



화상계측기법에 의한 전단압축파괴형 보의 국부변형률분포 추정

권용길¹⁾ · 한상훈²⁾ · 홍기남^{2)*}

¹⁾충북대학교 건설기술연구소 ²⁾충북대학교 토목공학과

Estimation of Local Strain Distribution of Shear-Compressive Failure Type Beam Using Digital Image Processing Technology

Yong-Gil Kwon,¹⁾ Sang-Hoon Han,²⁾ and Ki-Nam Hong^{2)*}

¹⁾Institute of Construction Technology, Chungbuk National University, Cheung-ju 361-763, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheung-ju 361-763, Korea

ABSTRACT The failure behavior of RC structure was exceedingly affected by the size and the local strain distribution of the failure zone due to the strain localization behavior on the tension softening materials. However, it is very difficult to quantify and assess the local strain occurring in the failure zone by the conventional test method. In this study, image processing technology, which is available to measure the strain up to the complete failure of RC structures, was used to estimate the local strain distribution and the size of failure zone. In order to verify the reliability and validity for the image processing technology, the strain transition acquired by the image processing technology was compared with strain values measured by the concrete gauge on the uniaxial compressive specimens. Based on the verification of image processing technology for the uniaxial compressive specimens, the size and the local strain distribution of the failure zone of deep beam was measured using the image processing technology. With the results of test, the principal tensile/compressive strain contours were drawn. Using the strain contours, the size of the failure zone and the local strain distribution on the failure of the deep beam was evaluated. The results of strain contour showed that image processing technology is available to assess the failure behavior of deep beam and obtain the local strain values on the domain of the post-peak failure comparatively.

Keywords : digital image processing, CCD camera, strain localization, strain softening behavior, local strain

1. 서 론

RC구조물의 균열 이후 (post-peak)거동에서는 인장균열과 콘크리트의 압축부 파괴에 의해 임의영역에서 변형률이 국부화 되는 현상을 보인다.¹⁻³⁾ 콘크리트와 같은 연화(softening)재료의 변형률 국부화 거동으로 인해 파괴영역과 파괴영역 내에서의 변형률 추이는 구조물의 극한거동에 많은 영향을 미치지만,¹⁾ 균열 이후의 거동에서 발생되는 파괴영역의 예측과 영역 내에서의 변형률 분포는 실험적으로나 해석적으로 명확히 구명되어있다고 보기 어려운 실정이다.⁴⁾ 특히 비교적 큰 RC구조물의 실내실험의 경우, 변위계측을 엄밀히 실시하여도 게이지의 파단 등과 같은 이유로 인해 국부화영역 내에서의 변형률을 극한변형률까지 완전히 추적하는 것은 불가능하다.^{5,6)} 따라서 최종파괴까지의 전체 파괴모드를 정확히 계측하기 위해서는 변형률게이지나 π -게이지 등에 의한 직접적

인 방법보다 비접촉 계측기법의 개발과 실용화 그리고 이를 통한 극한변형률의 정확한 계측이 필수적이라 하겠다.

최근 CCD (charge coupled device)카메라 등과 같은 화상데이터 취득 장비의 성능향상과 광학렌즈를 통해 취득된 화상데이터의 화소수 (number of pixels) 증가로 인해 보다 정밀한 데이터의 취득이 가능하게 되었다. 뿐만 아니라 컴퓨터의 연산능력의 증가로 인해 다량의 화상데이터 처리도 가능한 실정이다.

이 연구에서는 이와 같은 화상계측기술을 RC구조실험에 적용하여 적용 가능성을 검토하고 이를 통해 구조물의 극한파괴 거동을 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 먼저, 이 논문에서는 CCD 카메라에 의해 취득된 고해상도 화상데이터를 이용하여 정량화된 변형률값을 검정하기 위한 예비실험을 실시하였다. 취득된 화상데이터로부터 화상처리기법의 허용오차를 평가하고 이를 바탕으로 전단압축파괴형 보의 파괴실험을 실시함과 동시에 화상계측기법을 사용한 국부화영역의 변형률 분포를 계측한 후 후처리 과정을 거쳐 국부화변형률을 추정하였다.

