

영상처리기술을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 피로균열 성장거동 관찰

Observation of Fatigue Crack Growth Behavior in 1Cr-1Mo-0.25V Steel Using Image Processing Technology

남승훈*[†], 김용일**[†], 류대현***

Seung Hoon Nahm*[†], Yong-Il Kim**[†] and Dae Hyun Ryu***

초 록 피로균열 성장거동 관찰을 위한 새로운 실험 방법의 개발이 필요하다. 이러한 요구를 만족시키기 위해서 본 연구에서는 영상처리기술을 피로시험에 도입하였으며, 영상처리시스템을 이용하여 표면피로균열길이를 측정하였다. 먼저 주기적으로 시험하중을 멈추는 동안 균열영상 데이터를 컴퓨터에 저장시켰다. 시험이 끝난 후에는 본 연구진에서 개발한 영상처리 소프트웨어를 사용하여 균열길이를 측정하였으며, 이를 위하여 블록매칭방법을 포함한 다양한 영상처리 기술을 적용하였다. 영상처리시스템으로 측정한 데이터와 현미경을 이용하여 수동으로 측정한 데이터를 비교하여 영상처리시스템의 유효성을 검증하였다. 만약 본 연구에서 제안한 방법을 균열성장거동을 자동적으로 관찰하거나 모니터링하는데 사용한다면 피로시험에 소요되는 시간과 노동력을 현격히 줄일 수 있다.

주요용어: 영상처리기술, 피로균열, 영상 이진화, 블록 매칭법, 1Cr-1Mo-0.25V강

Abstract : The development of a new experimental method is required to easily observe the growth behavior of fatigue cracks. To satisfy the requirement, an image processing technique was introduced to fatigue testing. The length of surface fatigue crack could be successfully measured by the image processing system. At first, the image data of cracks were stored into the computer while the cyclic loading was interrupted. After testing, crack length was determined using an image processing software which was developed by authors. Various image processing techniques like a block matching method was applied to the detection of surface fatigue cracks. By comparing the data measured by the image processing system with those by the manual measurement with a microscope, the effectiveness of the image processing system was established. If the proposed method is used to monitor and observe the crack growth behavior automatically, the time and efforts for fatigue test could be dramatically reduced.

Keywords : image processing technology, fatigue crack, block matching method, 1Cr-1Mo-0.25V steel

1. 서 론

산업설비 중 파손사고의 대부분은 피로파손에 의한 것이다. 이런 이유로 피로와 관련한 재료물성 데이터가 여

러 가지 재료 물성 데이터 중에서도 매우 중요한 자리를 차지하고 있다. 그러나 피로시험은 많은 시간과 노동력을 필요로 하기 때문에 기피되고 있는 연구분야중의 하나이다. 그 결과 피로와 관련한 데이터의 생산이 현격히 줄어

들고 있다. 따라서 피로시험에 소요되는 시간과 노동력을 줄일 수 있는 시험방법의 개발이 절실하며, 이를 위하여 영상처리 시스템을 이용한 피로균열의 성장거동을 계측하는 방법의 개발도 이러한 노력의 일환이다[1-3].

재료의 피로시험에 있어서 표면에 발생되는 균열길이의 측정 방법은 크게 육안 및 현미경을 이용하는 직접측정과 compliance 및 전위차법을 이용하는 간접측정으로 대별할 수 있는 가운데 손쉽게 균열길이를 직접측정할 수 있는 현미경을 이용하는 방법이 많이 사용되고 있다. 그러나 하나의 피로 데이터를 얻기 위해서는 시간과 노동력을 많이 필요로 하므로 Ishii[4], Ichikawa[5] 등은 이런 단점을 극복하기 위하여 영상처리기법을 이용한 균열길이 자동측정에 대한 연구를 하였다.

영상처리기법을 이용하여 균열길이를 측정하기 위해서는 광학정보를 전기신호로 변환하는 charge coupled device (CCD) 카메라가 주로 사용된다. 영상처리기법을 이용하여 표면 균열길이의 측정 시 균열의 시작점 및 끝점을 검출하는 기법에 따라 균열길이의 측정오차가 발생하게 된다. 두 개의 영상 이미지를 매칭하거나 균열 주위의 농담차이를 이용하는 방법 등 여러 방법이 제시되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 균열크기 자동측정을 위한 CCD 카메라 위치제어 시스템, 균열영상처리 알고리즘 및 소프트웨어 개발을 목표로 하고 있다. 또한 화력발전용 터빈 로터에 사용되는 Cr-Mo-V강을 이용하여 표면균열의 성장거동 관측에의 영상처리시스템의 유효성을 검토하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 균열인식 알고리즘

임의의 위치에서 발생하는 균열인식 알고리즘[6-8]은 Fig. 1과 같다.

