

Scanning Probe를 이용한 OMM(On the Machine Measuring) 시스템 개발 및 평가

김선호*, 이승우*, 김인훈**, 권진우**, 이원정**

* 한국기계연구원 자동화연구부

** LG 전자 생산기술센터

1. 서론

기계가공 생산시스템에서 대량생산라인의 경우에는 측정 및 검사공정을 별도로 두고 있으나, 금형과 같은 다 품종소량 생산품의 경우에는 이러한 방식이 적합하지 않다. 이러한 경우에는 유연성이 높은 3차원 측정기(CMM)를 설치하여 운용하고 있으나 운용비용이 많이 들고 관리하기가 쉽지 않으며 Setup 및 측정시간이 길어져 비경제적일 수가 있다. 또한 3차원 측정기의 한정된 크기 때문에 대형가공물이라든지 탈착이 어려운 생산품의 경우에는 마땅한 측정 방법이 없는 실정이다.[1,2]

이에 반해 최근의 생산시스템은 황삭, 정삭, 연삭 그리고 측정이 한대의 기계에서 이루어지는 복합가공화 추세에 있으며, 가공방법에 있어서도 밀링가공후 동일기계에서 연마를 동시에 수행하는 방법이 등장하고 있다.

본 연구에서는 이러한 금형측정상의 문제를 해결하고 최근의 가공시스템의 추세에 부응하기 위해 공작기계에서 제품의 가공이 종료된 후, 공구의 교체에 의해 즉시 기내(機內: On the Machine) 측정이 가능한 시스템에 대해 연구했다.[3] 형상 측정 프로브로는 고속 고정밀 측정이 가능한 접촉식 스캐닝 프로브를 사용했으며, 이의 특성이 고려된 3차원 자유곡면 금형의 CP측정(연속측정)과 PTP측정(점측정)이 가능한 알고리즘을 개발했다. 개발된 알고리즘을 이용해 측정성능을 확인하기 위해 하드웨어와 소프트웨어로 구성된 OMM 3차원 가공형상 자동측정 시스템으로 구성했다.

본 논문에서는 개발된 OMM 시스템을 3종류의 TV Shadow Mask 금형의 측정에 적용한 결과를 소개한다. 측정된 결과는 CMM을 이용해 측정한 결과와 비교 했고, 비교된 결과를 이용해 개발된 시스템의 반복정밀도, 측정 정확도를 통계적 방법으로 그리고 경제적 관점에서 CMM을 이용한 기존의 방법과 개발된 시스템을 비교 평가했다.

2. 금형측정에 적합한 프로브 선택

CNC 공작기계에서 기내측정용으로 사용하기 가능한 센서로는 3점 볼의 점접신호를 이용한 Touch Trigger Probe, Stylus가 평행이동기구를 갖는 Scanning Probe 그리고 비접촉식인 레이저 변위센서가 있다.

터치 프로브는 시스템 구성이 간단하다는 장점은 있으나, 3점 볼이 프로브를 지지하고 있는 구조를 가지는 관계로 방향성을 가지며 프로브의 이동속도에 따라 Pre Travel Error를 가지기 때문에 이에 대한 보상이 필요하며

측정속도가 비교적 낮은 단점을 가진다.[4,5,6].

레이저 거리센서로 대표되는 비접촉식 측정법은 레이저 광(光) 방향으로만 측정이 가능하며 축의 직각방향 측정은 불가능하다. 따라서 센서를 공작기계의 주축에 장착하는 경우 Center Shift의 보정이 불가능하다. 또한 피측정물의 경사각도에 따라 오차가 발생하며 금형과 같이 요철이 있는 가공면의 경우에는 표면상태의 영향을 받는다.

접촉식 스캐닝 프로브는 3축이 평행이동식 탄성기구를 가지며 피가공물에 접촉시 축압이 낮아(375g/mm) 피가공물을 손상 시키지 않는다. 또한 높은 분해능을 가지면서도 응답성이 좋아 다른 두 방법에 비해 고속측정이 가능하다.

