

## 무아래 간섭계를 이용한 복합재 보강 콘크리트의 변형해석

주진원\* · 채수은\* · 신동일\*

(2001년 5월 15일 접수, 2001년 10월 24일 심사완료)

### Deformation Analysis of Composite-Patched Concrete Using Moiré Interferometry

Jinwon Joo, Soeun Chai and Dongil Shin

**Key Words:** Composite Patched Concrete(복합재 보강 콘크리트), Moiré Interferometry(무아래 간섭계), Flexural Test(굽힘 시험), Fringe Pattern(간섭 무늬)

#### Abstract

Many of aged and damaged concrete structure have been revitalized with composite reinforcement. Flexural behaviors of composite-patched concrete specimens are characterized by high-sensitivity moiré interferometry. The three-mirror, four-beam interferometry system and a compact loading system are used for obtaining fringe patterns representing whole-field contour maps of in-plane displacements. It is seen from the calibration test for the loading system that the measured bending displacement is in excellent agreement with the displacement calculated by the beam theory. The crack opening displacement as well as the bending and the horizontal displacement for the notched and unnotched specimen are investigated. The results also show that the notched specimen reinforced by a composite sheet has sufficient stiffness and strength compared to the original concrete specimen.

#### 1. 서론

교량, 지하구조물 등의 건축 구조물은 피로하중, 과도하중, 지진, 열악한 환경으로 인하여 손상을 입게 될 가능성이 많다. 손상을 입은 구조물은 보수를 통하여 문제점을 해결한 뒤 계속 사용하는 경우가 대부분이다. 콘크리트 구조물에 생겨나는 균열은 균열진전으로 인한 파손의 원인이 될 수 있을 뿐 아니라, 수분 침투 및 부피증가로 인한 콘크리트의 응력집중 현상이 나타날 수 있으므로 이에 대한 보수는 필수적이다.

균열을 보수하기 위하여 지금까지는 표면에 철판으로 조립하거나 접합하여 보강하는 방법이 사용되어 왔다. 금속판 접합에 비교하여 복합재료를 이용한 접합방법은 재료의 무게에 비해 기계적인 특성이 우수하고, 곡면 등 복잡한 표면에 잘 이용될 수 있으며 표면처리가 쉽고 방향성이 있어 균열 등의 파손에 대한 수리효과가 좋다는 장점을 가지고 있다. 일본 등 선진국에서는 복합재료 접합에 대한 연구<sup>(1~3)</sup>와 실제적용이 활발하게 진행되고 있다.

콘크리트에 복합재료 적층판을 접합한 구조물이 하중을 받았을 때는 이종 재료의 재료상수 값의 차이로 인하여, 복합재료 적층판과 피접합체 사이에 응력집중이 발생할 수 있다. 특히 균열 주위에는 복잡한 변형거동을 보이므로 보수된 구조물의 신뢰성 판단을 위해서는 정확한 변형 및 응력해석이 필요하다. 유한요소 해석 등 수치적인 방법으로 이와 같은 해석을 수행할 수 있으

† 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부

E-mail : jinwon@chungbuk.ac.kr

TEL : (043)261-2456 FAX : (043)263-2441

\* 충북대학교 대학원

나, 수치적인 방법에서는 모델링된 요소 크기와 종류에 따라 최대값이 상당히 달라질 수 있으므로 이에 대한 판단이 필요하며, 또한 적용된 수치해석법의 신뢰성을 검증하기 위해서도 정확한 측정방법이 필요하다. 변형이나 응력을 측정하는 실험적인 방법으로는 스트레인 게이지법, 광탄성법,<sup>(4)</sup> ESPI법<sup>(5)</sup> 등이 각각의 장점을 가지고 잘 이용되어 왔다. 스트레인 게이지법은 어느 한 지점의 작은 면적에 걸친 평균 변형률을 측정할 때 잘 이용되고, 광탄성법은 시편을 광탄성 재료로 따로 만들어야 하므로 복합재료로 접합된 콘크리트의 응력해석에는 이용이 어려우며, ESPI법은 주로 면외변위를 측정하고 시편의 표면에서 반사된 빛을 간섭시키므로 콘크리트와 같이 표면이 거친 재료에는 적당하지 않다.

무아래 방법(Moiré method)은 1954년에 처음 개념이 소개된 후로 많은 연구자들에 의하여 기술이 개선되고 응용되어 왔다. 무아래 방법은 평면 무아래, 그림자 무아래, 투영 무아래 등의 방법이 사용되어 왔으며, 이 방법들은 기본적으로 기준 격자와 시편 격자를 사용하는 기하학적인 방법이다. 최근에는 레이저를 사용하는 무아래 간섭계 기술이 개발되어 아주 높은 정밀도를 가지고 응용이 되고 있다. 이 방법은 회절 격자를 사용하고 광학적인 간섭을 이용하여 변형에 관한 정보를 얻어낼 수 있는 방법<sup>(6)</sup>이다. 무아래 간섭법은 정밀도가 대단히 높고 비접촉으로 전체영역의 변형 상태를 한번에 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 무아래 간섭법은 복합재료의 국부변형해석,<sup>(7,8)</sup> 균열해석,<sup>(9,10)</sup> 이중접합재의 변형거동,<sup>(11)</sup> 전자 패키지의 열변형해석<sup>(12~14)</sup> 등에 효과적으로 이용되어 왔다.

본 논문에서는 복합재료로 보강된 콘크리트 시편에 대하여 굽힘하중에 의한 변형거동과 변위분포를 무아래 간섭법에 의하여 측정하고 정량화하고자 한다. 이를 위하여 레이저를 이용한 무아래 간섭계 장치와 하중장치를 본 실험의 목적에 맞게 구성한다. 구성된 하중장치의 신뢰성을 검증하기 위하여 금속시편에 대한 3점 굽힘시험을 수행하고 이 간섭무늬를 해석하여 이론해와 비교한다. 또한 균열이 없는 경우와 균열이 있는 경우의 시편 및 복합재료 접착 후의 시편에 대한 3점 굽힘시험을 수행하여 간섭무늬를 얻고 이를 해석한다.

## 2. 무아래 간섭법의 원리 및 광학 시스템 구성

### 2.1 무아래 간섭법의 원리

무아래 간섭법(Moiré interferometry)은 빛의 회절과 간섭이라는 두 가지 성질을 주로 이용하여 평면 내에 정해진 2축의 변위성분을 나타내는 간섭무늬를 얻어내는 광학적인 실험방법이다.

