

〈메소 스케일 3차원 형상측정기술〉

知的 계측 기술에 의한 메소 스케일 형상 측정

글 _ TAKAMASU Kiyoshi

1. 메소 스케일 형상 측정

“meso”는 그리스어로 「중간」을 의미한다. 예를 들면, 「Mesopotamia」라고 하는 지역은 티그리스 강과 유프라테스 강의 양 연안에 끼어 있는 중간지역의 호칭이다. 또, 「Mezoscopic」이라고 하는 말도 있는 것과 같이 「meso」, 「mezo」의 두 가지로 읽는다. 본 특집에서 「메소 스케일」은 마이크로 스케일과 나노 스케일의 중간의미로 사용하지만, 마이크로 스케일과 나노 스케일의 중간에 대하여서도 메소 스케일이라고 할 수 있다.

표1에 단순한 길이 계측을 대상으로 하는 경우의 매크로 계측, 마이크로 계측 및 나노 계측과 측정 범위를 나타내는 실효 스케일 및 측정 정도(精度)의 관계를 나타낸다. 매크로 계측에서는 자동차 등의 일반적인 기계가 대상으로 1m의 측정 범위를 서브 밀리미

터로 측정하는 것이 정밀측정의 역할이다. 이 분야는 길이 측정으로 한정된 대략적인 것으로, 2장 이하에서 나타내는 것과 같이 1차원적인 측정여부, 측정 대상의 형상 및 측정 환경의 영향 등에 의하여 상황이 크게 달라진다. 또, 초정밀측정은 어떤 스케일에 있어서도 아주 한정된 조건에서만 실현이 가능하다.

본 특집에서는 마이크로 계측에서부터 나노 계측에 이르는 메소 스케일 계측이 왜 어려운지를 검토하고, 메소 스케일의 3차원 측정을 가능하게 하는 기술적인 문제를 해결하는 방향을 제시한다. 메소 스케일 3차원 측정기를 개발하기 위해서는 측정기 본체, Probing System, 측정기 교정의 세 가지 기술 개발이 필요하다. 각각에 대해서는 이 특집의 각 해설에서 상세하게 나타낸다.

표1 길이 계측에 있어서 매크로 계측, 마이크로 계측, 나노 계측의 비교

| 계측의 분류 | | 매크로 계측 | 마이크로 계측 | 나노 계측 |
|----------|-------------------|--------|---------|-------|
| 계측 대상(예) | | 자동차 | 정밀기기 | 반도체 |
| 실효 스케일 | | 1m | 10mm | 100μm |
| 측정범위 | 정밀측정 10^{-4} ~ | 100μm | 1μm | 10nm |
| | 초정밀측정 10^{-5} ~ | 10μm~ | 100nm~ | 1nm~ |

2. Scale Factor와 Scale Interface

메소 스케일의 형상 측정 문제점은 Scale Factor와 Scale Interface의 개념으로 이해할 수 있다. 그림1은 측정 범위를 나타내는 실효 스케일을 가로축에, 측정 범위를 세로축에 나타내고 있다. Scale Factor는 측정 정도(精度)와 실효 스케일의 비로, 정밀 계측에서는 10^4 정도, 초정밀계측에서는 10^5 에서 10^6 정도이다.

Scale Interface는 Scale Factor를 확보한 조건에서 넓은 범위의 실효 스케일에 대응 할 수 있는 것을 나타낸다. 현재의 Scale Interface는 마크로 계측에서 마이크로 계측까지는 비교적 연속적으로 대응하고 있지만, 마이크로 계측에서 나노 계측에는 연속성의 확보가 되어 있지 않아 갭이 존재한다. 이것은 측정의 분해능이 나노미터 오더가 됨에 따라 빛의 파장, 원자의 크기(Si의 격자정수), 열잡음, 레이저 간섭계의 비선형성 등의 양자적인 효과가 현저하기 때문이다.

또한 설비 제작에 있어서는 계측 대상의 형상 정도가 나쁜 점, 2차원 및 3차원적인 형상 계측이 필요한 점, 복잡한 형상이 대상인 점에서 Scale Factor가 악화

한다. 차세대의 설비 제작을 추진하는 계측 기술은 이 갭을 메우기 위하여 지적(知的) 계측 기술의 체계화를 나노미터로 확장하고, 메소 스케일에 있어서 계측 기술을 확립함으로써 생산 기술 혁신을 일으키는 것이 요구되고 있다.

