

임계정류피로크랙의 하한계 전파조건에 대한 정량적 고찰

Quantitative Study on Threshold Condition of Critical Non-propagating Crack

김민건*
Kim, Min-Gun

Abstract

Since the propagation of a short fatigue crack is directly related to the large crack which causes the fracture of bulk specimen, the detailed study on the propagation of the short crack is essential to prevent the fatigue fracture. However, a number of recent studies have demonstrated that the short crack can grow at a low applied stress level which are predicted from the threshold condition of large crack. In present study, the threshold condition for the propagation of short fatigue crack is examined with respect to the micro-structure and cyclic loading history. Specimens employed in this study were decarburized eutectoid steels which have various decarburized ferrite volume fraction. Rotating bending fatigue test was carried out on these specimens with the special emphasis on the "critical non-propagating crack length". It is found that the reduction of the endurance limit of their particular micro-structures can be due to the increase of the length of critical non-propagating crack, and the quantitative relationship between the threshold stress σ_{w0} and the critical non-propagating crack length L_c can be written as $\sigma_{w0}^m \cdot L_c = C$ where m, C is constant. Further experiments were carried out on cyclic loading history on the length of critical non-propagating crack. It shown that the length of critical non-propagating crack is closely related to cyclic loading history.

키워드 : 피로크랙, 임계정류크랙, 하한계 전파조건

Keywords : *fatigue crack, critical non-propagating crack, threshold condition*

1. 서론

근년에 비교적 긴 관통크랙에 대한 역학적 관점으로 부터의 정량적 평가법이 확립되었기 때문에, 실제의 기계·구조물에서 피로크랙이 문제되는 것은 오히려 재료결함 또는 응력집중부로부터 발생하여 전파하는 표면미소크랙인 경우가 많다. 따라서 기계·구조물의 피로수명을 정확히 예측하여

안전한 사용을 보장하기 위해서는, 미소크랙거동의 정량적인 파악이 극히 중요하다고 할 수 있다.

그런데 미소크랙의 경우, 그 전파특성이 대단히 까다로워, 특히 미시조직학적 인자에 민감하기 때문에 연속체역학을 기반으로 하는 선형파괴역학 (Linear Elastic Fracture Mechanics : LEFM)에 의한 정량적 취급은 성공하고 있지 않은 게 현실이다. 선형파괴역학은 소규모항복조건이 충족될 수 있는 비교적 큰 크랙사이즈를 대상으로 했을 때 성공적이다. 피로한도 응력의 부하로 발생하는 이른바 미소크랙을 대상으로 했을 때는 성공하기 어

* 강원대학교 기계의용공학과 교수, 공학박사, 책
임지자

롭다. 즉, 일반적으로 하한계응력(피로한도 응력) 근처에서 존재하는 크랙은 그 길이가 1 미리 이하인 경우가 많아서 소규모항복조건을 만족시키기가 어렵고, 이 크랙의 하한계 전과거동을 선형과곡역학으로 해석하게 되면 큰 오차가 발생할 수밖에 없다.

이러한 까닭으로, 미소피로크랙전과의 하한계조건(피로한도를 포함하면서 그 근처 응력에서의 미소크랙의 전과거동을 포함하는 의미)에 관한 연구는 별로 많지 않은데, 그중에서 대표적인 연구는 Kitagawa의 연구라고 할 수 있다[1]. Kitagawa는 표면 에비크랙을 지닌 세 종류의 환봉시험편에 대하여, 크랙전과 하한계응력을 조사하였다. 그 결과, 크랙길이가 긴 거시크랙의 전과하한계조건은 $\Delta K_{Ih} = const.$ 의 관계를 나타내는데 대하여, 크랙길이가 감소하여 0.5mm 정도가 되면서부터, 같은 조건은 $\Delta K_{Ih} = const.$ 의 직선관계로부터 이탈하기 시작하여 평활재의 피로한도에 도달한다는 결론을 얻고 있다. 즉, 미소크랙은 거시크랙의 ΔK_{Ih} 이하의 응력 레벨에서도 전과할 수 있으며, 그 하한계조건은 LEFM의 개념으로부터 기대되는 $\Delta K_{Ih} = const.$ 와 다르다는 것을 보여주고 있다.

