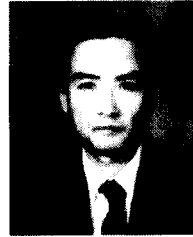


# 고정밀 금형의 쾌속제조를 위한 CAD/CAM/CAI 기술

김경돈\*, 정성종\*\*

## CAD/CAM/CAI Technology for High Precision and Rapid Manufacturing of Die

Kyung-Don Kim\* and Sung-Chong Chung\*\*



### 1. 서론

금형산업은 다품종 단품생산 방식의 대표적인 생산모형을 가지고 있으며 공산품의 가격, 품질, 생산성을 선도하는 생산기반산업이다. 세계 금형산업은 일본, 미국 등의 선진국에서는 정밀금형을 생산하고, 개도국에서는 범용금형을 생산하는 양분된 산업구조를 유지하여 왔으나 소비자 욕구의 고급화, 조립 용이성, 생산성 향상 등으로 정밀금형의 시장수요가 크게 확대되고 있다. 따라서 자동차, 항공기, 공작기계, 가전제품, 반도체 등의 수요산업의 요구에 신속하고 정확하게 대응하기 위해서는 금형의 고정도화, 고품위화, 저가격화, 단납기화 생산기술이 필요하다.

다품종 단품생산 체제를 갖는 금형제조 공정에서 고정밀 금형의 단납기 생산체제를 갖추기 위해서는 설계, 가공, 그리고 측정 및 검사공정의 자동화 및 효율화가 필수

적으로 요구된다. 최근에는 설계에서 가공에 이르기까지의 일련의 공정들은 CAD/CAM 시스템의 발달로 매우 자동화되어 있으므로 이들 공정과 측정 및 검사공정의 통합이 중요한 요소로 대두되고 있다.<sup>(1)</sup>

제품을 측정하거나 검사하기 위해 종래에는 캘리퍼스, 블록게이지, 사인바, 하이트게이지, 다이얼인디케이터 등의 1차원 또는 2차원 게이지를 사용하였으나, 신속성과 정확성 등의 요구에 따라서 3차원 좌표측정기(Coordinate Measuring Machine : CMM)가 출현하기에 이르렀다. CMM은 현재 30만대 정도가 전세계적으로 자동차, 항공, 가전, 공작기계 및 각종 정밀기계 산업에서 사용되고 있으며, 가격대는 1~5억원 정도로 세계시장규모 1조원, 내수 시장규모 300억원을 형성하고 있다. CMM을 사용함으로써 3차원 공간내에서 제품으로의 완성도를 입증할 수 있는 치수, 형상 그리고 기하편차 등의 상관관계 해석까지를

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과  
\*\* 한양대학교 기계공학부

신속하고 정확하게 처리할 수 있게 되었다.<sup>13)</sup>

그러나, CMM은 항온실에 설치가 요구되며, 그 자체의 고비용 투자뿐만 아니라 가공된 공작물의 측정 및 검사를 위해 공작기계와 CMM사이를 빈번히 이동해야 하는 난점을 가지고 있다. 특히, 금형제조 공정은 대량생산공정과 달리 가공과 측정이 반복적으로 실행되므로 측정 및 검사를 위한 공작물의 이동시간은 생산성 저하요인이 되고 있다. 이로 인해 공작기계를 좌표측정기화하여 공작기계상에서 3차원 형상의 측정을 수행할 수 있는 컴퓨터 지원 검사(Computer Aided Inspection : CAI) 시스템인 온더머신 측정 및 검사시스템(On-the-Machine Measurement and Inspection System : OMMIS)을 구축하고, 상용 CAD/CAM과의 인터페이스를 통해 설계, 제조, 측정 및 검사에 이르는 일련의 공정을 통합하고자 하는 연구가 진행되고 있다.<sup>13-14)</sup>

본 논문에서는 고정밀 금형의 단납기 생산을 위한 CAD/CAM/CAI 기술로써 온더머신 측정 및 검사시스템의 구축에 필요한 핵심요소들과 IGES 파일에 의한 상용 CAD/CAM과의 통합 방법을 소개하고자 한다.

## 2. 온더머신 측정 및 검사시스템의 개념

Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 오차요인이 존재하지 않는 이상적인 공작기계에서 가공을 수행하면 공작물의 형상은 공작기계의 이송지령과 동일한 이상적인 형상을 얻을 수 있다. 그러나, 실제 공작기계는 이송부분과 형상부분에서 발생하는 기하학적인 오차와 공작기계의 발열이나 주위의 온도변화에 따라 야기되는 열변형 오차 등의 오차요인을 갖고 있으며, 이로 인한 공작기계 가공체적내의 스케일의 왜곡이 그대로 공작물에 전달되어 공작물의 가공결과는 왜곡된 형상을 지니게 된다. 동일한 공작기계에서 접촉식 측정프로브를 이용하여 가공된 공작물을 측정하면 측정결과는 공작기계의 이송지령과 동일한 이상적인 형상으로 인식될 것이며, 가공물의 정확한 형상을 평가하기 위해 CMM을 이용하는 것은 CMM이 공작기계와 달리 왜곡되지 않은 정확한 스케일을 가지고 있다는 점에서 비롯된 것이다. 공작기계를 측정기로 사용하여 CMM에서의 측정결과와 동일한 실질적인 가공결과를 얻기 위해서는 측정시 공작기계 가공체적내의 스케일 왜곡으로 인한 체적오차(volumetric error)를 정확히 규명하고 이를 바탕으로 공작기계상에서의 측정결과를 수정해야 한다. 즉, OMMIS에서 가장 중요한 요소는 공작기계의 체적오

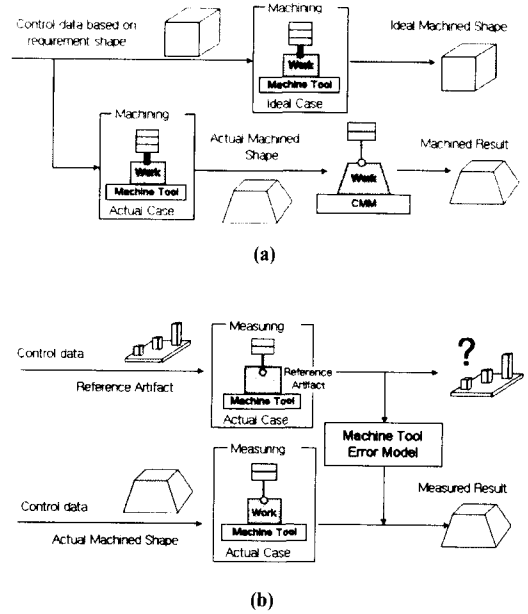


Fig. 1 Concept of the OMMIS

차로 인해 왜곡된 측정결과를 보상함으로써 정확한 가공결과를 평가하는 것이다. 이를 위해서는 측정이 필요한 시점에서 공작기계의 체적오차를 빠르고 정확하게 규명할 수 있는 방법론이 필요하다.

공작기계 가공체적내의 체적오차 규명은 레이저 간섭계나 기구볼바 등과 같이 부가적인 측정장비를 이용하는 방법이 있으나 공작기계를 측정기로 사용하고자 하는 목적에 비추어 본다면 홀플레이트나 볼플레이트 등과 같은 기준물(reference artifact)을 이용하는 방법이 적합하다.<sup>13,14)</sup> 즉, Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 치수와 형상을 정확하게 알고 있는 기준물을 공작기계 상에서 측정함으로써 얻어지는 기준물의 왜곡으로부터 체적오차를 규명하고 이를 바탕으로 실질적인 가공공작물의 측정시 얻어진 측정데이터를 수정함으로써 CMM에서의 측정결과와 동일한 가공결과를 얻을 수 있다.

