

레이저 스페클 간섭법을 이용한 균열 길이 측정에 관한 연구

강영준*, 배진길**, 유원재**, 박낙규**

A Study on Measurement of Crack Length by using Laser Speckle Interferometry

Young-June Kang*, Jin-Kil Bae** and Weon-Jae Ryu**, Nak-Kyu Park**

ABSTRACT

More accurate and fast inspection method for mechanical parts and structure is required to guarantee the safety. Conventional methods using compliance method, eddy current method, ultrasonic wave, acoustic emission for non-destructive testing in mechanical parts and structure have been performed as the method of contact with objects to be inspected. With this reason these methods have been taken relatively much time, money, and manpower. In this study, in order to overcome these shortcomings, we used In-plane Electronic Speckle Pattern Interferometry(In-plane ESPI) that was full-field measurement and noncontact method. We detected the cracks of the specimen at a real time and measured the length of the crack by using In-plane ESPI system. Finally, we compared this results with conventional microscope method.

Key Words : In-plane Electronic Speckle Pattern Interferometry(면내 전자 스페클 간섭계), Crack Propagation (균열 진전), Quantitative measurement of crack length(크랙길이의 정량적 측정)

1. 서론

최근 들어 건설된 시설물에 대한 안전관리의 소홀에 따른 대형 구조물의 붕괴사고가 잇따라 발생하고 있다. 따라서 노후 구조물이나 산업설비에 존재하는 광범위한 균열이나 결함으로 인해 구조물 및 설비의 수명과 안전성 평가에 대한 의식이 높아지고 있으며, 또한 검사하고 보수해야 할 필요성이 증대되고 있다.

균열의 진전 측정방법으로는 직접 측정법과 간접 측정법이 있는데, 직접 측정법은 육안 또는 확대경, 현미경을 사용한 광학적 관찰에 의해 시험편 표면에서 균열길이를 측정하는 것으로 표면균열의 형상과 치수의 검출에 유리하다. 간접 측정법은 균열길이의 증대에 의해 생기는 간접적인 정보량의 변화에 착안하여 균열길이를 추정하는 것으로 컴플라이언스법, 전기적 방법, 초음파법, AE법 등이 있다. 이러한 방법들은 거의 접촉식에 가까운 방식으로 탐촉자나 필름이 위치하는 지점으로 그 검사영

* 전북대학교 기계공학부

** 전북대학교 기계설계학과 대학원

역이 제한되고, 넓은 영역에 걸쳐 단시간내에 검출하지 못하는 단점으로 인해 많은 시간, 경비 그리고 인력이 소비되고 있다. 간섭성 광원인 레이저를 이용한 변형과 진동 모드측정 및 결합검사 기법 중 에서 대표적인 것이 홀로그래피 간섭법(Holographic interferometry, HI)이 있다. 이 방법은 구조물의 변형이나 진동모드측정, 표면의 미세 결합 측정, 유체 흐름의 가시화 등 전 분야에 걸친 계측을 할 수 있으며, 비접촉식으로 검사 대상에 영향이 전혀 없고 실시간 측정이 가능하다. 또한 계측 단위로 레이저의 파장을 사용하므로 측정 정밀도가 대단히 우수하다.^[1] 그러나 느리고 복잡한 기록 및 재생 과정은 현재 홀로그래피 간섭법을 이용함에 있어 하나의 단점으로 작용되고 있으며, 특히 실시간 측정이 요구되는 산업현장의 경우 이러한 단점 때문에 이 방법의 이용이 매우 힘든 실정이다.^{[2][3]}

본 연구에서는 홀로그래피 간섭법의 장점들을 수용하면서 동시에 그의 단점을 보완하는 비디오 시스템의 사용이 제안되었는데, 이 방법을 전자 스페클 패턴 간섭법(Electronic speckle pattern interferometry, ESPI)이라 한다. ESPI는 측정물체의 변형 정보를 갖고 있는 간섭무늬의 기록과 저장에 비디오 시스템을 사용하기 때문에 데이터의 저장 및 관리가 대단히 용이하며, 현장적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 ESPI가 현장에 보다 적합하게 적용되기 위해서는 외란에 덜 민감한 레이저 간섭 시스템을 요구하게 되는데, 그러한 요구에 적합한 시스템이 면내 변형에 민감한 ESPI이다.^{[4][5]}

먼저 자연 결함을 재현하기 위해 시험편에 피로 균열을 내고 이 시험편을 SSRT(Slow Strain Rate Test) 시험기를 사용하여 낮은 속도로 인장시켰다. 시험편의 인장에 따른 표면에서의 변형을 알기 위해서 면내 변형에 민감한 ESPI 시스템을 구성하여 균열선단의 위치와 길이를 측정할 수 있도록 하였다.

