

해양구조물용 TMCP강의 피로균열진전거동에 미치는 용접이방성 및 과대하중의 영향

최성대*, 이종형*, 三澤啓志**

The effect of the excessive loading and welding anisotropy on the fatigue crack propagation behavior of TMCP steel for offshore structure

Seong-Dae Choi*, Jong-Hyung Lee*, Hiroshi Misawa**

Abstract

The effect of the welding for the offshore structure in the TMCP steel on the fatigue crack propagation rate and crack opening-and-closure behavior was examined. The welding anisotropy of the TMCP steel and crack propagation characteristics of the excessive loading were reviewed

(1) It seemed that a heat which was generated by the welding made a compressive residual stress over the base metal, so fatigue crack propagation rate was placed lower than in case of the base metal.

(2) In the base metal, an effect of the anisotropy which has an effect on fatigue crack propagation rate of the excessive load and the constant amplitude load was not found but in the welding material case, fatigue crack propagation rate of the excessive load in the specimen of the width direction was located in the retard side as compared with a specimen rolling direction.

(3) A crack opening ratio of the used TMCP steel in this study was not changed after excessive loading but a retard phenomenon of crack propagation was observed. Consequently, it was thought that all of the retard phenomenon of crack propagation did not only a cause of the crack opening-and-closure phenomenon.

Key Words : TMCP steel(열처리 압연강), Fatigue crack propagation behavior(피로균열진전거동), Welding anisotropy(용접이방성), Excessive loading(과대하중), Crack opening displacement(COD, 균열개구변위)

1. 서론

최근 용접기술의 현저한 발전에 의해 해양구조물의 대부분이 용접에 의해서 조성되고 있다. 그러나 용접부를 기

점으로 한 피로파괴 사고는 매년 수많은 보고가 되고 있다.⁽¹⁾ 이것들의 사고를 미연에 방지하는 의미에서도 용접부의 피로특성을 해명하는 것이 중요하다. 또한 해양에서는 돌발적인 높은 파도, 폭풍우등이 생기는 실제 해양구조

* 금오공과대학교 기계공학부
** 동경도립대학 공학연구과 기계공학전공

물에 작용하는 하중은 일정진폭 하중이 아니라 변동하는 하중이다. 이런 변동하중은 피로수명에 커다란 영향을 미친다. 변동하중을 단순화하여 부하된 과대하중이 피로균열진전거동에 미치는 영향을 밝히는 것이 중요한 과제가 되고 있다.¹²⁾ 이상과 같이 해양구조물은 용접으로 제작되고 있으며 용접구조물에서의 과대하중이 피로균열진전거동에 미치는 영향에 대하여 연구하는 것은 해양구조물의 수명예측 및 사고 방지에 큰 도움을 줄 것이라 생각된다.¹³⁾ 따라서 본 연구에서는 해양구조물을 위해서 새롭게 개발된 TMCP (Thermo Mechanical Control Process)법에 의해 제어 압연 강재의 용접 열영향부를 포함한 시험편을 이용하여 용접에 의한 열의 영향이 피로균열진전속도와 균열 개폐구 거동에 미치는 영향에 대하여 검토했다. 또, 변동하중시험에서 가장 중요한 과대하중이 피로균열진전 거동 및 균열 개폐구 거동에 어떤 변화를 미치는가에 대해서도 검토하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 소재는 해양구조물용으로 개발된 TMCP법에 의해 제조된 열간압연강이다. 철강재료의 TMCP법은 열간성형(열간압연) 및 그의 전후공정을 합리 적이며 연속으로 배치하여 열간 가공을 하기 전에 1회의 가열로써 이것들의 공정조건을 만족하도록 규제하는 것에 따라 성형완료시의 재료에 이 공정들에 맞는 최고의 재료특성을 부가하는 기술체계이다.¹⁴⁾ 그리고 TMCP법의 주된 목적은 조직의 미세화이며, 주로 페라이트의 미세화 및 제2상(퍼일라이트, 베이나이트등의 페라이트이외의 조직)의 미세 분산상의 생성이다. 결정립의 미세화는, 강의 강도를 높게 하고 인성을 향상시키기 위한 유일한 경제적 수단이다.¹⁵⁾ Fig. 1에는 시험편의 압연방향에 따른 조직사진을 나타내었다. Tandem submerge arc 용접법으로 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 K type 맞대기 용접으로 앞면에는 19층 51라인으로 뒷면은 14층 28라인으로 용접하였다. Table 1에는 TMCP강의 화학성분을 나타내고, Table 2에는 모재의 압연방향에 따른 기계적 성질을 나타내었다. CT 시험편은 두께가 12mm이고 폭(W)이 51mm 것을 두께가 150mm의 두꺼운 용접재의 내부에서 채취하여 사용하였다. 시험편은 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 노치부가 용접방향과 평행하게 된 것으로 용착금속의 끝단에서 균열진전경로까지 5mm의 시험편(WA), 15mm의 시험편