## 3. 측정신뢰도 확보

접촉식 측정프로브의 감지신호를 스킵신호(skip signal)로 입력시키고 이송기구의 이송을 통해 원하는 측정위치에 측정침을 접촉시키면 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 이상

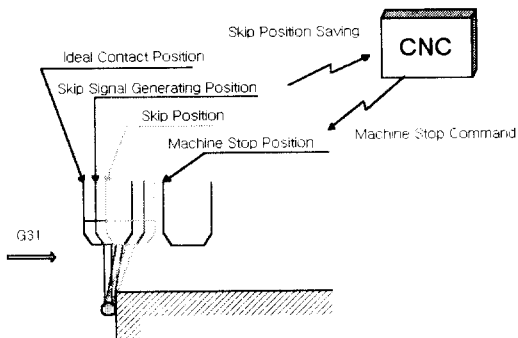


Fig. 2 Measuring mechanism

적인 접촉점을 지나서 감지신호가 발생하게 된다. CNC는 감지신호를 입력받아 스킵신호를 인식하며 메모리에 현재의 좌표값을 기억시킨 후 이송기구에 이송정지 명령을 내린다.

이상적인 접촉점의 좌표값과 CNC가 스킵신호를 인식하여 기억시킨 좌표값 사이에는 측정오차(measuring error)가 존재한다. 이 측정오차는 공작기계 가공체적 내의 위치합수인 공작기계의 체적오차, 측정침과 공작물 사이의 접촉각과 이송속도의 함수인 프로빙오차, 측정침의 반경오차, 측정침의 장착오차 등을 포함하고 있다.

측정침의 장착오차는 주축의 중심과 측정침의 중심을 일치시킴으로써 쉽게 제거할 수 있다.<sup>10)</sup> 따라서 본 장에서는 체적오차, 프로빙오차, 측정침 반경오차의 보정 및 보상을 통한 측정데이터의 신뢰도 확보에 대해 기술한다.

### 3.1 체적오차 보정 및 보상<sup>14)</sup>

공작기계에서 발생하는 오차는 공작기계의 테이블, 새들, 칼럼 등과 같이 기구의 링크에 해당하는 형상변환요소에서 발생하는 형상오차와 공작기계의 이송부와 같이 기구의 조인트에 해당하는 조인트변환요소에서 발생하는 조인트오차로 나뉜다. Fig. 3은 3개의 이송축을 갖는 수직형 머시닝센터의 구조도로서 형상변환요소  $S_1, S_2, S_3, S_4$ 와 조인트변환요소  $J_1, J_2, J_3$ 를 수학적으로 표현할 수 있는 동차변환행렬을 이용하여 가공체적내의 임의의 위치에서 각 축방향의 위치오차를 구하기 위해 8개의 좌표계를 정의하고 이들 좌표계를 이용한 기구학적 연결기구를 보인 것이다.

본 연구에서는 형상변환요소의 각오차는 무시하고 각 축 방향의 열변형에 의한 병진변형 오차만이 존재한다고

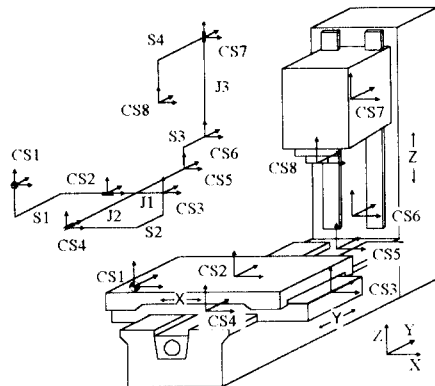


Fig. 3 Structural configuration of a three-axis vertical machining center

가정하며, 조인트변환요소는 위치오차, 직각도오차에 의한 진직도오차, 열변형에 의한 선형 병진변형 오차를 가진다고 가정한다. 스펀들 좌표계(CS8)의 원점과 프로그래밍 좌표계(CS1)에서 공작물 상의 가공점을 일치시켜 페루프를 구성하고 동차변환행렬을 이용한 기구학적 연쇄에 의해 가공체적내의 임의의 위치에서 각 축 방향의 위치오차를 구하면

$$\begin{aligned}
 dX &= \delta_x(x) + \sum \Delta a_i + P_1x + PZX_z \\
 dY &= \delta_y(y) + \sum \Delta b_i + P_2y + PXY_x - PYZ_z \\
 dZ &= \delta_z(z) + \sum \Delta c_i + P_3z
 \end{aligned} \tag{1}$$

이 된다. 상기의 오차모델 파라미터 중 각 축의 위치오차인  $\delta_x(x), \delta_y(y), \delta_z(z)$ 는 레이저 간섭계를 이용하여 규명하고, 열변형에 의한 원인을 포함하는 직각도 오차인  $PXY, PYZ, PZX$ , 열변형으로 인한 각 축의 원점이동인  $\sum \Delta a_i, \sum \Delta b_i, \sum \Delta c_i$ , 그리고 이송축의 선형열팽창을 모델링한  $P_1, P_2, P_3$ 는 Fig. 4에 나타난 기준물을 접촉식 측정프로브를 이용하여 공작기계 상에서 측정함으로써 규명한다. 접촉식 측정프로브를 이용하여 공작기계 가공체적내의 체적오차를 규명하기 위해 고안/제작된 기준물은  $450 \times 350 \times 225\text{mm}$ 의 크기로 17개의 기둥들(columns)과 진구, 직각자 등으로 구성되어 있으며 각 형상들의 정보(geometry information)는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 3차원 좌표측정기에서 보정(calibration)하여 공작기계 상에서의 측정시 기준으로 삼았다. 또한, 주위온도의 변화 등

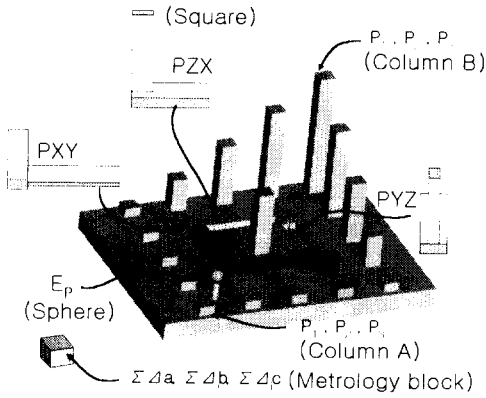


Fig. 4 Designed reference artifact

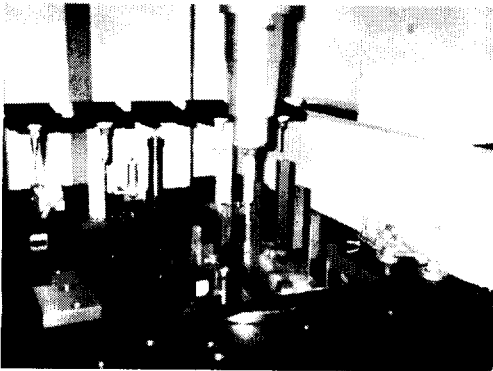


Fig. 5 Artifact calibration by CMM

에 따른 기준물의 변형을 막기 위해 기준물의 재질은 인바(invar:  $0.5 \times 10^{-6} K^{-1}$ )를 사용하였으며, 오차모델 파라미터의 규명을 위한 기준물 측정에 소요되는 시간은 8분 27초였다.

