

오스테나이트 분포에 따른 수퍼 2상 스테인리스강의 기계적 특성과 피로균열 진전거동

도재윤 · 이상기* · 안석환** · 남기우*** · 강창룡***
부산기능대학, *부경대학교 대학원, **부경대학교 기계공학부
***부경대학교 재료공학부

Mechanical Characteristics and Fatigue Crack Propagation of Super Duplex Stainless Steel by Distribution of Austenite

J. Y. Do, S. K. Lee, S. H. Ahn, K. W. Nam, and C. Y. Kang
Division of Materials Science and Eng., Pukyong National Univ., Pusan 608-739, Korea

Abstract The characteristics of super duplex stainless steel were investigated on its fibrous structure and dispersed structure. These structures consist of various volume fractions and distributions of the austenite phase that were obtained by changing the heat treatment temperature and cycle. The fibrous structure had higher austenite volume fraction than dispersed structure on the same temperature. As the austenite volume fraction increased in both structures, tensile strength and elongation increased, but hardness decreased. Fatigue life of fibrous structure parallel to rolling direction was shorter than that of perpendicular to rolling direction. Fatigue life of dispersed structure was longer than parallel fibrous structure, and shorter than perpendicular fibrous structure. Fatigue crack propagation rate of fibrous structure was faster than that of dispersed structure.

(Received)

Key words: Super Duplex Stainless Steel, Fatigue Crack Growth Behavior, Volume Fraction, Fibrous Structure, Dispersed Structure

1. 서 론

2상 스테인리스강은 내식성과 강도를 현저히 개선한 강종이지만 산업발달과 더불어 더욱 가혹한 환경에서 오랜 수명을 유지할 수 있는 새로운 강종의 필요성은 지속적으로 요구되고 있다. 이에 개발된 2상 스테인리스강 중의 하나가 25%Cr에 고질소를 함유한 수퍼 2상 스테인리스강이다. 이강은 내공식지수(Pitting Resistance Equivalent Number, PREN) 값이 40이상이므로 기존의 2상 스테인리스강에 비해 국부부식과 응력부식균열에 대한 저항성이 향상되어 내식성과 기계적 성질이 대단히 우수하기 때문에[1~4], 1980년대 후반에 개발되기 시작하여 1991년부터 부분적으로 이용되고 있다. 그러나 고합금이며, 특히 질소의 함량이 높아 고온 가공 또는 열처리 후 탄화물 및 질화물과 같은 금속간 화합물이 석출됨으로써 상변태를 일으키기 쉬운 단점이 있다. 그러므로 Cu, W 등의 합금원소를 첨가하여 내식성을 향상시키면서 조직의 안정성을 동시에 향상시키려

는 많은 연구가 진행되고 있다.[5~9] 또한 수퍼 2상 스테인리스강에서 페라이트상과 오스테나이트상의 체적분율 변화 및 분포상태 변화는 기계적 성질뿐만 아니라 여러 환경하에서의 부식특성도 크게 달라질 것으로 예상되기 때문에 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있지만[10~13], 아직까지 미흡한 점이 많다. 따라서, 실제 산업에 응용되는 예는 많지 않으며, 보다 가혹한 환경하에서 사용되기 위해서는 더 많은 연구가 필요한 실정이다[14].

따라서 본 연구는 Cu, W를 첨가한 수퍼 2상 스테인리스강을 열처리 온도 및 방법을 달리하여 오스테나이트상의 체적분율과 분포상태를 변화시킨 다음, 오스테나이트상의 체적분율과 분포상태의 변화에 따른 수퍼 2상 스테인리스강의 기계적 특성과 피로균열 진전 거동을 검토하였다.

2. 실험재료 및 방법

본 실험에 사용된 Cu와 W이 첨가된 수퍼 2상 스테

Table 1. Chemical compositions of specimen

										(wt%)
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W	Fe	
0.02	0.41	0.69	25.1	7.0	3.6	0.24	0.56	0.62	Bal.	

