

미세패턴 가공 시뮬레이션 기술 개발

이종민* · 레두이* · 김수진[†] · 이석우** · 제태진***

(2008년 11월 21일 접수, 2009년 1월 20일 수정, 2009년 2월 19일 심사완료)

Development of Micro Pattern Cutting Simulation Software

Jong-Min Lee, Duy Le, Su-Jin Kim, Seok-Woo Lee and Tae-Jin Je

Key Words: Machining Simulation(가공시뮬레이션), Micro Pattern(미세패턴), Micro Cutting(미세가공), Cutting Force(절삭력), Roll Mold(롤금형)

Abstract

The micro pattern machining on the surface of wide mold is not easy to be simulated by conventional software. In this paper, a software is developed for micro pattern cutting simulation. The 3d geometry of v-groove, rectangular groove, pyramid and pillar patterns are visualized by C++ and OpenGL library. The micro cutting force is also simulated for each pattern.

기호설명

- a : 공구 각도
- p : 패턴 피치
- d : 가공 깊이
- w : 사각형 공구의 폭
- F_c : 절삭력
- A : 절삭 단면적
- K : 비절삭에너지
- C : 실험상수
- n : 실험상수

1. 서론

국제시장의 경쟁이 더욱 치열해지고 제품을 만들어 내는 것에 있어서 더욱 짧은 생산시간이 요구 되어가고 있는 현재의 상황에서 제품을 시뮬레이션 상에서 가상으로 제작해보는 것은 매우 큰 이점으로 작용하기 시작하였다. 그리하여 제품이 생산 전 이라도 제작 중에 발생할 수 있는 오차요인을 시뮬레이션으로 미리 발견하는 것이 주안점이 되었고, 시뮬레이션 프로그램에 툴과 가공장비의 상태를 적용하여 최적의 장비 셋팅을 찾아내는 연구가 있었다.⁽¹⁾ 시뮬레이션으로 NC코드에 의해 이상적으로 제작된 공작물과 동역학적, 열 변형, 절삭력에 의한 변형, 셋팅 에러 등 수많은 에러들을 종합하여 이것을 이상적 공작물의 데이터에 적용 그 차이를 해석 공작물의 작업 후의 상태를 예측하는 것이 가능하다.⁽²⁾ 경계표현법을 사용한 솔리드 모델링에서 특징 형상을 적용하여 설계하고 치수를 쉽게 변경하는 연구가 있었다.⁽³⁾ NC 밀링 시뮬레이션을 실시간으로 구현함에 있어 데이터의 실시간 처리를 위하여

[이 논문은 2008년도 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2008.6. 4-5. 제주오리엔탈호텔) 발표논문임]

[†] 책임저자, 회원, 경상대학교 기계항공공학부

E-mail : sujinkim@gnu.ac.kr

TEL : (055)751-6075 FAX : (055)762-0227

* 경상대학교 기계항공공학부

** 한국생산기술연구원

*** 한국기계연구원

Quad-tree를 적용한 연구가 있었다.⁽⁴⁾

미세가공에서 절삭력은 공구마모, 절삭온도, 변형 등 가공오차에 가장 기초가 되는 물리적 현상으로 연구의 필요성이 있다. 절삭력 해석은 크게 절삭모형을 이용한 연구와 FEM을 이용한 수치해석적 연구가 있었다.⁽⁵⁻⁸⁾

하지만 위 시뮬레이션 방법과 일반적인 시뮬레이션 소프트웨어는 미터단위의 넓은 면적에 마이크로 단위의 미세패턴을 가공하는 대면적 미세패턴가공^(9,10)의 시뮬레이션에 적합하지 않다. 따라서 넓은 면적에 마이크로미터 크기의 미세패턴을 가공할 때 3차원 형상과 물리적 절삭현상을 시뮬레이션 할 수 있는 소프트웨어의 개발이 요구된다.

본 논문에서는 대면적 미세패턴가공 과정을 가공 전에 미리 시뮬레이션 하는 기술을 개발해 가공과정과 결과를 미리 가상공간에서 관찰하고, 미세가공 중에 공구에 작용하는 절삭력을 예측하고자 한다.

