

철판 두께 자동 측정기 개발

*정 승배, *박 준호, **이 응석

* : 대성중앙연구소, ** : 산업과학기술연구소

1. 서 론

철판재의 Roll 압연가공 중에는 균일한 제품의 판재가공을 위해 철판재의 실시간 측정이 필요하다. 현재, 포항제철사는 이 공정에서 두께 측정을 위해 방사광 측정기를 사용하고 있다. 이 장비의 출력치에 대한 보정은 여러 종류 두께의 평판을 정밀하게 가공하고, 수동형 측정기와 방사광 측정기로 비교하여 실행되고 있다. 이 방법의 문제점은 수동형 측정기의 정밀도로 인해 가공한 시편 자체의 두께를 정확히 평가할 수 없기 때문에 방사광 측정기의 정밀한 보정이 어렵다는 것이다. 더욱이 이것의 측정 정밀도는 수 μm 이상이어서 서브마이크론 이하의 정밀한 측정을 하기가 어려운데 현장에서는 서브마이크론 이하의 정밀한 측정을 요구하고 있다.

철판 두께의 평가는 각기 다른 여러 점을 측정하고 이를 통계적으로 계산하여야 되는데, 수동형 두께측정기는 이를 수행하기 번거롭고, 반복하여 측정할 경우에 같은 값을 얻기가 어렵다. 이는 같은 점을 측정하기 어렵기 때문이다. 또한 시편이 휘어 있을 때, 시편의 휨에 대한 보정 즉, 코사인 오차(COSINE ERROR)를 보정하기가 어려워 측정 오차를 수반하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 자동 두께 측정기 시스템을 개발하였다. 이 제품의 목표사양을 측정범위는 100 ~ 200mm, 측정 두께 범위는 0 ~ 20mm, 두께 측정 정밀도는 0.2 μm 로 정하였다. 또한, 측정대상은 전도체로 제한하였다. 본 과제에서는 이를 개발하기 위해 측정원리에 적합한 시스템을 설계 및 제작하고, 측정하는 운영소프트웨어의 개발 및 보정에 관한 연구를 진행하였다.

2. 두께 측정 원리

평판 두께 측정 시스템을 결정하기 위해서, 먼저 레이저 센서, 용량형 센서, 와전류형 센서, LVDT 등 변위센서들의 정밀도와 보정방법에 관해 비교 검토하였고, 이 중에서 용량형 센서를 본 시스템의 센서로 결정하였다^[1-3]. 측정시스템은 0.2mm ~ 20mm의 영역에서 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 의 측정정도를 요구하고 있어 본 과제에서는 다음과 같은 측정원리를 사용하였다. 그림1

은 본 연구에서 사용한 두께 측정기의 원리를 보여준다. 이것은 상하 두 센서의 간격을 기준하여, 각 센서와 시편과의 간격을 측정하는 것이다. 이 방법으로 측정을 하기 위해서는 상·하 센서의 간격은 측정시편의 두께에 따라 적절히 가변되어야 한다. 그림1(a)는 센서의 기준간격을 결정하는 방법을 보여준다. 점선으로 도시된 영역은 센서의 측정 범위 M_s 를 나타낸 것이다. 상·하 센서 사이에 0급의 표준 게이지 블럭을 설치하고, 시편과 상·하 센서의 위치를 점선이내의 적절한 위치에 고정한다. 이때 게이지 블럭의 두께는 센서의 측정범위 제한에 의해 측정하고자 하는 시편의 두께보다 $\pm M_s/2$ 이내의 것을 설치한다. 두 센서의 기준 간격 l_R 은 게이지 블럭 두께 l_b 와 시편과 상·하 센서의 간격 l_u , l_d 의 합으로 계산된다. 즉,

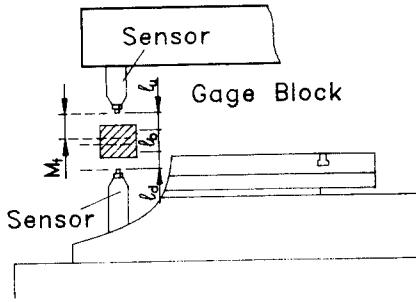
$$l_R = l_b + l_u + l_d \quad \text{----- (1)}$$

그림1(b)는 센서의 간격 결정 후, 두께 측정하는 모습을 보여준다. 센서가 시편 상에 위치되어 상·하 센서의 간격 l_u , l_d 를 측정하면, 두께 l 은 식(2)로 계산된다.

$$l = l_R - l_u - l_d \quad \text{----- (2)}$$

이 방법은 상·하 센서의 간격을 기준하여 측정하므로 측정시에는 센서가 고정되어 실행된다.