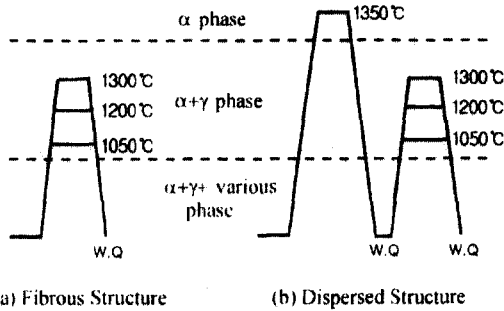


Fig. 1. Schematic sketch of heat treatment cycle.

인리스강은 고주파 진공유도 용해로에서 용해 제작하였고, 그 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 시료는 수직 관상로에서 질소와 알곤이 혼합된 분위기에서 오스테나이트상의 체적분율과 분포상태를 달리하기 위한 열처리를 행하였으며, 그 열처리과정을 Fig. 1에 나타낸다.

Fig. 1에서 (a)는 냉간압연한 시료를 직접 페라이트상과 오스테나이트상이 공존하는 1050°C~1300°C의 2상 영역 구간으로 가열하여 15분 유지후 급랭함으로써, 오스테나이트상이 일방향으로 배열되어 있는 조직을 얻기 위한 열처리로서, 이 조직을 섬유상조직(fibrous structure)이라 부른다. (b)는 1350°C에서 30분 가열후 수냉하여 페라이트 단상조직을 얻은 다음, 페라이트상과 오스테나이트상이 공존하는 1050°C~1300°C 사이의 온도에서 15분 유지후 급랭시킴으로써 페라이트 기지에 오스테나이트상이 분산된 조직을 얻기 위한 과정이며, 이 조직을 분산상조직(dispersed structure)이라 부른다.

한편 열처리가 완료된 시료의 미세조직은 경면 연마하여 40% KOH용액에서 30초 전해부식을 실시한 후, 광학현미경으로 관찰하였다. 열처리온도 변화에 따른 페라이트상과 오스테나이트상의 체적분율 변화는 화상분석시험기와 점분석법을 병행하여 측정하였다. 그리고 경도측정은 비커스 경도시험기를 사용하여 하중 500 g으로 5회 측정한 후 평균하여 구하였다. 또한 오스테나이트상의 체적분율 변화에 따른 기계적특성을 관찰하기 위한 인장시험은 분산상과 TL방향의 섬유상 시험편을 사용하여, 상온에서 크로스 헤드 속도 1 mm/min의 속도로

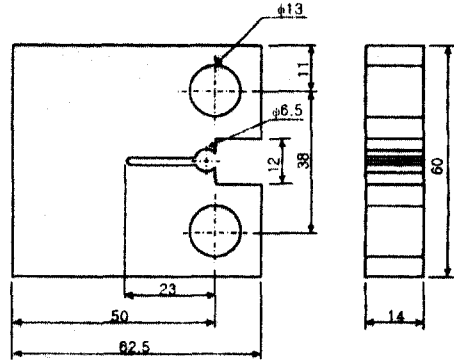


Fig. 2. Dimensions of specimen (unit:mm).

실시하였다.

피로시험은 용량 10톤의 유압식 만능피로시험기를 사용하여 본 실험전에 2 mm의 피로예균열을 삽입한 후, 실온·대기중에서 정현파로, 하중반복수 5Hz, 응력비 R=0.1, P=12.7kN의 일정하중으로 실시하였다. 이때 균열진전량은 클립게이지를 사용하여 측정하였으며, 응력확대계수는 다음식을 이용하여 계산하였다. 그리고 균열전파속도(da/dN)는 중분다항식법으로 구하였다.

$$K = \left[\frac{P}{(B \cdot W)^{1/2}} \right] \cdot f(\eta) \quad (1)$$

여기에서, $\eta = a/W$,

$$f(\eta) = \frac{(2 + \eta)}{(1 - \eta)^{3/2} \cdot (0.866 + 4.64 \cdot \eta - 13.32 \cdot \eta^2 + 14.72 \cdot \eta^3 - 5.6 \cdot \eta^4)}$$