2. 미세패턴 3D 가공 시뮬레이션

2.1 가시화 방법

이 연구에서 그래픽에 가시화하는 대상은 공구와 공작물 그리고 공작물 표면에 가공되는 미세패턴이다. 넓은 볼륨 금형에 수많은 미세패턴 모델을 실시간으로 가시화하기 위해 멀리 있는 형상은 데이터 크기를 줄이고 단순화해 표현하고 가까이 있는 형상은 자세히 표현하는 LOD 방법을 이용할 필요가 있다.⁽⁴⁾ 즉 원거리에서 볼 전체 형상을 보여줄 때는 미세패턴을 제외한 원통형만을 표현하고 아주 가까이 확대했을 경우는 확대영역 안에 있는 미세패턴을 정밀하게 표현한다. 초정밀 미세가공품의 특징상 동일한 패턴이 반복됨으로 확대 영역을 자세히 표현할 때는 한번 계산된 형상을 연속적으로 배열해 가시화함으로써 메모리와 CPU 사용을 최소화 한다.

확대영역의 표시 면적은 가로 세로 100 μm 의 면적을 표현 하도록 한다. 볼 몰드의 표면은 곡면이지만 100 μm *100 μm 의 평면과의 차이가 0.005 μm 로 매우 작아 평면으로 간주할 수 있다. 그리하여 확대영역은 곡면이 아닌 평면으로 표현하며, 확대영역에서 제거되는 소재는 공구의 형상과 동일한 형상을 지닌다.

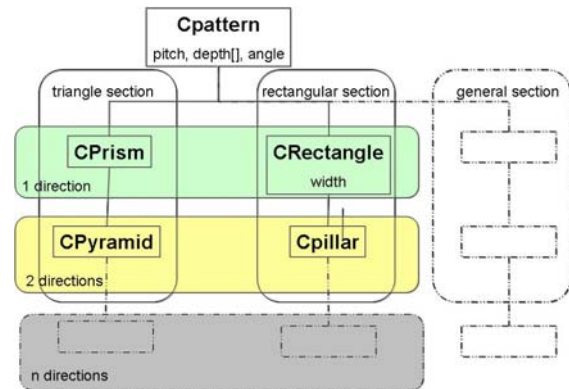


Fig. 1 Data structure of micro pattern

2.2 미세패턴 자료 구조

미세패턴을 단면 모양을 기준으로 크게 3가지로 분류하면 삼각단면, 사각단면, 일반단면으로 나누어진다. 또한 가공 방향으로 분류하면 일방

향, 두방향, n방향으로 분류된다. 미세패턴의 자료구조는 앞의 분류와 C++ 클래스 특성을 반영해 Fig. 1과 같이 설계되었다.

2.3 미세패턴 3D 가공 시뮬레이션

프리즘 패턴의 기본 요소는 피치, 각도, 깊이의 세 가지 요소로 이루어진다. Fig. 2(a)와 같이 절삭 폭이 피치보다 작을 경우에는 소재의 윗면과 V홈이 함께 보이며, 절삭 폭이 피치보다 커지게 되면 프리즘 패턴의 형태가 된다.

사각패턴의 기본요소는 피치, 각도, 깊이, 폭이다. 사각형 패턴은 삼각형과 매우 유사하나 폭이 존재하여 폭으로 인하여 발생하는 면의 정의가 필요하다. 기본 요소의 중앙에서 정의되는 사각단면 패턴은 각각 5개의 면 ①, ②, ③, ④, ⑤로 이루어지게 된다. 사각 패턴의 기본요소와 시뮬레이션 결과는 Fig. 2(b)에서 볼 수 있다.

피라미드 패턴의 기본적인 형태는 프리즘 패턴의 기본형상을 두 방향으로 가공하여 생기는 형상을 시뮬레이션 상에 구현한 것이다. 완전한 피라미드 패턴이 생성되기 전 황삭 결과와 완전한 피라미드 패턴이 완성된 정삭 결과를 Fig. 2(c)에서 볼 수 있다.

