

AISI 4340의 피로균열 진전 및 균열닫힘 거동 평가

최재만^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 제1기술연구원

Evaluation of Fatigue Crack Growth and Crack Closure Behavior in AISI 4340

Jaeman Choi^{*,1)}

¹⁾ 1st R&D Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 29 November 2024 / Revised 30 January 2025 / Accepted 4 February 2025)

Abstract

To obtain fatigue crack closure data, fatigue crack growth tests for AISI 4340 are performed under constant amplitude loading at various stress ratios and the behavior of crack closure is investigated. For determination of crack opening load under constant amplitude loading, ASTM compliance offset method is applied because its simplicity among the various methods.

It is observed that crack opening ratios of AISI 4340 for constant amplitude loading are nearly constant at stress ratio R. Based on the characteristic crack closure behavior, Fatigue crack growth rates(da/dN) at various stress ratios are well correlated with effective stress intensity factor range(ΔK_{eff}). It was confirmed that the crack closure behavior is the primary factor controlling fatigue crack growth.

Key Words : Fatigue Fracture(피로 파괴), Fatigue Crack Growth Rate(피로균열 진전속도), Crack Closure Phenomenon(균열닫힘현상), Constant Amplitude Loading(일정진폭하중), Effective Stress Intensity Factor(유효응력강도계수), Crack Opening Ration(균열열림비), Compliance(컴플라이언스)

기 호 설 명

ΔK_{eff} : 유효응력강도계수폭

da/dN : 피로균열진전속도(Fatigue crack growth rate)

R : 응력비(Stress ratio)

U : 균열열림비(Crack opening ratio)

1. 서론

피로 파괴(Fatigue fracture)는 자동차, 항공기 등에서 일어나는 파괴의 주요한 원인이 되고 있다. 특히 항공기에서 발생된 파손 원인을 조사한 결과에서도 Table

* Corresponding author, E-mail: jaemanchoi@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

1과 같이 피로 파괴가 전체 파손 원인의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다¹⁻²⁾. 이와 같은 피로 파괴로 인한 인명과 재산 손실 등을 방지하기 위해서는 손상 허용설계(Damage tolerant design) 등 다양한 피로설계 개념이 적용되고 있으며 이를 위해서는 피로균열에 대한 충분한 이해와 올바른 평가가 반드시 요구된다.

본 연구에서는 Elber의 균열단합현상(Crack closure phenomenon)을 기반으로 한 피로강도설계 데이터베이스 구축³⁻⁵⁾을 위해 항공기 등에 사용되는 니켈-크롬-몰리브덴 합금강인 AISI 4340을 다양한 응력비(Stress Ratio)에서 피로시험을 수행하여 AISI 4340의 피로 데이터 및 균열단합 거동을 확인하고자 한다.

열리는 것을 균열단합현상(Crack closure phenomenon)이라고 한다.

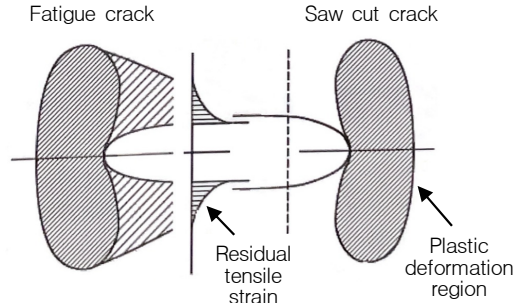


Fig. 1. Comparison of fatigue crack and saw cut crack

Table 1. Failure modes of aircraft

Failure Modes	Percentage
Corrosion	16
Fatigue	55
Overload	14
High temperature corrosion	2
Stress corrosion cracking	7
Wear	6

2. 피로균열 단합현상 및 측정방법

2.1 피로균열 단합현상

일반적으로 균열은 압축하중하에서 닫히고 인장하중하에서 열린다고 생각되지만, 피로균열은 균열에 의해 균열선단에 형성된 소성역 속을 진전하기 때문에 균열선단 후방의 균열 자유표면에 잔류 인장변형이 남게 된다.