실제, 탄소강 평활재에 있어서, 피로한도의 응력이 10^7 회 이상 반복 부하된 시험편 표면에는 0.1~0.5mm 정도의 미소크랙들이 다수 발생해 있다. 그런데, 이들은 모두 피로한도에서 더 이상 전과하지 않는 이른바 정류크랙(non-propagating crack : NPC)들로서, 평활재의 피로한도는 바로 이 정류크랙들의 전과 하한계응력에 대응한다[2]~[6]. 다시 말해 금속재료의 피로한도가 크랙이 발생하느냐 안하느냐의 한계응력으로 결정되는 것이 아니라, 발생한 크랙이 어느 정도까지 전과하다가 정류하느냐 안하느냐의 한계응력으로 결정된다는 것이다. 정확히 말해서, S-N 곡선에서 얻어지는 피로한도는 정류크랙들중에서 해당 응력 하에서 전과 임계상황에 도달해 있는 이른바 '임계정류크랙'의 전과 하한계응력에 대응한다. 임계정류크랙은 해당응력 하에서 존재할 수 있는 최장, 최대의 크랙길이로서, 이 크랙이 전과하면 시험편은 곧 파단하게 되어 피로한도는 출현하지 않는다.

그러므로 이들 미소정류크랙의 전과 하한계조건에 관한 연구는 피로한계의 본질을 밝히는데 있어서도 대단히 중요한 요소라고 할 수 있다. 그런데, 다수의 정류크랙들이 발생함으로 인해, 그들 중에서 어느 크랙을 해당 부하 하에서의 『한계길이(critical length)』로 정하여 피로한도와 관계를 정량적으로 논할 것인가가 문제가 된다. 말하자면, 일반적으로 생각하여 정류크랙들 중에서 최장의 길이를 택한다고 하여도, 그 길이가 해당 부하 하에서 발생 할 수 있는 임계정류크랙길이와 꼭 일치한다고는 볼 수 없다. 바로 이러한 점이, 평활재

의 피로한도와 관련된 정류크랙전과의 하한계조건에 정량적 평가를 곤란하게 하는 주된 요인이라고 생각된다.

이처럼, 정류크랙의 전과 하한계조건의 평가에 있어서, 우선 생성된 많은 정류크랙들 중에서 이른바 『한계상태』에 도달해 있는 크랙을 찾아내는 것이 필요하다. 즉, 해당 부하 하에서 생성될 수 있는 최대의 정류크랙길이(앞으로 이것을 『임계정류크랙길이: L_c 』라 칭한다.)를 우선 찾아내고, 이 임계정류크랙길이의 전과 하한계응력으로서의 피로한도를 규명하는 것이 타당하다고 생각한다.

본 연구에서는, 상술한 『임계정류크랙길이』를 찾아내는 것을 주요수단으로 하여, 그 전과 하한계응력으로서의 피로한도와 관계를 정량적으로 검토하고, 미소크랙 전과거동이 피로부하 이력 등에 민감함을 감안하여, 이들 인자가 미소크랙 전과의 하한계조건에 미치는 영향에 관하여도 검토하기로 한다.