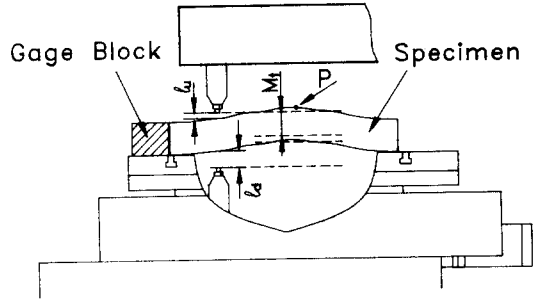
그림1(b)의 P점은 시편의 휨이 큰 부분을 나타낸 것이다. 이 점은 시편의 왜곡에 의해 점선으로 표시된 측정영역 M_s 을 벗어난 점이다. 실제로, 롤 압연한 제품의 평판은 두께가 얇을수록 시편의 휨이 크게 발생되므로 이러한 상황은 충분히 예상 가능한 것이다. 이러한 점을 측정할 때, 센서의 기준간격이 고정되어 있으므로 시편이 장착된 테이블은 P점이 센서의 측정영역내에 위치하도록 상하이동을 하게 된다. 이러한 측정방법은 0 ~ 20mm 범위에서 0.2 μm 측정 정밀도를 갖는 측정이 가능하다.



$$l_R = l_b + l_u + l_d$$

l_R : 기준 간격

(a) 기준간격 결정



$$l = l_R - l_u - l_d$$

l : 두께

(b) 두께 측정

그림1 두께 측정 원리

3 측정 데이터의 불확실도 계산

평판의 두께를 평가하기 위해서는 측정된 데이터를 통계적으로 계산하여야 한다. 여기서는 포항제철 측정실 규정에 의해 두께를 측정 데이터의 산술평균값 $\pm 2\sigma$ 로 나타내었고, 이 값에 대한 불확실정도는 우연불확실도(RANDOM UNCERTAINTY)와 계통불확실도(SYSTEM UNCERTAINTY)를 가지고 계산하였다.

우연불확실도 U_r 는 우연오차에 의한 불확실도를 나타내는 것으로, 이것은 표2에서 주어지는 인자값 t 와 측정점의 수 n 과 표준편차 σ 에 의해 다음과 같이 정의하였다.

$$U_r = t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{-----}(3)$$

<표2 측정점의 수에 따른 t 인자값>

n	2	3	4	5	6	7	8
t	14.0	4.50	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43
n	9	10	11	12	13	14	15
t	2.37	2.32	2.28	2.25	2.23	2.21	2.20
n	16	17	18	19	20	∞	
t	2.18	2.17	2.16	2.15	2.14	2.00	

계통불확실도 U_s 는 측정시스템의 불확실도와 보정하

는 게이지불러의 오차에 의한 불확실도를 의미하는 것으로, 이것은 측정점의 수에 따른 인자값 t , 측정장비의 불확실도 M , 게이지불러의 불확실도 GB 에 의해 식(4)와 같이 계산된다.

$$U_s = t \sqrt{\frac{M^2 + GB^2}{3}} \quad \text{-----}(4)$$

만약 $U_s > (M+GB)$ 이면 계통불확실도 식(5)로 계산한다.

$$U_s = M + t \sqrt{\frac{GB^2}{3}} \quad \text{-----}(5)$$

따라서 시스템의 전체 불확실도는 우연불확실도와 계통불확실도에 의해 식(6)과같이 계산한다.

$$U = \begin{cases} \sqrt{U_r^2 + U_s^2} & \text{if } U_s \leq (M+GB) \\ M + \sqrt{U_r^2 + U_s^2} & \text{if } U_s > (M+GB) \end{cases} \quad \text{-----}(6)$$

4. 두께 측정 시스템

그림2는 본 연구개발에서 제작된 전체시스템의 모습을 보여주고 있다. 이는 측정을 담당하는 기구부와 명령을 실행, 전달하는 제어부와 전체 시스템을 관장하고 측정결과를 출력하는 컴퓨터와 프린터로 구성된다. 이것은 항온실 환경

속에 위치하고 있고, 측정중에 온도변화를 줄이기 위해 공기의 흐름을 차단하도록 케이스가 기구부에 장착되어 있다. 각 부분에 대한 자세한 설명은 아래와 같다.

