

자유곡면의 온더머신 측정 및 검사를 위한 시스템 설계

남우선*, 정성중**

System Synthesis for On-the-Machine
Measuring and Inspection of Freeform Surfaces

Woo-Sun Nam*, Sung-Chong Chung**

ABSTRACT

Measurement and inspection of freeform surfaces are required in reverse design processes. In the case of surface measurement using a touch probe, probe radius compensation affects measuring accuracy. But current industrial practice depends upon an operator's experience to compensate for probe radius. In this paper, an on-the-machine measuring and inspection system for freeform surfaces is studied. Probe radius compensation methodology is investigated by modeling of B-spline surfaces based on digitized data. The accuracy and reliability of the developed system is verified through various kinds of numerical simulations and on-the-machine experiments.

Key Words : B-spline surface(B-spline 곡면), On-the-machine(온더머신), Probe radius compensation (측정침의 반경보정), Reverse design(역설계), Surface measurement(곡면 측정)

1. 서론

최근, 자유곡면(freeform surface)의 설계와 가공이 자동차, 항공기 제조 및 조선, 가전, 플라스틱 제품의 생산에 널리 사용되고 있고, 역설계(reverse design)의 수요가 증대됨에 따라 생산현장에서 자유곡면에 대한 고정도 측정검사의 중요성이 증대되고 있다. 측정 및 검사공정에 있어 측정자동화의 기술은 수치제어(CNC) 장치를 장착한 좌표측정기(CMM, coordinate measuring machine)⁽¹⁾ 및 온더머신(on-the-machine) 측정시스템⁽²⁻⁶⁾의 도입으로 급속한 발전을 이루게 되었다. 그러나 이

러한 측정자동화 연구의 대상은 주로 2차원의 기본형상이 대부분이었으며 특히 자유곡면(free-form surface) 측정에 대한 연구는 상대적으로 저조한 실정이다.

자유곡면을 고정도로 측정하기 위해서는 측정침의 정확한 반경보정이 이루어져야 한다. 그러나 미지곡면(mathematically unknown surface)의 경우 측정점에 대한 법선벡터 추정의 난해함으로 정확한 반경보정이 어렵다.⁽⁷⁻¹²⁾ 따라서 국내외에서 이러한 측정침의 반경보정 문제를 해결하기 위한 연구들이 진행되고 있다.

곡면 측정시의 측정침의 반경보정에 관한 선행 연구로서, Aoyama 등⁽⁷⁾은 미지의 곡면 측정시 반경보정의 어

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 한양대학교 공대 기계공학부

려움을 해결하기 위해 측정침에 포텐쇼미터(potentiometer)를 장착하여 측정침 표면에서 접촉점을 감지할 수 있도록 하였다. 그러나 측정침이 고가이고 접촉식 프로브에 비해 소형으로 구현하기 어렵다. Chen 등⁽⁶⁾은 미지의 곡선 측정시 측정점에서의 법선벡터를 각각 선형(linear), 다항식(polynomial), 스플라인 예측법(spline prediction method)으로 반복적으로 추정하여 이를 측정침의 반경보정에 이용하였다. 그러나 이 연구는 곡선측정에만 한정되어 있다. 그리고 Inasaki 등⁽⁹⁾은 곡면상의 측정점 부위를 삼각형으로 근사하고 근사된 삼각형의 법선벡터 방향으로 측정침의 반경보정을 수행하였다. 이 연구는 간단한 방법으로 측정침의 반경보정문제를 해결하였으나 곡면의 일부를 삼각형으로 근사화함에 따라 근사화 오차가 수반된다. Duffie 등⁽¹⁰⁾과 Kawabe 등⁽¹¹⁾은 CAD 데이터를 이용하여 측정침의 접근방향으로 측정면의 법선벡터를 이용하였다. 그러나 미지의 자유곡면에는 적용할 수 없다. 그리고 Suh 등⁽¹²⁾은 Inasaki 등⁽⁹⁾과 같이 삼각형 근사화로 법선벡터 추정하였으며 추정(estimation), 검증(verification), 수정(modification)을 반복적으로 수행하여 곡면의 형상을 조정함으로써 정확한 곡면 모델링을 수행하였다. 측정데이터로부터 우수한 모델링 결과를 얻을 수 있는 반면 하나의 측정점마다 법선벡터 추정을 위한 세개의 측정점을 필요로 하고, 검증과 수정을 위해 추가적인 측정이 필요하다.