제안된 체적오차 규명법의 신뢰성을 검증하기 위해 IBM/PC에 기반을 둔 체적오차 보상제어 시스템을 구현하고 레이저 간섭계(HP10768A, Hewlett-Packard Co., Ltd.)를 이용하여 ANSI/ASME B.5에 명기된 가공체적의 대각선 방향으로의 위치오차를 평가하였으며 이를 Fig. 6에 나타내었다. 레이저 간섭계에 의한 대각선 방향의 위치 오차 측정은 공작기계를 워밍업하여 정상상태에 이르게 한 후와 공작기계의 스핀들 회전(3000rpm)과 각 축의 직선 왕복운동(6m/min)을 통해 열변형 오차를 유발한 후에 수

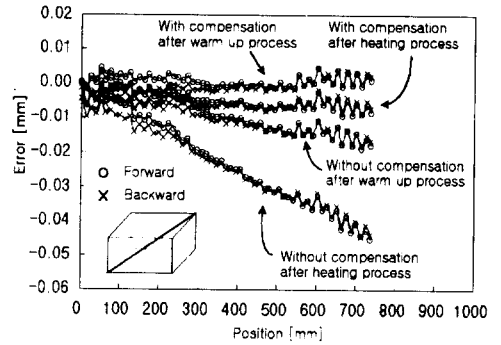


Fig. 6 Compensation results of positioning errors along diagonal direction in machining workspace

행되었다. 각각의 경우에 있어서 제안된 방법에 의한 체적 오차를 규명하고 이를 바탕으로 한 체적오차 보상전과 보상후의 위치오차를 측정하였다. Fig. 6으로부터 대각선 방향의 위치오차 정밀도(positioning accuracy)는 체적오차 보상효과로 인해 공작기계의 워밍업에 의한 정상상태에서는  $22\mu m$ 에서  $10\mu m$ 으로 향상되었으며, 스핀들 회전과 각 축의 직선왕복운동에 의한 열변형 오차 유발 후에는  $45\mu m$ 에서  $10\mu m$ 으로 향상되었음을 알 수 있다.

### 3.2 프로빙오차의 보정 및 보상<sup>13)</sup>

접촉식 측정프로브는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 기계적/전기적 스위칭 메카니즘으로 인해 공작물과의 접촉각에 따라 프로빙오차량이 다르게 나타난다.

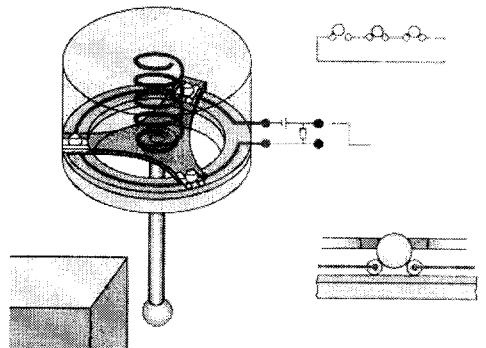


Fig. 7 Switching probe head

3차원 형상측정시 프로빙오차는 Fig. 4의 진구를 이용해 보정한다. 진구가 차지하는 영역( $\phi 25\text{mm}$ )은 공작기계의 가공체적에 비해 매우 작으므로 위치에 의존하는 공작기계 오차는 없다고 가정하고, 측정속도를 고정하면 프로빙오차  $E_p$ 는 Fig. 8의 진구와 측정침 사이의 관계로부터

$$E_p(\phi, \theta) = R_M(\phi, \theta) - R_S - R_N \quad (2)$$

이 된다. 여기서,  $R_M$ 은 접촉각  $\phi, \theta$ 에 따른 측정값이며  $R_S$ 는 진구반경,  $R_N$ 은 측정침의 공칭반경이다. 자유곡면 측정시 곡면의 법선벡터를 정확히 알 수 없기에 -Z축 방향으로만 측정을 수행하므로 프로빙오차 보정을 위한 진구 측정시의 프로빙 방향도 -Z축 방향이다. 진구 측정시, 측정점에서의 법선벡터  $N=[N_x, N_y, N_z]^T$ 와 접촉각과의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi &= \cos^{-1}(N_z / \sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2}) \\ &= \cos^{-1}(N_z) \\ \theta &= \tan^{-1}(N_y / N_x) \end{aligned} \quad (3)$$

자유곡면 측정시의 프로빙오차 보상량은 곡면모델링을 통해 각 측정점에서의 법선벡터가 구해지면 식 (3)에 대입하여 접촉각을 구한후, 접촉각에 따른 진구 측정시의 프로빙오차 보상량으로부터 산출한다. Fig. 9는 진구 측정시의 접촉각  $\phi, \theta$ 에 따른 프로빙오차의 보정결과이다.

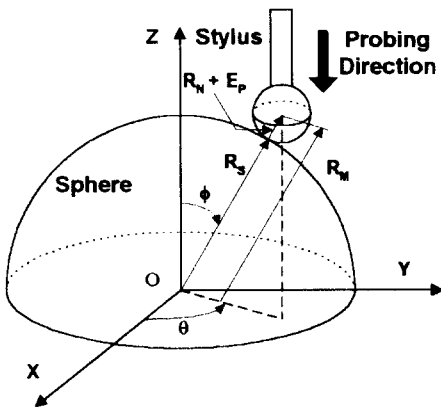


Fig. 8 Probing error identification

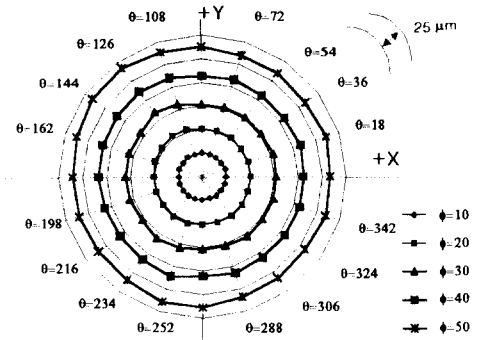


Fig. 9 Calibration results of probing error

### 3.3 측정침의 반경오차 보정 및 보상<sup>(11)</sup>

미지곡면 또는 가공된 곡면을 측정하고자 하는 경우, 그 곡면의 형상정보가 존재하지 않거나 실질적인 가공형상과 동일하지 않기에 측정침의 접촉점에서의 법선벡터를 정확히 계산할 수 없다. 따라서 측정침의 정확한 반경보정이 어렵게 된다. 곡면측정시 측정침의 반경보정에 관한 선행연구는 측정침에 포텐쇼미터(potentiometer)를 장착하여 측정침 자체가 접촉점을 감지할 수 있도록 하거나 곡면상의 측정점 부위를 삼각형으로 근사하고 근사된 삼각형의 법선방향으로 측정침의 반경보정을 수행하는 연구 등이 있다.<sup>(15-16)</sup> 전자의 경우는 측정침 자체가 매우 고가이며 소형으로 구현하기가 힘든 문제가 있으며 후자의 경우는 곡면의 일부를 삼각형으로 근사화함에 따른 오차가 수반된

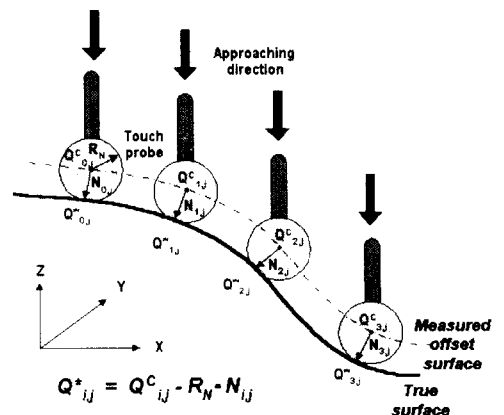


Fig. 10 Probe radius compensation

다. 본 논문에서는 이러한 반경보정의 문제를 해결하기 위해 Fig. 10과 같이 측정점들을 B-spline 곡면으로 보간하여 오프셋 곡면을 구하고 측정점들에서의 단위법선벡터를 추출하여 측정점의 반경만큼 법선벡터 방향으로 측정점들을 이동시킴으로써 가공곡면상의 접촉점들을 구한다.