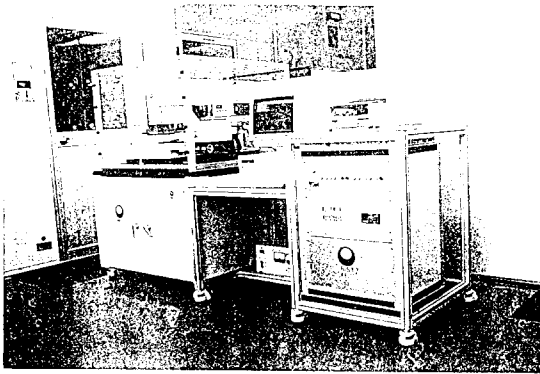


그림2 철판 두께 자동 측정 시스템

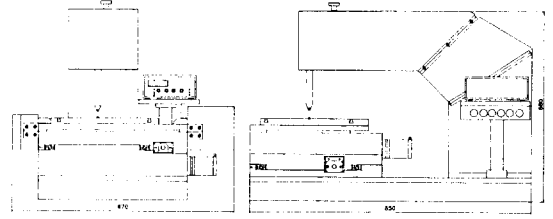


그림3 기구부의 개략도

4-1. 기구부

그림3은 두께 측정 시스템 기구부의 개략도를 보여준다. 기구부는 크게 베이스, XYZ테이블, U축 클립과 U축 테이블로 구성되어 있다. 베이스상에는 하측센서, XYZ테이블과 클립이 고정되어 있고, 클립에는 U축 테이블이 부착되어 있다. U축 테이블에는 상측 센서를 고정하는 센서홀더가 부착되어 있고, U축 볼스크류와 모터축은 타이밍 벨트로서 연결되었다. XY축에는 강성이 높은 크로스롤러 가이드와 피치가 4mm인 볼스크류가 사용되었다. Z축은 XY테이블상에 장착되어 시편과 센서의 간격조정을 담당한다. 각축의 구동모터는 마이크로 스텝핑 모터가 사용되고, Z축과 U축은 개회로 제어되고, XY축은 분해능이 5 μ m인 스케일이 장착되어 폐회로 제어된다. X, Y, Z, U 축의 구동범위는 각각 200mm, 200mm, 50mm, 10mm로 측정시편에 대한 요구사항을 만족하도록 하였다.

그림4는 Z축 테이블의 개략적인 모습을 보여준다. 여기에는 게이지블럭을 장착하는 영역과 시편을 장착하는 영역이 있다. 시편 장착영역은 시편크기에 따라 가변될 수 있도록 하였다. 이는 100 ~ 200mm 크기의 사각형과 원형 시편을 측정대상으로 하기 때문이다. 시편의 장착부에는 자석을 심어 자력에 의한 장착, 탈착이 용이하도록 하였다.