*Corresponding author E-mail : hong@chungbuk.ac.kr

Received August 20, 2007, Revised December 11, 2007

Accepted November 17, 2008

©2009 by Korea Concrete Institute

2. 격자법에 의한 화상계측기법

격자법에 의한 화상계측기법^{4,5)}은 피사체에 부착된 표점의 움직임을 카메라를 이용하여 촬영하고 촬영된 영상을 화상처리과정을 거쳐 표점들의 위치를 측정한다. 이후, 측정된 표점의 위치 변화를 이용하여 변위 및 변형률을 산출하는 기법이다. 비접촉에 의한 변위 및 변형률의 변화 추이를 추정하는 것이 가능하여 변위가 집중되는 부근의 파괴영역과 같은 대변형 영역에서의 물리적인 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다.

이 논문에서는 표점간의 위치 변화를 이용한 변형률 계산 시 평균변형률을 사용하였다. 즉, 사각형요소라 하더라도 하나의 요소 내에서 분포되는 변형률은 동일한 값을 가지는 것으로 가정하였다. Fig. 1에 격자법에 의한 일반적인 계측절차를 나타내었다.

2.1 화상촬영 및 화상취득

이 연구에서는 표점들의 이동량을 취득하기 위해 화소 수 2160 × 3840 pixel의 CCD카메라 3대를 사용하여 실험체 및 표점들을 촬영하였다. 표점간 거리는 일축압축 공시체의 경우 37.5 mm, 전단압축파괴형 보의 경우 가로 27.25 mm, 세로 28.75 mm로 제작하였다. 카메라의 위치는 실험체의 정중앙에 위치시키도록 하여 화상데이터의 왜곡을 최대한 방지하였으며 표점의 크기는 일축압축공시체에서는 5 mm, RC보에 있어서는 8 mm의 직경을 가지는 표점을 사용하였다.

2.2 화상처리

얻어진 화상데이터는 표점뿐만이 아니라 배경 등 기타

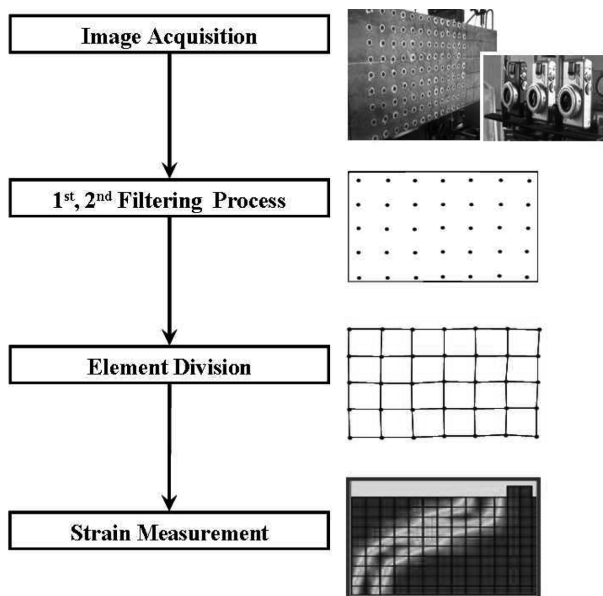


Fig. 1 Flowchart of image processing

노이즈들을 모두 포함하고 있다. 따라서, 화상처리기법에서는 이러한 노이즈들을 제거하는 작업이 필수적이다.

이 논문에서는 얻어진 화상에 대하여 두 차례의 필터처리를 실시하였다. 1차 필터처리에서는 영상분할기법⁴⁾에 의해 배경과 표점을 분할하였다. 이어서 2차 필터처리에서는 표점의 위치 및 크기를 보정한 후 정량화과정을 실시하였다. 정량화 단계에서는 추출된 표점만을 이용하여 표점의 중심좌표를 구하였다. 이때, 중심좌표는 화소크기보다 작은 sub-pixel를 이용하여 산출하였다.

2.3 요소분할 및 변형률 계산

이 논문은 추출된 표점위치를 이용하여 표점위치 근방에서의 변형률 분포를 추정하는 것이 목적이다.

따라서, 추출한 이동변위량을 변형률로 변환하는 변위-변형률 변환모듈이 필요하게 된다. 이 논문에서는 유한요소법의 변위-변형률 관계를 이용하여 계측된 표점의 이동변위량과 변형률과의 변환모듈을 개발하여 변형률을 추출하였다. 사용된 요소로는 얻어진 표점의 좌표위치를 절점으로 하는 사각형요소를 이용하였다. 응력상태는 2차원 평면응력상태를 기준으로 하였으며 계산에 사용된 변위-변형률관계식은 식 (1)과 같다. 또한, 계산된 변형률의 분포도를 작성하기 위해 일반적인 범용 후처리 프로그램을 이용하여 변형률분포도를 작성하였다.