이 식은 $0.2 \leq a/W < 1$ 에서 적용 가능하다. 이 때 사용한 CT 시험편의 형상을 Fig. 2에 나타내었으며, 섬유상조직 시험편의 노치는 압연방향에 대하여 각각 수직(LT) 및 평행(TL)한 방향으로 삽입하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 오스테나이트상의 체적분율 및 분포상태

체적율이 다른 섬유상조직과 분산상조직을 갖는 시료의 미세조직을 광학현미경에 의해 관찰하여 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림에서 흰색이 오스테나이트상이고, 검은색이 페라이트상이다. 이 사진에서 알 수 있는 바와

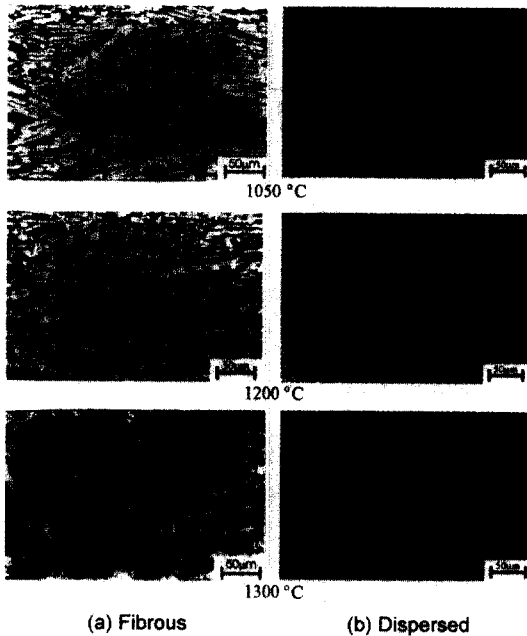


Fig. 3. Optical micrographs of super duplex stainless steel showing the temperature effect on the fibrous and dispersed. (Ferrite (α): Black, Austenite (γ): White).

같이 (a)의 섬유상조직에서는 오스테나이트상이 압연방향을 따라 섬유상형태로 존재하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 2상영역 열처리 온도가 높아짐에 따라 섬유상형태의 연속상으로 존재하던 오스테나이트상이 조대화되면서 연속적이지 못하고 끊어진 상태로 존재하고 있으며, 오스테나이트상의 체적분율 또한 감소하고 있음을 알 수 있다. (b)의 분산상조직에서는 페라이트상의 입계 및 입내에 오스테나이트상이 필름형태로 분산되어 있다. 또한, 2상영역 열처리 온도가 높아질수록 오스테나이트상의 체적분율이 적어질 뿐만 아니라 입자의 크기가 조대화되고 있음을 알 수 있다.

분산상조직과 섬유상조직을 갖는 시료에서 오스테나이트상과 페라이트상의 체적분율에 미치는 2상영역 열처리 온도의 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 2상영역 열처리 온도가 상승함에 따라 오스테나이트상의 체적분율은 급격히 감소하고 있는데 반하여 페라이트상의 체적분율은 증가하고, 섬유상조직이 분산상조직보다 동일 열처리 온도에서 오스테나이트상의 체적분율이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 동일 열처리 온도 및 시간에서 섬유상 조직의 오스테나이트상의 체적분율이 높은 이유는 냉간압연에 의해 결정립이 미세화되고, 또

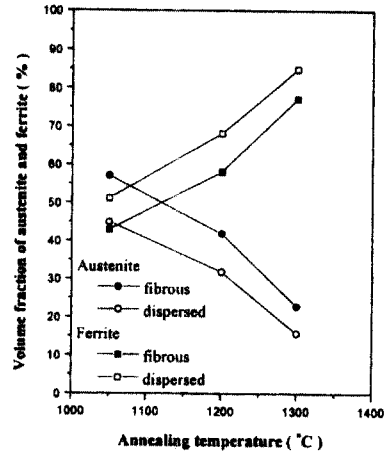


Fig. 4. Effect of annealing temperature on the volume fraction of γ and α in super duplex stainless steel.