3. 메소 스케일 계측의 과제

3.1 정밀측정의 조건

제조 현장에 가까운 장소에서의 정밀측정에서는 절대측정보다 기준과의 비교측정이 이루어지고 있다. 역사적으로 보더라도 기계적인 정밀측정이 실현 가능하였던 것은 제한된 조건하에서 라고 생각된다. 정밀측정을 가능하게 하는 조건을 표2에 나타낸다. 이것은 항온실에서 고정도의 형상을 갖는 기계 부품의 1차원적인 치수를 측정하는 경우이다. 우선, 고분해능의 센서를 아베(Abbe) 원리(역자 주 : 피측정물과 측정기가 일직선상에 있어야 측정 오차를 줄일 수 있다는 이론)에 맞도록 배치하고, 두 개의 블록 게이지에 의하여 센서의 확대율을 교정한다. 다음에 측정물을 블록 게이지와 비교측정 함으로서 치수를 구한다. 이러한 조건에서는 온도 변화나 측정 대상의 형상은 문제가 되지 않고, 센서에 대해서도 단시간, 좁은 범위의 직진성과 고분해능이 있으면 된다(그림2).

이 조건에서는 누구라도 간단히 서브마이크로미터의 치수 측정을 하는 것이 가능하고, 현장에 가까운 측정에서도 항온실을 갖춤으로서 정밀한 측정이 가능해졌다. 그러나, 현장에 있어서 정밀측정이나 3차원좌표측정은 측정대상이나 측정환경이 광범위하여 앞에 기술한 조건을 만족하지 않는 경우도 많다. 본 원고에서는 이 중에서 측정의 3차원화, 측정 대상의 형상 및 측정환경온도의 영향에 대하여 문제점을 지적하고, 이에 대한 해결 방안을 제시한다.

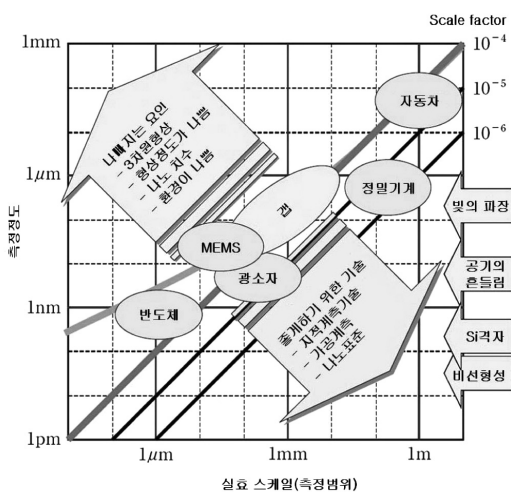


그림1 Scale Factor와 Scale Interface

표2 정밀측정의 조건

| | |
|--------|------------------------|
| 아베의 원리 | 독일의 Abbe(1890년) |
| 블록 게이지 | 스웨덴의 요한슨(1896년) |
| 항온환경 | 미국의 NBS(1924년) |
| 센서 | 단시간의 안정성, 좁은 범위에서의 직진성 |
| 측정 대상 | 단순한 형상, 형상정도가 높다 |
| 측정 시간 | 짧다. Drift의 영향이 없다 |

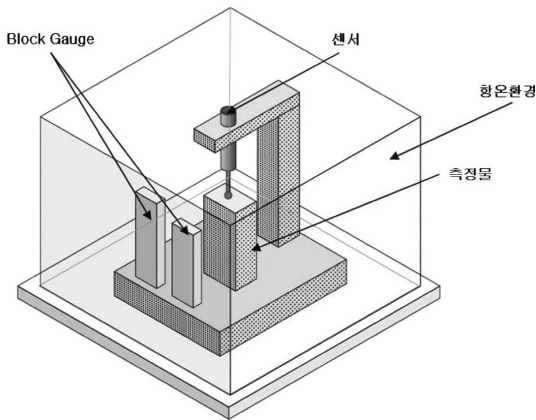


그림2 정밀측정 조건을 만족하는 치수의 측정방법

3.2 3차원 측정의 문제

정밀측정의 대상은 1차원적인 치수였지만, 공업제품의 고정도화에 의하여 매우 복잡한 3차원적인 형상도 정밀측정의 대상이 되고 있다. 3차원적이고 복잡한 측정을 하는 경우에는 아베의 원리를 만족하는 측정기를 구성하는 것이 매우 어렵다. 그림3은 3차원 측정에서 유사하게 아베의 원리를 만족하는 구성방법이다. 계측 Frame에 세 개의 레이저 간섭계를 Probe 선단(先端) 위치에 대응되도록 배치한다. 측정 대상을 이동하는 스테이지의 삼면경에 대하여 레이저 간섭계를 설치함으로써 아베의 원리를 만족하는 구조를 확보하고 있다. 이러한 구성을 실행하고 있는 고정도 3차원