본 연구에서는 95% 신뢰도 구간에서 $\pm 5\mu\text{m}$ 의 정밀도를 보장하는 온더머신 측정시스템^(2,6)에 자유곡면 측정이 가능하도록 한다. 기계오차를 보정한 공작기계^(5,6)를 사용해 측정을 수행하고 측정점을 B-spline 곡면으로 보간하여 법선벡터를 추정한다. 추정된 법선벡터를 이용해 프로빙오차(probing error) 보정과 공칭반경(nominal radius) 보정을 수행한다. 제안된 법선벡터 추정법과 프로빙오차 및 공칭반경 보정법의 신뢰도 검증을 위해 곡면구배와 오차분포곡면⁽¹³⁾에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 실제적 효용성을 평가하기 위한 온더머신 측정을 수행한다. 이를 통해 추가적인 측정 없이 고정도 측정이 가능함을 입증한다.

2. B-spline 곡면을 이용한 측정침의 반경보정

미지의 곡면을 측정하고자 하는 경우, 그 곡면의 형상 정보가 존재하지 않기 때문에 측정침의 접촉점에서의 법선벡터를 추정할 수 없다.⁽⁷⁻¹²⁾ 이는 측정침의 정확한 반경

보정을 어렵게 하는 요인이 되고 있다. 본 논문에서는 측정값을 B-spline 곡면으로 모델링하여 법선벡터를 추정하고 이를 이용하여 접촉각에 따른 프로빙오차와 공칭반경을 보정한다.

2.1 법선벡터 추정

법선벡터를 추정하기 위해 측정값을 식 (1)과 같은 비주기적 B-spline 곡면으로 모델링한다. 일반적으로 비주기적 B-spline 곡면은 u, v 에 대한 양3차(bi-cubic) 곡면을 주로 사용하고 있다.^(14,15)

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

$$0 \leq u \leq n - k + 2, 0 \leq v \leq m - l + 2 \quad (1)$$

여기서 $P_{i,j}$: B-spline 곡면의 조정점

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u - t_i)N_{i,k-1}(u)}{t_{i+k-1} - t_i} + \frac{(t_{i+k} - u)N_{i+1,k-1}(u)}{t_{i+k} - t_{i+1}},$$

$$N_{i,l}(u) = \begin{cases} 1 & t_i \leq u < t_{i+1} \\ 0 & \text{그 외의 범위} \end{cases}$$

$$N_{j,l}(v) = \frac{(v - t_j)N_{j,l-1}(v)}{t_{j+l-1} - t_j} + \frac{(t_{j+l} - v)N_{j+1,l-1}(v)}{t_{j+l} - t_{j+1}},$$

$$N_{j,l}(v) = \begin{cases} 1 & t_j \leq v < t_{j+1} \\ 0 & \text{그 외의 범위} \end{cases}$$

$$t_i = \begin{cases} 0 & 0 \leq i < k \\ i - k + 1 & k \leq i \leq n \\ n - k + 2 & n < i \leq n + k \end{cases}, \quad t_j = \begin{cases} 0 & 0 \leq j < l \\ j - l + 1 & l \leq j \leq m \\ m - l + 2 & m < j \leq m + l \end{cases}$$

k, l : u 방향, v 방향의 차수(order), 양3차 곡면의 경우 $k=4, l=4$

n, m : (u, v 방향으로의 조정점의 개수 - 1)

조정점이 4×4 배열인 경우 $n=3, m=3$

법선벡터는 측정값으로부터 역으로 식 (1)을 이용하여 곡면 방정식을 유도하는 보간 과정을 거친 후 이를 통해 추정한다. 법선벡터 추정 과정은 다음과 같다.

(1) 4×4 배열의 측정값 Q_{ij} 를 수집한다.

(2) Q_{ij} 를 B-spline 곡면 $P^0(u, v)$ 로 보간한다. 보간 순서는 다음과 같다.

① 매듭값 t_p, t_j 를 식 (1)로 구한다.

② 접속 함수(blending function) $N_{i,k}(u)$, $N_{j,l}(v)$ ($i, j = 0, 1, 2, 3$)를 식 (1)로 구한다.