무아래 간섭법에서는 아주 작은 간격(보통 1200 lines/mm)의 회절격자(diffraction grating)를 시편에 접착하여 시편과 함께 움직이도록 한다. 이와 같은 회절격자에 빛이 입사되면, Fig. 1과 같이 그보다 작은 강도를 가지는 여러 개의 빛으로 나누어져 반사되며, 그 나누어진 빛은 정해진 윗한개의 각도를 가지고 진행한다. Fig. 1(a)와 같이 빛이 회절격자 표면의 법선과  $\alpha$ 의 각도를 이루며 입사되었다면, 반사되는 각도  $\beta_m$ 은 빛의 파장  $\lambda$ 와 회절격자의 주파수  $f_g$ 에 따라 달라지며, 다음과 같은 식에 의하여 결정된다.<sup>(6)</sup>

$$\sin \beta_m = \sin \alpha + m \lambda f_g \quad (1)$$

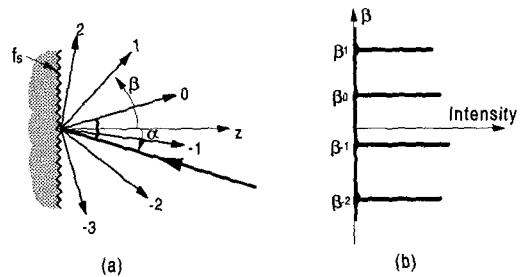


Fig. 1 Diffraction orders of diffracted beams for a reflection grating and the intensity of light

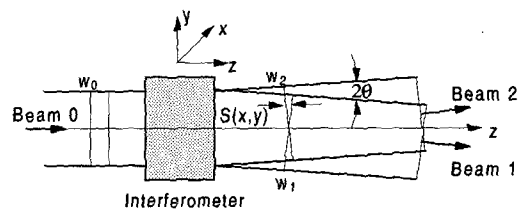


Fig. 2 Two beam interferometry with a relative angle  $2\theta$

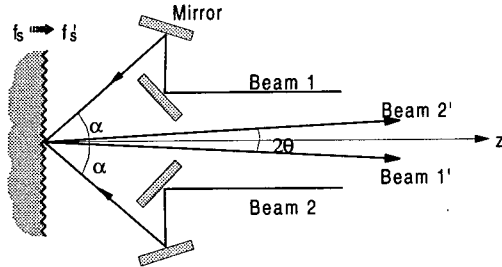


Fig. 3 Schematic diagram of an interferometer for moiré interferometry

한 빛에서 나누어진 coherent한 두 개의 빛에 경로차이가 생기면 이것들은 간섭을 일으켜 간섭무늬를 만들게 된다. Fig. 2와 같이 평행광 Beam 0가 프리즘 등과 같은 광학장치를 통과하여  $2\theta$ 의 상대각도를 가지는 두 개의 평행광 Beam 1과 Beam 2로 나누어졌다고 하면, 한 평면  $(x, y)$ 에서는 광 진행거리(optical path length)의 차이로 인하여 x축과 평행한 같은 간격의 간섭무늬가 생겨나게 된다.

무아레 간섭법은 앞에서 설명한 빛의 회절과 간섭의 성질을 함께 이용한다. Fig. 3과 같이 시편에 접합된 회절격자에 같은 광원으로부터 나누어진 두 개의 평행광이  $\pm \alpha$ 의 각도로 입사되도록 하여 각각에 대하여 회절된  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 이  $0^\circ$ 가 되도록  $\alpha$ 를 조정하면 두 광선은 같은 방향으로 진행하므로 간섭이 일어나지 않는다. 여기서, He-Ne 레이저의 파장이 632.8 nm이고, 회절격자의 주파수가 1200 lines/mm인 경우에는 식 (1)에 의하여  $\alpha$ 는  $49.4^\circ$ 가 된다. 시편이 변형하여 시편 위에 부착된 회절격자의 주파수  $f_s$ 가 변하게 되면 식 (1)에 의하여  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 이 Fig. 3과 같이 z축에 대하여  $0^\circ$ 가 아닌  $\theta$ 를 갖게 된다. 이러한 두 광선은 간섭무늬를 생겨나게 하며, 회절격자의 주파수가 더 크게 변하면  $\theta$ 가 커지며 그에 따라 간섭무늬의 간격은 좁아지게 된다. 이러한 간섭무늬를 해석하면 재료 표면의 변형분포를 알 수 있다.

Fig. 3에서 설명한 변형측정원리는 x 방향의 변위 U를 측정하기 위한 것이다. 평면 내의 두 방향 변위 U, V를 동시에 측정하기 위해서는 직교형으로 흠이 나 있는 회절격자를 시편에 접착하고 빛을 4방향으로 입사시키는 시스템을 구성하여야 한다. 이렇게 얻어지는 간섭무늬들은 시편

의 표면에서 각각 변위 U와 V에 대한 등변위곡선을 나타낸다. 평면의 각 점에서의 변위는 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$U(x, y) = \frac{1}{2f_s} N_x(x, y) \quad (2)$$

$$V(x, y) = \frac{1}{2f_s} N_y(x, y)$$

여기서  $N_x(x, y)$ 와  $N_y(x, y)$ 는 위치에 따라 분포하는 간섭무늬의 차수이다. 일반적으로  $f_s=1200$  lines/mm이므로 인접한 간섭무늬차이는  $0.417 \mu\text{m}$ 의 변위를 나타낸다.

평면내의 변형률을 계산하여야 할 때에는 다음 식을 이용할 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} \approx \frac{1}{2f_s} \left[ \frac{\Delta N_x}{\Delta x} \right]$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} \approx \frac{1}{2f_s} \left[ \frac{\Delta N_y}{\Delta y} \right] \quad (3)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \approx \frac{1}{2f_s} \left[ \frac{\Delta N_y}{\Delta x} - \frac{\Delta N_x}{\Delta y} \right]$$

## 2.2 광학시스템의 구성

Moiré 간섭법을 위한 광학시스템은 빛을 퍼뜨려서 평행광을 만들어 무아레 간섭계에 진행시키는 빛 입사장치, 평행광을 4개의 각도로 나누어서 시편 회절격자에 입사하기 위한 무아레 간섭계 및 형성된 간섭무늬를 기록하기 위한 기록장치의 3가지로 구성된다. 무아레 간섭계는 기본적으로 수평방향(xz 평면)과 수직방향(yz 평면)에서 각각 2개의 평행광이 시편의 회절격자에 같은 입사각을 가지고 서로 반대편에서 입사되어야 하는 조건을 만족하여야 한다. 이러한 광학시스템을 구성하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으나, 본 논문에서는 비교적 간단하게 실험장치를 구성할 수 있고, 정렬이 자체 조정될 수 있는, 3개의 거울을 이용한 간섭계를 구성하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 구성한 광학장치를 도식적으로 보여주고 있다. 30 mW의 He-Ne 레이저에서 나온 빛은 렌즈와 핀홀로 이루어진 빔 확장기 (beam expander)를 통하여 구면 파면을 가지고 진행한다. 이 빛을 평행광(collimated beam)으로 만들기 위하여 직경 6 in, 초점거리 48 in의 곡면거울(parabolic mirror)을 사용하여 빛을 반사시켰다. 곡면거울에서 일어나는 파면굴절을 줄이기 위해서는 거울에 입사되는 빛의 각도를 가능한한 작