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

3. 화상계측기법의 허용오차 검증

3.1 검증 방법

이 연구에서는 화상계측기법의 허용오차를 실험적으로 검증하고 계측기법의 타당성을 검토하기 위해 일축압축 공시체를 이용한 예비검정실험을 실시하였다. Fig. 2는 검정실험에 사용된 일축압축공시체 (150 × 300 mm)를 나타내고 있다. Fig. 2와 같이 공시체 중앙에 게이지길이 60 mm의 콘크리트 게이지를 부착하였다. 또한, 화상계측을 위해 총 14개의 표점을 설치하였으나 게이지와 동일 위치에서의 변위 및 변형률을 검정하기 위해 a-a'선 그리고 b-b'선 (a-b간 거리 50 mm)의 변위차로부터 구한 수직변위의 평균값을 이용하여 변형률을 구하고 이를 검정에 사용하였다.

총 6개의 공시체에 대해 촬영을 실시한 후, 화상처리과정을 거쳐 콘크리트 게이지와의 변형률오차 및 응력-변형률관계를 도출하였다

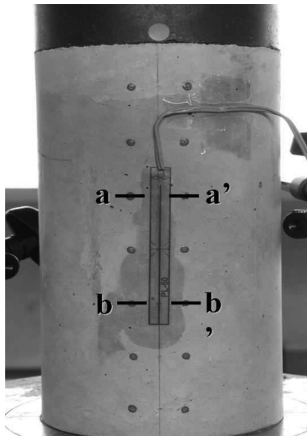


Fig. 2 Target positions and concrete gauge of uniaxial compression specimens

3.2 검정 결과

콘크리트 게이지 및 화면처리에 의한 응력-변형률관계를 Fig. 3에 나타내었다. 실험 결과, 최대응력 이전뿐만 아니라 최대응력상태에 있어서도 콘크리트게이지의 변형률값과 거의 일치하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4에는 콘크리트 게이지와 화상계측에 의해 구해진 변형률 분포를 나타내었다. 변형률의 계측오차가 약 1000 μ 오차를 가지는 것을 알 수 있다. 본 실험에 사용된 표점내의 pixel 수는 약 2,750 pixel 정도이다. 1 pixel은 약 0.0556 mm의 변위값을 가지며 변형률로 변환했을 경우 변형률의 해상도는 1,100 μ 이다. 그러므로 1,000 μ 정도의 변형률은 해상도의 오차범위 내에 드는 것을 알 수 있다. 더욱이, 이 논문에서 변형률을 추정하고자 하는 전단압축파괴형 보의 경우, 10,000 μ 이상의 대변형을 나타내는 경우가 대부분이므로 본 예비검정실험에서 나타난 오차는 허용오차범위 내에 있다고 판단된다.

따라서 이 논문에서는 화상계측기법의 변형률에 대한 허용오차범위를 $\pm 1,000 \mu$ 내외로 정하였으며 이를 전단압축파괴형 보의 변형률 허용오차로 사용하였다.

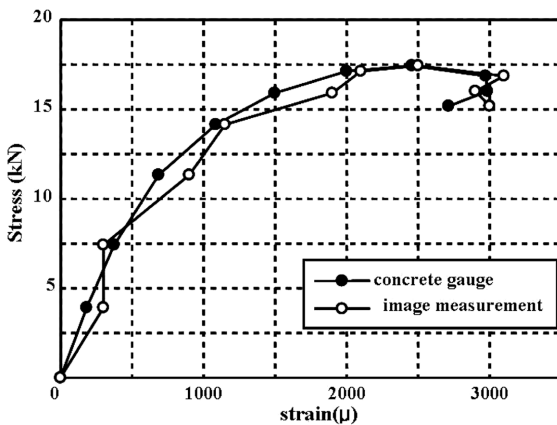


Fig. 3 Comparison of the stress-strain relationship between concrete gauge and image measurement

