

〈論 文〉

疲勞크랙 進展壽命의 確率特性에 관한 研究(Ⅱ) —크랙 進展速度的 分布—

尹 漢 鏞*

(1990년 5월 25일 접수)

A Study on the Probabilistic Nature of Fatigue Crack Propagation Life(Ⅱ) —The Distribution of Crack Propagation Rate—

Han-Yong Yoon

Key Words : Distribution of Crack Propagation Rate(크랙進展速度的 分布) Effect of Thickness(두께의 影響), Distribution of Material Factors(材料係數의 分布), Automation of Fatigue Testing(피로시험의 자동화)

Abstract

Recently, some reports of experimental research on the distribution of fatigue crack propagation rate have been published, and the reliability evaluation using the results of research for the mechanical structure has been executed. Since the thicknesses of specimens used in the published reports are limited to the thin ones, the applicability of the results into the mechanical structure with another thickness seems to be doubtful. That is, not only the quantitative evaluation, but also qualitative evaluation of the effect of specimen thickness has not been executed. In this study, an experimental investigation has been done by using the new type automated multi-stage fatigue testing machine which was developed by the author. The influence of specimen thickness for the distribution of fatigue crack propagation rate with the results is discussed.

1. 序 論

결함이 존재하는 機械構造部材의 疲勞壽命은, 초기결함의 분포를 비롯한 諸因子의 不確定性으로 인해 확률통계적 분포를 띄게 된다. 이들 여러인자가 피로수명의 확률분포에 미치는 영향은 서로 유기적인 관계를 가지면서 복잡하다. 疲勞破壞의 확률적인 과정은, 어떠한 확률분포를 가진 초기결함으로부터 재료내부의 조직적 불균일성등으로 기인된 크랙진전속도 자체의 분포가 가미되어 파괴에 이르는 것으로 간단화할 수 있으며 그러므로 해서 確率疲勞

勞破壞의 본질을 파악하기가 쉽다.

本 研究의 第1報⁽¹⁾에서는 수명분포에 미치는 영향이 가장 큰 初期크랙길이 分布의 영향을 집중적으로 논했으며, 材料側의 불확정성(재료내부의 조직적 불균일성 등으로부터 기인된 크랙 진전속도 자체의 분포)이 미치는 영향은 그 자체의 확률특성을 간단히 가미함으로 해서 평가할 수 있음도 나타냈다. 材料側의 불확정성, 다시 말해서, 크랙 진전속도의 분포는 실험에 의해서 논해질 수 있으며 이와 관련된 연구결과도多數 발표되어 있다^(2~7). 그러나 이들 연구는 대개가 시험편의 두께가 얇은 것에 국한되어 있으며, 시험편의 두께가 두꺼워지면 크랙 진전속도의 통계적분포는 어떤 양상을 띄게

*정회원, 목포대학교 공과대학 기계공학과

되는지에 관해서는 아직 밝혀지지 않고 있다. 橋內⁽⁸⁾에 의하면 미시적 피로파면의 striation 간격의 patch당 평균치는 시험편 내부와 표면에 있어서 차이를 나타내는 등 복잡성을 나타내고 있기 때문에 시험편두께에 따라 크랙 진전속도의 분포특성이 변화할 수 있는 가능성을 내포하고 있으나 이에 관한 연구는 全無한 것으로 생각된다. 따라서 本報에서는 高强度 알루미늄합금 Al2024-T3材의 통계적시험에 의하여 시험편두께가 피로크랙 진전속도의 분포에 미치는 영향을 밝히고자 하며, 또한, 통계적시험의 能率化 및 一貫性を 꾀하기 위하여 개발한 새로운 유형의 自動化 多段式 疲勞試驗機의 개략을 밝힌다.

2. 自動化 多段式 疲勞試驗機의 개발

本 自動化 多段式 疲勞試驗機의 상세한 내용에 관해서는 별도의 논문^(9,10)을 참조 바라며, 本報에서는 그 개략과 특징만을 나타낸다.

2.1 本 試驗機 개발의 필요성

통계적실험은 가능한 한 많은 데이터가 필요하며, 또한 誤差를 가능한 한 배제하여야 함은 주지의 사실이다.

