

ΔK_{eff} 제어 피로 균열 진전 시험 자동화 시스템에 관한 연구

신성철* · 송지호**

An Automated System for Constant ΔK_{eff} Fatigue Crack Growth Testing through Real-time Measurement of Crack Opening Load

Sung-Chul Shin and Ji-Ho Song

Key Words : fatigue crack growth (피로균열진전), constant ΔK_{eff} (일정 유효응력강도계수폭), unloading elastic compliance method (재하 탄성 컴플라이언스법), real-time measurement (실시간 측정), crack opening load (균열 열림점)

Abstract

An automated system is developed to perform fatigue crack growth tests under constant effective stress intensity factor range ΔK_{eff} . In the system, crack length and crack opening load are measured in real-time by using the unloading elastic compliance method. The system consists of two personal computers, an analogue electrical subtraction circuit, a stepping motor, a stepping motor driver, a PIO board, and the application software used to integrate the whole system. The performance of the developed system was tested and discussed performing constant ΔK_{eff} crack growth tests on a CT specimen of 7075-T6 aluminum alloy. The performance of the system is found to be strongly dependent on the accuracy of measurements of crack opening load. Besides constant ΔK_{eff} testing, the system is expected to be successfully applied for automation of various fatigue tests.

기호설명

- ΔP : 하중 폭($P_{max} - P_{min}$)
 P_{op} : 균열 열림점
 ΔK : 응력강도계수 폭($K_{max} - K_{min}$)
 ΔK_{eff} : 유효응력강도계수 폭($K_{max} - K_{op}$)
 U : 균열 열림비($\Delta K_{eff}/\Delta K$)
 da/dN : 균열진전속도

1. 서 론

피로 균열 진전에 관한 연구는 Paris 가 균열 진전 속도를 $da/dN=C(\Delta K)^n$ 과 같이 재료 상수 C 와 n, 그리고 응력강도계수폭(stress intensity factor range) ΔK 에 의해 나타낼 수 있음⁽¹⁾을 밝힌 이래

체계적으로 이루어져 왔다. 또한 Elber 에 의해 균열 선단 뒷부분에 생성되는 균열면에 잔류 소성 인장 변형(residual plastic tensile strain)이 남아 하중이 영(zero)이 아닌 인장 상태에서 균열이 닫히는 균열 닫힘 현상(crack closure phenomenon)^(2,3)이

밝혀진 이후 균열 닫힘 현상은 피로 균열의 진전 거동을 지배하는 주요 인자로 알려져 왔으며, 피로 균열 진전 시험을 통해 얻은 데이터를 ΔK_{eff} 를 이용하여 정리하면 균열 진전 속도를 잘 설명할 수 있었다. 이러한 균열 진전 거동을 밝히기 위하여 수행하는 피로 균열 진전 시험에서는 균열 길이와 균열 열림점 결정이 필수적이며, 이에 대해서 컴플라이언스법(compliance method)⁽⁴⁻⁶⁾, 전압 강하법(potential drop method)⁽⁷⁾, 레이저 간섭법(laser interferometry method)⁽⁸⁾, 초음파법(ultrasonic method)⁽⁹⁾ 등 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 단일 과대 하중과 같은 경우에는 ΔK_{eff} 로는 진전 거동을 잘 설명할 수 없다는 결과도 있다.

* LG 전선㈜ 기계연구소

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

따라서 ΔK_{eff} 를 제어할 경우에는 ΔK_{eff} 로 균열 진전 속도를 잘 설명할 수 있는지의 문제 제기가 가능하다. 이는 시험의 어려움으로 인해 아직까지 실험적으로 검증된 바가 없다.