(WB)과 노치부가 용접방향에 수직으로 된 것으로 노치부 선단에서 용착금속까지가 10mm의 시험편(WC)의 3종류를 사용하였다. 그리고, 모재 시험편으로 압연방향과 균열진전방향이 일치하는 T-L방향(BD)과 압연방향에 수직인 L-T방향(BE)의 시험편을 합해서 5종류의 시험편을 준비하여 피로시험을 실시하였다.

Table 1 Chemical composition of TMCP steel(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Fe.
0.076	0.4	1.52	0.007	0.005	0.39	0.025	Bal.

Table 2 Mechanical properties of TMCP steel

Direction	T-L	L-T	T-S
Upper yield stress (MPa)	459	381	374
Lower yield stress (MPa)	423	356	357
Tensile stress (MPa)	515	489	490
Elongation (%)	54	44	36

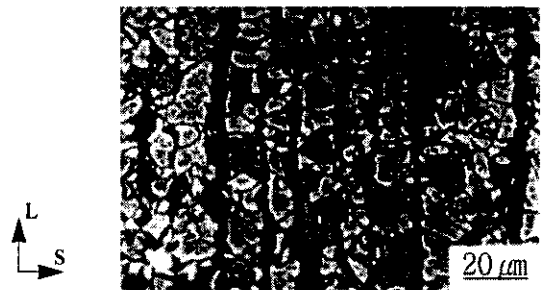


Fig. 1 Microstructure of TMCP steel

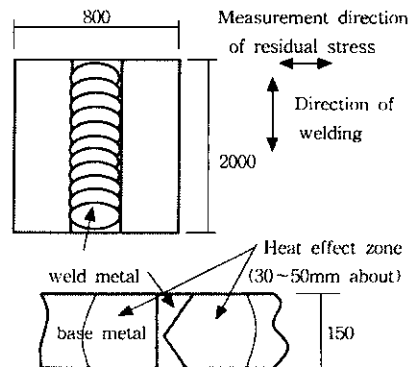


Fig. 2 Schematic of welding form

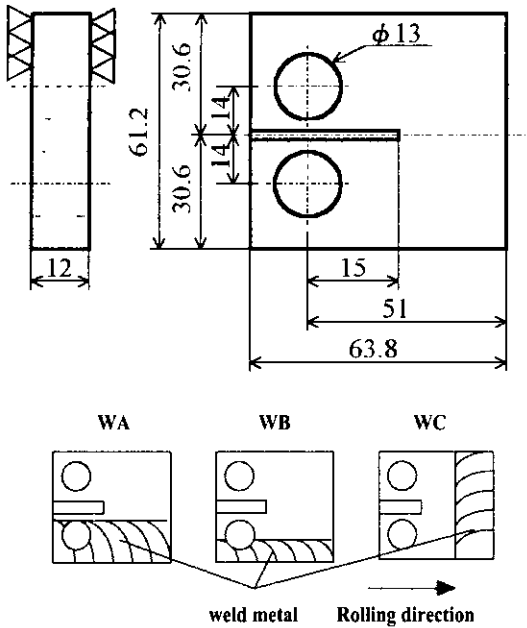


Fig. 3 Dimension of specimens

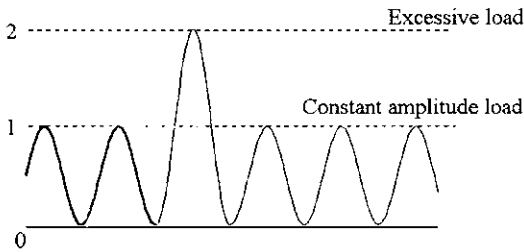


Fig. 4 Excessive loading program

2.2 실험방법