이러한 장단점을 고려해 본 연구에서는 스캐닝 프로브를 형상 측정용 프로브로 선택했다. 이에 대한 특성을 표 1에 나타 내었다.

3. 측정원리

3.1 프로브의 Center Shift 보정

OMM 시스템은 가공이 완료된후 공구를 측정 프로브로 교체하여 즉시 형상을 측정하는 시스템이다. 따라서 교체된 측정 프로브의 중심은 금형을 가공한 공구의 중심과 반드시 일치 해야한다. 만일 어느 방향으로 중심이 편심되어 있으면 형상의 목표위치와 측정위치가 차이가 나게되어 정확한 측정이 되지 않는다. 본 연구에서는 프로브의 Center Shift를 보정하기 위한 방법으로 원의 중심값을 알고 있는 임의 직경을 갖는 원을 사용했다. 측정은 X, Y방향의 기준면위 필스값과 CNC의 SKIP 신호를 이용해 자동으로 Center Shift량을 측정하여 측정된 편심량을 이용해 기계좌표를 자동으로 변경하는 Custom Macro 프로그램을 이용 했다. 접촉방향 전환을 위한 기준필스는 20 μ m으로 했으며 고속측정을 위해 2단계 접촉방식을 이용했다. 이러한 방법에 의해 임의 직경원의 중심을 10회 반복 측정한 결과를 그림1에 나타내었다. 따라서 이러한 방법을 이용해 금형을 가공한 공구의 중심과 측정 프로브의 중심을 3-4 μ m 이내로 일치 시킬수 있다.

3.2 반경오차

접촉식 프로브를 이용할 경우 그림2에 보이듯이 일정한 직경을 갖는 볼(Ball)이 부착된 Stylus를 이용하여 측정을 한다. 그림에서 보이듯이 측정하고자 하는 점은 P인데도 불구하고 볼의 반경 때문에 Q점에 접촉한다. 편의

상 Z 방향만 생각할때 이로 인해 발생하는 ΔZ 는 접촉점의 각도 θ 를 알면 구해진다. 이 경우 θ 가 30° 일때 ΔZ 는 $0.155R$ 이 된다. 임의의 자유형상에 대한 측정시 접촉점에서 θ 를 추정하는 방법은 몇가지 제안된 방법이 있으나 어떠한 방법이든 오차를 수반한다. 이러한 어려움을 감안해 본 연구에서는 CP 측정(연속측정: Continus Path Measurement)의 경우에는 프로브의 볼 크기와 절삭공구의 직경을 동일한 것을 사용함으로써 반경방향 오차를 줄였다. PTP 측정(점측정: Point to Point Measurement)의 경우에는 반경 $25\mu\text{m}$ 인 축침 프로브를 사용했다. 이 경우 접촉점에서의 경사 각도가 20° 인 경우 ΔZ 는 $1.6\mu\text{m}$ 가 된다. 본 연구에서는 이 크기는 무시하기로 한다.

3.2 CP 측정(Continus Path Measurement) 원리

3차원 형상을 측정하거나 검사하는 방법으로 전체를 검사하는 방법도 있지만, 한 단면을 선택해서 단면을 검사하는 방법이 있다.

연속측정은 3차원 곡면중에서 한 단면을 선택해서 가공도를 연속 측정하는 방법이다. 본 연구에서는 한 단면을 측정하기 위한 측정 프로그램은 금형을 가공한 NC 프로그램을 이용하여 생성 했다. 연속된 NC 프로그램에서 측정하고자 하는 1개의 라인을 선택하여 측정 프로그램을 생성했을 때, 프로그램이 G01에 의한 보간 코드가 N개로 구성이 되어 있다고 할 때 그림3(A)와 같이 표현이 가능하다. 이때 총 NC 패치와 이동 소요시간 T 및 샘플당 이동거리 l_s 는 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$L = \sum_{i=1}^N L_i$$

$$T = \frac{L}{F_s}, \quad S = TF$$

$$l_s = \frac{L}{S}$$

- L : Total NC Path Length [mm]
- T : Total Moving Time [sec.]
- S : Sample 데이터 수
- l_s : Sample당 이동거리 [mm]
- F_s : Scanning Feed [mm/sec.]
- F : Sample 주파수 [hz]

