

홀로그래피 간섭법을 이용한 층상평행판의 내부결함 탐상

김달우 · 한용규

포항산업과학연구원 제측연구팀

(1998년 7월 21일 받음, 1998년 9월 14일 수정본 받음)

층상평행판의 접착불량을 홀로그래피 간섭법을 이용하여 가시화함으로써 내부결함을 비파괴 탐상하였다. PZT로 측정 대상을 진동시키면서 실시간 홀로그래피 방법으로 접착불량의 특징이 간섭 무늬에 이상무늬로 나타나는 특성주파수를 찾고, PZT의 위치를 변화시키며 시간평균법으로 홀로그램을 구하였다. 재생된 상에서 결함 부분을 영상처리한 후 이들을 합성하여 층상평행판의 전체 면적에 걸친 내부결함 분포를 구하였다.

I. 서 론

비파괴검사는 검사 대상물을 파괴하거나 심한 변형을 주지 않고 대상물 내부에 존재하는 공동(cavity), 접착불량(debond) 등의 결함이나 잔류응력의 상태를 검출하는 검사방법으로써 X-선, 감마선, 초음파 등을 이용한 투과영상법(transmission imaging), 와전류(eddy current)나 자분탐상(magnetic particle)을 이용한 필드 맵핑(field mapping), 음파 발생(acoustic emission)에 의한 응력 검출(stress detection) 등 다양한 방법이 이용되고 있다.^[1,2] 최근에는 검사 대상물에 응력을 가한 후 미소 변형에 의한 간섭 무늬를 홀로그램에 기록하여 간섭 무늬의 관찰을 통해 이상무늬(anomaly)를 발견함으로써 결함을 찾아내는 홀로그래피 비파괴검사(holographic nondestructive testing)가 이용되고 있다. 홀로그래피 간섭법에서 검사 대상물에 응력을 가하는 방법으로는 열, 압력, 진동 등이 이용되고 있으며,^[3,9] 이때 발생된 변형을 간섭 무늬의 형태로 나타낸 후 컴퓨터를 이용하여 디지털 화상처리(digital image processing)를 하는 방법이 연구, 개발되고 있다.^[10-12] Robinson^[13]은 이러한 기법을 이용하여 냉각 패널(cooling panel)에 가압 변형을 일으켜 국부적인 접착불량 결함을 찾아내는 컴퓨터 프로그램을 개발하였고, Steinbichler^[4] 등은 가압 변형을 일으켜 자동차 타이어 내부의 접착불량 결함에 의한 국부적 이상 변형을 3차원으로 plotting 하여 가시화하였다. Erf^[5]는 가압 변형대신 진동 변형을 적용하여 층상평행판(laminated plate) 내부의 접착불량 결함을 검출하였다. 일반적으로 진동 변형은 가압 변형보다 간편하고 대상물의 외형에 구애를 받지 않기 때문에 널리 이용되는 방법이지만 진동원으로 주로 사용되는 piezo-electric transducer(PZT)의 출력에 한계가 있어 비교적 큰 시편의 경우에는 전체적인 결함 분포를 알기 힘들다. 그래서 Erf는 이 실험에서 전체적인 결함 분포를 구하기 위하여 PZT의 출력을 크게 증가시키는 한편, 시편의 뒷면에 알루미늄 판을 부착시켜 시편의 파손을 방지하였다.

본 연구에서는 PZT의 출력을 크게 증가시키지 않고도 두께가 얇고 면적이 넓은 대상물의 결함 분포를 측정할 수 있는 홀로그래피 비파괴검사 방법에 대하여 연구하였다. 검사 대

상물로는 유리-에폭시(glass-epoxy) 층상평행판을 사용하였으며 평행판의 층 사이에 인공적인 접착불량 결함을 만들었다. 이 대상물에 PZT로 진동 변형을 가하면서 시간평균법으로 홀로그램을 작성하였다. 비교적 크기가 큰 평행판에 내재된 결함을 모두 찾기 위해 PZT를 평행판의 여러 위치로 이동시키면서 여러장의 홀로그램을 작성하였다. 홀로그램으로부터 재생된 상은 CCD 카메라를 통하여 컴퓨터에 입력시켰으며 회색 레벨(gray level)의 조정을 통하여 이상무늬를 찾은 후 이들을 합성하여 결함의 크기와 모양이 전체적으로 나타난 결함 분포도를 완성하였다.

II. 홀로그래피 간섭을 이용한 비파괴검사

피사체 표면이 미세하게 변형되었을 경우 그 변형에 대한 정보를 가진 간섭 무늬로 덮인 피사체를 비축 홀로그래피(off-axis holography)를 이용하여 재생할 수 있다.^[14-18] 이것은 피사체에서 반사된 빛을 홀로그래피 방법으로 기록하고 재생하면 동일한 피사체에서 다른 시간에 반사된 빛과 간섭을 일으켜 간섭 무늬를 만들기 때문이다. 본 연구에서는 간섭 무늬를 기록하는 방법으로 시간평균법(time-average)과 실시간법(real-time)을 사용하였다.