2. 면내 변형에 민감한 간섭계의 이론적 배경

ESPI 장치는 사용 목적에 따라 간섭계의 구성이 달라지는데 크게 면외 변위에 민감한 ESPI와 면내 변위에 민감한 ESPI 두 가지 방법이 있다. 본 연구에서는 면내 변위에 민감한 In-plane ESPI를 구

성하여 실험하였다. 간섭계의 구성도는 Fig. 1과 같다.

여기에서 물체는 x_2, x_3 평면에 놓여 있고 물체면에 수직인 방향과 이루는 각의 크기가 θ 이며 방향이 반대인 두 평면 파면 U_o 과 U'_o 이 물체에 조사되고 있다. 변위 d 에 의한 두 빔의 상대적인 위상차는 x_2 축에서 아래의 식과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d \sin\theta \quad (1)$$

여기서, λ 는 광원인 레이저의 파장이고, d 는 x_2 -방향의 변위. 즉, 면내 변위이며, θ 는 레이저의 입사각이다. 또한 위상차 $\Delta\phi$ 는 스펙클 상관 계수에 의하여 아래의 식과 같이 된다.^[1]

$$\Delta\phi = 2N\pi \quad (2)$$

여기서, N 은 간섭무늬 차수이다.

식 (1)을 식 (2)에 대입해 보면, 간섭무늬 차수에 비례하는 면내 변위의 상관식이 성립한다.^[1]

$$d = \frac{N\lambda}{2\sin\theta} \quad (3)$$

그러므로, 이 식을 토대로 측정하고자 하는 물체의 면내 변위를 결정할 수 있다.

3. 실험

3.1 시험편의 제작

ASTM E399에서는 4종류의 시험편이 표준화되어 있는데 일반적으로 많이 사용되는 것은 3점 굽힘시험편과 Compact Tension(CT)시험편이다. 일반적으로 어느 것을 사용해도 동일한 결과를 주는 것이 보장되어 있는데, 같은 판두께를 적용할 경우, 3PB시험편은 제작이 용이하며 시험기의 용량이 작아도 되는 이점이 있다. 한편 CT시험편은 3PB시험

편에 비하여 중량은 대략 1/3정도로 소형이며, 특히 매우 두꺼운 시험편을 사용하는 경우에 유리하게 된다.^{[6][7]}

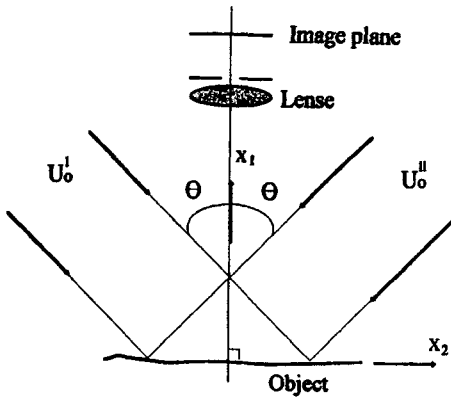


Fig. 1 The optical arrangement of laser interferometer for measuring in-plane displacement

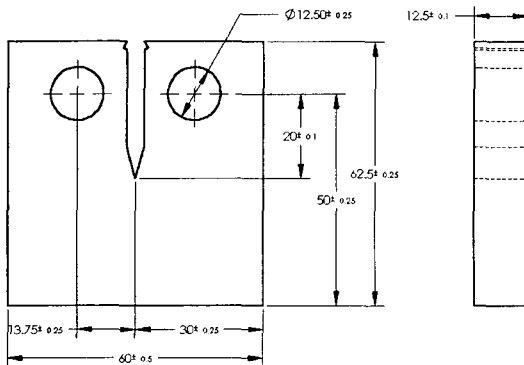


Fig. 2 Geometry of CT specimen

본 연구에서는 CT시험편을 사용하였으며 Fig. 2는 CT시험편의 형상을 보여주고 있다. 사용된 재료는 7175 Al 합금 링롤 단조품을 사용하였다.

