

高精度 位相計測에 의한 表面形狀測定

박 익근*

* 서울산업대학교

1. 서언 (序言)

초음파계측에서 활용되는 초음파신호의 정보는 주로 신호 강도(진폭)에 관한 것으로 RF신호 또는 검파한 신호의 피크값을 검출하는 방법을 취하여 왔다. 또, SAM(Scanning Acoustic Microscope)의 $V_{(z)}$ 측정[1-3]에서는 신호의 간섭에 의한 강도 변화를 측정하고 있으나 이것은 진폭과 위상을 별개로 측정하는 것은 아니다. 이들 방법에서는 고정도의 측정이나 해석을 하는 경우 정보량이 적다고 하는 문제점이 있고 이 문제를 해결하기 위해 초음파신호의 주파수해석[4-6]을 하는 종래와는 다른 측정방법의 연구를 하여 왔다.

본 연구에서는 진폭과 위상을 이용하는 초음파계측기술을 실용화하기 위하여 위상의 고정도계측 성능을 평가할 목적으로 실제의 시료에 대해 표면 반사신호의 위상측정에 의한 위상 검출능의 실험적 검토하였다. 위상의 고정도 계측에 대해서는 위상측정 분해능은 113 MHz의 경우 초음파 파장의 1/44로 높은 분해능을 갖는 것을 알았으며 종래의 탐상장치에서는 불가능하였던 시료의 형상계측에 유효하다는 관점에서 실제의 시료에 대해 표면 반사 신호의 위상을 측정하고 표면형상의 계측을 하였다.

2. 실험장치

2.1 탐상장치의 구성

본 연구에 사용한 위상·진폭을 이용한 탐상장치의 구성도를 그림1에 나타내고 있다. 본 장치에서는 그림 중 위측의 측정용의 신호계통과 좌측의 참조용의 신호계통 2개의 신호를 이용하여 측정신호의 진폭 및 참조신호와의 위상차를 측정한다. 이것은 측정신호와 참조신호와의 위상을 shift시켜 가며 저역필터(Low pass filter:LPF)에 의해 직류 성분만을 추출한다. 위상의 shift량은 최저1회(90)로 신호의 진폭과 위상이 구해지나 초음파신호에 offset전압이 곱하여진 경우 위상은 본래의 값과는 다른 각도를 나타내는 것이 있다. 이것을 피하여 진폭과 위상의 측정정도 향상을 위해서 본 장치에서는 위상제어에 10 및 11회의 분주기의 제어 가능한 IC를 이용하여 측정신호의 위상을 $0 \sim 2\pi$ 까지 10회() 것에 의해 진폭과 위상의 고정도측정을 가능하게 하고 있다.

270 MHz 발전기 연속파(Continuous Wave: CW)을 발전기 출력과 합성하고 협대역(Band Pass Filter: BPF)을 통과시켜 임의의 주파수성분을 추출한 후 측정신호는 고출력앰프에 의해 진폭되고 초음파탐촉자에 인가된다. 신호발생기에는 가변주파수를 이용하며, 위상제어용 Tone-Burst 신호 발생용의 펄스신호

는 스캐너의 엔코더 펄스와 연동하게 하고 초음파탐촉자의 측정 주사피치에 근거하여 10개의 펄스가 발생된다. 또 Delay generator에 의해 지연된 펄스신호는 S/H(Sample Holder)회로와 A/D변환기에 입력된다. 샘플링하여 얻어진 10개의 데이터는 이산적인 sampling 데이터가 되고 이것을 $Q(\varphi)$ (φ 는 측정신호와 참조신호와의 위상차)로 표시하면 이 식은 일정주기의 cos 신호이고 이 식의 진폭과 위상의 계산은 다음 식에 의해 신호의 실수부(R) 과 허수부(I)를 구한다.

$$R = \sum_{n=0}^9 Q(\varphi) \cos\left(\frac{2\pi n}{10}\right) \quad \text{----- (1)}$$

$$I = \sum_{n=0}^9 Q(\varphi) \sin\left(\frac{2\pi n}{10}\right)$$

식1에서 구한 신호의 실수와 허수로부터 위상과 진폭은 다음 식으로 계산된다.

$$\text{진폭 } A = \sqrt{R^2 + I^2} \quad \text{----- (2)}$$

$$\text{위상} = \tan^{-1}\left(\frac{I}{R}\right)$$

본 장치에서는 2차원 주사를 하여 측정된 위상을 화상으로 표시한다. 본 장치의 화상표시장치는 휘도 분해능 8 비트의 성능을 갖는데 비해 위상은 $0 \sim 2\pi$ 의 실수값이다.