시간평균법은 정현파로 진동하고 있는 피사체를 사진 건판에 기록하는 방법으로 노출 시간을 진동 주기보다 훨씬 크게 하여 진동 주기동안 피사체 표면의 각 점이 가지는 모든 위치를 효과적으로 기록한다. 홀로그램에는 진동하는 피사체의 시간 평균이 기록되므로 재생시에는 재생된 각각의 복소진폭들이 서로 간섭을 일으켜 재생상 표면에 진동 모양에 따른 간섭 무늬가 만들어진다. 만일 물체가 표면의 직각 방향을 따라 각속도 ω , 진폭 z 로 진동하고 있다면 물체 표면에서 반사된 물체파의 복소진폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_0 = A_0 \exp i \left[\frac{2\pi}{\lambda} (\cos \alpha + \cos \beta) z \cos \omega t \right] \quad (1)$$

여기서 α 와 β 는 각각 입사각과 관찰각이다. 사진 건판을 현상한 후, 참조파를 비추어 주면 진동 주기 T 동안 물체파의

시간 평균에 비례하는 복소진폭이 재생되며 이때의 재생상의 밝기 분포는 다음과 같다.

$$I_{avg} \propto |A_0|^2 J_0^2 \left[(\cos \alpha + \cos \beta) \frac{2\pi z}{\lambda} \right] \quad (2)$$

여기서 J_0 는 0차 Bessel 함수이다. 따라서 재생상의 가장 밝은 부분은 진동하는 표면의 정지된 부분인 마디(node)를 나타내고 진동에 의한 변위가 커지면서 밝은 무늬와 어두운 무늬가 번갈아 나타나며 밝은 무늬의 밝기는 점점 작아진다.^[18-21]

실시간법은 변형이 되지 않은 피사체가 기록된 홀로그램의 재생상과 실제 피사체를 중첩시켜 간섭 무늬를 관찰하는 방법이다. 홀로그램 제작시의 사진 건판 위치에 홀로그램을 정확히 재위치시킨 후 처음과 동일한 참조파로 홀로그램을 재생시키면 재생상은 피사체의 위치에 재현된다. 이때 피사체에 홀로그램 제작시와 동일한 물체파를 비추면 재생된 허상의 복소 진폭과 물체파의 복소 진폭이 일치하여 두 상이 겹쳐지게 되는데 피사체에 변형을 주면 재생파와 물체파 사이에 간섭이 일어나 간섭 무늬가 생긴다. 이 피사체에 진동 변형을 가하면 피사체에서 반사되는 물체파는 재생파와 물체파의 복소진폭을 서로 더하여 생기므로 다음과 같이 된다.

$$U_r \propto A_0 + A_0 \exp i \left[\frac{2\pi}{\lambda} (\cos \alpha + \cos \beta) z \cos \omega t \right] \quad (3)$$

피사체-허상 평면(object-image plane) 상에서의 밝기 분포는

$$I_r \propto 2|A_0|^2 \left\{ 1 + J_0 \left[\frac{2\pi}{\lambda} (\cos \alpha + \cos \beta) z \right] \right\} \quad (4)$$

로써 상수항을 가지며 0차 Bessel 함수에 따라 변화한다.^[21-23] 만일 검사 대상물이 약간 변형되었을 때 결함의 존재가 대상물 표면에 이상변형을 초래한다면 홀로그래피 간섭법이 비파괴검사에 응용될 수 있다. 이상변형은 미소 변형에 의한 전체 간섭 무늬에 대해 특이성을 갖는 무늬로 나타난다. 홀로그래피 비파괴검사법은 실험 방법이 간단하고 측정 대상물 전체에 대한 결함 무늬를 육안으로 관찰할 수 있으며 상당히 복잡한 형태나 구조를 가진 대상물에도 적용이 가능하고 검사를 위하여 미리 표면처리를 하지 않아도 되는 장점이 있다. 검사 대상물 표면에 간섭 무늬가 나타나게 하기 위해서는 대상물에 미소 변형을 가해야 하는데 변형시키는 방법으로는 기계적 변형(direct mechanical stressing), 가압 변형(pressure stressing), 가열 변형(thermal stressing), 진동 변형(vibration excitation) 등이 있다.^[2-4, 6-8, 13] 층상 구조물의 경우에는 주로 가압, 가열, 진동 변형이 적용되는데 본 연구에서는 적용이 간편하고 별도의 챔버(chamber)가 필요없는 진동 변형을 이용하였다.

