

< 논문 >

## 고분해능 원자 현미경 스캐닝 무아레 기법을 이용한 미소 영역의 변형량 측정

박진형<sup>†</sup>, 이순복<sup>\*</sup>

(2006년 11월 21일 접수, 2007년 5월 9일 심사완료)

### Measurement of Deformations in Micro-Area Using High Resolution AFM Scanning Moiré Technique

Jin-Hyoung Park and Soon-Bok Lee

**Key Words :** AFM(원자 현미경), Moiré(무아레), ACF(이방성 도체 필름)

#### Abstract

Moiré interferometry is a useful technique to assess the reliability of electronic package because Moiré interferometry can measure the whole-field and real-time deformations. The shear strain of a small crack site is important to the reliability assessment of electronic package. The optical limitation of Moiré interferometry makes ambiguous the shear strain of a small area. An atomic force microscope (AFM) is used to measure the profile of a micro site. High resolution of AFM can apply to the Moiré technique. AFM Moiré technique is useful to measure the shear strain of a small area. In this research, the method to accurately measure the deformation of a small area by using AFM Moiré is proposed. A phase-shifting method is applied to improve the resolution of AFM Moiré.

#### 1. 서론

최근 나노 관련 기술의 급속한 발전으로 그에 따른 미소 변형 측정 기술 또한 급속히 발전하고 있다. 특히나 광학적 기법을 이용한 미소 변형 측정 기법은 넓은 영역의 변형을 실시간으로 측정할 수 있다는 장점이 있기 때문에 많은 분야에 응용되고 있다. 최근 나노 단위의 공정 기법의 발달로 광학적 기법은 한계에 봉착했다. 이는 빛의 파장의 길이에 따른 회절 한계 때문이다. 이를 극복하기 위하여 가시광선의 광원을 이용하던 기존의 기법과 달리 자외선, X-ray 와 같이 짧은 파장의 길이를 가지는 광원을 이용하여 그 한계를 극복하고자 하고 있다.<sup>(1)</sup>

하지만 50 nm 급 구조체의 변형을 측정하기에는 아직 많은 연구가 필요한 실정이다.

나노 구조체의 형상을 측정하기 위해 SEM, AFM 와 같은 장비가 많이 이용되고 있다. 광학적 기법과는 달리 나노급 구조체의 형상을 정확히 측정할 수 있으므로 이를 응용하면 미소 변형 측정 기술에 적용할 수 있다.

무아레 기법은 변형량을 증폭시키는 성질로 인하여 미소 변형 측정 기술에 많이 응용되고 있다. SEM, AFM 장비에도 무아레 기법이 응용될 수 있다.<sup>(2,3)</sup> SEM 과 달리 AFM 은 시편의 준비가 간단하여 주변환경을 진공으로 만들어야 하는 과정이 필요 없다. 또한 AFM 은 x-y 스캐너의 해상도가 매우 높으며 정확한 위치제어가 되는 장점을 가지기 때문에 무아레 기법에 적용성이 높다. 본 논문에서는 기하학적 무아레 기법을 응용한 AFM 무아레 기법을 제안하고 그 성능을 이미지 필터링 기법과 위상천이 기법의 적용으로 향상시켰다. 또한 기존의 광측정

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : turbomb@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3069 FAX : (042)869-3095

<sup>\*</sup> 회원, 한국과학기술원 기계공학과

기법의 한계성으로 인해 측정이 어려웠던 전자 패키지의 미소 크랙 영역의 변형량을 AFM 무아레 기법으로 측정하였다.