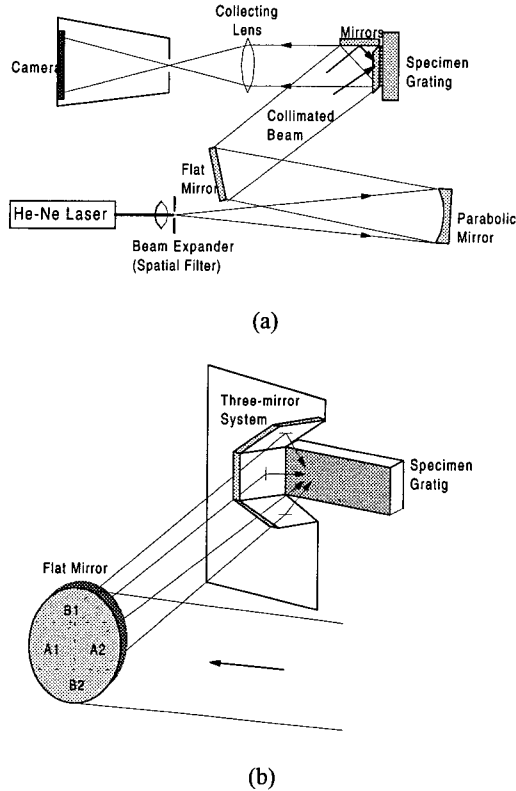


Fig. 4 Optical arrangement for three-mirror, four beam interferometer

계 하여야 한다. 이를 위하여, 평행광을 직접 시편에 입사시키지 않고 직경 6-in 평면거울에서 반사되어 시편방향으로 진행하도록 하였다.

시편에 49.4°의 입사각으로 진행한 평행광은 Fig. 4(b)와 같이 4부분으로 나누어져서 회절격자에 도달한다. A2 부분에서 반사된 빛은 시편에 부착된 회절격자에 대하여 49.4°의 입사각을 가지고 직접 도달하며, A1 부분에서 반사된 빛은 시편과 90°로 세워진 거울에 반사되어 법선에 -49.4°를 이루며 회절격자에 도달한다. 이 두 빛은 U 변위를 나타내는 간섭을 일으킨다. 또한 B1과 B2에서 반사된 빛은 각각 ±45°로 위, 아래에 부착된 2개의 거울에서 반사되어 회절격자에 위, 아래 49.4° 방향으로 입사된다. 이 두 빛은 V 변위를 나타내는 간섭을 일으키도록 실험장치를 구성하였다.

3. 하중장치의 설계 및 특성시험

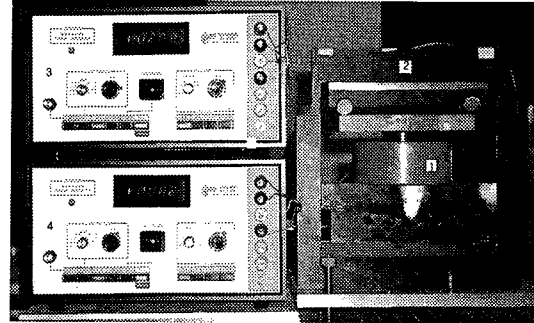


Fig. 5 Calibration test for the loading system with master loadcell

무아레 간섭계에서 시편에 변형을 일으키기 위하여 이용되는 하중장치는 상대 진동 등을 방지하기 위하여 광학테이블 위에 설치되어야 한다. 본 논문에서는 2개의 쉘기블럭을 이용하여 힘을 증폭시키는 하중장치를 고안하였다. Fig. 5와 같이 아래의 쉘기블럭을 왼쪽으로 이동시키면 위의 쉘기블럭이 위로 이동하면서 시편에 압축을 가하는 구조로 되어 있다. 하중의 최대치는 9.8 kN (1000 kgf)로 설계하였으며 시편과 볼트의 이송거리 제한 및 볼트에 가해주어야 할 힘을 고려하여 쉘기의 각도는 10°로 하였다. 하중의 측정은 로드셀과 같은 외부의 하중측정장치를 사용하지 않고 하중장치 자체의 프레임 변형을 이용하여 측정하였다. 양쪽 프레임의 변형을 스트레인 게이지 4개로 감지하고 이들로 구성된 브리지회로의 출력에 대한 특성시험을 수행하여 하중장치로 사용하였다.

위와 같은 하중장치에서 쉘기블럭들의 힘 평형 관계를 이용하면 볼트에 가해주어야 할 힘 Q와 시편에 가해지는 압축력 F 사이에 다음과 같은 관계가 구해진다.

$$Q = \frac{\sin \theta + 2\mu \cos \theta - \mu^2 \sin \theta}{\cos \theta - 2\mu \sin \theta - \mu^2 \cos \theta} F \quad (4)$$

시편에 최대하중 F=9.8 kN이 가해진다면 쉘기의 각도 θ=10°, 마찰계수 μ=0.1일 때, 볼트를 통하여 가해야 할 힘 Q는 3.84 kN으로 계산된다. 이 힘을 지탱할 수 있는 볼트는 M10 정도이며, 힘 조정을 세밀하게 하고, 하중을 감소시킬 때 백래쉬를 작게 하기 위하여 가는 나사를 사용하

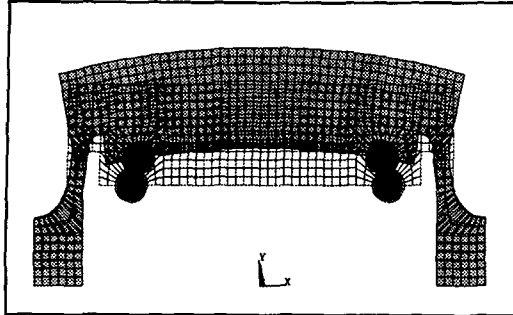


Fig. 6 Finite element mesh and the deformed shape of the sensing part of the loading system

여 최종적으로 선택된 볼트는 M10×1이었다. 하중장치의 프레임은 압축력을 받고 있는 블록들을 지탱해주고 하중측정의 감지부로 사용되는 외에 볼트의 암나사부로서 지탱하는 역할도 한다. 최대 하중에서 볼트의 접촉면압이 허용치 내에 있기 위하여 암나사부의 길이를 20 mm로 설계하였다. 이때 볼트를 돌려 썩기블럭을 진행시키기 위한 토크는 최대하중 9.8 kN에서 약 3.4 N.m로, 공구를 사용하면 손쉽게 토크를 가할 수 있는 것으로 설계되었다.