2. 시험편 및 실험방법

표 1에 그 성분을 표시한 공석강을 모재(ϕ 20mm)로 하고, 거기에 1200℃ 2시간의 소둔처리를 하면 모재 표면으로부터 대략 5mm의 깊이에 걸쳐서 탈탄 페라이트 층이 형성된다[7]. 즉 고온에 의하여 공석강(100% 펄라이트 조직) 표면의 탄소가 빠져나가면서 그 부분이 페라이트의 조직으로 변한다. 그러므로 열처리에 들어가기 전에, 장래 시험부가 될 부분의 직경이 12.5mm, 13mm, 13.5mm가 되도록 미리 모재를 선삭해 두고 상기의 열처리를 실시한다. 그 다음, 이들 재료를 사용하여 최종적으로 시험부 직경 ϕ 9, R20의 환봉시험편으로 가공하면, 표면 페라이트 체적분율이 상이한 여러 종류의 시험편을 제작할 수가 있다. 이렇게 해서 얻어진 3종류의 시험편의 표면 페라이트 체적분율은 각각 13%, 6%, 2%인데, 큰 순서부터 A재, B재, C재로 칭하였다. D재는 탈탄페라이트 층을 전부 선삭 제거한 시험편이다[7].

시험편은 시험부를 에머리페이퍼로 경면 연마한 후 피로시험에 사용하였다.

사용한 시험기는 회전굽힘피로시험기(3000 rpm)이다.

표 1 Chemical composition of specimen material

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.84	0.22	0.45	0.014	0.027	0.03	0.02	0.10

3. 결과 및 고찰

3.1 페라이트 체적분율에 따른 피로한도와 임계정류크랙길이

표면층 조직에 있어서 탈탄 페라이트 체적분율 $V_{fF} = 13, 6, 2, 0\%$ 의 4종류로 변화시킨 A, B, C, D 재를 사용하여, 회전굽힘 피로시험으로부터 얻어진 피로한도(σ_{wo})를 V_{fF} 에 대하여 구해보면, V_{fF} 의 증가에 따라 피로한도가 감소하고, $V_{fF} = 13\%$ 의 A재에서는 $\sigma_{wo} = 199\text{MPa}$ 임에 대하여, 탈탄층을 갖지 않는 D재에서 $\sigma_{wo} = 240\text{MPa}$ 이다[7].

이것은, 서론에서 말한 것처럼, 피로한도의 응력이 발생한 정류크랙의 전과한계응력에 대응하므로, A, B, C, D재에 있어서 V_{fF} 의 변화와 더불어 임계정류크랙의 길이가 달라지는데서 연유한다고 볼 수 있다. 따라서 우선 A, B, C, D재에 대하여 크랙 전과의 양상을 조사하기로 하였다. 그 결과, 이들 각 재의 표면 조직 중에 관찰되는 크랙은, 예외 없이 탈탄페라이트 부에 발생하여 페라이트 영역을 따라 전과하고, 최후에는 펄라이트 경계부근에서 정류하였다. 그 한 예를 그림 1에 나타내었다.

다음으로, 각 재의 피로한도의 대소를 직접 지배하는 것으로 예상되는 임계정류크랙길이 L_c 를 구하기로 하였다. L_c 를 구하는 방법은 저자의 선행 연구인 문헌[7]에 소개한 방법을 사용하였다.

이러한 방법으로 실시한 A, B, C, D재의 결과를 그림 2에 도시하였다. 그림 2로부터 평가되는 L_c 는, A재의 경우 $L_{cA} = 400\mu\text{m}$, B재의 경우 $L_{cB} = 340\mu\text{m}$, C재의 경우 $L_{cC} = 250\mu\text{m}$, D재의 경우 $L_{cD} = 190\mu\text{m}$ 으로, 이들 L_c 는 각각의 해당 응력 하에서 견딜 수 있는 크랙의 임계길이라고 생각된다. 또한 V_{fF} 의 증가에 따라 L_c 도 커져서, 평활재의 피로한도의 대소가 L_c 에 의하여 직접 지배되고 있음을 보여주고 있다.

