

CNC 가공의 정밀 절삭 시뮬레이션 및 이송속도 스케줄링 시스템 개발

이한울*, 고정훈+, 조동우**

Development of Accurate Cutting Simulation and Feedrate Scheduling System for CNC Machining

Han Ul Lee*, Jeong Hoon Ko⁺, Dong-Woo Cho⁺⁺

Abstract

This paper presents an accurate cutting simulation and feedrate scheduling system for CNC machining. This system is composed of a cutting simulation part and a feedrate scheduling part. The cutting simulation part computes the geometric informations and calculates the cutting forces in CNC machining. The cutting force model using cutting-condition-independent coefficients was introduced for flat end milling and ball end milling. The feedrate scheduling part divides original blocks of NC code into smaller ones with optimized feedrates to adjust the peak value of cutting forces to reference forces. Some machining examples show that the developed system can control the cutting force at desired levels.

Key Words : Cutting Simulation(절삭 시뮬레이션), Cutting Force Model(절삭력 모델), Feedrate scheduling(이송속도 스케줄링), CNC Machining(CNC 가공), Reference Cutting Force(기준 절삭력)

1. 서론

소비자의 욕구가 다양화됨에 따라 제품의 수명 주기가

단축되고 다품종·소량 생산 방식이 정착되고 있다. 이러한 산업의 흐름에 따라 CNC 가공에서도 생산성 향상을 위한 최적의 절삭 조건을 선정하는 기술이 요구되어지고

* 발표자, 포항공과대학교 기계공학과 (polarb@postech.ac.kr)
주소: 790-784 경북 포항시 남구 효자동

+ Manufacturing Automation Lab., The University of British Columbia

** 포항공과대학교 기계공학과

있으며, 그 일환으로 이송속도 스케줄링의 필요성이 점차 부각되고 있다. 현재까지 개발된 이송속도 최적화 시스템은 아직 다양한 제품을 생산하는데 사용될 수 있을 정도의 일반적인 기술로 정립되지 못하였다. 절삭 공정에 대해 명료하게 분석되지 않아서 다양한 절삭 조건에서의 가공 결과를 예측하기 힘들기 때문이다.

최근 국내의 CAM 소프트웨어에서는 절삭 조건 최적화의 방법으로 소재 제거량(Material removal rate)을 조절하는 방식의 이송속도 스케줄링 방법을 도입하고 있다¹¹⁻³¹. 소재 제거량을 이용하는 방식은 절삭력의 효과적인 조절 및 절삭력 계수의 데이터베이스화가 불가능하므로 정확한 절삭력 모델을 이용한 이송속도 스케줄링 시스템의 개발이 필요하다. 따라서 효과적이고 신뢰할 수 있는 이송속도를 얻기 위해서는 절삭력 예측을 기반으로 이송속도를 스케줄링하여야 한다. 여러 연구자들에 의해 절삭력 모델을 기반으로 한 이송속도 스케줄링 기법이 연구되었지만⁴⁻⁶, 절삭 계수를 가공 조건에 따른 함수로 결정하였으므로 임의의 NC 가공에 대한 이송속도 스케줄링을 수행할 수 없었다.

본 논문에서는 CNC 가공의 정밀 절삭 시뮬레이션 및 이송속도 스케줄링 시스템을 개발하였다. 절삭 시뮬레이션 시스템에서는 주어진 NC 코드에 대한 공구와 공작물 간의 접촉 영역을 해석하고, 이를 기반으로 가공 중의 절삭력을 예측한다. 이송속도 스케줄링 시스템에서는 예측된 절삭력을 바탕으로 NC 코드를 분할하고, 가공 조건에 따른 기준 절삭력을 계산하여 기준 절삭력이 발생하도록 NC 코드의 이송속도를 조절한다. 개발된 절삭 시뮬레이션 및 이송속도 스케줄링 시스템에서는 ME Z-map⁷⁾을 이용하여 공구와 공작물 간의 접촉 영역을 정밀하게 해석하였고, 절삭 조건에 독립적인 절삭력 계수를 이용한 절삭력 모델⁸⁾⁹⁾을 사용함으로써 NC 가공의 절삭력 예측 및 이송속도 스케줄링의 정밀도와 효율성을 높였다. 개발된 시스템을 금형 가공을 포함한 다양한 가공 조건에 적용하여 그 성능을 검증하였다.