이로 인해 Fig. 1과 같이 제하(Unloading)시에 피로 균열은 잔류 인장변형에 의해 이상적인 절단균열(Saw cut crack) 보다 균열열림량이 감소하여 하중이 0이 되기 전에 인장하중하에서 닫히게 된다. 하중이 0으로 되기까지 제하하면 피로균열 표면에는 큰 잔류 압축 응력이 생겨 부하>Loading)시에는 발생된 잔류 압축 응력 이상의 인장응력이 부하되어야만 피로균열은 열리게 된다. 이와 같이 피로균열이 인장하중하에서 닫히고 어느 정도 이상의 인장하중이 부하되어야 균열이

2.2 유효응력강도계수(Effective stress intensity factor) 개념

균열단합 현상을 설명하기 위해서 Elber는 Fig. 2와 같이 균열선단 후방의 균열 사이에 변위계(Extensometer)를 부착하여 변위를 검출하고 응력-변위 곡선을 그렸다. Fig. 2의 응력-변위곡선에서 직선 AB부분은 균열이 없는 시험편의 탄성선의 기울기와 같고 균열이 완전히 닫혀있는 상태를 나타낸다. 직선 CD의 기울기는 피로 균열과 같은 길이로 만든 절단균열이 있는 시험편의 탄성선과 기울기가 같고 피로균열이 완전히 열려있는 상태를 나타낸다. 곡선 BC는 균열이 닫힌 상태에서 열려가는 과정으로 균열이 완전히 열리는 C점이 균열 열림점(Crack opening point)이 된다.

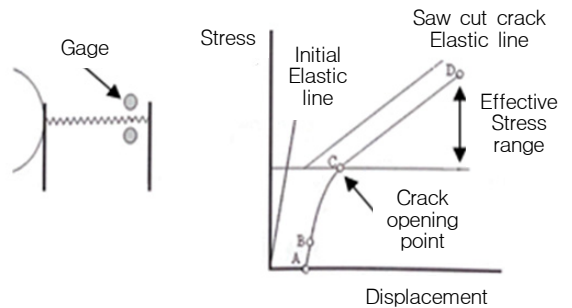


Fig. 2. Stress-displacement curve

이와 같이 컴플라이언스(Compliance)의 변화를 이용하여 Elber는 균열단합 현상을 관찰하였으며, 균열 열림점 응력(σ_{op})으로 부터 유효 응력폭($\Delta\sigma_{eff}$ Effective

Stress range)과 균열열림비(U Crack opening ratio)를 다음과 같이 정의하였다.

$$\Delta \sigma_{eff} = \sigma_{max} - \sigma_{op} \quad (1)$$

$$U = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{op}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} \quad (2)$$

여기서 ΔK_{eff} 는 유효 응력폭에 대한 유효응력강도계수폭(Effective stress intensity factor range), K_{op} 는 σ_{op} 에 대한 균열열림 응력강도계수(Crack opening stress intensity factor)로 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^m = C(U \cdot \Delta K)^m \quad (3)$$

2.3 균열닫힘 측정방법

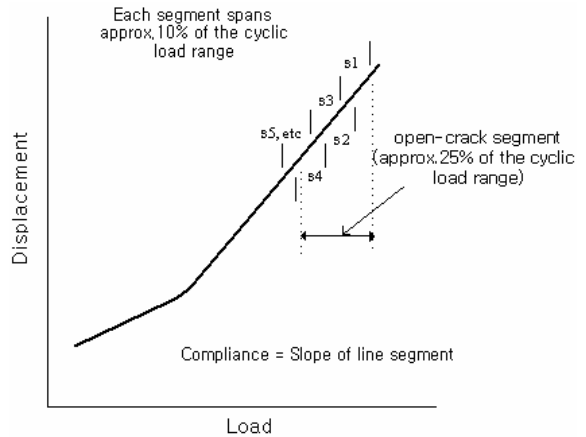
균열닫힘은 부하되는 하중을 지탱할 수 있는 단면 크기의 변화에 대응하는 적절한 물리량의 변화를 검출하여 측정하며, 일반적으로 사용되는 균열닫힘 측정 방법은 Table 2와 같다.