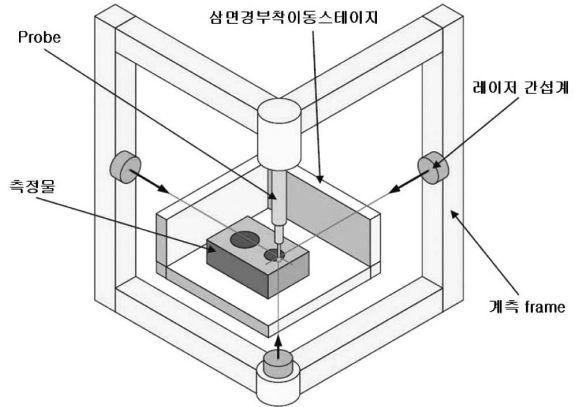


그림3 아베의 원리를 만족하는 3차원 측정기의 구성 방법

측정기나 AFM(原子間力顯微鏡) 등이 개발되고 있다.

메소 스케일에 대응한 3차원 측정기에서 가장 큰 과제가 Probing System의 개발이다. 3차원적으로 복잡한 측정물을 측정하기 위해서는 구형의 선단을 갖는 Ball Probe를 사용하는 것이 유리하여, 작은 직경을 갖고, 고분해능인 Probe를 개발할 필요가 있다. 본 특집에서도 새로운 Probe 기술이 소개되고 있다.

메소 스케일에 대응하는 3차원 측정기의 과제를 정리하면 아래와 같다.

- 3차원 안내의 고정도화 : 기능이 한정되지만 삼면경의 사용으로 대응가능하다.
- Probing System : 과제가 크고, 좋은 Probing System의 개발이 기대된다.
- 교정 : 좋은 표준이 없는 점. 불확실성의 평가가 어려운 점이 문제가 된다.

3.3 측정물 형상의 영향

형상 측정을 하는 경우와 치수 측정을 하는 경우(특히, 표준 값을 부여하는 경우)에는 측정물의 형상에 대한 사고가 다르다. 나노미터의 단차표준용으로 만들어진 Artifact의 예에서는 단차량 50nm에 대하여 표면의

편차가 1nm 정도의 것도 있고, 이것은 블록 게이지에 적용하면 50mm의 블록 게이지의 평면도가 1mm인 것에 상당한다. 50mm의 블록 게이지의 평면도는 K급에서는 0.05 μm 이고, 이 비율을 나노미터 단차 표준에 적용하면 평면도가 0.05 μm 가 된다.

이와 같이 나노미터 표준에서는 지금까지의 정밀측정 표준에 대하여 치수와 형상 정도의 비율이 네 자리 이상 나빠게 되어, 정밀 측정의 조건을 만족시키지 못하는 것을 알 수 있다. 형상 정도가 치수에 대하여 충분히 좋다고 하는 조건이 성립하지 않는 경우, 측정 대상을 정밀하게 측정하는 것은 매우 어렵다. 단차 표준 값 지정을 하면, 측정물 형상의 영향에 의한 불확실성(측정 장소의 차이에 의한 것)이 최대가 된다.

1차원 그레이팅의 경우는 많은 피치를 측정하여, 평균적인 피치를 값 지정의 대상으로 함으로서 형상의 영향을 감소시키는 것이 가능하지만, 이러한 평균화는 일반적인 형상측정에서는 실행할 수 없다.

3.4 온도환경의 영향

정밀측정에서 온도보정과 온도 드리프트의 관계를 명확하게 이해하지 못하는 경우가 많다. 이것은 표1의 조건을 만족하고 있는 정밀측정의 경우, 온도 드리프트를 고려할 필요가 없기 때문이다. 그러나, 제조현장에 가까운 상황이나 복잡한 형상을 측정하는 경우에는 측정시간이 길어져서 온도 드리프트가 중요하다.

측정시간이 충분이 짧은 경우에는 온도 보정을 함으로서 정확한 치수 특정이 가능하다. 그러나 측정시간이 긴 경우에는 작업 사이에 온도변화가 있어서, 이 온도 변화에 의하여 온도 드리프트가 발생한다. 온도 드리프트는 측정 루프 안에 있는 모든 재료의 열팽창 계수, 치수, 온도 변화에 의하여 결정되기 때문에 보정은 간단하지 않다. 또한, 재료 열팽창계수의 불확실성, 온도 계측의 불확실성 등의 평가도 과제이다.