여기서 L_i 는 NC 코드에서 X축 및 Z축 증분으로 부터 얻어지며 프로브의 피드와 샘플 주파수를 결정하면 총 이동 소요시간 및 샘플수가 결정된다. 이때 총 이동거리

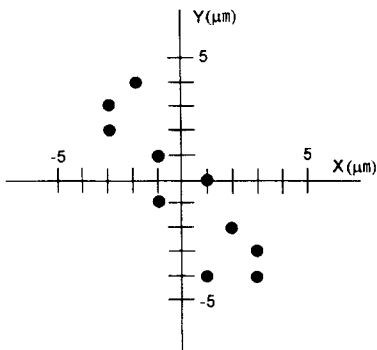
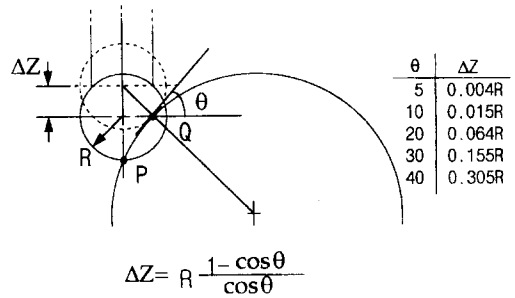


그림1. 기준원 측정 반복정밀도

를 샘플수로 나누면 샘플당 이동거리가 결정된다. 이러한 환경이 설정된후 NC측에서는 수동방법으로 이미 알고 있는 특정점에 대해 기준점을 설정한 후 측정 프로그램을 기동한다. 측정시 피측정면의 Overcut을 측정하기 위해 프로브는 피측정면에 약 $50\mu\text{m}$ 정도 압축된 상태에서 측정을 개시하기 때문에 프로브가 이동되는 순간 그림 3(B)에서 이동방향의 반대쪽으로 프로브는 약 $20\mu\text{m}$ 정도 밀리는 현상이 발생한다. 이러한 현상을 샘플 시작 기점 으로 잡았다. 샘플 시작 기점부터 연속으로 S개의 데이터가 샘플되면 샘플을 종료하고 얻어진 프로브의 변위값을 이용해 X축 데이터로 연산 및 보정후 형상을 표현하게 된다. 연속측정법에 대한 측정순서는 그림4에 나타나 있다.

3.3 PTP 측정(Point to Point Measurement) 원리

3차원 형상을 측정하는 방법으로 CAD 설계 데이터를 기준으로 금형의 전체를 측정하는 방법이 점측정 방법이다. 이는 전면을 측정하기 위해 측정정보를 설계 데이터에서 받아서 각각의 X,Y 좌표에 대한 Z좌표 값을 입력하여 측정 프로그램을 생성한 후 NC로 전송한다. NC에서는 연속측정과 마찬가지로 기준점을 설정한 후 자동측정을 행한다. 측정하는 방법은 CMM에서 측정하는 방법과 유사하지만 운용하는 방법은 Custom Macro 프로그램을