순수한 피로실험과 달리 피로크랙진전 실험은 수시로 크랙길이를 측정해야 하기 때문에 사람이 없는 실험자체가 불가능하며, 또한, 개인적 오차를 배제하기 위해서는 동일인에 의한 데이터 측정이 바람직하다. 따라서, 다수의 실험데이터를 얻기 위해서는 실험장치의 자동화가 필요하며, 이 자동화로 인하여 측정시 일어날 수 있는 人間的 誤差를 가능한 한 적게할 수 있다.

2.2 試驗機의 개요

本 試驗機는 標準型 CT試驗片의 疲勞크랙進展에 관한 통계적 실험을 목적으로 한 것으로서, 한번의 실험으로 다섯개의 피로크랙진전 실험데이터를 얻을 수 있도록 시험편의 5連直列連結 방식으로 제작되었으며, 시험편의 교환외에는 크랙길이의 측정으로부터 실험진전상황의 모니터링, 실험데이터의 수록 까지 퍼스널 컴퓨터와 A/D, D/A變換器를 이용하여 전부 자동으로 가능하게 하였다. 본 시험기의 全體寫眞을 Fig. 1에 나타내었다.

본 시험기에서는 실험에 필요한 작업을 다음과

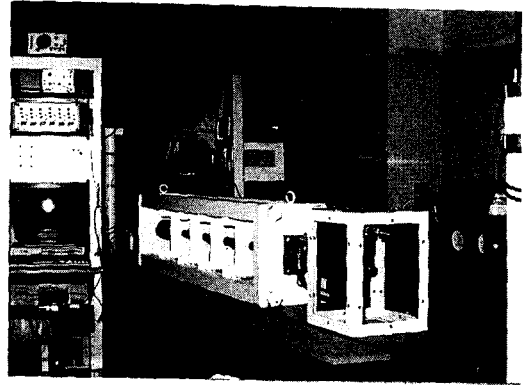


Fig. 1 Automated multi-stage fatigue testing machine

같이 다섯의 과정으로 나누었다.

(1) 시험기의 制御

本 試驗機는 直列로 5개의 실험이 가능하도록 했기 때문에 1개의 試驗片이 破斷했을때 계속해서 실험이 가능하도록 완전히 두조각으로 나누어지기 전에 破斷防止板으로 動力이 전달되어질 수 있도록 하지만 이때 試驗機의 動特性이 급격히 변화하기 때문에 수시로 應答報償을 해야 한다. 신호의 최대치와 최소치를 TTL 신호에 의해서 고속으로 Holding시키는 Peak Bottom Holder라고 하는 IC가 있는데 본 시험기에서는 이를 이용하여 로드셀로부터 검출된 하중의 최대치와 최소치를 판단해서 A/D변환기를 통해 PC에 入力하며, 다시 PC로부터 새롭게 조절된 하중의 平均值 및 振幅值를 D/A 出力시켜 函數發信器로부터의 波形과 乘算해서 서보 AMP를 통해 油壓系에 出力한다. 시험기제어의 기본적구성을 Fig. 2에 나타내었다.

(2) 크랙길이의 測定

크랙길이의 측정은 後述하는 바와 같이 背面스트레인게이지法⁽¹¹⁾을 이용하였다. 일정한 사이클수마다 출력되는 PC로부터의 신호에 의해 하중 및 시험편의 변위신호를 A/D변환기를 통해 PC에 입력한다.

(3) 크랙길이의 계산 및 기억장치에의 수록

PC에 입력된 하중 및 변위신호로부터 컴플라이언스를 계산하고 예비실험으로부터 구한 컴플라이언스와 실측한 크랙길이와의 관계로부터 크랙길이를 환산해 플로피 디스크에 출력한다.

