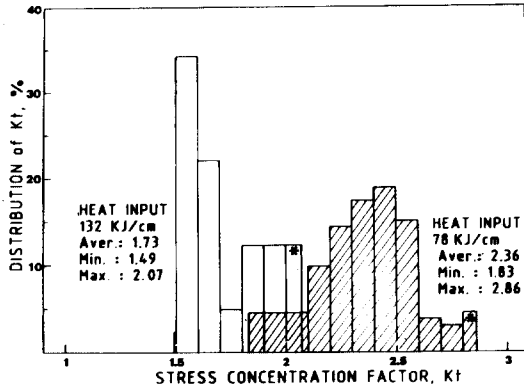


Fig.11. Variation of the stress concentration factor along the lower toe of the welded joints

에서 최고 2.86까지 불균일하게 분포되었으며, 입열량이 132kJ/cm인 용접부의 경우에는 평균은 1.73, 최저는 1.49 그리고 최고는 2.07로 분포되어 있다. 그런데 용접부의 피로균열은 응력집중계수가 가장 큰 곳에서 발생되었다고 할 수 있으므로, 용접부의 피로특성은 평균응력집중계수 보다는 최대응력집중계수로 정량화되어 짐이 바람직하다. Fig.9에서 평가된 양 용접부의 피로강도의 변화는 바로 용접부의 기하학적 형상 차이, 즉 응력집중계수의 차이에 기인되어 응력집중계수(Kt=2.86)가 큰 78kJ/cm 입열량의 용접부가 응력집중계수(Kt=2.07)가 적은 132 kJ/cm 입열량의 용접부에 비하여 더욱 피로강도가 저하되게 된 것이다.

4. 종합 검토

Fig.12와 13에 가속냉각형 TMCP 강재 및 용접부의 피로강도 변화를 용접부의 기하학적 형상, 즉, 응력집중계수 별로 종합하여 도시하였다. Fig.12와 13에서 보여주듯이 가속냉각형 TMCP 강재의 용접부는 응력집중계수가 1인 경우(weld reinforcement off)

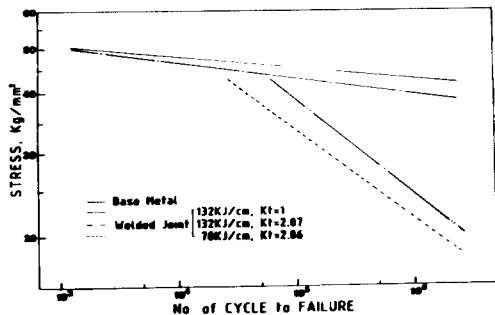


Fig.12. Variation of the fatigue strength

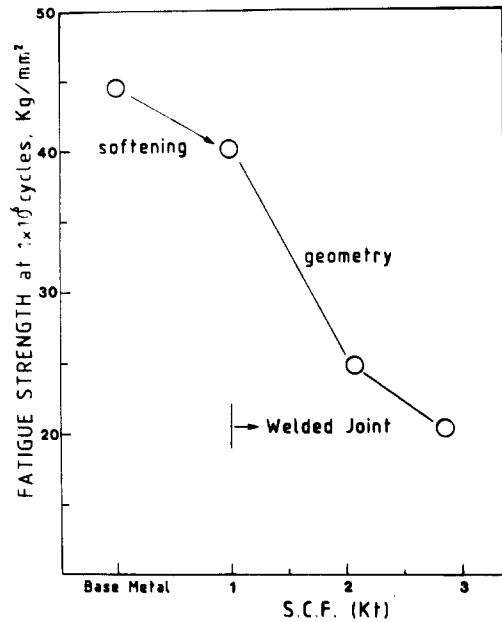


Fig.13. Reduction of the fatigue strength with welding and stress concentration factor

에는 연화현상에 의한 피로강도저하가 인정되고 있으나, 실 용접부의 경우에는 연화현상과 무관하게 응력집중계수의 차이로 인하여 용접부의 피로강도는 크게 변화되며 용접부의 응력집중계수가 커질수록 용접부의 피로강도는 크게 저하된다.

이상의 결과를 강도측면과 함께 종합적으로 고찰하여 보면 다음과 같다. 가속냉각형 TMCP강재는 용접에 의하여 열영향부의 강도가 저하되는 연화현상이 발생된다. 이 연화현상으로 인하여 열영향부에서의 피로균열 전파속도가 증가되며, 용접부의 피로강도도 저하되게 된다. 그러나 실 용접부에서는 용접부의 세부 기하학적 형상이 피로강도를 결정하게 되므로 연화현상에 의한 영향은 나타나지 않는다. 더우기 피로파단 위치도 연화된 열영향부가 아닌 용접부의 하단 toe이므로, 가속냉각형 TMCP강재 용접부의 피로강도는 연화현상과는 거의 관계가 없으며 전적으로 용접부의 기하학적 형상에 의존하게 된다.

