

PC-NC 를 위한 기상측정 모듈 개발

윤길상[#], 권양훈^{*}, 정석우^{*}, 조명우^{**}

Development of OMM Module for PC-NC System

Gil-Sang Yoon[#], Yang-Hoon Kwon^{*}, Suk-Woo Jeong^{*}, Myeong-Woo Cho^{**}

ABSTRACT

The purpose of this paper is to establish an effective inspection system by using OMM (On-Machine Measurement) system based PC-NC. This system can reduce manufacturing lead time because part is inspected each process. Inspection process planning is accomplished by determining the number of measuring points, their location, measuring path using fuzzy logic, Hammersley method, traveling salesperson problem. Inspection with contacted sensor improve quality as inspection feature is developed to based machining feature. This method is tested by simulation and experiment, then analyzed measuring data and geometry tolerance

Key Words : OMM(기상측정, On-Machine Measurement), CMM(3 차원 좌표측정기), Tolerance(공차)

1. 서론

일반적인 기계가공은 CAD/CAM 소프트웨어를 사용하여 모델링 작업을 수행한 후, 생성한 형상 데이터를 이용하여 황삭과 정삭 등 다양한 형태의 공구경로를 결정한다. 이 공구경로로 가공을 수행하여 원하는 가공품을 만드는 일련의 과정을 거치게 된다. 추후, 완성된 제품은 접촉식 장비나 비접촉식 측정장비를 이용하여 제품의 정밀도를 판정하게 되는데, 이때 오차는 측정기에서 발생하는 오차도 있지만 대부분 기계가공에서 발생하는 오차이다. 또한 기존의 가공-측정의 오프라인(Off-Line) 방식으로는 현재의 현재 가공 공정이 공차 범위를 만족하고 있는지 확인 할 방법이 없다. 이는 측정 공정이 가공이 완료된 후 수행되기 때문이다. 만약, 가공 중에 운영자에게 가공정도에 관한 정보를 제시할 수 있다면, 오차의 진척에 따라

후속 공정의 수행 여부를 결정할 수 있기 때문에 시간과 경제적인 손실을 줄일 수 있으며, 공정과 공정 중간에 작업자가 오차에 대하여 능동적으로 대처할 수 있다. 일반적으로 사용되는 접촉식 장비인 3 차원 측정기(CMM, Coordinate Measuring machine)는 우수한 정밀도를 보유하고 있지만, 생산 공정 중간에 측정 작업을 수행하기에는 불가능하며, 측정시간이 많이 소요된다. 그리고 대상물을 가공기에서 측정기로 이동해야 하기 때문에 좌표계의 변화에 따른 오차를 고려해야만 한다. 이에 반하여 기상측정은 공작기계 상에서 측정을 수행하기 때문에 기계가공 중간에 측정을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 기상측정의 장점을 이용하여 작업자가 비교적 간단한 조작으로 기계가공 공정간에 측정을 수행할 수 있는 기상측정 운영시스템을 개발 하였다. 기상측정에 관한 연구로 Cho 는 CAD 데이터에 기초한 측정 조건을

[#] 접수일: 2002 년 8 월 8 일; 게재승인일: 2003 년 7 월 11 일
[#] 교신저자: 인하대학교 기계공학과 대학원
 Email: g2001060@inhavision.inha.ac.kr, Tel: (032) 860-7306
^{*} 인하대학교 기계공학과 대학원
^{**} 인하대학교 기계공학부

효과적으로 도출하기 위하여 CAD/CAM/CAI 통합에 기초한 측정기술에 관해 제시하였다.^{1,2} 공작기계 의 기하학적 오차, 열변형 오차 모델링에 관한 연구가 활발히 이루어 지고 있다.^{3,4,5} 금형제작을 비롯한 기계가공이 적용되는 현장에서는 가공기에서 측정할 수 있는 기상측정(OMM, On-Machine Measurement)의 필요성을 지속적으로 요구하고 있다. 이에 차세대 수치제어 시스템인 PC-NC(Personal Computer based Numerical Control)에 기상측정을 운영할 수 있는 시스템을 제작하였다. PC-NC 는 기존의 공작기계와는 달리 CAD/CAM S/W 의 내장이 가능하기 때문에, 현재 공작기계에서 On-Line 으로 운용할 수 있는 S/W 와 모듈이 개발 되고 있다. 본 연구에서는 (주)현대자동차에서 개발한 PC-NC 운영 시스템의 하나인 대화형 CAM 프로그램(Dialog Program, DPROM)과 인터페이스를 통하여 공작기계에서 모의 가공을 수행과 동시에 측정을 병행할 수 있는 시스템을 구축하였으며, 기존의 설계 데이터(CAD feature)는 측정을 수행하기 위해서는 수정이 불가피하지만, 측정 형상 분류를 통하여 CAD/CAM/CAI 연계시스템을 구축하였다. 개발한 시스템은 시뮬레이션과 실험을 이를 검증하였다.