시험편에 도입된 노치는 가장 예리한 자연결함을 재현하기 위해 1.5mm의 피로균열이 사용되었다. 또한 피로균열길이를 실제 현미경으로 관찰하기 위해 시험편 표면에 노치 선단으로부터 0.5mm마다 선을 그었다.

3.2. ESPI 시스템의 구성

본 연구에서 사용된 시스템의 구성은 Fig. 3과 같다. 구성된 광학계는 면내변위에 민감한 ESPI시스템으로서 진동 절연된 광학 테이블위에 구성되었으며, 광원으로는 632.8nm의 파장과 5mW의 출력을 가지는 He-Ne 레이저를 사용하였다. 발진된 레이저는 광분할기(Beam Splitter)를 통하여 두 개의 물체빔으로 나누어진다. 두 개의 물체빔은 확산판(expander)에 의해 확산되어 물체에 조사되면 물체 표면에서의 난반사에 의해 스펙클 패턴이 형성된다.

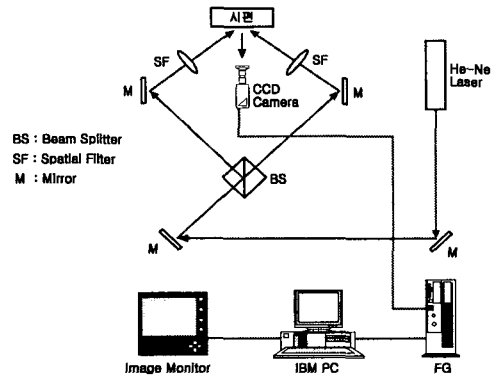


Fig. 3 Experimental setup

이렇게 생성된 스펙클패턴은 CCD카메라를 통해 이미지를 저장하는 프레임 그래버(frame grabber)에 0에서 256 레벨의 밝기 정보값으로 저장하는데, 이 이미지를 기준 이미지(reference image)라 정의한다. 또한 물체를 변형시키면 그 결과에 의해 생긴 스펙클 패턴이 기준 이미지와 실시간적으로 빠지게 되어 이미지 모니터를 통해 변형에 의한 간섭 패턴을 실시간적으로 볼 수 있게 된다.

먼저 CT 시험편을 인장시키기 전에 기준 이미지를 프레임 그래버에 저장시킨 후 SSRT(Slow Strain Rate Test) 시험기를 이용하여 0.03mm/min의 속도로 인장시킨다. 시험편을 인장시키면 변형이 되기 때문에 이미지 모니터상에 간섭무늬가 생기게 되고 이것을 프레임 그래버에 저장하게 된다. 변형량이 커지면 간섭무늬 간격이 줄어들면서 간섭무늬가 조밀해져 콘트라스트가 떨어지고, 결국에는 간

섭무늬가 사라지기 때문에 다시 기준 이미지를 새로 잡아 앞의 작업을 반복적으로 수행한다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 X-Y recorder를 사용하여 획득한 하중-변위 선도이다. 이 하중-변위 선도에서 하중이 갑자기 감소하는 부분, 즉 균열이 진전하기 시작할 때부터 하중을 계속 가해 과단 될 때까지인 1에서 4 까지의 상태를 나타낸 그림이다. Fig. 5에서 Fig. 10 까지의 그림은 면내 변형에 민감한 간섭계를 구성하여 균열진전에 따른 균열 선단의 위치 추적과 진전된 균열 길이를 측정하기 위하여 변형에 의해 생긴 간섭무늬와 간섭무늬를 필터링한 결과들이다. 이 결과들은 SSRT(Slow Strain Rate Test) 시험기를 사용하여 0.03mm/min의 속도로 인장시키고 그에 따른 하중-변위 선도를 X-Y recorder를 이용하여 획득하였으며, 또한 현미경을 이용하여 진전된 균열 길이를 측정하였다. 전자 스펙클 간섭법을 이용한 균열 진전 길이의 측정은 먼저 실험 시작전에 시험편 표면에 자를 대고 이때의 이미지를 저장시킨다.

또한 변형되기 전의 균열선단의 pixel 위치를 알아낸다. 그리고 변형된 후의 간섭무늬를 이진화한 후 글로잉 에지 필터(glowing edge filter)를 이용하여 필터링을 하고 간섭무늬가 집중되는 곳의 중심 pixel값을 균열선단으로 가정하여 측정하였다.