피로시험은 전기유압서보식 하중제어시험기(9.8kN)를 사용하였다. 응력비(R)가 0.05인 일정진폭하중으로 하중파형은 정현파로 반복속도는 15Hz로 실험하였다. 과대하중의 하중프로그램을 Fig. 4에 나타난 것과 같이 과대하중비가 2로 하였다.⁶⁾ 균열길이는 0.01mm까지 측정 가능한 이동현미경으로 측정하고, 균열 개폐구 거동은 시험편의 배면에 부착한 스트레인게이지에 의한 제하 단성 컴플라이언스법으로 측정하고 균열개구변위(COD)를 클립게이지를 사용하여 측정하였다.

용접에 의한 열의 영향을 분석하기 위해 시험편의 앞면에서의 잔류응력을 X선 응력 측정법으로 측정하였다. 응

력 측정방향은 용접방향과 수직인 방향이고, 2θ -sin 2ψ 법으로 측정하였다.¹⁷⁾ 사용한 X선은 Cr-K α 로, 측정 회절면은 Fe 211면으로, 회절각(2θ)은 156.42 deg.이고 입사면적은 $1 \times 4 \text{ mm}^2$ 으로, X선 응력정수(K)는 -318 MPa/deg. 으로 사용하였다. 또한, 잔류응력측정은 X선 입사각 ψ 가 6종류에서 3회 측정하여 그 평균치를 사용하였다. 그리고, 용접부근의 경도분포를 마이크로 비커스 경도계에 의해서 측정하였다.

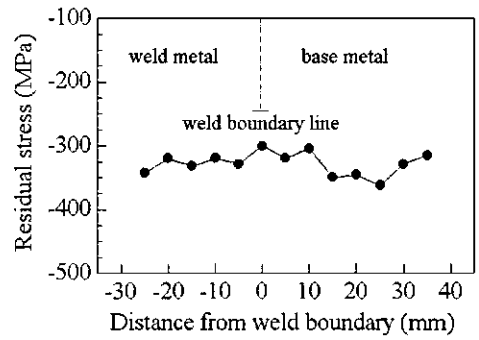


Fig. 5 Distribution of residual stress

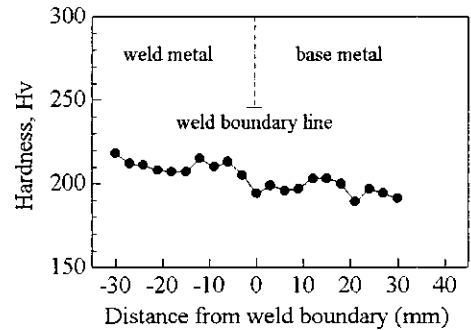


Fig. 6 Distribution of surface hardness

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부재에 있어서의 잔류 응력 분포 및 경도 분포

용접부재에서 균열진전거동에 영향을 미치는 하중방향의 잔류응력의 측정결과를 Fig. 5에 나타내었다. 용접부재의 경계에 있어서 잔류응력은 현저한 차이는 발견되지 않았지만 열의 영향에 의해 모재는 조금 높은 압축 잔류응력을 나타내고 있다. 이것은 용접폭이 100mm가 넘는 용접에 있어서는 열의 영향부가 워낙 크기 때문에 용접경계