III. 실험

본 연구에서 사용한 시편은 한 변의 길이가 20 cm인 정사각형의 유리-에폭시 층상평행판 4장을 섬유(fiber) 방향이 서

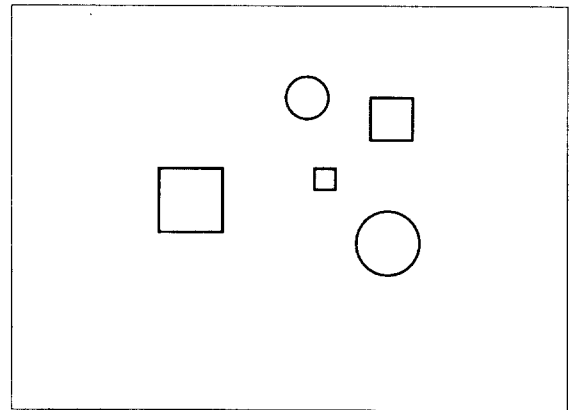


Fig. 1. Location of debonds in a plate.

로 수직 방향이 되도록 적층한 것이다. 층상평행판 내부에는 인공적으로 접착불량 결함을 만들기 위해 첫 층과 둘째 층 또는 둘째 층과 셋째 층 사이에 지름이 2 cm, 3 cm인 원형 테플론과 한 변의 길이가 각각 1 cm, 2 cm, 3 cm인 정사각형의 테플론 조각들을 삽입한 후 130°C의 온도 하에서 프레스로 8 psi의 압력을 가해 제작하였다(Fig. 1). 시편 표면에는 백색의 난반사 코팅을 하여 홀로그램 제작시 난반사가 잘 일어나고 재생시 간섭 무늬의 식별이 용이하도록 하였다. 제작된 평행판은 황동으로 만든 정사각형 프레임 사이에 끼운 후 볼트와 너트로 조인 후 4면을 클램프로 고정시켜 광학 테이블에 설치하였다.

실험 장치도는 Fig. 2와 같다. 광원으로는 파장 0.633 μm, 출력 25 mW인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 레이저에서 나온 빛을 광분리기(Beam Splitter)를 이용하여 참조파와 물체파로 나누어 각각의 광선을 현미경 대물렌즈로 확장한 후 공간 필터(spatial filter)를 통해 정화하였다. 참조파의 경로에 위치한 중성 필터(neutral-density filter)는 홀로그램 제작시 참조파의 강도(intensity)를 적당한 세기로 줄이는데 사용하였으며 재생시에는 필터를 제거하여 재생상을 밝게 하였다.

진동 변형은 신호 발생기(function generator)에서 발생한 정현파 진동 전압의 진폭을 전력증폭기로 증폭하여 PZT를 발

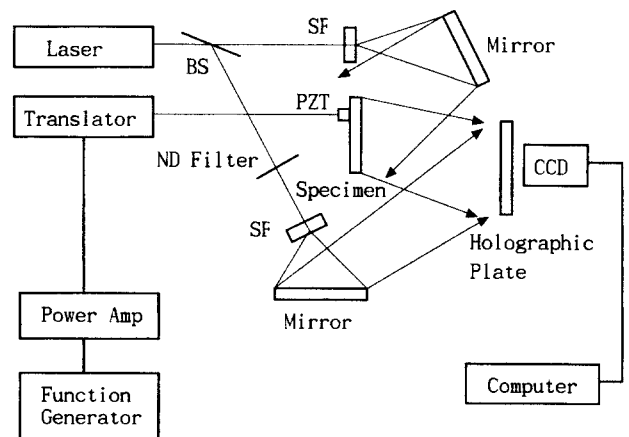


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup.

진시켜 만들었다. 사용한 전력증폭기는 최고 출력이 400 W 정도인데 전류와 전압을 함께 증폭시키는 기종으로 신호 발생기의 출력 단자에서 나오는 최대 4 V의 전압을 약 120 V까지 증폭시켰다. PZT는 두께 4.35 mm, 지름 39.6 mm 이며 공진 주파수 450 kHz, 임피던스 2 k Ω 이었다. 시편 면을 향하는 PZT 면에 전원을 연결하기 위하여 두 면 사이에 알루미늄 foil을 깔아 전극을 끌어낸 후 마이크로미터를 이용하여 PZT를 시편쪽에 밀착시켰으며 PZT와 foil, 시편면 사이에 진공구리스를 발라 진동 전달을 용이하게 하였다.