공작기계 상에서 가공곡면을 측정함으로써 얻어진 측정 데이터로부터 체적오차, 프로빙오차, 측정점 반경오차를 보상함으로써 설계도면과 비교하기 위한 검사모델을 얻는 과정은 다음과 같다.

단계 1 : 언더머신 측정을 통한 측정점들을 얻는다.

단계 2 : 공작기계의 체적오차를 보상함으로써 수정된 측정점  $Q_{i,j}$  를 구한다.

단계 3 : 수정된 측정점들을 B-spline 곡면으로 보간하여 오프셋 곡면  $P^0(u, v)$  를 얻는다.

단계 4 : 오프셋 곡면으로부터 수정된 측정점에서의 단위법선벡터  $N_{i,j}$  를 계산한다.

단계 5 : 프로빙 오차의 보상으로 수정된 측정점  $Q_{i,j}^C$  를 구한다.

단계 6 : 단계 3과 단계 4를 반복한다.

단계 7 : 측정점 반경오차 보상으로 수정된 측정점  $Q_{i,j}^*$  를 구한다.

단계 8 : 수정된 측정점들을 B-spline 곡면으로 보간하여 검사곡면  $P(u, v)$  를 얻는다.

오프셋 곡면의 법선벡터 추정에 의한 프로빙오차와 측정점 반경오차의 보정 및 보상의 정확도를 평가하기 위해 Fig. 11과 같은 공작물을 가공하고 측정을 수행하였다. 가공조건은 cusp 높이가  $5\mu\text{m}$ , 직선보간 오차  $5\mu\text{m}$ 이며, 공작물의 재질은 공구의 휨, 마멸 등에 의한 가공오차의 영향을 줄이기 위해 공업용수지로 선택하였다. 측정은 Fig. 11의 A-A' 구간에서 측정프로브와 공작물과의 접촉각을 0도에서 38도까지 2도 간격으로 증가시키며 20개의 검사영역을 선택하였다. 각 검사영역은 균일하게 분포하는 16개의 측정점을 가지며 B-spline 곡면보간을 통해 검사곡면으로 모델링된다. 검사곡면과 설계곡면과의 오차는 다음과 같은 오차평균값을 이용한다.

$$E_{ave} = \frac{1}{n_p n_q} \sum_{p=1}^{n_p} \sum_{q=1}^{n_q} |P(x_p, y_q) - P^*(x_p, y_q)| \quad (4)$$

여기서,  $n_p, n_q$  는 측정영역내의  $x, y$  방향 점의 개수,

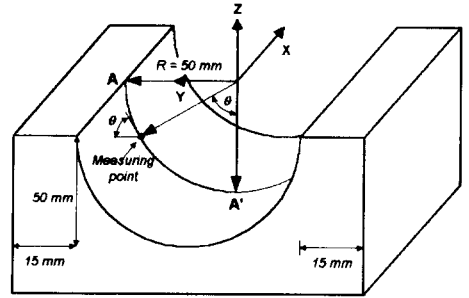


Fig. 11 A workpiece for tangential angle test

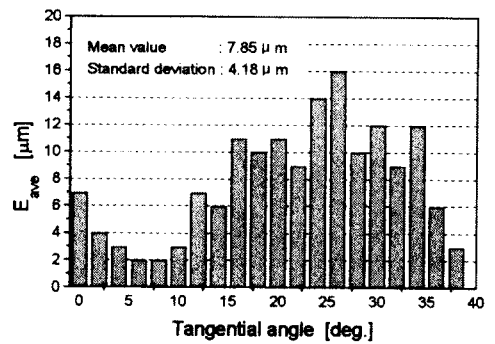


Fig. 12  $E_{ave}$  vs. tangential angle

$x_p, x_q$ 는 측정영역내의  $p, q$  번째  $x, y$  값,  $P(x, y)$ 는 설계 곡면식,  $P^*(x, y)$ 는 모델링 곡면식이다.

Fig. 12는 접촉각에 따른 20개의 검사영역에 있어서 설계곡면과 검사곡면과의 오차해석 결과로써 오차평균값이  $7.85\mu\text{m}$ , 표준편차가  $4.18\mu\text{m}$ 임을 나타낸다. 이는 가공조건을 고려해 볼 때 고정도의 자유곡면 측정이 가능함을 나타낸다.

#### 4. 측정점 선정<sup>(8)</sup>

자유곡면의 측정 및 검사에서 측정점 선정에 관한 연구는 주로 측정점의 위치와 개수의 선정을 다룬다. 측정점수의 증가는 신뢰도를 증가시키지만 생산성에 저하를 가져오며, 반대로 생산성만 강조한다면 신뢰성이 저하될 것이다. 현재까지도 이러한 문제에 대해 명확한 해결방안이 제시되지 못하고 있으며, 현장에서는 필요이상으로 많은 등간격의 균일 측정점이 사용되고 있다. 본 연구에서는 가공

된 표면의 표면조도의 영향을 최소화하고 신속한 측정이 이루어질 수 있도록 Hammersley 점들을 측정점으로 선정하였다.

가공표면의 검사를 위한 측정점의 선정은 근본적으로 근사(approximation)과정이다. 만약 측정점의 개수가 무한개로 증가한다면 그에 따른 오차도 0으로 수렴하게 되며 이상적인 측정작업을 수행한 것이 된다. 그러나 실제 측정점 개수는 무한개가 될 수 없으며, 측정작업에 소요되는 시간적인 문제로 인해 많은 점을 측정하기가 어렵기 때문에 이와 관련된 오차는 반드시 존재하게 된다. 부정확도(discrepancy)는 이러한 유한개의 측정점들로 인해 발생하는 오차를 의미하는데, 측정면의 평균조도 영향으로 인한 RMS 오차와 밀접한 관련이 있다.<sup>(17-18)</sup>

Roth는 d차원 실수 공간(d dimensional real space)에서 N개의 점으로 이루어진 유한개의 점들의 집합에 대한 부정확도 D의 하한 경계값(lower bound)이 다음과 같음을 증명하였다.

$$D \geq kN^{-1} (\log N)^{(d-1)/2} \quad (5)$$

여기서 k는 d의 항으로 표시되는 상수이다. 측정점의 선정시 Roth의 부정확도 하한 경계에 근접하는 점들을 측정점으로 선정한다면 측정시의 오차를 줄일 수 있다. 부정확도를 줄인 점군(point set)은 가장 먼저 van der Corput에 의해 유도되었으며, Hammersley는 van der Corput의 점군

을 d차원으로 확장하였다.<sup>(17-18)</sup> Fig. 13은 이차원에서의 균일 측정점과 Hammersley 점들의 좌표를 비교한 것이다.

Hammersley 점들의 부정확도는 균일 측정점의 부정확도에 비해 훨씬 작은 값이 되기에 Roth의 부정확도 하한 경계값에 상당히 근접한다. 같은 부정확도에 대한 Hammersley 점들과 균일 측정점들의 개수 비교는 Fig. 14와 같다. 따라서 균일 측정점 대신 Hammersley 점들을 측정작업에 이용한다면 측정점의 개수를 상당히 줄이고도 정확도가 보장되는 고속·고정도 측정작업을 할 수 있다. 이는 측정점의 개수가 줄어들기 때문에 그만큼 측정작업에 소요되는 시간이 단축되며, 균일 측정점들에 비해 Hammersley 점들이 측정면의 표면조도로 인해 발생하는 오차를 감소시킬 수 있기 때문이다.