1) 기준점 탐색

영상파일을 취득하기 전에 시험편에 기준점(reference point)을 표시하는 것이 좋다. 왜냐하면 영상들을 서로 겹쳐서 나온 차(difference) 영상으로부터 잡음을 제거하고 임계값을 설정한 후 균열을 검출하기 위해서는 두 개의 영상파일이 완전히 겹쳐야 정밀한 차 영상을 얻을 수 있기 때문이다.

2) 차이(difference) 영상 구현

기준점을 기준으로 하여 두 개의 영상을 겹쳐서 차의 영상을 구현한다.

3) 잡음(noise) 제거

영상에서 발생하는 잡음은 찾고자 하는 정보를 얻기 힘들게 한다. 이러한 잡음을 제거하기 위한 방법에는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 미디언 필터(Median Filter)와 형태학적 필터(Morphological Filter)를 적용하였다. 미디언 필터는 어떤 화소 주변의 영역내의 화소 농도의 중간값을 구하여 원하는 화소의 농도로 처리하는 것인데 에지 부분을 잘 보존하면서 잡음을 제거하는 특징을 갖는다. 형태학적 필터는 확장(expansion) - 축소(contraction)이라고 불리는 처리를 이용하는 것으로 salt-and pepper noise 형태의 잡음 제거에 효과적이다[9,10].

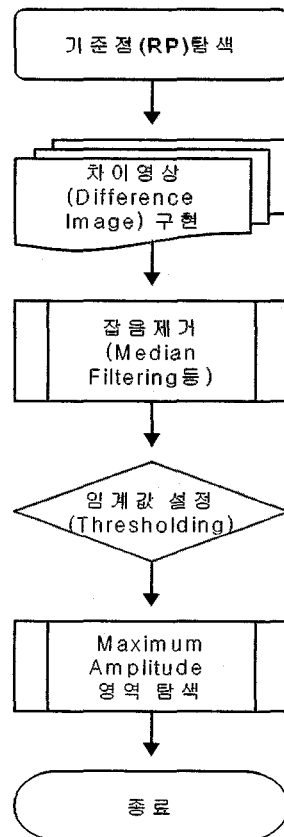


Fig. 1 Image processing algorithm

4) 이진화 및 임계값 설정

영상처리에 있어서 영상으로부터 도형의 모양이나 크기, 선의 굵힘 정도 등과 같은 특정한 정보를 얻기 위해서는 이진영상으로 변환시키면 원하는 정보를 쉽게 얻을 수 있다. 영상의 이진화 처리 또는 임계값 처리는 원리적으로 입력영상을 $F=(f_{ij})$, 출력영상을 $G=(g_{ij})$ 로 하였을 때 파라미터 t 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_{ij} = \begin{cases} 1: f_{ij} \geq t \\ 0: f_{ij} < t \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 t 는 농도값 수준을 나타내며, 배경부분(white)과 도형부분(black)으로 나누는 것을 결정하는 파라미터로서 일반적으로 한계치라고 한다. 이 한계치를 결정하는 것을 임계치 선택이라고 하며, 이진 영상처리에서는 실제적으로 이 한계치를 어떻게 결정하는가가 중요하다. t 이상의 수준에서는 1(1 화소)로 되고 t 이하의 수준에서는 0(0 화소)로 구성되는 이진 영상이 만들어진다.

5) Maximum amplitude 영역 탐색

이진화 및 임계값 설정으로 얻어진 영상에서 가장 진폭이 큰 영역을 탐색하여 이전에 얻어진 영상과 비교하여 차이 영상을 얻어 균열을 판별한다.

2.2. 균열 자동 추적 시스템 구성

만약 CCD 카메라의 위치가 고정되어 있으면, 임의의 위치에서 균열이 발생하여 성장하는 경우나 예비 균열을 시작점으로 하여 균열이 진전하는 경우라도 균열이 진전되어 CCD 카메라의 시야 밖으로 벗어나면 균열선단 영상을 얻을 수 없게 된다. 이런 경우, 균열 영상을 얻기 위해서는 CCD 카메라를 움직여야 하므로 사람의 노동력을 추가로 필요로 하게 된다. 사람의 노동력을 최소화하기 위해서는 CCD 카메라의 위치제어 시스템을 균열의 진전에 따라 자동적으로 움직일 수 있는 시스템, 즉 자동 추적 시스템의 개발이 필요하다.