2. 운영 S/W & 기상측정 모듈 결합

PC-NC(Personal Computer based Numerical Control)는 PC 를 이용하여 공작기계를 일괄 제어하는 장치로 저장능력, 네트워크 면에서 기존 공작기계에 비해 향상되었고, CAD/CAM S/W 를 내장 할 수 있기 때문에 공작기계에서 3 차원 모의가공과 가공을 실행할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 사용한 내장형 프로그램 DPROM 는 일반형상을 모델링 할 수 있으며, 가공 경로와 G-code 를 생성과 모의가공(simulation)이 가능한 CAD/CAM S/W 이다. 기상측정 모듈은 DPROM 의 파일 처리 모듈(AFFA, Advanced Fast File Access)과 연계하여 가공과 측정을 하나의 시스템에서 수행할 수 있도록 연계시스템을 구현하였다. Fig. 1 는 DPROM 과 OMM Module 의 상호 연계 구조를 나타낸 것이며, CAD 형상정보와 CAM 가공정보를 기상측정 모듈에서 정보를 공유할 수 있도록 인터페이스 하였다. Fig. 2 는 DPROM 에서의 기상측정 모듈의 사용자 인터페이스 부분을 나타내고 있으며, 각 형상에

대한 가공과 측정을 선택할 수 있다. 기상측정 시스템에 대한 구조를 Fig. 3 에 도시하였으며, CAD/CAM 형상정보를 고려한 자동측정을 수행할 수 있고, 기상측정에 필요한 코드 생성과 모의 측정작업을 할 수 있다. 개발된 프로그램은 기존의 시스템에 적용 가능하도록 형상정보 공유를 제외한 다른 기능들은 독립적인 형태로 개발하였다.

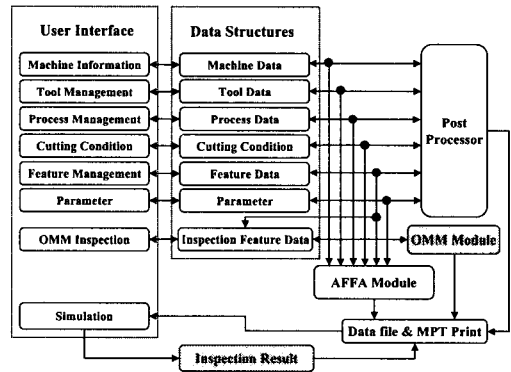


Fig. 1 Structure of In/Out data in DPROM & OMM module

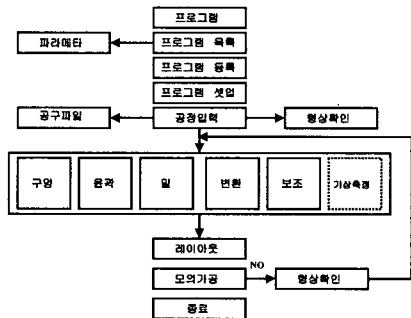


Fig. 2 User interface OMM Module in DPROM

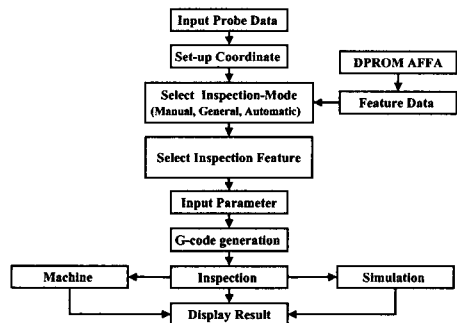


Fig. 3 Structure of OMM Module

3. 기상측정 모듈

기존의 기상측정은 공작기계에서 직접 프로그램을 작성하는 방법과 CAD 데이터를 이용하여 측정 영역에 측정점을 분포시켜 작업을 수행하였다. 본 연구에서는 형상정보를 이용하여 측정에 적합하게 형상(surface feature)을 분류하고, 분류된 형상에 대해 측정 변수를 결정하였다. 상 Fig. 5 와 같은 형상을 측정할 경우, Fig. 4 처럼 CAD/CAM 형상의 기하 정보를 기상측정 모듈에서 인식하여 각 형상을 측정형상으로 분류한 후 수동모드(Manual Mode), 일반모드(General Mode), 자동모드(Automatic Mode) 세가지 모드를 이용하여 대상물을 측정할 수 있다. 수동모드는 측정하고자 하는 위치 정보를 직접 입력하여 측정하는 모드로, 입력변수는 측정하는 위치 정보(P_2)와 프로브의 후퇴 위치(P_1)이다.(Fig.5(a)) 일반모드는 해석적 곡면의 특징형상 (feature based surface) 적합한 모드로 대상물의 형상 특징을 이용하여 측정하는 방식이다. 입력변수는 측정할 단면의 수(NP)와 각 단면에 대한 측정점의 수이다(Fig. 5(b)).^{6,7,8} 자동모드는 CAD/CAM 형상 정보를 측정 형상분류를 이용하여 측정을 수행한다(Fig. 5(c)). 입력변수는 공작기계의 정밀도, 유도할 측정 정밀도이다. 위의 측정모드는 프로브의 정보, 안전거리에 관한 정보를 입력할 수 있다. Fig. 6 은 자동모드의 측정변수(측정점 수, 위치, 경로) 결정에 이용되는 알고리즘을 도시한 것이다. 측정점의 수의 결정은 Fuzzy 알고리즘을 이용하였으며, 측정점의 위치 선정은 Hammersley 를, 프로브의 이동경로 결정은 2-3 유도점(guide points)과 TSP(Traveling Salesperson Problem)를 이용하여 결정하였다. 수동, 일반모드는 측정에 필요한 측정 변수를 사용자가 입력하기 때문에 위의 알고리즘을 적용하지 않고 측정을 수행하였다.