사각형 공구를 두 방향으로 가공할 경우 사각기둥 패턴이 가공되며 가시화를 위한 기본 요소와 시뮬레이션 결과는 Fig. 2(d)와 같다.

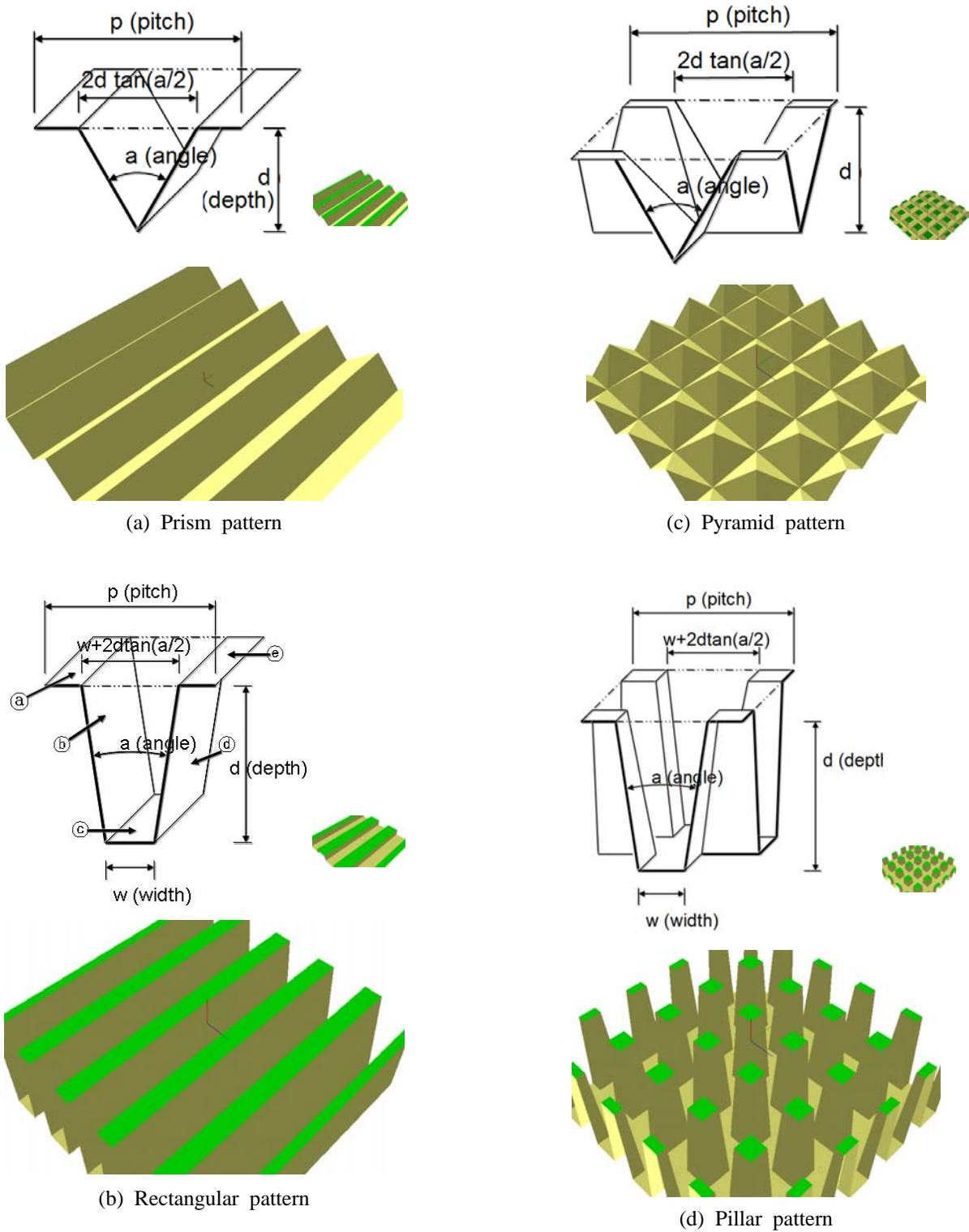


Fig. 2 Micro pattern simulation

3. 미세가공 절삭력 해석

3.1 프리즘 패턴의 절삭력

기초적인 형상에 대한 시뮬레이션에 데이터를 기초한 절삭력에 대한 어플리케이션의 추가적인 구축이 가능하다. 공작기계에서 공작물의 절삭 시 발생하는 절삭력은 식 (1)로 정의된다.⁽⁷⁾ Fig. 3(a)는 삼각 프리즘 패턴 절삭 시 발생하는 단면이다. 공작물의 가공 시 발생하는 절삭력 F_c 는 절삭면의 면적과 비절삭에너지(specific cutting energy)에 비례한다. 여기서 절삭면적은 Fig. 3(a)에서 나타남과 같이 i 번째 절삭 깊이와 이전 깊이를 뜻하는 d_i 와 d_{i-1} 의 절삭면적의 차이에 의해 정의 된다. 절삭면적의 경우 두 가지 경우가 발생하게 되는데 절삭 폭이 피치 p 보다 작은 황삭의 경우 즉 원소재의 윗면이 남아있는 경우에는 i 번째 절삭면적은 식 (2)로 계산 된다. 두 번째 절삭 폭이 피치보다 큰 정삭의 경우 즉 프리즘 패턴이 완성된 정삭 단계의 경우 절삭되는 면적은 식 (3)로 계산 된다.

$$F_c = KA \tag{1}$$

$$A_i = (d_i^2 - d_{i-1}^2)\tan\left(\frac{a}{2}\right) \tag{2}$$

$$A_i = (d_i - d_{i-1})p \tag{3}$$

비절삭에너지 K 는 절삭 칩 두께가 작아지면 커지는 치수효과를 고려한 식 (4)으로 계산되며, KIMM의 실험 데이터⁽¹¹⁾와 최소자승법(least square method)을 이용하여 실험상수 C 와 n 의 값을 구하게 된다.