$$\Delta Z = R \frac{1 - \cos\theta}{\cos\theta}$$

그림2. Ball Stylus의 반경 방향 오차

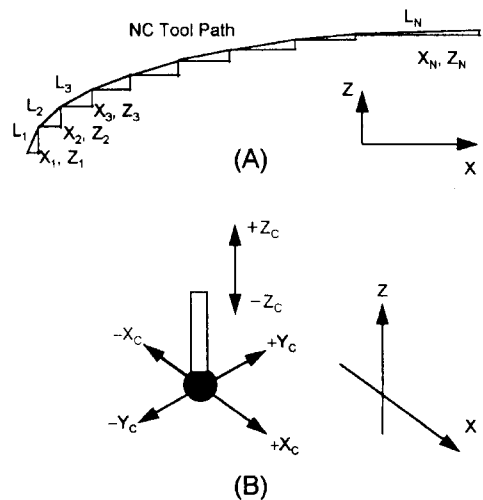


그림3. CP 측정을 위한 Tool Path 개념

작성해서 사용했다. 측정용 매크로 프로그램은 PC에서 생성하는 측정좌표 정보를 가지는 1개의 주 프로그램과 측정할 X위치, 측정할 Y위치 그리고 프로브가 측정을 위해 접근할 Z위치 및 측정좌표 전송용등 4개의 서브프로그램으로 구성하여 유연성을 부여했다. NC에서는 매크로 프로그램에 의해 각 1점을 측정할 때 마다 측정좌표 X_p , Y_p , Z_p 를 PC로 송신한다. PC에서는 좌표를 수신받은 후 그때의 프로브 변위 값 X_c , Y_c , Z_c 를 읽는다. 이를 토대로 X_m , Y_m , Z_m 를 구한다. 점측정법에 대한 측정순서는 그림5에 나타내었다.

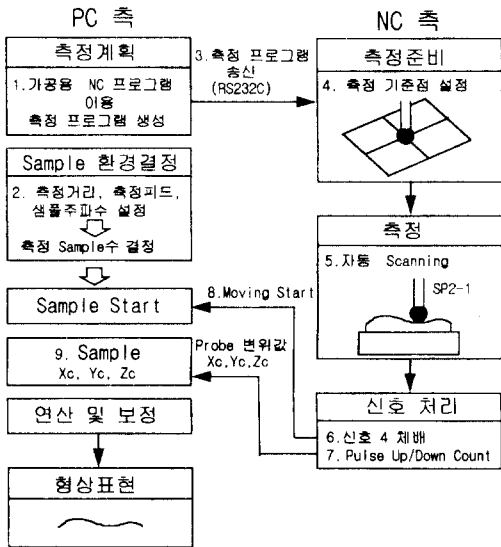


그림4. CP 측정 흐름도

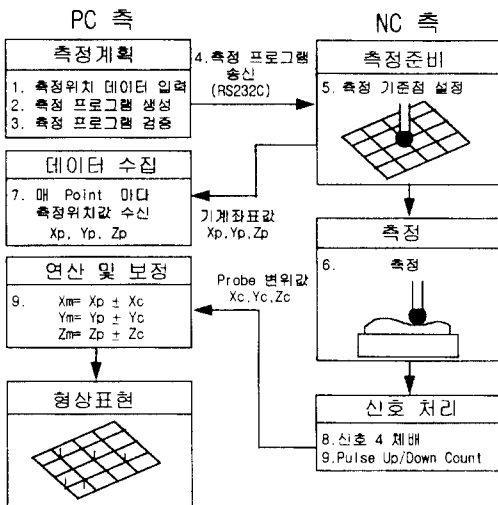


그림5. PTP 측정 흐름도

4. 시스템 구성

이상과 같이 제안된 방법을 이용해 3차원 형상을 측정하기 위해 그림6와 같이 OMM 시스템을 구성 했다. OMM 운용 소프트웨어가 탑재된 PC와 측정 프로브가 설치된 CNC 공작기계는 PC에서 작성된 측정 프로그램의 송신, 측정위치 데이터 수신을 위해서는 RS232C로 연결되어 있으며, 자동측정을 위한 CNC SKIP 입력은 PC에 설치된 DIO(Digital Input Output) Board와 연결되어 있다. DIO에 연결된 Buzzer는 작업자의 편의를 돕기 위해 설치했다. CNC 주축에 설치된 스케닝 프로브는 1축당 4개의 상(相) A, \bar{A}, B, \bar{B} 데이터가 EIA-422-A 형식으로 출력된다. 출력되는 신호는 1주기가 $4\mu\text{m}$ 이기 때문에 이를 $1\mu\text{m}$ 으로 체배 시키기 위해 특별히 제작된 4체배 펄스 카운터를 사용하여 필요한 주기로 펄스값을 Up Down 방식으로 누산했다.