내부결함에 의한 이상무늬가 나타나는 진동 주파수의 영역을 찾기 위하여 실시간 홀로그래피를 이용하여 접착불량 결함에 의한 이상무늬가 나타나는 진동 주파수 영역을 찾은 후 시간평균법으로 정확한 진동 주파수와 진폭을 찾았다. 시편 전체의 간섭 무늬를 작성하기 위해 시편 면에서 PZT의 위치를 이동해 가며 각각의 접착불량 결함의 모양이 가장 잘 나타나는 위치를 선정하여 시간평균법으로 홀로그램을 제작하고 재생상을 CCD 카메라로 읽어 컴퓨터에 입력시켰다. 입력된 재생상은 영상처리 프로그램을 이용하여 결함 위의 이상무늬만을 추출하여 컴퓨터 파일로 저장하였다. 이러한 일련의 작업은 층상평행판의 주위를 따라 PZT를 약 10 cm 간격으로 이동시키며 반복하였으며 기록한 모든 간섭 무늬에 대해 화상처리한 후 컴퓨터 프로그램을 통해 합성하였다. 파일의 입력 및 출력은 DT2867 화상처리 시스템을 사용하였다.

IV. 결 과

4.1. 간섭 무늬

접착불량 결함의 검출이 용이한 주파수를 찾기 위하여 주파수 0~450 kHz 범위에서 주파수를 변화시키며 간섭무늬를 구한 결과, 결함을 나타내는 간섭 무늬는 15 kHz와 28 kHz에서 명확히 나타났다. Fig. 3은 층상평행판을 PZT를 사용하여

주파수 15 kHz로 진동 변형을 가하며 나타나는 간섭 무늬를 CCD 카메라로 기록한 것이다. 작은 진동 출력으로 시편에 산재한 결함을 모두 찾기 위해 PZT의 위치를 이동하며 간섭 무늬를 기록하였다. 여기에 사용한 전력증폭기의 출력은 17 V로써 비교적 낮은 전압이지만 PZT의 진동이 평행판 전체에 전달되어 간섭 무늬가 강하게 나타나 있다. Fig. 3(a)-(d)는 PZT의 위치를 변화시키며 기록한 간섭 무늬이다. PZT의 위치는 (a)에서는 시편의 좌측 하단, (b)에서는 중간 하단, (c)에서는 우측 하단, (d)에서는 좌측 중단이며 PZT의 위치는 등근 원으로 나타나 있다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 진동 변형에 의한 간섭 무늬는 PZT 부근에서 가장 강하게 나타나며 PZT를 중심으로 하여 사방으로 퍼져 나간다. 간섭 무늬중 마디를 가지고 있는 것은 진동파의 성분중 횡파 성분을 나타내고 동그란 형태로 불규칙적으로 나타나는 무늬는 결함에 의한 이상무늬를 나타낸다. 이러한 이상무늬는 결함에 의한 높은 공진 모드로 진동하는데서 비롯되는 것으로써 접착불량의 결함은 이상결함 무늬의 조밀도로 나타난다. 그림을 관찰하여 보면 PZT 주변에는 횡파에 의한 간섭 무늬가 강하게 나타나 있어 이 진한 간섭 무늬와 접착불량에 의한 이상무늬가 중첩되는 경우는 이상무늬를 판별하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 경우는 PZT에서 비교적 멀리 떨어진 부분에 존재하는 이상무늬만을 발견할 수 있다. Fig. 4는 주파수 28 kHz에서의 간섭 무늬이다. 낮은 전압에서는 간섭 무늬가 나타나지 않아 전력증폭기의 전압을 120 V 까지 증가시켰으나 진동의 전달이 미약하게 나타났다. 그러나 주파수 15 kHz의 경우에 PZT 주변의 횡파에 의한 짙은 간섭 무늬 때문에 접착 불량 결함 위의 이상무늬를 판별하기 어려운데 반해, 주파수 28 kHz의 경우는 횡파에 의한 간섭무늬가 상대적으로 미약하며 시편의 일부분에만 나타나 있어 내부결함에 의한 이상무늬가 비교적 잘 구분이 되므로 결함의 판별이 용이하다. 이와 같이 PZT의 위치를 층상평행판의 표면을 따라 여러 곳으로

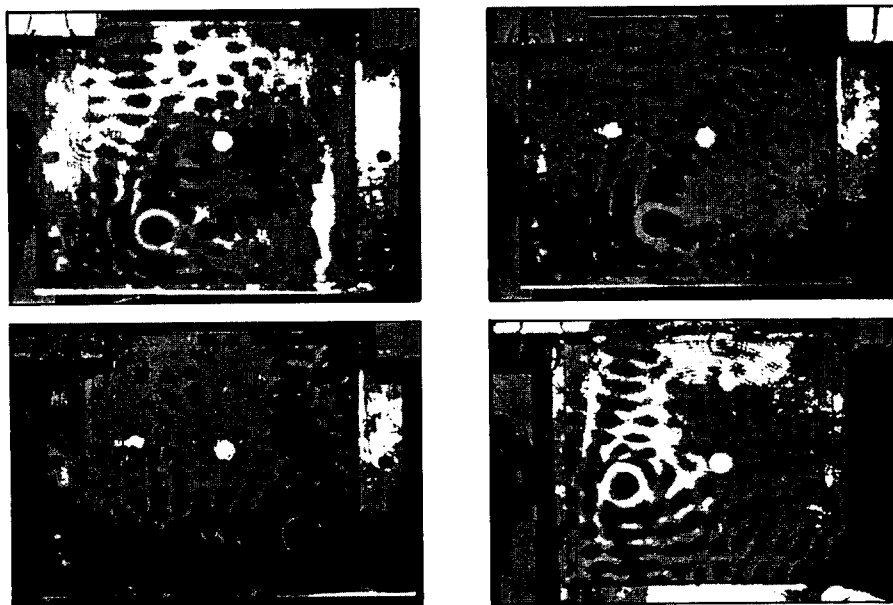


Fig. 3. Interferometric fringes of the vibration plate at 15 kHz.