스트레인 게이지가 부착되어 하중을 측정할 감지부의 변형거동을 파악하고 변형률을 계산하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 모델은 Fig. 6과 같이 프레임의 윗 부분만을 대상으로 하였고 2차원 선형사각형 요소를 사용하였다. 사용하려는 재료는 니켈크롬몰리브덴 강 (SNCM 8종)이므로 탄성계수를 206 GPa, Poisson 비를 0.3으로 하였다. 연결되는 경계의 y 방향 변위를 구속하였고 시편과 접촉하는 2개의 하중점에 +y 방향으로 합계 9.8 kN의 힘을 가하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 위의 수평한 프레임은 4점 굽힘시편에서와 같이 굽힘변형이 일어났으며, 양쪽 단에서 발생한 회전각으로 인하여 감지부는 S자형으로 변형하였다. 따라서 감지부 쪽에는 전체적으로 y 방향으로의 인장변형과 함께 안쪽에는 인장변형이, 바깥쪽에는 압축변형이 중첩되는 형태를 보여서 감지부의 안쪽면에 가장 큰 변형률이 분포하였다.

앞에서 설계된 결과를 근거로 하중장치를 제작하였다. 프레임과 썩기 블럭은 탄성비제한도를 크게 하기 위하여 니켈크롬몰리브덴 강 (SMCN 8

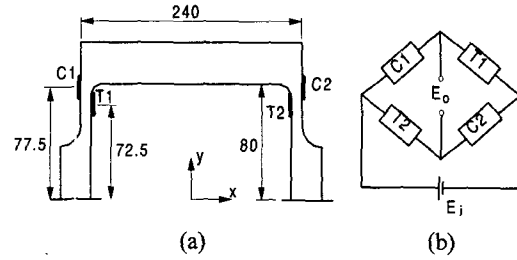


Fig. 7 Dimensions and positions of strain gages for the loading system

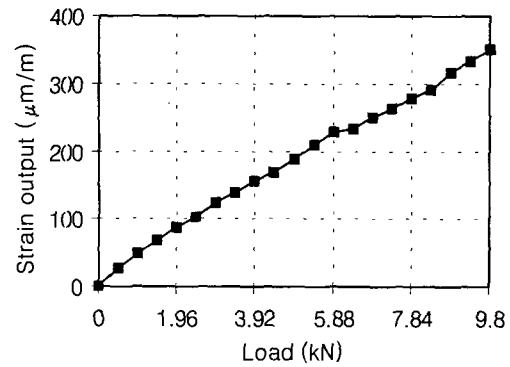


Fig. 8 Calibration curve of the loading system with master loadcell

종)으로 가공한 후 열처리하였다. 나머지 부품들은 일반 강으로 가공하였다. 미끄러짐이 일어나는 부분에서 발생하는 마찰을 최소한으로 줄이기 위하여 조립할 때 그리스 계통의 윤활제를 첨가하였다.

Fig. 7(a)와 같이 인장 변형률과 압축변형률이 가장 크게 발생되면서 부착작업이 용이한 지점에 스트레인 게이지 4개를 부착하고 Fig. 7(b)와 같이 완전결선 브리지 (full bridge) 회로를 구성하여 신호를 증폭시켰다.

이와 같이 제작된 하중장치의 특성 및 감도를 평가하기 위하여 정밀 로드셀을 이용하여 특성시험을 수행하였다. 사용한 로드셀은 최대용량 19.6 kN의 박형로드셀이다. Fig. 5와 같이 시편이 놓일 위치에 로드셀을 설치하고 이송볼트를 이용하여 단계별로 하중을 가하면서 로드셀과 하중장치에 부착된 스트레인 게이지 브리지회로의 출력을 측정하였다. 출력은 변형률 측정기를 이용하여 변

형률의 값으로 측정하였다. Fig. 8은 특성시험 결과를 보여주고 있다. 하중장치의 감도는 1 kN당 35.8  $\mu\text{m/m}$ 이었으며, 하중시의 비직선성은 5.2% FS (Full Scale)로 계산되었다.

#### 4. 실험방법

##### 4.1 시편준비

본 논문에서 구성한 무아래 간섭계의 광학장치와 하중장치의 신뢰성을 검증하기 위하여 콘크리트 시편을 실험하기 전에 먼저 금속시편에 대한 3점 굽힘 시험을 수행하여 그 결과를 이론해와 비교하였다. 시편은 연강으로 제작하였고 시편의 크기는 길이 200 mm, 폭 40 mm, 두께 20 mm로 하였다. 3점 굽힘시 양끝 지지점 간의 거리는 160 mm로 하였다. 회절격자를 부착하려는 표면은 연마하여 아주 매끄럽게 하였다.

미리 준비된 회절격자를 시편에 복제하여 1200 lines/mm의 주기를 가지고 직각으로 형성된 회절격자를 생성하였다. 복제하려는 회절격자는 유리 위에 에폭시가 골과 마루를 이루고 그 위에 두 겹의 아주 얇은 금속막이 증착되어 있는 구조로 되어 있다. 점도가 낮은 에폭시를 이용하여 회절격자를 시편에 접촉하면 골과 마루로 형성된 에폭시 위에 한겹의 금속막이 분리, 접촉되어 반사율을 높이게 된다. 본 광학장치에서 간섭무늬를 기록할 수 있는 면적은 약 40×40 mm 정도이므로 보의 중심을 포함한 한쪽 부분에만 회절격자를 복제하였다.

본 논문에서 대상으로 하는 콘크리트 시편은 재료의 균질성을 위하여 자갈을 포함시키지 않고 시멘트, 모래, 물을 1 : 2.6 : 0.6의 무게비로 혼합하여 제작하였다. 혼합된 재료를 시험편 형상의 틀에 부은 후, 로내에서 35℃의 온도로 14일간 양생하였다. 보강재로는 한국화이버사의 무수지 카본 UD NR72와 에폭시 LR67로 이루어진 두께 1 mm의 복합재료 단층판을 사용하였다.