따라서, 본 장치에서는 위상에 대해서는 그림 2에 나타낸 것과 같이 위상 0 을 휘도 0, 위상 2π 를 휘도 255에 대응시켜 휘도 변환을 한다.

본 장치의 진폭과 위상의 측정시간은 신호 $Q(\varphi)$ 의 측정에 요하는 시간과 진폭과 위상의 계산에 요하는 시간으로 나누어 진다. 앞에도 기술한 것과 같이 1측정점으로 10개의 데이터를 Sampling하기 위해 측정에 요하는 시간보다도 계산에 요하는 시간의 Weight가 더 걸린다. 또, 위상을 측정하는 경우에는 다양한 위상 잡음이 있으나 측정시간이 길게 될때 영향을 받는 요인으로는 주변의 온도변화가 염려된다. 따라서, 위상의 측정에 영향을 미친다고 생각되는 원인을 제거하기 위해 측정과 계산과를 병행하게 하지 않고, 측정시에는 Sampling Data는 저장시켜 놓고 측정종료 후에 계산을 한다. 그 결과 측정시간은 종래의 장치(AT 7000)과 같이 측정 중에 온도등의 환경조건의 변화 등에 의한 문제는 해결 가능하다.

2.2 위상 · 거리 환산방법

본 장치로 측정할 수 있는 위상으로 거리를 직접 측정하는 것은 불가능하여 사용하고 있는 초음파의 주파수(f)와 초음파가 전파하는 매질의 속도(C)를 알면 이들의 값으로부터 다음 식에 의해 위상차(φ)를 거리(d)로 환산하는 것이 가능하다.

$$d = \frac{c}{2\pi f} \cdot \varphi \text{ ----- (3)}$$

그러나 측정된 위상차는 $0 \sim 2\pi$ 간을 변화하는 것만으로 1파장 이상의 변화는 데이터의 시계열변화를 계속 관찰하고 위상이 감소해 가거나 또는 증가하고 있는가를 판단한다고 하는 작업을 해야 한다. 그래서 이 작업을 Software화 하였다. 각 측정점에서의 데이터와 그 측정점 이전의 데이터로부터 위상의 증감을 판단하는 작업을 하였다. 측정점 이전의 데이터로부터 위상변화의 경향을 계산하고 이까지에 위상이 증가 경향이 있는지 감소경향이 있는지를 위상의 경향을 구하고, 측정점에서의 위상변화 방향의 판단기준으로 하였다. 단, 이 방법은 위상이 완만하게 변화하였을 때는 효과적이나 급격한 변화를 나타냈을 때는 그 신호처리 결과의 신뢰성은 낮아진다.

2.3 위상 경사 보정 방법

본 장치에서는 위상측정은 고정도이기 때문에 시료의 경사에 매우 민감하고 시료의 설치에 신중을 기할 필요가 있으나 본 연구에서는 시료 경사의 거친 조정을 XY Stage를 사용하여 매뉴얼로 조작을 하며, 측정결과에 대해 컴퓨터에 의한 계산으로 위상 경사의 보정을 하였다.

그림 3은 실제의 측정결과에 본 처리를 적용한 결과를 나타내고 있다. 그림에서는 박막센서위의 전극패턴의 표면반사신호의 위상측정에 의한 C-Scan상 및 Lin상 위상profile를 나타낸다. 보정방법은 C-Scan상에서 임의의 2점간의 위상차로부터 위상의 경사를 구하고, 이 경사를 사용하여 데이터를 보정하는 방법을 취하였다. 이것을 X,Y의 2방향에 대한 것으로 C-Scan상 중의 2차원 데이터로 위상경사보정이 가능하다.