3.2 피로부하 이력과 임계정류크랙 길이

일반적으로, 피로크랙의 크랙면 주위에는 인장성 잔류변형이 남게 되고, 주위 탄성조직의 변형구속에 기인하는 압축성 잔류응력이 유기된다[8]. 이러한 압축성 잔류응력은, 특히 크랙팁의 크랙개구변위를 억제함으로써, 그 후의 크랙전과거동에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[9]. 크랙이 전과하려면 응력부하 사이클 동안 크랙면이 개구(開口)와 폐구를 반복해야 하며, 특히 최대 인장응력 작용 시의 크랙팁에서의 개구변위는 크랙 전과거동에 지대한 영향을 미친다. 즉, 개구변위가 클수록 크랙은 보다 큰 전과구동력을 갖게 되고, 개구변위가 어느 한도보다 작아지거나 0이 되

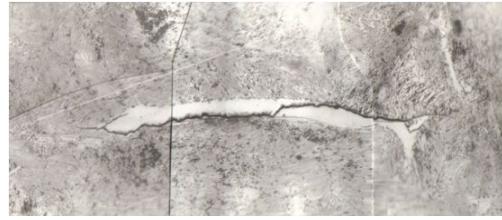


그림 1 Typical feature of NPC which propagated along the ferrite band and stopped its propagating in the vicinity of pearlite boundary.

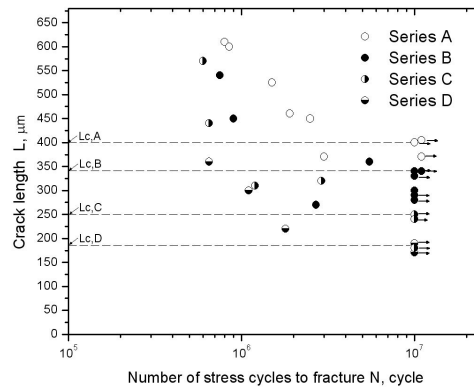


그림 2 Evaluation of the maximum allowable crack length (i.e. the critical NPC length) at the endurance limit employing pre-cracked specimens.

면 크랙은 구동력을 잃고 정류하게 된다.

본 연구에서 L_c 를 구하는데 사용하고 있는 예비크랙재는, 이러한 의미에서 압축성 잔류응력 등의 피로부하 이력이 잔존해 있는 크랙이라 볼 수 있다. 즉, 예비크랙을 도입하는 과정에서 크랙면 주위에는 인장성 소성변형이 남게 되고, 그로 인해 발생하는 압축성 잔류응력이 크랙 팁 주위에 분포해 있다. 이러한 압축성 잔류응력은 외부의 인장부하를 경감시키는 결과를 가져오므로 당연히 크랙 개구변위를 감소시키게 된다.

그러므로 하한계조건의 정확한 파악을 위해서는, 피로부하이력을 제거한 예비크랙재를 가지고 시험하는 것이 본래 의미의 하한계조건을 규명하는데 효율적이다. 그리고 이 결과를 앞 결과와 비교하여 보는 것도 흥미 있는 일이라 하겠다.

따라서 이번에는 모든 예비크랙재에 640°C 1시간의 진공소둔처리를 실시하여, 잔류응력 등의 이력을 제거한 시험편을 준비하였다. 진공소둔처리는 진공로를 사용하여, 디퓨전(diffusion)펌프로 로(爐)내가 충분한 진공상태가 되도록 하고 난 후 가열하였다. 640°C 의 온도는 해당 재료의 재결정온도에

해당한다. 잔류변형을 지닌 재료를 가열하여 재결정온도에 도달하면 변형이 제거된다. 소성변형이 제거되면 당연히 압축잔류응력도 제거되어, 부하이력이 없는 시험편이 얻어지는 것이다.

이렇게 준비한 A, B, C재를 대상으로, 앞선 요령으로 L_c 를 구하는 실험을 실시한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림으로부터, 잔류응력 제거처리된 시험편의 임계정류크랙길이(L_c' 라고 하면)는 L_c' A=95 μ m, L_c' B=80 μ m, L_c' C=50 μ m으로 나타났다. 이 결과들을, 3.1절에서의 결과와 비교할 때 대폭 감소한 수치를 보이고 있는데, 이것은 에비크랙이 형성되기까지의 부하이력이, 그 후의 크랙 전파의 하한계조건에 중대한 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다. 즉, 하한계조건으로서의 피로한도 거동에 영향을 미치고 있다.