Fig. 9는 복합재로 보강된 콘크리트의 3점 굽힘 시험편의 형상을 보여주고 있다. 복합재는 2층으로 적층하였고 미리 만들어놓은 결합의 깊이는 9 mm이었으며 복합재의 길이는 160 mm이었다. 본 실험에서 비교를 위하여 사용한 시편은 4가지이다. S1시편은 보강재와 결합이 없는 콘크리트 시편, S2 시편은 S1 시편에 결합을 만들어

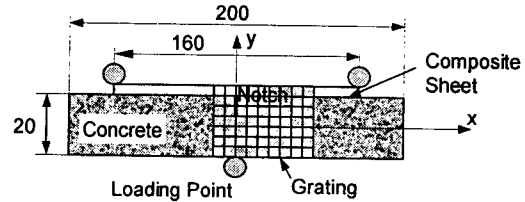


Fig. 9 Configuration of three-point bending concrete specimen with moiré grating

놓은 시편, S3 시편은 결합이 없고 보강재만 있는 시편이며 S4 시편은 S2 시편의 결합을 보강재로 보강한 시편이다. 회절격자는 앞의 금속시편과 같은 방법으로 입혔으며, 표면을 매끈하게 하기 위하여 에폭시로 구멍을 메운 후 polishing하였다.

##### 4.2 광학장치의 정렬 및 실험과정

본 논문에서 구성한 3 개의 거울을 이용한 무아래 간섭계의 정확한 정렬을 위해서는 다음과 같은 3가지 점이 검토되어야 한다.

- (1) 입사되는 빛은 정확하게 평행광인가?
- (2) 수직거울(Fig. 4(b)의 A1)은 시편과 정확히 직각을 이루는가?
- (3) 수평방향 변위 U를 나타내는 빛과 수직방향 변위 V를 나타내는 빛의 입사각은 정확하게 49.4° 인가?

위와 같은 조건을 만족시키기 위하여 광학소자들을 정확한 제 위치에 놓는 것은 거의 불가능하므로 본 논문에서는 다음과 같은 자체정렬방법을 사용하였다.

- (1) 곡면거울을 통하여 진행된 빛을 평면거울에서 반사하여 편홀로 되돌아가 모이게 한다. 이 지점에 돌아온 빛의 반경이 최소화되도록(점이 되도록) 곡면거울의 축방향 위치를 조정하면 평면거울에 도달한 빛이 평행광이 된다.
- (2) 시편에 직접 입사된 빛과 거울 A1에서 반사된 후 시편에 입사된 빛이 각각 회절되어 그중 0 차의 빛이 평면거울, 곡면거울을 통하여 되돌아와 모여진다. 이로 인하여 편홀이 있는 지점에 생기는 두 줄을 거울 A1을 조정하여 일치하도록 하면 시편과 거울 A1이 직각을 이루게 된다.
- (3) 두 빛의 시편에 대한 입사각이 정확히 맞는다면 각각 빛이 회절한 후  $\pm 1$  차의 빛은 정확하게 시편의 법선방향으로 진행하게 된다. 이 빛을

블록렌즈를 통과시켜 렌즈의 초점거리에 생기는 두 개의 점이 일치하도록 거울들의 위치를 조정하면 시편에 대한 입사각이 정확함을 뜻한다. 이 조정을 변위 U와 변위 V를 나타내는 거울들에 각각 수행하여 4개의 점이 모두 일치하게 되면 모든 정렬이 잘 된 상태라고 할 수 있다.

이와 같은 정렬상태에서 하중을 가하지 않아도 간섭계 전체와 시편의 상대 정렬문제 등으로 인하여 보통 간섭무늬가 생겨나게 된다. 이 간섭무늬가 없어지도록 하중장치전체 3방향의 회전각을 조정하면 이 상태가 변형이 없는 초기단계 (null field)가 된다.

회절격자에서 회절이 일어난 두 개의 빛은 간섭을 일으키면서 회절격자의 법선 방향으로 진행한다. 이 간섭무늬의 실영상을 얻기 위하여 초점거리 300 mm의 집광렌즈를 사용하고, 영상의 확대배를 크게 하기 위하여 거리조절이 가능한 폴라로이드 사진기를 사용하여 영상을 기록하였다. 이 때, 기록된 간섭무늬의 정보가 시편 앞에서의 간섭무늬 정보와 일치하게 하기 위하여 초점이 맞추어진 영상면(image plane)에서 간섭무늬를 기록하였다.<sup>(5)</sup>

### 5. 실험결과 및 토의

#### 5.1 금속시편의 실험결과 및 토의

금속시편의 중심부분에서의 U 변위와 V 변위를 나타내는 간섭무늬를 Fig. 10에 나타내었다. 간섭무늬 하나 사이의 변위는 식 (2)에서 설명한 바와 같이 0.417  $\mu\text{m}$ 에 해당한다. 하중이 증가할수록 변위가 커져 간섭무늬의 간격이 점점 좁아졌으며 하중의 증가에 따라 이 변위의 크기는 선형적으로 증가하였다. 간섭무늬의 모양은 전형적인 3점 굽힘에서의 변위 분포 모양을 보여주고 있다. Fig. 11은 하중이 5488 N인 한 경우에 대해서 중립축을 따라 변화하는 수직방향 변위(처짐)를 보이론과 비교하여 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실험값과 이론값은 대단히 잘 일치하여서 본 연구에서 구성한 광학장치 및 하중장치와 광학장치 정렬 등의 실험방법이 대단히 신뢰성이 높음을 알 수 있다.

Fig. 12는 U 변위를 나타내는 간섭무늬와 식 (2)로부터 계산된 굽힘변형률  $\epsilon_x$ 를 나타내고 있다. 이 변형률은 위, 아래 표면보다 2 mm 안쪽에

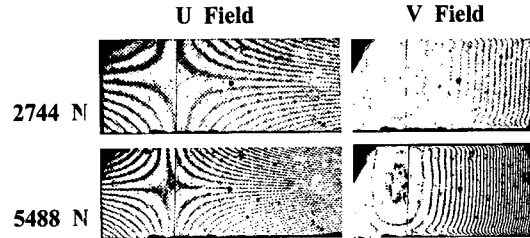


Fig. 10 Moiré interferometric fringes representing U and V displacement fields of the steel specimen induced by three-point bending

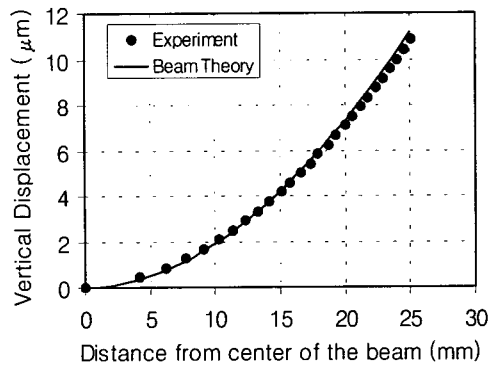


Fig. 11 Vertical displacement distribution of the steel specimen at the load level of 5488 N