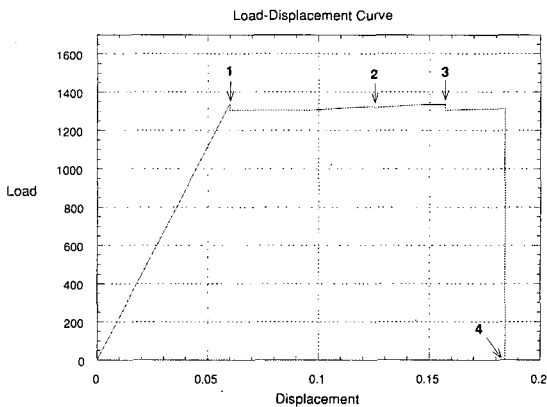
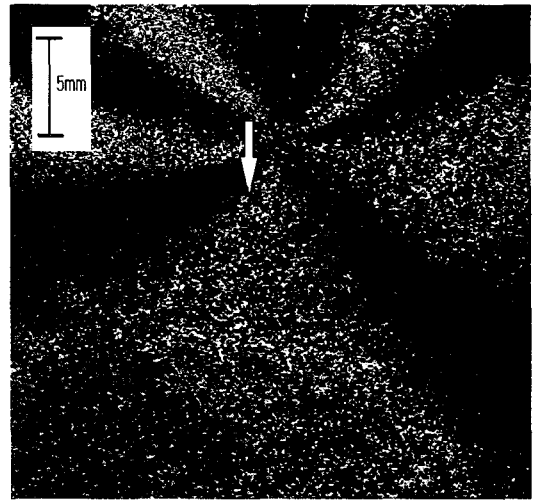


Fig. 4 Load-Displacement Curve



(a) Fringe pattern



(b) Filtered image of fringe pattern

Fig. 5 Before crack propagate

먼저 시험편을 인장시키면서 균열이 진전되기 전까지의 간섭무늬는 Fig. 5와 같은 형태를 보이고 있으며 하중-변위 선도에서 1상태에서의 간섭무늬를 나타내고 있다. 이것은 시험편을 인장시키면서 균열이 진전되기 전까지 실시간적으로 기준 이미지를 계속 갱신 시키면서 변형에 의한 간섭무늬를 측정 한 결과이다. 이때의 균열길이는 시험편 표면에 0.5mm마다 참조선을 그어 현미경으로 측정한 결과

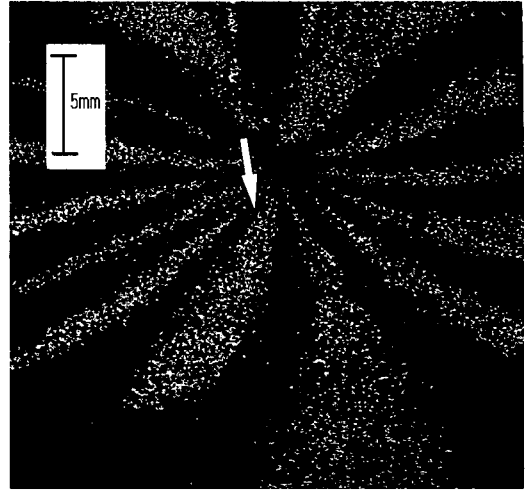
1.5mm를 나타내고 있으며 이것은 자연 결함을 재현하기 위해서 도입된 피로균열의 길이이다. 또한 균열 선단에 간섭무늬가 집중되는 것을 볼 수 있다. 이것은 균열선단에 응력이 집중되기 때문에 그만큼 선단에서의 변형이 크다는 것을 알 수 있다. 이로써 균열이 진전되는 선단의 위치를 추적할 수 있게 된다. 측정된 간섭무늬를 필터링함으로써 균열길이를 구한 것은 1.53mm이며 현미경 측정에 의한 것과의 오차는 2%이다.

그림 4의 하중-변위 선도를 보면, 시험편을 계속 인장시켜 하중을 가했을 때, 하중이 1326 kgf에서 하중이 갑자기 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이것은 균열선단에 집중된 하중이 갑자기 해방되어 균열이 진전된 것을 의미한다. 이때 균열은 현미경으로 측정해 본 결과 3.5mm만큼 진전되었으며 이것은 하중-변위 선도의 2번의 위치에 해당하며, 이때의 간섭무늬는 Fig. 6과 같다.