(4) 시험의 綜合狀況 표시

각 시험편의 크랙길이 및 사이클수와 하중조건, 플

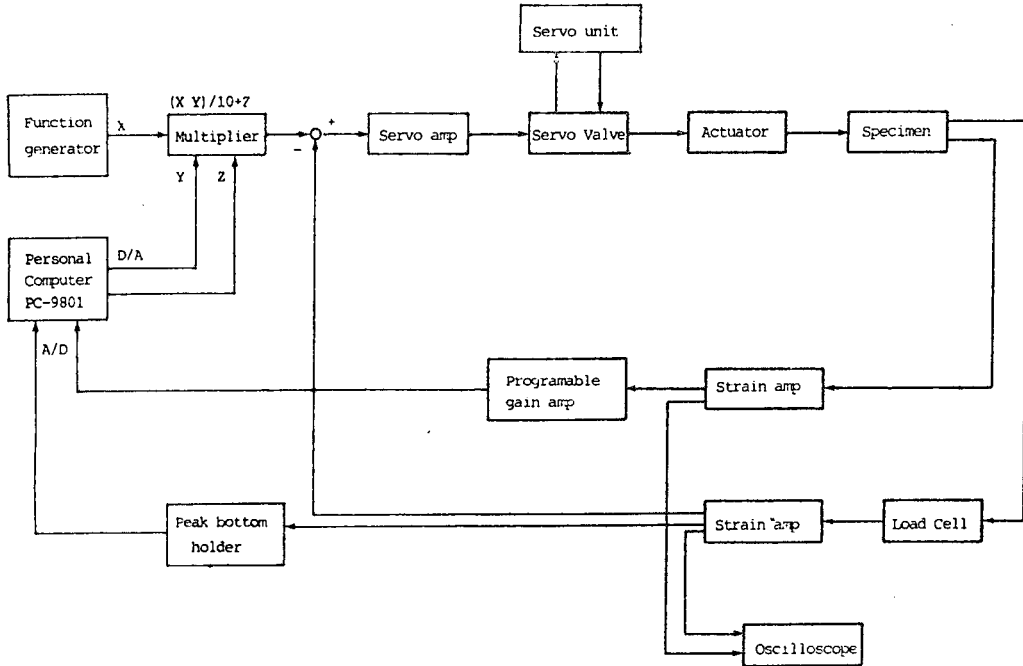


Fig. 2 Feedback diagram of testing machine

로피 디스크 殘量등을 모니터에 표시한다.

(5) 키입력상태의 감시

Function key입력에 의해, 하중과 변위신호의 그래프 표시, 전시험편의 사이클수-크랙길이 그래프 표시, 긴급사태의 발생에 따른 시험의 중지 등을 감시한다.

이들 작업들은 하나의 프로그램상에서 연속적으로 진행되는 것이 아니라 각각 별개의 프로그램으로 제작되어 별도로 起動되나 유기적인 관계를 맺으면서 우선순위에 의하여 서로 기동시키기도 중지시키기도 가능하도록 되어있다. 다시말해서 Multi-Task수법을 사용하였는데, 그 이유로서는, 예를 들어 측정된 크랙길이를 계산하여 플로피 디스크에 수록하고 있을때 여러 시험편중 하나가 파단되게 되면 다른 작업은 제쳐두고 應答報償을 먼저 처리

해야 하나 연속적 단일 프로그램의 경우는 하던 작업을 끝내야만 다른 작업으로의 이행이 가능하게 되는 문제점이 있기 때문이다. 프로그램들은 대부분 비교적 고속인 C언어를 사용하였으나 극히 고속을 요하는 A/D, D/A변환의 제어부분은 어셈블러언어를 사용하였다.

3. 實 驗

3.1 試驗片

실험에 사용한 재료는 알루미늄 合金 Al 2024-T3 材이며 그 化學的 成分 및 機械的 性質을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 試驗片의 형상은 標準型 CT試驗片이며, 壓延方向과 크랙의 進展方向이 직각이 되도록 가공하였다.