③ 각 측정점에 식 (2)를 이용하여 매개변수 값 u_p, v_q 를 할당한다.

$$u_p = \frac{t_{p+1} + t_{p+2} + \dots + t_{p+k-1}}{k-1}, \quad p = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$v_q = \frac{t_{q+1} + t_{q+2} + \dots + t_{q+l-1}}{l-1}, \quad q = 0, 1, 2, \dots, m$$

④ 식 (3)으로부터 u 방향으로 보간하여 $C_i(v_q) = \sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{j,l}(v_q)$ 를 구한다.

$$\begin{bmatrix} N_{0,k}(u_0) \cdots N_{i,k}(u_0) \cdots N_{n,k}(u_0) \\ N_{0,k}(u_1) \cdots N_{i,k}(u_1) \cdots N_{n,k}(u_1) \\ \vdots \\ N_{0,k}(u_n) \cdots N_{i,k}(u_n) \cdots N_{n,k}(u_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0(v_j) \\ C_1(v_j) \\ \vdots \\ C_n(v_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{0,j} \\ Q_{1,j} \\ \vdots \\ Q_{n,j} \end{bmatrix} \quad (3) \quad j=1, \dots, n$$

⑤ $C_i(v_q)$ 를 식 (4)에 대입해 v 방향으로 보간하여 최종적인 조정점 P_{ij} 를 구한다.

$$\begin{bmatrix} N_{0,l}(v_0) \cdots N_{j,l}(v_0) \cdots N_{m,l}(v_0) \\ N_{0,l}(v_1) \cdots N_{j,l}(v_1) \cdots N_{m,l}(v_1) \\ \vdots \\ N_{0,l}(v_m) \cdots N_{j,l}(v_m) \cdots N_{m,l}(v_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i,0} \\ P_{i,1} \\ \vdots \\ P_{i,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_i(v_0) \\ C_i(v_1) \\ \vdots \\ C_i(v_m) \end{bmatrix} \quad (4) \quad i=1, \dots, n$$

⑥ 구해진 곡면의 조정점 P_{ij} 를 식 (1)에 대입해 곡면 방정식 $P^0(u, v)$ 를 얻는다.

(3) 곡면 $P^0(u, v)$ 의 방정식을 이용하여 각 측정점에서의 단위 법선벡터를 다음의 식 (5)를 이용해 추정한다.

$$N_{i,j} = \frac{\frac{\partial P^0(u_i, v_j)}{\partial u} \times \frac{\partial P^0(u_i, v_j)}{\partial v}}{\left| \frac{\partial P^0(u_i, v_j)}{\partial u} \times \frac{\partial P^0(u_i, v_j)}{\partial v} \right|} \quad (5) \quad i, j = 0, 1, 2, 3$$

2.2 프로빙오차 보정

정확한 곡면 모델링을 위해서는 측정값에 대한 신뢰도 확보가 필수적이다. 이를 위해 본 연구에서는 레이저 간섭계를 이용하여 기계오차를 보정하였으며 진구와 접촉식 측정프로브를 이용하여 곡면 측정시의 프로빙오차를

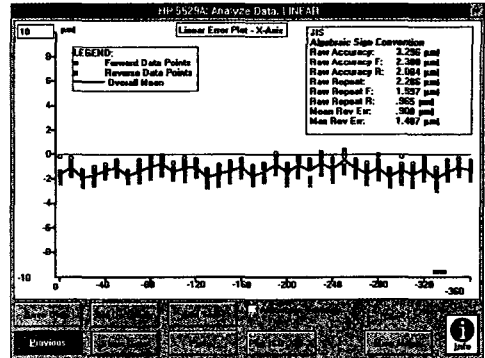


Fig. 1 Pitch error compensation

보정하였다. Fig. 1은 레이저 간섭계에 의해 피치오차를 보정한 결과이다. JIS 규격을 기준으로 공작기계 가공체적에 대해 위치결정 오차는 3.3 μ m이고 반복위치결정 오차는 2.3 μ m이다.^(5,6) 자유곡면의 가공정도가 일반적으로 20~50 μ m인 점을 감안할 때 서론에서 언급한 온더머신 측정시스템은 매우 우수한 곡면 측정기로 활용할 수 있음을 입증한다.

프로빙오차는 측정프로브의 트리거링 메커니즘으로 인한 로빙오차(lobing error)와 이송방향에 의존하는 기계오차로 인해 측정시 발생하는 오차로 정의한다. 3차원 형상측정시 측정속도를 일정하게 유지하더라도 측정침과 공작물간의 접촉각에 따라 프로빙오차가 발생한다.⁽¹⁾ 프로빙오차는 Fig. 2에 나타난 진구와 측정침 중심간의 관계로부터 식 (6)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 진구와 측정침의 반경은 상수이므로 프로빙오차는 측정속도가 일정한 경우 접촉각 ϕ 와 θ 의 함수로 표현된다.