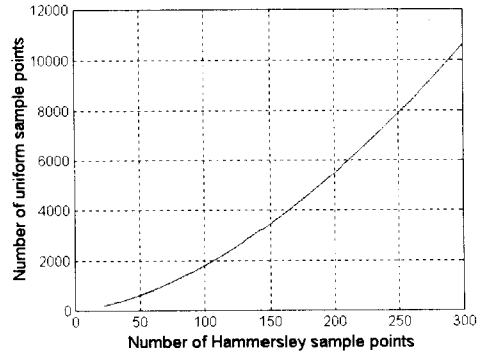


Fig. 14 Hammersley measuring points versus uniform measuring points with same accuracy

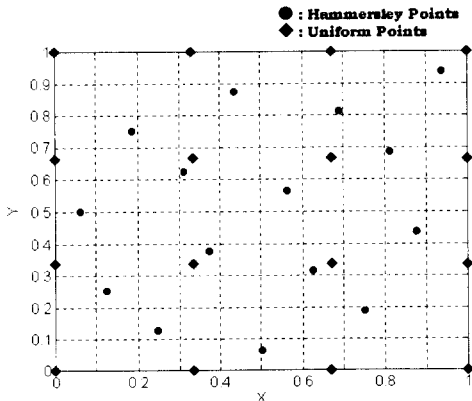


Fig. 13 Distribution of 16 Hammersley and uniform points in domain [0,1]<sup>2</sup>

### 5. 곡면평활화를 고려한 B-spline 곡면보간<sup>(13)</sup>

제품의 설계자가 곡면을 사용하는 이유중의 하나는 기능성뿐만 아니라 곡면만이 가지는 부드러움이나 아름다움을 표현하기 위함이다. 따라서 가공곡면의 품위평가는 곡면의 기능성을 평가할 수 있는 치수정밀도와 함께 곡면의 부드러운 정도를 표현할 수 있는 곡면평활도를 동시에 고려해야 한다. 그러나, 치수정밀도와는 달리 미적 기준이라 할 수 있는 부드러움이나 아름다움을 표현하는 곡면평활도는 여러 연구자들이 나름대로의 정의를 사용하고 있지만 아직까지 어떤 절대적인 수치로써 객관화되어 있지 못하며 이로 인해 곡면의 측정 및 검사에 관한 기존의 연

구는 주로 치수정밀도에 의존하고 있다.

곡면모델의 생성방법은 곡면근사(surface approximation)와 곡면보간(surface interpolation)의 두가지 방법이 있다. 측정데이터가 신뢰성을 가진다면 모델링 곡면이 측정데이터를 지나야 하므로 치수정밀도를 평가하기 위해서는 곡면근사가 아닌 곡면보간에 의한 곡면모델링이 타당하다. 접촉식 측정프로브를 이용하여 공작기계상에서 가공곡면을 측정하고 이를 평가하기 위해 측정데이터를 다음의 비균일 B-spline 곡면으로 모델링한다.

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) \quad (6)$$

여기서  $P_{i,j}$  는  $i, j$  번째 조정점,  $N_{i,k}(u)$ ,  $N_{j,l}(v)$  는 매개변수  $u, v$  에 대한 접속함수(blending function)이다. 비균일 B-spline 곡면은 측정데이터의 개수  $((n+1) \times (m+1))$  에 관계없이 곡면을 일정 차수  $(k, l)$  로 모델링 할 수 있으며 곡면의 차수가 3차( $k=4, l=4$ ) 이상인 경우 C2 연속성을 보장하므로 연속성 확보를 위한 별도의 계산과정이 필요 없다. B-spline 곡면보간은 상기의 곡면모델이  $p, q$  ( $p = 0, \dots, n, q = 0, \dots, m$ ) 번째 측정데이터  $Q_{p,q}$  를 지나도록 조정점  $P_{i,j}$  를 구하는 과정으로 측정데이터를 비균일 B-spline 곡면으로 모델링할 경우 곡면형상은 측정데이터에 할당된 매개변수에 의해 결정되므로 이를 합리적으로 선정할 경우 곡면형상을 개선시킬 수 있다.

본 논문에서는 가공곡면의 치수정밀도와 함께 곡면의 부드러운 정도를 나타내는 곡면평활도를 동시에 고려하여 가공곡면의 품질을 종합적으로 평가함으로써 수정가공이나 다듬질 공정에 유용한 정보를 제공하고자 한다. 즉, 전체곡면에 고루 분포하는 측정데이터를 채취하고 체계적오차, 프로빙오차, 측정침 반경오차 보정 및 보상으로 측정데이터의 신뢰도를 확보한 후, 곡면보간을 통해 치수정밀도를 평가함과 동시에 최적의 매개변수 할당으로 설계 곡면에 가까운 보다 부드러운 곡면을 생성함으로써 가공곡면을 종합적으로 평가하는 것이다.

곡면평활도는 곡면모델의 부드러운 정도를 표현한 것으로

$$F = \int_u \int_v (k_{uu}^2 + k_{vv}^2) dudv \quad (7)$$

로 정의된다.<sup>(19,20)</sup> 여기서  $k_{uu}, k_{vv}$  는 각각  $u, v$  방향의 법선

곡률로서 모델링 곡면의  $u, v$  방향의 1차 및 2차 도함수벡터와 단위법선벡터의 함수이다. 곡면평활도는 물리적 상사로부터 지지조건을 만족하는 탄성평판의 변형에너지를 의미한다. 변형에너지가 최소가 될 때 탄성평판은 전반적으로 부드러운 형상을 유지하게 되므로 자유곡면의 경우 곡면평활도를 최소화함으로써 전체적인 곡면형상을 개선할 수 있다.

모델링 곡면은 매개변수의 함수이다. 따라서 모델링 곡면의 도함수 벡터도 매개변수의 함수이며 곡면평활도는 다음과 같이 먹지수를 변수로 가지는 단일변수함수로 표현될 수 있다.

$$F(e) = \int_u \int_v \{ (k_{uu}(e))^2 + (k_{vv}(e))^2 \} dudv \quad (8)$$

본 연구에서는 식 (8)을 곡면평활도로 정의하고 평활  $F$  를 목적함수로 하는 비선형 최적화 문제를 구성한다. 최적화 문제는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

Minimize :

$$F(e) = \int_u \int_v \{ (k_{uu}(e))^2 + (k_{vv}(e))^2 \} dudv$$

Subject to :

$$[P] = ([N_u])^{-1} [Q] ([N_v])^T)^{-1}$$

$$0 \leq e \leq 1$$

(9)

식 (9)의 곡면평활화는 먹지수의 범위와 측정데이터를 지나는 곡면보간을 구속조건으로 가진다. 즉, 목적함수를 최소화하는 먹지수의 값으로 매개변수를 할당하고 접속함수를 구성하여 곡면의 조정점을 구함으로써 곡면평활화가 가능하다.