Table 1 Chemical compositions

Components Thickness	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr+Fi	Ti
5mm	0.12	0.21	4.59	0.59	1.50	0.03	0.02	0.03	0.02
12.5mm	0.13	0.23	4.60	0.56	1.43	0.02	0.07	0.04	0.02

Table 2 Mechanical properties

Thickness \ Properties	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
5mm	48.7	34.3	19.6
12.5mm	47.9	34.9	19.6

Table 3 Loading conditions

Thickness \ Conditions	Mean (kg)	Amplitude (kg)	Stress ratio
5mm	100	150	0.14
12.5mm	240	360	0.14

3.2 試驗條件

시험의 荷重條件을 Table 3에 나타 내었다. 前述한 바와 같이, 本 試驗機는 A/D, D/A變換器를 이용해서 PC에 의한 荷重의 設定 및 監視를 行하도록 되어있기 때문에 이 A/D, D/A變換器의 分解能에 의해서 荷重의 精度가 좌우된다. 本 實驗에 있어서는 A/D變換器를 통해서 샘플링한 荷重信號가 設定荷重보다 2bit이상 틀러지면 應答報償을 하도록 되어 있기 때문에 負荷精度는 2bit라고 말할 수 있으며, 1bit가 9.8N(1kgf)에 해당하도록 되어 있으므로 本 實驗의 負荷精度는 19.6N(2kgf) 程度이다.

3.3 實驗方法

실험은 室溫에서 했으며, 실험의 준비에서부터 데이터처리에 이르기까지 한사람의 실험자에 의해서 전부 이루어졌다. 크랙길이의 計測方法은 背面 스트레인지이지法을 이용했다. 本실험에서는 시험편 背面에 붙인 스트레인지이지로부터의 출력과 하중신호로부터 컴플라이언스를 구해 크랙길이를 환산하였다.

측정은 1000사이클마다 5개의 시험편을 동시에 行하여, 플로피 디스크에의 기록은 각 시험편마다 前회에 기록한 크랙길이와의 간격이 0.2mm이상 되었을 시점에 기록토록 하였다. 또한, precrack의 効果⁽¹³⁾를 고려해서 크랙길이가 0.1B(B; thickness)가 되었을때 부터 기록을 시작하였다.

3.4 實驗結果 및 考察

시험편의 두께 5mm, 12.5mm 각각 20개씩의 실험

으로부터 얻어진 크랙길이 a 와 사이클수 N 의 관계를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 또, 이들로부터 구한 크랙 진전속도 da/dN 과 응력확대계수 ΔK 의 관계를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타낸다. 여기서, da/dN 은 약 0.2mm간격인 측정점에 대한 1점2차 다항식 근사를 이용했으며, ΔK 는 다음식⁽¹¹⁾을 이용하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{(B\sqrt{W})} g(\xi) \tag{1}$$

$$g(\xi) = \frac{2+\xi}{(1-\xi)^{3/2}} \{0.886+4.64\xi-13.32\xi^2+14.72\xi^3-5.6\xi^4\} \tag{2}$$

여기서, $\xi = a/W$, a ; 크랙길이, W ; 시험편폭, ΔP ; 하중진폭, B ; 시험편두께를 나타낸다.

序論에서 밝혔듯이, 本 報의 주된 목적은 크랙 진전속도의 분포에 대한 시험편두께의 영향을 파악

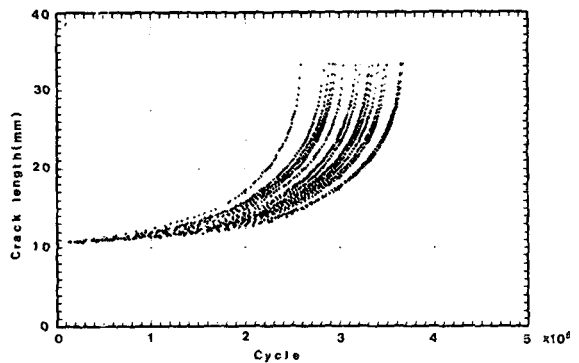


Fig. 3 Relations between crack length and cycle number(20 specimens of 5mm thickness)

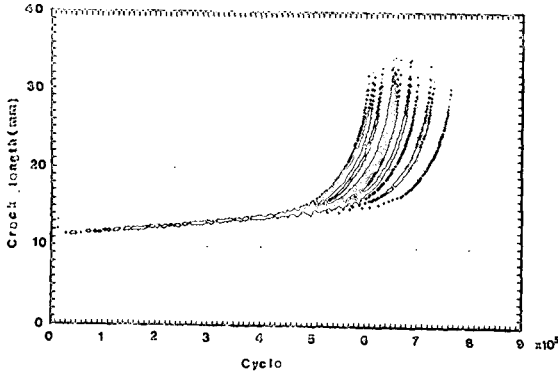


Fig. 4 Relations between crack length and cycle number (20 specimens of 12.5mm thickness)