본 연구에서 개발한 균열자동추적 시스템을 Fig. 2에 나타내었다. 본 시스템은 CCD 카메라, XYZ 스테이지, 카메라 위치제어기 및 균열영상처리 프로그램 등으로 구성되어 있다. CCD 카메라는 균열의 진전이 CCD 카메라로 얻어진 전체 영상의 3/4 지점에 도달했을 때 이동하게 되어 있다. 본 연구에서 구성한 측정 시스템 중 기본적인

장치에 대한 측정 정밀도 평가는 참고문헌 [2]에 기술되어 있다.

1) CCD 카메라

작은 균열 또는 균열의 선단을 정밀하게 인식하기 위하여 대물렌즈(6배 확대)를 CCD 카메라 (Putnix, TM-7EX) 앞에 부착시켜 균열의 영상을 얻었다. 균열영상 취득 시 조명조건을 일정하게 하기 위하여 집중 램프를 사용하였다. 본 연구에 사용한 CCD 카메라의 픽셀은 768(H)×494(V)이며, 1 cell size 는 8.4μm×9.8μm이다. 본 시스템에서 이용할 수 있는 최대 배율인 6배의 렌즈를 이용할 경우 17인치 모니터에 나타나는 상은 실제 크기의 약 480배 정도이다. 그리고 이 경우 입력영상의 1 픽셀(340μm)은 실제 약 0.7μm에 해당한다. 따라서 본 시스템에서 균열로의 식별이 가능한 최소한계균열크기는 30μm이다.

2) XYZ 스테이지

CCD 카메라 이동시스템은 마이크로 스텝 모터를 사용하여 X, Y, Z축을 독립적으로 100mm까지 움직일 수 있다. 또한 X축은 1μm, Y 및 Z축은 10μm이내의 정밀도로 제어할 수 있도록 각 축에 직선형 엔코더를 부착시켜 카메라의 위치를 확인할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 균열의 생성 및 성장기동을 조사하기 위하여 평활시험편의 중앙부 가로 12mm×세로 1.8mm 의 영역을 집중적으로 관찰하였다. 2배의 렌즈를 사용할 경우에는 이 영역을 횡으로 4등분하여 4화면을 영상처리하였다. 즉 횡으로

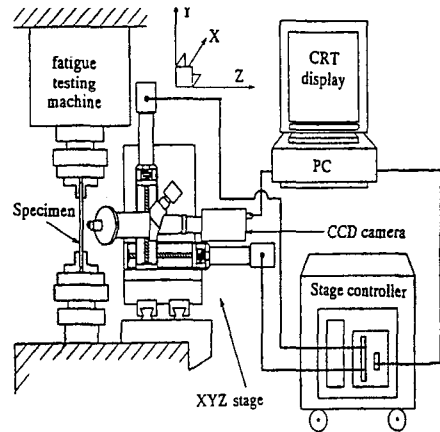


Fig. 2 Schematic diagram of auto-tracking system

4등분의 경우, 1화면에 영상처리할 범위를 3mm×1.8mm 보다 조금 큰 3.275mm×1.988mm로 하여, 다음 영상으로 영상처리를 위해 3mm를 이동할때 0.275mm의 범위가 겹치도록 하였다.

3) 균열영상처리 프로그램

균열영상처리 프로그램은 Windows98 환경하에서 Borland사의 Delphi를 사용하여 제작하였다. 균열선단이 시작되는 지점을 예측할 수 있는 경우에는 균열선단 시작 부분의 영상을 미리 저장해 놓고, 블록매칭 알고리즘을 적용하여 새로이 입력되는 영상에서 균열이 시작되는 선단을 추정하였다[11]. 이러한 방법으로 시험편의 형상이 다르거나, 동일한 시험편 형상이라 할지라도 다른 조명 조건 하에서 얻어진 균열영상에서 균열선단을 정확하게 인식할 수 있었다. 또한 균열영상을 이진화하는 과정에서 임계값(threshold)을 적용하는데, 일반적으로 선단 부분의 영상의 밝기 값이 작기 때문에 영상 이진화 과정에서 선단부분이 소실될 수 있다. 본 논문에서는 균열선단으로 갈수록 임계값을 자동적으로 증가하는 알고리즘, 즉 경사 임계값 설정방식을 사용하여 이러한 문제를 개선하였다.