이러한 피로 균열 진전에 관한 연구를 진행하기 위해서는 각 시험마다 많은 양의 데이터를 얻을 필요가 있으며 많은 시험을 정밀하게 수행해야 하나, 피로 균열 진전 시험의 특성상 타 시험에 비해 장시간 지속되는 경우가 대부분이다. 이때 시험자가 시험 종료 시까지 지켜보며 일일이 데이터를 획득해야 한다는 것은 많은 인적, 경제적 손실을 초래하게 되어 합리적이지 못할 뿐 아니라 사람에 의해서 측정되는 경우 데이터 측정 간격도 일정치 않다. 이러한 이유로 일정 하중하의 균열 열림점 실시간 측정을 통한 피로 균열 진전 시험의 자동화에 관한 연구가 이미 이루어진 바 있으며, 자동화 시스템을 이용한 시험은 좋은 결과를 보여주었다.⁽¹⁰⁾ 그러나 앞의 시험 자동화는 아직 초보적인 단계로서 일정 진폭 하중하의 시험에만 적용 가능하다.

본 연구에서는 균열 길이 및 균열 열림점의 실시간 측정을 통해 ΔK_{eff} 제어의 기초로서, 일정 ΔK_{eff} 균열 진전 시험 자동화 시스템을 개발하였다. 또한 이를 이용하여 A17075-T6 CT 시험편에 대해 일정 ΔK_{eff} 균열 진전 시험을 수행하여 개발된 시스템의 성능을 검토하고, 그 결과를 이용하여 ΔK_{eff} 를 제어할 경우에도 균열 진전 속도를 ΔK_{eff} 로 잘 설명할 수 있는지를 검토하였다.

2. 자동화 시스템

2.1 자동화 시스템의 구성

본 연구에서 개발한 균열 길이, 균열 열림점 실시간 측정을 통한 ΔK_{eff} 일정 피로 균열 진전 시험 자동화 시스템은 정밀성과 효율성을 높이기 위하여 퍼스널 컴퓨터(PC) 2대를 이용한 피로 계측 시스템⁽¹¹⁾으로 구성하였다. 시스템은 Fig.1과 같이 25톤 용량의 MTS 시험기와 컨트롤러의 시험기부, 제어된 하중 파형을 만들어주는 PC1과 D/A 컨버터로 구성된 하중 제어부, 그리고 하중, 변위, 감산 변위의 데이터를 획득하는 PC2와 A/D 컨버터로 구성된 데이터 저장부, 스텝 모터와 스텝 모터 컨트롤러, 전기 아날로그 감산 회로(subtraction circuit)로 구성된 균열 길이 및 균열 열림점 검출부로 구성되었다.

하중 신호, 변위 신호 및 감산 신호는 선행 연구자에 의해 제작된 5톤 용량의 로드셀(loadcell), 클립온 게이지(clip-on gage)와 아날로그 감산 회로(Fig.2)를 이용하여 정밀하게 측정되었다.

2.2 자동화 시스템의 작동 알고리즘

자동화 시스템의 작동 알고리즘(Fig.3)은 다음과 같다. 먼저 제어된 하중 데이터를 보내는 역할을 하는 PC1의 프로그램을 이용하여 D/A 컨버터를 통해서 일정 주파수 및 진폭(amplitude)을 갖는 정현파(sinusoidal wave)를 시험기 컨트롤러로 보내준다. MTS 시험기 컨트롤러는 이 파형의 진폭과 평균값, 즉 응력비 R 값을 정해서 시험기를 작동하게 된다.