Table 2. Crack closure measurement methods

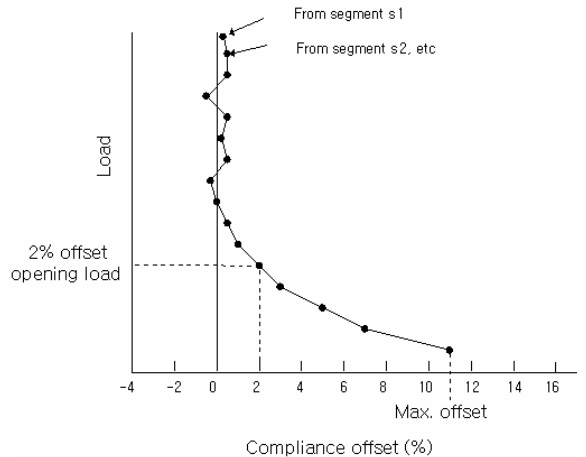
Category	Mrsurement Methods
Compliance	ASTM ^[6]
	Unloading Elastic compliance ^[7]
Electricity	Electirc Potential ^[8]
	Eddy current ^[9]
Wave	LASER Interferometry ^[10]
	Acoustic Emission ^[11]

본 연구에서는 균열열림점 결정과정이 간편한 ASTM Compliance offset 방법을 이용하여 균열열림점을 결정하였다. ASTM Compliance offset 방법의 균열열림점을 결정하는 과정은 다음과 같다.

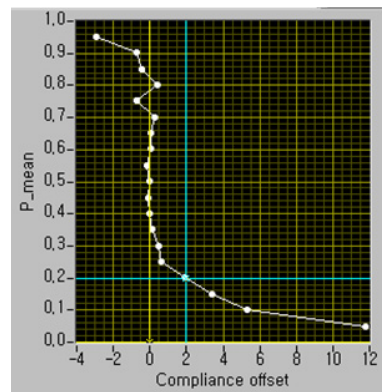
Fig. 3(a)과 같이 하중-변위의 제하(Unloading) 곡선 상에서 되풀이 하중 폭의 약 25% 구간에서 최소자승법으로 기울기(Compliance)를 구하여 이를 균열이 완전히 열린상태에 해당되는 Open crack compliance라고 한다. 다음으로 하중-변위의 부하>Loading) 곡선상에서



(a) Open crack compliance & compliance



(b) Crack opening load determination



(c) Crack opening load determination of AISI 4340

Fig. 3. ASTM Compliance offset method

되풀이 하중 폭의 약 10 % 구간에서 최소자승법으로 Compliance를 구하고 이를 되풀이 하중 폭의 5 %씩 중첩하면서 Compliance를 구한다. 이와 같이 결정된 Open crack compliance와 각 구간에서 구한 Compliance를 식 (4)를 이용하여 Fig. 3(b)와 같이 Compliance offset을 구하여 균열열림하중은 일반적으로 좋은 결과를 제공하는 2 %의 Compliance offset을 이용하여 결정한다. 본 연구에서는 Fig. 3(c)과 같이 피로시험중 측정된 Compliance offset에서 균열열림하중을 결정하는 프로그램을 작성하여 결정하였다.

$$Compliance\ offset = \frac{Open\ crack\ compliance - Compliance}{Open\ crack\ compliance} \quad (4)$$

3. 실험 결과

3.1 시험 재료

AISI 4340은 니켈-크롬-몰리브덴 합금강으로 열처리에 의해 다양한 기계적 성질을 갖는다. 본 연구에서는 810 °C에서 어닐링된 AISI 4340을 파괴인성 값이 가장 큰 L-T방향으로 시편을 채취하였다. 금속조직을 관찰한 결과 Fig. 4와 같이 페라이트(Ferrite)와 미세한 줄무늬의 펄라이트(Pearlite) 조직으로 구성되어 있으며, 제조사에서 제공한 화학적 조성과 기계적 성질은 Tables 3-4와 같다.