$$K = Ct^{-n} \tag{4}$$

삼각 프리즘 패턴에서 6:4황동을 절삭할 경우에 $n=0.026$, $C=0.00174$ 으로 계산되었다. 최종적인 절삭력 F_c 는 원소재의 윗면이 남은 경우 식 (5)로 이미 프리즘 패턴이 완성된 정삭단계인 경우에는 식 (6)으로 계산된다. Fig. 3(b)는 각도 90° , 피치 $50 \mu m$, 절삭 깊이 $18+7+3+1+0.5 \mu m$ 인 경우 프리즘패턴 가공 절삭력 시뮬레이션 결과를 보여준다.

$$F_c = C((d_i - d_{i-1})\sin\left(\frac{a}{2}\right))^{-n}(d_i^2 - d_{i-1}^2)\tan\left(\frac{a}{2}\right) \tag{5}$$

if $2d\tan\left(\frac{a}{2}\right) < p$

$$F_c = C((d_i - d_{i-1})\sin\left(\frac{a}{2}\right))^{-n}(d_i - d_{i-1})p \tag{6}$$

if $2d\tan\left(\frac{a}{2}\right) \geq p$

3.2 사각 패턴의 절삭력

Fig. 4(a)와 같은 사각 패턴의 절삭력은 크게 두 개의 힘으로 나누어 계산을 하고 있다. 식 (7)과 같이 공구의 옆면에 의하여 발생하는 절삭력과 공구의 아랫면에 의하여 발생하는 절삭력으로 나누어 계산하는 이유는 공구의 옆면에서 발생하는 칩의 두께와 공구의 아랫면에서 발생하는 칩의 두께 사이의 차이로 인해 측면의 비절삭에너지 상대적으로 크기 때문이다. 공구의 옆면에 의해 발생하는 절삭면적 A_{si} 는 식 (8)로 칩의 두께는 식 (9)으로 계산되고, 공구의 아래쪽에서 발생하는 절삭면적 A_{bi} 는 식 (10)으로 이때의 칩의 두께는 식 (11)으로 계산된다. 최종적으로 유도되는 사각패턴 가공의 절삭력은 식 (12)로 계산된다.