4. Scale Factor Chart

Scale Factor를 나빠게 하는 요인, 좋게 하기 위한 방법을 정리한 것이 Scale Factor Chart(표3)이다. 표3에는 Scale Factor를 나빠게 하는 요인으로 실패 스케일이 작은 점, 계측 대상의 형상 정도가 나쁜 점, 측정 차원이 2차원, 3차원으로 되는 점, 환경이 나빠지는 점 등을 들고 있다. 또, Scale Factor를 좋게 하는 방법으로서 온도 보정, In Process 계측, 평균화, 아베의 원리를 들고 있다.

어떤 요인이 어느 정도 Scale Factor에 영향을 주는지는 실제에는 복잡한 조건을 고려할 필요가 있지만, Scale Factor Chart에서는 크게 -1, 0, +1, +2로 분류하고 있다. 이것은 -1의 요인이 있으면 Scale Factor가 한자리 좋아지는 것, +1의 요인이 있으면 Scale Factor가 한자리 나빠게 되는 것을 나타내고 있다. 이 차트의 기준은 10^{-1} 이므로, -4에 요인의 Scale Factor를 만족시킴으로서 Scale Factor가 어느 정도 될 것인지 추정할 수 있다.

Scale Factor Chart를 길이측정 AFM에 의하여 값 지정한 나노 스케일 표준에 적용한 예를 표4에 나타낸다. 여기에서는 피치 표준, 단차 표준 및 선폭 표준에 대하여 검토하였다. 피치 표준은 형상은 나빠지만 평균화가 유효하여 10^{-3} 오더의 불확실성을 확보할 수 있다. 한편, 단차 표준에서는 피치 표준과 같은 평균화가 불가능하므로 불확실성이 증가한다. 또한 선폭 표준에서는 양 방향에서의 계측이 필요하여, 절대측정이 되기 때문에 10^{-1} 을 확보하는 것이 고작이다.

이와 같이 나노 스케일 표준에서는 Scale Factor를 좋게 하기 위해서는 형상을 좋게 하기 위한 가공 방법을 개선, In Process 가공계측의 도입, 다점법 등에 의한 보정의 실시가 필요하다.

표3 Scale Factor Chart : Scale Factor를 변화시키는 요인

| 요인 | | Scale Factor(10 ⁴ 를 기준) | | | |
|------------------------|-----|------------------------------------|----------------|--------------|----------------|
| 분류 | 소분류 | -1 | 10 | +1 | +2 |
| 1. 실효스케일 | A | 작다 | 10 μ m보다 큼 | 10 μ m이하 | 1 μ m이하 |
| | B | 크다 | 100mm 미만 | 100mm 이상 | 10m 이상 |
| 2. 계측 대상 | A | 표면형상 | 충분히 좋음 | 나쁨 | 매우 나쁨 |
| | B | 측정차원 | 1차원 | 2차원 | 3차원 |
| | C | 형상 | 단순 | 복잡 | |
| 3. 계측 환경 | A | 환경 | 좋음 | 나쁨 | 매우 나쁨 |
| | B | 온도 보정 | 유효 | 없음/무효 | |
| 4. 수법 · 데이터 처리(지적계측기술) | A | 반전법/다점법등 | 유효 | 없음/무효 | |
| | B | In Process 가공계측 | 유효 | 없음/무효 | |
| | C | 상대/절대 | | 상대적으로 좋은 표준 | 절대/상대적으로 나쁜 표준 |
| | D | 평균화 | 유효 | 없음/무효 | |
| | E | 아베의 원리 | 유효 | 없음/무효 | |

표4 나노 스케일 표준의 값 지정에 대한 Scale Factor Chart의 적용 예

| 요인 | | | 피치 | 단차 | 선폭 |
|------------------|---|---------|------------------|------------------|------------------|
| 1. 실효스케일 | A | 작음 | +2 | +2 | +2 |
| 2. 계측대상 | A | 표면형상 | +1 | +1 | +1 |
| 3. 계측환경 | A | 환경 | 0 | 0 | 0 |
| 4. 수법 · 데이터처리 | A | 반전법/다점법 | 0 | 0 | 0 |
| | C | 상대/절대 | 0 | 0 | +1 |
| | D | 평균화 | -1 | 0 | 0 |
| | E | 아베의 원리 | -1 | -1 | -1 |
| 합계(가 기준) | | | +1 | +2 | +3 |
| Scale Factor 추정치 | | | 10 ⁻³ | 10 ⁻² | 10 ⁻¹ |