곡면평활화의 유용성을 시뮬레이션을 통해 입증하였다. Fig. 15에 나타난 설계곡면에 오차를 포함시킨 후 각 축 방향으로 30점, 총 900점을 모의 측정하였다. 설계곡면에 포함한 오차는 밀링이나 연삭작업에 의한 가공표면을 적절히 묘사하기 위해 다음의 평균 Wiener 곡면(averaged Wiener surface)을 이용하였다.

$$AW(t_1, t_2) = \frac{1}{4} (W(t_1, t_2) + W(1-t_1, t_2) + W(t_1, 1-t_2) + W(1-t_1, 1-t_2)) \quad (10)$$



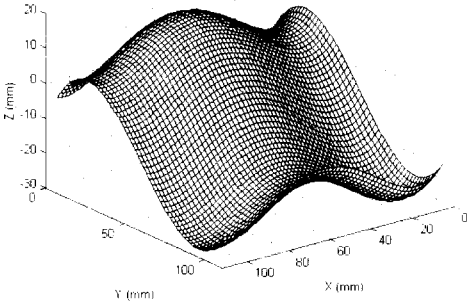
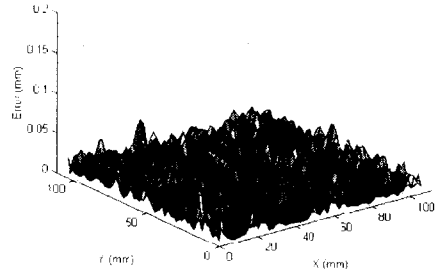


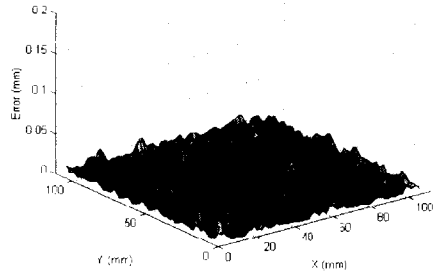
Fig. 15 Designed surface

Mean Value : 0.0099 mm  
Standard Deviation : 0.0074 mm



(a) Initial surface model

Mean Value : 0.0052 mm  
Standard Deviation : 0.0039 mm



(b) Faired surface model

Fig. 17 Comparison of error distribution

여기서  $W$ 는 Wiener 곡면이고  $t_1, t_2 (0 \leq t_1, t_2 \leq 1)$ 는 매개변수이다. 모의 측정된 데이터를 곡면평활도를 고려한 B-spline 곡면으로 모델링한 후, 각 축방향으로 60점, 총 3600점을 추정하여 오차가 포함되지 않은 설계곡면과 비교하였다.

평활화 과정에 따른 곡면평활도의 개선은 Fig. 16과 같다. Fig. 16의 세로축은 평활화 과정 전의 평활도의 값으로 평활화 과정에 따른 평활도의 값을 나누어준 무차원수이다. 최적화 과정을 수행함에 따라 초기 곡면에 비해 평활화 이후의 곡면의 평활도는 10% 정도 개선되었음을 나타낸다. 평활화 전후의 곡면모델과 오차가 포함되지 않은 설계곡면을 비교함으로써 평활화 과정에 따른 곡면오차의 변화를 Fig. 17에 나타내었다. 곡면 평활화 과정에 따라 모델링 곡면과 설계곡면과의 오차 평균값과 표준편차가 감소함을 보이고 있다. 이는 제한된 곡면 평활화 과정

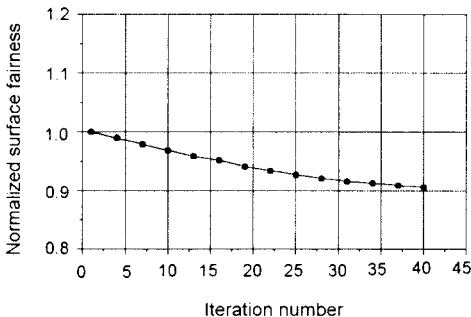


Fig. 16 Improvement of surface fairness

에 따라 모의 측정된 데이터이외의 추정점들이 조금씩 이동하여 설계곡면에 근접해감을 의미한다. 즉, 평활화 과정이 곡면의 형상을 보다 부드럽게 개선함으로써 모델링 곡면이 설계곡면에 가까운 보다 부드러운 곡면으로 개선되었음을 나타낸다.

## 6. 상용 CAD/CAM과 측정 및 검사시스템의 통합<sup>(11)</sup>

상용 CAD/CAM 시스템과 응용 시스템과의 연계나 이기종 CAD/CAM 시스템들간의 정보교환 방법은 Fig. 18과 같이 직접교환 방식(direct exchange approach)과 중립파일 방식(neutral file approach)이 있다. 정보를 전달하고자 하는 대상 시스템의 수를  $n$ 이라 할 때 직접교환 방식

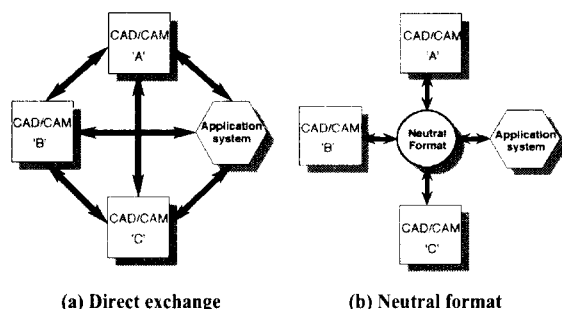


Fig. 18 Data exchange approach

은  $nC_2$  개, 중립파일 방식은  $2n$ 개의 변환기가 필요하며, CAD/CAM 보급이 일반화되어 있는 현실을 고려할 때 국제적으로 표준화된 중립파일 형식인 IGES, SET, VDAFS, STEP 등의 중립파일 방식에 의한 정보교환 방법이 유리하다. 본 연구에서는 현재 표준 정보교환 방식으로 가장 널리 채택되어 사용되고 있는 IGES 형식을 통해 OMMIS와 CAD/CAM 시스템을 연계하였다.

IGES는 엔터티(entity)를 데이터 표현의 기본 단위로 삼고 있으며 각 엔터티는 형상(geometry), 주석(annotation), 구조(structure) 엔터티로 구분된다. 특히 형상 엔터티에는 곡선, 곡면 등 제품의 기하학적 설계 정보를 담고 있다. I-

Table 1 Geometric entity supported by commercial CAD/CAM systems

Geometric entity	Entity number	Entity type
Curve	100	Circular arc
	102	Composite curve
	104	Conic arc
	110	Line
	112	Parametric spline curve
	126	Rational B-spline curve
	141	Boundary
Surface	142	Curve on a parametric surface
	108	Plane
	114	Parametric spline surface
	118	Ruled surface
	120	Surface of revolution
	122	Tabulated cylinder
	128	Rational B-spline surface
Trimmed surface	140	Offset surface
	143	Bounded surface
	144	Trimmed parametric surface

DEAS, CATIA, Pro/ENG, Cadd5 등 대개의 상용 CAD/CAM 시스템이 지원하는 형상 엔터티는 Table 1과 같다.

IGES 파일은 Table 2에 나타난 바와 같이 시작 단락 (start section), 전역 단락(global section), 주소 기재 단락 (directory entry section), 인자 데이터 단락(parameter data section), 종료 단락(terminate section)으로 구성된다. 특히 각 엔터티의 구체적인 정보는 주소 기재 단락과 인자 데이터 단락에 기록된다. 주소 기재 단락은 엔터티에 대한 목차와 각 엔터티의 속성 정보가 기록되어 있다. 속성 정보에는 해당 엔터티의 인자 데이터 단락을 지시하는 포인트와 각 인자 데이터의 길이 등이 명시되어 있다. 인자 데이터 단락은 개별 엔터티의 구체적인 형상 정보나 하위 엔터티의 주소 기재 단락을 가리키는 포인트가 기록되어 있다.