또한 임의의 위치에서 발생하는 균열을 추적하기 위하여 영상취득시간이 다른 균열 이미지(t_0 , t_1)들을 설정된 기준점을 맞추는 방식으로 영상이미지 전체를 매칭시켜 그 차이로부터 생성되는 영상이미지 결과를 다른 균열영상 이미지(t_2 , t_3)들과 매칭시켜 균열인지 아닌지의 여부를 확인하는 과정을 반복하여 균열을 검출하는 알고리즘을 사용하였다[12,13].

2.3. 시험소재 및 시험조건

본 연구에 사용된 재료는 터빈 로터에 많이 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V강으로서 화학적 성분은 Table 1과 같다. 시험재료의 기계적 물성 측정을 위하여 상온에서 인장시험 및 경도시험을 실시하였다. 인장시험편은 단조한 원통형 재료로부터 시험편의 길이방향이 재료의 원주방향과 일치하도록 가공하였다. 인장시험은 직경 6.35mm, 표점거리 25.4mm인 시험편을 사용하여 ASTM E8[14] 규격에 준하여 1mm/min의 속도로 변위제어 방식으로 실험하였다. 경도는 비커스경도시험기를 사용하여 측정하였으며 시험편이 모재의 반경방향과 일치하도록 하여 10kgf 하중으로 측정하였다. 1Cr-1Mo-0.25V강의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

긴 관통균열(long through crack)의 성장 특성을 파악하기 위하여 균열의 성장방향이 디스크 형상인 모재의 반경방향과 일치하도록 compact tension(CT) 시험편을 채취하였다[2]. 시험편은 폭 50mm, 두께 6.7mm인 CT형으로 가공한 후 상온대기중에서 10Hz, 응력비 R=0.05 조건에서 정현파형으로 ASTM E647[15] 규격에 준하여 실험하였다. 또한 표면균열 성장특성을 파악하기 위해 평활 시험편은 표면균열 성장방향이 길이방향이 되도록 시험편을 채취하였으며, 균열의 발생·성장거동을 관찰할 수 있도록 관찰부위 한쪽면만이 오목한 모래시계형으로 제작하였다[2]. 그리고 표면균열에 관한 피로시험을 상온·대기중에서 10Hz, 응력비 R=0.05의 정현파형으로 하여 441MPa, 544MPa의 2종류의 최대시험응력을 가하였다. 인장시험을 비롯한 피로시험은 유압식 만능재료시험기(MTS사 제작, 최대용량: 250kN)를 사용하여 수행하였다.

Table 1 Chemical composition of 1Cr-1Mo-0.25V steel (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Ni
.31	.23	.76	.006	.001	.36
Cr	Mo	V	As	Sn	sb
1.11	1.32	.27	.006	.005	.001

Table 2 Mechanical properties of test material at room temperature

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area(%)	Hardness (Hv)
665.2	823.1	18.8	59.4	266

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 영상 취득 조건이 균열의 검출에 미치는 영향

시험영상은 시험편 표면의 거칠기, 조명조건, 시험편 자체의 광학적 성질, CCD 카메라의 성질 등에 따라 샘플 영상의 상태가 달라질 수 있었고, 관찰되는 균열은 연결성이 좋지 못해 자동적으로 균열을 검출하기에는 적합하지 못한 많은 약조건들이 있음을 알 수 있었다.

예를 들어 Fig. 3에서 보는 것처럼 Fig. 3(a),(b)의 경우보다 외견상 균열의 진행 부분과 그 이외의 부분을 쉽게 구분할 수 있는 Fig. 3(c),(d)의 경우가 이진화를 위한 임계값이나 잡음 제거를 위한 필터 특성 등 동일한 영상

처리 조건 하에서 균열을 쉽게 검출되지 않았다. 그 이유는 시험편의 표면의 상태와 조명 조건으로 인해 Fig. 3(c),(d)의 경우 균열 선과 배경의 밝기 차이가 Fig. 3(a),(b)보다 적을 뿐 아니라 상대적으로 노이즈에 해당하는 시험편 표면의 흠집이 큰 밝기를 보이기 때문이라 분석할 수 있다.