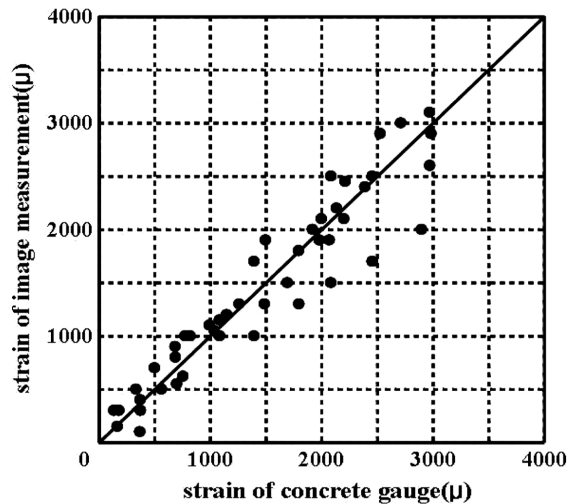


Fig. 4 Strain distribution with concrete gauge and image measurement on uniaxial compression tests ($R^2 = 0.8954$)

4. 화상계측기법에 의한 전단압축파괴형 보의 변형률 추정

4.1 실험 개요

이 논문에서는 화상계측기법을 이용한 파괴영역의 크기와 파괴영역 내에서의 국부변형률 분포를 추정하기 위해 전단압축파괴 형태의 전형적인 RC깊은 보를 대상으로 실험을 실시하였다.

4.2 실험체 형상 및 재료특성

실험체의 형상과 크기는 Fig. 5(a)에 도시하였다. 실험체 단면은 폭이 150 mm이며 유효깊이 200 mm의 직사각형 단면으로 하였으며, 전단-지간비는 약 1.5의 단순보로 설계하였다. 주철근은 D29(SD30)철근 2개를 배근하였으며 전단압축파괴 영역의 예측이 가능하도록 하기 위해 전단철근을 한쪽에만 배근하였다. 전단철근으로는 D10(SD30)철근을 사용하였으며 50 mm 간격으로 배근하였다. 하중재하판의 폭은 45 mm로 하였으며 실험체는 모두 2분을 제작하였다. 사용된 콘크리트의 배합특성 및 재료특성은 Tables 1, 2와 같다.

4.3 표점의 설치

이 논문에서는 Fig. 5(b)와 같이 총 117개의 표점을 설치하였다. 카메라 1대당 45개의 표점을 제작하여 설치하였으며 취득된 화상데이터 간의 임계보정을 위해 총 18개의 표점을 중복하여 촬영하였다.

표점은 파괴시의 대변위로 인한 표점의 탈락을 방지하기 위해 Fig. 6과 같은 철제표점을 제작하여 부착하였다. 직경 3 mm의 드릴을 이용하여 깊이 30 mm의 구멍을 만

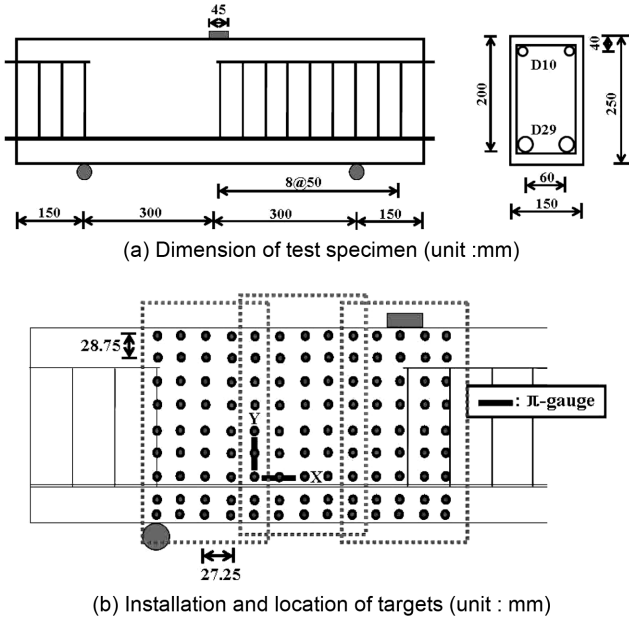


Fig. 5 Dimension of test specimen and target locations

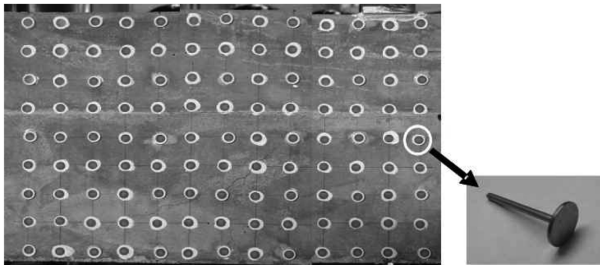


Fig. 6 Installed steel-nail type target

Table 1 Mix proportion

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)			
		W	C	S	G
55	46.3	173	318	787	981

