# 금형가공 및 측정을 위한 통합 Rule-based CAPP 시스템 개발

윤길상*, 최진화* (인하대 기계공학과 대학원), 조명우**, 이홍희** (인하대 기계공학부),
서태일*** (한국생산기술연구원)

# Development of integrated Rule-based CAPP system for Mold Manufacturing and Inspection

G. S. Yoon, J. H. Choi(graduate Mechanical Eng. Dept., INHA Univ.), M. W. Cho, H. H. Lee(Mechanical Eng. Dept., INHA Univ.) T. I. Seo(KITECH)

## ABSTRACT

A rule-based CAPP(computer aided process planning) system is proposed in this research to develop integrated manufacturing process of machining and inspection using OMM(On-Machine Measurement) device. Generally workpiece composed of many primitive form features. This features are determined optimum inspection sequence by analyzing the feature information such as features-relationship, probe approach direction and etc. Proposed paper is more efficient method of CAIP(computer aided inspection planning) considered machining process

**Key Words** : CAPP(Computer aided process planning), CAIP(Computer aided inspection planning), 기상측정(OMM, On-Machine Measurement), Rule-Based

## 1. 서론

일반적으로 생산공정이 완료된 후 제품에 대한측정을 수행한다. 측정에 적용되는 장비는 크게 접촉식과 비접촉식 장비로 나눌 수 있으며, 접촉식 측정장비 가운데 금형을 제작하는 업체를 비롯한 제조업에 많이 사용되는 측정기는 3 차원 좌표 측정기(CMM, Coordinate Measuring Machine)이다. 3 차원 좌표 측정기를 이용하여 측정을 수행할 경우, 생산공정과 측정 공정을 분리 하여 수행할 수 밖에 없다. 이는 전용 측정기의 측정 정밀도 유지와 측정속도에 따른 이유도 있지만, 근본적으로 공작기계의 가공 공정중간에 측정을 수행할 수 없는 Off-line 방식이기 때문이다. 현재 생산현장은 공작기계의 가공 전, 가공 도중 또는 가공이 완료된 후 측정을 수행하는 On-line 방식의 측정 시스템에 대한 요구가 대두되고 있다. 이는 가공 대상물이 요구되는 공차를 가공 공정마다 측정을 통하여 확인할 필요성이 높아지고 있기 때문이다. 이에 본 연구에서는 접촉식 측정방식으로 기상측정(OMM, On-Machine Measurement)을 이용하여 CAPP(Computer aided Process Planning) 시스템을 구현하였다. 가공기인 공작기계에서 측정 시스템이 구현되면, 측정공정을 포함한 전체 생산공정을 시간적, 경제적으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 작업자가 현재 가공의 정도를 판단할 수 있기 때문에 능동적인 대처가 용이한 장점을 가지고 있는 시스템이다. 하지만 이런 기상측정 시스템이 공작기계의 오차(기하학적 오차, 열변형 오차)를 그대로 포함하고 있어, 측정 정밀도에 영향을 주는 단점이 있다. 이에 따른 공작기계의 오차 모델링에 관한 연구가 수행되고 있으며[1]-[3], 공작기계 오차를 보정하여 기상측정 시스템에 적용하는 연구가 이루어지고 있다.[4] CAD/CAM/CAI 통합 시스템을 구축하려는 노력은 진행되고 있지만, 하나의 공정이 완료된 후 다음 공정을 수행하는 것이 일반적인 생산 공정이다. 본 연구에서는 CAD/CAM 과 CAI(Computer aided inspection)에 대해 통합 룰 베이스(Rule-based)를 적용한 공정계획 시스템을 개발하였다. 하나의 가공물을 완성하기 위해서는 다양한 가공 공정을 거치게 되지만, 현재의 방법으로 가공 면을 두 번 이상 가공하게 되거나, 부분적으로 가공 공정이 겹치는 영역이 발생하는 경우, 각 공정에서 발생하는 오차를 예측할 수 있는 방법이 없다. 생산공정의 효율성을 높이기 위해,

본 연구에서는 공정 단계별 측정이 가능한 기상측정 알고리즘을 개발하였으며, 가공물을 구성하는 형상들에 대해 룰 베이스를 이용하여 가공과 측정 순서를 결정하는 통합적인 가공과 측정 공정계획 시스템을 구현하였다.