한 전위밀도 등과 같은 내부결합의 증가에 따른 축적된 에너지가 2상영역 열처리시 오스테나이트상으로의 변태 속도를 촉진시키기 때문이다. 이에 반하여, 분산상조직은 고온열처리에서 얻은 페라이트 단상조직을 2상영역에서 열처리함으로써 냉간압연에 의한 영향이 없어지게 된다. 따라서 오스테나이트상의 핵생성과 성장 속도가 상대적으로 느려져 변태량도 냉간압연재에 비하여 적게 된다고 생각한다.

3.2. 오스테나이트상의 분포 및 체적분율 변화가 기계적 성질에 미치는 영향

수퍼 2상 스테인리스강에서 2상영역 열처리 온도에 따른 각상의 경도를 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 두 시료 모두 2상영역 열처리 온도가 높아질수록 페라이트상과 오스테나이트상의 경도값이 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 섬유상조직의 경우가 분산상의 경우보다 경도값도 높고, 증가량도 크게 나타난다. 이와 같은 이유는 섬유상조직의 경우는 냉간가공한 시료를 직접 2상영역 열처리온도로 가열하여 제조하였기 때문에, 가공에 의해 발생된 결정립미세화와 전위들이 완전히 소멸되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 그리고, 2상영역 열처리 온도가 증가할수록 페라이트상과 오스테나이트상의 경도값이 증가하는 이유는 열처리 온도가 높아질수록 더 많은 양의 탄화물과 질화물들이 분해되어 페라이트상과 오스테나이트상으로 확산되어감에 따른 고용강화의 영향으로 판단된다.[7]

Fig. 6은 오스테나이트상의 체적분율 변화에 따른 인

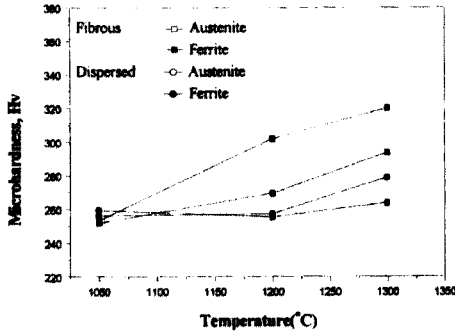


Fig. 5. Relationship between Vickers hardness and heat treatment.

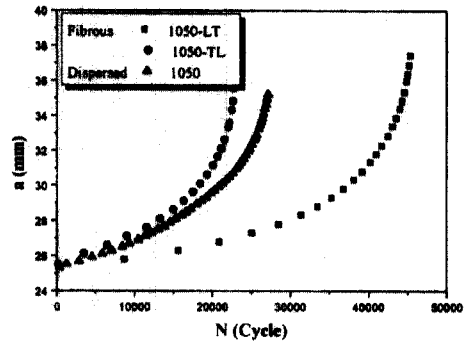


Fig. 7. α -N curves obtained from dispersed structure and fibrous structure heated in 1050°C.

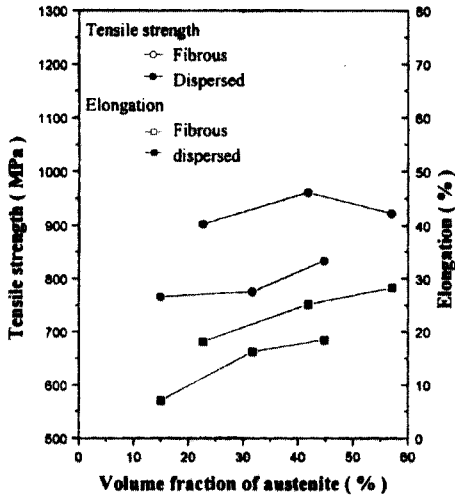


Fig. 6. Effect of volume fraction of austenite on tensile strength and elongation in super duplex stainless steel.