Table 2 Material properties of concrete

	Concrete
Elastic modulus (GPa)	25.0
Compressive strength (MPa)	29.1
Tensile strength (MPa)	2.1

든 후, 에폭시를 이용하여 실험체와 일체가 되도록 고정하였다. 또한, 표점의 인식률을 높이기 위해 철제표점의 상부에는 직경 8 mm의 붉은색 원형 스티커를 부착하였다. 일반적으로 화상데이터의 처리 시 붉은색의 인식률이 높은 것으로 알려져 있다.^{2,3)}

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 하중-변위 관계 및 균열진전 상황

Fig. 7에 2분의 실험체에 대한 하중-변위 관계를 나타

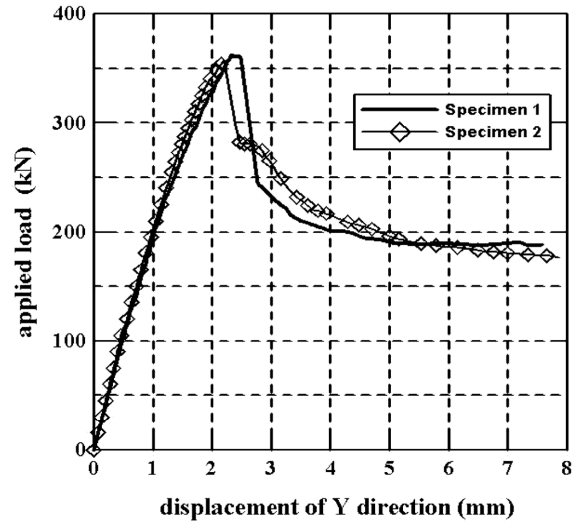


Fig. 7 Relationship with applied load and vertical displacement on deep beam tests

내었다. 2분의 실험체 (최대하중 : 357.71 kN, 361.74 kN) 모두 거의 동일한 하중-변위 관계를 나타냄으로 이 논문에서는 이 중 하나에 대한 화상처리 결과를 도시하였다.

Fig. 8의 카메라 이미지는 실험 과정 중 CCD 카메라로부터 취득된 화상데이터를 나타내었다. 1.50 mm (290.0 kN, 최대하중의 약 80% 수준), 2.45 mm (361.7 kN) 그리고 4.30 mm (199.4 kN)의 수직변위가 발생 시 취득한 화상데이터이다.

하중 160 kN 이전까지는 일정한 하중증가를 보였으나, 하중 160 kN 이후 순간적인 사인장균열이 보의 복부에서 관찰되었다. 그러나 이후, 일정량의 하중이 증가하여도 사인장균열의 진전을 보이지 않았으며 사인장균열의 폭 또한 일정한 값을 유지하였다 (Fig. 8(a) camera image).

그러나 최대하중 이후, 하중의 급격한 감소를 나타내었으며 하중재하판 부근에서 압축파괴에 의한 압축균열이 발생하였다 (Fig. 8(b) camera image). 압축균열의 발생 이후에는 사인장균열의 균열폭이 확대됨과 동시에 다수의 균열이 대각선 방향으로 발생 (Fig. 8(c) camera image) 하여 전형적인 전단압축파괴 형태의 거동을 나타내는 것을 확인하였다.

5.2 변위 및 변형률 진전 추이

이 연구에서는 화상처리기법에 의한 변형률값의 신뢰성 평가를 위해 2개의 π -계이지를 수평방향과 수직방향으로 부재의 후면에 설치하였다. 즉, π -계이저로부터 얻어진 변형률값과 같은 위치에 놓인 표점으로부터 구한 변형률을 비교하여 화상처리기법의 신뢰성 및 타당성을 검토하였다.