## 2. 기상측정계획

### 2.1 CAD/CAM/CAI 형상분류

일반적으로 CAD/CAM 에서 기계가공을 고려하여 설계를 한다면, 일반적으로 가공 대상물은 3 차원 형상(feature)으로 정의한다. Fig.1 과 같은 형상이라도 CAD 형상은 2 개의 형상으로 정의되며, 기계가공에서 사용되는 CAM 의 형상에서는 하나는 블록으로 나머지 하나는 가공형상(machining feature)으로 분류된다. 측정에서 정의해야 하는 형상은 대상물이 지그(zig)와 물려있는 부분(-z 방향)을 제외한 11 개의 형상(Block plane : 5, feature plane: 4, feature cylinder : 2)으로 정의된다. 이와 같이 하나의 가공물을 정의하더라도 공정에서 사용되는 형상은 일반적으로 다르게 정의된다. 각 공정에 따른 형상의 변화에 적응하기 위하여 본 연구에서는 가공(computer aided machining)과 측정(computer aided inspection)에 필요한 일반형상(analytical feature)을 정의하였으며, 정의된 형상 가운데 하나(pocket-9)를 Table 1, 2 에 도시하였다. Table 1 는 가공형상을 정의한 것으로 블록에 대한 형상정의가 존재하지 않는다. Table 2 는 측정형상 정의로 측정할 수 있는 면의 종류가 11 개임을 나타내고 있으며, 측정을 해석할 수 있는 것으로 단일 면(single geometry)에서는 6 개(position, length, height, flatness, roundness, cylindricity)을 상호 연관 면(integrated geometry)인 경우 2 개(squarness, parallelism)을 측정하여 해석할 수 있다.

### 2.2 측정계획(Inspection planning)

본 연구에서 개발한 측정계획은 크게 두 가지 방법으로 적용하였다. 먼저, 대상물을 구성하는 형상(machining feature)들에 대해 측정 순서(inspection sequence)와 형상 그룹(group)을 정의하는 거시적인 측정계획(Global inspection planning)을 적용하였으며, 측정 순서가 결정된 형상(machining feature)에 대해 측정변수(측정 위치, 측정점의 수, 측정 경로, 충돌 평가)를 결정하는 형상별 측정계획(local inspection planning)을 적용하였다. Fig.2 는 측정계획에 대한 구조를 나타내고 있으며, 이런 측정 구조는 대상물에 대해 가공과 측정을 효율적으로 연계하기 위한 측정계획으로 가공 공정중간에 또는 원하는 가공이 완료된 후 측정을 수행하여 오차를 평가할 수 있다.

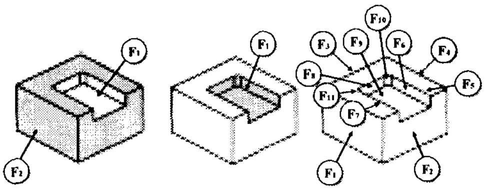



Fig. 1 Feature Definition of CAD/CAM/CAI

Table 1. Machining feature definition of POCKET

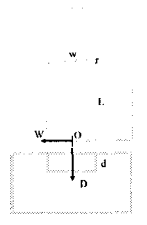
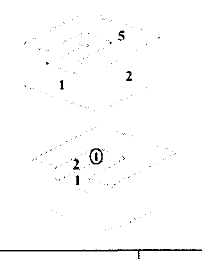
| 이름 | pock-9 | 분류 | POCKET | |
|---|---|---|---|---|
| 형상 | | 정보 | | |
|  | | O : position vector(x,y,z) of origin<br>W : direction vector(x,y,z) of width<br>D : direction vector(x,y,z) of depth<br>Width (w)<br>Length (L)<br>Corner radius (r)<br>Depth (d) | | |