이 실험 결과로부터 영상처리를 이용한 균열 검출은 영상의 취득 조건에 따라 전혀 다른 결과를 낼 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 영상 취득 조건에 대한 기준 설정이 영상 처리 알고리즘과 더불어 중요함을 알 수 있다. 즉 매 시험편에 대해서 가급적 동일한 영상 취득 조건을 유지해 줌으로서 인식율을 높일 수 있다. 시험편이 달라지는 경우와 같이 영상 취득 조건이 달라지는 경우에는 예비균열선단 정보, 임계값, 임계값 경사도, 필터 파라미터 등을 조정해 줌으로서 인식율을 높일 수 있다. 뿐만 아니라 보다 정확하게 균열을 검출하기 위하여 균열의 특성에 관한 전문가 그룹의 사전 지식, 즉 균열의 예비 후보들을 전문가가 선택하고, 선택된 균열 예비 후보들을 집중적으로 관찰할 수 있도록 프로그램을 구성하였다.

3.2. 예비균열이 있는 경우

예비 균열이 있는 경우에는 예비 균열선단을 균열 진전 시작점으로 하여 균열의 길이를 측정한다. 균열이 진전되기 전의 영상을 백그라운드 영상, 균열이 진전된 후

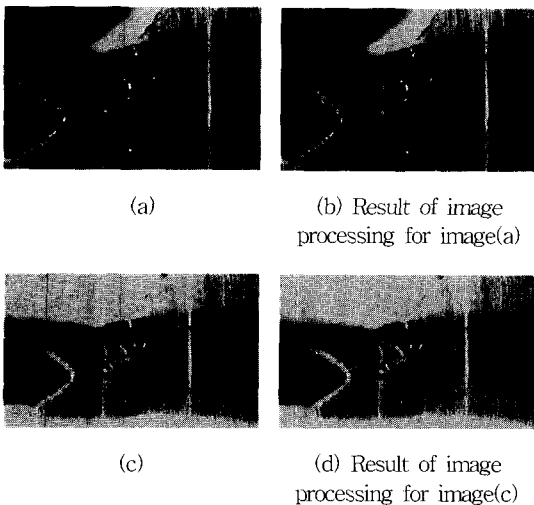


Fig. 3 Comparison of images obtained under different illuminating condition

의 영상을 균열 영상이라 하였을 때 이 두 영상을 겹쳐서 균열의 시작점을 탐색하여 균열의 시작점 위치를 영상의 픽셀 단위로 하여 좌표(x_0, y_0)값의 형태로 저장한다. 이렇게 인식된 좌표값과 최종적으로 균열이 진전된 균열 선단에서 검출되는 픽셀의 좌표값(x_1, y_1)을 구한다. 이 좌표값 가운데 횡방향에 해당하는 것이 균열의 진전 길이에 해당되므로 균열선단의 좌표값 가운데 x_1 값과 균열 시작점의 좌표값 x_0 값과의 차이(x_1-x_0)를 구한다. 여기서 구한 값은 픽셀값이므로 실제 균열길이를 구하기 위해서는 한 픽셀당 어느 정도의 길이에 해당되는지를 알아야 한다. 이 정보는 표준자를 이용하여 영상을 얻기 전에 미리 정해진 배율에서 자에 대한 영상을 얻으면 픽셀당 길이를 계산할 수 있다. 이렇게 얻어진 픽셀당 거리를 영상으로부터 얻어진 (x_1-x_0)에 곱함으로써 최종적으로 균열의 길이를 얻을 수 있다.

Fig. 4는 예비 균열이 있는 시험편에 대하여 균열의 진전과 그 진전 길이를 검출하는 과정을 보여주고 있다. 여기서 붉은 선으로 표시된 것은 균열이 진전된 크기를 표시한 것이며, 균열 영상 이미지 왼쪽 상단에 표시된 image position은 CCD카메라의 이동 위치에 해당된다.

Fig. 5는 동일한 균열을 원격거리측정시스템(remote measurement system: RMS)과 영상처리기법(image processing technology: IPT)으로 측정된 결과를 비교한 것이다. Fig. 5에서 횡축은 RMS로 측정된 결과이고 종축은 IPT로 측정된 결과이다. 이 두가지 방법으로 측정한