장성질 변화를 조사하여 나타낸 것이다. 두 시료 모두 오스테나이트상의 체적분율이 증가함에 따라 인장강도와 연신율이 함께 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 오스테나이트상의 체적분율이 증가함에 따라 강도와 연신율이 모두 증가하는 이유는 오스테나이트상의 체적분율이 높아지면서 페라이트상의 결정립이 미세화 될 뿐만 아니라 고용되는 질소량도 증가하는데 따른 결정립 미세화 및 고용강화의 영향 때문인 것으로 생각된다[6]. 또한 섬유상조직의 경우 오스테나이트상의 체적분율이 50% 이상이 되면 인장강도는 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 2상 스테인리스강에서 기계적 성질을 반영하고 있는 페라이트상의 체적분율이 상대적으로 적어지기 때문이라 생각된다. 특히 2상 스테인리스강의 기계적 성질은 페라이트상의 성질을 반영한

다고 알려져 있고[15], 2상의 체적분율이 각각 50%에서 가장 우수한 것으로 알려져 있다[6,16]. 따라서 본 연구에서 오스테나이트상의 체적분율이 50%를 넘는 섬유상조직에서 인장강도가 저하하고 있는 것은 이러한 결과와 잘 일치하고 있다.

또한 섬유상조직이 분산상조직에 비하여 강도와 연신율이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 일반적으로 2상 스테인리스강에서 파괴의 기점이 되는 크랙은 페라이트상과 오스테나이트상의 계면에서 주로 일어난다고 알려져 있다.[15] 따라서 섬유상조직은 인장변형과 함께 오스테나이트상과 페라이트상의 상호간섭에 의해 네킹이 일어나려는 현상을 방해하는 효과가 크기 때문에 강도와 연신율이 높게 나타난다. 그러나, 분산상조직에서는 오스테나이트상이 필름상으로 석출되었기 때문에 페라이트상과의 계면에서 슬립이 쉽게 발생되어 네킹의 시작과 함께 크랙이 쉽게 전파됨으로서 낮은 강도와 연신율을 나타낸다고 생각된다.

6.3. 오스테나이트상의 체적분율 및 분포변화가 피로균열 진전특성에 미치는 영향

수퍼 2상 스테인리스강의 오스테나이트상의 체적분율 및 조직의 이방성이 피로균열 성장거동(a -N 선도)에 미치는 영향을 조사하여 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림은 1050°C에서 열처리된 결과를 대표적으로 나타낸 것이다. 섬유상조직의 경우는 조직의 이방성에 대한 피로균열진전의 영향을 함께 규명하기 위하여, 균열진전방향이 압연방향에 수직 및 수평한 시료에 대해 피로시험을 실시하였다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 피로균열 성장거동은 조직의 이방성에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉, 섬유상 조직을 갖는 시료에서 균열의

진전방향이 압연방향과 평행(TL)한 섬유상조직을 갖는 시료의 경우가 압연방향과 수직(LT)한 섬유상조직을 갖는 시료보다 피로균열 성장거동이 빨라 피로수명이 짧게 나타나고 있다. 또한 그 수명의 차이는 오스테나이트상의 체적분율이 감소할수록, 즉, 열처리 온도가 증가할수록 적게 나타났다. 한편 분산상조직을 갖는 경우는 균열진전 방향이 압연방향과 평행한 섬유상조직을 갖는 시료보다는 피로수명이 길게 나타나고 있지만, 압연방향에 수직인 섬유상조직을 갖는 시료보다는 짧게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와같이 균열진전 방향이 압연방향에 평행한 섬유상조직을 갖는 경우가 수직인 섬유상조직을 갖는 시료에 비해 피로수명이 짧은 이유는 압연방향과 평행한 섬유상조직을 갖는 시료의 경우는 균열진전방향이 섬유상조직의 배열방향과 평행하기 때문에 균열전파가 용이하기 때문이다. 즉, 압연방향과 평행한 섬유상조직을 갖는 시료의 경우는 균열진전이 길게 신연된 페라이트상과 오스테나이트상의 계면을 따라 용이하게 진전하였기 때문에 피로수명이 짧게 나타났다고 판단된다. 한편 오스테나이트상의 체적분율이 감소할수록 이방성에 따른 피로수명 차가 적게 나타나는 이유는 오스테나이트상의 체적분율이 적어지면 상대적으로 균열진전이 용이한 통로가 되는 페라이트상과 오스테나이트상의 계면이 적어지는데 기인되는 것으로 판단된다.