5. 측정결과

측정은 측정환경에 따라 CP측정과 PTP측정을 선택해서 측정했는데 그림7에 CP측정 모습을 나타 내었다. CP측정을 위해 가공용 NC 프로그램중 한 개 라인을 인입으로 선택하여 총길이 84.525mm를 측정한 결과를 그림8에 나타내었다. 그림에서 보이듯이 이속 $300\text{mm}/\text{min}$ 으로 길이를 측정하는데 16.905초가 소요되었으며 이때 측정 주파수를 10Hz로 했을 때 169개의 데이터가 얻어졌다. 이렇게 얻어진 프로브 변위값 Z_c 를 표시한 것이다. 반복 정밀도를 확인하기 위해 동일한 측정을 3번 반복했는데 최대변위와 최소변위는 큰 변화가 없음을 알 수있다. 또한 정확도를 측정하기 위해 4점을 CMM과 OMM을 이용해 PTP측정한 결과를 그림 아래에 나타내었다. PTP측정 결과도 잘 일치하고 있다.

그림9는 3종류의 S/MASK 금형을 PTP측정한 결과이다. 최대변위와 최소변위는 14인치 21인치 28인치에서 각각 11.1, 14.8, 29.5 μm 을 나타내고 있다. 각 측정점은 14인치의 경우 63점, 21인치의 경우 169점 그리고 28인치의 경우 285점이 측정되었다. 그림에 나타난 최대 및 최소변위는 형상 설계치에 대한 가공오차의 상태치를 나타낸 것으로 양 4각 모서리에서 Under Cut 현상이 발생했음을 알 수있다. 표2는 동일한 방법으로 CMM에서 측정한 결

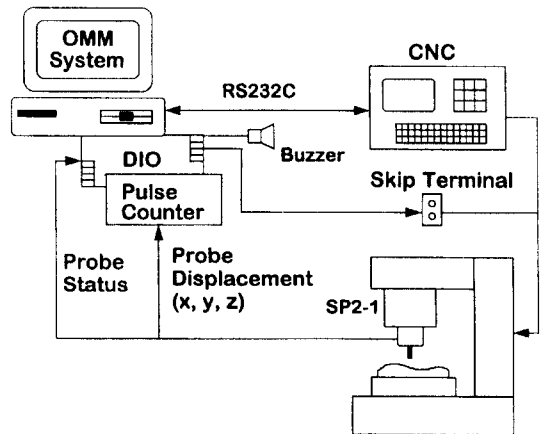


그림6. OMM 시스템 구성도

과와 OMM에서 측정된 결과를 각 측정점마다 비교한 차이값을 나타낸 것이다.

6. 측정 시스템 평가

개발된 OMM 시스템은 성능 및 경제성 측면에서 평가했다. 성능평가에 있어서는 측정 시스템 자체의 반복정밀도를 그리고 정확도 측정에 있어서는 CMM 측정값과 비교하여 통계처리 분석을 했다. 경제성 측면에서의 분석은 기존방법과 개발된 OMM 시스템의 도입에 따른 운용 시간분석을 수행했다.

반복정밀도에 대한 측정은 PTP 측정법을 이용했다. 대상은 S/MASK 28"로 했으며, 지정된 측정방법에 따라 285점을 4회 반복 측정했으며, 측정시 매번 기준점을 설정했다. 측정결과 반복정밀도의 차이는 2 μ m을 벗어나지는 않았다. 한 예로 285점 중 -2, -1, 0, 1, 2 μ m 차이가 각각 3, 48, 155, 73, 6점으로 나타났다. 이에 대한 통계처리 결과를 표3에 나타내었다. 표에서 보이듯이 반복정밀도 평균은 0.10 μ m 그리고 표준편차는 0.73 μ m으로 추정되었다. 이러한 반복정밀도는 기계의 정밀도와 측정 시스템의 정밀도가 포함되어 나타난 결과로서 측정 시스템으로서 양호한 결과로 판단된다.