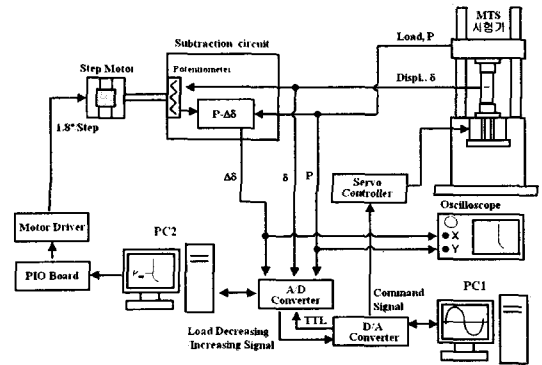


Fig. 1 Schematic diagram of the automated system

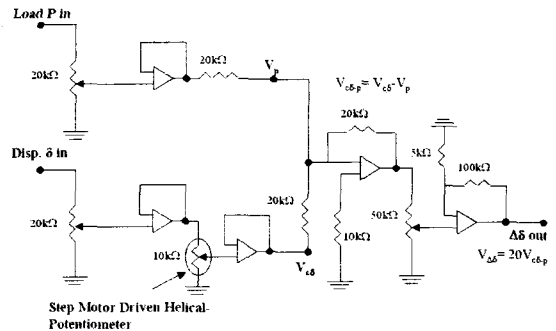


Fig. 2 Subtraction Circuit

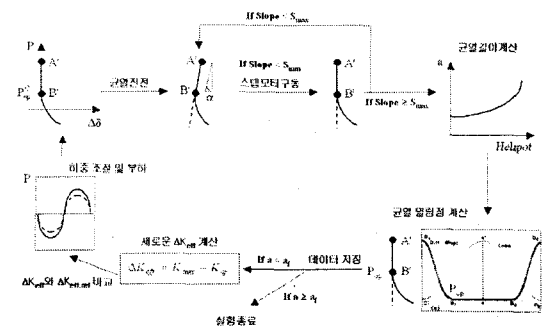


Fig. 3 Algorithm of the operation

시험기와 시험편에 장착된 로드셀과 클립은 게이지를 통해서 측정된 하중 신호와 변위 신호는 스텝 모터가 장착된 감산기로 보내진다. 하중, 변위 및 감산기를 거쳐 나온 감산 신호를 PC2에서 획득하여 하중 - 감산 신호의 기울기, 균열 열림점 및 유효 응력 강도 계수 폭 등을 계산한다. 이때 하중 - 감산 신호의 기울기가 일정 이상 기울어 있다면(Slope <math>< S_{min}</math>) 스텝 모터(1.8°/step)를 작동하여 감산 신호를 반복해서 세우고, 기울기의 총합이 일정 이상 크다면(Slope $\geq S_{max}$) 감산 신호가 섰다고 판단하며, 이 때의 감산 신호 및 하중, 변위 신호를 이용하여 균열 열림점 및 균열 길이를 찾은 뒤 유효 응력 강도 계수 폭 ΔK_{eff} 를 계산한다. 이 때 계산된 현재의 ΔK_{eff} 와 기준으로 잡아놓은 $\Delta K_{eff,ref}$ 를 비교해서 그 대소의 양에 비례하도록 PC1에서 MTS 컨트롤러로 보내는 정현파 하중의 폭을 제어해 주면서 ΔK_{eff} 일정 시험을 진행한다. 시험 중 균열 길이가 시험 시작 시에 정해 놓은 최종 균열 길이보다 크다면($a \geq a_f$) 시험을 종료한다.

3. 시험 방법

3.1 시험 재료 및 시험편 형상

피로 균열 진전 시험을 위한 시험편의 재질은 Al 7075-T6 이고, 형상은 CT(Compact Tension)형이며, 길이 60mm, 폭 62.5mm, 두께 24mm, 그리고 초기 노치(initial notch)는 24mm이다. 또한 클립은 게이지를 장착할 수 있도록 시험편의 바깥에 나이프 에지를 고정했다. 시험편의 방향은 L-T이다.

3.2 일정 ΔK_{eff} 하의 피로균열진전 시험 방법

먼저 제어부의 PC1에서 시작 하중 폭과 하중비를 정해 주고 프로그램을 수행하면, 하중 파형을 D/A 컨버터를 통해 시험기의 컨트롤러로 보내 시험기를 제어하게 된다. 또한 이와 동시에 데이터 저장부의 PC2로 동기신호를 보내 데이터를 한 파형씩 저장한다.