Figs. 9에 부재 축방향 (X방향) 및 부재 수직방향 (Y방향) 에 설치한 π -계이저로부터 얻어진 변위 및 변형률과 동일위치의 표점을 화상처리하여 얻어진 결과를 나타내었다. 실험 결과 π -계이저로부터 얻어진 변형률값과 화

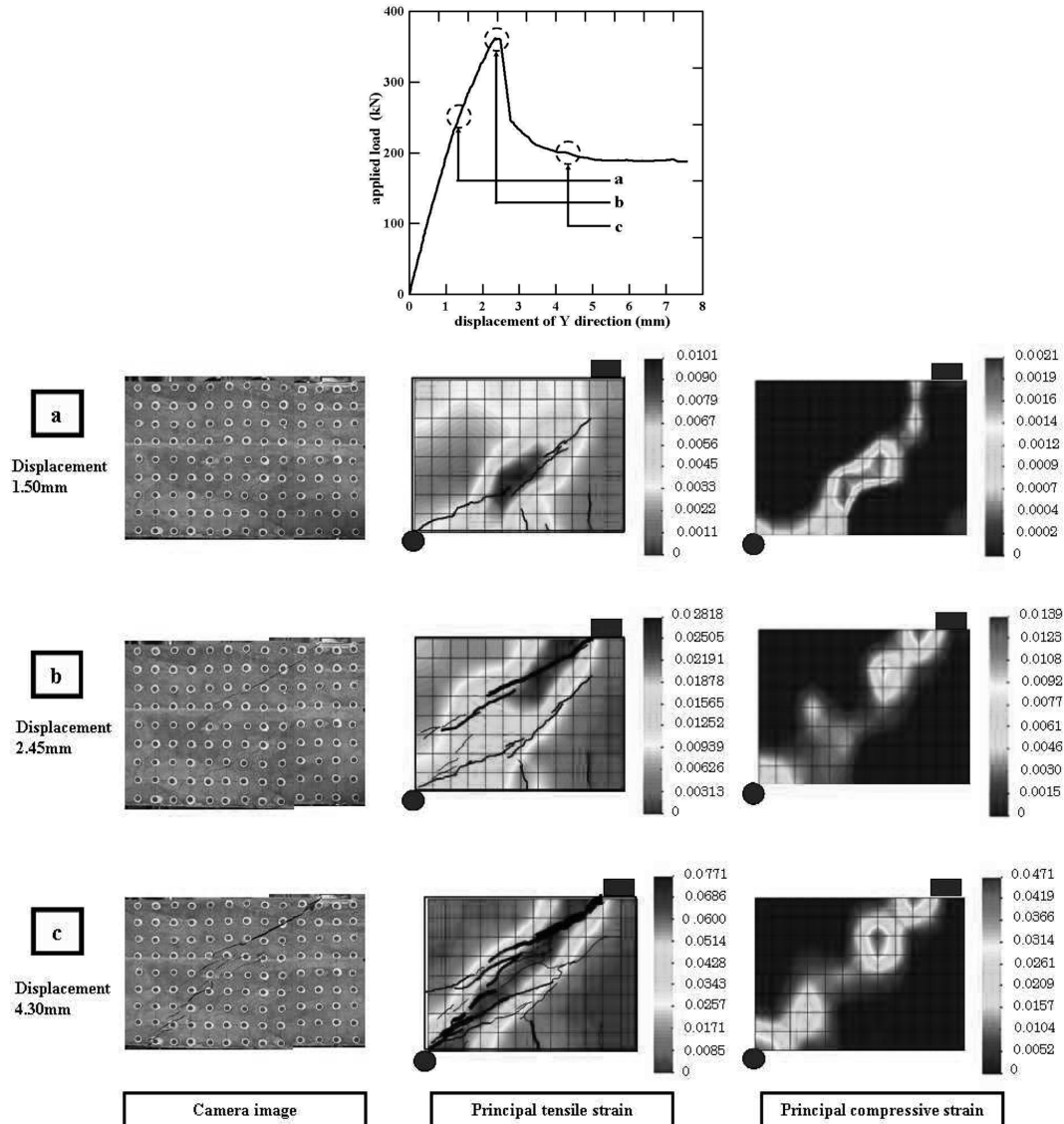


Fig. 8 Results of image processing

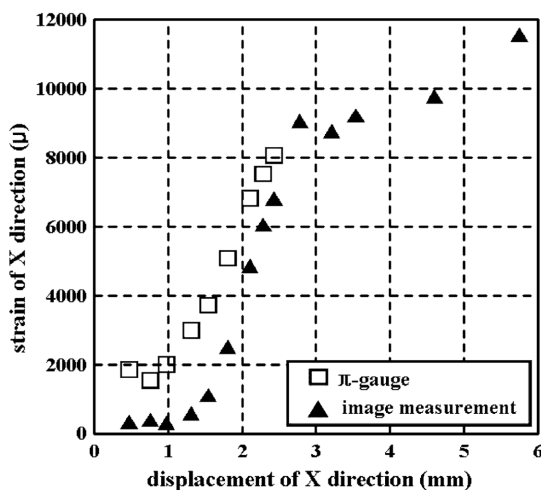


Fig. 9 Comparison of strain development between π -gauge and image measurement on the X direction