Table 2 IGES file structure

Start Section : file name, date ...	S	1
	•	•
Global Section : system information	S	n1
	G	1
Directory Entry Section (DE Section) : index, entity type number...	•	•
	G	n2
	D	1
	D	2
Parameter Data Section (PC Section) : real data (coordinate, parameter...)	•	•
	D	n3
	P	1
	P	2
Terminate Section S n1G n2D n3P n4	•	•
	P	n4
	T	1

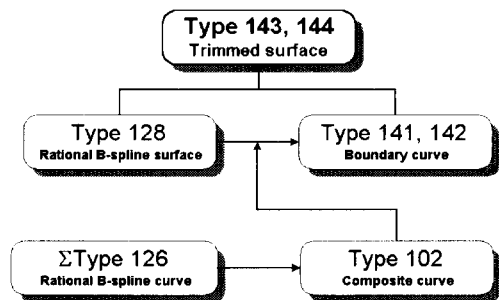


Fig. 19 Trimmed surface representation in commercial CAD/CAM

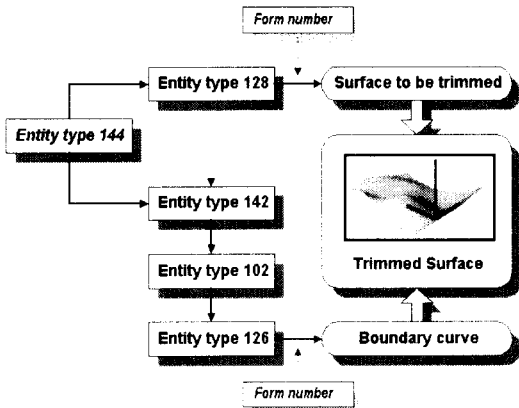
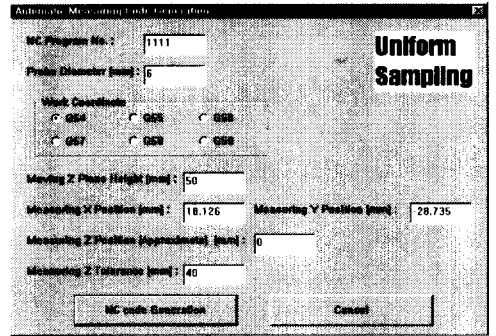
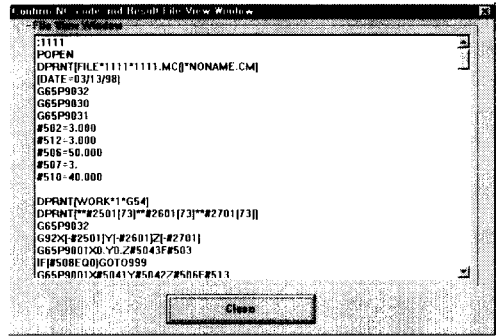


Fig. 20 Construction procedure of trimmed surfaces



(a) Automatic detection of inspection region 'B'



(b) Generated measuring code

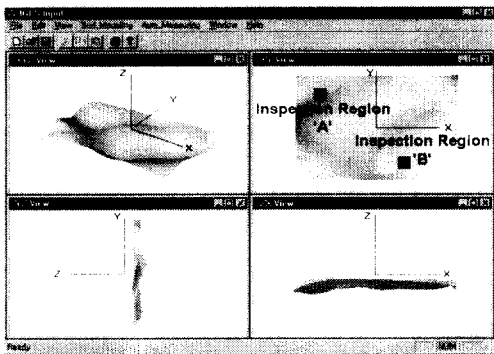


Fig. 21 IGES freeform surface generated through coordinate transformation on OpenGL

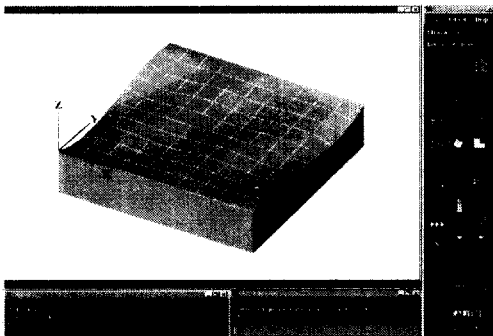


Fig. 22 Designed surface by using I-DEAS

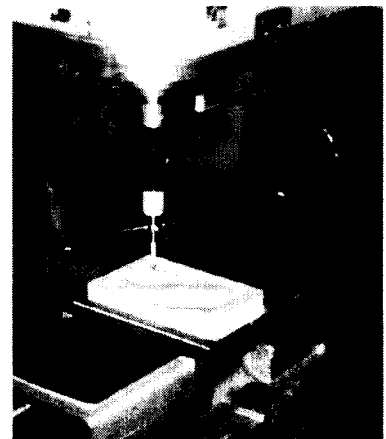


Fig. 24 On-the-machine measurement for freeform surface

IGES 형식의 자유곡면은 곡면의 경계를 정확히 표현할 수 있도록 Fig. 19와 같이 144번(혹은 143번) 엔터티를 이용해 트림곡면으로 표현되고 있다. 곡면의 경계 곡선은 142번(혹은 141번) 엔터티로 정의된다. 142번(혹은 141번) 엔터티는 128번 엔터티로 표현되는 곡면과 이 곡면 위에 존재하는 곡선, 102번 엔터티로 정의되며, 102번 엔터티는 NURB 곡선으로 표현되는 126번 엔터티의 집합으로 정의된다. 그러므로 자유곡면의 형상정보는 128번 엔터티를 기준으로 102, 126, 142, 144번(혹은 143번) 엔터티 등으로 전달된다. 본 연구에서는 이와 같은 엔터티로 설계정보를 표현하는 NURB 형태의 트림곡면을 IGES

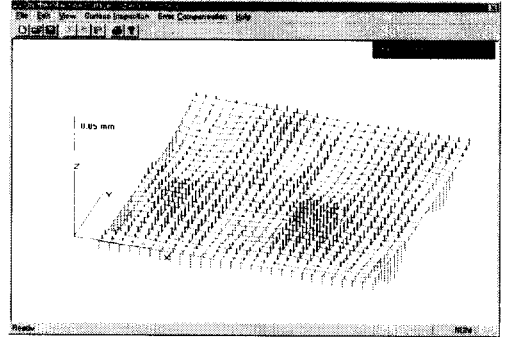
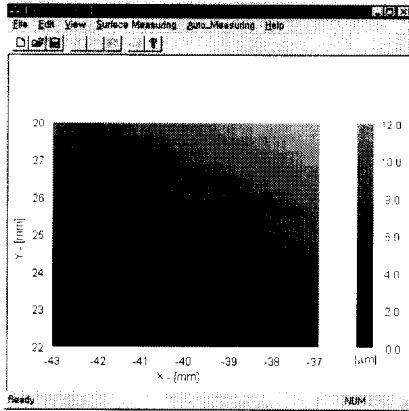
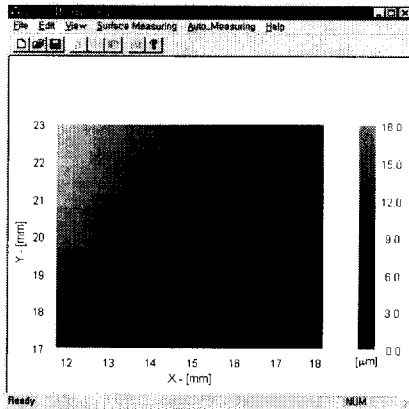


Fig. 26 On-the-machine measurement result I : Inspection model and machining error map



(a) region 'A' : Eave=7.2 $\mu$ m



(b) region 'B' : Eave=8.8 $\mu$ m

Fig. 25 On-the-machine measurement result I : Error distribution of inspection region 'A' and 'B'

자유곡면으로 정의한다.