$$E(\phi, \theta) = R_M(\phi, \theta) - R_S - R_N \quad (6)$$

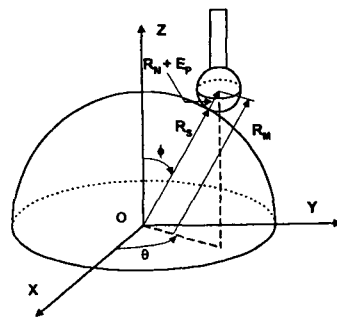


Fig. 2 Probing error identification

여기서, $E(\phi, \theta)$: 프로빙오차
 $R_M(\phi, \theta)$: 측정값 좌표
 R_S : 진구반경
 R_N : 측정침의 공칭반경

프로빙오차 규명을 위한 진구 측정시의 측정점은 진구의 정점과 ϕ 가 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ 에서 θ 의 위치를 0° 에서 360° 까지 18° 씩 증가시켜 총 101점으로 선정하였다. Fig. 3은 측정침과 진구의 접촉각 ϕ 와 θ 에 따른 프로빙오차를 나타낸 것이다.

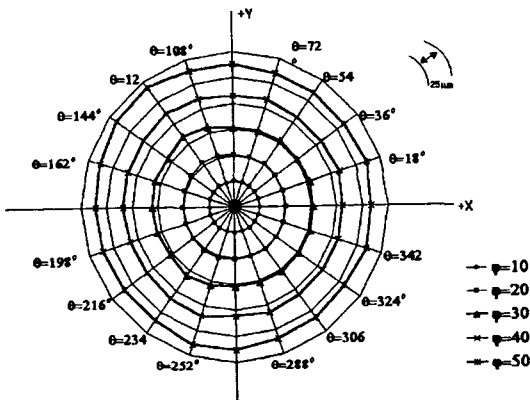


Fig. 3 Probing error at the contact angle (ϕ, θ)

자유곡면 측정시 프로빙오차를 보정하기 위해서는 2.1에 추정된 법선벡터를 이용하여 식 (7)로부터 곡면과 측정침의 접촉각 ϕ 와 θ 를 구한다.

$$\phi = \cos^{-1}(N_z / \sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2}) = \cos^{-1}(N_z) \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1}(N_y / N_x)$$

여기서, N_x, N_y, N_z : 각 축방향의 법선벡터 요소

접촉각에 대한 프로빙오차를 구한 후 이를 이용하여 식 (8)과 같이 측정값을 보정한다.

$$Q_{i,j}^* = Q_{i,j}^C - R_N \cdot N_{i,j} \quad (8)$$

여기서, $Q_{i,j}^C$: 보상된 i, j 번째 측정점
 $Q_{i,j}$: 보상전 i, j 번째 측정점
 $E_{i,j}$: i, j 번째 보상값

2.3 측정침의 공칭반경 보정

측정침의 공칭반경 보정은 프로빙오차를 보정한 측정점들로부터 추정된 법선벡터를 이용한다. 측정점은 법선벡터 방향으로 공칭반경만큼 이동되며 이를 다시 B-spline 곡면으로 모델링하여 최종적인 곡면 모델인 자유곡면 검사모델을 구한다. 공칭반경 보정과 검사모델 생성 과정은 다음과 같다.

- (1) 프로빙오차를 보정한 측정값 $Q_{i,j}^C$ 로부터 2.1 법선벡터 추정을 통해 법선벡터를 구한다.
- (2) Fig. 4에 나타낸 바와 같이 $Q_{i,j}^C$ 를 추정된 법선벡터 방향으로 다음의 식 (9)를 이용하여 $Q_{i,j}^*$ 로 이동시킨다.

$$Q_{i,j}^* = Q_{i,j}^C - R_N \cdot N_{i,j} \quad (9)$$

여기서 R_N : 측정침의 공칭반경
 $N_{i,j}$: i, j 번째 측정점의 법선벡터

- (3) 이동된 16개의 $Q_{i,j}^*$ 를 이용하여 식 (1)의 B-spline 곡면 $P^*(u, v)$ 로 보간한다.
- (4) 보간된 B-spline 곡면 $P^*(u, v)$ 를 측정영역에 대한 검사모델로 사용한다.