3.3 평활재의 피로한도 σ_{wo} 와 임계정류크랙 길이 L_c , L_c' 와의 관계

우선, 지금까지 구한 L_c 및 L_c' 를 각각의 σ_{wo} 와 대응시켜 양 대수 방인지 상에 나타낸 것이 그림 4이다. 이들 결과는, 어느 쪽도 Frost가 제안했던 [10] 다음 식의 형태로 나타낼 수 있음을 보여주고 있다.

$$\sigma^m L = C \quad (1)$$

여기에서, m과 C는 상수로서, σ_{wo} vs. L_c 와의 관계에서는, m=5, C=4.2 $\times 10^{10}$ [MPa]⁵·mm인 값을 갖는다.

또한 σ_{wo} vs. L_c' 의 결과는 σ_{wo} vs. L_c 의 결과의 아래쪽에 위치해 있다. 이 사항은, 크랙자체에 대한 피로부하 이력의 유무에 따라서, 크랙전파의 하한계조건인 피로한도의 크기가 현저히 변화함을 잘 나타내 주고 있다.

다음으로, 그림 4를 소위 Kitagawa 그래프에[1] 함께 나타낸 것이 그림 5이다. 그림으로부터, 본 연구의 결과는 $\Delta K_{th} = const.$ 의 거시크랙의 연장선상에서 이탈하여, **Region I**에서 직선으로 나타나고 있다. Kitagawa 그래프는 주어진 크랙길이에 대하여 그 전파하한계응력을 구한데 대하여, 본 연구에서는 역으로, 주어진 피로한도응력에 대하여 임계크랙길이를 찾는 방법을 택하고 있다. 바로 이 방법상의 차이가 두 연구에 있어서 다른 결과를 가져온 요인이라고 볼 수 있는데, 이점은 미소크랙이 미시조직에 민감한 전파특성에서 비롯되었다고 생각되어진다. 즉, 주어진 크랙이 어떤 응력 하에서 일단 전파개시를 하였다 하더라도, 크랙 팁 부근 미시조직의 상황에 따라서는 다시 정류하고, 그것보다 길이가 작은 제3의 크랙이 전파개시를 하

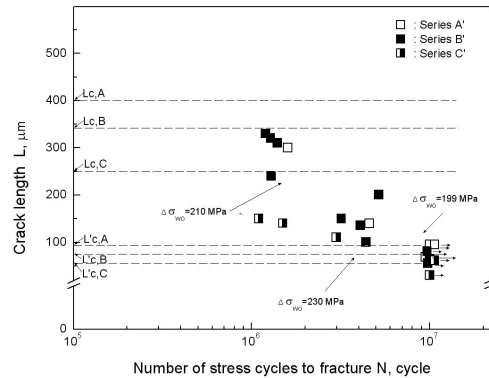


그림 3 Evaluation of the critical NPC length at the endurance limit employing annealed pre-cracked specimens.

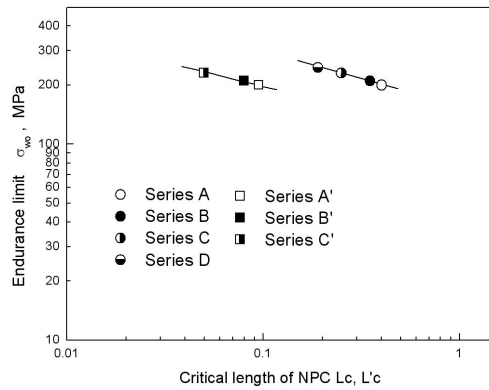


그림 4 Quantitative relationship between the endurance limit and the critical NPC length.