3.1 퍼지논리(Fuzzy Logic)를 이용한 측정점 수 결정

대상물을 측정하기 위해서는 단일 형상(2D surface feature)에 측정점을 분포시키는 작업을 수행하게 되는데, 먼저 측정점의 수를 결정한다. 측정점의 수는 다른 측정 변수에 비해 측정 정밀도에 미치는 영향이 가장 크다고 할 수 있다.

일반적으로, 다양한 측정 대상에 대해 측정점

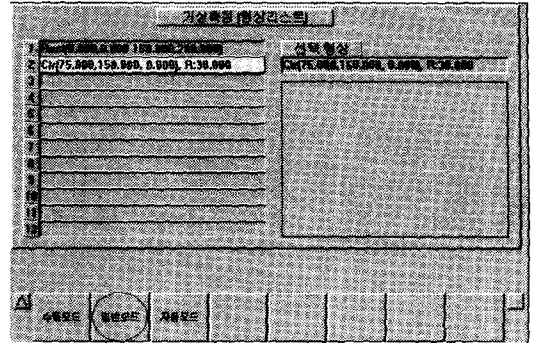


Fig. 4 Selection of inspection mode in OMM Module

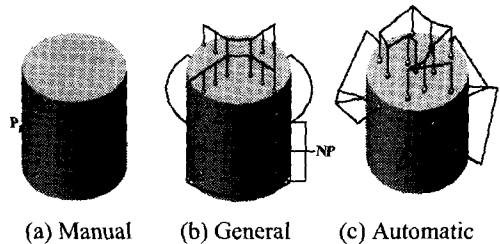


Fig. 5 Distribution of measuring point each mode

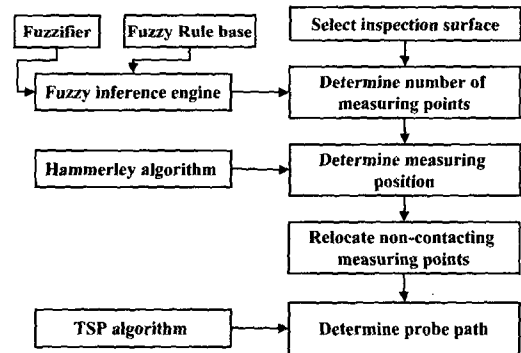


Fig. 6 Procedures of inspection planning

수, 측정시간을 단축시키기 위하여 직선의 경우 3~5 점, 평면 4~9 점, 원 4~7, 구 5~9, 실린더 6~12, 원추 7~12 점 정도를 측정하고 있으나, 이런 측정점 수의 결정은 단순히 대상물에 대해 측정 형상을 정의 할 수 있는 최소 측정점의 수를 고려한 것으로 대상물의 크기나 정밀도에 관한 정보를 배제한 측정점의 수이다. 그러므로 기하공차(geometry tolerance)를 평가할 때나 측정 결과의 신뢰성이 부족하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 측정 형상

의 크기와 측정에 사용될 공작기계의 정밀도에 관한 정보를 측정점 수를 결정하는 요소로 추가 하였다. Fig. 7은 퍼지 논리를 이용하여 측정점의 수를 결정하는 알고리즘을 도시화 한 것이다. 퍼지 논리를 이용하여 유도되는 최소 측정점의 수는 기하 공차를 평가할 수 있는 측정점 수와 일치하며, 최대 측정점의 수는 입력 가능하다. 입력 변수는 측정할 면의 면적, 측정결과를 유도할 공차의 정밀도, 공작기계의 정밀도이다.⁹ 입력되는 변수의 값에 의해 측정점은 능동적으로 변화하게 된다.