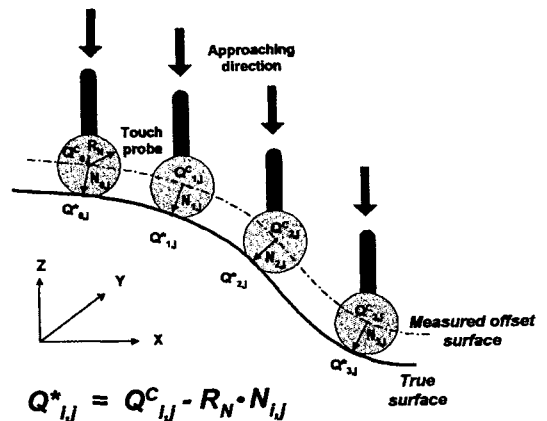


Fig. 4 Nominal radius compensation

3. 언더머신 측정 및 검사 시스템

Fig. 5는 개발된 자유곡면 측정시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 측정 시스템은 측정 NC코드 생성, 측정 NC코드 시뮬레이션, DNC, 측정데이터 해석, 해석결과 출

력 등의 모듈로 구성되어 있다. 16점의 측정 NC코드를 생성하여 시스템 상에서 확인한 후 DNC를 이용해 온더머신으로 측정을 수행한다. 수집된 측정값은 2장의 법선벡터 추정과 이를 이용한 프로빙오차 보정 및 공칭반경 보정의 과정으로 해석되어 검사모형을 출력한다.

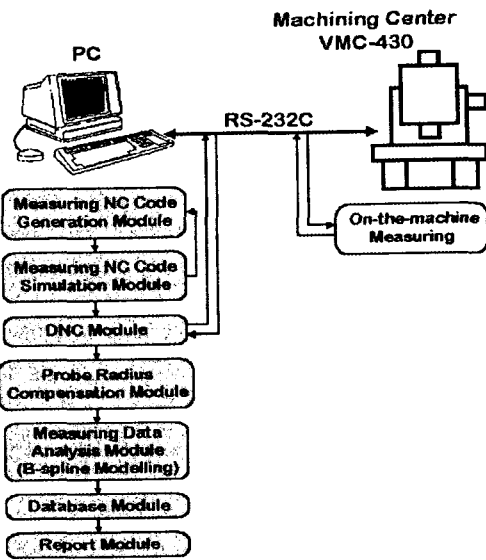


Fig. 5 Schematic diagram of the developed system

4. 시뮬레이션 및 온더머신 측정

본 연구에서 제시된 자유곡면 측정을 위한 측정시스템 설계법의 신뢰성 및 유용성을 입증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션과 Fig. 6과 같은 온더머신 측정을 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 곡면 구배와 실제 가공표면을 묘사할 수 있는 오차분포곡면에 대해 수행하였고 온더머신 측정은 I-DEAS를 이용하여 설계 및 가공된 자유곡면을 대상으로 수행하였다.

4.1 컴퓨터 시뮬레이션

법선벡터 추정의 신뢰도 평가를 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 측정침의 공칭반경은 3mm로 가정하였고 측정영역의 크기를 $(0, 6\text{mm})^2$ 로 설정하였으며 16개의 균일분포점을 모의측정하였다. 측정침의 공칭반경 보정과 이를 위한 법선벡터 추정은 2장의 내용을 이용하였고 검사모



Fig. 6 On-the-machine measurement

형의 정확도는 식 (10)의 평균오차 E_{ave} 로 평가하였다.

$$E_{ave} = \frac{1}{n_p n_q} \sum_{p=1}^{n_p} \sum_{q=1}^{n_q} |P(x_p, y_q) - P^*(x_p, y_q)| \quad (10)$$

- 여기서 n_p, n_q : 측정영역내의 x, y 방향 점의 개수
- x_p, y_q : 측정영역내의 p, q 번째 x, y 값
- $P(x, y)$: 설계 곡면식
- $P^*(x, y)$: 모델링 곡면식

먼저 곡면 구배에 따른 측정시스템의 알고리즘 정확도를 평가하기 위해 Fig. 7의 A-A'구간에 대해 0° 에서 40° 까지 2° 간격으로 21개의 검사영역을 모의측정하였다.

두번째로 Fig. 8(b)와 같이 오차가 분포하는 곡면을 대상으로 표면조도에 따른 신뢰도를 평가하였다. 오차분포곡면은 절대 오차평균이 $11\mu\text{m}$ 이고 표준편차가 $0.6\mu\text{m}$ 인 오차분포를 Fig. 8(a)와 같은 곡면에 중첩하여 생성하였다. 실제 가공표면을 묘사할 수 있도록 식 (11)과 같이