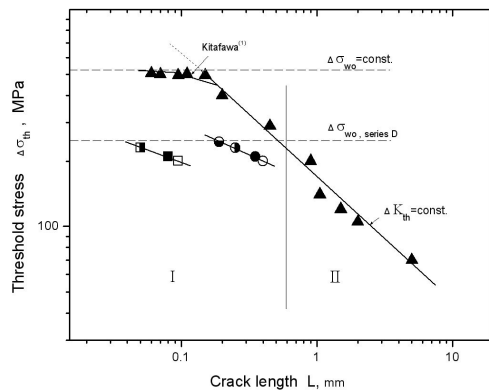


그림 5 Comparison between values of present study and 'Kitagawa Plot'.

는 예는 평활계의 회전굽힘 피로시험에서는 흔히 있는 일이다[5].

Frost가 제안한 식 (1)은, 본 연구에서 취급하고 있는 크랙사이즈보다 한 위수(order) 큰 거시크랙의 전파 하한계조건을 논한 것으로, 미소크랙의 평가를 목적으로 한 것은 아니다. 또한 식 (1)은, 서론에서 지적했듯이, 동일시험편에 발생하는 여러 크랙들 중에서 어느 크랙이 이른바 『임계상태』에 도달해 있는가를 직접 판정할 수가 없는 관계로, 미소크랙의 범주에서는 언제나 한계조건을 나타내고 있다고 할 수 없다. 그런데, 본 연구의 L_c 는, 해당 부하 하에서 한계상태에 도달해 있음이 직접 확인되었으므로, 식 (1)의 σ 및 L 대신에, σ_{wo} 및 L_c 를 대입함으로써 얻어지는 다음 식

$$\sigma_{wo}^m \cdot L_c = C \quad (2)$$

은, 미소크랙의 영역에까지 확장된 Frost류(流)의 『미소피로크랙전파의 하한계조건』을 나타내고 있다고 할 수 있다.

3.4 임계 피로크랙의 전파식 $\sigma_{wo}^m L_c = C$ 의 이론해석

피로에 있어서 크랙의 전파응력이 식 (2)으로 표현됨을 실험적으로 밝혔으므로, 여기서는 그것에 대한 이론적 고찰을 수행한다.

파괴역학에 입각한 Griffith-Orowan-Irwin의 이론에서 크랙의 전파응력은

$$\sigma^2 L = C \quad (3)$$

으로, 취성파괴에 있어서 크랙전파응력의 실험결과가 식 (3)으로 표현됨은 잘 알려져 있다. 즉, 일방향 정적응력 하에서 이론적으로 또는 실험적으로도 식 (3)에 있어서 응력의 멱수는 $m=2$ 가 되는데, 반복(피로)응력 하에서의 실험결과는 $m=3\sim 5$ 로 알려져 있다. 이것은 일방향 응력하의 크랙전파와 피로응력 하에서의 크랙전파의 근본적 메커니즘의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 피로응력 하에서의 크랙의 전파를 논할 때 우선 생각해야 할 사항은, 일방향의 경우와는 다르게 크랙이 전파개시하기 이전에 이미 크랙 팁 부근에 발생하는 피해(damage)의 내용이다.

Holden은 Al, 탄소강에 대하여 피로크랙 팁 부근을 X선으로 조사하여, Al에서 5μ , 탄소강에서 $1\sim 2\mu$ 의 부결정(sub-grain)이 형성되어 있음을 밝혔다[11]. 그리고 그 후의 많은 연구도 이 같은 사실을 입증하고 있다. Wood는 황동 및 탄소강의 부결정을 전자현미경으로 관찰하여, 부결정의 경계(sub-boundary)에 공동(void)이 형성되어 있으며

이 공동을 따라서 크랙의 전파가 발생함을 밝히고 있다[12].