로부터 30mm 정도 떨어진 것으로 열의 영향에 큰 차이는 없는 것이라고 생각된다. 그리고 열의 영향을 받지 않는 모재부의 시험편에서의 임의의 5점의 잔류응력을 측정된 결과, 약80MPa의 압축잔류응력이 측정되었다. 이것은 TMCP법의 압연가공에 의한 것이라고 생각된다. Fig. 6에 마이크로 비커스 경도시험의 결과를 나타내었다. 시험편의 경도의 분포에서도 용접에 의한 열의 영향은 거의 일정하게 나타나고 있다. 일반적으로 용착 금속이 모재보다 경도가 높은 것이나 본 시험편의 용착 금속과 모재의 조직이 그다지 큰 차이가 없는 것으로 보아 이것이 두꺼운 판의 용접에 따른 열영향으로 인하여 모재에 풀림 열처리 효과와 같은 영향으로 경도의 분포가 일정하게 되는 원인이라고 생각된다.

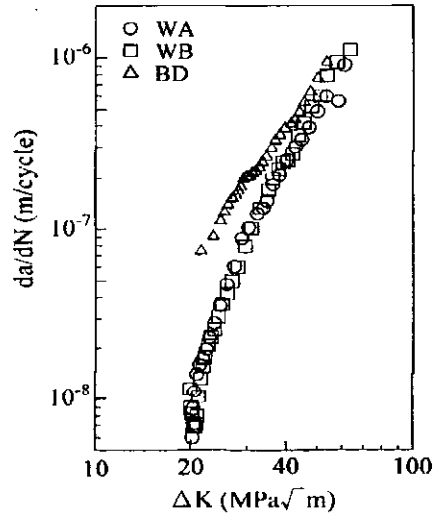
3.2 일정진폭하의 피로균열진전거동

모재와 용접부재의 균열진전거동을 비교하면 Fig. 7(a)에 나타난 것과 같이 낮은 ΔK 영역에서는 모재의 시험편이 큰 폭의 균열진전속도가 빠르나 높은 ΔK 영역 ($\Delta K \geq 50 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)이 되면 거의 일치한다. 이것은 용접에 의한 압축잔류응력이 균열선단에 작용하는 소성역의 크기에 대한 영향으로 균열선단의 소성역이 작은 영역인 낮은 ΔK 영역에서 균열진전속도의 차이가 나타나지만, 압축잔류응력의 영향을 받지 않는 높은 ΔK 영역에서의 균열진전속도의 차이는 거의 존재하지 않는 것으로 생각된다. 또 WA와 WB의 균열진전속도는 거의 차이가 없다. 이것은 용접폭이 100mm에 달하는 대형의 용접에 대해서는 10mm정도의 부재의 차에서는 열의 영향에 큰 차이가 없다고 생각한다. Fig. 7(b)은 용접부에 수직인 균열이 진전하는 WC와 같은방향의 모재에 대하여 균열진전속도를 나타내었다. 여기에서도 균열진전속도는 용접방향과 평행하는 균열진전과의 결과와 같은 경향을 나타낸다. 모재에 있어서 정적강도는 Table 2에 나타난 것과 같이 이방성의 영향을 가지나 압연방향, 판 폭방향, 판 두께방향의 전부가 균열진전속도에 거의 변화하지 않는다. 다시 말해서, 용접부재나 모재에서 균열진전속도에 미치는 압연방향에 따른 이방성의 영향은 거의 없는 것으로 생각된다.

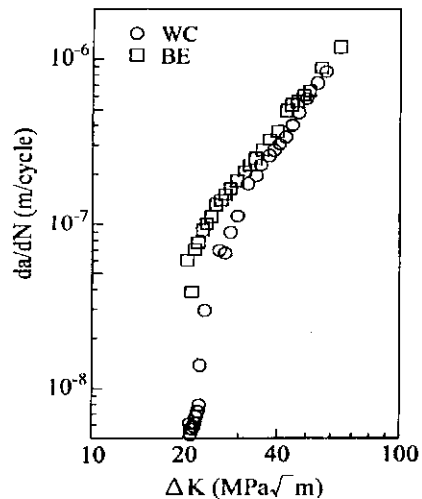
Fig. 8은 균열개구변위(COD)와 응력확대계수범위(ΔK)로 나타난 것이다. 모재의 시험편이 용접부재의 시험편과 비교하면 같은 ΔK 에 대하여 COD가 약간 크나 전 영역에서의 그 차이는 없다.

