

CAD/CAM/CAI 통합에 기초한 자유곡면의 On-Machine Measurement : II. 측정계획 수립

조명우*, 김진섭**, 서태일***, 조재형****

On-Machine Measurement of Sculptured Surfaces Based on CAD/CAM/CAI Integration : II. Inspection Planning Strategy

Myeong-Woo Cho*, Jin-Seop Kim**, Tae-Il Seo*** and Jae H. Cho****

ABSTRACT

The objective of this research is to develop an effective inspection planning strategy for sculptured surfaces in OMM(On-Machine Measurement) process. As a first step, effective measuring point locations are determined to obtain optimum results for given sampling numbers. Two measuring point selection methods are suggested in this study based on newly proposed CAD/CAM/CAI integration concept: (1) by the prediction of cutting errors, (2) by considering cutter contact points to avoid the measurement errors caused by cusps. As a next step, the TSP(Traveling Salesman Problem) algorithm is applied to minimize the probe moving distance. Appropriate simulations and experiments are performed to verify the proposed inspection planning strategy in this study, and the results are analyzed.

Key Words : Inspection Planning(검사계획), Sculptured Surface(자유곡면), CAD/CAM, CAI(Computer-Aided Inspection), OMM(기상측정:On- Machine Measurement)

1. 서론

자유곡면의 기계적 가공은 CAD/CAM 소프트웨어를 사용하여 주어진 형상 데이터로 공구경로를 결정하고, CNC 공작기계에서 볼엔드밀(ball-end mill)이나 엔드밀(end mill) 등의 공구를 사용하여 황삭(rough cut), 정삭(finish cut) 등의 일련의 과정을 통하여 공작물을 가공하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다. CNC 공작기계에서의 가공이 완료된 후, 자유곡면의 표면에 발생하는 공구이동 흔적(cusp)을 제거하여 요구되는 형상과 표면조도를

만족시키기 위한 마무리 다듬질 공정이 이어진다. 가공된 자유곡면의 정밀한 측정을 위하여 컴퓨터로 제어되는 3 차원 측정기가 널리 사용되고 있으며, 수동 측정작업에 의한 오차 발생 가능성 배제 및 측정 정밀도의 향상을 위하여 CAD 데이터 베이스로부터 최적의 측정 조건을 도출하기 위한 CAD/CAI 통합에 기초한 측정기술의 개발에 관한 연구^{1,3,8,12)}가 이루어져 왔다.

그러나, 일반적인 기계가공에서 가공물의 대부분의 기하학적 형상은 CNC 공작기계에서 결정되기 때문에, 이 단계에서 의도하지 않았던 과도

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 대학원

*** 인하대학교 기계기술공동연구소

**** 단국대학교 산업공학과

한 절삭이 발생하여 요구되는 형상과 공차범위를 벗어나는 오류가 발생하였을 경우에 후속 공정을 계속 진행하는 것은 시간과 경제적인 손실로 이어진다고 할 수 있다. 현재 다양한 CAD/CAM 소프트웨어를 사용하여 가공조건에 대한 시뮬레이션 및 검증과정을 통하여 이러한 가능성을 최소화 시키고자 하고 있으나, 실제 가공 시에는 공작기계 자체의 기하학적 오차 및 공구의 변형 또는 검증과정의 오류 등으로 인하여 형상오차가 발생할 가능성은 항상 존재하고 있다. 따라서, 기계가공 단계에서 원하는 형상으로 가공이 진행되고 있는지를 판단할 수 있는 측정방법이 필요하나, 가공작업의 진행 중에 가공물을 3차원 측정기에 이동시켜 측정하고, 다시 공작기계에서 후속 가공을 진행하는 것은 좌표계의 변화 및 가공시간의 증가 등으로 인하여 현실적이지 못하기 때문에, 공작기계에서 자체적으로 가공물의 형상을 측정하여 후속작업 진행 여부 및 공구경로 수정 여부를 판단할 수 있는 방법이 필요하다.

이러한 사유로 가공 중에 있는 공작물의 형상오차 측정을 위하여 최근에 OMM(기상측정: On-Machine Measurement)에 대한 연구¹¹⁾가 이루어지고 있으나, 대부분 3차원 측정기를 사용하여 가공이 완료된 가공물의 최종 정밀도 측정을 위한 방법을 그대로 적용하고 있기 때문에, 가공 중에 있는 공작물의 형상오차 측정에서는 비효율적이고 원하지 않은 측정오차가 발생할 가능성이 있다. 따라서, 자유곡면의 효과적인 OMM을 위해서는 이러한 특성에 적합한 방법이 개발되어야 하며, 본 연구에서는 CAD/CAM/CAI 데이터의 통합에 기초하여 공구경로를 고려한 적절한 측정점 위치의 결정방법 및 전체 측정시간을 최소화하기 위한 측정순서의 결정 등을 포함한 새로운 측정계획 수립을 위한 방법을 제시하였으며, 일련의 실험을 통하여 타당성을 검증하였다.

2.3 차원 측정기와 OMM의 측정방법 비교

3차원 측정기와 OMM은 가공이 완료된 공작물에 대한 형상정밀도 측정에서는 유사한 방법으로 측정작업을 수행할 수 있으나, 공정 중에 있는 공작물을 측정대상으로 하였을 경우에는 사용되는 기기의 목적과 기능이 서로 다르기 때문에 측정방식도 달라져야 한다. 따라서, 다음과 같이 두 기기

의 측정방식의 차이점을 비교하였다.