이 때 PC2에서는 로드셀로부터의 하중, 시험편에 부착된 클립은 게이지로부터의 변위, 감산회로로부터의 감산 변위 데이터를 여러 사이클을 받아 평균하여 잡음을 줄인 후, Kim & Song의 방법⁽¹¹⁾을 이용하여 실 시간으로 균열 열림점을 결정하고, 유효응력강도계수폭 ΔK_{eff} 를 계산한다. 이 때 계산된 ΔK_{eff} 가 실험 중 정해 놓은 $\Delta K_{eff,ref}$ 와 비교하여 더 크면 하중을 줄이는 신호를, 작으면 하중을 키우는 신호를 PC1으로 보내고 PC1은 이 신호의 양, 음 및 크기에 따라서 ΔK_{eff} 가 항상

$\Delta K_{eff,ref}$ 를 유지할 수 있도록 하중 폭을 조절하여 MTS 컨트롤러로 제어된 하중 신호를 보낸다. 이때 이상 잡음이나, 시험편 그림핑(gripping) 문제로 인해 신호가 좋지 않을 경우, 균열 열림점의 흠어짐이 커질 수 있다. 이런 경우에도 ΔK_{eff} 를 일정하게 원하는 값($\Delta K_{eff,ref}$)으로 제어하기 위하여 하중을 줄인다면 단일 과대 하중으로 작용할 수도 있고, 잡음 문제에 따라 변동 하중 시험과 같이 될 수도 있으므로 데이터를 받아서 ΔK_{eff} 를 비교한 후, 한번에 변동시킬 수 있는 하중의 크기를 $\pm 2\%$ 로 제한하였다.

본 연구에서는 일정 ΔK_{eff} 하의 피로 균열 진전 시험 자동화 시스템의 성능을 검증하기 위하여 시작 하중폭이 3.8kN 이고 시험 주파수 7Hz, 하중비 0.1 인 시험을 수행하였다. 일정 진폭 하중 하에서 시험을 시작하여 균열이 진전함에 따라 균열 길이가 26.1mm~28.3mm, 29.2mm~30.7mm, 33.4mm~37.0mm 인 세 구간에서 ΔK_{eff} 일정 시험을 수행하였다. 위의 세 구간에서 시험을 진행하면, 균열이 진전하면서 균열 진전면이 안정되고, 따라서 잡음이 줄어들어 좋아지는 신호 대 잡음비, 즉 S/N 비가 자동화 시스템에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 또한 Kim & Song의 방법으로 균열 열림점을 찾는 알고리즘 상에서, 시험 초기에는 균열 닫힘 현상이 크게 나타나지 않기 때문에 최대 빈도 기울기를 정하는데 잡음의 영향이 상대적으로 크나 균열이 증가함에 따라 점차적으로 잡음의 영향이 작아지는데, 이에 따른 균열 열림점의 흠어짐이 자동화 시스템의 성능에 미치는 영향을 확인할 수가 있다.

3.3 자동화 시스템의 사용자 인터페이스

Fig.4와 Fig.5는 각각 본 연구에서 개발된 일정 ΔK_{eff} 균열 진전 시험 자동화 시스템 프로그램의 하중 제어부 PC1과 데이터 획득부 PC2의 사용자 인터페이스 화면이다. 먼저 PC1에서는 Fig.4와 같이 시험 주파수와 응력비 R 및 시험 시작 하중 폭을 정하여 하중 신호를 MTS 컨트롤러로 보내 준다.

PC2에서는 Fig.5와 같이 하중, 변위, 감산 변위 신호를 실 시간으로 보여준다. 우측의 데이터 화면에서는 시험 시작 하중폭, 전 스텝의 하중폭, 현재 하중폭을 각각 보여준다. 또한 가변저항 눈금 값을 이용하여 균열 길이 보정 곡선으로부터 얻어진 균열 길이와 Kim & Song의 방법으로부터 얻어진 균열 열림 하중을 각 스텝마다 실 시간으로 보여준다.