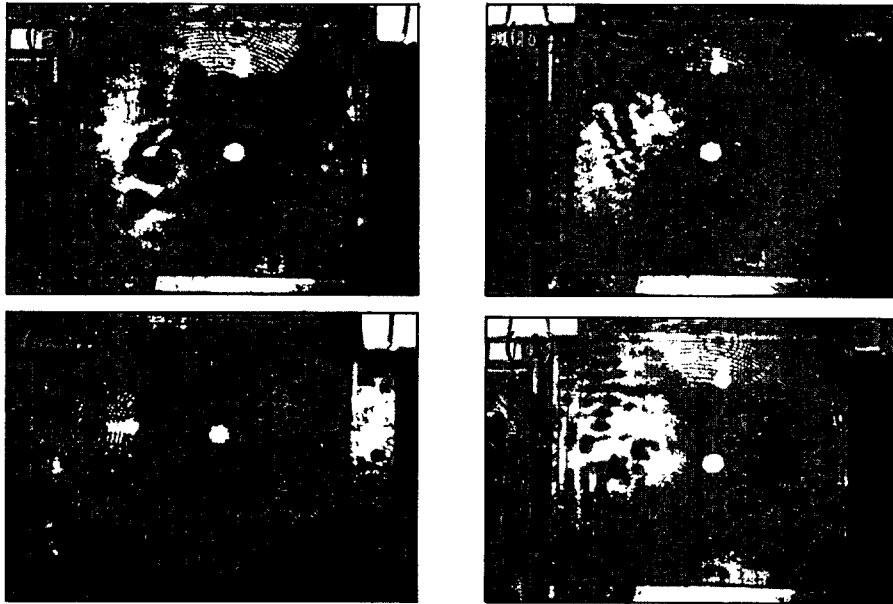


Fig. 4. Interferometric fringes of the vibrating plate at 28 kHz.

이동시키며 간섭 무늬를 기록함으로써 특성 주파수 15 kHz에서는 이상무늬가 횡파와 중첩되지 않는 위치에서 결함에 의한 이상무늬를 용이하게 추출할 수 있다. 또한 특성 주파수 28 kHz의 경우와 같이 시편의 진동이 미약하여 시편 전체의 간섭 무늬를 한 장의 홀로그램에 기록할 수 없을 때는 여러 개의 PZT를 사용하여 진동 변형을 동시에 가하는 것과 같은 효과를 기할 수 있다.

4.2. 화상처리

CCD 카메라로 기록한 간섭무늬 사진에는 PZT의 진동에 의한 간섭 무늬와 결함에 의한 이상무늬가 동시에 나타나므로 이상무늬를 판별하기 어렵다. 따라서 결함의 분포를 용이

하게 구하기 위하여 화상처리 작업을 통하여 사진 전체의 강도 분포를 흰색, 연한 회색, 진한 회색 등 3개의 회색 레벨로 표현한 후 간섭 무늬중 횡파 성분을 제거하고 이상 진동을 하는 결함 무늬만 남겼다. 간섭 무늬 사진에서 횡파는 일반적으로 마디(node)가 나타나므로 쉽게 구별할 수 있으며 횡파가 조밀해질수록 마디의 간격이 좁아지고 결국은 전체적으로 진한 회색으로 나타나는 특징이 있다.

Fig. 5는 PZT를 15 kHz로 진동시킬 때 구한 간섭 무늬 사진인 Fig. 3을 화상처리한 것이다. Fig. 5(a)-(d)는 각각 Fig. 3(a)-(d)와 대응되도록 화상처리한 것이다. PZT의 위치에서 조금 떨어진 곳에 여러개의 작은 원형 형태로 검정색 무늬들이 불규칙하고 산발적으로 분포되어 있다. 이 무늬들은 접착