2.1.3 차원 측정기에 의한 측정

Fig.1은 3차원 측정기를 이용하여 최종 가공물의 정밀도 판정을 하는 경우의 개요도이다. 자유곡면의 형상정보를 가지고 있는 CAD 데이터로부터 가공을 위한 CAM 데이터를 생성하여 이를 CNC 머시닝 센터로 전송하여 기계가공을 하고, 가공이 완료된 후 가공물을 3차원 측정기로 이동시켜 CAD 데이터로부터 측정점의 위치 및 측정경로 등을 추출하여 생성된 CAI 데이터를 이용하여 형상오차 측정을 한 후, 이를 CAD 데이터 베이스의 형상정보와 비교하여 오차를 판별하게 된다. 이러한 방법은 높은 정밀도를 가지고 가공물의 최종 정밀도 판정을 할 수 있다는 장점이 있으나, 최종 가공물에 대한 오차 판별에 주목적이 있기 때문에 가공 중에 있는 공작물의 형상오차 측정을 위한 OMM에 그대로 적용하기에는 여러 가지 요인에 의한 측정오류의 발생 가능성이 있다.

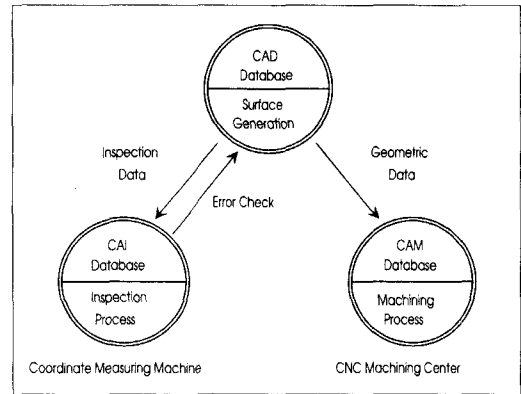


Fig. 1 Inspection procedure using CMM

일반적으로 3차원 측정기에서 자유곡면의 형상오차측정을 위하여는 등간격으로 측정점을 배열하는 방법이 사용되나, 공작기계에서 공작물은 황삭공정에서 정삭공정까지 여러 단계의 과정을 통하여 완성되며, 이 때마다 공구의 종류 및 가공경로등에 따라서 공구의 이동흔적(cusp)이 가공표면에 남게 된다. 따라서, 이러한 상황에 대한 정확한 고찰이 없이 종래의 방법으로 측정하였을 경우에는 Fig.2에 나타낸 바와 같이 측정점이 cusp의 끝부분이나 밀부분 등 일정하지 않은 곳에 위치할

가능성이 있기 때문에 이에 의한 측정오차가 발생하게 되며, 이러한 경우는 특히 짧은 시간에 직경이 큰 공구로 많은 양을 제거하는 황삭공정에 대한 측정시 발생할 가능성이 많다. 또한 황삭과 정삭은 그 특성상 사용되는 절삭속도 및 공구간섭현상의 회피 등의 이유로 목표로 하는 가공표면의 형상이 달라질 수 있으며, 자유곡면의 가공 중 측정에는 이러한 요인이 반드시 고려되어야만 원하는 측정결과를 얻을 수 있다.

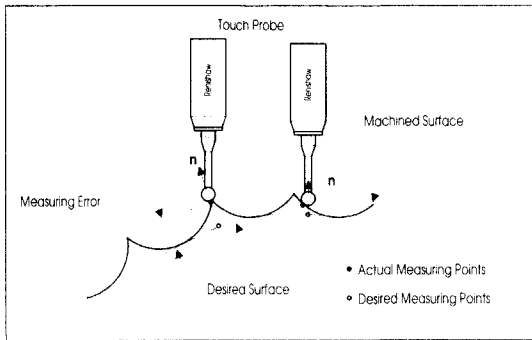


Fig. 2 Measurement errors caused by cusp height

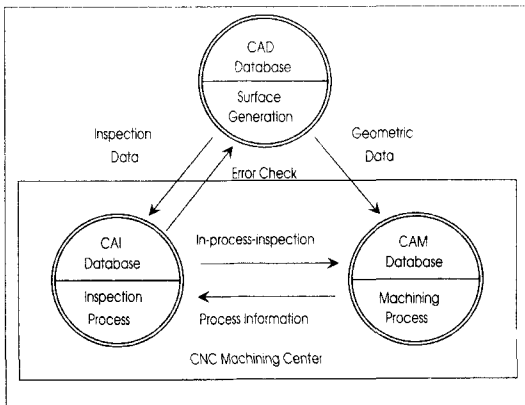


Fig. 3 Inspection procedure using OMM based on CAD/CAM/CAI integration

2.2 OMM 에 의한 측정

가공 중에 있는 자유곡면의 적절한 OMM 을 위해서는 앞에서 언급한 3 차원 측정기를 위한 CAD/CAI 통합에 기초한 측정방법 외에 가공경로 등에 대한 정보를 가지고 있는 CAM 데이터도 함께 고려되어야 하며, 이에 대한 개요도를 Fig.3 에

나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 OMM 에서 는 가공과 측정이 하나의 공작기계 위에서 이루어 지기 때문에 측정을 위한 데이터 베이스 구성을 위해서는 CAD 데이터와 CAM 데이터를 동시에 고려하여야 한다. 이 때, CAD 데이터 베이스에 있는 형상정보로부터 NC 가공을 위한 CAM 데이터를 추출하여 황삭에서 정삭까지 일련의 과정으로 가공하며, 이러한 가공정보와 CAD/CAI 통합에 기초하여 생성된 측정 데이터 베이스로부터 자유곡면의 OMM 을 위한 적절한 측정계획이 수립된다. 생성된 측정계획에 의하여 수행된 측정의 결과는 다시 CAD 및 CAM 데이터와 비교하여 현재 공정 중의 가공물이 요구되는 형상 및 오차범위에 있는 지의 여부를 판별할 수 있게 된다.