Fig. 9는 압연방향이 같은 용접부재와 모재의 균열진전속도를 COD로 정리한 것이다. COD의 증가와 균열진전

속도의 증가에는 재료의 특성에 의한 일정한 관계가 있다고 생각하고 구조물 등에서 발생한 균열에 대해 파괴의 위험을 동반하는 균열진전속도를 COD의 측정에 의해 예측하는 것이 가능하다. 균열개폐구 거동에 대해서는 모재, 용접부재에 관계없이 균열개폐구거동은 균열선단에서 균열이 개구한 채 진전하는 것이라는 결과를 얻었다.



(a) T-L direction



(b) L-T direction

Fig. 7 Relation between da/dN and ΔK for constant amplitude load

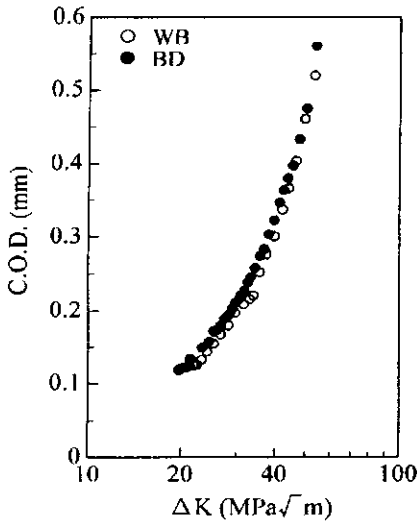


Fig. 8 Relation between COD and ΔK for constant amplitude load

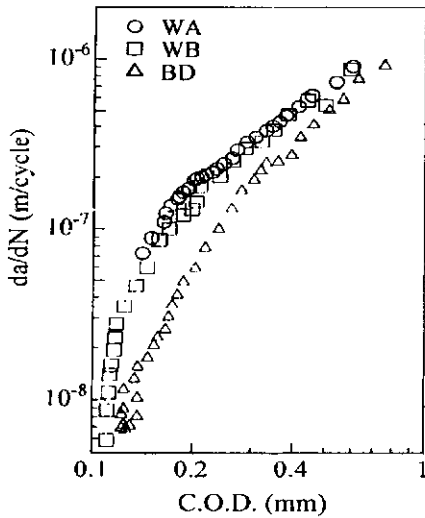


Fig. 9 Relation between da/dN and COD at T-L direction

3.3 과대하중이 피로균열진전거동에 미치는 영향

과대하중의 균열진전은 Fig. 10에 나타난 것과 같이 전 시험편에서 지연현상을 나타내고 있다. 일반적으로 과대하중의 부하에 의해 그 영향을 받는 균열길이는 과대하중의 작용에 의한 균열선단에 생성되는 소성역의 크기 ω 에 대응하는 것이라고 보고되고 있다. 과대하중의 부하시점에서 균열진전속도가 가장 느리게 되는 시점까지의 균열

길이의 진전량을 Δa_1 이라 하고, 과대하중의 부하시점부터 균열진전의 지연현상이 종료되는 시점까지의 균열길이의 진전량을 Δa_2 라고 하였다. 일반적으로 지연현상에서는 지연시작에서 지연종료까지의 균열진전량 Δa_2 은 과대하중의 부하시의 균열선단의 단조소성역의 크기 ω 와 잘 대응하고 있다고 보고되고 있다. 먼저, 균열선단의 소성역의 크기 ω 를 알기 위해서 탄성응력분포에 대하여 Von Mises의 항복조건 및 소규모 항복조건의 만족하는 평면응력상태와 평면변형상태에서의 균열선단의 단조소성역의 크기를 식으로 나타내면, 식(1)과 같다.

$$\omega = \frac{2}{\pi d} \cdot \left(\frac{K_{max}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (1)$$

K_{max} : 최대응력확대계수

σ_{ys} : 항복응력

d : 상수

(평면응력상태 $d = 2$, 평면변형상태 $d = 6$, 혼합상태(평면변형+평면응력) $2 < d < 6$)