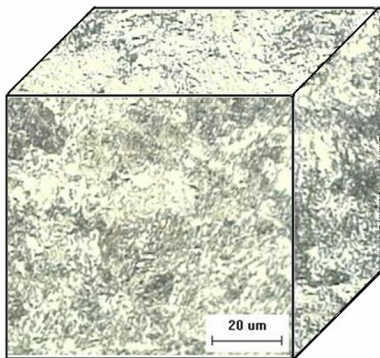


Fig. 4. Microstructure of annealed AISI 4340

Table 3. Chemical composition of AISI 4340(wt.%)

C	Cr	Si	Mn	Mo	Ni	P	S	Fe
0.41	0.75	0.26	0.69	0.22	1.81	0.005	0.003	나머지

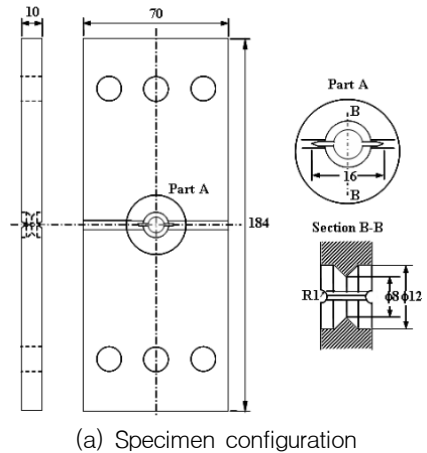
Table 4. Mechanical properties of AISI 4340

Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Hardness (Hv)
745	470	22	50	217

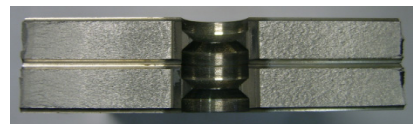
3.2 시험편 형상 및 피로시험 시스템

피로균열 진전시험을 위한 시험편 형상은 Fig. 5(a)와 같이 M(T) Middle-Tension형이며 길이(L) 184 mm, 폭(W) 70 mm, 두께(B) 10 mm, 초기 노치(Initial notch, 2a₀) 16 mm로 가공하였다.

또한, 시험편의 중앙에는 지름(Φ) 8 mm인 원형 구멍을 가공하여 클립 게이지를 고정할 수 있도록 하였다. 또한 시험편 내부와 표면의 응력상태가 상이해서 평면변형률(Plane strain) 상태인 내부가 평면응력(Plane stress) 상태인 표면에 비해 균열이 빨리 진전하므로, 시험편 양쪽 표면에 홈(Side-groove)을 가공하여 두께 방향의 변형을 구속하여 시험편 표면을 내부와 비슷한 평면변형률 상태가 되도록 하였다^[12]. Fig. 5(b)는 본 실험에서 얻어진 시험편의 파단면이며, 시험편의 균열형상이 직선에 가까운 형태가 되어 시험편 내외부의 응력상태가 비슷하게 유지되고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Specimen configuration



(b) Fractured specimen surface of AISI 4340

Fig. 5. Specimen

피로시험을 위해 본 연구에서는 500 kN 용량의 피로시험기를 이용하여 Fig. 6과 같이 자동화된 시스템을 구성하였으며, 피로시험 시스템은 로드셀, 클립게이지, 데이터 획득 및 시험제어용 컴퓨터, 데이터 수집장치 등으로 구성된다.