3. 가공표면 및 오차 예측

본 연구에서는 가공 중에 있는 자유곡면의 효율적인 측정을 위하여 곡면의 형상정보 외에, 가공된 표면의 상태를 함께 고려하여 적절한 측정점 위치의 결정 등을 포함한 새로운 검사계획법을 제시하는데 목적을 두고 있다. 실제 가공된 표면의 정확한 정보는 가공이 완료된 표면에 대하여 적절한 측정을 수행하여 구할 수 있으나, 이는 대단히 비효율적이기 때문에 본 연구에서는 시뮬레이션을 통한 효율적인 예측방법이 사용되었다.

자유곡면의 NC 가공을 위해서는 CAD 데이터 베이스의 형상정보로부터 주어진 공구의 크기와 공차범위를 만족시키는 가공점(CC-point)을 연속적으로 계산하며, 이로부터 공구위치점(CL-point)이 결정되게 된다. 대부분의 경우 공구는 주어진 점 사이를 직선보간에 의하여 이동하며 절삭작업을 수행하므로, 요구되는 자유곡면과 실제 가공된 곡면사이에 오차가 발생하는 것은 필연적이라 할 수 있으며, 이러한 가공오차를 예측하여 발생 가능한 오류를 보정하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 본 연구에서 가공표면과 절삭오차를 예측하기 위하여 사용된 방법은 Jerard^[2,4,5] 와 Kim^[6]의 연구에 기초하고 있으며, Fig.4 에 본 연구에 적용된 방법의 개요가 나타나 있다.

가공표면 형상의 예측을 위한 첫번째 순서는 가공오차를 판별할 위치(판별점:check point)를 자유곡면 상에 선정하는 것이다. 판별점이 선정되면, XY 평면에서 각 판별점 좌표에서 일정한 크기를

가지는 벡터를 결정하여 가상적인 공작물을 구성하며, 일반적인 3축 가공의 경우에는 Z축에 평행하고 일정한 값을 가지는 포인트 벡터(point vector)를 초기값으로 사용한다. 이러한 포인트 벡터는 공구의 이동경로를 고려하여 공구이동궤적의 접촉점을 연속적으로 계산하여 가공 후 표면의 형상을 구할 수 있으며, 이를 요구되는 형상정보와 비교하여 가공오차를 예측할 수 있다.

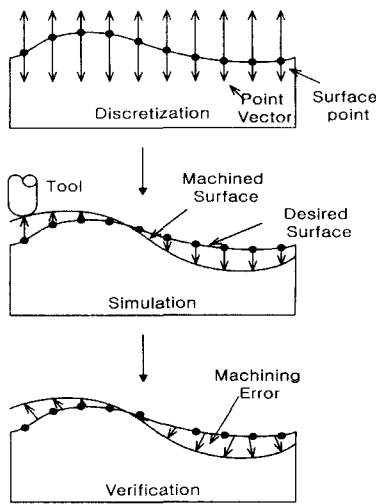


Fig. 4 Applied method for cutting simulation

3.1 가공면 계산

공작기계를 사용하여 절삭작업을 수행할 때, 실제로는 공작기계의 기하학적 정밀도, 절삭깊이 및 이송량에 따라 변화하는 공구의 변형 등에 의하여 가공면의 형상 정밀도가 변화하나, 이러한 오차요소를 배제하고 절삭과정을 단순화시키면, 공작물은 공구의 이동 궤적에 의하여 가공형상이 결정된다고 가정할 수 있다. 이러한 경우, 공구의 경로 및 공작물과의 접촉 범위 등을 고려하여 앞에서 설정한 포인트 벡터와 만나는 점을 구하고, 공구에 의하여 포인트 벡터가 제거되는 부분을 계산하면 주어진 가공조건에 따라 가공된 표면의 형상을 계산할 수 있다. Fig.5에 이러한 방법의 개요를 도시하였다. Fig.5(a)에 나타난 바와 같이 2개의 공구위치점 a 와 b 가 주어질 때, 공구는 두 점 사이를 직선으로 이동하며, 이 때 이동궤적

사이에 있는 부분은, 공구의 이동궤적 형상에 따라 제거된다. 이 때 절삭되지 않은 부분은 가공이 완료된 후의 표면형상이 되며, 이는 앞에서 설정한 포인트 벡터와 공구궤적 사이의 교점을 연속적으로 계산하여 구할 수 있다.