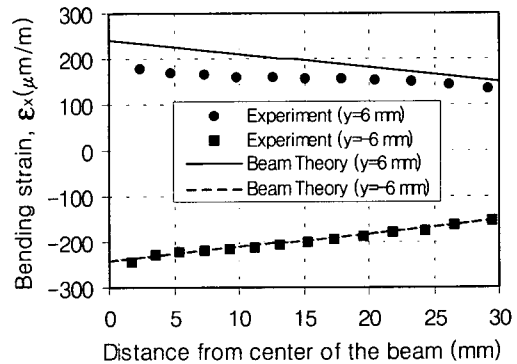


Fig. 12 Bending strain distributions of the steel specimen at the load level of 5488 N

위치한 선을 따라 계산되었다. 변형률은 변위의 미분값에 해당하기 때문에 변위에 대한 약간의 오차도 변형률에 큰 차이를 내게 할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 중립축 아래부분의 압축

변형률은 이론값과 아주 잘 일치하였고, 인장변형률이 발생하는 윗 부분에는 실험값이 이론값보다 약간 작게 나타났다. 5488 N일 때 U 변위를 나타내는 간섭무늬를 보면 중립축이 약간 위로 올라갔음을 볼 수 있는데 이것은 윗 부분의 인장 변형률이 약간 작게 나타났음을 의미한다. 이는 실험시 하중을 가하면서 시편이 y축을 중심으로 미세하게 회전한 때문으로 보인다. 이 경우 시편의 법선방향(z 방향)에서 볼 때, 압축변형을 하는 것처럼 보여서 이 압축변형과 굽힘변형이 중첩하였기 때문으로 판단된다.

5.2 콘크리트 시편에 대한 실험결과 및 토의

Fig. 13과 Fig 14는 각각 결함이 없는 콘크리트 시편(S1)과 9 mm의 결함이 있는 콘크리트 시편(S2)의 간섭무늬를 보여주고 있다. S1 시편의 경우는 금속시편에서와 같이 일반적인 3점 굽힘시험시 나타나는 간섭무늬와 유사하다. S2 시편의 경우는 하중이 증가할수록 균열의 진전으로 인하여 중립축(x 방향으로 U 변위의 변화가 없는 선)이 아래쪽으로 내려오고 있으며, 균열이 발생하는 시편 윗 부분에는 x 방향으로 변위 U의 변화가 거의 없어서(거의 수평을 이루고 있어서) 굽힘이 일어나기보다는 강제회전이 일어남을 알 수 있다. 결함부근에서 변위 U의 불연속이 분명히 나타나서 균열간격이 벌어지고 있음을 볼 수 있다. 또한 V 변위도 결함이 있는 윗 부분에는 간섭무늬의 간격이 일정하여 x의 변화에 따라 직선적으로 변화하고 있었으며 아랫 부분에는 간격이 점점 좁아져서 굽힘변형 곡선을 이루며 변형하고 있음을 알 수 있다. 같은 하중에서 S1시편에 비해 V 변위의 크기가 훨씬 큰 것으로 나타났다.

Fig. 15는 결함이 없는 복합재료 보강시편(S3)의 하중증가에 따른 간섭무늬를 보여주고 있다. 대략적인 간섭무늬의 모양은 S1시편의 경우와 비슷하나, 복합재료의 강한 탄성계수로 인하여 변형이 줄어들고 중립축이 위쪽으로 이동하였음을 볼 수 있다. U 변위를 보면 중심선 부근의 복합재와 콘크리트 접합부 바로 아래에 변형률이 집중되어 1470 N의 하중이 넘어가면서 균열이 생기는 것을 알 수 있다. 1960 N에서는 이 균열이 커져서 간섭무늬 14-15 차수의 불연속이 생겨나 결함의 폭 증가가 6 μm 정도되는 것을 볼 수 있다.

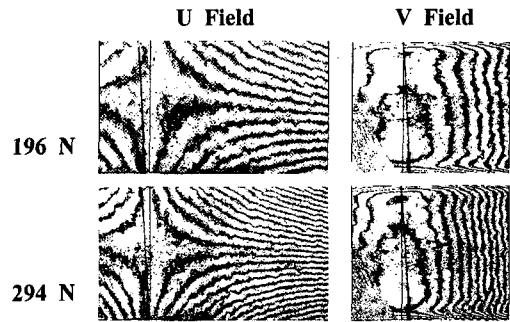


Fig. 13 Moiré fringes of the unnotched concrete specimen induced by three-point bending

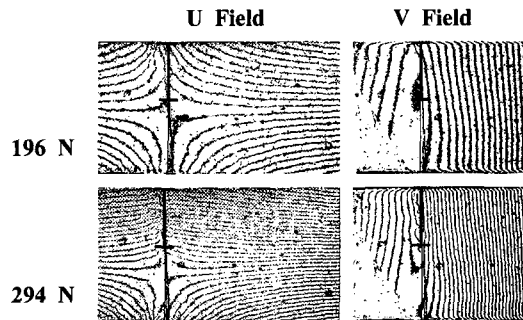


Fig. 14 Moiré fringes of the notched concrete specimen induced by three-point bending (I marks indicate the original notch length)

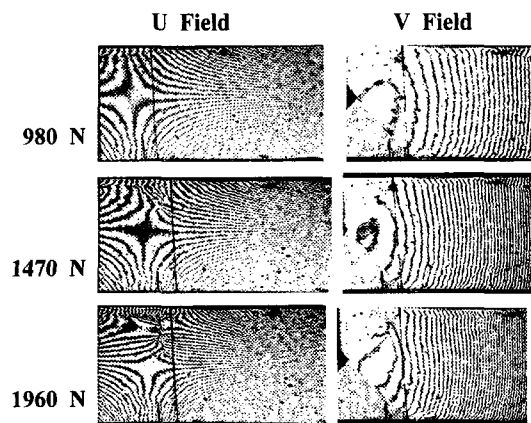


Fig. 15 Moiré fringes of the unnotched composite-concrete specimen induced by three-point bending