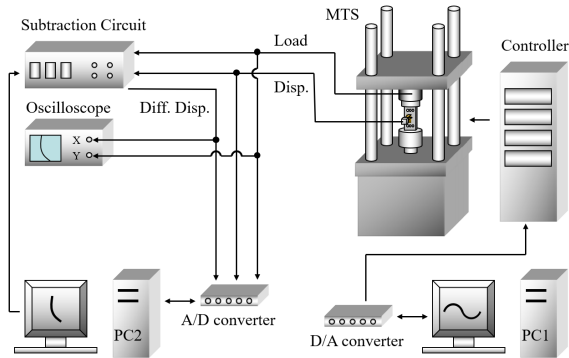
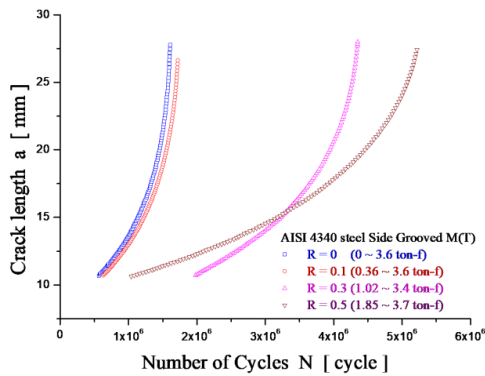
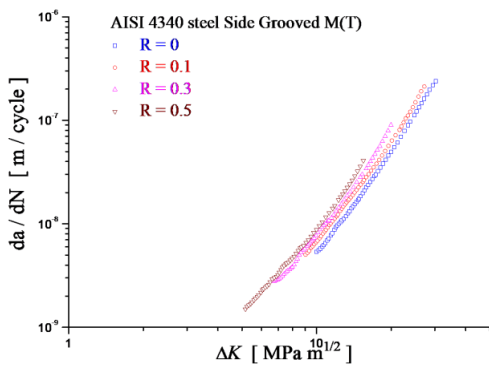


Fig. 6. Fatigue test system



(a) Crack length(a)-N curves



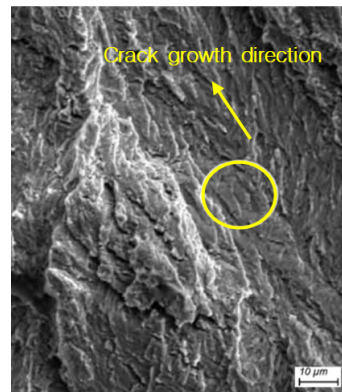
(b) $da/dN - \Delta K$

Fig. 7. Fatigue crack growth rates of AISI 4340

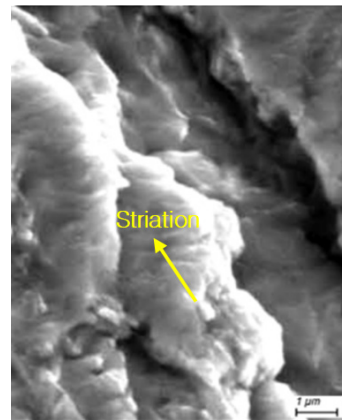
3.3 피로균열 진전시험 결과

일정진폭하중하에서 AISI 4340에 대해 Fig. 7(a)와 같이 응력비($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$)를 다양하게 변화($R = 0, 0.1, 0.3, 0.5$)시켜 피로시험을 수행하였다. 피로균열 진전속도(da/dN)와 응력강도계수폭(ΔK)의 관계는 Fig. 7(b)과 같다. AISI 4340은 피로균열 진전속도 전 구간에서 응력비의 영향은 연성재료인 알루미늄 합금에 비해 적게 나타나고 있다^[1,13]. 하지만 응력비의 영향으로 피로균열 진전속도가 상이하므로 피로균열 진전속도를 하나의 단편 형태의 식으로 나타낼 수 없다. 따라서 정확한 피로수명을 예측하기 위해서는 대단히 많은 응력비에 대해 피로시험을 수행해야 함을 의미한다.

AISI 4340의 미시적 균열진전 양상을 확인하고자 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 파단된 시편($R = 0.5, da/dN = 10^{-7}m/cycle$)을 관찰하였다.



(a) Fracture surface($R = 0.5, \times 1,000$)



(b) High magnification($\times 10,000$) image of circle area

Fig. 8. SEM images of fractured surfaces of AISI 4340

Fig 8(a)과 같이 파단면은 능선(Tearing Ridge)과 2차 균열(Secondary crack)로 구성되어 있으며, Fig. 8(a)의 일부를 고배율로 관찰한 결과 피로 줄무늬(Striation)가 피로균열 전파방향에 수직으로 진행되고 있다.