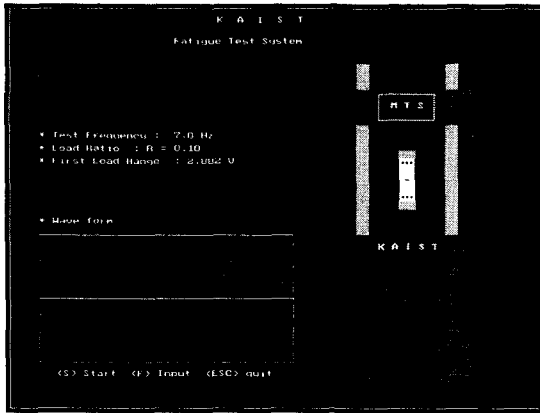


Fig. 4 User Interface I (PC1)

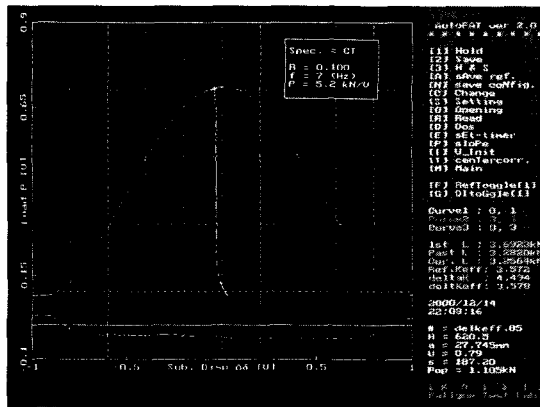


Fig. 5 User Interface II (PC2)

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 하중 되풀이 수 Vs. 균열 길이, ΔP , ΔP_{op}

Fig.6은 개발된 자동화 시스템을 이용하여 CT 시험편에 대해 시작 하중폭, 하중비를 각각 3.8kN, 0.1의 조건에서 시작해서 그림에 표시된 세 구간에서 ΔK_{eff} 일정 시험을 한 결과이다. 하중 되풀이 수에 대해서 각각 균열 길이, 하중폭, 균열 열림 하중의 관계를 나타내었다. 먼저 하중 되풀이 수와 균열 길이의 관계를 살펴보면, 일반적으로 피로 시험에서는 하중 되풀이 수가 증가함에 따라 균열 길이 증가 속도는 점차 빨라지지만, 그림의 결과에서 보면 ΔK_{eff} 가 일정하게 유지되는 세 구간에서는 사이클 당 균열 진전량, 즉 균열 진전 속도가 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다. 이론적으로 ΔK_{eff} 가 일정하게 유지되면 균열 진전 속도는 N-a 그래프에서 ΔK_{eff} 가 일정하게 유지되는 순간의 기울기에 접하도록 나타날 것인데, 시험결

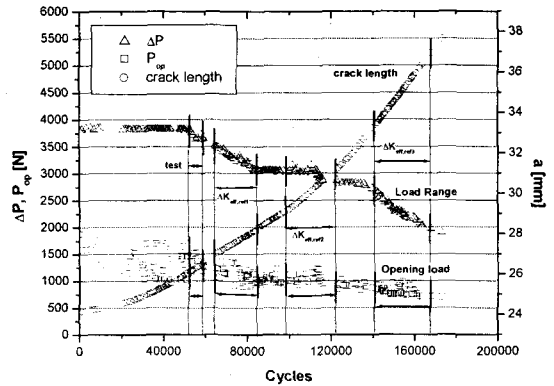


Fig. 6 Cycles Vs. crack length, ΔP , ΔP_{op}

과는 이를 만족한다. 따라서 하중이 제어된 세 구간에서 균열 진전 속도가 일정하게 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

다음으로 하중 되풀이 수에 대한 하중폭의 변화에 대해서 살펴보자. 전반적으로 하중폭은 시험 시작 하중폭에 대해 시험이 진행됨에 따라 50%정도까지 줄었다. 이는 균열이 증가함에 따라 잔존면적이 줄어 ΔK_{eff} 가 커지는데, 일정 ΔK_{eff} 제어 구간에서 ΔK_{eff} 를 일정하게 유지하기 위해 하중이 떨어지고 있음을 보여준다.