분산상조직을 갖는 시료에서 오스테나이트상의 체적분율이 피로균열 성장거동에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 오스테나이트상의 체적분율이 가장 높은 즉, 1050°C의 2상영역에서 열처리한 시료가 가장 피로수명이 가장 짧게 나타났다. 이와같은 이유는 오스테나이트상의 체적분율이 증가하게 됨에 따라 피로균열의 생성과 성장이 용이한 페라이트상과 오스테나이트상의 계면이 많아지기 때문이라 판단된다.[12] 그러나 1300°C의 2상 영역에서 열처리한 시료는 1200°C에서 열처리한 시료에 비해 오스테나이트상의 체적분율이 적음에도 불구하고 피로수명이 짧게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 2상 스테인리스강에서 기계적 성질은 최소 20%이상의 오스테나이트상의 체적분율이 되어야 2상 스테인리스강으로서의 강도와 연신율을 유지할 수 있는데[10,11], 1300°C에서 열처리한 시료는 오스테나이트상의 체적분율이 14%정도이기 때문에 강도와 연신율이 낮아지며, 페라이트상의 경도가 다른 시료보다 높은 것에 기인되어 피로수명이 짧게 된다고 판단된다.

그리고 조직의 이방성에 따른 균열진전 상황을 조사하

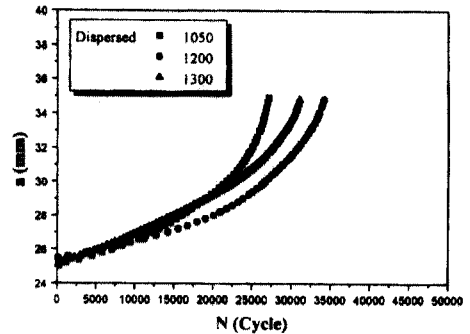


Fig. 8. α -N curves for dispersed structure.

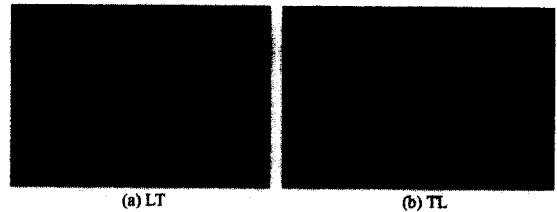


Fig. 9. Typical surface appearance obtained from 1050°C specimen.

기 위하여 피로시험에 의해 얻은 파단시험편중 1050°C 시료의 균열진전 경로를 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 균열진전 방향이 압연방향에 수직(LT)한 섬유상조직을 갖는 시료는 페라이트상과 오스테나이트상을 관통하면서 균열이 진전하는데 반하여, 평행(TL)한 섬유상조직을 갖는 시료는 경계면을 따라서 균열이 진전하였음을 알 수 있었다.

오스테나이트상의 분포상태 및 조직의 이방성에 따른 균열진전속도(da/dN)와 응력확대계수의 변동폭(ΔK)과의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림에서 섬유상조직의 1050°C는 TL방향의 균열진전속도가 LT방향보다 빠르게 나타나고 있다. 그러나 온도가 증가할수록 두방향의 진전속도가 비슷하게 나타나고 있다. 그리고 분산상조직의 1050°C에서는 섬유상조직의 TL방향보다 늦지만, LT방향보다 빠른진전을 보여주고 있다. 그러나 온도가 증가함에 따라서 섬유상조직에 비하여 피로균열진전속도가 더욱 더 느리게 나타나고 있다. 이것은 온도가 증가함에 따라서 경질인 페라이트상의 체적분율이 증가하고, 균열이 2상의 계면을 따라 진전하기보다는 관통하여 진전하기 때문이라 판단된다.[14]