그림 3(1)에서는 위상 profile이 나타내고 있는 것처럼 X-Y양방향과 함께 위상의 변화가 보인다. 그림 3(1)의 C-Scan상의 왼쪽 아래에는 위상이 2π 보다 크게 되어 0로 변화하고 있기 때문에 휘도가 높아지는 것으로 부터 낮은 곳으로 급격한 변화를 나타내고 데이터의 연속성이 없어진다. 이 데이터에서 2차원의 위상경사보정을 한 결과가 그림 3(2)이다. 위상profile로부터도 알 수 있듯이 XY양방향 모두 급격한 위상 변화는 거의 없으며 위상경사보정처리에 의해 화상중의 미소한 위상변화를 보정 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 실험방법

표 1에 본 연구에 사용한 시료 및 본 장치에서의 측정조건을 나타낸다. 본 연구의 목적은 시료표면의 위상측정에 의한 표면형상의 관찰이기 때문에 사용한 탐촉자는 분해능을 높이기 위해 주파수가 높고, 동시에 수중에서의 감쇄가 적도록 초점거리가 짧은 것을 선택하였다. 이하의 조건으로 위상에 의한 표면의 C-Scan 및 XY라인상의 위상계측과 거리환산 실험을 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 불베어링의 표면결함 측정

시료에 Si_3N_4 세라믹 불베어링을 사용하였다. 이 불 표면은 래핑처리 되어 있고 Fe분말의 핵을 발생한 결합 중에 표면에 석출한 결합이 불베어링 표면에 미세한 요철을 형성하고 있다. 이 결합의 크기는 광학현미경으로 관찰한 결과 $100 \mu\text{m}$ 이하

였으며, 이들 결합중 크기가 $80, 30 \mu\text{m}$ 인 것에 대해 측정을 하였다. 초음파의 위상계측에 의한 C-Scan화상, 라인상의 위상 profile 및 위상-거리 환산결과를 그림 4, 5에 나타낸다. 또, 측정된 결합의 광학현미경상도 같이 나타낸다. 이들 결합에 대해서는 위상의 C-Scan상(2)에 나타내고 있고 그 형상은 광학현미경으로 관찰한 결합의 형상(1)과 잘 일치하고 있다. 또, 동일한 탐촉자를 이용하여 SAM으로 측정을 한 결과 $30 \mu\text{m}$ 의 결합은 검출할 수 없었다.

위상에 의한 C-Scan상에서는 불의 정점을 중심으로 동심원 형상이 휘도가 조금씩 밝아지고, 즉 위상이 증가방향이 있는 것을 관찰할 수 있다. 또, 위상이 2π 를 넘으면 0에 되돌아 오기 때문에 정점으로부터 멀어져 2π 부터 0에의 위상변화를 조금씩 짧은 주기로 반복하게 되고 이것은 그림4(2)에 관찰된다.

그림4 및 그림5(3)에서는 결합 위를 통과하는 X방향 0.75 mm , Y방향 0.5 mm 의 범위에 대한 위상 profile를 나타낸다. 그림4에 나타내는 $80 \mu\text{m}$ 결합측정 결과의 결합위의 위상 profile에서는 시료가 구(球)이기 때문에 그림 중에서 점선으로 나타나는 위상의 변화를 보여주는 것 같은 불정점 부근에서의 profile이 결합부분에서 위상이 - 방향으로 변화하고 있다.

여기서 위상변화량 φ 는 그림4(3)으로부터 100° 로 읽혀진다. 이것을 (3)식을 이용하여 거리로 환산하면 $1.83 \mu\text{m}$ 가 된다. 또, 위상의 [- 방향의 변화] = [탐촉자 - 시료간극의 차이] = [표면형상]이기 때문에 이 결합은 $1.83 \mu\text{m}$ 표면으로부터 돌출한 것임을 알 수 있다. 이것은 그림 4(4)의 거리 환산결과로 보아도 이결합은 불룩한 형상인 것을 인식할 수 있다. 다음에 그림5에 나타내는 $30 \mu\text{m}$ 결합의 측정결과에 대해 검토를 하였다.