Table 2. Inspection feature definition of POCKET

| 이름 | pock-9 | 분류 | POCKET | |
|---|---|---|---|---|
| 측정형상 | | 형상 정의 | | |
|  | | Single geometry<br>1. Base : Plane 5<br>2. Pocket : Plane 4<br>Partial Cylinder : 2<br>Inspection Function<br>1. Flatness, 2. Squareness<br>3. Parallelism, 4. Roundness<br>5. Cylindricity | | |
| 측정대상형상 | 11 개 | single geometry<br>integrated geometry | 6 개<br>2 개 | |

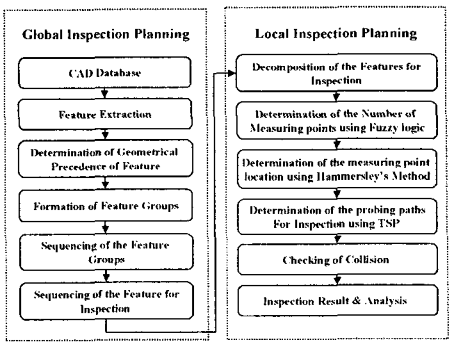



Fig. 2 Overall schematic diagram of the proposed inspection planning strategy

## 3. 형상별 측정 순서 결정

대상물의 전체 형상(machining feature)에 대한 측정 순서는 본 연구에서 개발된 Rule 에 의해 결정된다. 하지만 기상측정(OMM)은 가공공정에 작업자가 원하는 가공공정 사이에 측정을 수행 할 수도 있다. 본 연구에서는 가공중의 측정의 시기를 결정하기 위해 대상물의 공차와 가공물의 좌표이동을 고려하여 결정하였다. 측정 형상의 순서를 결정하는 방법은 프로브의 접근방향(PAD, probe approach direction)과 형상간의 상관 관계에 의해 정의된다. Fig.3 과 같이 제안된 측정계획을 대상물에 적용하기 위해 시편을 제작하였다. Fig.4 는 생산공정의 가공과 측정을 통합하여 개발된 공정계획의 기본 구조이다.

### 3.1 형상별 그룹, 공정 룰 베이스(rule-based)

대상물의 다양한 형상 가운데 측정 형상의 순서를 결정하기 위해서는 일정한 규칙을 적용하여 형상을 그룹화시키는 작업이 필요하다. 이는 가공과 측정의 공정을 고려하여 공정계획을 최적화하기 위한 것이다. 형상별 그룹, 공정 규칙은 다음과 같다.

Rule 1. Application of the identical TAD rule
Rule 2. Formation of feature group
Rule 3. Determination of the main link of brother features
 Sub Rule 1. If there exists a feature whose depth is greater than those of other brother features the link between the feature and the parent feature is the main link.
 Sub Rule 2. If there exists a feature that has the more number of open faces than other brother features, the link between the feature and the parent feature is the main link.
 Sub Rule 3. If there exists a major feature of the feature group, the link between the parent feature and the major feature of the feature group is the main link among the brother link.
 Sub Rule 4. If there exists a feature that has more link than other brother feature, the link between the feature and the parent feature is the main link.
 Sub Rule 5. If there exist multiple main links of equal qualification the choice of the main link is random.
Rule 4. Cancellation of shortcut paths.
Rule 5. Determination of the process planning order of feature groups.
 Sub Rule 1. The major feature group is planned first.
 Sub Rule 2. The Hub feature group is planned next.
 Sub Rule 3. The datum feature group is planned before the important feature group.
 Sub Rule 4. The important feature group is planned last, if possible.
Rule 6. Determination of the machining order of features in a feature group.