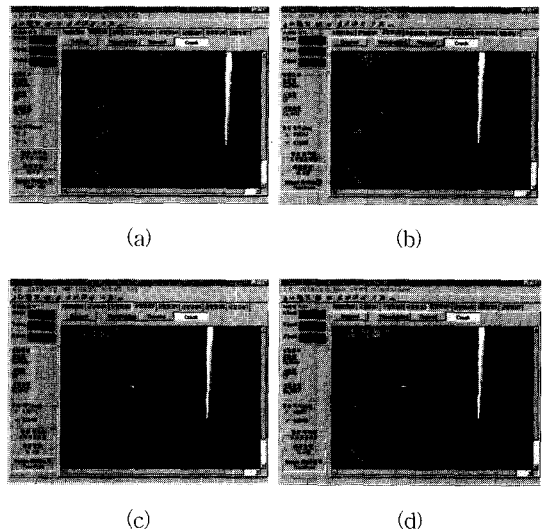


Fig. 4 Crack detecting procedure for CT specimen

결과가 같다면 Fig. 5의 실선 위에 위치해야 한다. 실험 값들은 이 실선에 거의 일치하고 있으며 편차는 0.03% 였다. 따라서 균열측정에 이용되는 기존의 RMS 측정법에 비해 IPT를 이용한 균열측정법의 능력이 크게 뒤떨어지지 않음을 확인할 수 있었다.

3.3. 임의의 위치에서 균열이 발생하는 경우

임의의 위치에서 발생하는 균열의 경우에는 경과 시간에 따라 얻어진 영상 이미지를 겹쳐서 나오는 차이 영상으로부터 균열의 유무를 판정하는 알고리즘으로 구성되어 있기 때문에 두 개의 영상 이미지를 겹치기 위해서는 어떤 기준점이 필요하게 된다. 시험하기 전에 시편에 기준점을 표시하고 이 기준점을 가지고 두 개의 영상을 겹쳐서 차이 영상을 구한다. 이 차이 영상으로부터 일반적인 영상 처리 알고리즘으로 균열을 인식하게 되어 있다. 시험 영상이미지로는 480×640 크기의 Zsoft Paint Format(.pcx) 포맷의 영상을 이용하였다.

Fig. 5에 시험 영상의 일부를, Fig. 7에는 균열 부분을 확대하여 표시한 것이다. 얼마간의 시간이 경과된 후에 얻어진 영상으로부터 선택된 균열 예비 후보들 중 길이의 변화가 검출되는 것이 있다면 이것을 이후의 시간에 얻어진 영상과 다시 한번 더 비교하여 2번 이상 연속해서 길이의 변화가 관찰된다면 이것을 균열로 간주하여서 균열만을 집중적이고도 지속적으로 관찰할 수 있는 알고리즘을 사용하였다.(Fig. 8)

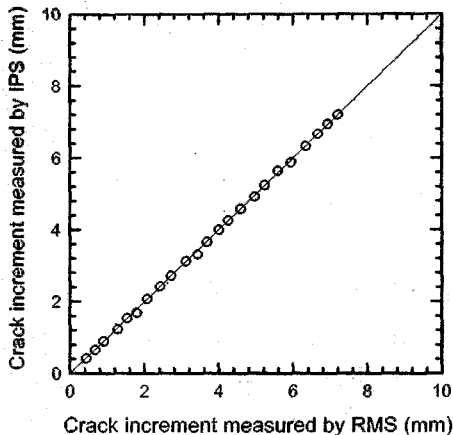


Fig. 5 Comparison of the accuracy for crack increment length measured by RMS and IPT