그림5(3)에서는 X방향의 위상profile은 (2) 중의 좌측 아래 측을 통하여 Y방향의 위상 profile은 오른 위쪽의 결합을 통하여 있다. 이들 결합상의 위상profile로부터 결합부분에서의 위상 변화량 φ 는 구형에서의 위상profile로부터 좌측 아래의 결합(X라인)은 46.5° 인 것에 대해 오른쪽 상은 결합이 거의 위상차를 읽는 것이 불가능하였다. 이 위상 변화량을 (3)식을 이용하여 거리로 환산하면 왼쪽 아래의 결합은 $0.86 \mu\text{m}$ 의 결합이 된다. 한편, 오른쪽 상부의 결합은 위상profile로부터 위상변화량을 잘 읽지 못하나 (2)의 초음파측정 화상에서 결합상이 그 주변부에 대해 어둡게 나타나는 것으로 부터 결합부분의 위상은 주변부 보다도 감소방향이고, 따라서 이 결합은 불룩한 결합이라는 것을 추정할 수 있다.

본 측정 결과로부터 표면에 나타난 결합은 그림6에 나타난 것과 같이 세라믹 중에 혼입한 Fe분말이 결합이 되어 표면에 석출한 것이다. 또, 결합의 크기에 비해 돌출의 정도가 상당히 작은 것으로부터 결합은 래핑시에 세라믹보다 래핑이 되기 어려운 정도로 표면에 돌출하다 어느 정도 튀어나오면 선단은 잘리는 과정을 반복한다는 것을 예측할 수 있다.

이상의 결과로부터 본 측정방법에서는 표면의 요철정도 와 결합이 오목한 형인지 불룩한 형인지를 인식 할 수 있음을 확인하였다

4.2 세라믹판 표면형상의 측정

시료로 사용한 세라믹판 표면에는 크랙이 발생하여 있고, 크랙의 영향으로 시료표면에 요철을 볼 수 있다. 여기서 초음파의 위상을 사용하여 표면형상을 측정하고 접촉식 단차계(段差計)를 사용한 측정결과와의 비교를 그림7에 나타낸다. 또, 크랙의 상태를 알기 쉽게 하기 위해 초음파영상장치를 사용하여 25 MHz 로 측정된 C-Scan상도 그림 (1)에 나타내었다. 초음파에 의한 측정결과에는 그림7(2)의 위상측정 화상의 외측에 마크를 붙인 횡 및 종방향의 라인상의 위상-거리환산 결과를 같이 나타낸다. 또, 초음파의 위상측정 결과에는 단차계의 측정결과와의 비교를 고려하여 위상의 경사보정처리를 하였다.

그림7(1)의 초음파영상측정 결과로 관찰되는 크랙은 그림 7(2)의 위상측정 화상에서는 불선명하게된다. 이것은 크랙 신호의 산란등이 생겨 신호강도가 변화하기 쉬운 것에 대해 위상변화가 생기는 요인이 없기 때문이라 생각된다. 그러나 그림 7(2)에서는 중앙부로부터 주변을 향해 휘도가 저하하는 것이 관찰되고 크랙을 둘러싼 화상 중앙부에서는 중앙부가 옅게 되고 크랙을 향해 붙어 있는 것을 알 수 있다. 이 현상은 중앙부에서는 구의 일부와 같은 형상을 하고 있다.

다음에 초음파의 위상측정 결과로부터 추출한 화상 중앙을 통하는 X,Y방향의 라인상 위상profile 그림7(3)과 접촉식 단차계의 측정결과 그림7(4)를 비교한다. 2가지의 방식으로 측정 한 표면형상은 크랙 부분과 일치한다. 초음파 위상측정 결과는 X방향 4.38 μm , Y방향 3.56 μm , 접촉식 단차계측정 결과에서는 X방향 4.35 μm , Y방향 2.39 μm 였다.