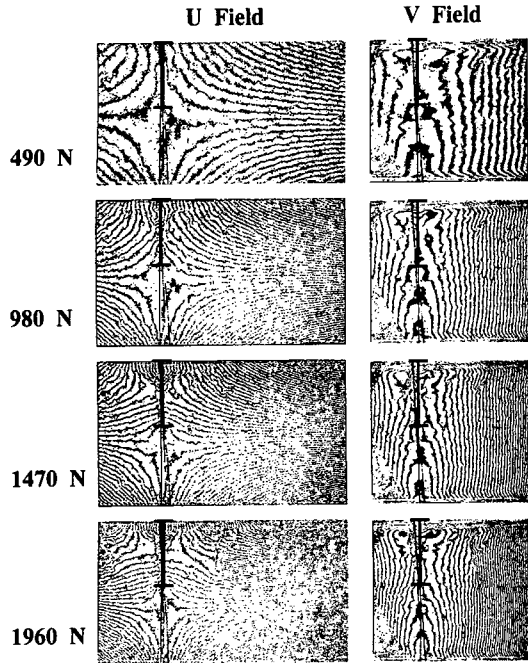


Fig. 16 Moiré fringes of the notched composite-concrete specimen induced by three-point bending (I marks indicate the original notch length)

Fig. 16은 결함이 있는 복합재료 보강시편(S4)의 간섭무늬를 보여주고 있다. 낮은 하중에서는 중립축이 가운데에 있다가 하중이 증가하면서 균열의 영향으로 중립축이 아래로 내려오는 것을 알 수 있다. 그러나 하중이 980 N에 도달할 때까지 U 변위의 불연속은 생기지 않아 이 하중까지는 균열이 더 이상 벌어지지 않았음을 알 수 있다. 하중이 1470 N이 되어서야 U 변위의 불연속이 생겨, 균열이 진전되었음을 볼 수 있다. 결함이 없는 콘크리트 시편(S1)이 686 N 근처에서 결함이 발생하고 곧 바로 균열이 진행되어 파단에 도달한 것과 비교해 보면 본 연구에서 복합재료로 보강한 콘크리트 시편은 1.5배 이상의 보강 효과가 있는 것으로 판단된다. 복합재가 있는 부분에서 U 변위의 간섭무늬가 수직으로 나타났는데, 이것은 복합재가 굽힘변형을 나타내지 않고 단순 인장변형을 나타내고 있다는 것을 보이고 있다. V 변위를 보면, 복합재 층이 있는 부분에서 상당한 압축변형이 있는 것으로 나타났는데 이것은 복합재를 도포한 코팅재가 압축되었을 것

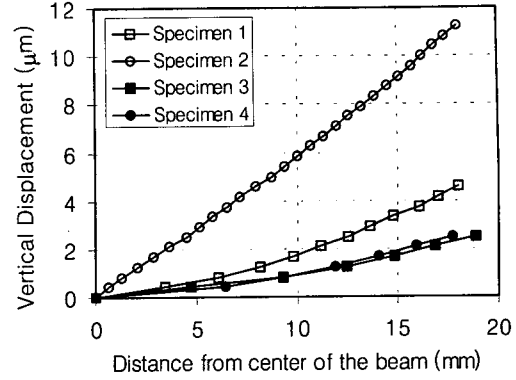


Fig. 17 Vertical displacement distributions of the concrete specimens along the center line (y=0) at the load level of 294 N

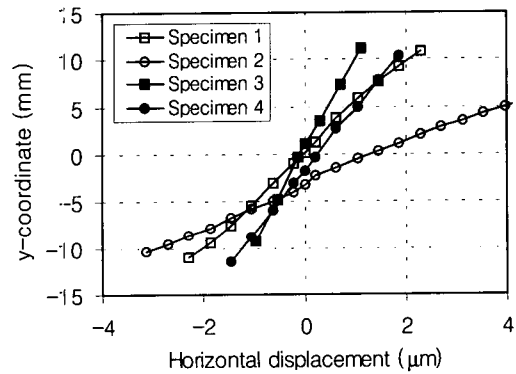


Fig. 18 Horizontal displacement distributions of the concrete specimens along the vertical line (x=10 mm) at the load level of 294 N

으로 판단된다. 이 시편은 1960 N의 하중 근처에서 여러군데의 균열이 발생되는 것을 U 변위 간섭무늬의 불연속으로부터 알 수 있다.

Fig. 17은 4가지 시편에 대하여 하중이 147 N 일 때 y=0인 중간축을 따라서 분포하는 y 방향 변위 V를 보여주고 있다. 균열이 있고 복합재 보강이 없는 경우(S2)가 다른 것들보다 2배 이상 큰 변위를 보이고 있으며, 거의 직선적으로 변화 하여서, 균열의 증가로 인하여 굽힘이 일어나지 않고 거의 강제회전이 일어났음을 볼 수 있다. 균열이 있는 시편에 복합재 보강이 있는 경우(S4)는 원래의 콘크리트 시편(S1)보다도 변위가 2

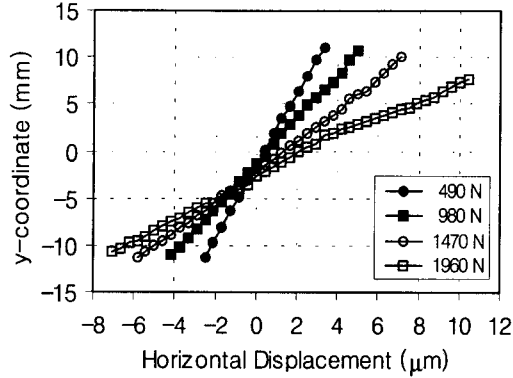


Fig. 19 Horizontal displacement distributions of the notched composite-concrete specimens along the vertical line ( $x=10$  mm)

배 정도 작게 발생되어서 보강효과가 충분한 것을 알 수 있다. 복합재 보강을 한 경우 147 N의 하중에서는 균열의 영향을 거의 받지 않고 초기 균열이 없는 경우(S3)와 균열이 있는 경우(S4)의 변위 크기가 거의 같은 것으로 나타났다.

Fig. 18은 147 N의 하중이 가해질 때 대칭선에서 약간 오른쪽으로 벗어난  $x=10$  mm인 수직선을 따라서 분포하는  $x$  방향 변위  $U$ 를 보여주고 있다.  $U$  변위도 S2 시편의 경우에 대단히 크게 나타났다으며 균열의 영향을 받아 중립축도 약 3.5 mm 정도 아래에 위치한 것을 볼 수 있다. 균열이 있는 시편의 복합재 보강에 의하여 원래의 재료보다 다 강성이 강해짐을 알 수 있다.