표1. 장비사양

Milling Machine	<ul style="list-style-type: none"> Model: UB75 (URAWA, JPN) 항온조건: 22°C ± 1.5
Scanning Probe	<ul style="list-style-type: none"> 형식: 3차원 변위 검출센서 Model: SP2-1(Renishaw, UK) 변위기구: 3축 탄성변위기구 Probe 자세: 수직, 수평 최대변위량: ±4.5mm 분해능: 0.001mm 축압: 3.5 N/mm
CMM	<ul style="list-style-type: none"> Model: UMM850 (ZEISS) Probe Dia.: 3mm U1= 2.5+ L/300mm U3= 2.8+ L/250mm

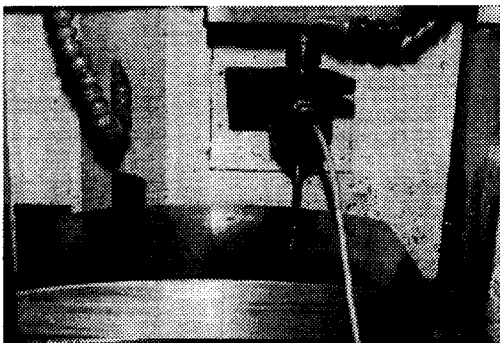


그림7. CP 측정 장면

표2. CMM에 대한 OMM 측정결과의 상대오차

규격: 14" S/MASK 구분: (OMM, CMM DATA 비교지) 96.3.20

X \ Y	-120	-100	-80	-40	0	40	80	100	120
90	0	-2	-4	-2	1	0	0	0	-1
80	3	2	-1	1	3	3	2	1	2
40	2	3	-1	1	3	3	1	0	-1
0	-4	-2	0	-1	1	2	-1	1	2
-40	0	2	3	2	2	5	7	3	3
-80	2	2	1	2	2	2	5	2	4
-90	6	6	7	4	4	6	7	7	5

규격: 21" S/MASK 구분: (OMM, CMM DATA 비교지) 1996.1.19

X \ Y	-193	-180	-160	-120	-80	-40	0	40	80	120	160	180	193
147	-6	-5	-5	-4	-4	-3	-2	1	0	1	6	3	10
140	-5	0	-2	6	-1	0	2	2	3	2	3	5	3
120	-3	-5	-2	-4	-4	-5	-2	-1	1	0	1	1	3
100	4	0	-3	-2	0	-1	-1	0	2	2	2	2	3
80	1	2	-3	-4	-4	-4	-2	-2	-1	1	-1	1	2
40	-4	-9	-3	-1	-2	-1	-1	0	1	3	5	3	4
0	3	6	3	1	5	3	1	2	3	6	6	6	6
-40	2	-1	1	3	-1	0	0	1	-2	4	4	5	5
-80	2	3	2	3	-1	2	-2	1	0	1	1	2	1
-100	1	2	1	1	2	1	2	1	4	5	5	6	4
-120	3	-1	3	0	0	-1	0	-1	0	0	0	2	1
-140	2	1	0	1	1	1	2	2	3	3	4	4	4
-147	1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	2	0