## 2. 원자 현미경 무아레의 원리

### 2.1 원리

원자 현미경 무아레의 기본 원리는 두개의 격자 무늬를 겹치는 기하학적 무아레와 유사하다. 기하학적 무아레 무늬는 비슷한 주기를 가지는 두 개의 격자를 접촉내지는 매우 가깝게 위치시키고 조명을 함으로써 얻을 수 있다. Fig. 1 에서는 투과형의 무아레의 원리를 보여주고 있다. 그림에서 I 는 명암을 나타낸다. 측정을 하고자 하는 물체가 그림에서와 같이 기준격자에 가까이 위치시킴으로써 곱셈식의 무아레무늬를 얻을 수 있다. 측정하고자 하는 물체 표면에는 시편격자가 새겨져 있다. 시편격자는 기준격자와 같은 주기를 가진다. 측정물체에 변형이 있을 때 시편격자의 간격이 기준격자와 달라지게 되고 이는 무아레 프린지를 생성시킨다. 무아레는 물체의 작은 변형을 크게 증폭시키는 성질이 있기 때문에 미소 변형 측정에 많이 응용되고 있다.<sup>(4,5)</sup>

원자 현미경 무아레에서는 기하학적 무아레와 동일하게 시편격자가 이용된다. 보통 기하학적 무아레에서는 빛의 회절 현상의 한계 때문에 100 lines/mm 정도의 격자 간격이 한계로 알려져 있다. 하지만 원자 현미경 무아레의 경우는 x-y 스캐너의 분해능이 0.15 nm 이하이기 때문에 현재 제조 가능한 50 nm 급 격자에도 적용이 가능하다. 격자의 간격이 작아질수록 분해능이 점점 향상된다. 원자 현미경 무아레에서는 기준격자가 기하학적 무아레와는 다르게 쓰인다. 기하학적 무아레의 경우는 보통 유리 위에 검은색 라인이 새겨진 기준격자를 이용한다. 하지만 원자 현미경 무아레의 경우는 x-y 스캐너의 스캔 라인이 가상의 기준격자가 된다. 만약 1200 lines/mm 의 시편격자를 이용한 경우는 이에 맞게 스캔 라인도 1200 lines/mm 간격으로 스캔하여 가상의 기준격자로 쓰이게 된다.

Fig. 2 는 시편격자에 변형이 없는 경우와 시편격자에 변형이 있는 경우, 원자 현미경 무아레가 어떻게 되는지 설명하고 있다. 그림에서 grating line 은 시편격자를 뜻한다. 시편격자에 변형이 없는 경우는 시편격자 간격과 스캔 라인에서 얻는 데이터 포인트 간격이 일치하기 때문에 무아레 프린지가 없는 형상을 얻게 된다. 하지만 시편격자

간격과 스캔 라인 간격이 불일치할 경우는 무아레 프린지 형상을 얻을 수 있다. 본 실험에서는 기준격자의 간격은 일정하게 두고 즉, 스캔 라인 간격은 일정하게 둔 채 시편격자의 변형을 통하여 무아레 이미지를 얻었다. 이렇게 생성된 무아레 프린지는 식 (1)과 같은 분해능을 가진다.

$$\eta = \frac{1}{f_s} \quad (1)$$

본 연구에서 사용된 시편격자는 1200 lines/mm 격자이다. 측면에서 보았을 때 시편격자는 사인파 형태를 가진다. 사인파 모양의 시편격자의 산봉우리와 계곡을 모두 격자 라인으로 이용하기 때문에 실제 무아레에 응용되는 격자 간격은 2 배인 2400 lines/mm 가 된다. 이에 맞게 AFM 의 스캔 라인의 간격도 2400 lines/mm 로 하였다. 이 경우 얻는 기본 분해능은 417 nm/fringe 이다.