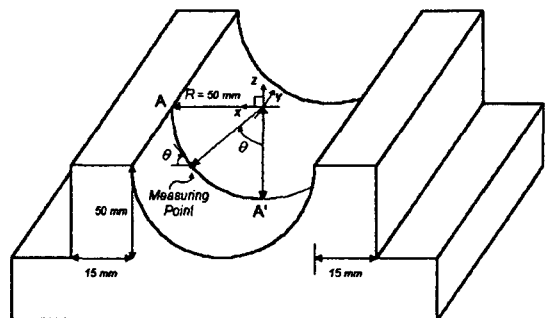


Fig. 7 A surface for simulation I : Tangential angle test

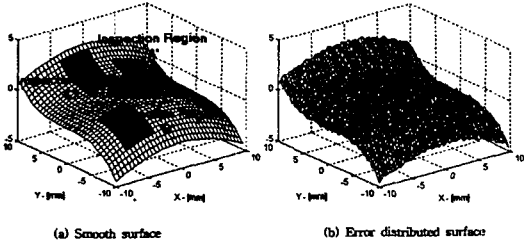


Fig. 8 A surface and 3 inspection regions for simulation I : Error effect test

표현되는 65,536개의 점으로 이루어진 averaged Wiener surface를 사용하였다. Averaged Wiener surface는 곡면의 형상이 부드럽고 주기적인 특징이 있어 밀링이나 연삭작업 등의 거친 표면을 나타내는데 적합하다.⁽¹³⁾ Fig. 8의 A, B, C 3개의 검사영역에 대해 모의 측정하였다.

$$AW(t_1, t_2) = \frac{1}{4} [W(t_1, t_2) + W(1-t_1, t_2) + W(t_1, 1-t_2) + W(1-t_1, 1-t_2)], \quad 0 \leq t_1, t_2 \leq 1 \quad (11)$$

여기서 $W(t_1, t_2) = \sum_{k_1=0}^{255} \sum_{k_2=0}^{255} w[k_1, k_2] u(t_1 - k_1/255, t_2 - k_2/255)$
 $w[k_1, k_2] = (-1)^{k_1+k_2} / 256$ (단, $w(0,0)=0$)
 $u(t_1, t_2)$ = 2차원 단위 계단 함수(unit step function)

Fig. 9는 곡면 구배에 따른 모델링 정확도의 평가결과이다. 0°에서 ±40°까지 평균오차 E_{ave} 가 모두 1μm 이내로 공칭반경 보정을 위한 법선벡터 추정이 곡면 구배에 큰 영향을 받지 않으면서 고정도의 측정에 이용할 수 있다.

오차분포곡면에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 부드러운 곡면과 오차분포곡면간의 해석결과 차이가 오차 평균값에 접근함을 확인할 수 있다. 이는 오차가 분포하는 곡면에 대해서도 제한한 법선벡터 추정법이 유용함을 의미한다.

4.2 온더머신 측정

추정된 법선벡터를 이용한 프로빙오차 및 공칭반경 보정법을 평가하기 위해 온더머신 측정실험을 수행하였다. 측정프로브는 측정침 공칭반경이 3mm인 Renishaw사의

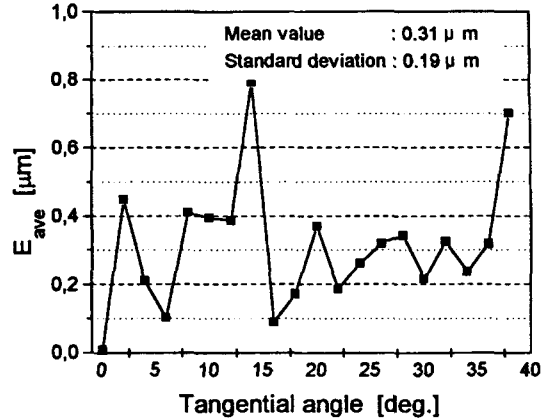


Fig. 9 Simulation I result : E_{ave} vs. tangential angle at contact point

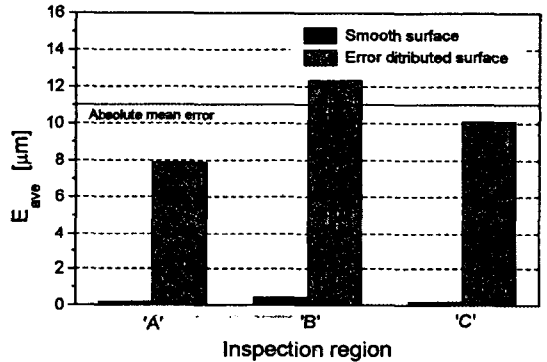


Fig. 10 Simulation I result : E_{ave} vs. inspection region

LP2를 사용하였고, 측정장비로 수직형 머시닝센터 VMC 430을 사용하였다. 측정영역의 크기는 4.1의 컴퓨터 시뮬레이션과 같이 [0, 6mm]²로 설정하였고 검사영역 내의 16점을 온더머신으로 측정하였다. 검사모델의 정확도는 식 (10)의 평균오차 E_{ave} 를 이용하였다.