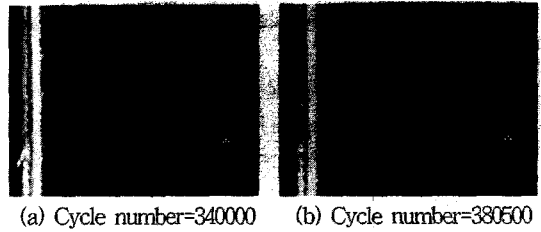


Fig. 6 Test images for smooth specimens

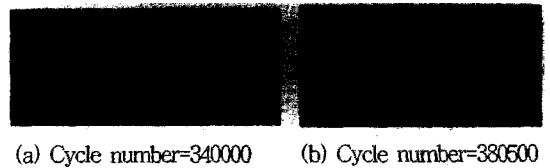


Fig. 7 Magnified images of crack in Fig. 4

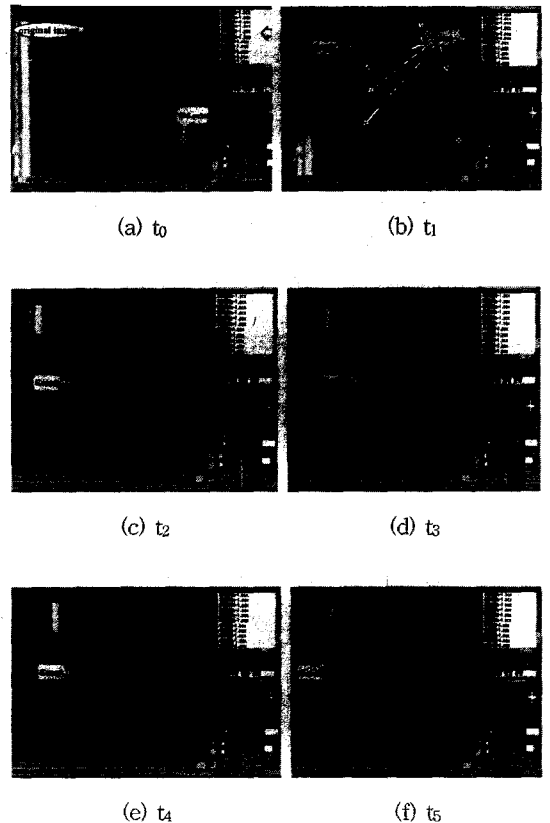


Fig. 8 Crack detecting procedure for smooth specimens

3.4. 표면 피로균열 성장 측정예의 적용

Fig. 9의 원형(○) 표시는 본 영상처리시스템을 사용하여 관찰한 1Cr-1Mo-0.25V강의 CT시험편에서의 긴 균열의 성장거동을 $da/dN-\Delta K$ 선도로 나타낸 것이다. 이 때 응력확대계수범위 ΔK 는 ASTM E647[15] 규격에 나온 식을 이용하여 구하였다. 피로시험을 통해 얻은 균열성장속도를 직접 할선법(secant method)으로 나타내어 Paris law로 정리하여 나타내었다. Fig. 9상의 직선은 이전의 연구결과[1,2,16]를 나타내며 본 시스템으로 측정된 데이터가 이 직선과 잘 일치하고 있다. Fig. 8의 직선은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$da/dN=C(\Delta K)^m \dots\dots\dots (2)$$

여기서 C는 2.279×10^{-4} 이고 m은 3.03이다.

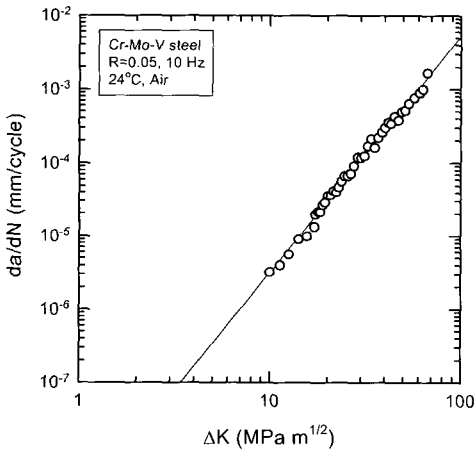


Fig. 9 Dependence of the long crack growth rate of CT specimen upon stress intensity factor range at 24°C

Fig. 10은 1Cr-1Mo-0.25V강의 상온에서의 시험결과를 영상처리 시스템을 이용하여 얻은 표면 피로균열길이와 무차원화 시킨 수명비와의 관계로 나타낸 것이다. 피로시험 데이터가 두 가지 응력수준에 관계없이 모두 좁은 범위 내에 모여 있으며, 이 결과 또한 이전의 연구결과[1]와 잘 일치하였다. Fig. 9와 10으로부터 본 연구에서 개발한 영상처리시스템의 유효성이 검증되었다고 할 수 있다. 따라서 균열성장거동을 자동적으로 관찰하거나 모니터링하는데 본 연구에서 제안한 방법을 사용한다면 피로시험에 소요되는 시간과 노동력을 현저히 줄일 수 있다.

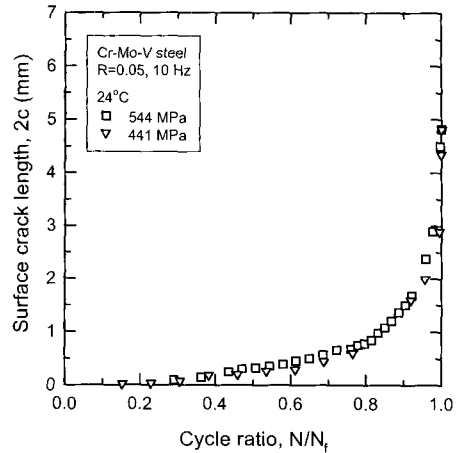


Fig. 10 Relationship between the surface crack length and cycle ratio for 1Cr-1Mo-0.25V steel specimens

4. 결 론

본 연구에서는 영상처리기법의 알고리즘을 응용한 균열길이 측정시스템을 구축하였으며 이 시스템을 이용하여 균열길이를 실시간에 정량적으로 측정할 수 있는 가능성을 제시하였다.