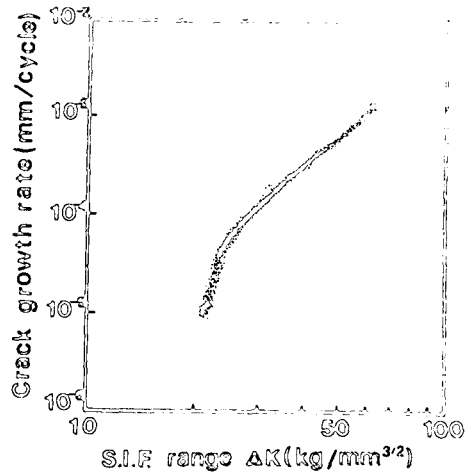


Fig. 6 Fatigue crack propagation rate (20 specimens of 12.5mm thickness)

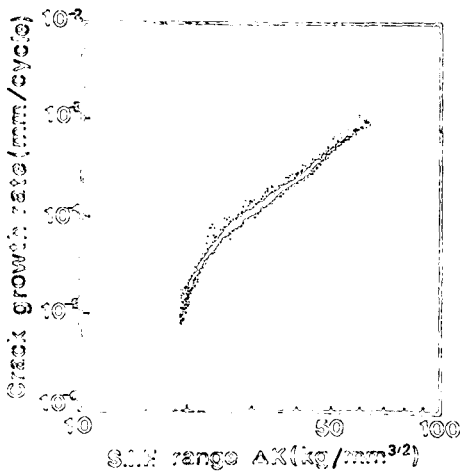


Fig. 5 Fatigue crack propagation rate (20 specimens of 5mm thickness)

하기 위한 것으로서 이를 위해서는 두께가 다른 여러 종류의 시험편에 대한 많은 실험데이터가 필요하다. 본 연구에서는 두께가 각각 5mm, 12.5mm인 두 종류의 시험편데이터만 제시했으나, 보다 얇은 시험편의 데이터도 필요하다. 그러나 얇은 시험편에 대한 피로시험은 시험편의 彎屈의 영향, 크랙길이 측정을 위한 스트레인 게이지 부착의 不容易性 등의 문제점이 남기 때문에 본 연구에서는 同一材料에 대한 他 研究者^(3,5)의 既 發表된 데이터를 이용하기로 한다. 市川⁽⁵⁾은 두께 1mm인 시험편 30개에 대한 실험결과를 발표했으며, Virkler⁽³⁾은 두께 0.1inch (2.54mm)인 시험편 68개에 대한

실험결과를 발표했다.

크랙 진전속도의 분포의 크기를 나타내는 척도로서는 材料係數 C , m 의 變動係數를 이용하기로 하며 Fig. 7, Fig. 8에 나타내었다. 단, Virkler들의 논문에는 C , m 에 대한 記述이 없고 이들의 데이터들로부터 C , m 의 變動을 해석한 Ortiz and Kiremidjian⁽¹²⁾의 논문을 인용했다. Fig. 7에서 橫軸은 시험편두께이며 縱軸은 $\log C$ 의 變動係數이다. 그림중 ○로 표시한 것은 본 실험에서 얻어진 것이며 △은 市川의 데이터이고 □로 표시한 것은 Virkler의 데이터이다. 그림으로부터 알 수 있는 것처럼 시험편의 두께가 두꺼울수록 變動이 작아진다. Fig. 8은 $\log C$ 대신에 m 의 變動係數를 나타낸 것인데 마찬가지로 두께가 두꺼울수록 變動이 작아짐을 알 수 있다.