X방향의 들어간 깊이에 대해서는 초음파에 의한 측정결과와 단차계에 의한 측정결과와 좋은 일치를 보였으나 Y방향의 깊이에 대해서는 초음파에 의한 측정 결과의 쪽이 큰 값을 나타내고 있다. 그 원인은 초음파에 의한 측정에서는 측정범위내에서 측정위치와 측정 데이터와의 대응이 연관되어 있는 것에 비해 단차계에 의한 측정에서는 현미경을 관찰해 가며 측정했기 때문에 측정 데이터와 측정개소와의 대응이 어렵고, 이번에 비교한 데이터의 측정위치가 다소 다르지않다고 생각된다. 이상의 결과로부터 초음파로도 비접촉으로 표면형상을 정밀하게 측정할수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론(結言)

위상계측에 의한 표면형상의 측정을 실제 샘플에 대해 적용한 결과 아래의 결론을 얻었다.

- 1) 위상측정으로 부터 표면의 결합형상을 정도 좋게 측정할 수 있었다.
- 2) 위상-거리환산으로 부터 측정결과를 보다 실 결합형상에 근사하게 결합평가가 용이하였다.

금후의 과제로는 내부결합에 대한 위상계측, 위상을 이용한 기술의 응용등이 있다.

參考文獻

- 1.石川 潔, 1987, " 超音波顯微鏡による加工變質層の厚さ計測 ", 非破壊検査 第 36 卷, 第 3 號, pp 195-200.
- 2.V. S. Ahn and J. H. Lee, 1991, "Numerical analysis of the acoustic signature for the line focus acoustic microscope", FENDT, pp 112-119
- 3.野中 壽夫, 1988, " 超音波による新素材の缺陷檢出 ", 新素材及ひ"その製品の非破壊試験シンポジウム論文集, 日本非破壊検査協會, pp 126-130.
- 4.W.A.Simpson.1974, " Time-Frequency-Domain Formulation of Ultrasonic Frequency Analysis ", Journal of the Acoustical Society of America, Vol.56, pp 1776-1781
- 5.S.Takeshita,1990, " Application of Two - Dimensional Ultrasonic Spectroscopy to Nondestructive Inspection ", Materials Evaluation / December , pp 1473 - 1477

6.Sachse,W and Pao,Y.H,1978, "On the determination of Phase and Group velocities of dispersive waves in solids", Journal of Applied Physics, Vol.49, No.8, pp 4320-4327

7.L.Paradis et al,1986, " Ultrasonic Signal Processing for Thickness Measurements and Detection of Near-Surface Defects ", Materials Evaluation, Vol.44, October, pp 1344-1349.

8.H.L.Whaley and L.Adler,1971, " Flaw characterization by Ultrasonic Frequency Analysis ", Materials Evaluation, august, pp 182-192.