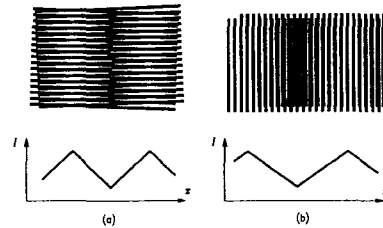


Fig. 1 Principle of geometric Moiré

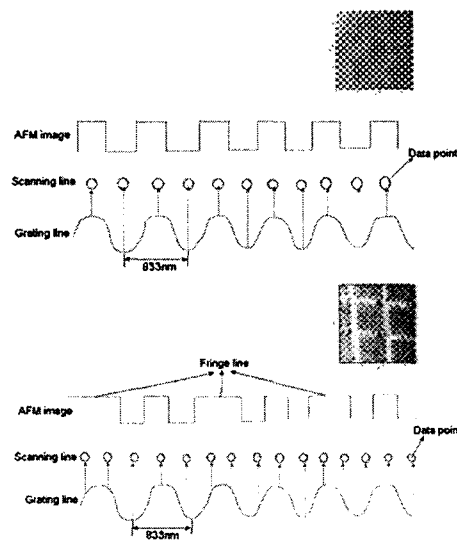


Fig. 2 Principle of AFM Moiré

2.2 특징

본 연구에서 사용된 AFM 은 PSIA XE-100 장비이다. x-y 스캐너의 분해능은 0.15 nm 이고 z 스캐너의 분해능은 0.05 nm 이며 최대측정가능 면적은 45 μm×45 μm 이다.

무아레를 응용한 AFM 무아레 변형 측정 기법은 image correlation 기법을 이용한 변형 측정 기법보다 다음과 같은 장점을 가진다. Image correlation 기법은 일단 2 개의 스캔 이미지가 필요하다. 변형 전의 AFM 이미지와 변형 후의 AFM 이미지의 상관 관계에서 변형량을 알아내는 기법이다. 이 경우 2 번의 스캔이 필요하며 변형 전에 스캔한 곳을 정확하게 변형 후에 한번 더 스캔해야만 한다. 변형 후의 스캔 시 많은 어려움이 있으며 번거로운 작업이 필요하다. 하지만 AFM 무아레 기법은 단 한번의 스캔으로 변형량을 측정할 수 있으므로 원하는 곳의 변형량을 정확히 알 수 있다.

일반적으로 AFM 스캔 이미지는 512×512 픽셀로 측정하게 된다. 이는 512 번의 스캔이 필요함을 의미하며 1 Hz 의 속도로 측정하였을 때 512 초의 스캔 시간이 필요하다. 하지만 AFM 무아레 기법의 경우, 시편격자 라인만 지나도록 스캔을 하므로 1200 lines/mm 시편격자의 변형을 40 μm ×40 μm 면적에서 측정할 경우 100 초의 시간이면 측정 가능하다. 짧은 시간에 단 한번의 스캔으로 증폭된 변형량을 측정할 수 있으므로 많은 이점을 가진다.

또한 AFM 무아레는 시편격자 수의 제한이 없다는 큰 장점을 가진다. 격자 간격이 짧은 시편격자의 이용은 분해능의 향상을 의미한다. AFM 무아레 기법은 점점 발전하는 나노 공정 기술에 적합한 변형 측정 기법이라고 할 수 있다.

2.3 위상천이 기법의 적용

본 연구에서는 보통 무아레 간섭계 기법에서 분해능의 향상을 위하여 적용되는 위상천이 기법을 AFM 무아레에 적용하였다. 위상천이는 시편격자나 기준격자의 위치를 미세하게 이동시켰을 때 무아레 프린지 상의 위상이 변함을 이용한다. 본 연구에서는 AFM 의 x-y 스캐너의 정확한 위치제어 성능을 이용하여 π/2 씩 위상천이 하였다. 이를 통해 π/2 씩 위상천이된 4 개의 이미지를 얻고 이를 통해 Fig. 3 과 같은 위상맵을 얻을 수 있다.<sup>(6)</sup>

AFM 무아레를 통해 얻은 무아레 프린지 이미지는 많은 에러를 포함하고 있다. 따라서 이를 제거하기 위한 필터링 기법이 필수이다. 무아레 프린지를 선명하게 하기 위한 필터링 기법이 적용되