시험편의 두께가 두꺼울수록 크랙진전속도의 변동이 작아짐, 다시말해서, 시험편의 두께에 따라 크랙 진전속도의 분포가 달라지는 원인에 관해서는 두가지 모델을 생각할 수 있다. 첫째, 巨視的인 金屬破斷面을 보게 되면 평탄한 부분과 shear lip 이라고 하는 경사진 부분으로 되어 있다. 이들 부분은 微視的으로 관찰하면 평탄한 부분에서는 스트라이에이션이라고 하는 규칙적인 파면을 볼 수 있으나, shear lip 부분에서는 스트라이에이션은 거의 볼 수가 없고 덩플등의 불규칙적인 파면을 볼 수가 있다. 금속 피로파단면에 있어서 shear lip이 차지하는 비율은 平面應力條件일수록 높다. 다시말해

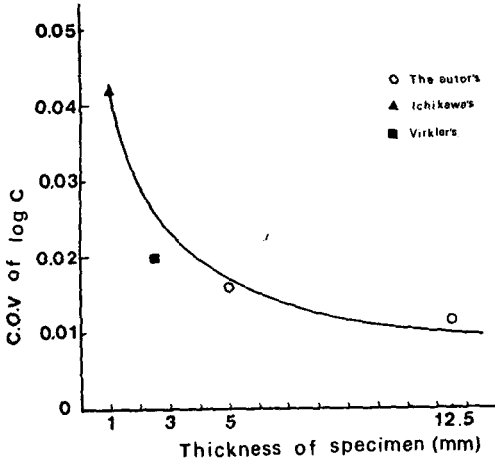


Fig. 7 Coefficient of variance of material factor C

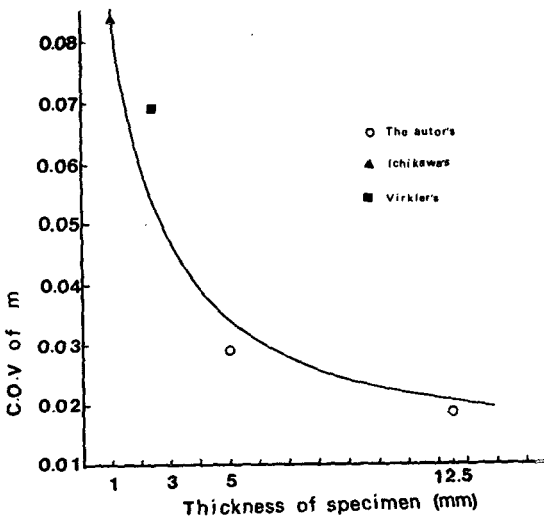


Fig. 8 Coefficient of variance of material factor m

서, 얇은 시험편일수록 불규칙한 破壞機構를 형성한다고 가정해 볼 수 있다. 둘째, 통계학적 모델로서, 샘플링한 데이터로부터 母數를 推定할 경우 샘플수가 많을수록 推定誤差가 줄어드는 것은 이미 알고 있는 사실이며 이를 시험편의 두께가 두꺼울수록 샘플데이터가 많아지는 것으로 가정하면 두께가 얇을수록 오차가 커진다고 볼 수 있다. 그러나, 이 모델의 문제점은 하나의 샘플이라고 하는 단위를 크랙의 진전에 있어서 통계적변동의 크기를 일

마로 잡느냐에 따라서 달라진다. 다시말해서, 통계적변동의 크기의 단위를 스트라이에이션의 방향과 크기가 달라지는 patch의 크기정도로 한다면 대략 patch의 크기는 μm 에서 몇십 μm 이므로 시험두께가 1mm라 하더라도 충분한 샘플수가 될 수 있기 때문이다.

물론, 이들 모델이 맞는지 틀리는지는 아직 모르며 더욱 정확한 다른 모델이 존재할 수도 있다. 이에 관한 연구는 앞으로의 연구과제로 남겨두고 싶다.

Fig. 7 및 Fig. 8중의 實線은 시험편두께 1mm의 變動係數에 대해 시험편두께의 平方根으로 나눈 값을 표시한 것으로 이 曲線을 이용함으로써 크랙 진전속도의 분포에 대한 시험편두께의 영향을 파악할 수 있으며 하나의 특정한 두께의 통계적성질로부터 다른 두께의 통계적성질을 實用的으로 推定할 수 있음을 알 수 있다.