다음은 ASTM Compliance offset 방법을 이용하여 AISI 4340의 균열열림점을 측정하고 그 결과를 응력비에 따라 나타내었다. Fig. 9와 같이 균열열림비 U 가 전 영역을 통해 비교적 높고 일정하다고 볼 수 있을 정도로 그 변화가 적었다. 이와 같이 균열열림비 U 가 응력비에 일정하므로 균열열림비 U 와 응력비의 관계를 실험적으로 구하여 데이터베이스화하여 활용하면 피로수명 예측을 보다 쉽고 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

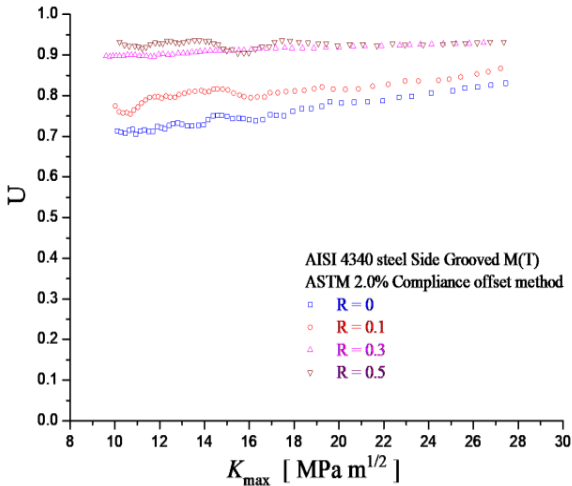


Fig. 9. Crack opening ratio(U)- K_{max} of AISI 4340

ASTM Compliance offset 방법을 이용하여 측정된 균열열림점을 이용하여 피로균열 진전속도(da/dN)와 유효응력강도계수폭($\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{open}$)의 관계로 정리한 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 7(b)에서 응력강도계수폭(ΔK)으로 피로균열 진전속도를 나타냈을 때 있었던 응력비의 영향이 거의 없어져 피로균열 진전속도가 유효응력강도계수폭(ΔK_{eff})이 낮은 영역에서는 약간의 흩어짐이 있으나 ΔK_{eff} 가 증가함에 따라 하나의 좁은 형태로 정리되어 피로균열 진전속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = 1.16 \times 10^{-11} (\Delta K_{eff})^{3.03} \quad (5)$$

이와 같이 균열단합을 고려한 유효응력강도계수폭(ΔK_{eff})으로 정리하면 일의적으로 피로균열 진전속도를 평가할 수 있으며, 피로균열진전속도 평가를 응력강도계수폭(ΔK)에 의한 경우보다 현저하게 간단하게 할 수 있음을 알 수 있다.

즉, 피로균열 진전속도가 균열단합을 고려한 유효응력강도계수폭(ΔK_{eff}) 하나만으로 결정된다고 가정하면, 극단적인 경우 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 의 관계를 결정하기 위해 하나의 응력비에 대해 피로시험을 수행하여 이를 피로수명평가에 활용할 수 있음을 나타낸다.

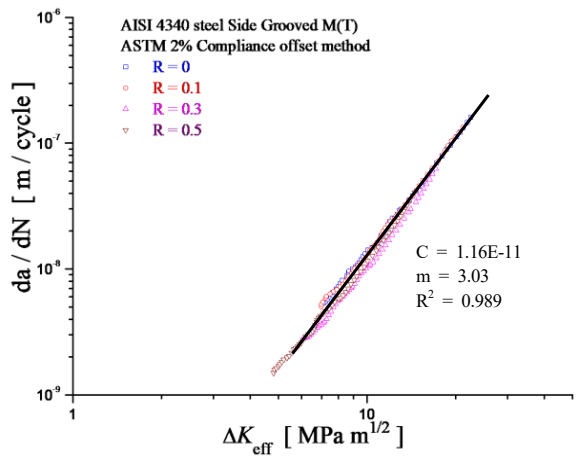


Fig. 10. $da/dN - \Delta K_{eff}$ of AISI 4340

4. 결론

본 연구에서는 다양한 응력비에서 AISI 4340의 균열 단합 거동에 대한 피로 데이터를 확보하고자 연구를 수행하였으며, 이를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