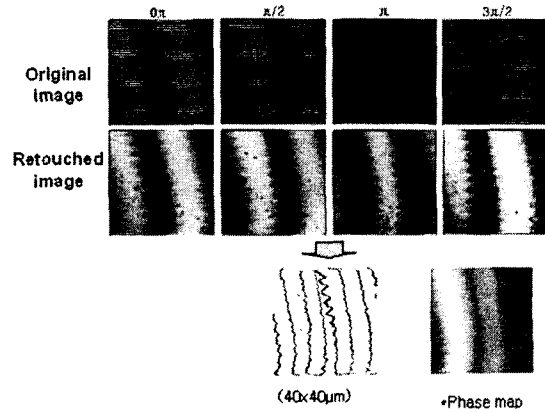


Fig. 3 Phase shifting method in AFM Moiré

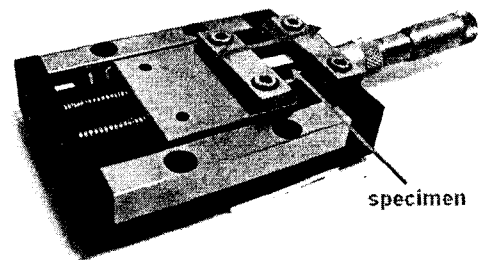


Fig. 4 Tensile tester

었고 또한 프린지가 아닌 부분의 노이즈를 제거하기 위하여 블러링 기법이 적용되었다. 이를 통해 광학적 기법을 이용하여 얻은 무아레 이미지와 유사한 결과를 얻을 수 있다(Fig. 3).

이미지 필터링 기법과 위상천이 기법을 적용하면 선명한 위상맵을 얻을 수 있고 본 연구에서 사용된 1200 lines/mm 격자를 이용할 경우 얻는 분해능은 기본 분해능 417 nm/fringe 에서 32 배 향상된 13 nm/fringe 이다. 좀더 격자 간격이 작은 시편격자를 이용할 경우 분해능은 점점 향상된다.

3. 실험 결과

3.1 검증실험

개발된 AFM 무아레 기법의 검증을 위하여 다음과 같은 실험을 하였다. Fig. 4 는 간단한 인장기이다. 상온에서 시편격자가 입혀진 시편을 인장기에 고정시키고 이를 인장시키면서 무아레 이미지를 얻는다. 각 프린지 당 417 nm 의 변형을 뜻하는 무아레 이미지에서 변형량을 얻고 인장한 값과 비교를 하였다. 측정 영역은 40 μm ×40 μm 이다. Fig.

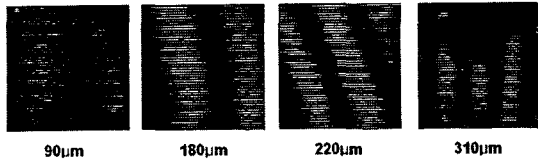


Fig. 5 AFM Moiré images of stretched specimen

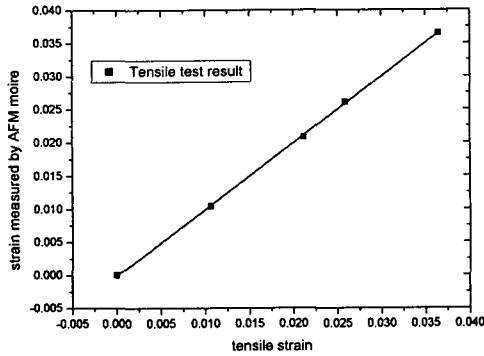


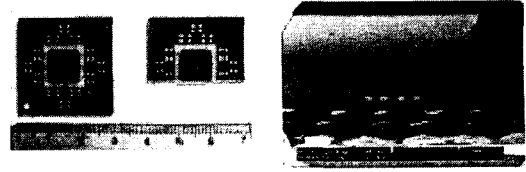
Fig. 6 Strain measured by AFM Moiré

5는 시편을 각각 90 µm, 180 µm, 220 µm, 310 µm 인장을 시키면서 얻은 AFM 무아레 이미지이다. 실험은 모두 위상천이 기법을 적용하였고 측정 전체 영역의 strain 값을 평균하였다. 검증실험 결과 AFM 무아레는 인장된 strain 을 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다(Fig. 6).

3.2 적용시편

본 연구에서는 ACF(Anisotropic Conductive Film) type 패키지의 변형량 측정에 AFM 무아레를 적용하였다. 패키지 시편의 ACF는 일반적인 폴리머 매트릭스를 가지며 glass transition temperature는 113 °C이다. 시편은 45 MPa, 180 °C에서 20 초간 압착하여 본딩시켰다. ACF의 두께는 50µm이다. 시편의 크기는 모두 동일하며, 칩은 9mm×9 mm×0.68mm이다. gold bump의 크기는 120µm×120µm×18µm이며, bump pitch는 130µm이다. PCB는 30 mm×30 mm×1 mm이다(Fig. 7).