여기서 본 시험편인 CT시험편은 평면변형상태이기 때문에 $d = 6$ 으로 계산하였다. 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 균열지연감소량은 WB와 BE의 시험편이 가장 많고, 회복에 필요한 균열길이량은 모재가 용접부재의 약 2배정도로 많이 소요됨을 알았다. 균열지연량과 단조소성역의 크기와의 관계에서 ($\Delta a_2 / \omega$)를 비교해서 보면 BE보다 BD, 다시 말해서 판폭방향보다 압연방향의 것이 지연량이 크다는 것을 알 수 있다. 정적강도의 이방성은 균열진전속도의 영향을 받지 않지만 과대하중의 지연효과

Table 3 Plastic zone size and crack growth quantity

unit : mm

specimen	WA	WB	WC	BD	BE
Δa_1	0.764	0.980	0.429	0.667	1.015
Δa_2	1.281	2.309	1.433	3.107	3.821
$\Delta a_2 - \Delta a_1$	0.517	1.329	1.004	2.440	2.806
ω	2.196	2.310	3.590	1.830	2.730
$\Delta a_2 / \omega$	58.3%	99.9%	39.9%	170.1%	140.1%

Δa_1 : Crack growth quantity to minimum of crack growth rate from excessive loading point

Δa_2 : Crack growth quantity to finish point of crack retardation from excessive loading point