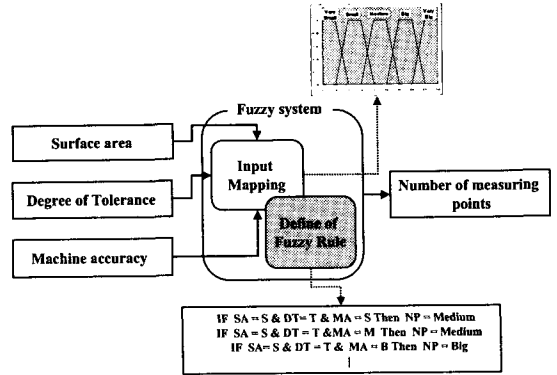


Fig. 7 Fuzzy logic structure

3.2 Hammersley 를 이용한 측정점 위치 결정

기상측정 모듈에 적용되고 있는 측정점의 위치 결정은 기존에 사용되고 있는 임의 격자형 측 위치 방법과 Hammersley 위치 결정을 모두 사 하였다. 임의 격자형은 일반적으로 사용되는 등 간격 격자형(equi-grid mesh)을 이용한 측정 방법으로, x-, y- 방향으로 일정한 간격을 나누어, 대상물에 적용하면 대상물의 영역에 일정한 격자형대가 생성되는데 서로가 만나는 지점을 측정할 위치로 결정하는 방법이다. 이 측정방법은 일반모드에 적용하였다. Hammersley 를 이용한 측정점 위치 결정 방법은 대상물을 Hammersley 좌표계인 (s, t) 축으로 만들고, 2 차원 면이 사각형이면 직교 좌표계로, 원형이면 극 좌표계로 사용하며, 형상에 대한 적용 함수는 Table 1 과 같다. 여기서 s, t 의 값은 0 보다 크고 1 보다 크지 않다. 자동모드에 적용한 위치결정 방법으로 측정점의 수가 10 개인 경우 측정점의 위치를 Fig. 8 에 도시하였다.

Table 1 Hammersley's function for various feature

Rectangular	$s_i = \frac{i}{N}, t_i = \sum_{j=0}^{k-1} \left(\left\lfloor \frac{i}{2^j} \right\rfloor \text{Mod} 2 \right) \times 2^{-j-1}$
Circular	$s_i' = t_i \times R, t_i' = s_i \times 360^\circ$
Cone	$s_i' = t_i \times R, t_i' = s_i \times 360, w_i' = -s_i \times h$
Hemisphere	$s_i' = \sqrt{R^2 - (-R - w_i')^2} = \sqrt{1^2 - (1 - t_i)^2} \times R$ $t_i' = s_i \times 360, w_i' = -t_i \times R$

3.3 TSP(Traveling Salesperson Problem)를 이용한 측정경로 결정

기상측정의 프로브의 경로는 적절한 유도점들 (guide points)의 생성과 측정점들의 측정 순서를 결정하여 데 있어 최단 거리를 만족시키는 두 가지의 조건을 충족시켜야 한다.¹⁰ 유도점은 측정 오차(measuring error)를 최소화하고 프로브의 충돌을 피하려는 기능을 가지고 있으며, 측정점의 측정 순서를 결정하는 것은 측정시간을 최소화하는데 그 목적이 있다. 일반적으로 측정 유도점의 수는 2, 3 개이다. 이는 측정오차를 최소화하기 위하여 법선방향(normal direction)으로 프로브가 움직이도록 하기 위해서이다. 충돌을 고려하면 3 개의 유도

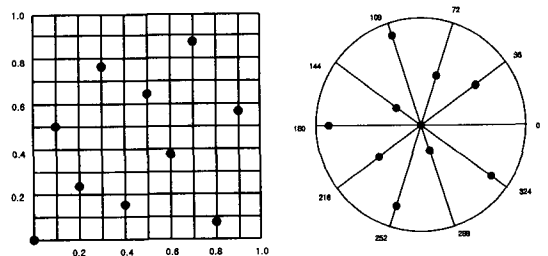


Fig. 8 Distribution of ten Hammersley points on rectangular and circular surface

점(three guide points)을 이용하는 것이 유리하나, 시간을 고려할 경우 2 개의 유도점(two guide points)을 적용하는 것이 이롭다. 본 연구에서는 2 개의 유도점을 이용하여 프로브의 진입방향을 결정하였다(Fig. (a)). 외부의 유도점(Pi)과 내부의 유도점(Pt)이 그것이다.

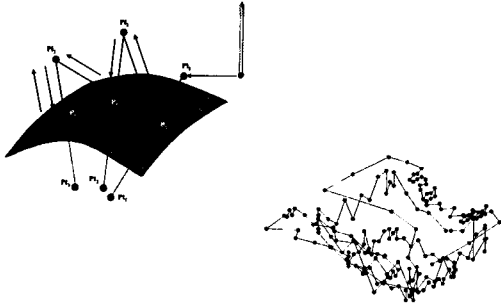


Fig. 9 Probe path determination (a) Probe path using two guide points, (b) Measuring sequence by minimum distance calculation)

여기에서 Δg 측정점과 유도점 사이의 거리이다. 그리고 측정점의 측정 순서 결정은 전체 측정 시간을 줄이기 위해 TSP(traveling salesperson problem) 알고리즘을 적용하였다(Fig. 9(b)). 목적 함수(objective function)는 다음과 같다.

$$E = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2} \quad (3)$$

(n : Number of measuring points)

여기에서 n 은 측정점의 총 개수이며, (x_i, y_i, z_i) 는 측정점의 좌표, E 는 전체 움직인 거리를 나타내며, E 를 최소화 하는 측정점의 순서를 결정하면 프로브의 측정 순서를 얻을 수 있다.