결정의 미세화에 의한 부결정은 크랙 팁 부근의 높은 응력(집중된 응력)의 반복작용으로 생긴 것이나, 공동은 전위(dislocation)의 운동에 의해서 만들어진다. 지금, 결정의 전위밀도를 n_d 라 하고, 응력의 반복에 의해 전위가 평균거리 s 만큼 이동했다고 하면, 전위의 이동에 의한 시험편 전체의 소성변형은

$$\Delta \epsilon_p = c_1 n_d s \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있다. 집중된 큰 응력을 받는 크랙 팁 부근에서의 소성경화는 부하 초기에 포화하여 응력과 변형의 관계는 안정된 히스테리시스 루프를 나타낸다. 이런 경우, 반복되는 소성변형은 응력과 지수법칙인 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta \epsilon_p = c_2 \sigma^k \quad (5)$$

한편, 원자의 공동은 나선전위의 교차가 jog를 형성함으로써 만들어진다. jog의 밀도를 n_j 라 한다면, 전위의 운동에 기인하여 시험편에 생기는 공동의 수는

$$n_v = c_3 n_d n_j s \quad (6)$$

가 된다. 식 (4)와 (5)를 식 (6)에 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$n_v = c_4 n_j \sigma^k \quad (7)$$

식 (7)은 1회의 응력반복으로 생겨나는 공동의 수를 나타내고 있다.

크랙 팁은 소성변형에 의하여 둔화(곡률반경 : ρ)되므로, 팁 부근에서는 무한대의 응력집중이 아닌 다음 식으로 표현되는 응력이 발생한다.

$$\sigma_{max} = 2(L/\rho)^{1/2} \sigma \quad (8)$$

크랙 팁 부근의 이러한 항복응력 이상의 높은 응력이 반복 부하됨으로 인해 결정은 미세화 되어간다. 충분한 응력 반복 후에 형성되어진 공동은 그 반경이 r_v 인 구(球)로 간주하면, 그 수를 i 라고 할 때

$$i (4/3\pi r_v^3) = c_5 n_j \sigma^k \quad (9)$$

가 된다. 이러한 공동이 연결함에 의해서 미세화된 결정의 경계에 크랙이 생성된다. 그 크랙의 길이 L_v 는, 공동의 반경 r_v 와 그 수 i 에 의해서 결정

된다.

$$L_v = c_6 i r_v = c_7 n_j / r_v^2 \sigma^k \quad (10)$$

이상 서술했던 크랙 팁 근방에서의 결정이 미세화하여, 그 경계에 형성되는 공동이 미시크랙화하는 과정을 그림 6에 모식적으로 나타내었다. 크랙의 전파는 주크랙과 그 팁에서의 이러한 미시크랙화한 공동 등이 연결됨에 의해서 이루어진다. 그리고 주크랙의 팁에서는 항복 때문에 그 예리함이 둔화되어 있으므로, 파괴는 소성역 내부에 위치한 미시크랙화한 공동의 팁에서 이루어진다. Griffith-Orowan-Irwin의 이론에 의하면, 이러한 미시크랙이 전파하는데 필요한 한계응력 $\bar{\sigma}_{cr}$ 은 다음 식으로 주어진다.

$$\bar{\sigma}_{cr} = (E\gamma / L_v)^{1/2} \quad (11)$$

여기서 E는 탄성계수, γ 는 파면형성에 필요한 소성에너지이다. 앞서 말했듯이, 미시크랙이 존재하는 소성역 내의 최대 응력은 식 (8)로 주어지기 때문에, 이것과 식 (10)를 대입한 식 (11)로부터, 미시크랙화한 공동이 전파하여 주크랙과 연결될 조건은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma^{2+k} L = c_8 E\gamma p r_v^2 / n_j \quad (12)$$

우변의 각 값은 모두 결정의 성질에 의존하는 상수로 볼 수가 있으므로, 식 (12)는

$$\sigma^{2+k} L = c_9$$

가 되어, $\bar{\sigma}_{wo}^m L_c = C$ 가 유도된다.