ω : Monotonic plastic zone size

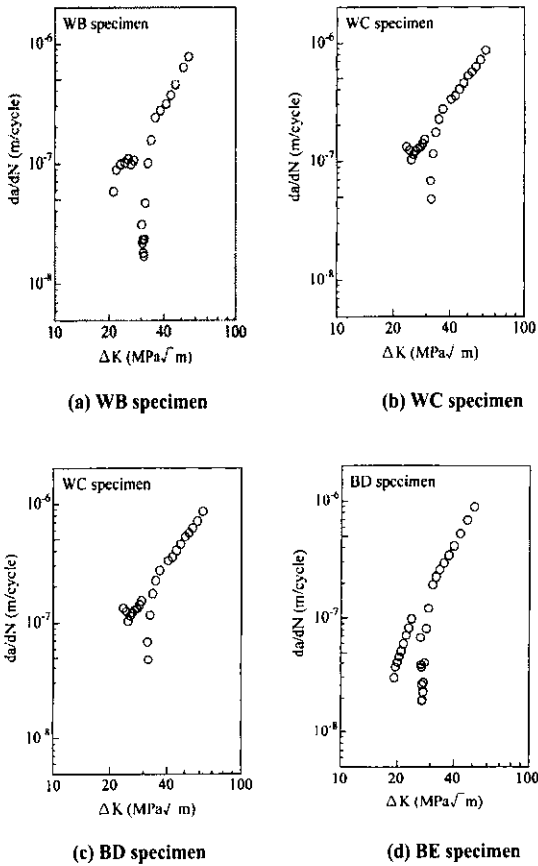


Fig. 10 Relation between da/dN and ΔK of excessive loading

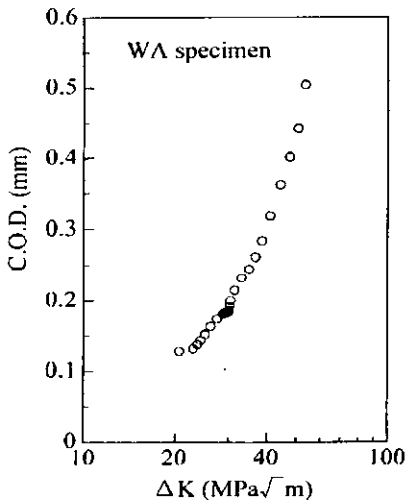


Fig. 11 Relation between COD and ΔK of excessive loading

에 대해서는 영향을 받는다는 것을 알았다. 또 WA와 WB를 비교하면 용착금속에 가까운 것이 지연량이 크다는 것이 된다. 잔류응력분포로부터 Fig. 5에 나타난 것과 같이 큰 변화가 없고 설명할 수는 없으나, 시험편의 내부의 응력분포가 달리 나타내고 있다고 생각되어진다. WC의 시험편에 대해서는 항복응력의 차이와 용접에 의한 열의 영향의 두 가지 원인에 의해 ($\Delta a_2 / \theta$)는 낮게 되는 것이라고 생각한다. Fig. 11에 과대하중부하에 의한 COD의 변화를 나타내고 있다. COD는 과대하중에 대하여 민감하게 반응하여 균열이 지연하면 COD는 정류한다. 과거의 연구결과로부터 단일 과대하중을 부과한 경우 균열첨단의 압축잔류응력역이 발생하여 균열개폐구의 응력레벨이 변화하고 균열폐구에 의한 지연을 일으키는 것이라고 했다. 그러나 본 실험에서는 재하탄성컴플라이언스법에 의해 모재, 용접재에서 균열은 개구한대로라는 데이터가 얻어졌다. 따라서 본 실험의 지연은 균열폐구에서는 설명할 수 없으나 COD의 증가와 대응되는 것이라고 보면 균열 선단의 둔화가 일어나고 있는 것이라고 생각할 수 있고, 과대하중 부하후의 균열선단의 곡률 반경이 낮은 하중에 있어서의 균열선단의 곡률 반경과 비교해서 충분히 크게 되면 응력집중계수가 작아져서 균열의 지연이 일어나고, 또 과대하중에 의해서 생성된 압축잔류응력이 낮은 하중에 의한 응력에 대하여 충분히 크면 균열은 지연하는 것이라고 생각한다.

4. 결론

해양구조물에 널리 사용되는 TMCP강의 용접이방성 및 과대하중하의 균열진전특성에 대하여 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 용접에 의해 발생하는 열이 모재에 압축잔류응력을 발생시키므로 피로균열진전속도는 모재보다도 저속 측에 위치한다.
- (2) 모재는 일정진폭하중이나 과대하중하의 피로균열진전에 미치는 이방성의 영향은 나타나지 않았지만, 용접부재의 경우, 과대하중하의 피로균열진전속도는 폭방향의 시험편이 압연방향의 시험편보다 지연측에 위치한다.
- (3) 본 연구에 사용한 재료인 TMCP강의 균열개구비는 과대 하중 부하 후에서 변화하지 않았지만, 균열진전의 지연현상은 관찰되었다. 따라서 균열진전의 지

연현상은 균열개폐구현상의 원인만으로 이루어지는 것이 아니라고 생각된다.

후 기

본 연구는 1999년도 금오공과대학교 학술연구비('98과제수탁촉진연구비)지원에 의하여 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 이용복, 정진성, 김호경, 조남익, 박상흠, "SS330 용접재에서 재분포 압축잔류응력 및 균열단합의 영향을 고려한 피로거동에 관한 연구", 한국공작기계학회지, Vol.6, No.2, pp. 26~33, 1997.
- (2) 신용승, 이승호, "7075-T6 Al 합금에 있어서 변동하중진폭하에서 피로균열성장거동", 한국공작기계학회지, Vol.6, No.4, pp. 80~88, 1997.
- (3) 飯田, 飯野 "角變形をもつ容接継手の疲労強度", 日本造船學會論文集, Vol.140, pp. 259~265, 1976.
- (4) 失島, 多田, 井上, 阪井, 安田, 岩城, 町田 "最近の船體用高張力鋼容接継手部の強度特性について" 西部造船會會報第66, 1983.
- (5) 豊貞雅宏, "継手強度と疲労特性", 日本造船工學會, 新しい製造法による鋼材の容接構造物への適用に関するシンポジウム, pp. 181~202, 1983.
- (6) Mori, Choi, Akita, Misawa, "The crack propagation mechanism for a high tension steel in seawater", 日本材料學會, 第6會機械構造物安全シンポジウム論文集, pp. 68~71, 1998.
- (7) 日本材料學會, "X線應力測定法", 1990.