오스테나이트상의 분포상태와 조직의 이방성에 대한 영향을 알아보기 위하여 Fig. 10에서 피로균열진전속도

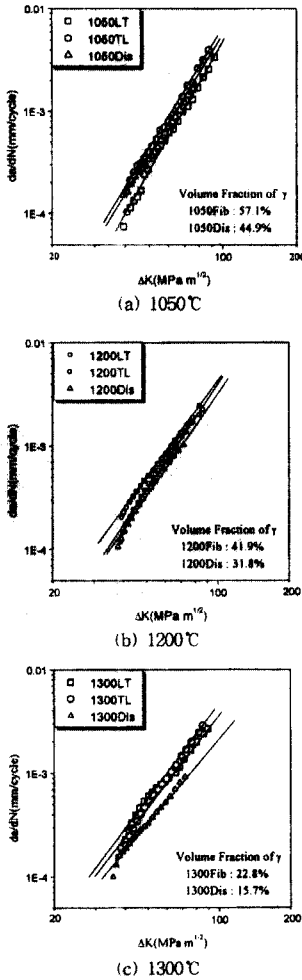


Fig. 10. Fatigue crack growth rate versus stress intensity factor range for temperature.

인 Paris식의 C와 m값을 구하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 여기서 m값은 조직의 상태에 관계없이 온도가 증가할수록 적어짐을 알 수 있다. 또한 섬유상 조직에서 오스테나이트상의 체적분율이 너무 낮은 1300 °C 시편을 제외하면, LT방향이 TL방향보다 m값이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 LT시험편이 초기에는 균열진전 속도가 늦지만, 균열이 진전함에 따라서 TL시험편보다 더 빠른 진전속도를 나타내기 때문이다

한편, 분산상조직의 경우는 오스테나이트상의 체적분율이 증가할수록, 즉, 열처리 온도가 낮을수록 m값이 증가하며, 균열진전속도가 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 본 실험에서 얻어진 분산상

Table 2. C and m obtained by Paris' law.

Condition	C	m
1050LT	1.78×10^{-10}	3.65
1050TL	2.76×10^{-10}	3.59
1050Dis	2.50×10^{-10}	3.58
1200LT	4.25×10^{-10}	3.57
1200TL	1.58×10^{-9}	3.23
1200Dis	3.75×10^{-10}	3.44
1300LT	4.20×10^{-9}	2.99
1300TL	2.25×10^{-9}	3.13
1300Dis	7.85×10^{-9}	2.70

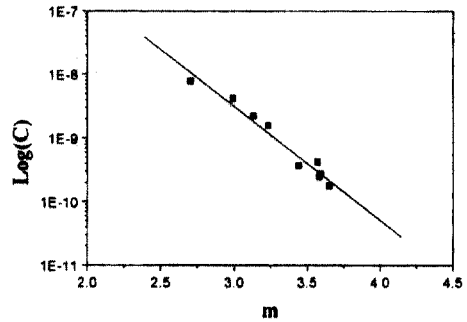


Fig. 11. Correlation of "m" and "C" in the equation $da/dN = C(\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth rate. (a: mm, $\Delta K = \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

조직의 오스테나이트상 체적분율 범위내에서는 오스테나이트상의 체적분율이 증가할수록 균열의 진전통로가 되는 페라이트상과 오스테나이트상의 계면이 증가하기 때문이라 판단된다.

Fig. 10에서 얻어진 C값과 m값을 편대수상에 나타낸 결과가 Fig. 11이다. 이 그림에서 m과 log C사이에는 직선관계가 성립함을 알 수 있다. 즉, m과 C사이에는 서로 독립적이지 아니고, 양자의 사이에는 $C = A \cdot B^m$ 의 관계가 있다.[17] 여기서 A와 B는 정수이고, 본 실험의 결과에서 최소자승법으로 얻어진 A와 B의 값은 $A = 1/8000 \text{ mm/cycle}$, $B = 1/35 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 이다.