상처리기술을 통해 얻어진 변형률값이 유사한 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

π -게이지를 통해 취득된 변형률의 경우 최대하중 이후 즉, 수직방향변위 약 4.0 mm 이후, π -게이지의 파손 및 π -게이지를 고정시킨 콘크리트 피복부의 파손 등으로 인하여 더 이상의 데이터 취득이 불가능하였으나, 화상처리기술의 경우, 부재의 변형상태와 상관없이 변형률의 취득이 가능하여 post-peak 영역 및 최종 파괴상태에서의 변형률 추이를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

5.3 변형률 분포도를 통한 실험체의 거동 추정

Fig. 8에는 화상처리기술을 통해 얻어진 주인장변형률 및 주압축변형률 또한 나타내었다. 도시한 범례는 취득된 시점에서의 주변형률의 최대값과 최소값을 나타낸다.

주인장변형률 분포의 경우, 사인장균열 발생 후 주인장 변형률의 최대값 및 발생 위치를 비교적 정확히 파악하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다 (Fig. 8(a) principal tensile strain). 또한, 하중의 급격한 감소 이후, 하중재하 판 근처에서 나타나는 사인장균열로 인한 주인장변형률의

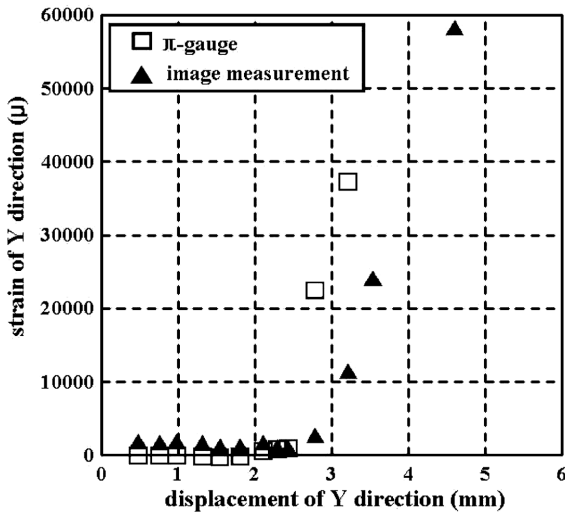


Fig. 10 Comparison of strain development between π -gauge and image measurement on the Y direction

최대값 및 발생위치 등 변형률의 위치변화도 파악할 수 있다는 것을 알 수 있다 (Fig. 8(b) principal tensile strain).

손상이 진행됨에 따라 하중재하판에서 지지점까지 주인장변형률이 일정한 값을 가지는 사인장균열띠가 형성되었을 경우, 화상처리방법에 의해 취득된 주인장변형률의 분포와 유사한 형상을 하고 있는 것을 알 수 있다 (Fig. 8 (c) principal tensile strain).

한편, 주압축변형률 분포의 경우, 사인장균열의 발생 이후 하중재하판에서 지지점까지 압축스트럿이 형성되어 있는 것을 화상처리방법을 통해 확인할 수 있다. 최대하중 직전까지도 압축스트럿의 폭은 거의 변화가 없었으며 주압축변형률의 절대값만이 증가하였다 (Fig. 8(a) principal compressive strain).

하중이 급격히 감소하는 경우, 주압축변형률 분포가 하중재하판과 지지점에 국부화되어 나타나는 것을 화상처리방법에 의한 변형률 분포로 알 수 있었다 (Fig. 10(b) principal compressive strain). 더욱이, 하중재하판과 지지점 근처 그리고 스트럿 내부 등 국부적 영역에 한해서 주압축변형률이 10,000 μ 정도의 압축스트럿이 형성^{4,7)}되는 것을 파악할 수 있었다 (Fig. 8(c) principal compressive strain).