일정진폭하중하에서 피로균열 진전속도(da/dN)를 응력강도계수폭(ΔK)으로 나타낸 결과, 알루미늄 합금보다는 적지만 AISI 4340에서도 응력비의 영향이 피로균열 진전속도 전 영역에서 나타났다.

또한, 일정진폭하중하에서 ASTM Compliance offset 방법을 이용하여 균열열림점을 결정한 결과, AISI 4340은 균열열림비 U 가 피로균열 진전속도 전 영역을 통해 비교적 높고 비교적 일정하였다. 이와 같이 AISI 4340은 균열열림비 U 가 응력비에 일정하므로 균열열림비 U 와 응력비의 관계를 실험적으로 구하여 데이터베이스화하여 활용하면 피로수명 예측을 보다 쉽고

정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

끝으로 AISI 4340은 일정진폭하중하에서 피로균열 진전속도는 유효응력강도계수폭(ΔK_{eff})에 의해 거의 일의적으로 결정되어 응력강도계수폭(ΔK)에 의한 경우보다 간단하게 피로균열 진전속도가 결정되었다. 이를 통해 균열단합 거동이 AISI 4340에서도 피로균열진전을 지배하는 주요인자(Primary factor)임을 확인하였다.

References

- [1] Choi J. M., "Evaluation of Fatigue crack growth behavior of 7475-T7351 Aluminium alloy under random loading," Ph.D Dissertation, KAIST, 2009.
- [2] Campbell, G. S., Lahey, R. T. C., "A Survey of serious aircraft accidents involving fatigue fracture," Vol. 1 and 2, National Aeronautical Establishment (Canada), 1983.
- [3] W. Elber, "The significance of fatigue crack closure," ASTM STP462, pp. 1-15, 1970.
- [4] J. H. Song, C. Y. Kim "Expert System for fatigue Crack Growth Predictions Based on Fatigue Crack Closure," KAIST Research Series, Springer(Singapore), 2022.
- [5] Schijve J., Skorupa A., "Fatigue crack growth in the aluminum alloy D16 under constant and variable amplitude loading," International Journal of Fatigue, Vol. 26 pp. 1-15, 2004.
- [6] ASTM E-647-05, "Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates," Annual books of ASTM Standards, 2007.
- [7] Kikukawa M., Jono M., Kondo Y., Mikami S., "Fatigue crack closure and estimation method of crack propagation rate under stationary varying loading conditions including random loading," Trans JPN Mech Eng. Vol. 48, pp. 1496-1504, 1982.
- [8] T. T. Shih, R. P. Wei, "A study of crack closure in fatigue," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 6, pp. 19-32, 1974.
- [9] K. M. Lal, "On crack opening stress level in fatigue by eddy current technique," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 12, pp. 185-190, 1979.
- [10] W. N. Sharpe, Jr., "Interferometric surface strain measurement," International Journal of Nondestructive Testing, Vol. 3, pp. 59-76, 1971.
- [11] J. M. Larsen, J. C. Williams, A. W. Thompson, "Crack-closure effects on the growth of small surface cracks in Titanium-Aluminium alloys," ASTM STP 982, pp. 149-167, 1988.
- [12] Kim C. Y., Song J. H., "Design, construction and use of a displacement gage for M(T) specimens," Trans. KSME(A), Vol. 26, pp. 415-427, 1986.
- [13] C. Y. Kim, J. M. Choi, J. H. Song, "Fatigue crack growth and closure behavior under random loading in 7475-T7351 aluminum alloy," International Journal of Fatigue, Vol. 47, pp. 196-204, 2013.