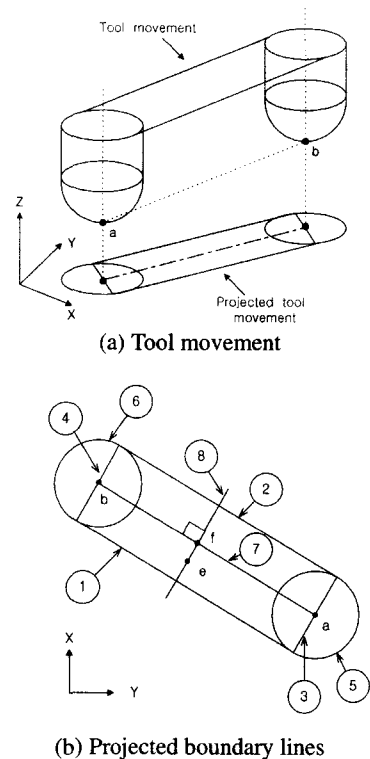


Fig. 5 Tool movement and projected boundary lines on XY-plane

Fig.5(a)에서 보는 바와 같이 공구의 이동궤적은 두 개의 공구위치점 a , b 의 좌표와 공구반경 r 에 의해 정의되며, 이 때, XY 평면에 투영된 공구궤적 영역은 Fig.5(b)와 같이 정의된다. 가공된 표면의 계산을 위하여, 먼저 미리 설정된 판별점이 이 영역 내에 존재하는지를 판단하고, 만약에 존재하고 있다면 Z 방향의 포인트 벡터와 공구이동궤적의 교점을 구하여 가공된 표면의 좌표를 구할 수 있다.

판별점 e 가 직사각형 ①②③④ 내에 존재할 때, 판별점의 Z 좌표 Z_e 를 구하기 위해 보조점 f 가 사용되었으며, 이 점 f 는 선분 ⑦과⑧의 교점이다.

판별점 e 가 선분 ㉔위에 있으므로 점 f 에서의 Z 좌표 Z_f 는 다음식에 의해 계산된다.

$$Z_f = Z_a + (Z_b - Z_a) \frac{(X_f - X_a)}{(X_b - X_a)} \quad (1)$$

여기에서, X_a, Z_a, X_b, Z_b 는 공구위치 a 와 b 의 X 좌표와 Z 좌표를 각각 나타낸다. 판별점 e 의 Z 좌표 Z_e 는 Fig.6 에 나타낸 바와 같이 사용되는 공구의 형태에 따라 달라질 수 있으며, ball-end cutter 의 경우에는 다음의 식으로부터 구해질 수 있다.

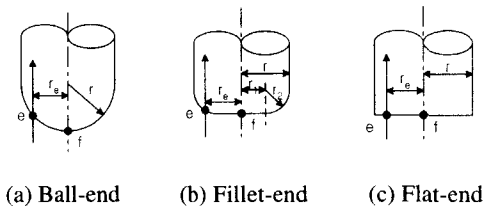


Fig. 6 Geometry of cutting tools

$$Z_e = Z_f + r - \sqrt{r^2 - r_e^2}$$

$$r_e = \sqrt{(X_f - X_e)^2 + (Y_f - Y_e)^2} \quad (2)$$

판별점 e 가 원 ㉕와 원 ㉖안에 있을 경우에는 Z 좌표를 구하기 위해서는 식(6)에서 X_f 와 Y_f 를 X_a, Y_a 또는 X_b, Y_b 로 대체하면 된다. 사용되는 공구가 flat-end cutter 의 경우에는 판별점 e 의 Z 좌표는 점 f 의 Z 좌표와 같게 되고, fillet-end cutter 의 경우에 Z 좌표는 다음 식에 의해 계산되어 진다.

$$Z_e = Z_f + r_2 - \sqrt{r_2^2 - (r_e - r_1)^2} \quad r_e > r_1$$

$$Z_e = Z_1 \quad r_e \leq r_1 \quad (3)$$

3.2 가공오차 계산

계산된 가공면의 좌표와 요구되는 자유곡면 형상을 비교하여 판별점에서의 가공오차를 예측할 수 있다. 자유곡면의 오차는 가공면상의 좌표로부터 최단 거리에 있는 곡면상의 좌표를 계산하고 두 좌표 사이의 거리를 계산하여 구할 수 있다^[1]. 측정점과 (x_m, y_m, z_m) 를 앞의 과정을 통하여 계산된 판별점에서의 가공면 좌표이고, (x_s, y_s, z_s) 를 가

공면 좌표로부터 최단 거리에 있는 요구되는 곡면상의 좌표라 하면, 매개변수 (u, v) 로 표시되는 자유곡면의 경우 (x_s, y_s, z_s) 는 다음의 식을 최소화하는 u 와 v 의 값으로부터 계산되며, Newton-Raphson method 등의 수치해석 방법을 사용하여 구할 수 있다.

$$D(u, v) = (x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + (z_m - z)^2 \quad (4)$$

이 때, 판별점에서의 가공오차는 다음과 같이 계산된다.

$$Error = \{(x_m - x_s)^2 + (y_m - y_s)^2 + (z_m - z_s)^2\}^{1/2} \quad (5)$$

3.3 Simulation 결과

전술한 방법을 사용하여 계산된 가공면의 형상과, 그 때 발생하는 가공오차의 예측결과가 황삭과 정삭의 경우에 대하여 Fig.7 과 8 에 각각 나타나 있다.