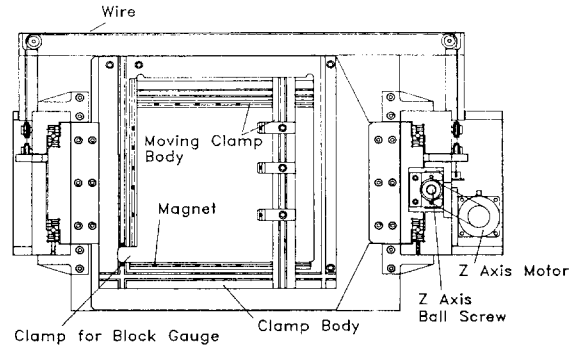


그림4 Z 테이블의 개략도

4-2. 제어회로의 구성도

그림5는 제어시스템의 개략적인 구성도를 보여준다. 이는 486 컴퓨터, 모터드라이버, A/D변환기, DIO 포트와 시리얼 포트 등으로 구성된다. 486컴퓨터는 주 콘트롤러의 기능을 갖고, 모터 드라이버와 RS-232C통신을 하며 명령전달 및 측정정보를 수집하고, 이를 수치 또는 그래픽화면으로 출력하는 기능을 갖는다. X, Y축 스케일 신호는 카운터보드를 통해 컴퓨터에 입력된다. 수동 구동시에 사용되는 조이스틱은 X, Y, U축의 구동이 가능하다. 각 축의 신호는 A/D변환되어 컴퓨터에 입력되고 이는 다시 RS-232C를 통해 각 모터에 지령되어 구동을 실행하게 된다. 센서의 신호는 전류 증폭기를 거쳐 16비트 A/D 변환되어 컴퓨터에 입력된다. 모터의 상태, 리미트 스위치의 상태는 DIO 포트를 통해 출력되거나 입력된다.

본 시스템에 사용된 MOTOR는 PARK HANNIFIN사의 OEM650X이다. 이는 마이크로 스텝핑 모터로서 정속한 운전이 가능하다. 드라이버에 콘트롤러가 내장되어 독립적인 구동이 가능하다. XY축은 스케일의 신호가 궤환되어 구동되고, U, Z축은 개회로 제어된다. 이들 모터는 1회전당 50,800STEP까지 가능하다.

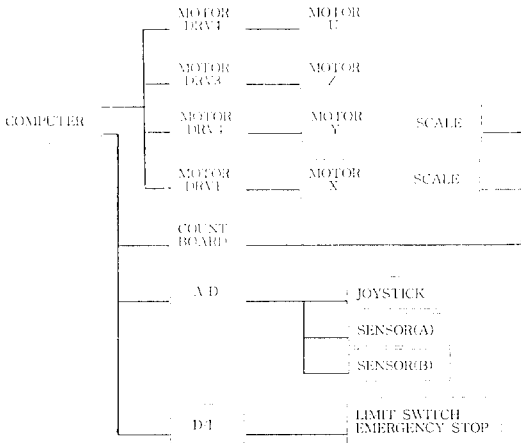


그림5 제어부의 개략적인 구성도

4-3 운영소프트웨어

본 시스템의 운영 및 측정 소프트웨어는 MS-C를 사용하였다. 이것은 한글메뉴 방식으로 채택되어 누구나 쉽게 사용할 수 있도록 되어 있고, 측정변수에 따른 자동측정과 조이스틱을 이용한 수동측정이 가능하도록 되어 있다. 자동측정시 측정 데이터는 시편의 형에 의한 코사인오차가 자동보상이 되도록 되어 있다.

본 소프트웨어는 그림6에 도시된 바와 같이 크게 보정, 측정, 출력, 끝 메뉴로 구성되어 있다. 보정메뉴에는 시스템의 원점복귀기능, 센서의 간격보정기능, 자동접근기능, 자동이탈기능, 조이스틱 구동 기능, 수동측정기능이 할당되어 있고,

측정메뉴에는 측정에 필요한 변수값들을 키보드로 입력하도록 되어 있다. 예를 들면, 시편의 형태, 두께, 재질, 크기, 측정영역, 측정점의 수, 측정회수, 측정온도 변수에 대한 값들을 입력하도록 되어 있고, 측정실행 명령도 있다. 출력에는 화일 입출력 기능과 측정된 데이터의 수치 및 그래픽 출력기능과 화면상에 그래픽 출력기능이 있다.

각 메뉴에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

가. 보정

①원점 복귀

Z, U축의 상측 LIMIT SWITCH위치, 시편을 기준으로 한 좌하단의 X, Y 위치를 절대원점으로 설정하였다. 원점복귀의 순서는 U축이 원점이동을 한 후에 Z축이 원점이동을 실행한다. XY축은 X축의 좌측, Y축의 전측 리미트 스위치 위치까지 이동한 후 반전하여 각 축 스케일의 기준마크를 지날 때까지 이동한다. 스케일 기준마크에 의해 카운터가 기준값으로 설정되고, 시편을 기준으로 한 (22,23)의 위치로 이동한 후 원점복귀를 완료한다.