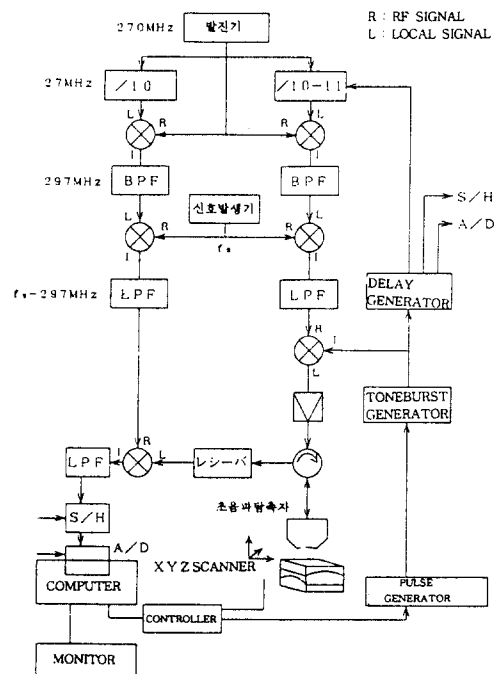


그림 1 실험장치 구성도

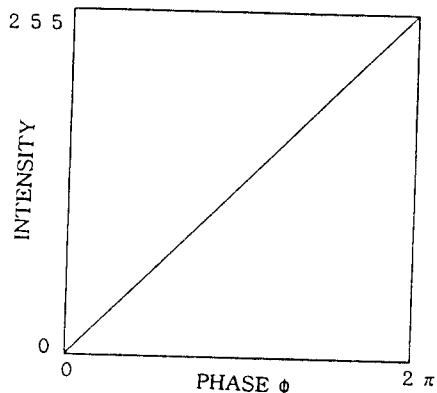
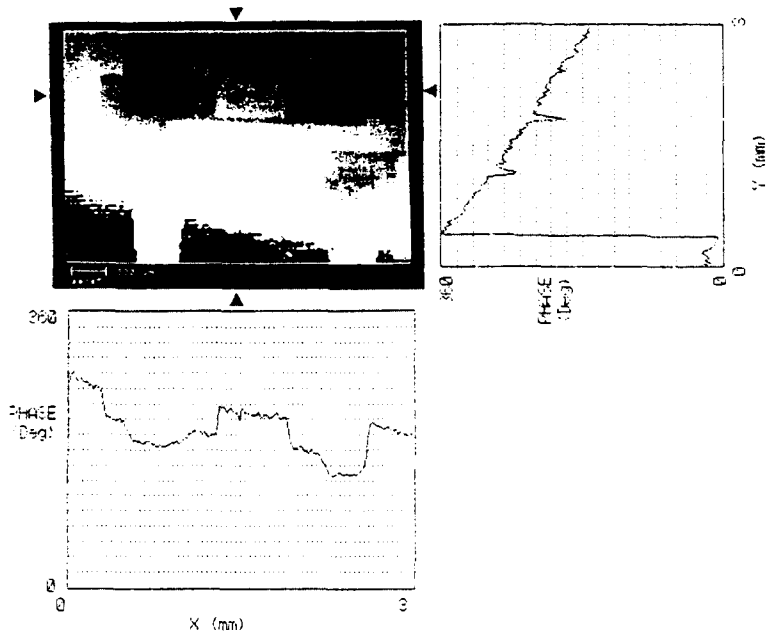
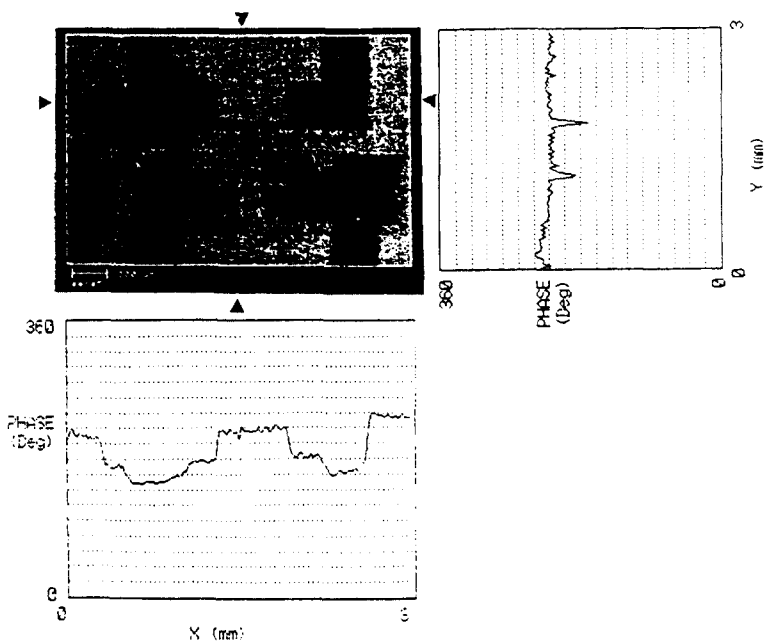