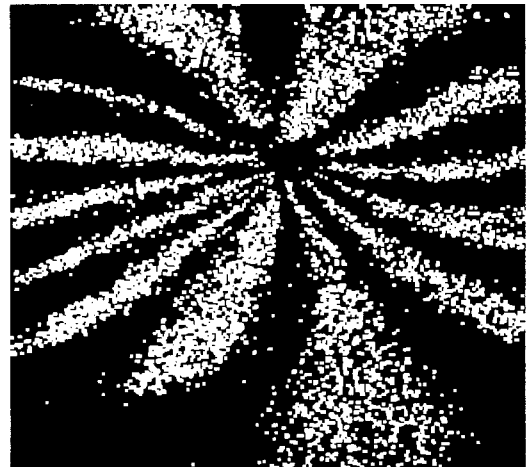
이러한 간섭무늬로부터 균열이 진전되는 순간은 시험편의 표면에서 변형량이 크기 때문에 간섭무늬의 개수가 많아지는 것을 볼 수 있으며 균열 선단에 간섭무늬가 집중되는 것을 볼 수 있다. 획득한 간섭무늬에 의해서 균열 진전 길이를 측정해 본 결과 3.62mm였으며 현미경으로 관찰한 결과와 비교했을 때 3.43%의 오차가 발생했다.

하중-변위 선도의 2번의 위치, 즉 균열이 진전된 순간에서부터 하중을 계속 가하면 Fig. 7과 같은 간섭무늬를 얻을 수 있다. 이때는 균열이 진전되지 않고 하중만이 시험편에 계속 가해지는 상태로서, 하중 부하에 의해 균열 선단의 위치에서 간섭무늬가 집중되는 것을 볼 수 있으며 균열이 진전된 위치에서는 간섭무늬가 불연속적임을 알 수 있다. 이와 같은 간섭무늬의 불연속은 균열이 진전된 양쪽의 변형량이 같지 않음을 나타낸다.

Fig. 4를 보면 균열이 진전된 후 하중이 계속 증가하여 1336 kgf에 도달하게 되었을 때, 또다시 하중이 갑자기 감소함을 볼 수 있는데 이것은 균열이 진전되기 때문이며, 현미경을 통해 관찰된 진전된 균열길이는 5mm이다. 이때의 측정된 간섭무늬는 Fig. 8과 같으며, 하중-변위 선도에서 3번의 위치에서의 간섭무늬를 나타낸다. 이것 또한 Fig. 6과 마찬가지로 간섭무늬의 개수가 많아짐을 알 수 있다. 간섭무늬를 이용해 균열 진전길이를 구해본 결과 5.12mm가 진전되었다는 것을 알 수 있었고, 현미경



(a) Fringe pattern

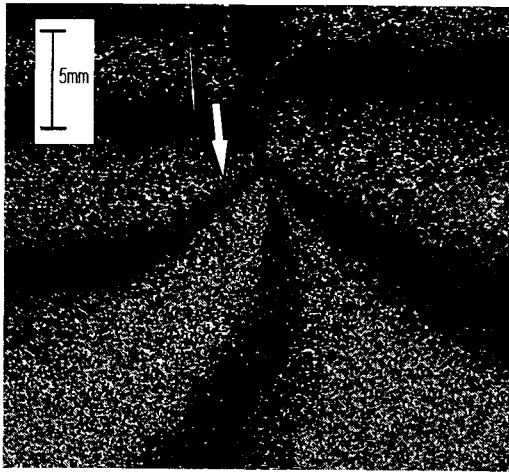


(b) Filtered image of fringe pattern

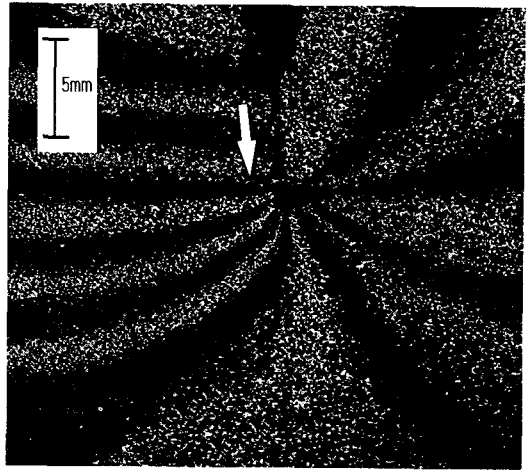
Fig. 6 The moment crack propagated up to 3.5mm

으로 관찰한 결과와 비교했을 때 2.4%의 오차가 발생함을 알 수 있었다.