시편격자는 측정하고자 하는 시편의 면에 접합하게 된다. 따라서 무아레 프린지는 시편의 변형을 대신하여 나타내준다. 시편이 늘어나게 되면 시편격자 또한 같이 늘어나므로 시편격자의 주파수 fs가 달라진다. 주파수 fs의 변화는 무아레



(a) (b)

Fig. 7 (a) ACF-type package specimens (b) SEM image of the ACF-bonded assembly

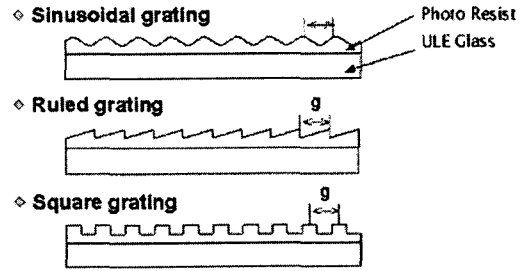


Fig. 8 Schematic diagrams of gratings

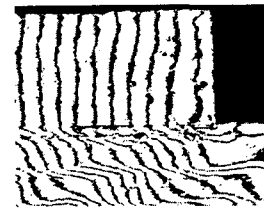


Fig. 9 Optical Moiré image of ACF-type package

프린지를 만들어낸다. 이를 통해 시편의 변형을 알 수 있으므로 시편격자의 정교한 접합은 매우 중요하다. 본 실험에서는 상온에서 시편격자를 시편의 칩 윗면에 접합하였다. 접합에는 TRA-BOND F114 에폭시가 이용되었다.

무아레 간섭계에 사용되고 있는 시편 격자는 1200 lines/mm (=833.3nm)이다. 무아레 간섭계 실험결과와 AFM 무아레 실험결과 값을 비교하기 위하여 동일한 1200 lines/mm 시편격자를 이용하였다. U, V 방향 변형을 모두 측정할 수 있게끔 격자 패턴이 동일 면상에 직교하는 sinusoidal 격자의 형상을 가지고 있다.

본 실험에서는 1200 lines/mm를 갖는 시편격자가 사용되었다. 이는 피치가 833 nm급의 규칙적인 나노 패턴이다. 패턴의 형상은 나선 형태의 U groove나 톱날 형태의 V groove에 상관없이 적용

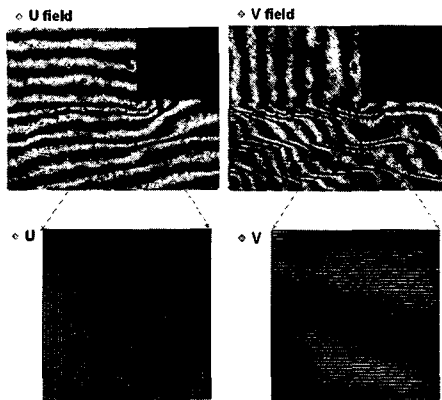


Fig. 10 Optical Moiré images & AFM Moiré images of ACF-type package

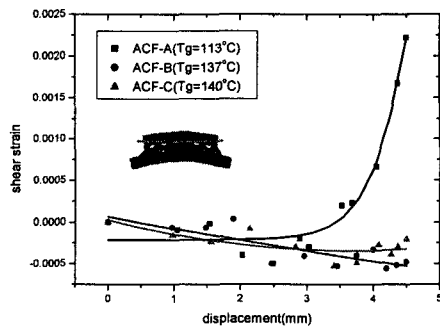


Fig. 11 Shear strain of ACF-type packages

가능하다(Fig. 8).

3.3 실험결과

ACF 패키지의 피로 수명에 중요한 인자는 칩과 ACF 끝단의 shear strain 이다.<sup>(7)</sup> 큰 shear strain 은 delamination 을 쉽게 유발시키므로 칩과 ACF 끝단의 shear strain 을 작게 설계하는 것은 중요하다. 무아레 간섭계 기법을 이용할 경우 패키지 시편의 전체적인 shear strain 을 얻을 수 있으나 미소 영역의 정확한 shear strain 을 얻기는 힘들다(Fig. 9). 특히나 칩 끝단의 미소 영역의 shear strain 을 광측정 기법으로 측정할 경우 그 값이 과소평가된다.