마지막으로 균열 열림 하중은 시험이 진행됨에 따라 점차적으로 떨어지다가 세 번째 제어구간에서는 거의 일정하게 유지되는데, 이는 하중폭이 떨어지는 비율이 첫 번째 제어 구간에서보다 세 번째 제어 구간에서 더 크게 나타나는 이유를 잘 설명해 준다. 또한 균열 열림 하중은 시험이 진행됨에 따라 그 흠어짐 양이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이는 균열이 진전함에 따라 신호가 안정되고 있음을 나타낸다.

4.2 균열 길이 Vs. U, ΔK , ΔK_{eff}

Fig.7은 각각 균열 길이에 대한 균열 열림비(U), 응력강도계수폭(ΔK), 유효응력강도계수폭(ΔK_{eff})의 변화를 보여준다.

먼저 균열 길이가 증가함에 따라 균열 열림비는 점차적으로 그 흠어짐 양이 작아지면서 증가하다가 세 번째 제어 구간에서는 흠어짐도 적고, 거의 일정하게 유지되는 경향을 볼 수가 있다. 이는 Fig.6에서 살펴 본 균열 열림 하중의 변화에 따른 결과라 할 수 있다.

다음으로 균열 길이에 대한 ΔK 의 변화를 살펴보자. 시험이 시작되면서 ΔK 는 점차 증가하다가 첫 번째 제어 구간에서는 점차적으로 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 균열 진전에 따른 잔존면적 감소로 ΔK 가 커지는 효과보다 균열 열림비가

증가하면서 ΔK_{eff} 가 급격하게 커지므로 이를 일정하게 제어하기 위해 하중을 줄이는 효과가 더 크기 때문이다. 두 번째 제어 구간, 세 번째 제어 구간에서는 거의 일정한 경향을 보이는데, 이것은 앞서 언급한 두 효과의 크기가 거의 비슷하기 때문이라고 생각할 수 있다. 또한 첫 번째, 두 번째 제어 구간에서의 ΔK 의 흠어짐 보다 세 번째 제어 구간에서의 흠어짐이 더 작은 데, 이는 균열 열림비의 흠어짐의 크기와 같은 경향을 보이는 것이다.

마지막으로 균열 길이에 대한 유효응력강도계수 ΔK_{eff} 의 변화를 살펴보자. 전반적으로 ΔK_{eff} 는 균열 길이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 그러나 세 번의 제어 구간에서는 약간의 흠어짐을 갖지만, 일정하게 유지되는 경향을 보이고 있다. 좀 더 자세히 Fig.8에서 살펴보자. 첫 번째 제어 구간에서는 앞서 살펴보았듯이 균열 열림 하중의 흠어짐이 크기 때문에 ΔK_{eff} 의 흠어짐도 크게 나타났지만, 목표 값과 실제 제어 값의 평균 오차는 1.38%로 상당히 작게 나타났다. 두 번째 제어 구간에서는 흠어짐이 줄어들었지만 평균 오차는 6.97%로 크게 나타났다. 세 번째 제어 구간에서는 흠어짐이 가장 적었고, 제어 ΔK_{eff} 와 실제 ΔK_{eff} 의 평균 오차도 3.96%로 비교적 작게 나타났다. 두 번째, 세 번째 제어 구간에서 오차가 크게 나타난 것은 자동화 시험 과정에서 균열 길이를 측정하기 위한 스텝 모터 컨트롤 상의 문제로 균열 진전 속도를 스텝 모터가 감산 신호를 세우는 속도가 따라 가지 못했기 때문이다. 그러나 앞선 결과는 구축된 일정 ΔK_{eff} 시험 자동화 시스템이 충분히 ΔK_{eff} 제어를 하고 있음을 보여준다.

4.3 5.3 ΔK_{eff} Vs. da/dN

Fig.9는 각각 제어된 구간에서의 ΔK_{eff} Vs. da/dN의 결과를 보여준다. 균열 진전 속도 da/dN은 Seven Point Incremental Polynomial Technique⁽¹²⁾을 이용하여 계산하였다. 그래프 상에서 세로로 된 직선은 각각 제어하고자 하는 $\Delta K_{eff,ref}$ 의 값을 나타낸다. ΔK_{eff} 가 제어된 각 구간에서 균열 진전 속도는 약간의 흠어짐을 갖지만, 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 각 구간에서의 균열 진전 속도의 평균값에 대한 오차는 각각 4.28%, 12.80%, 4.44%로 앞선 ΔK_{eff} 의 제어 오차량과 같은 경향을 보인다. 이로써 일정하게 제어된 ΔK_{eff} 가 균열 진전 속도를 일정하게 유지시킴을 확인할 수 있다.