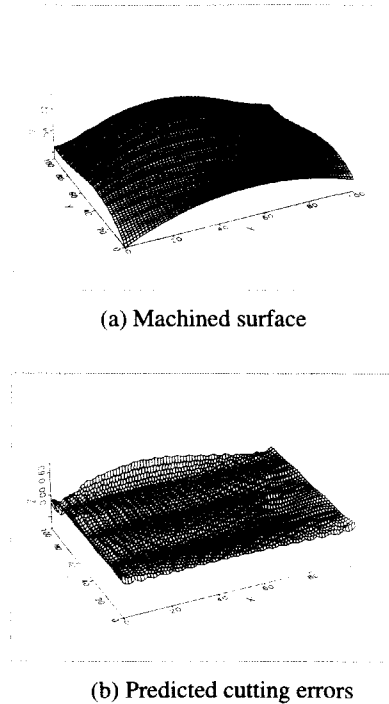
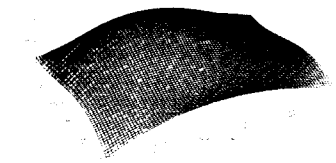
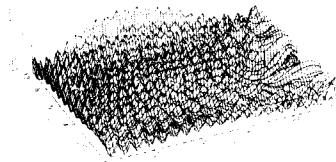


Fig. 7 Simulation result of rough cutting (tool radius=10mm, 311 CL-data)



(a) Machined surface



(b) Predicted cutting errors

Fig. 8 Simulation results of finish cut (tool radius=5mm, 1766 CL-data)

4. 가공데이터에 의한 측정점 결정 방법

접촉식 프로브를 이용하여 자유곡면을 측정할 때, 측정결과와 신뢰도는 측정점의 수와 밀접한 관계가 있으며, 일반적으로 사용되는 등간격 측정의 경우, 측정점의 수가 감소하면 전체 곡면의 형상정보가 불충분하게 되어 측정결과에 대한 신뢰도가 낮아지게 된다. 일반적으로, 측정점 수의 증가에 따라 측정결과에 대한 신뢰도가 증가한다고 할 수 있으나, 접촉식 프로브를 사용하는 측정작업의 경우에는 시간과 데이터 수의 증가로 비효율적인 측정작업이 수행될 수 있다. 이에 Menq^[7] 등은 가공에 사용된 설비의 능력과 요구되는 자유곡면의 공차범위를 고려하여 적절하게 측정점의 수를 결정하는 방법을 제안하였다. 또한, 동일한 수의 측정점으로 자유곡면을 측정할 경우, 측정위치를 적절하게 선정하면 보다 효율적으로 자유곡면의 측정을 수행할 수 있으며, 따라서, 본 연구에서는 전술한 가공표면에 대한 시뮬레이션 결과와 공

구경로 데이터를 사용하여 측정점의 수가 일정하게 주어졌을 때, 자유곡면의 측정작업을 효과적으로 수행할 수 있는 두 가지 방법을 제안하였다. 첫번째 방법은 예측된 가공오차를 기초로 오차가 크게 발생하는 부분에 측정점을 위치하여 효율적으로 측정하는 방법이고, 두 번째 방법은 가공면에 형성된 공구이동 흔적에 의한 측정오차를 피하기 위해 측정점을 가공점(CC-point)으로 이동시켜 측정하는 방법이다. 제안된 방법과 등간격 측정의 경우를 동일한 측정점 수에 대하여 오차를 비교하여 제안된 방법의 효율성을 검증하였다.

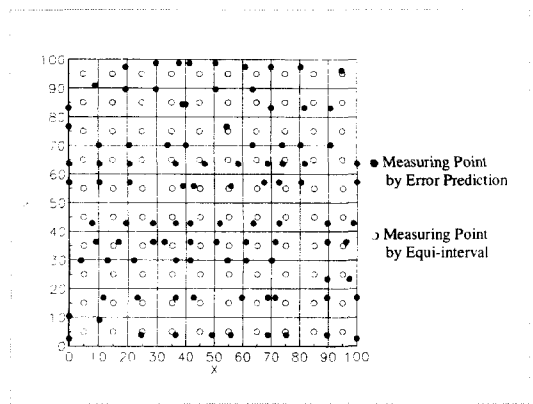


Fig. 9 Measuring points selection method based on cutting simulation.

4.1 가공오차의 예측에 의한 측정점 결정

일반적으로 측정점이 오차발생 가능성이 높은 부분에 위치하게 되면 보다 효율적으로 가공된 자유곡면에 대한 형상오차 판별이 가능해지며, 곡률이 큰 부분에 측정점을 주로 위치하여 효율적인 측정작업을 수행하는 방법에 대한 연구가 수행되었다^[1,9]. 본 연구에서는 가공표면의 시뮬레이션을 통하여 황삭 또는 정삭가공된 자유곡면의 오차를 예측하는 방법을 통하여 적절한 측정점의 위치를 선정하는 방법을 제시하여 이의 타당성을 검토하였다. Fig.7 과 8 에 본 연구에서 사용된 방법에 의한 가공표면의 오차예측 결과가 나타나 있으며, 이를 기초로 예측된 오차값이 큰 부분을 선정하면 일정한 측정점 수에 대해 효율적인 측정이 수행될 수 있다. 그러나, 측정점의 위치결정을 단순하게

최대 오차발생 부분에 집중시키는 방법은 대상 곡면 전체에 대한 일반성이 결여되어 만족스러운 결과를 얻지 못하는 현상이 발생할 수도 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 가능성을 최소화하기 위하여, 먼저 곡면을 주어진 측정점의 수로 분할하고, 각 분할된 영역에서 최대 가공오차가 예측된 곳을 측정점으로 결정하는 방법을 사용하였다. Fig.9에 이러한 방법을 사용하여 측정점의 위치를 선정한 결과를 나타내었다.