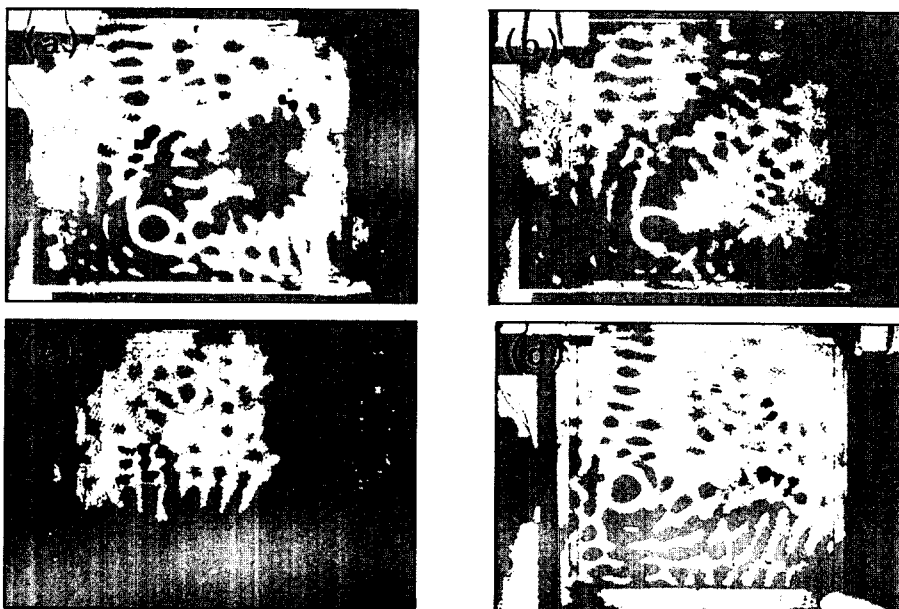


Fig. 5. Image processed interferometric fringes of the vibrating plate at 15 kHz.

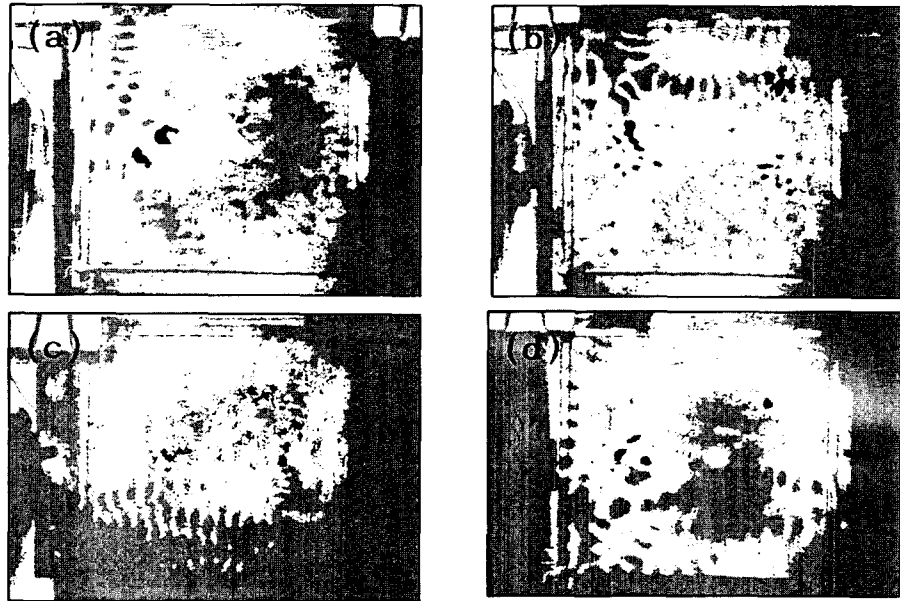


Fig. 6 Image processed interferometric fringes of the vibrating plate at 28 kHz.

불량에 의한 이상 진동에 의해 발생된 이상무늬로써 PZT 주변에 나타난 횡파 무늬와 상관관계가 없이 독립적으로 나타났다. PZT 부근에서는 이상무늬가 나타나지 않았는데 이는 이상무늬가 횡파에 의한 간섭 무늬에 가려졌기 때문이다. Fig. 5(a)-(d)는 각각 다른 위치에 PZT가 놓인 경우이며, 이에 따라 각각 다른 위치에 존재하는 결함들이 이상무늬로 나타남을 알 수 있다. Fig. 6은 28 kHz로 진동할 때의 간섭 무늬인 Fig. 4를 화상처리한 것이다. Fig. 6(a)-(d)는 각각 Fig. 4(a)-(d)와 대응되도록 화상처리한 것으로써 이상무늬가 PZT에서 조금 먼 곳뿐 아니라 가까운 곳에도 분포되어 있다. 이는 특성 주파수 28 kHz에서는 진동 변형이 비교적 작게 일어나므로 횡파 발생이 미약하여 결함에 의한 이상무늬가 횡파에 의해서 영향을 크게 받지 않기 때문인 것으로 해석된다.