4. 결 론

본 연구에서는 수퍼 2상 스테인리스강에서 열처리 온도 및 경로를 달리하여 오스테나이트상의 체적분율 및 분포상태를 변화시킨 후, 기계적 특성과 피로균열 진전 특성을 규명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 섬유상조직은 냉간가공에 의하여 축적된 에너지가 오스테나이트상의 형성을 촉진하는데 기인되어 동일온도 분산상조직보다 오스테나이트상의 체적분율이 높게 나타났다.

2. 오스테나이트상의 체적분율이 증가함에 따라 인장강도와 연신율은 증가하고, 경도값은 낮게 나타났으며, 섬유상조직의 경우가 분산상조직보다도 인장강도와 연신율이 높게 나타났다.

3. 오스테나이트상이 압연방향과 평행한 섬유상조직을 갖는 경우가 수직한 섬유상조직을 갖는 경우보다 피로수명이 짧게 나타났다. 또한 분산상을 갖는 경우의 피로수명은 압연방향과 평행한 섬유상조직을 갖는 경우보다는 길고, 수직한 섬유상조직을 갖는 경우보다는 짧게 나타났다.

4. 오스테나이트상의 체적분율이 감소할수록 조직의 이방성에 따른 피로수명의 차이는 적게 나타났고, 피로균열 진전속도는 섬유상조직의 경우가 분산상조직에 비해 빠르게 나타났다.

참고문헌

1. Robert N. Gunn : "Duplex Stainles steels", Woodhead Publishing. Ltd., (1997) 67.
2. J. Charles, Dr-ring : Fourth Int. Coference -Duplex Stainless Steels, Scotland, 1 (1994) Paper I.
3. J. M. Nicholls : Fourth Int. Conference-Duplex Stainless Steels, Scotland, 1 (1994) Paper III.

4. J. S. Kim, C.J. Park and H.S. Kwon : Bul. Kor. Inst. Met. & Mater., 12 (1999), 635.
5. V. J. Gadgil and E. G. Kein : Fourth Int. Conference-Duplex Stainless Steels, Scotland, 2 (1994) Paper V.
6. D. W. Joo, C. Y. Kang and J. H. Seong : J. Kor. Inst. Met. & Mater., 34 (1996), 1312.
7. R. M. Davidson et al. : Materials Performance, January (1990) 57.
8. T. Ogawa, K. Tokaji and Y. Kato : JSME, 56 (1990), 752.
9. C. Y. Kang, H. J. Kim, C. G. Kim, I. S. Kim, D. W. Joo and J. H. Seong : J. Kor. Soc. Heat Treat., 11 (1998), 192.
10. R. F. Atkinson and R. W. King : Duplex stainless Steel, R. A. Lula (Ed.) ASM Metals Park, Ohio, (1983) 399.
11. J. Charles : Proc. of Duplex stainless steels '91, Les editians de physique, France, 1 (1991) 151.
12. T. H. Kang, Y. D. Lee and C. S. Lee : J. Kor. Inst. Met. & Mater., 36 (1998), 1038.
13. M. Nakajima, K. Tokaji and Y. Okamoto : J. Soc. Mat. Sci., Jpn, 48 (1999), 1379.
14. S. K. Lee, J. Y. Do, K. W. Nam, C. Y. Kang, H. W. Lee and S. H. Ahn : KCORE, 14 (2000) 65.
15. H. D. Solomon and T. M. Dedino : Duplex Staniless Steel, Duplex stainless Steel, R.A. Lula ed, ASM Metals Park, Ohio, (1983) 693.
16. T. Katayama and H. Fujita : J. Jpn. Inst. Met. & Mater., 52 (1988), 935.
17. M. Misumi and H. Kitagawa : Proceeding of JSME, 770-2 (1972), 67.