Rule 1 은 공구의 접근방향(TAD, tool approach direction)을 고려한 규칙으로, 현재 가공중인 공구 방향을 제외한 다른 방향($S_2$, $S_3$,$S_4$,$S_5$)으로 가공을 위해 방향 전환(좌표이동)이 있는 경우에 적용한다. $F_1$-$F_6$, $F_{12}$-$F_{16}$, $F_{14}$-$F_{16}$ 기하학적 관계는 상실된다. Rule 2 는 Rule 1 의 적용한 이유의 기하학적 관계가 성립되는 형상을 그룹화시키는 것으로 이를 적용한 결과는 Fig.5 와 같다. Rule 3-Rule5 를 적용한 결과는 Fig.6 과 같으며, Rule 6 를 적용하면 최적화된 형상별 그룹이 완성된다. 완성된 결과는 Table 3 과 같다.

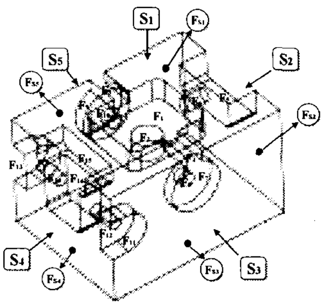


Fig. 3 An example part and its features

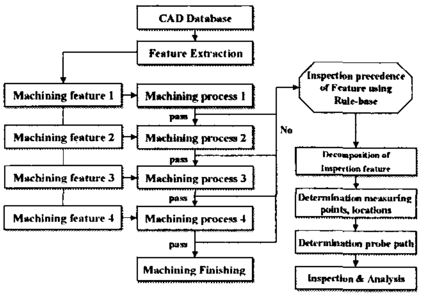



Fig. 4 Overall schematic diagram of CAPP for integrated machining and inspection process

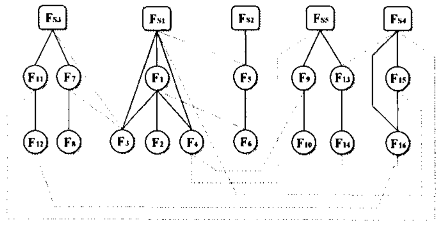


Fig. 5 The precedence tree of the features of the example part

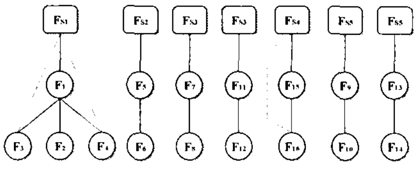


Fig. 6 Feature groups of the example part

Table 3. The order of feature groups of example part

| Order | Feature Groups | Setups |
|---|---|---|
| 1 | S1 — F1 — F3, F2, F4 | S1 |
| 2 | S4 — F15 — F16 | S4 |
| 3 | S2 — F5 — F6 | S2 |
| 4 | S3 — F7 — F8 | S3 |
| 5 | S3 — F11 — F12 | S3 |
| 6 | S5 — F9 — F10 | S5 |
| 7 | S5 — F13 — F14 | S5 |

Table 4. CAPP process of example part

| Sequence | setup | features | processes |
|---|---|---|---|
| 1 | S1 | | Inspection-Setup |
| 2 | | | Inspection-Alignment |
| 3 | | F1 | End-milling |
| 4 | | F2 | End-milling |
| 5 | | F2-F1 | Inspection-Features |
| 6 | | F3 | End-milling |
| 7 | | F4 | End-milling |
| 8 | | F4-F3 | Inspection-Features |
| 9 | S4 | | Inspection-Setup |
| 10 | | | Inspection-Alignment |
| 11 | | F15 | End-milling |
| 12 | | F16 | End-milling |
| 13 | | F16-F15 | Inspection-Features |
| 14 | S2 | | Inspection-Setup |
| 15 | | | Inspection-Alignment |
| 16 | | F5 | End-milling |
| 17 | | F6 | Drilling and Reaming |
| 18 | | F6-F5 | Inspection-Features |
| 19 | S3 | | Inspection-Setup |
| 20 | | | Inspection-Alignment |
| 21 | | F7 | End-milling |
| 22 | | F8 | End-milling |
| 23 | | F11 | End-milling |
| 24 | | F12 | Drilling and Reaming |
| 25 | | F12-F11-F8-F7 | Inspection-Features |
| 26 | S5 | | Inspection-Setup |
| 27 | | | Inspection-Alignment |
| 28 | | F9 | End-milling |
| 29 | | F10 | End-milling |
| 30 | | F13 | End-milling |
| 31 | | F14 | Drilling and Reaming |
| 32 | | F14-F13-F10-F9 | Inspection-Features |