4.3. 결함 분포도

PZT를 이동시키며 작성한 여러장의 간섭 무늬 사진들을 화상처리한 후 컴퓨터로 합성하여 결함 분포도를 작성하였다. Fig. 7(a)는 15 kHz 진동 변형으로 얻은 결함 분포도인 Fig. 5(a)-(d)를 합성한 것이고, Fig. 7(b)는 특성 주파수 28 kHz인 Fig. 6(a)-(d)를 합성한 것이다. 결함 분포도를 Fig. 1에 나타난 시편과 비교하여 보면 전체적으로 신빙성 있는 결함 분포가

구해진 것을 알 수 있다. 특성 주파수 15 kHz에서 구한 Fig. 7(a)에서는 결함의 위치가 모두 정확히 나타났으며 결함의 모양도 비교적 잘 나타나 있다. 그러나 결함이 일정한 크기를 가진 원형 형태의 무늬들의 집합체로 나타나 상이 선명하지 않다. 결함 분포도의 좌측에 나타난 이상무늬의 집합체는 한 변이 3 cm인 정사각형의 접촉불량 결함에 의해 나타난 것으로서 전반적으로 사각형의 형태를 나타내고 있다. 우측 하단에 있는 무늬는 직경 3 cm인 원형 결함에 의한 것으로써 이상무늬의 결함 형태도 원형을 나타내고 있다. 우측 상단에 있는 네 개의 점들은 한 변의 길이가 2 cm인 정사각형을 나타내고 있다. 중앙에 있는 한 개의 점은 한 변이 1 cm인 정사각형의 결함인데 결함 분포도로는 원형인지 사각형인지 형태를 알 수 없으며 중앙 상단에 있는 두 개의 점은 한 개의 결함인지 근접한 두 개의 결함인지 구분할 수 없다. 특성 주파수 28 kHz인 Fig. 7(b)의 경우는 결함을 나타내는 이상무늬의 크기가 비교적 작은 점들의 집합이므로 결함의 윤곽선을 더 명확히 나타내고 있다. 예를 들어 Fig. 7(a)의 중앙에 나타난 한 개의 점은 Fig. 7(b)에서는 세 개의 점으로 분리되어 나타나 결함의 형태를 좀 더 명확히 알 수 있다. 그러나, 이 경우는 시편 전체에 걸친 진동 전달이 미약하여 Fig. 7(a)의 중앙 상단에 나타난 이상무늬가 누락되어 있다. 이는 시편 위에서 이동

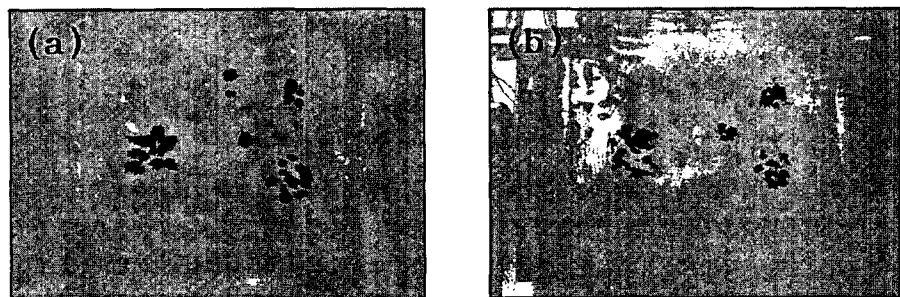


Fig. 7. Debond distribution at (a) 15 kHz and (b) 28 kHz.

시킨 PZT의 간격이 너무 커서 진동이 충분히 전달되지 않았기 때문이다. 따라서, 결함 분포도의 분해능을 향상시키기 위해서는 PZT를 더 작은 간격으로 이동시키며 측정하여야 된다. 이상과 같이 시행한 본 실험의 결과, 결함의 이상무늬를 나타내는 특성 주파수에서 크기 1 cm의 결함은 위치 판정은 가능하나 모양이나 크기는 판별하기 어렵고 3 cm 크기의 경우는 결함의 위치뿐 아니라 크기, 형태 등의 판단도 가능하였다. 또한 특성 주파수에 따라 내부결함의 검출 특성이 다르게 나타났는데 낮은 주파수에서는 비교적 낮은 전압으로 넓은 면적에 걸쳐 쉽게 진동 변형이 전달되나 횡파에 의해 결함 검출이 어렵고 결함의 형태가 명확하지 않으며, 높은 주파수에서는 결함의 분해능이 좀 더 우수하여 약 1 cm 정도의 공간분해능을 나타내지만 높은 출력을 요한다.