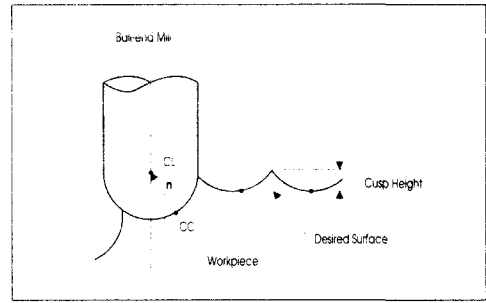
본 방법은 가공표면에 발생하는 cusp에 대한 고려를 하지 않았기 때문에, 황삭가공에 적용할 때 cusp에 의하여 실제로 목적하였던 측정결과가 영향을 받을 수 있으며, 따라서 상대적으로 cusp가 작게 형성되는 정삭가공의 경우에 효율적으로 사용될 수 있는 방법이라고 할 수 있다.

4.2 공구경로 데이터에 의한 측정점 결정

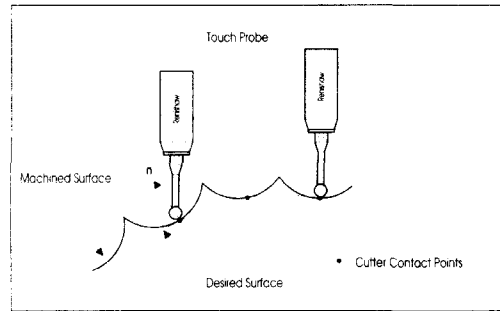
일반적으로 사용되는 등간격 측정방법으로 대상 자유곡면에 대한 가공 중 측정을 수행하면 Fig.2에 나타내 바와 같이 측정점의 위치가 가공시 발생한 cusp의 끝이나 밑부분에 불규칙하게 분포할 수 있으며, 이로 인한 측정오차의 발생 가능성이 있다. 이러한 현상은 상대적으로 cusp이 크게 생성되는 황삭가공 단계에서 발생할 가능성이 매우 높으며, 이에 대한 정확한 고찰 없이 측정작업을 수행하였을 경우에 그 측정결과에 대한 신뢰도를 저하시키는 요인이 될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 오차발생 요인을 제거하기 위하여 가공 데이터를 근거로 측정위치를 효율적 결정하는 방법을 제시하였다.

Fig.10(a)에 자유곡면에 대한 가공개요를 나타내었으며, 그림에 나타낸 바와 같이 ball-end cutter를 사용한 자유곡면의 가공시 주어진 공차범위를 만족시키는 범위 내에서 연속적으로 공구 접촉점이 결정되며, 많은 경우에 직선보간에 의하여 공구 접촉점 사이를 공구가 이동하여 절삭작업을 수행한다. 따라서, 이 때 결정된 공구 접촉점은 다른 오차요소가 없다고 가정하였을 때, 가공하고자 하는 곡면 상에 항상 존재하게 되기 때문에, 가공물의 형상오차 측정을 위해서는 실제 공구와 곡면이 접촉하는 가공점(CC-point)에 대한 고찰을 통하여 이에 대한 측정점 위치의 수정이 필요하다. Fig.10(b)는 실제 가공시에 공구와 공작물이 접촉하는 CC-point와 이러한 정보를 이용하여 수정된

측정점의 위치를 나타내고 있다.



(a) Cusp height on the machined surface



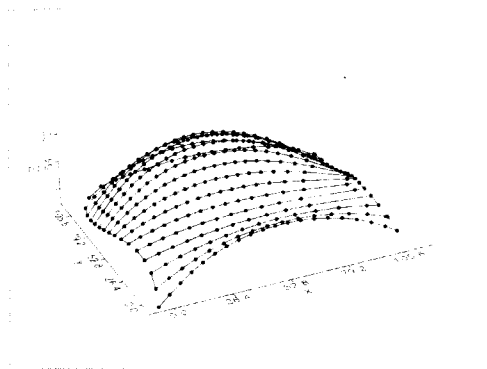
(b) Measuring point shifted to CC-point

Fig. 10 Correction of measuring points considering cusp height on the machined surface

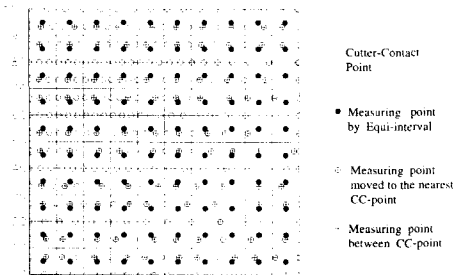
이러한 측정점의 위치 선정은 CAM 데이터베이스의 분석을 통하여 수행될 수 있으며, 기존의 등간격 방법에 비하여 cusp에 의한 측정오차를 상당히 줄일 수 있으며, 특히 황삭가공의 경우에, 후속되는 작업 수행 전에 가공면의 과도한 절삭 유무 및 가공상태를 판단하여 작업의 계속 진행 여부를 판단하고, 후속 절삭 공정의 수정여부를 판단할 수 있는 방법을 제시하기 때문에, 보다 효율적인 가공 및 측정작업을 수행할 수 있다. 또한 정삭가공의 경우에도 동일한 방법을 사용하여 cusp에 의한 측정오차를 감소시킬 수 있다.