4. 측정 형상(Inspection Feature)

4.1 측정형상분류

측정형상은 일반적으로 CAD 데이터의 형상 정보를 이용하거나, 가공 단계에서 분류할 수 있는 특징 형상을 이용하여 측정에 적용하는 경우가 일반적으로 사용되고 있다.^{11,12,13} 그러나 측정을 수행할 때 위와 같이 분류된 형상을 접촉식 측정 장비인 CMM 나 기상측정에 적용하는 것은 점 단위로 측정하여 위치오차를 판별하는 것 이외에는 형상에 위한 측정방법은 아직 제시되고 있지 않다. CAD/CAM 의 단일 형상이라도 세부적으로 측정하기 위해서는 면(surface) 정보로 더 분류된다. 만약 면 정보로 분류되지 않은 경우 접촉식의 특성상 측정하지 못하는 방향이 있고, 측정할 수 없는 영역이 존재하기 때문에 이에 대한 대처방법이 용이하지 않다. 그래서 본 연구에서는 측정 형상을 Fig. 10 처럼 분류하여 체계화 하였다. 대상물은 먼저 해석 곡면(analytic geometries)과 자유 곡면(free-form geometries)으로 분류되며, 해석 곡면은 더 이상 분류되지 않은 상태의 단일 곡면(single surface) 상태로 존재하게 된다. 즉, 일반적인 특징 형상들은 몇 개의 단일 곡면들로 구성할 수도 있으며, 분류될 수도 있다. 단일 곡면을 측정할 경우 6 가지 기하공차를, 2 개 이상의 단일 곡면을 측정할 경우 서로 상관 관계에의 존재하는 기하공차 4 개중에 해당되는 측정결과를 얻을 수 있다.

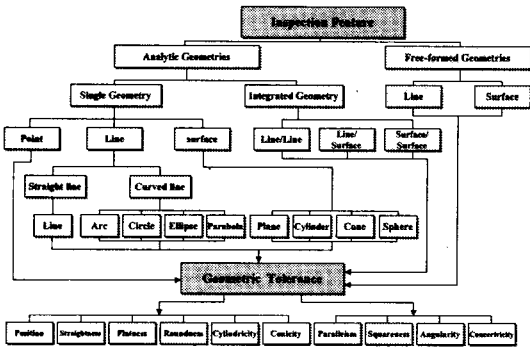


Fig. 10 Geometric feature classification for inspection

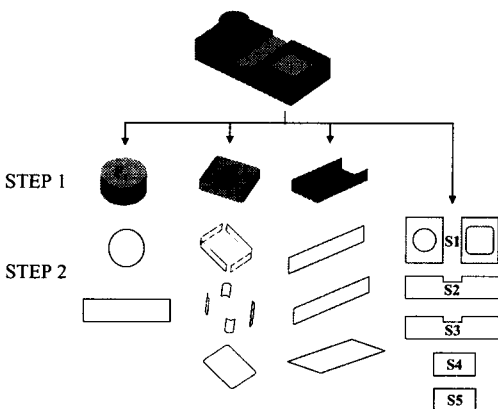


Fig. 11 Feature classification for part

$$P_{T_i}(x, y, z) = P_i - \Delta g \cdot N_i(x, y, z) \quad (1)$$

$$P_{B_i}(x, y, z) = P_i + \Delta g \cdot N_i(x, y, z) \quad (2)$$

4.2 형상분류법을 이용한 기상측정

자동모드에서 적용되는 형상 분류에 의한 측정점의 결정 과정을 실제적으로 보여주기 위해 대상물을 선정하였고, 이 시편은 이후 실제 측정 작업을 수행했던 대상물과 일치한다. 시편에 대하여 형상분류 작업을 수행한 결과는 Fig. 11 과 같다. STEP 1 는 가공 형상(machining feature)분류에 의해 분류된 형상이다. 즉, Island 1(F₁), Pocket 1(F₂), Slot 1(F₃)개의 특징형상으로 구성되어 있다. 대상물을 다시 측정 형상(inspection feature)으로 분류한 과정이 STEP 2 이다. S₁~S₅는 프로브의 접근 방향에 의해 결정되며, 가공 형상 분류 방법으로는 존재하지 않은 형상이며, 기계 가공한 후 대상물에 필연적으로 남는 형상이다. 그러나 이 면들은 측정 작업을 수행할 때는 반드시 필요한 면이다. 분류된 가공 형상 중에서 F₂(feature 2)을 측정 형상 분류에 의해 분류된 측정형상을 도시한 것이 Fig. 12 이다. F₂는 9 개의 측정형상 즉, Side Plane 2(4 개), Side Quarter Cylinder 2(4 개), Bottom Plane 2(1 개)의 단일 측정 곡면을 가지고 있으며, 각 단일 곡면을 기상 측정 알고리즘에 적용하여 측정점의 수와 위치를 결정하면, 하나의 특징 형상에 대한 측정점의 결정이 완료된다. Fig.13 는 F₂의 대표적인 단일 곡면에 대해 Fuzzy 와 Hammersley method 를 적용한 후 측정점을 결정한 것이다. Fig.14 은 F₂의 특징 형상에 본 측정점의 수와 위치 그리고 경로를 모두 결정한 것이다. SP_{2a}, SP_{2b}, SC_{2a}, BP_{2a}는 각각 7,7,5,7 개로 정의 되어서 F₂의 전체 측정점은 26 개이다.