그림 2 위상-휘도변환



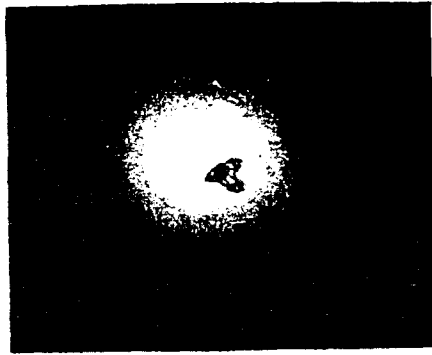
(1) Original data



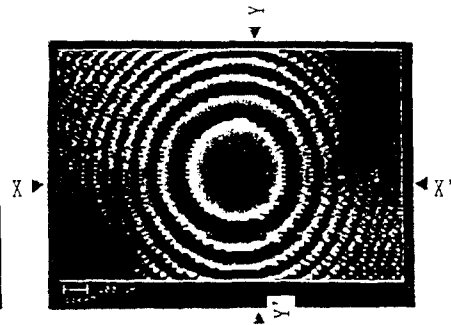
(2) Correction data 그림 3 위상경사보정처리 예

표 1 시료 및 측정조건

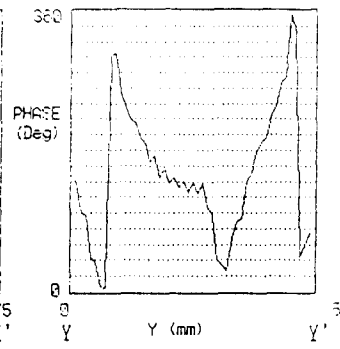
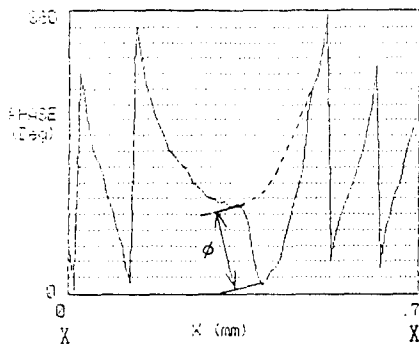
시 료	불베어링	세라믹판
크 기	φ 3/8 inch	40 × 40
재 질	Si ₃ N ₄ 세라믹	세라믹
결 함	Fe분말 혼입	레이저 조사에 의한 크랙
사용 탐촉자	고분자 초점형 탐촉자 초점거리 1.5 mm	
사용 주파수 (MHz)	113	102
주사범위(mm)	1.5 × 1.0	6.0 × 4.0



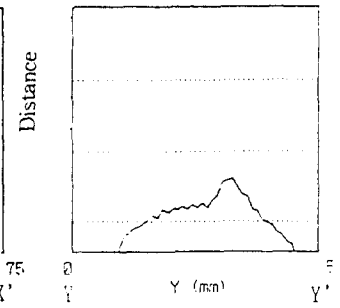
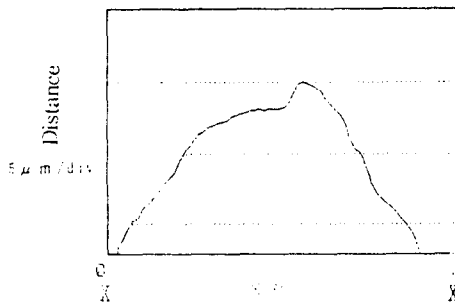
(1) 광학현미경(× 50)



(2) 초음파위상측정화상



(3) Phase profile on line

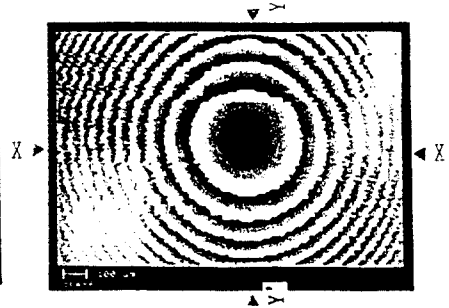


(4) Distance conversion on line

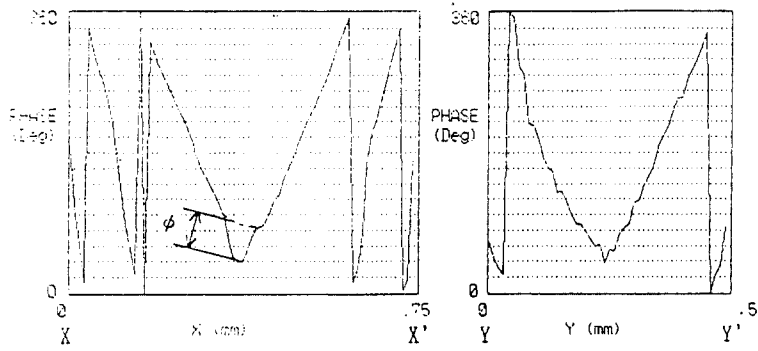
그림 4 볼베어링 표면측정 결과 (80 μm)