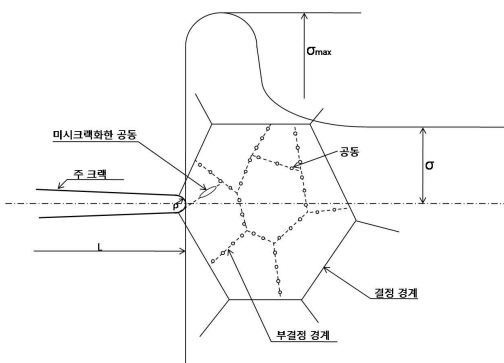


그림 6 Schematic diagram showing the crack propagating mechanism

4. 결론

탄소강 평활재를 사용하여, 피로한도 하에서의 임계정류크랙길이를 구하고, 피로한도와 임계정류크랙길이와의 정량적 관계를 고찰함과 동시에, 이와 같은 미소크랙의 전파 하한계조건에 영향을 미치는 인자 즉 피로부하 이력에 대하여도 검토하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 임계정류크랙의 전파 하한계응력으로서의 피로한도의 대소는, 임계정류크랙 길이에 의해서 직접 지배된다.

(2) 피로한도 σ_{wo} 와 임계정류크랙길이 L_c 사이에는, Frost流의 크랙전파 조건인 $\sigma_{wo}^m \cdot L_c = C$ 인 정량적 관계가 성립한다. 여기에서, m과 C는 상수이다.

(3) 크랙의 피로부하이력의 유무에 의해 미소크랙의 전파 하한계응력은 현저하게 달라진다.

(5) 실험적으로 얻어진 $\sigma_{wo}^m \cdot L_c = C$ 를 전위론을 사용하여 이론적으로 검토한 결과, 피로크랙 팁 부근의 부결정립계에 발생하는 미소공동모델로 그 수식의 타당성이 검증되었다.

참고 문헌

- [1] Kitagawa, H., Takahashi, S., Suh, C.M., and Miyashita, S., "Quantitative Analysis of Fatigue Process-Microcracks and Slip Lines Under Cyclic Strains", *ASTM STP 675*, pp.420-449, 1979.
- [2] Wadsworth, N.J., "The Influence of Atmospheric Corrosion on the Fatigue Limit of Iron-0.5% Carbon", *Phil. Mag.* 6, pp.387-341, 1961.
- [3] 도면, 응진, "평활피로시험에서의 비진행성 크랙과 피로강도", *일본기계학회 강연전체집*, No.37, pp.67-69, 1961.
- [4] Hempel, M., "Metallographic Observation on the Fatigue of Metals", *Proc. Int. Conf. on Fatigue of metals*, IME, pp.543-548, 1965.
- [5] 서곡, 서전, "피로한도의 굴재와 미시적 정류크랙의 관계", *일본기계학회 논문집*, 제39권, 제312호, pp.1385-1393, 1973.
- [6] Kunio, T., Yamada, K., "Microstructural Aspects of the Threshold Condition for Non propagating Fatigue Crack in Martensitic-Ferritic Structure", *ASTM STP 675*, pp.342-370, 1979.
- [7] 김민건, "탄소강 미소크랙 전파의 하한계조건", *대한기계학회 논문집*, 12권, 3호, pp.505-512, 1988.
- [8] 중택, 소림, "금속피로크랙의 거동", *기계연구*,

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제30권 B호, 2010.
임계정류피로크랙의 하한계 전파조건에 대한 정량적 고찰

- 제20권, 제10호, pp.1384-1391, 1968.
- [9] Elber, w., "The Significance of Fatigue Crack Closure", *ASTM STP 486*, pp.230-242, 1971.
- [10] Frost, N.E., "A Relation Between the Critical Alternating Propagation Stress and Crack Length for Mild Steel", *Proc. Inst. Mech. Engrs.* 173-35, pp.811-827, 1959.
- [11] W. T. Holden, *Dislocations in Crystals*, McGraw-Hill Book Co. Inc., NewYork, 1953.
- [12] R.L. Wood, *Acta Metall*, vol. 11, pp.203, 1963.