규격: 28" S/MASK 구분: (OMM, CMM DATA 비교지) 1996.1.4

X \ Y	-265	-240	-220	-200	-180	-160	-120	-80	40	0	40	80	120	160	180	200	220	240	265
140	4	-4	-12	5	5	4	3	2	1	0	-2	-1	0	-3	-2	-6	-4	-7	-2
120	4	0	-6	-12	-3	-8	1	0	-1	-1	-1	-2	-2	-6	-4	-1	0	-2	-1
100	7	5	4	4	1	1	-3	-2	-2	-3	-5	-6	-4	-4	-3	-5	-2	-3	-1
80	11	1	2	-3	2	0	1	-1	-1	0	0	-4	-4	-7	-4	-5	-6	-3	
60	6	5	0	-6	2	1	1	0	1	1	1	0	-1	-3	-4	-1	-1	-2	-7
40	9	1	-4	-6	1	-3	-2	-1	-2	-1	-2	-2	-4	-5	-2	-3	-3	-8	-1
20	11	7	4	1	2	-3	0	0	-1	-1	-2	-2	-4	-5	-4	-3	-5	-4	-4
0	5	2	0	-3	-3	0	-1	-4	0	1	-1	-1	-2	-3	-2	-3	-1	-2	0
-40	3	0	-2	-5	-3	-2	-1	-1	-5	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-4	-1
-60	2	3	0	1	0	-4	-5	0	2	4	2	2	1	-1	0	0	0	-3	-1
-80	7	5	1	2	2	4	2	0	3	1	-2	-1	-4	-3	-5	-3	-4	-3	
-90	7	3	1	2	-4	-10	-1	-1	-1	0	-2	-1	-2	2	-1	-4	-2	-3	0
-100	4	2	1	2	2	2	1	2	4	3	1	2	2	2	0	2	1	-1	-1
-120	6	2	2	3	3	4	4	2	1	2	3	2	0	1	0	-1	-2	-4	-3
-140	5	3	1	2	2	1	4	3	1	0	0	1	-1	0	1	0	-1	-6	-2

Total Length: 84.525mm
 Scanning Feed: 300mm/min
 Total Time: 16.905sec.
 Scanning Freq.: 10Hz
 Scanning Data: 169

최대변위: 1
 최소변위: -3

20 μ

Total Length: 84.525mm
 Scanning Feed: 300mm/min
 Total Time: 16.905sec.
 Scanning Freq.: 10Hz
 Scanning Data: 169

최대변위: 2
 최소변위: -3

20 μ

Total Length: 84.525mm
 Scanning Feed: 300mm/min
 Total Time: 16.905sec.
 Scanning Freq.: 10Hz
 Scanning Data: 169

최대변위: 1
 최소변위: -3

20 μ

	X13	X40	X80	X97
CMM(μ m)	1	-3	-1	-1
OMM(μ m)	0	-2	0	1

그림8. CP 측정 결과

표3. OMM 시스템의 반복정밀도

Model	SM 28"
No. of Samples	285
Average($\pm \mu\text{m}$)	0.10
STDEV($\pm \mu\text{m}$)	0.73
Max. Error($\pm \mu\text{m}$)	2.19

정확도 측정은 금형 가공 후 OMM 시스템에서 측정된 후, 이를 CMM으로 옮겨 동일한 방법으로 측정후 측정치를 비교하는 방법을 이용했다. 실험에 사용된 CMM은 표1에 나타난 바와 같은 보이듯이 U1, U3 오차특성을 가진다. 그러나 비교할 만한 다른 대안이 없기 때문에 이를 기준으로 하였다. 측정된 비교 데이터는 표2에 나타냈으며 이를 통계처리한 결과를 표4에 나타내었다.

표4. OMM 시스템의 CMM에 대한 비교 정확도

Model	SM 14"	SM 21"	SM 28"
No. of Samples	63	169	285
Average(μm)	1.87	0.91	-0.55
STDEV($\pm \sigma \mu\text{m}$)	2.55	2.81	3.31
Max. Error($\pm \sigma \mu\text{m}$)	7.65	8.43	9.93

측정된 샘플은 모두 3 σ 기준으로 10 $\sigma \mu\text{m}$ 이내에 들고 있다. 그러나 표4에서 CMM과 OMM의 측정결과 차이는 측정기의 정밀도 차이뿐 아니라, OMM에서 발생하는 공구와 프로브의 Center Shift 그리고 CMM에서 발생하는 Setup 오차, Calibraion 오차가 포함되어 나타 난다.