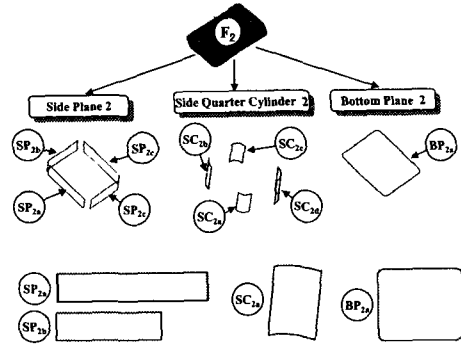


Fig. 12 Inspection feature classification for F₂ (Feature 2)

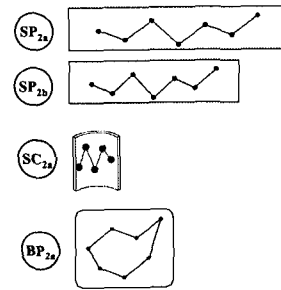


Fig. 13 Distribution of inspection points for Typical Feature of F₂ (Feature 2)

4.3 Non-contact point 의 결정

가공 형상(machining feature) F₁, F₃는 위의 F₂를 결정하는 방법과 동일한 방법을 적용하여 형상에 대한 측정점을 결정하면 되지만, S₁~S₅는 Hammersley 방법을 적용하면 Fig. 15 (a)와 같이 접촉하지 않은 점(non-contact points)들이 발생한다. 대부분의 S 그룹은 접촉하지 않은 점들이 발생하였다. 이런 경우에 접촉하지 않은 점들에 대한 위치 결정을 다시 하게 되는 데, 본 연구에서는 접촉하지 않은 측정점을 가지고 있는 측정형상에 대해 사각형 분할영역(rectangle mesh)을 만들어 측정점의 위치를 다시 결정하였다. Fig. 16 는 S₁를 분할한 것을 나타내고 있다. 위치를 결정하는 방법은

(F₂) Inspection planning

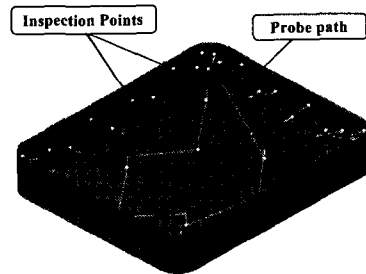


Fig. 14 Distribution of inspection points for F₂ (Feature 2)

먼저, 각 분할영역에서 측정점의 존재여부를 검출하고, 측정점이 존재하지 않은 영역에서 영역 면적이 큰 순서부터 하나씩 접촉하지 않은 점의 수만큼 중심에 측정점을 다시 위치 시키는 방법이다. 만약 접촉하지 않은 점의 수가 분할 영역보다 많다면, 각 분할영역에 있는 측정점을 이용하여

분할 곡면을 다시 생성하여 면적의 크기 순으로 다시 위치시키면 된다. 또한 곡면과 사각 영역 사이에 존재하는 영역은 분할하여 만들어진 최소 영역의 2/3 이상의 면적이면 측정점을 분포시킬 수 있으나, 그렇지 않다면 측정점을 분포시킬 수 없다. 실제 S_1 는 접촉하지 않은 측정점은 3 개였으며, 측정점이 존재하지 않은 분할영역 중에서 M_{1a1} , M_{1b2} , M_{1a3} 순으로 면적이 크다. 면적이 큰 영역부터 측정점의 위치를 재결정하였고 결과는 Fig. 15 (b)와 같다.^{13,14}