②센서간격보정

측정원리상 상하센서의 간격을 알고 있어야 두께를 측정할 수 있으므로 이 명령은 측정을 실행하기 전에 반드시 실행되어야 한다. 보정용 게이지 블럭의 일부 치수는 MENU상에서 선택이 가능하고, MENU상에 없는 치수는 KEY IN이 가능하도록 되어 있다. 보정용 게이지 블럭의 두께를 입력하고 보정명령을 선택하면 리미트 스위치의 기능을 off 시키고, 각 축은 게이지블럭 시편의 위치로 이동하고, U축과 Z축이 이동하여 센서와 보정용 게이지 블럭의 간격을 각각 약 0.25mm씩 유지하고, 센서간격을 정확히 보정한 후 (22, 23)점으로 이동한다.

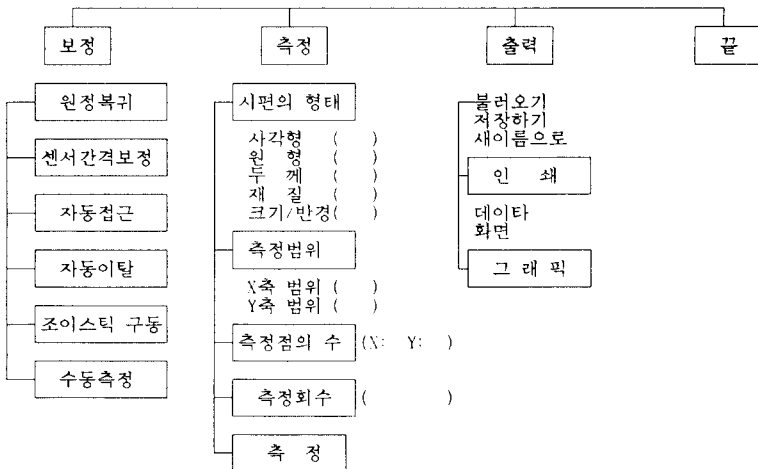


그림6 운영 소프트웨어의 트리구조

③자동접근

Z축에 장착된 시편과 하측센서가 0.25mm의 간격이 유지 되도록 Z축이 구동되고, Z축구동이 완료된 후, 상측센서와 시편과의 간격이 0.25mm가 되도록 L축이 구동된다

④자동이탈

센서와 시편과 간격이 접근된 상태에서 시스템이 비정상 작동을 하였거나, 명령이 완료된 상태에서 센서와 시편과의 간격을 충분히 크게 유지하기 위해 사용된다.

⑤조이스틱 구동

조이스틱 구동모드가 설정되어 조이스틱을 이용한 X, Y, U 축의 수동구동이 가능해진다. 조이스틱의 좌우는 X축의 구동, 전후는 Y축의 구동회전방향은 U축의 구동을 담당한다. 각 축의 구동속도는 정지, 저속, 중속, 고속 모드로 구분되어 있다.

⑥수동측정

센서보정기능, 조이스틱 구동기능, 측정기능을 순차적으로 행하여 수동측정이 실행된다. 측정점까지의 이동은 조이스틱을 이용하고, 측정실행은 조이스틱에 부착되어 있는 SWITCH를 선택하면 이루어진다. 측정된 데이터는 동시에 화면 출력된다. 이때 출력되는 값은 시편의 코사인오차가 보정되지 않은 것이다.

나. 측정

측정메뉴에는 시편에 대한 정보와 측정변수에 값을 키보드 입력하거나 선택할 수 있게 되어있다. 시편에 대한 정보 즉, 시편의 형태, 두께, 재질, 크기, 반경등을 입력하도록 되어 있으며, 측정범위, 측정점의 수, 측정회수등을 입력하도록 되어있다. 측정영역이 시편의 크기를 초과시에는 ERROR 메시지를 자동 출력하도록 되어있다. 측정실행시 화면에는 변수에 따른 측정경로가 화면에 DISPLAY되고, 측정값과 이에 상당하는 그래프가 화면에 나타내진다.