AFM 무아레 기법을 이용하여 칩 끝단의 40 μm × 40 μm 영역의 U, V field 변형을 얻고 이를 통해 shear strain 을 계산하였다. 실험에 사용된 ACF 패키지는 125 °C 에서 시편격자를 접합하였다. 그리고 25 °C 에서 열변형량을 측정하였다. Fig. 10 은

Table 1 Shear strain at the corner of chip

ACF 시편	무아레 간섭계	AFM 무아레
ACF A	0.0023	0.0041
ACF B	-0.0002	0.0007
ACF C	-0.0001	0.0004

AFM 무아레를 이용하여 얻은 칩 끝단의 무아레 프린지이다. 무아레 간섭계와 동일하게 25 °C 에서의 변형량을 측정하였다.

Fig. 11 은 무아레 간섭계를 통해 얻은 ACF 패키지의 shear strain 분포이다. 무아레 간섭계를 이용하여 얻은 shear strain 은 AFM 무아레를 이용하여 얻은 shear strain 보다 과소 평가됨을 알 수 있다 (Table 1).

4. 결론

기하학적 무아레 기법을 응용한 AFM 무아레 기법을 제안하고 그 성능을 이미지 필터링 기법과 위상천이 기법의 적용으로 향상시켰다. 개발된 AFM 무아레 기법의 검증에 위하여 인장 실험을 하였다. 또한 기존의 광측정 기법의 한계성으로 인해 측정이 어려웠던 전자 패키지의 미소 크랙 영역의 변형량을 측정하였다. AFM 무아레는 시편 격자 수의 제한이 없기 때문에 격자 간격이 짧은 시편격자를 이용하면 분해능의 향상된다. 따라서 AFM 무아레 기법은 점점 발전하는 나노 공정 기술에 적합한 변형 측정 기법이라고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 나노 메카트로닉스 기술개발 사업단 (나노 구조 및 나노 공정의 해석, 측정 및 평가에 관한 기초 기술) 의 지원 하에 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Park, Jin-Hyoung, and Lee Soon-Bok, "Evaluation of Thermal Deformation Behavior in Electronic Package Using UV Moire Interferometry," 2005 Electronic Materials and Packaging, Proceedings of the 7th International Symposium, pp. 209-214.

- (2) Zhong, Z. W. and Lu, Y. G., 2004, "An AFM Scanning Moiré Technique for the Inspection of Surface Deformations," *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 23, pp. 462~466.
- (3) Xie, H., Asundi, A., Boay, C. G., Yunguang, L., Yu, J., Zhaowei, Z. and Ngoi, K. A., 2002, "High Resolution AFM Scanning Moiree Method and Its Application to the Micro-Deformation in the BGA Electronic Package," *Microelectronics Reliability*, Vol. 42, pp. 1219~1227.
- (4) Daniel, Post, Bongtae, Han and Peter, Ifju, 1994, "High Sensitivity Moiré," *Spring-Verlag, NY*, pp. 50~53.
- (5) Oh, Kihwan, and Joo, Jinwon, 2004, "Submicro-Displacement Measuring System with Moire Interferometer and Application to the Thermal Deformation of PBGA Package," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 28, No. 11, pp. 1646~1655.
- (6) Yang, Se Young, Lee, Soon-Bok, Kwon, Woon-Seong, and Paik, Kyung-Wook, 2002, "Analytical Approach to Evaluate Shear Stress in Flip Chip Interconnection Using NCA/ACF," *2002 Electronic Materials and Packaging, Proceedings of the 4th International Symposium*, pp. 204~209.
- (7) Yang, Se Young, Kwon, Woon-Seong, Lee, Soon-Bok, and Paik, Kyoung-Wook, 2005, "Chip Warpage Damage Model for ACA/NCA Flim Type Electronic Packages," *Key Engineering Materials*, Vol. 297~300, pp. 887~892.