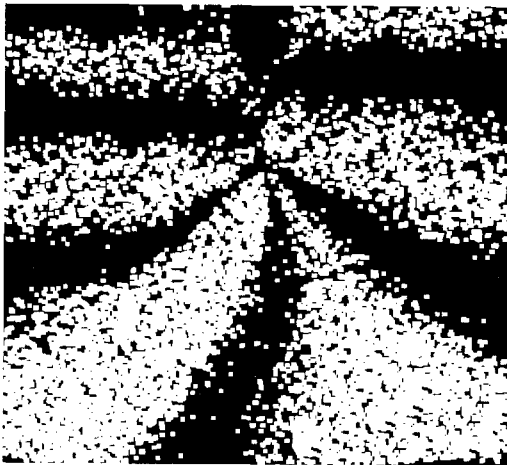
균열이 진전된 후 하중을 계속 가하면 Fig. 9와 같은 간섭무늬를 얻을 수 있다. 그림 9와 같은 상태로서, 이 간섭무늬 또한 균열 선단에 간섭무늬가 집중되고 균열이 진전된 곳에서 간섭무늬가 불연속적임을 알 수 있다.



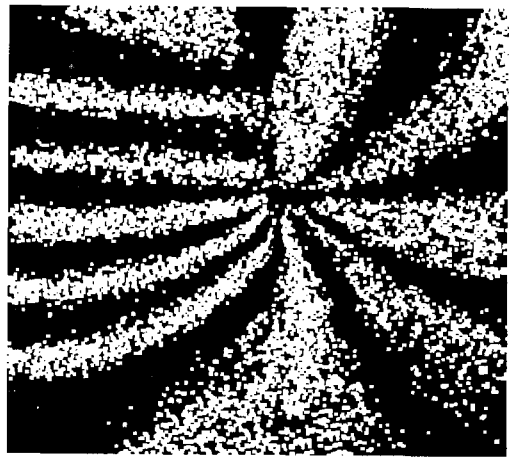
(a) Fringe pattern



(a) Fringe pattern



(b) Filtered image of fringe pattern



(b) Filtered image of fringe pattern

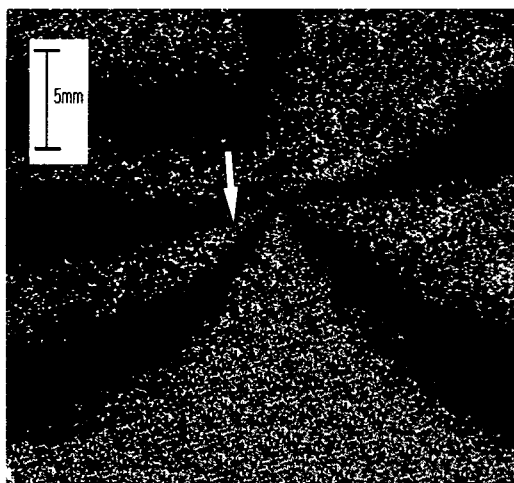
Fig. 7 After crack propagated up to 3.5mm

Fig. 8 The moment crack propagated up to 5mm

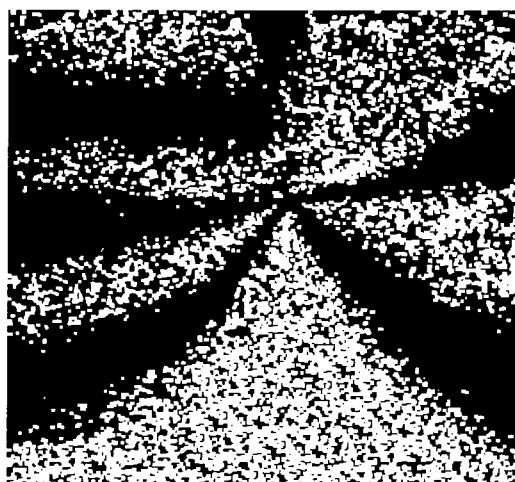
하중을 계속 가하다보면 시험편은 결국 파단되게 되는데 이때의 간섭무늬는 그림 10과 같다. 시험편이 파단되면서 양쪽의 변형량 차이에 의해 간섭무늬가 불연속적이게 된다. 이와 같은 결과로 균열이 진전되는 순간에는 간섭무늬의 개수가 많아짐을 알 수 있고 균열이 진전되지 않는 상태에서는 간섭무늬의 개수가 적음을 알 수 있다.