센서홀더 등의 이유 때문에 시편크기에서 약 25mm내부의 영역만을 측정할 수 있다. 측정회수를 1회 이상으로 입력하면, 각 측정점에 대해 평균된 값이 저장파일로 남게 된다.

다. 출력

①불러오기

측정 DATA FILE을 선택하여 볼 수 있게 되어 있다. 측정 FILE은 *.TB확장자를 갖고 있다. 여기서는 PE EDITOR가 사용된다.

②저장하기

측정된 DATA를 저장하는 기능을 갖는다. 화면상에 UNTITLED가 표시되어 있으면 파일이름을 KEY IN하도록 되어 있으며, 파일이름이 기입되어 있을 때는 그 이름으로 저장한다.

③새 이름으로

현재 표시된 이름과 다른 이름으로 측정 FILE을 저장하고 싶을 때 사용된다.

④인쇄

DATA 및 측정 DATA의 그래픽 화면을 프린터로 출력한다.

⑤그래픽

측정파일 데이터를 그래픽으로 화면상에 출력한다.

5. 실험 예

5.1 용량형 센서의 보정

본 과제에서 사용된 센서는 Capacitec사의 용량형 센서로서 0.5mm 범위에서 ±0.2%의 선형성과 ±0.01%의 반복능을 갖고 있다. 이 센서의 보정은 분해능이 10nm인 레이저인터페로미터를 사용하여 실시하였다. 그림7은 센서를 보정하기 위한 측정시스템의 개략도를 보여준다. 상하 센서사이에 전도체인 철판이 있고, 철판상에는 반사경이 놓여 있고, 베이스 상에는 인터페로미터가 장착되어 있다.

상측 센서를 기준으로 출력신호가 약 0.5V간격으로 증가 될 때까지 시편을 구동하고, 그 때의 상측, 하측 센서의 출력

<표1. 센서의 출력전압에 따른 변위 DATA>

센서 (상)		센서 (하)	
거리 (mm)	전압 (V)	거리 (mm)	전압 (V)
0.00361	0.0952	0.01000	0.0000
0.02287	0.5013	0.03317	0.3952
0.04244	0.8994	0.05392	0.7953
0.06350	1.3164	0.07364	1.1685
0.08350	1.7066	0.09441	1.5578
0.10448	2.1111	0.11427	1.9280
0.12450	2.5006	0.13486	2.3156
0.14567	2.9187	0.15458	2.6920
0.16497	3.3040	0.17416	3.0687
0.18547	3.7151	0.19440	3.4595
0.20470	4.1006	0.21461	3.8459
0.22498	4.5045	0.23468	4.2307
0.24547	4.9108	0.25453	4.6114
0.26532	5.3036	0.27502	5.0002
0.28539	5.7012	0.29530	5.3854
0.30560	6.1027	0.31453	5.7504
0.32584	6.5104	0.33503	6.1434
0.34542	6.9035	0.35433	6.5167
0.36514	7.3005	0.37550	6.9285
0.38573	7.7125	0.39552	7.3193
0.40559	8.1076	0.41650	7.7255
0.42636	8.5202	0.43650	8.1135
0.44608	8.9085	0.45756	8.5199
0.46683	9.3143	0.47713	8.8949
0.49000	9.7639	0.49639	9.2628

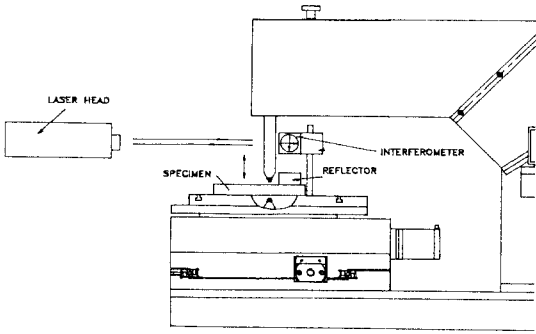


그림7 레이저인터페로미터를 이용한 용량형 센서의 보정

전압과 레이저 인터페로미터의 출력을 측정하였다. 측정된 결과는 표1에 나타난 바와 같다.