4.4 5.4 시험 결과 고찰

Table 1은 앞서 살펴 본 시험 결과를 유효응력강도계수 ΔK_{eff} 와 균열 진전 속도 da/dN에 대해서 정리한 것이다. 각각 제어되는 값으로부터 ΔK_{eff} 일정 시험 자동화 시스템이 ΔK_{eff} 를 충분히

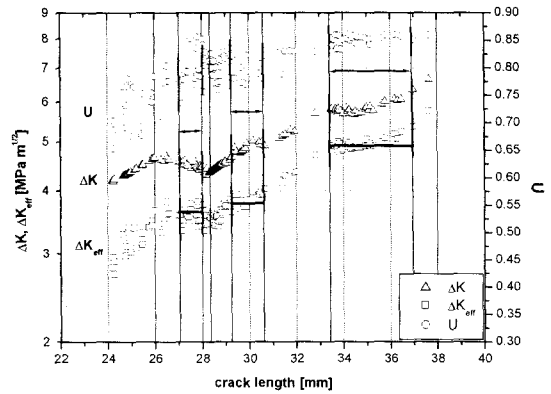


Fig. 7 crack length Vs. U, ΔK , ΔK_{eff}

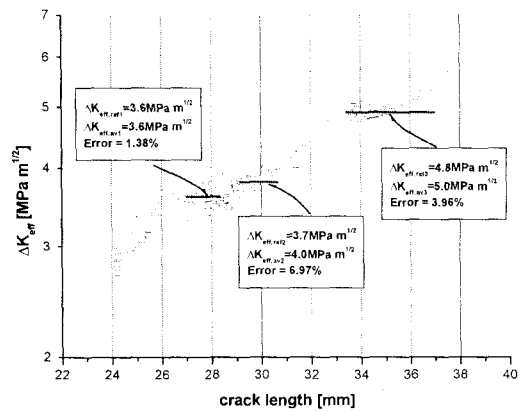


Fig. 8 crack length Vs. ΔK_{eff}

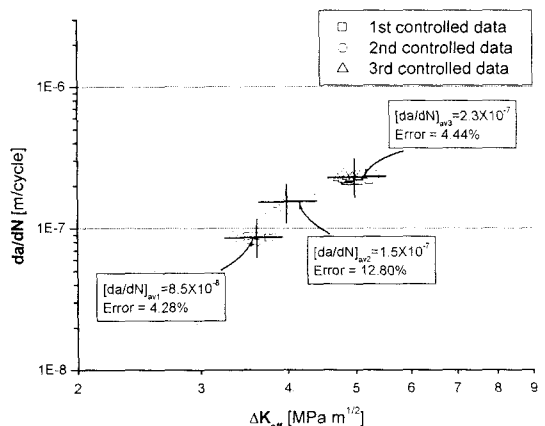


Fig. 9 ΔK_{eff} VS. da/dN

제어하고 있음을 확인할 수 있다. 비록 제어된 시험 결과에서 흠어짐이 크고, 약간의 오차가 있지만, 이는 본 연구의 시험에 쓰인 CT 시험편에 부

하되는 하중의 크기가 작아 S/N 비가 크지 않고, 이로 인해 하중 제어를 위해서 필수적인 균열 열림점 결정 방법에 있어 사용된 Kim & Song의 방법에서 최대 빈도 기술품을 찾는 데 문제가 있었기 때문이다. 따라서 균열 열림점 결정 방법이 조금 더 보완되고, S/N 비가 큰 시험이 이루어진다면 구축된 자동화 시스템이 더 좋은 결과를 보여줄 수 있을 것이다.