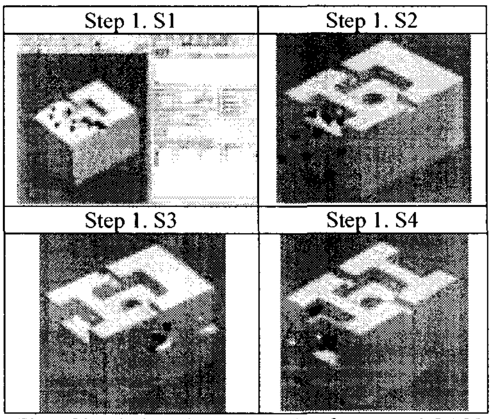



Fig.7 Simulation about example of proposed CAPP

## 4. 결론

본 연구에서 제안된 통합 공정계획에 의한 가공과 측정에 대한 결과는 Table 4 와 같으며, 가공과 측정의 순서, 측정시기의 결정은 설계에서 제공하는 공차, PAD(probe approach direction)와 형상관계를 고려한 룰(rule)에 의해 정의된다. 최적화된 공정계획을 수행한 후 Fig.2 에 도시한 영역 형상별 측정계획(local inspection planning)을 수행하여, 측정점의 수와 위치 그리고 측정경로, 프로브의 충돌을 검사하였다. 측정변수의 결정하는 알고리즘으로 Fuzzy logic, Hammerley's method, TSP problem 을 적용하였다.[5] 공정계획에 따른 단계별 모의 측정을 수행하여 Fig.7 과 같은 결과를 얻었다. 본 연구를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 가공과 측정을 통합한 공정계획을 제시하였다.
(2) 공정계획에 적용할 룰 베이스(Rule-based)를 개발, 적용하였다.
(3) 가공 및 측정에 필요한 형상을 정의하였다.
(4) 가공을 고려한 측정의 방법을 제안하였다.
(5) 제안된 방법을 모의 가공 및 측정에 적용하였다.
(6) CAD/CAM/CAI 통합 공정계획에 독자적인 운영 방법을 제시하였다.

## 참고문헌

1. 이석원, 박희재, 주종남,"CNC 공작기계 선형피치 오차의 최적 보정 알고리즘을 구현하는 측정 및 보정 시스템 개발",한국정밀공학회지 제 15 권, 제 1 호,1998.
2. 이상준, 김선호, 김옥현, " OMM 시스템에서의 측정오차 해석" , 한국정밀공학회 제 15 권 제 5 호, pp 34-42,1998.
3. 박규백, 송길홍, 조명우, 권혁동, 서태일, "열변형 오차를 고려한 기상측정 오차 보정에 관한 연구" , 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp 399-404, 2001.
4. 조명우,이세희, 서태일, "CAD/CAM /CAI 통합에 기초한 자유곡면의 On-Machine Measurement : I. 측정오차 모델링", 한국정밀공학회지 제 16 권 제 10 호, pp 109-118. 1999
5. 정석우, 윤길상, 조명우, "특징형상 기반의 측정계획 시스템 개발에 관한 연구", 한국정밀공학회 추계학술대회, pp 654-658, 2002.