5. 메소 스케일 3차원 측정의 전개

메소 스케일 3차원 측정에서는 마이크로 스케일에서부터 나노 스케일로의 다리 역할로서의 갭이 생기고 있다. 정확하게는 갭이 아니라 마이크로 계측에서의 요구(3차원, 복잡한 형상, 절대 측정)가 나노 계측에 대하여서도 필요해졌고, 거기에 충분하게 대응하지 못하는 것이 문제가 되고 있다. 나노 계측에서는 양자

(量子)적인 제약 등에서부터 매크로 계측과 마찬가지로 요구에 대응하는 것이 원리적으로 어려운 부분도 있다.

그림4에 마이크로 계측에서부터 나노 계측에 있어서의 방향 지시 및 기본적인 개념을 나타낸다. Scale Factor Chart에서도 검토한 것과 같이 나노 계측에 있어서 Scale Factor를 개선하기 위해서는 계측 형상의

형상 및 계측 환경을 좋게 하는 것 이외에는 좋은 표준의 개발, 계측 수법 및 데이터 처리 수법의 개선이 필요하다. 이러한 개선의 방향을 지적 계측 기술로서 확립하는 것을 목표로 하고 있다.

여기에서는 아래의 세 가지 방향이 중요하다.

- 지적인 계측 기술의 적용 : 자기 교정 기술, 멀티 Probe 수법, 불확실성 추정 수법 등의 데이터 처리 수법의 고도화를 실행한다.
- In Process 계측 및 가공계측의 적용 : 가공 기술을 포함하여 In Process로 계측한다.
- 좋은 나노 표준의 개발 : 비교측정을 가능하게 하는 고정도의 나노 표준을 개발하여 그 값 지정을 고정도화 한다.

이러한 지적계측기술을 적용하여 제품 기하특성의 나노 스케일하에 의하여 일본형 제품 생산의 이노베이션을 가속화 하는 것을 「나노 스케일 제품 생산」이라고 정의 한다. 나노 스케일 제품 생산의 코어 기술

은 제품 기하특성의 계측기술이다. 지금까지 검토한 것과 같이 메소 스케일의 제품 생산 계측에서는 계측 대상의 형상정도가 나쁜 점, 2차원 및 3차원적인 형상 계측이 필요한 점, 복잡한 형상이 대상인 점에서 Scale Factor가 악화한다. 나노 스케일의 제품 생산을 추진 하는 계측기술은 이 갭을 메우기 위하여 지적계측기술의 체계화를 나노미터에 확장하여 생산기술혁신을 일으키는 것이 요구되고 있다.



일본정밀공학회지, Vol.74, No.3, 2008

본 기사는 간국대학교의 이성수 편집이사가 “일본정밀공학회지” 2008년 3월호 pp.213-216을 번역한 것으로 일본정밀공학회지의 연락처는 다음과 같다.

- 주소 : (우)102-0073 東京都千代田區 九段 北 1-5-9(九段誠和Building 2F)
- 전화 : +81-3-5226-5191/FAX : +81-3-5226-5192
- URL : <http://www.jspe.or.jp/>

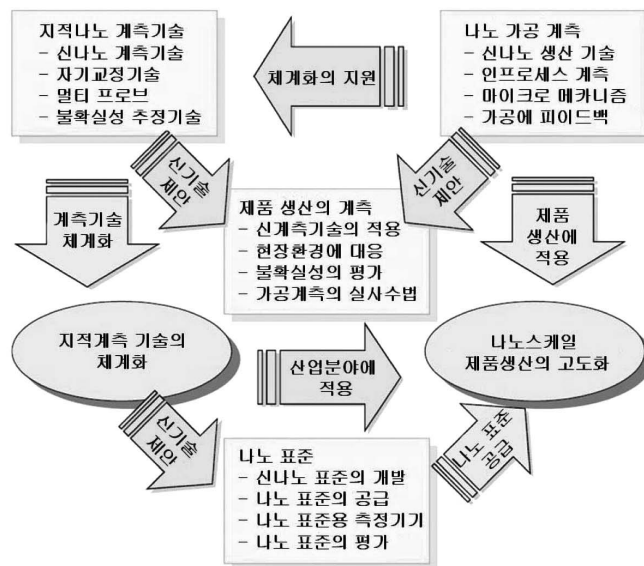


그림4 나노 스케일 제품생산의 고도화를 위한 지적계측기술의 체계화