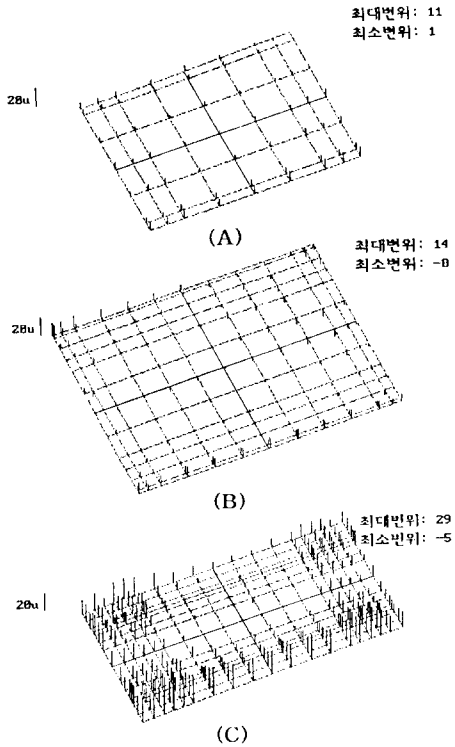


그림9. PTP 측정 결과

OMM 시스템의 경제성 측면에서의 분석은 기존의 방법에 대한 소요시간과 OMM 시스템을 이용한 경우에 대한 소요시간 비교를 했다. 이러한 결과를 표5에 나타내었다.

표5. CMM과 OMM 운용에 대한 경제성 비교

구 분	CMM	OMM
1.준비시간(탈착,장착 열평형시간)	24시간(겨울) 4시간(여름)	0
2.Setting, Calibration	10분	3분(자동)
3.Program 작성시간	60분	5분(자동)
4.측정시간	190분(40초/1점)	50분(10초/1점)
5.측정결과 출력시간	20분	2분
계	28시간40분(겨울) 8시간40분(여름)	1시간

※ 28" S/MASK (285점 측정)를 기준으로 한 데이터임

7. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 기존의 방법에서 발생하고 있는 금형측정상의 문제를 해결하고 최근의 생산시스템의 추세에 부응하기 위해 공작기계에서 제품의 가공이 종료된 후, 공구의 교체에 의해 즉시 기내 측정이 가능한 시스템에 대해 연구했다. 이러한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 3차원 금형의 기내측정에 적합한 OMM 시스템을 구성했다.
- 2) 개발된 시스템은 평균 0.10 μm σ 0.73 μm 의 반복정밀도를 갖는다.
- 3) 개발된 시스템은 CMM 대비 3 σ 가 10 μm 이내의 정확도를 갖는다.
- 4) 개발된 시스템은 생산성 측면에서도 양호한 결과를 얻었다.

본 연구결과를 토대로 향후에는 가공형상의 계측을 통해 얻은 결과를 이용해 가공오차에 대하여 수정가공을 행하는 문제에 있어 효율적인 수정가공 프로그램의 작성에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

- [1] Owen, J. V., "CMMs on the Shop Floor", Manufacturing Engineering, April, pp. 66-70, 1991
- [2] Keizo, U., "Die & Mold 3-Dimensional Measuring on the Machine", Conf. on Die and Mold technology, pp.208-209, 1994 (In Japanese)
- [3] 김선호외, "On Machine 가공형상 자동측정 시스템 개발 보고서(한국기계연구원 BSIA58-2165C)", LG전자 MTC, 1995.12
- [4] John, J., "Touch Probe Calibration and Measurement on CNC Machining Center", SME Technical Paper IQ86-908, 1986
- [5] Taylor, A., "Performance Characteristics of Touch Trigger Probes", SME Technical Paper MS90-266, 1990
- [6] 김선호,김선호, "무인 선삭셀에서의 측정/검사 시스템", IE Interface 산업공학 제5권 1호, 1992.4