- (1) 시험편의 종류, 시험 방법 등에 따라 알고리즘을 달리 적용해야 할 필요가 있음을 알 수 있으므로 보다 정확하게 균열을 검출하기 위하여 균열의 특성에 관한 전문가 그룹의 사전 지식, 즉 균열의 예비 후보들을 전문가가 선택하고, 선택된 균열 예비 후보들을 집중적으로 관찰할 수 있도록 프로그램을 구성하였다.
- (2) 균열길이 측정 프로그램에서는 블록매칭방식과 경사임계값 설정방식을 병합하여 균열진전을 성공적으로 검출하였다.
- (3) 영상처리기법을 응용한 균열길이의 측정에 있어서 표면 거칠기, 광학적 성질 등과 같은 시험편의 상태와 조명, 진동 등과 같은 시험조건에 따라 매우 상이한 영상을 얻을 수 있기 때문에 표준 조건 및 절차의 정립이 필수적이다.
- (4) 블록매칭방식으로 노치선단을 인식하기 위해서는 여러 가지 형상의 노치에 대한 영상 DB 구축이 요구된다. 이와 더불어 정밀하고 정확한 노치선단인식 및 균열선단인식을 위한 다양한 영상처리 알고리즘의 개발이 필요하다.

참고문헌

- [1] S. H. Nahm, and C. M. Suh, "Observation on the Growth Behavior Small Surface Cracks Using Remote Measurement System," ASTM STP 1318, pp. 71-84, (1997)
- [2] S. H. Nahm, H. M. Lee and C. M. Suh, "A Study on Observation and Growth Behavior of Small Surface Cracks by Remote Measurement System," KSME Journal, Vol. 10, No. 4, pp. 396-404, (1996)
- [3] 남승훈, 장상엽, 서창민, 김시천, "원거리측정시스템을 이용한 교온하의 표면피로균열의 측정," 대한기계학회 '95년도 추계학술대회논문집(D), pp. 692-698, (1995)
- [4] A. Ishii, V. Lachkhia, Y. Ochi and T. Akitomo, "Recognition of Small Surface Fatigue Crack Initiation and Crack Tip," J. Soc. Mat. Sci., Japan, Vol. 42, No. 481, pp. 1231-1237, (1993)
- [5] M. Ichikawa, T. Takamatsu and T. Matsumura, "Measurement of Small Crack Lengths under Creep-Fatigue Condition by means of Image Processing," JSME International Journal, Vol. 35, No. 2, pp. 241-246, (1992)
- [6] J. Roberts, D. Rose, G. Jullien, L. Nichols, P. Jenkins, S. Chamberain, G. Marroscher, R. Mantha and D. J. Litwiller, "A PC-based Real Time Defect Imaging System for High Speed Web Inspection," Proc. SPIE. Vol. 1907. Machine Vision Applications in Industrial Inspection, pp. 164-176, (1993)
- [7] J. H. Han, D. M. Yoon and M. K. Kang, "Features for surface inspection", Proc. SPIE Machine Vision Applications in Industrial Inspection, vol. 1907, San Jose, California, pp. 114-123, (1993)
- [8] 윤두만, "표면 흠 검출을 위한 CCL을 기초로 한 기하학적 특징들의 선택과 분류 알고리즘," 포항공과대학 전자계산학과 석사학위 논문, (1993)
- [9] J. T. Tou and R. C. Gonzalez, "Pattern Recognition Principles," Addison-Wesley Pub. Co., (1974)
- [10] R. O. Duda and P. E. Hart, "Pattern Classification and Scene Analysis," John Wiley & Sons, Inc., (1973)
- [11] J. A. Lim, "Two-Dimensional Signal and Image Processing," Prentice-Hall, Inc., pp. 500-503, (1995)
- [12] A. Rosenfeld and A. C. Kak, "Digital Picture Processing," 2nd Edition, Academic Press, (1982)
- [13] A. Martelli, "Edge detection using Heuristic search methods," Computer Graphics and Image Processing, Vol. 1, pp. 169-182, (1972)
- [14] "Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials," Annual Book of ASTM Standards, Part 10, E8, pp. 130-149, (2000)
- [15] "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," Annual Book of ASTM Standards, Part 10, E647, pp. 674-701, (1999)
- [16] S. H. Nahm, H. M. Lee, C. M. Suh and S. S. Kee, "Measurement of Small Surface Fatigue Cracks by Remote Measurement System," Journal of Materials Science Letters, Vol. 15, pp. 422-424, (1996)