Fig.11에 cusp에 의해 발생하는 측정오차를 감소시키기 위하여 측정점의 위치를 가공점으로 이동시킨 결과를 나타내었다. 그림(a)는 ball-end cutter를 사용하여 주어진 자유곡면을 황삭가공할 때의 가공점의 위치와 공구의 이동경로를 나타내

고 있으며, 그림(b)는 등간격 측정의 경우와 제시된 방법에 의하여 이동된 측정점의 위치를 보여주고 있다. 새로운 측정점의 위치는 등간격 측정점을 가장 근접한 위치에 있는 공구접촉점으로 이동하여 결정되었다. 그러나, 상대적으로 평탄한 부분에서는 등간격 측정점 부근에 공구접촉점이 존재하지 않을 수도 있으며, 이러한 경우 공구접촉점 사이를 연결하는 선분에 수직으로 만나는 점이 새로운 측정점으로 선정되었다.



(a) Tool path for ball-end cutter



(b) Measuring points

Fig. 11 Measuring points considering cusp height

5. 측정순서의 결정

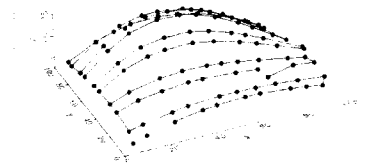
상기의 방법으로 측정점의 위치가 결정되면 측정시간의 단축을 위하여 측정경로를 결정하여야 한다. 실제로 측정대상이 자유곡면이며, 측정점의

위치 또한 효과적인 측정을 위하여 등간격 방식을 사용하지 않았기 때문에, 선정된 측정점에 대한 측정순서의 결정에 따라서 전체 측정에 소요되는 시간에 차이가 발생하게 된다^[13]. 본 연구에서는 측정시간을 최소화하기 위하여 TSP(Traveling Salesman Problem) 알고리즘^[10]을 적용하였다. 이때의 목적함수(objective function)는 다음과 같다.

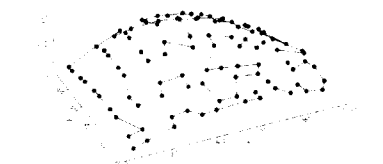
$$E = \sum_{i=1}^n \left[(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

여기에서 n 은 측정점의 총갯수이며, (x_i, y_i, z_i) 는 각 측정점의 좌표, E 는 프로브가 움직인 전체 거리를 나타내며, E 를 최소화하는 측정점의 순서를 결정하면 자유곡면에 대한 측정시간을 최소화하는 측정경로를 결정할 수 있다.

Fig.12에 결정된 측정순서의 한 예를 나타내었으며, 일반적인 방법과 비교한 결과가 Table I에 나타나 있다. 표에서 보는 바와 같이 TSP 방법을 적용하였을 때, 기존의 방법에 비하여 프로브의 평균 이동거리가 상당히 감소한 것을 알 수 있다.



(a) Conventional method



(b) TSP method

Fig. 12 Probe path generation using TSP method.

Table 1 Result of the probe path generation method

Probe path generation	Average moving distance
Conventional method	11.32mm
TSP method	9.79mm

6. 실험 및 결과분석

본 연구에서 제안된 측정점 선정 방법의 효율성을 검토하기 위하여 동일한 자유곡면을 현대정공의 HiMac-V100 수직형 머시닝 센터를 이용하여 알루미늄 시편 (100×100×100)을 가공하였으며, 공구반경 10mm 인 ball-end cutter 를 사용하여 스피들 회전수 1000 rpm, 이송속도 100 mm/min 의 절삭조건으로 황삭가공과 정삭가공을 수행하였다. 가공직후 stylus 길이 50mm, probe 직경 1mm 인 Renishaw 프로브(MP10)를 이용하여 앞에서 제시한 방법으로 100 개의 측정점을 측정하여 이의 평균 오차를 계산하였다.

Fig.13 은 황삭가공과 정삭가공 직후에 OMM 에 의한 측정장면을 보여주고 있으며, 제시된 방법에 의하여 측정된 오차결과를 Table II 에 나타내었다. 이때, 다른 오차요소들이 고려되지 않았으므로 표에 나타난 오차값은 가공표면에 발생된 cusp 과 가공오차에 의한 자유곡면의 형상오차로 생각될 수 있으며, 본 연구에서 제시된 두 가지 측정점 선정방법의 타당성을 보여주고 있다.