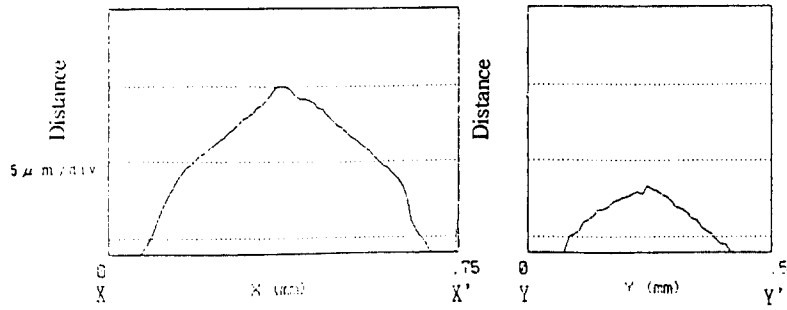
(1) 광학현미경(× 50)



(2) 초음파위상측정화상



(3) Phase profile on line



(4) Distance conversion on line

그림 5 볼베어링 표면측정 결과 (30 μm)

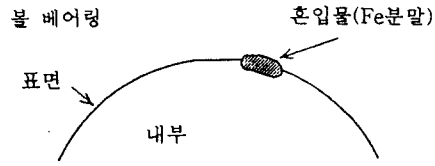
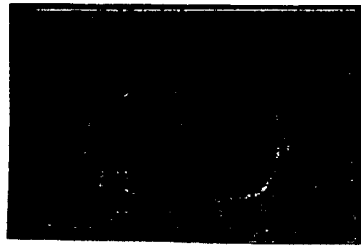
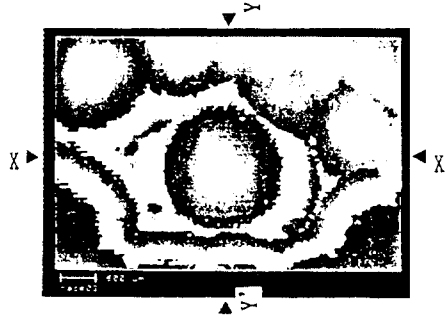


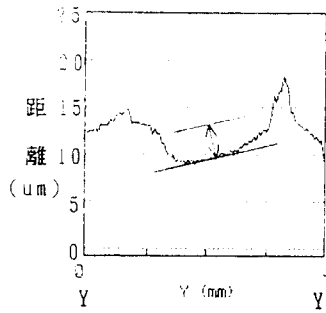
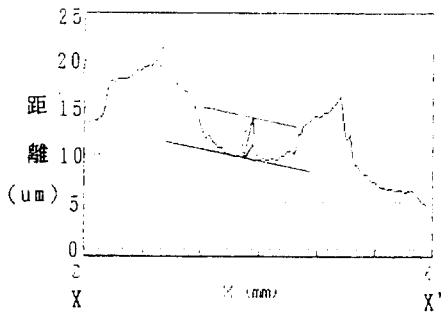
그림 6 볼베어링 표면결함 모델 (단면)



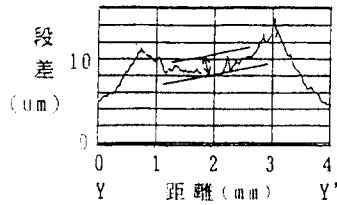
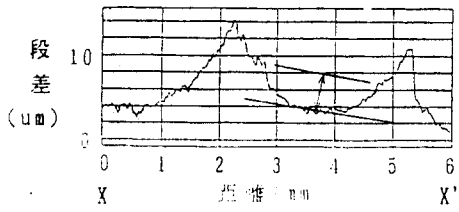
(1) AT 탐상화상



(2) 초음파위상측정화상



(3) Distance conversion on line



(4) Step height measurement

그림 7 세라믹판 표면측정 결과