4. 結 論

결함을 가진 部材의 疲勞壽命의 분포에 대한 재료내부의 불균일성으로부터 기인된 材料側의 영향은 피로크랙 진전속도의 변동을 가미함으로써 평가할 수 있다. 동일시험편두께, 동일조건하의 피로크랙 진전속도의 변동에 대해서는 몇몇 학자에 의하여 연구되었으나, 그 결과를 그대로 재료의 두께가 다른 경우에도 적용할 수 있는지 없는지에 관해서는 아직 밝혀지지 않고 있다. 本報에서는 시험편의 두께에 따라서 크랙 진전속도의 변동에 차이가 있는지 없는지를 밝히기 위하여 실험적인 연구를 하였다.

한번의 실험으로 다섯개의 피로크랙 진전속도 데이터를 얻을 수 있으며 시험편의 교환의에는 전부를 자동화하는 등 통계적 피로시험을 목적으로 개발된 새로운 類型의 自動化 多段式 疲勞試驗機를 이용하여 多數의 피로크랙 진전속도 데이터를 얻었으며, 이로부터 시험편 두께에 따라 피로크랙 진전속도의 변동에 차이가 있음을 밝혔다. 즉, 시험편 두께가 두꺼울수록 크랙 진전속도의 變動이 작아지는 것으로 나타났으며, 또한, 시험편두께 1mm의 변동을 기준으로 하여 變動의 크기를 시험편두께의 平方根으로 나누어줌으로써 해서 다른 시험편두께의 크랙 진전속도의 變動을 대략적으로 예측할 수 있음을 나타냈다.

참 고 문 헌

- (1) 윤한용, 1990, “疲労크랙 進展壽命의 確率特性에 관한 研究(Ⅰ)－初期크랙길이 分布의 影響－”, 대한기계학회논문집, 第14卷, 第1號, pp. 138~144.
- (2) 田中 榮, 秋田 敏, 小林信之, 1973, “軟鋼切缺き材の疲れき裂傳播に関する統計的考察”, 日本材料強度學會誌, 第8卷, 第2號, pp. 56~63.
- (3) Virkler, D. A., Hillberry, B. M., Goel, P.K., 1979, “The Statistical Nature of Fatigue Crack Propagation”, Tran. ASME, Vol. 101, pp. 148~152.
- (4) 酒井達雄, 田中道七, 1979, “金屬材料の疲労き裂進展壽命の分布特性に関する統計的研究”, 材料, 第28卷, 第312號, pp. 880~886.
- (5) 市川昌弘, 濱口光夫, 中村武夫, 1984, “疲労き裂傳播法則 $da/dN=C(\Delta K)^m$ における確率特性”, 材料, 第33卷, 第364號, pp. 8~13.
- (6) 島田住弘, 中川隆夫, 徳納久陸, 1984, “マルコフ連鎖を用いた疲労き裂進展壽命の信頼性解析”, 材料, 第33卷, 第367號, pp. 475~481.
- (7) 北川英夫, 權在度, 中曾根祐司, 島崎剛, 1986, “長期使用クロム・モリブデン鋼劣化材疲労き裂進展壽命豫測”, 日本機械學會論文集, 第52卷, 第480號, pp. 1749~1756.
- (8) 橋内良雄, 田中正清, 秋山英司, 近藤太二, 1976, “アルミ合金および軟鋼のストライエーション間隔の統計的検討”, 日本機械學會論文集, 第42卷, 第364號, pp. 3689~3678.
- (9) 윤한용, 박창언, 1989, “통계적시험을 목적으로한 자동화 다단식피로시험기의 개발”, 대한기계학회 호남지부 학술강연회 초록집, pp. 15~20.
- (10) 윤한용, 1989, “통계적 시험을 위한 자동화 다단식 피로시험기의 개발”, 아세아자동차기보, 제4호, pp.47~55.
- (11) 國尾武, 中澤一, 林郁彦, 岡村弘之, 1984, “破壊力學實驗法”, 朝倉書店, p. 142.
- (12) Keith Ortiz, Anne S.Kiremidjian, 1988, Stochastic Modeling of Fatigue Crack Growth, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 29, No. 3, pp. 317~334
- (13) 國尾武, 中澤一, 林郁彦, 岡村弘之, 1984, “破壊力學實驗法”, 朝倉書店, p. 162.