Photo.2에는 인장 및 피로 시험후 가속냉각형 TMCP 강재의 파단양상을 나타내었다. 용착금속의 덧붙임을 가공한 용접부의 피로시험이나 인장시험시에는 연화된 열영향부에서 파단됨에 따라 인장이나 피로강도에 미치는 연화현상의 중요성이 인정되었으나, 실용접부의 피로파단은 연화된 열영향부와 무관하게 용접부의 하단 toe에서 피로균열이 개시 및 전파에 의

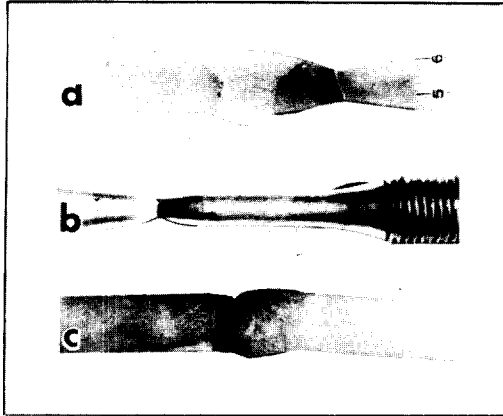


Photo. 2. Fractured specimen after (a) tensile, (b) fatigue (without weld reinforcement) and, (c) fatigue (with weld reinforcement) test

해 발생되었으므로 실용접부의 피로특성에 미치는 연화현상의 영향은 무시되고 있음을 보여주고 있다.

Photo. 3에는 용접부의 피로균열이 용착금속의 상부 toe(Photo. 3의 화살표)에서도 발생되어 진파된 피로파단 양상을 보여주고 있어 용접부의 피로파괴에 대한 용접부의 세부형상, 즉, 기하학적 형상의 중요성을 재차 강조하여 주고 있다.



Photo. 3. Fatigue failure initiated both at upper toe and at lower toe

5. 결 론

대입열 용접이 가능한 인장강도 50kg/mm²급 고속냉각형 TMCP강재 용접부의 피로특성을 정립하고자 피로시험을 실시하였으며, 이를 토대로 이 강재에 대한 대입열 편면 자동 용접기법(one side one run SAW process)의 적용에 대한 타당성을 검토하고자 하였다.

1. 고속냉각형 TMCP강재는 용접에 의하여 연화되며, 이에 따라 피로균열의 진파속도도 증가된다. 용접부의 덧붙임부가 없는 경우 용접부의 피로강도는 연화현상에 의하여 저하되었으며, 피로파단도 연화된 열영향부에서 발생된다.

2. 그러나 실 고속냉각형 TMCP강재 용접부의 피로강도는 연화현상과 관계없이 용접부의 기하학적 형상에 크게 의존된다.

3. 고속냉각형 TMCP 강재에 대한 대입열 용접은 바람직하다.

후 기

본 연구수행에 많은 도움을 주신 현대중공업(주) 용접기술연구소의 황주환, 최영종, 안명호씨 및 그의 연구소 직원들에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Sumitomo metal industries technical reports(1979).
- 2) Kawasaki steel corporation technical reports (1983).
- 3) 신민택, 윤중근, 김희진 : 대한용접학회지, 제4권, 제3호, (1986), 43-49.
- 4) 윤중근, 김희진 : 기술현대, Vol. 7, No. 2, (1987), 16-23.
- 5) S. Matsumoto, A. Narumoto, C. Shiga, S. Ueda: Kawasaki Steel Technical Report, No. 13, Sep., (1985), 83-96.
- 6) H. Nitoh, D. Sakai, H. Yajima, Y. Inoue, Y. Sogo, K. Satoh, M. Toyoda: Trans of JSNA, Vol. 157, (1985), 319-326(Japanese).
- 7) J. G. Youn, H. J. Kim: Welding Metallurgy of Structural Steels, ed. J. Y. Koo, TMS, (1987) 157-168.
- 8) 윤중근, 김희진 : 제1회 재료·강도 Symposium, Oct., (1987), 서울, 179-185.
- 9) M. Nishida: Stress Concentration, (1971), Morikita Ink. (Japanese).