6. 결 론

이 연구에서는 전단압축파괴형 보에 대해 화상처리방법을 이용한 국부변형률 분포 및 국부변형률 분포도를 작성하고 이를 통해 실험체의 거동을 추정하였다. 이 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일축압축공시체를 이용한 예비검정실험을 실시하여 화상처리방법의 신뢰성을 검토한 결과, 접촉계측기법에 비해 변형률 해상도에 있어 1,000 μ 전후의 오차를 보였다. 이는 이 논문에서 파악하고자 하는 전

단압축파괴형 보의 변형률 분포를 추정하는데 있어 수용할 수 있는 허용오차 범위에 있는 것으로 판단된다.

- 2) 비접촉 계측기법인 화상처리방법은 일반적으로 사용하는 접촉계측기법과 비교할 때 비교적 신뢰할 수 있는 계측값을 취득하는 것이 가능하나 계측값의 정확도와 정량화는 카메라의 해상도 및 표점의 개수 등에 비교적 많은 영향을 받는 것을 확인하였다. 만약, 표점 내의 화소수를 증가시킬 경우 변형률의 해상도도 함께 증가하여 보다 정확한 계측이 가능할 것으로 판단된다.
- 3) 화상처리방법을 이용할 경우, RC구조물의 극한파괴영역에서의 변형률 분포 추이와 이에 따른 구조물의 손상위치 등을 시각적으로 파악하는 것이 가능하다.
- 4) 화상처리방법을 통해 얻어진 변형률 분포를 이용할 경우, RC구조물의 거동을 합리적이며 비교적 정확히 파악할 수 있었으며 극한파괴영역에서의 파괴영역 및 손상 정도에 따른 변형률의 추이를 계측하는 것이 가능할 것으로 판단된다.
- 5) 극한파괴영역에서의 변형률 추이를 보다 정확히 계측하기 위해서는 향후 일련의 데이터 정량화를 위한 보정계수의 도입, 화상데이터의 후처리 방법 등 정확도를 향상시키기 위한 다양한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었고 (This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2007.) 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Nakamura, H. and Higai, T., *Compressive Failure Energy and Fracture Zone Length of Concrete*, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, 2001.
2. Bazant, Z. P. and Pijaudier-Cabot, G., "Nonlocal Continuum Damage, Localization Instability and Convergence," *J. Appl. Mech.*, Vol. 55, 1988, pp. 287-293.
3. Bazant, Z. P. and Planas, J., *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quas-Brittle Materials*, CRC Press, 1998.
4. 酒井理哉ほか, "畫像計測を利用した鐵筋コンクリートのひずみ計測の試み," 土木學會第56回年次學術講演會, CS3-002, 2001, pp. 164-165.
5. 權庸吉ほか, "せん斷壓縮破壊するはりの局所ひずみ分布と積分型非局所構成則の適用," 日本コンクリート工學年次論文集, 第28券第2号, 2006, pp. 775-780.
6. 上田尚史ほか, "せん斷破壊を生じるRCはりおよび柱のエネルギー吸収と破壊プロセス," 日本コンクリート工學年

요 약 연화재료의 변형률 국부화 거동에 따른 파괴영역과 파괴영역 내에서의 변형률 추이는 구조물의 극한거동에 큰 영향을 미치지만 파괴영역의 예측과 영역 내에서의 변형률을 정량화하는 것은 실험적으로 명확히 구명되어 있다고 보기 어렵다. 이 연구에서는 국부화된 파괴영역 및 그 영역 내에서의 변형률 분포 추이를 추정하기 위해 화상처리기법을 이용하였다. 화상처리기법의 신뢰성 및 타당성을 검증하기 위해, 일축압축공시체를 대상으로 화상처리기법을 이용하여 변형률을 추정하고, 이를 콘크리트 게이지로부터 취득한 변형률과 비교분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 전단압축 파괴형 보의 정적파괴실험에 화상처리기법을 적용하여 실험체의 거동에 따른 주인장변형률 및 주압축변형률의 분포도를 작성하였다. 마지막으로 작성된 분포도를 이용하여 국부화영역 및 국부변형률을 추정하였다. 실험 결과, 화상처리기법을 이용하여 취득한 파괴영역 내에서의 변형률 분포 추이는 비교적 정확히 실험체의 거동을 예측할 수 있었으며 손상 정도에 따라 비교적 합리적인 국부변형률값을 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 화상처리기법, CCD카메라, 변형률 국부화, 변형률 연화 거동, 국부변형률