이러한 간섭무늬로부터 간섭무늬의 밀도에 의해 균열의 진전 여부를 정성적으로 판별할 수 있었다. 또한 균열선단에 간섭무늬가 집중되는 것을 알 수 있었고 균열이 진전된 곳에서는 양쪽의 변형량이 틀려 간섭무늬가 불연속적임을 알 수 있었다.

또한 균열선단에 간섭무늬가 집중되는 것을 알 수 있었고 균열이 진전된 곳에서는 양쪽의 변형량이 틀려 간섭무늬가 불연속적임을 알 수 있었다.



(a) Fringe pattern



(b) Filtered image of fringe pattern

Fig. 9 After crack propagated up to 5mm

간섭무늬에 의해 균열길이를 측정된 것과 현미경으로 관찰한 균열 진전 길이를 비교 분석해 보면 Table 1.과 같다.

5. 결론

본 연구에서는 In-plane ESPI를 이용하여 CT 시

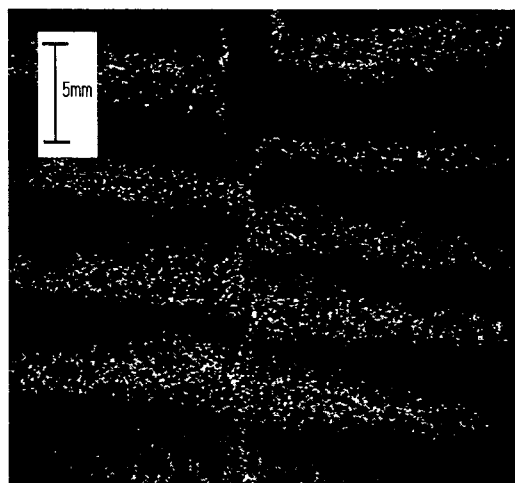


Fig. 10 At the onset of failure

Table 1 Error analysis for measurement of crack length by microscope and interference fringe

현미경으로 관찰한 균열길이(mm)	간섭무늬에 의한 균열길이(mm)	오차(%)
1.5	1.53	2
3.5	3.62	3.43
3.5	3.55	1.43
5	5.12	2.4
5	5.2	4

험편을 인장시켜 그에 따른 변형에 의해 생기는 간섭무늬를 이용하여 균열의 검출 및 균열 진전 길이를 실시간적으로 측정함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) In-plane ESPI를 이용하여 균열 길이를 정량적으로 측정 가능하였다.

2) 측정된 간섭무늬 형상을 통해 균열진전 여부를 실시간으로 모니터링 할 수 있었다.

3) 구성된 간섭계를 통하여 결함길이를 4% 오차 범위내에서 측정 가능함을 확인하였다.

본 연구를 통해 넓은 영역에 대해 균열진전 추적과 균열크기의 실시간 측정이 어려웠던 비파괴 검사분야에 전자 스펙클패턴 간섭법이라는 새로운 측정기술의 적용을 가능하게 함으로써 산업설비 부재의 균열진전 측정에 직접적으로 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Jones, R. and Wykes, C., "Holographic and Speckle Interferometry," Cambridge University press, pp. 51-57, 1989.
2. Hansen, E. A., "A Holographic Real Time Study of Crack Propagation in Concrete," CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol. 19, pp. 611-620.
3. Maji, A. K. and Shah, S. P., "Measurement of Mixed-mode Crack Profile by Holographic Interferometry," Experimental Mechanics, pp. 201-207, 1990.
4. Bosco, C., Cadoni, E. and Facchini, M., "Crack Propagation in Clay Elements Determined by ESPI Method," SPIE Vol. 2791, pp. 108-114, 1996.
5. Jia, Z. and Shah, S. P., "Crack Detection in Concrete Using Real-Time ESPI Technology", SPIE Vol. 2455, pp. 385-391, 1995.
6. Bosco, C., Cadoni, E. and Facchini, M., "Interferometric Technique to Evaluate Strain Concentration at Crack Tip in Clay Products," 4th International Masonry Conference, London, pp. 23-25, 1995.
7. Maji, A. K. and Wang, J., "Fracture Mechanics of a Tension-shear Macrocrack in Rocks," Experimental Mechanics, pp. 190-196, 1992.