Fig. 4(b)는 사각패턴 가공에서 각도 5.72° , 피치 $150 \mu m$, 폭 $120 \mu m$, 1회당 절삭 깊이는 $15*10\text{회}+12+10+8+5+3+1(\mu m)$ 로 16회에 걸쳐 절삭하는 경우⁽¹¹⁾ 각 가공 단계마다 식 (12)로 예측된 절삭력 그래프이다. 여기에서 상수 C 와 n 은 실험에서 얻은 $C=0.00168$, $n=0.149$ 를 사용했다.

$$F_c = Ct_{si}^{-n}A_{si} + Ct_{bi}^{-n}A_{bi} \tag{7}$$

$$A_{si} = 2d_{i-1}(d_i - d_{i-1})\tan\left(\frac{a}{2}\right) \tag{8}$$

$$t_{si} = (d_i - d_{i-1})\sin\left(\frac{a}{2}\right) \tag{9}$$

$$A_{bi} = (W + (d_i - d_{i-1})\tan\left(\frac{a}{2}\right))(d_i - d_{i-1}) \tag{10}$$

$$t_{bi} = d_i - d_{i-1} \tag{11}$$

$$F_c = C((d_i - d_{i-1})\sin\left(\frac{a}{2}\right))^{-n}2d_{i-1} \tag{12}$$

$$(d_i - d_{i-1})\tan\left(\frac{a}{2}\right) + C(d_i - d_{i-1})^{-n}$$

$$(w + (d_i - d_{i-1})\tan\left(\frac{a}{2}\right))(d_i - d_{i-1})$$

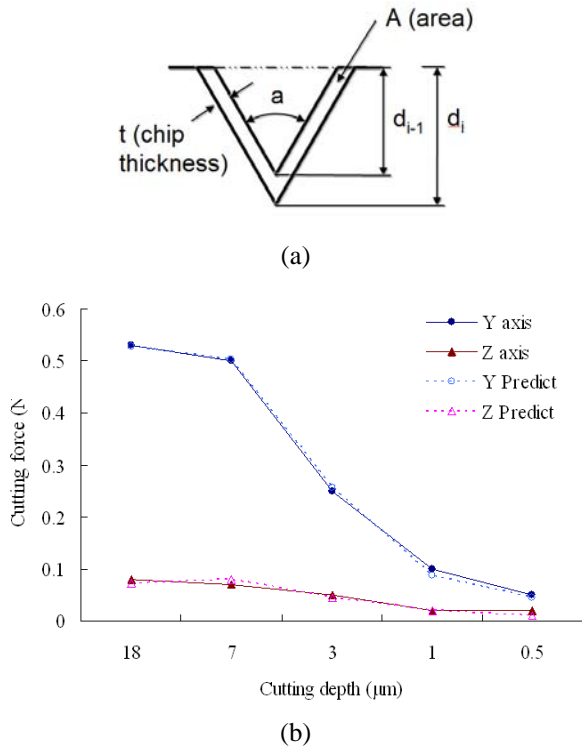


Fig. 3 Cutting force of prism pattern

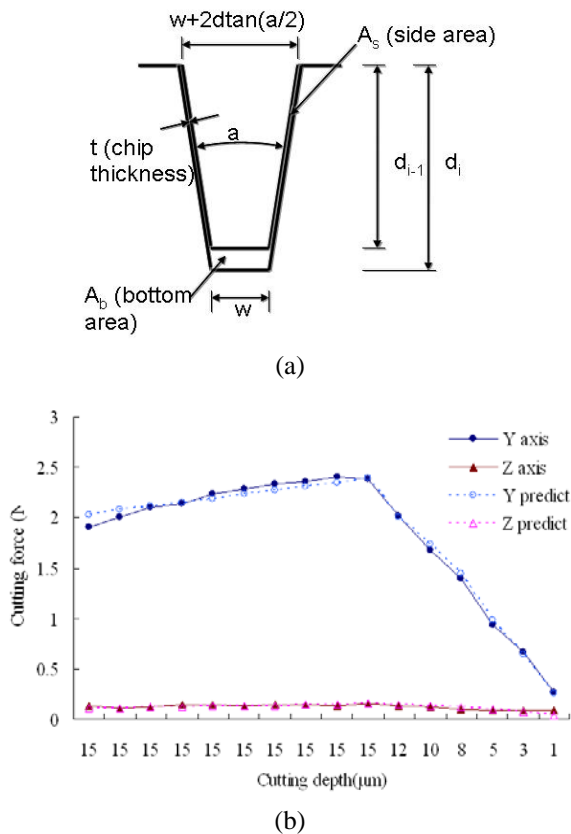


Fig. 4 Cutting force of rectangular pattern

5. 결 론

본 연구에서는 대면적 미세패턴 가공의 3D 형상 가공 시뮬레이션과 절삭력을 해석하는 알고리즘을 구현한다. 기존의 시뮬레이터와 다른 점은 미터 단위의 대면적에 마이크로미터 크기의 미세 형상이 가공되는 상황에 특화 되었다는 것이다. 이를 위해 기본요소를 계산하고 이것을 확대 영역 안에 배열하여 패턴을 가시화하는 방법을 이용하였다. 시뮬레이션으로 계산된 절삭단면적과 실험으로 계산된 비절삭 에너지를 이용해 미세절삭력을 효과적으로 예측할 수 있음을 확인했다.

구현된 미세가공 시뮬레이션 소프트웨어의 효과는 다음과 같다. 현재 육안으로 관찰되지 않는 가공 과정 및 가공 후 패턴 형상 제품을 가공 전에 미리 보여줌으로써 현장 작업자에게 도움을 주고 제품의 생산을 도와줄 수 있도록 하고 있다. 패턴을 미세가공하면서 발생하는 절삭력을 시뮬레이션에서 예측하여 사용자의 편의를 도와 줄 수 있도록 하고 있다.

후 기

이 연구는 “지식경제부 전략기술개발사업”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- (1) Li, J.G., Lee, W.B., Yao, Y.X., Cheung C.F. and To, S., 2005, "Workpiece Representation for Virtual Turning," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 25, pp. 857~866.
- (2) Yao, Y., Zhao, H., Li, J. and Yuan, Z.J., 2006, "Modeling of Virtual Workpiece with Machining Errors Representation in Turning," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, pp. 437~444.