	First controlled area	2nd controlled area	3rd controlled area
$\Delta K_{eff.ref}$ (kN)	3.6	3.7	4.8
$\Delta K_{eff.mean}$ (kN)	3.6	4.0	5.0
Error (%)	1.38	6.97	3.96
$(da/dN)_{mean}$	8.50×10^{-8}	1.50×10^{-7}	2.25×10^{-7}
Error (%)	4.28	12.80	4.44

Table 1 Experimental result

5. 결론

균열 열림점 실험 시간 측정을 통한 일정 ΔK_{eff} 피로 균열 진전 시험의 자동화 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 균열 열림점 실험 시간 측정을 통한 일정 ΔK_{eff} 하에서의 피로 균열 진전 시험 자동화 시스템을 개발하였다.
- 2) ΔK_{eff} 일정 피로 균열 진전 시험을 수행하여 자동화 시스템의 성능을 검증하였다.
- 3) 위의 시험을 통하여 ΔK_{eff} 제어의 경우에도 ΔK_{eff} 를 이용하여 균열 진전 속도를 설명할 수 있다는 가능성을 확인하였다.
- 4) 본 연구에서 개발된 ΔK_{eff} 일정 피로 시험 자동화 시스템은 비교적 구성하기가 쉽고 간편하므로 폭 넓은 연구에 적용 가능하다.
- 5) 피로 시험 전과정이 자동화 됨으로써 경제적이며 재현성 및 효율이 높은 피로 시험이 가능해졌다.
- 6) 균열 열림점 결정 방법이 보완된다면, 보다 정밀한 ΔK_{eff} 제어 시험도 가능할 것이다.

참고문헌

- (1) Paris and Erdogan, 1963, "A critical analysis of crack propagation laws", Trans. ASME, J. Basic Engng, Vol.85, pp.528-534
- (2) W.Elber, 1971, "Fatigue crack closure under cyclic tension", Engng Fract. Mech., Vol.2, 1970, pp.37-45
- (3) W.Elber, "The significance of fatigue crack closure", ASTM STP 486, pp.230-242

- (4) C.S. Oh, Y.Y. Earmme and J.H. Song, 1997, "Automated real-time measurements of fatigue crack length and crack opening load using unloading elastic compliance method", Int. J. Fatigue, Vol.19, No.2, pp169-176
- (5) K.R. Abbott and P. Doig, 1986, "Microcomputer control system for the measurement of fatigue crack growth data", Engng. Fract. Mech. 23, pp.965-967
- (6) Y. Kondo and T. Endo, 1985, "An automatic fatigue crack monitoring system and its application to corrosion fatigue", Automated Test Methods for Fracture and Fatigue Crack Growth, ASTM STP 877, ASTM, PA
- (7) R.H. Vanstone and T.L. Richardson, 1985, "Potential-drop monitoring of cracks in surface-flawed specimens", Automated Test Methods for Fracture and Fatigue Crack Growth, ASTM STP 877, ASTM, PA, pp.148-166
- (8) J.M. Larsen and J.R. Jira, 1991, "Small-crack closure measurements in titanium alloys", Exp. Mech. Vol.31, pp.82-87
- (9) K. Hirano, H. Kobayashi, H. Nagazawa and A. Hayashi, 1987, "Monitoring of surface fatigue crack growth and crack tip closure behavior by the ultrasonic isoscanning technique", JSME Int. J., Vol.30, No.269, pp1707-1713
- (10) 박준협, 송지호, 엄윤용, 김정엽, 강기주, 1988, "퍼스널 컴퓨터에 의한 피로 시험 자동화 및 피로거동 측정의 정밀화", 대한기계학회논문집, 제 12 권, 제 1 호, pp.123-130
- (11) C.Y. Kim and J.H. Song, 1993, "An automated procedure for determining crack opening level from differential displacement signal data", Int. J. Fatigue, Vol.15, pp.301-309
- (12) Annual Book of ASTM Standard(1996), ASTM E647-96