Fig. 19는 복합재로 보강된 균열이 있는 S4 시편에 대하여 하중이 증가함에 따라  $x=10$  mm인 지점을 따라 분포하는  $x$  방향 변위  $U$ 를 보여주고 있다. 균열의 영향으로 인하여 Specimen 4의 중립축이 아래에 위치한 것을 볼 수 있다. 하중이 1960 N을 넘어가면  $x$  방향 변위분포가 직선적이지 않고, 균열이 있는 윗 부분과 균열이 없는 아랫 부분의 기울기가 달라지는 것을 볼 수 있다. Fig. 20은 S3 시편과 S4 시편의  $y$ 축을 따라 변화하는 균열간격 증가를 보여주고 있다. 이 변위는 균열을 중심으로 양쪽에서 나타나는  $U$  변위 차수의 불연속 차이로부터 구해졌다. 초기 균열이 있었던 S4 시편의 경우 균열이 없었던 S3 시편에 비해 큰 차이를 나타내지 않아서, 복합재 접착은 균열 진전을 방지하는 보강효과가 충분한

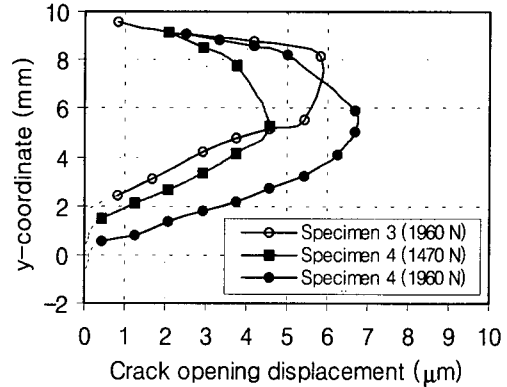


Fig. 20 Crack opening displacements of the notched and unnotched composite-concrete specimens

것을 알 수 있다. 또한 보강된 복합재로 인하여 위 표면은 균열의 간격이 더 이상 증가하지 않았음을 볼 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 복합재료로 보강한 콘크리트 시편에 대하여 굽힘하중에 의한 변형거동과 변위분포를 무아래 간섭법에 의하여 측정하고 정량화하였다. 이를 위하여 레이저를 이용한 무아래 간섭계 장치와 하중장치를 구성하였으며, 이에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 금속시편에 대한 3점 굽힘시험을 수행하였다. 균열이 없는 경우와 균열이 있는 경우의 시편 및 복합재료 접착 후의 시편에 대한 3점 굽힘시험을 수행하고 간섭무늬에 대한 변형거동을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 금속시편의 3점 굽힘시험에 의한 변형을 무아래 간섭법으로 측정하고 해석한 결과 보 이론과 변위가 잘 일치하여서 본 연구에서 구성한 광학장치와 하중장치는 신뢰성이 있는 것으로 판단되었다.

(2) 콘크리트 시편에 대한 무아래 간섭무늬는 전체영역에 걸친 변형분포를 제공하였고, 미세한 균열폭 증가, 균열이나 접합에 의한 중립축의 이동 등을 정량적으로 얻어낼 수 있었다.

(3) 간섭무늬를 해석한 결과, 결함이 발생한 콘크리트 시편을 복합재로 보강했을 때, 1.5배 이상

의 충분한 강성과 강도를 가질 수 있음을 보였다.

(4) 본 연구에서 적용한 무아레 간섭법은 굽힘 변형에 대한 해석 뿐만 아니라, 이종재료 접합에 대한 해석이나 균열 간격 증가 및 성장에 대한 해석에 효과적으로 이용될 수 있음을 알 수 있었다.

### 후 기

본 논문은 한국학술진흥재단의 1998년도 과학 기술기초 중점연구과제 (과제번호 : 1998-018-E00086) 의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Howie, I., 1995, "Effect of Tow Sheet Composite Wrap Architecture on Strengthening of Concrete due to Confinement: I- Experimental Studies," *J. of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 14, pp. 1008~1030.
- (2) Calado, L., Castiglioni, C. A. and Agatino, M. R., 1997, "Experimental and Numerical Evaluation of Bond Stress of Concrete Beams Reinforced by GFRP Bars," *Proc. ICCM-11*, Vol. VI, pp. 731~739.
- (3) Kimpara, I., Kageyama, K., Suzuki, T., Ohsawa, I. and Yamaguchi, K., 1997, "Experimental Characterization of Reinforcing Effects of FRP Sheets Bonded on Mortar and Concrete Beams," *Proc. ICCM-11*, Vol. VI, pp. 16~25.
- (4) 이효재, 황재석, Shimamoto, A., 1999, "투과형 광탄성 실험법에 의한 지능석 FRP 파파지연 효과에 관한 연구," 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제11호, pp. 1904~1911.
- (5) 정성균, 이승환, 임승규, 장석원, 1999, "ESPI를 이용한 복합재료의 층간분리 검출," 대한기계학회 논문집 A권, 제23권, 제12호, pp. 2103~2108.
- (6) Post, D., Han, B. and Ifju, P., 1994, *High Sensitivity Moiré: Experiential Analysis for Mechanics and Materials*, Springer-Verlag, New York.
- (7) Guo, Y., Post, D. and Han, B., 1992, "Thich Composites in Compression: An Experimental Study of Micromechanical Behavior and Smeared Engineering Properties," *J. Composite Materials*, Vol. 26, No. 13, pp. 1930~1944.
- (8) Ifju, P. G., Masters, J. E. and Jackson, W. C., 1995, "Using Moiré Interferometry to Aid in Standard Test Method Development for Textile Composite Material," *Composite Science and Technology*, Vol. 53, pp. 155~163.
- (9) Dadkhah, M. S. and Kobayashi, A. S., 1989, "HRR Field of a Moving Crack, An Experimental Analysis," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 34, pp. 253~262.
- (10) Perry, K. E. and McKelvie, J., 1996, "Measurement of Energy Release Rates for Delaminations in Composite Material," *Experimental Mechanics*, Vol. 36, pp. 55~63.
- (11) Post, D., Wood, J. D., Han, B. Parks, V. J. and Gerstle, Jr., F. P., 1994, "Thermal Stresses in a Bimaterial Joint: An Experimental Analysis," *J. Applied Mechanics, Trans. ASME*, Vol. 61, No. 1, pp. 192~198.
- (12) Guo, Y. Lim, C. K. Chen, W.T. and Woychik, C. G., 1993, "Solder Ball Connect (SBC) Assemblies under Thermal Loading: I. Deformation Measurement via Moiré Interferometry, and Its Interpretation," *IBM J. Research and Development*, Vol. 37, No. 5, pp. 635~648.
- (13) Han, B and Guo, Y., 1995, "Thermal Deformation Analysis of Various Electronic Packaging Products by Moiré and Microscopic Moire Interferometry," *J. Electronic Packaging, Trans. ASME*, Vol. 117, pp. 185~191.
- (14) Han, B., 1998, "Recent Advancements of Moiré and Microscopic Moiré Interferometry for Thermal Deformation Analysis of Microelectronics Devices," *Experimental Mechanics*, Vol. 38, No. 4, pp. 278~287.