- (3) Byun, M.H. and Oh, I.S., 1996, "A Study on the Representation of Dimensions in the Feature-based Modeler," *Transactions of the Society of CAD/CAM*

- Engineers*, Vol. 1, No. 2, pp. 122~132.
- (4) Liu, S.Q., Ong, S.K., Chen, Y.P. and Nee, A.Y., 2006, "Real-time Dynamic Level-of-detail Management for Three-axis NC Milling Simulation," *Computer-Aided Design*, Vol. 38, pp. 378~391.
- (5) Arcona, C. and Dow, T.A., 1998, "An Empirical Tool Force Model for Precision Machining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transaction of the ASME.*, Vol. 120, pp. 700~707.
- (6) Cheng, P.J., Tsay, J.T. and Lin, S.C., 1997, "A Study on Instantaneous Cutting Force Coefficients in Face Milling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 37, No. 10, pp. 1393~1408.
- (7) Lai, X., Li, H., Li, C.F., Lin, Z.Q. and Ni, J., 2007, "Modelling and Analysis of Micro Scale Milling Considering Size Effect, Micro Cutter Edge Radius and Minimum Chip Thickness," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.48, pp. 1~14.
- (8) Liu, K., 2005, "Process Modeling of Micro-Cutting Including Strain Gradient Effects," *Georgia Institute of Technology*, Ph.D. Thesis.
- (9) Hong, S.M., Je, T.J., Lee, D.J. and Lee, J.C., 2005, "Micro Machining Characteristics of V-shape Single Crystal Diamond Tool With Ductile Workpiece," *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 4, No. 4, pp. 28~33.
- (10) KIMM, KISTEP, 1992, "Development of Micro Cutting Technology for Mirror Surface," *KISTEP final report*
- (11) Je, T.J., Park, K.T., Kim, J.G. and Lee, K.W., 2008, "Development of Precise Micro Cutting Technique on Wide Plate," 1st Workshop of Micro Machining System Development, April 24-25, Jeju, Korea.