첫번째 온더머신 측정은 첫번째 시뮬레이션과 측정결과를 비교하기 위한 것이다. 측정 공작물은 Fig. 7과 같은 곡면을 상용CAD/CAM/CAE 통합 시스템인 I-DEAS⁽¹⁶⁾의 CAM기능을 이용하여 가공하였다. 가공조건은 cusp 높이가 5μm, 직선보간 오차 5μm이고 공작물은 곡률 구배에 따른 공구 휨을 줄이기 위해 베이클라이트(bakelite)이다. 접촉각에 따른 측정오차를 알아보기 위하여 Fig. 7의 A-A'구간에 대해 2°간격으로 0°부터 35°까지 측정하였다.

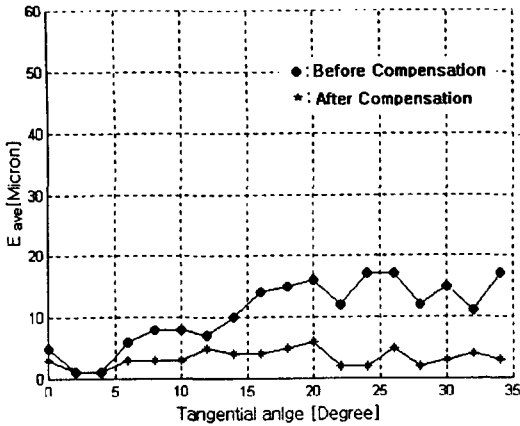


Fig. 11 On-the-machine measurement I result : E_{ave} vs. tangential angle at contact point

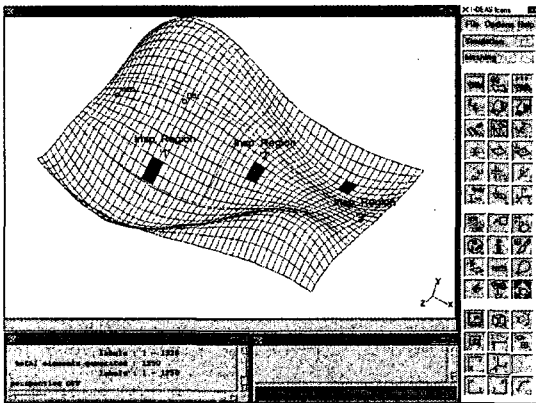
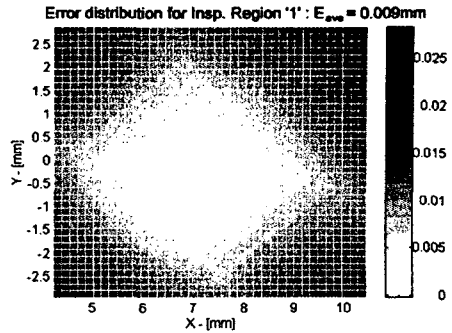


Fig. 12 A surface(200mm × 100mm) and inspection regions for on-the-machine measurement II (Surface constructed by I-DEAS)

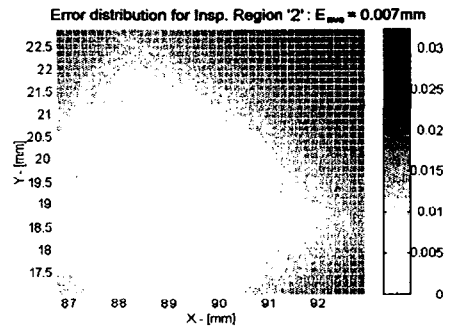
온더머신 측정결과는 Fig. 11과 같이 공칭반경만을 보정하였을 경우 $\pm 35^\circ$ 이내에서 $18\mu\text{m}$ 이하이다. 측정침과 공작물간의 접촉각이 커짐에 따라 오차가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 가공오차, 기계오차, 곡률에 따른 프로빙오차 등의 영향으로 해석된다. 이와 달리 프로빙오차를 보상하였을 경우 오차가 접촉각에 대해 일정한 경향을 보이고 있다.

Fig. 12는 두번째 온더머신 측정을 위한 곡면을 보여주고 있다. 첫번째 측정 공작물과 같은 조건으로 가공하여 3개의 측정영역을 선정하였다.