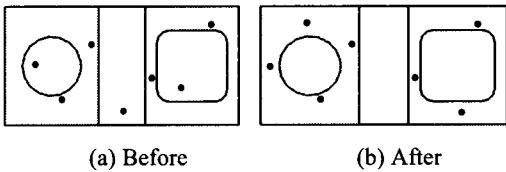


Fig. 15 Relocation of non-contacting measuring points for S_1

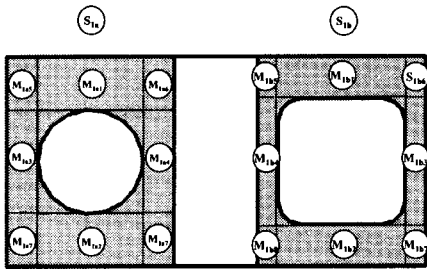


Fig. 16 Rectangular mesh generation

5. Simulation & 실험

본 제시한 측정방법은 Visual C++ 6.0 을 이용하여 기상측정 프로그램 제작하였으며, 이를 PC-NC의 대화형 프로그램인 DPROM 에 탑재하여 모의 가공 및 측정을 실행하였다. 개발한 기상측정 모듈을 테스트하기 위해 시편을 설계 및 모의 가공을 수행하였다(Fig. 17). 제작한 시편의 재료는 MC (methylene chloride)이며, 실제 가공물은 CNC M/C (V100, HYUNDAI)에서 가공하여, 기상측정 작업을 수행하였다(Fig. 18). 위에서 제시한 방법을 적용해 측정작업을 수행한 결과 측정점의 수는 60 개로 결정되었으며, 측정소요 시간은 10 분 50 초가 소요되었다. 측정계획에 의거한 측정위치와 프로브의 이동경로는 Fig. 19 에 도시하였다. 가공한 대상

물을 측정하여 기하공차(geometry tolerance)를 해석한 결과는 Table 2, Table 3 와 같다. Table 2 는 각 측정 곡면에 대한 위치(position tolerance)를 나타낸 것으로 F_2 한 측면부(SC_{1a})가 가공 상태가 가장 좋지 않으며, Island(cylinder)의 위 부분(TC_{1a})이 가장 가공이 좋은 상태로 평가 되었다. Table 3 은 각 곡면이 지니고 있는 그 외의 기하공차 평가 결과를 나타낸 것이다. 측정모드를 수행할 경우 공작기계의 정밀도를 입력변수로 가지고 있다. 이는 기상측정의 정밀도를 향상시키기 위한 것으로 본 연구에서는 레이저(laser interferometer)를 이용하여 공작기계의 기하학적 오차를 측정하여 본 시스템에 적용하였고, 프로브의 접촉에 의해 발생하는 pre-traveling 오차를 실험을 통하여 오차를 구하여 측정결과에 보정하였다.¹⁵⁻¹⁹

6. 결론

공작기계를 이용한 기상측정은 CMM 에 비해 대상물을 가공기에서 이동하지 않기 때문에 측정 작업을 기계가공 공정 중간에 수행할 수 있어서, 각 공정마다 가공 정도를 판정할 수 있다. 이런 면에서 작업자가 능동적으로 대처할 수 있어 생산공정에 적용이 가능하다. 본 연구는 해석적인 곡면(analytic geometry)들로 구성된 대상물에 대해 효과적으로 기상측정을 수행할 수는 방법을 제시하였으며 본 연구의 결론은 다음과 같다.

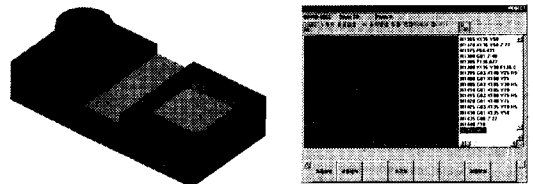


Fig. 17 Part drawing and simulation

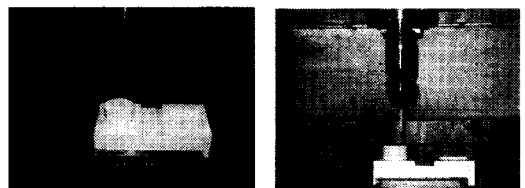


Fig. 18 Manufacturing & Inspection using OMM system

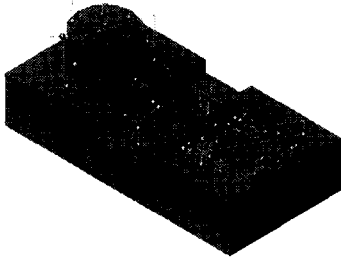


Fig. 19 Distribution of measuring points for Part

Table 2 Inspection result (position error, mm)

	Min	Max	Tolerance
S ₁	-0.0851	0.0669	0.1520
TC _{1a}	-0.0038	0.0034	0.0072
SC _{1a}	-0.0766	0.0763	0.1529
SP _{2a}	-0.0450	0.0784	0.1234
SP _{2b}	-0.0132	0.0422	0.0554
SP _{2c}	-0.0450	0.0718	0.1268
SP _{2d}	-0.0131	0.0462	0.0593
SC _{2a}	-0.0685	0.0547	0.1232
SC _{2b}	-0.0589	0.0623	0.1212
SC _{2c}	-0.0653	0.0537	0.1190
SC _{2d}	-0.0583	0.0610	0.1193
BP _{2a}	-0.0143	0.0290	0.0433
SP _{3a}	-0.0113	0.0246	0.0359
SP _{3b}	-0.0114	0.0259	0.0373
BP _{3a}	-0.0351	0.0368	0.0719