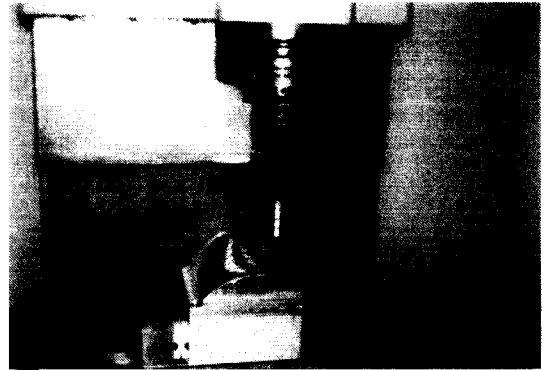
Table 2 Calculated errors using proposed methods

(a) Measured error after rough cut

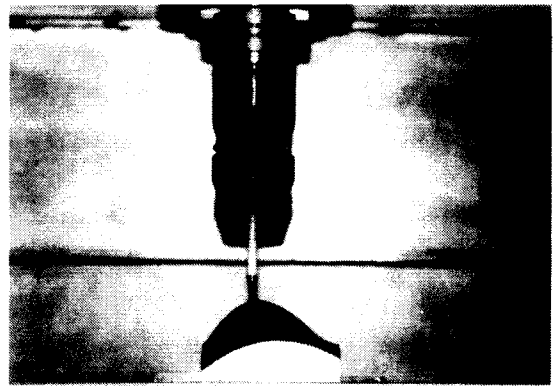
측정방법	RMS error(mm)
등간격 측정	0.185
CC-point 로 이동	0.091

(b) Measured error after finish cut

측정방법	RMS Error(mm)
등간격 측정	0.096
CC-point 로 이동	0.095
오차예측에 의한 측정	0.126



(a) Measuring process after rough cut



(b) Measurement after Finish Cut

Fig. 13 Measuring processes using Renishaw touch probe on the CNC machining center table

7. 결론

본 연구에서는, 기존의 CAD/CAI 데이터 베이스의 통합에 기초한 방법에 가공에 관련된 정보를 가지고 있는 CAM 데이터 베이스를 함께 고려하여 자유곡면의 OMM 시 효과적인 측정계획을 수립하는 방법을 제시하였으며, 실험을 통하여 제시된 방법의 효율성을 검토하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 측정점을 공구접촉점으로 이동하여 자유곡면의 OMM 시 cusp 에 의한 측정오차를 감소시키는 방법을 제안하였으며, 이는 특히 황삭가공의 경우에 효과적으로 사용될 수 있다.

- (2) 가공표면의 오차예측 방법을 통해 최대 오차 발생 가능성이 높은 부분에 측정점을 위치하여, 기존의 등간격 측정방법 보다 효율적으로 측정작업을 수행할 수 있는 방법을 제안하였으며, 이는 정삭가공의 경우나 가공이 완료된 자유곡면의 경우에 효과적이다.
- (3) 제안된 방법의 검증을 위하여 동일한 측정점 수를 갖는 경우에 대하여 실험을 수행하였으며, 그 결과를 비교하였다.
- (4) 측정점의 위치가 결정된 후, 이의 적절한 순서 결정에 의하여 측정시간을 최소화 하기 위하여 TSP(Traveling Salesman Problem) 알고리즘이 적용되었으며, 일련의 실험을 통하여 제시된 방법의 효용성을 검토하였다.

후기

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단의 연구비(KRF-98-003-E00103)에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Cho, M.W. and Kim, K., "New Inspection Planning Strategy for Sculptured Surfaces Using Coordinate Measuring Machine," International Journal of Production Research, Vol. 33, No. 2, pp. 427-444, 1995.
2. Drysdale, R.L., Jerard, R.B. and Schaudt, B., "Discrete Simulation of NC Machining," Algorithmica, Vol. 4., No. 1, pp. 30-33, 1989.
3. Duffie, N., Bollinger, J., Piper, R. and Kroneberg, M., "CAD Directed Inspection and Error Analysis Using Patch Databases," Annals of the CIRP, Vol. 33/1, pp. 347-350, 1984.
4. Jerard, R.B. and Drysdale, R.L., "Geometric Simulation of NC Machining," Pro. of the ASME International Computers in Engineering Conference, Vol. 2, pp. 129-136, 1988.
5. Jerard, R.B. and Drysdale, R.L., "Methods for Detecting Errors in Numerically Controlled Machining of Sculptured Surfaces," IEEE Computer

- Graphics & Applications, pp. 26-39, 1989.
6. Kim, K.I., Integrated Computer Aided Manufacturing System for Sculptured Surfaces, Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Chicago, 1993.
7. Menq, C.H., Yau, H.T., Lai, G.Y. and Miller, R.A., "Statistical Evaluation of Form Tolerances using Discrete Measurement Data," 1990 ASME Winter Annual Meeting, ASME, PED, Vol.47, pp.135-149, 1990.
8. Menq, C.H., Yau, H.T. and Lai, G.Y., "Automated Precision Measurement of Surface Profile in CAD Directed Inspection," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 2, 1992.
9. Pahk, H.J, Kim, Y.H, Hong, Y.S. and Kim, S.G. Kim, "Development of Computer-Aided Inspection System with CMM for Integrated Mold Manufacturing," Annals of the CIRP, Vol. 42/1, pp. 557-560, 1993.
10. Press, W.H., Numerical Recipes in C, Cambridge, 1992.
11. 남우선, 정성중, "3 차원 자유곡면 온더머신 측정 및 검사 시스템의 개발," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집 (II), pp. 911-914, 1997.
12. 박희재, 안우정, 김왕도, "CAD/CAI 통합에 기초한 박형 단면을 가지는 항공기 터빈 블레이드의 정밀측정기술 개발," 대한기계학회논문집, 제 20 권, 제 6 호, pp. 1743-1752, 1996.
13. 조명우, 이승중, 김문기, "3 차원 측정기를 이용한 자유곡면 측정 시 최적의 경로결정에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 12 권, 제 10 호, pp. 121-129, 1995.