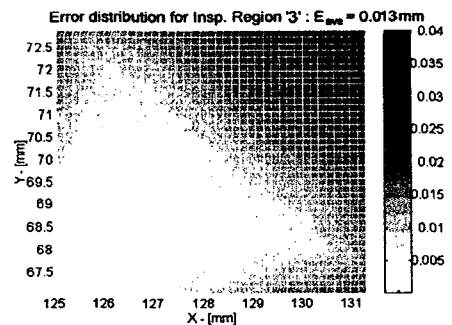
Fig. 13에 두번째 온더머신 측정결과를 보였다. Fig. 13은 곡면의 설계값과 측정 해석값을 오차분포도로 나타



(a) error distribution for inspection region '1' : $E_{ave} = 0.009\text{mm}$



(b) error distribution for inspection region '2' : $E_{ave} = 0.007\text{mm}$



(c) error distribution for inspection region '3' : $E_{ave} = 0.013\text{mm}$

Fig. 13 On-the-machine measurement II result : Error distribution of inspection region

낸 것이다. 3개의 측정영역에 대한 오차가 모두 $15\mu\text{m}$ 이내임을 확인할 수 있다. 이와 같은 온더머신 측정실험을 통하여 제안한 자유곡면 측정법이 높은 가공 정밀도가 요구되는 특정영역 측정에 유용함을 입증하였다.

5. 결론

본 연구를 통해 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 전략적 위치의 자유곡면 측정을 위한 측정시스템 설계법을 제안하였다.
- (2) 측정점의 B-spline 곡면 모델링을 통해 추가적인 측정 없이 법선벡터를 추정한다.
- (3) 레이저 간섭계를 이용한 공작기계 피치오차 보상과 추정된 법선벡터를 이용한 프로빙오차 보정으로 측정값의 신뢰도를 확보한다.
- (4) 측정침의 공칭반경 보정은 신뢰도를 확보한 측정점으로부터 추정된 법선벡터를 이용한다.

향후, 본 연구에서 제안한 방법론은 좌표측정기에 적용될 수 있도록 DMIS Pre/Post processor의 개발이 필요하고 상용 CAD/CAM 시스템과의 연계를 위한 IGES Translator 등의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

1. J. A. "Bosch, Coordinate Measuring Machines and System," M. Dekker Inc. 1995.
2. 박우열, 정성종, "공작기계용 자동측정 및 해석 시스템에 관한 연구," 한국정밀공학회 '93년도 추계 학술대회 논문집, pp. 228-232, 1993.
3. 김승철, 정성종, "특징형상에 기초한 자동가공 및 측정시스템에 관한 연구," 한국정밀공학회 '93년도 추계 학술대회 논문집, pp. 238-242, 1993.
4. 정성종, "공작기계상에서의 좌표측정기 기술," 서울대학교 제어계측신기술 연구센터, 제8회 CNC 콘트롤러 워크샵, pp. 121-141, 1996.
5. 신동수, 정성종, "NC 공작기계를 위한 레이저 이용 자동 오차 측정 및 보상," 한양대학교 기계기술 연구소 논문집 Vol.1, pp. 103-118, 1994.
6. 양종태, "수치제어 공작기계의 열변형오차 보정법," 한양대학교 석사학위논문, 1995.
7. H. Aoyama and M. Kawai, "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, 1989.
8. Y. D. Chen, X. J. Tang, J. Ni and S. M. Wu, "Automatic Digitization of Free-form Curve by Coordinate Measuring Machines," International Journal of Production Research, Vol. 32, No. 11, pp. 2603-2612, 1994.
9. H. Aoyama and I. Ianasaki, "Extraction of Boundary Lines between Free Form Surfaces for Construction of Computer Model," Transaction of NAMRI/SME, Vol XXV, pp. 293-298, 1997.
10. N. Duffie, R. Piper and M. Kronerberg, "CAD Directed Inspection and Error analysis Using Surface Patch Database," Annals of the CIRP, Vol. 31, No. 1, pp. 347-350, 1984.
11. S. Kawabe, etc, "Automatic Generation of NC Command for 3-D Coordinate Measuring Machines," Bulletin of the JSPE, Vol. 14 pp. 177-178, 1980.
12. S. H. Suh, S. K. Lee and J. J. Lee, "Compensating Probe Radius in Free Surface Modelling with CMM : Simulation and Experiment," International Journal of Production Research, Vol. 34, No. 2, pp. 507-523, 1996.
13. T. C. Woo, R. Liang, C. C., Hsieh and N. K., Lee, "Efficient Sampling for Surface Measurements," International Journal of Manufacturing Systems, Vol. 114, No. 5, pp. 345-354, 1995.
14. B. K. Choi, "Surface Modeling for CAD /CAM," Elsevier Science Publishing Com, 1991.
15. 이건우, "컴퓨터 그래픽과 CAD," 영지문화사, 1997.
16. SDRC, "I-DEAS User Manual," SDRC Korea, 1997.