OMMIS에서의 측정 및 검사작업에 상용 CAD/CAM에서 생성된 자유곡면을 받아들이는 과정은 주조 기재 단락과 인자 데이터 단락 해석을 통해 저장된 126, 128번 엔터티의 형상 정보와 엔터티간의 계층관계를 조사하여 트림 곡면을 구성하는 과정이다. 따라서 Fig. 19와 같은 트림곡면 표현법을 참조해 144번 엔터티를 시발점으로 하위 엔터티를 역추적하여 자유곡면 요소와 경계곡선 요소의 구체적인 정보를 수집하여 OMMIS에서 트림곡면을 구성한다. Fig. 20은 트림곡면 구성 과정을 보인 것이다. 구성된 트림곡면은 OpenGL을 이용하여 GUI환경으로 측정작업에 제공되며 이를 Fig. 21에 나타내었다.

가공곡면의 측정영역은 특정한 위치에서의 치수정밀도를 측정하기 위해 Fig. 21에 나타난 A, B와 같이 국부적인 영역을 선택하거나, 가공곡면의 품위를 종합적으로 평가하기 위해 Fig. 22에 나타난 바와 같이 상용 CAD/CAM에 의해 모델링된 곡면전체를 선택할 수 있다. Fig. 23은 선택된 측정영역에 대한 측정코드이며 Fig. 24는 생성된 측정코드에 의한 동작기계 상에서의 측정모습이다. 또한, Fig. 25는 측정영역 A와 B에 대한 측정결과이며 Fig. 26은 설계곡면(Fig. 22)과의 비교를 통해 곡면전체의 가공오차를 해석한 결과이다. 가공오차의 평균값은 17.9 $\mu$ m이며 표준편차는 12.1 $\mu$ m이다. 생성된 검사모델은 설계곡면과 마찬가지로 부드러운 형상을 유지하며 곡면 경계부분을 중심으로 과다절삭(overcut)이 일어난 것으로 나타났으며 곡률의 변화가 심한 부분에서 상대적으로 큰 가공오차를 보이고 있다.

## 7. 결 론

고정밀 금형의 단납기 생산을 위한 CAD/CAM/CAI 기술을 연구함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공작기계의 체적오차와 측정프로브의 프로빙오차, 그리고 측정침 반경오차의 보정 및 보상으로 접촉식 측정프로브를 이용한 측정데이터의 신뢰도를 확보함으로써 공작기계를 좌표측정기로 활용할 수 있음을 입증하였다.
- (2) 측정점 선정에 Hammersley 점들을 이용함으로써 측정작업에 소요되는 시간을 줄일 수 있으며 측정면의 표면조도로 인해 발생하는 오차를 감소시킬 수 있다.
- (3) 곡면평활도를 고려한 비균일 B-spline 곡면모델링 기법은 곡면보간을 통해 치수정밀도를 평가함과 동시에 최적의 매개변수 할당으로 곡면평활도를 향상 시킴으로써 설계곡면에 가까운 보다 부드러운 곡면을 생성할 수 있으며, 생성된 곡면은 수정가공을 위한 NC 코드의 생성이나 다듬질 공정에 유용한 정보를 제공할 수 있다.
- (4) IGES 파일을 이용한 온더머신 측정 및 검사시스템과 상용 CAD/CAM 시스템과의 통합으로 측정 및 검사작업에 설계자의 설계정보를 이용할 수 있다.
- (5) 공작기계를 좌표측정기화하여 공작기계 상에서 3차원 형상의 측정을 수행할 수 있는 컴퓨터 지원 검사 시스템인 온더머신 측정 및 검사시스템을 구축하고, 상용 CAD/CAM과의 인터페이스를 통해 설계, 제조, 측정 및 검사에 이르는 일련의 공정을 통합함으로써 고정밀 금형의 단납기 생산체제를 갖출 수 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) Ge, Q., Chen, B., Smith, P., and Menq, C. H., 1992, "Tolerance Specification and Comparative Analysis for Computer-Integrated Dimensional Inspection," *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 9, pp. 2173~2197.
- (2) Bosch, J. A., 1995, *Coordinate Measuring Machines and Systems*, Marcel Dekker, Inc., New York, New York.
- (3) 정성종, 박우열, 1993, "온더머신 오차측정 및 검사시스템의 개발," *대한기계학회*, '93년도 추계학술대회논문집, pp. 749~752.
- (4) 정성종, 공민규, 1994, "신뢰도를 고려한 측정시스템의 개선," *한국정밀공학회* '94년도 추계학술대회논문집, pp. 527~532.
- (5) 정성종, 1995, *자동측정 및 CAD/CAM/CAT 일괄처리시스템*, 한양대학교, 서울, 대한민국.
- (6) 정성종, 김승철, 안중용, 김경돈, 이성일, 1996, "상관관계 해석을 고려한 온더머신 자동측정 시스템," *한국공작기계기술학회* '96년도 춘계학술대회논문집, pp. 183~187.
- (7) 정성종, 김경돈, 1998, "NC 공작기계상에서의 측정 및 검사모듈의 설계와 구현," *한국정밀공학회지* 제15권, 제4호, pp. 91~97.
- (8) 정성종, 남우선, 1998, "온더머신 고속·고정도 자유곡면 측정 및 검사시스템에 관한 연구," *대한기계학회 논문집 A권*, 제22권, 제12호, pp. 2114~2125.
- (9) 정성종, 김경돈, 1999, "접촉식 측정프로브를 이용한 2½차원 온더머신 측정 및 검사시스템의 설계 및 해석," *대한기계학회논문집 A권*, 제23권 제1호, pp. 37~46.
- (10) S. C. Chung and K. D. Kim, 1999, "Design and Analysis of 2½ Dimensional Measurement and Inspection System on the Machine Tool," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 27, pp. 281~286.
- (11) 정성종, 이세복, 1999, "IGES 기반의 자유곡면 온더머신 측정 및 검사시스템," *대한기계학회논문집 A권*, 제23권, 제4호, pp. 590~607.
- (12) S. C. Chung, 1999, "CAD/CAM Integration of On-The-Machine Measuring and Inspection System for Free-form Surfaces," *Proceedings of ASPE*, pp. 267~270.
- (13) 정성종, 김경돈, 이세복, 2000, "곡면평활화를 고려한 공작기계상에서의 가공곡면 검사," *대한기계학회논문집 A권*, 제24권, 제4호, pp. 937~945.
- (14) 정성종, 김경돈, 2000, "기준물을 이용한 NC 공작기계의 오차규명 및 보상제어," *한국공작기계학회지*, 제9권, 제2호, pp. 102~111.
- (15) Aoyama, H. and Kawai, M., 1989, "A New Method for Detecting the Contact Point between a Touch

- Probe and a Surface," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp. 517~520.
- (16) Duffie, N., Piper, R. and Kronerberg, M., 1984, "CAD Directed Inspection and Error analysis Using Surface Patch Database," *Annals of the CIRP*, Vol. 31, No. 1, pp. 347~350.
- (17) Woo, T. C. and Liang, R., 1993, "Dimensional Measurement of Surfaces and Their Sampling," *Computer Aided Design*, Vol. 25, No. 4, pp. 233~239.
- (18) Woo, T. C., Liang, R., Hsieh, C. C. and Lee, N. K., 1995, "Efficient Sampling for Surface Measurements," *International Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, No. 5, pp. 345~354.
- (19) Vassilev, T. I., 1996, "Fair Interpolation and Approximation of B-splines by Energy Minimization and Points Insertion," *Computer Aided Design*, Vol. 28, No. 9, pp. 753~760.
- (20) Lott, N. J. and Pullin, D. I., 1988, "Method for Fairing B-spline Surfaces," *Computer Aided Design*, Vol. 20, No. 10, pp. 597~604.