Table 3 Geometry Tolerance(mm, rad)

	Flatness	Roundness	Cylindricity
S ₁	0.0561		
TC _{1a}	0.0031		
SC _{1a}		0.0437	0.0438
SP _{2a}	0.0489		
SP _{2b}	0.0250		
SP _{2c}	0.0456		
SP _{2d}	0.0274		
SC _{2a}			0.0105
SC _{2b}			0.0201
SC _{2c}			0.0153
SC _{2d}			0.0198
BP _{2a}	0.0158		
SP _{3a}	0.0155		
SP _{3b}	0.0163		
BP _{3a}	0.0125		

- (1) CAD/CAM 형상 (feature)에 대해 측정형상을 체계적으로 분류하였다.
- (2) 분류된 측정 형상을 이용하여 기상측정을 보다 효율적으로 수행하였다.
- (3) 측정변수(측정점 수, 위치, 경로)를 각 결정 알고리즘을 이용하여 측정형상에 대해 자율적으로 결정하였다.
- (4) PC-NC 공작기계의 운용시스템(DPROM)과 기상측정 모듈을 연계하였다.
- (5) 기상측정 운용 모듈을 개발하였다.

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. Cho, M. W., Kim, J. S., Seo, T. I., Cho, J. H., "On-Machine Measurement of Sculptured Surface Based on CAD/CAM/CAI Integration: II. Inspection Planning Strategy," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 109-118, 1999.
3. Cho, M. W., Lee, S. H., Seo, T. I., "On-Machine Measurement of Sculptured Surface Based on CAD/CAM/CAI Integration: I. Measurement Error Modeling," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 109-118, 1999.
4. Lee, S. W., Park, H. J., Chu, C. N., "Development of Computer Aided Measurement and Compensation system for Linear Pitch Error Correction in CNC Machine Tools Implementing a New Optimal Correction Algorithm," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 1, 1998.
5. Chung, S. C., "CAD/CAM Integration of On-The-Machine Measuring and Inspection System for Free-formed Surfaces," Proceedings of American Society for Precision Engineering, No. 20, pp. 267-270, 1999.
6. Shah, J. J., Mäntylä, M. and Nau, D. D., "Advances in Feature - Based Manufacturing," Amsterdam,

- Netherlands, Elsevier Science B.V.,1994.
7. Lee, K. I., Lee, H., Noh, S. D., Shim, Y. B., Cho, H. S., "A Process Planning System Using Group Technology and Rule-base," IE Interfaces, Korean Institute of Industrial Engineers, Vol. 8, No. 3, pp. 221-230, 1995.
 8. Lee, S. Y., "A Study on the Development of Feature Inspection System in OMM," Master's Thesis, 2001.
 9. Ming Chang, Paul P. Lin, "On-Line Free Form Surface Measurement via a Fuzzy-Logic Controlled Scanning Probe," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp. 537-552, 1999.
 10. Cho, M. W., Yi, S. J., Kim, M. K., "A Study on the Optimal Probe Path Generation for Sculptured Surface Inspection Using the Coordinate Measuring Machine," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 12, No. 10, pp. 121-129, 1995.
 11. Menq, C. H., Yau, H. T. and Lai, G. Y., "Automated Precision Measurement of Surface Profile in CAD Directed Inspection," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 2, 1992.
 12. Duffie, N., Bollinger, J., Piper, R. and Kroneberg, M., "CAD Directed Inspection and Error Analysis Using Patch Databases," Annals of the CIRP, Vol. 33, No. 1, pp. 347-350, 1984.
 13. Chen, Y. D., Tang, X. J., Ni, J. and Wu, S. M. "Automatic Digitization of Free-form Curve by Coordinate Measuring Machine," IJPR, Vol. 32, No. 11, 1994.
 14. Ha, S., Hwang, I. and Rho, H. M, "A Study on the Development of Knowledge-based Inspection Planning System for CMM," Intelligent Computation in Manufacturing Engineering-2, Proceedings of 2nd CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME2000), Capri, Italy, pp. 497-502, 2000.
 15. Nam, W. S., Chung, S. C., "System Synthesis for On-the-Machine Measuring and Inspection of Freeform Surface," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 12, pp. 81-88, 1998.
 16. Kim, S. H., Lee, S. J., Kim, O. H., "The Analysis of Measuring Error in OMM System," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 34-42, 1998.
 17. Lee, S. J., Kim, S. H., Kim, O. H., "The OMM for Machined Form and Surface Roughness Measurement Concerned with Volumetric Error," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 7, pp. 232-240, 2000.
 18. Park, J. W., Ko, T. J., "OMM System based on CAD Model," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 37-42, 2001.
 19. Park, K. B., Song, G. H., Cho, M. W., Kwon, H. D., Seo, T. I., "A study on the OMM Error Compensation Considering the Thermally Induced Errors," Journal of the Korean Society of Precision Engineering Spring Conference, pp. 399-404, 2002.