5-2. 실험결과

본 장비의 신뢰도를 평가하기 위해서는 알고 있는 정밀한 시편을 측정하여, 측정결과를 비교하여야 하는데 정밀한 표준시편을 제작하기가 어렵다. 이보다 정밀한 장비를 사용하여 비교하려고 하여도 같은 점을 측정할 수가 없기 때문에 비교 평가한다는 것도 어렵다. 따라서 본 과제에서는 시스템의 정밀도를 예측하는 한 방법으로 측정시편영역에 게이지 불력을 설치하였다. 표준 게이지불력을 가지고 보정을 한 후 측정영역으로 이동하여 다른 게이지불력을 측정하고, 그 결과를 비교하였다. 게이지불력을 1mm, 5mm, 10mm 로 하였을 때 최대오차가 $\pm 0.0001\text{mm}$ 로 계산되었다. 이러한 결과로 본 장비의 측정정밀도를 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 로 추정하였다.

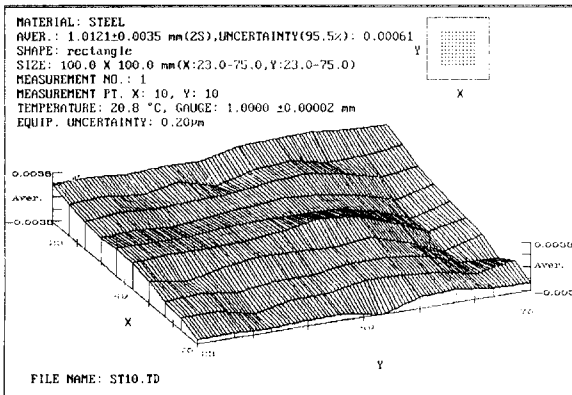


그림8 철판 두께 측정 예

그림8은 측정 시스템에 시편을 장착하고 측정한 결과를 그래픽 화면으로 보여준 실 예이다. 이것은 0급 $1.0000 \pm 0.00002\text{mm}$ 의 게이지불력으로 기준간격을 결정하고, X,Y축을 각각 23.0 mm 에서 75.0 mm 까지 10점씩 100점을 측정한 결과이다. 측정결과 두께는 $1.0121 \pm 0.0035\text{mm}$, 데이터에 대한 불확실도는 0.00061mm 로 계산되었다. 화면출력에는 재료, 두께, 불확실도, 시편의 형태, 크기와 측정영역, 보정한 게이지 불력의 정보, 측정온도, 장비의 불확실도가 나타내져 있고, 좌측 상단에는 측정시편의 크기와 측정영역이 비례 크기로 나타내지고, 측정 데이터가 3차원 그래픽 된다.

6. 결과

본 과제를 수행한 결과 측정원리에 따른 철판 두께 자동 측정기가 설계 및 제작되었다. 또한, 운영 및 측정소프트웨어도 개발되어 자동 측정 시스템이 구축되었다. 따라서 시편에 대한 정밀한 측정과 방사광 측정기의 정밀한 보정이 가능해졌다. 이것은 소프트웨어에 의해 자동 및 수동 측정이 가능하고, 측정점, 측정영역, 측정회수등을 변수에 의해 가변시킬 수 있다. 자동 측정의 경우, 코사인 오차는 자동적으로 보정 된다.

두개의 게이지불력을 가지고 하나는 보정시편, 다른 하나는 측정시편으로 사용하여, 각각을 측정 비교하여 본 결과 측정오차가 최대 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 로 계산되어 목표사양이 충족됨을 확인할 수 있었다. 측정결과 출력은 측정 데이터에 대한 통계적 계산을 통해 평균값 $\pm 2\sigma$ 로 나타내고, 장비와 데이터에 대한 불확실도가 동시에 출력된다.

본 시스템은 철판의 두께 뿐만 아니라 철판의 형상도 측정할 수 있고, 측정센서를 교체함으로 비철재료나 반도체 웨이퍼 등과 같은 평판의 두께 및 형상을 측정하는 데도 응용이 가능하다.

참고문헌

1. Ernest O. Doebelin, MEASUREMENT SYSTEM Application and Design, McGraw-Hill Book Company
2. Wo Gopel, J.Hesse, J.N. Zemel, Sensors, VCH
3. "변위 센서의 선정 포인트", 기계설계, Vol.8, No.3, 1993, pp 64 ~ 71