V. 결 론

본 연구에서는 비교적 크기가 큰 층상평행판의 내부결함 탐상에 적용할 수 있는 홀로그래피 간섭을 이용한 비파괴검사 방법에 대하여 연구하였다. 유리-에폭시 층상평행판 사이에 발생한 접촉불량 결함을 측정하기 위하여 PZT를 층상평행판 뒷면에 부착하여 진동 변형을 가하며 시간평균법으로 홀로그램을 제작하였다. 진동주파수 주사 결과, 결함을 나타내는 이상무늬가 잘 나타나는 특성 주파수는 15 kHz와 28 kHz로 측정되었다. 작은 출력으로 넓은 층상평행판 전체에 분포하는 내부결함의 분포를 측정하기 위하여 PZT의 위치를 시편 위에서 이동시키며 간섭 무늬를 구하고 이들을 합성하여 한 장의 결함 분포도로 합성하여 측정 대상물 전체에 대한 결함 분포를 구하였다. 특성 주파수에서 결함의 위치뿐 아니라 크기, 형태 등의 판단도 가능하였으며 낮은 주파수에서는 비교적 낮은 전압이 요구되고 높은 주파수에서는 높은 전압이 요구되었다. 그러나 낮은 주파수에서는 횡파에 의해 결함 검출이 어렵고 결함의 형태가 명확하지 않으며, 높은 주파수에서는 결함의 분해능이 상대적으로 조금 더 우수하며 약 1 cm 정도의 분해능을 나타내었다.

참고문헌

[1] G. Kaufmann, "Holographic Investigation of Residual Deformation Induced by a Pulsed Ion Implanter," *Appl. Opt.*, **30**, 85(1991).
 [2] A. Friesem and C. Vest, "Detection of Micro-Fractures by Holographic Interferometry," *Appl. Opt.*, **8**, 1253 (1969).
 [3] J. Crawford and R. Benson, "Holographic Interferometry: Identification of Circuit Board Component Failure," *Appl. Opt.*, **15**, 24 (1976).

[4] H. Steinbichler, "Application of Computer-aided Evaluation for Holography and Similar Techniques," *Optics and Lasers in Engineering*, **13**, 39 (1990).
 [5] R. Erf, *Holographic Nondestructive Testing*, Academic Press, New York, pp. 323-327 (1974).
 [6] C. Vest, "Holographic Interferometry in Material Testing," *International Journal of Nondestructive Testing* **3**, pp. 351 (1972).
 [7] J. Waters, "Holographic Inspection of Solid Propellant to Linear Bonds," *Appl. Opt.*, **10**, 2364 (1971).
 [8] S. Amadesi, "Holographic Methods for Painting Diagnostics," *Appl. Opt.*, **13**, 200 (1974).
 [9] 임충수, 오기장, 김달우, *응용물리* **6**, 213 (1993).
 [10] G. Reid, "Automatic Fringe Pattern Analysis : A Review," *Optics and Lasers in Engineering*, **7**, 37 (1986/87).
 [11] W. Funnell, "Image Processing Applied to the Interactive Analysis of Interferometric Fringes," *Appl. Opt.*, **20**, 3245 (1981).
 [12] V. Parthiban and R. Sirohi, "Interactive Fringe Processing Algorithm for Interferogram Analysis," *Optics and Lasers in Engineering*, **11**, 103 (1989).
 [13] D. Robinson, "Automatic Fringe Analysis with a Computer Image Analysis System," *Appl. Opt.*, **22**, 2169 (1983).
 [14] 김달우, 임부빈, *한국광학회지* **8**, 267 (1997).
 [15] E. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront Reconstruction with Continuous-Tone Object," *J. Opt. Soc. Am.*, **53**, 1377 (1963).
 [16] E. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-dimensional Objects," *J. Opt. Soc. Am.*, **54**, 1295(1964).
 [17] C. Vest, *Holographic Interferometry*, John Wiley & Sons, New York, pp. 57-64 (1979).
 [18] R. Powell and K. Stetson, "Interferometric Vibration Analysis of Three Dimensional Object by Wavefront Reconstruction," *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 612A (1965).
 [19] A. Wilson and D. Strobe, "Time-Average Holographic Interferometry of a Circular Plate Vibrating Simultaneously in Two Rationally Related Modes," *J. Opt. Soc. Am.*, **60**, 1162 (1970).
 [20] R. Pryputniewicz, "Time-Average Holography in Vibration Analysis," *Opt. Engr.*, **24**, 843 (1985).
 [21] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 107-111 (1989).
 [22] P. Hariharan, *Optical Holography*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 210-212 (1989).
 [23] J. Robillard and H. Caulfield, *Industrial Applications of Holography*, Oxford University Press, New York, pp. 47-61 (1990).

Detection of internal defects of a laminated plate using holographic interferometry

Dalwoo Kim and Yong-Gyu Han

Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-600, Korea

(Received July 21, 1998, Revised manuscript received September 14, 1998)

A laminated plate which contains debonds is visualized and evaluated nondestructively by holographic interferometry. Characteristic vibration frequencies of the plate are found in which debonds appear as anomalies in the fringe pattern for real-time holography. A set of time-average holograms for the vibrating plate are generated at various positions using a piezoelectric transducer, and the anomalies in each reconstructed hologram are enhanced through image processing. The images are added together to show the distribution of debonds for the whole area of the test plate.