2. 절삭력 예측을 통한 이송속도 스케줄링

이송속도 스케줄링은 그림 1과 같은 과정을 통해 이루어진다. 먼저 NC code를 읽어 들이고, NC code에 따라 공구를 이동시키면서 공구와 공작물 간의 접촉영역을 해석하고 절삭 해석 정보(Cutting configurations)를 계산한다. 계산된 절삭 해석 정보를 이용하여 NC 가공에 대한 절삭력 예

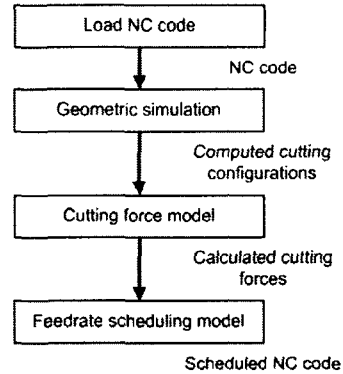


Fig. 1 Procedure for feedrate scheduling.

측을 수행하며, 절삭력의 변화 정도에 따라 NC 코드를 분할하여 최적의 이송속도를 입력함으로써 이송속도 스케줄링이 이루어진다. 최적의 이송속도를 구하기 위하여 각각의 절삭 조건에 따른 기준 절삭력이 계산되며, 기준 절삭력이 발생할 수 있도록 이송속도를 조절한다.

2.1 ME Z-map 모델

본 논문에서는 기하 시뮬레이션의 정밀도 향상을 위하여 기존의 Z-map을 개선한 ME(Moving Edge node) Z-map⁷⁾을 절삭 공정 시뮬레이션에 적용하였다. ME Z-map의 기본 개념은 그림 2와 같이 공구와 접촉하는 격자 점 가운데 가장 바깥쪽에 있는 점을 모서리 점(Edge node)으로 정의하고, 모서리 점을 공구 궤적의 윤곽선상으로 이동시키는 것이다. 모서리 점을 이용함으로써 가공 형상을 매우 정밀하게 묘사할 수 있으며, 절삭력 계산에 필요한 절삭 해석 정보를 정확하게 계산할 수 있다. 또한 기존의 Z-map 보다 적은 저장 공간과 빠른 계산 속도로 더 높은 계산 정밀도를 얻을 수 있다.

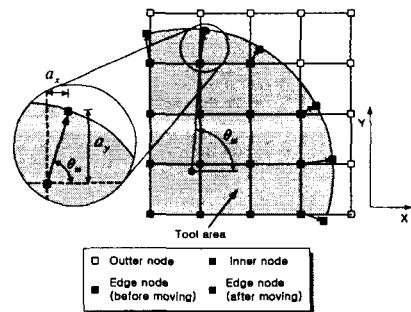


Fig. 2 Fundamental notion for ME Z-map.

2.2 절삭력 모델

본 논문에서는 절삭 조건에 독립적인 절삭력 계수를 이용한 절삭력 모델^{[8][9]}을 사용하여 CNC 가공의 절삭력을 예측하였다. 엔드 밀링 공구를 미소 디스크 요소로 분할하여 각각의 미소 디스크에서의 순간 절삭력을 계산하고 최종적으로 이를 더함으로써 임의의 공구 회전각에 대해서 절삭력을 예측한다.

평 엔드밀링에서 j 번째 위치각에서의 절삭력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x(j) &= \sum_k \sum_i C_1 \cos(\phi - \alpha_r) + K_f C_3 \cos \phi \\ &\quad - K_f C_4 \sin(\phi - \alpha_r) / K_n B_1 t_c(\phi) \quad (1) \\ F_y(j) &= \sum_k \sum_i C_1 \sin(\phi - \alpha_r) + K_f C_3 \sin \phi \\ &\quad + K_f C_4 \cos(\phi - \alpha_r) / K_n B_1 t_c(\phi) \\ F_z(j) &= \sum_k \sum_i -C_2 + K_f C_5 / K_n B_1 t_c(\phi) \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} C_1 &= \cos \theta_h / \sin \theta_{hk}, \\ C_2 &= (\sin \theta_h / \sin \theta_{hk}) \cos \alpha_r, \\ C_3 &= \sin \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{hk}), \\ C_4 &= \cos \theta_c / \sin \theta_{hk}, \\ C_5 &= \cos \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{hk}), \\ B_1 &= \cos \alpha_r (\Delta a / \cos \theta_h), \\ \cos \theta_{hk} &= \sin \alpha_r \cdot \sin \theta_h \end{aligned}$$

볼 엔드밀링에서의 절삭력은 식 (2)와 같은 행렬 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_{11} &= B_1 \sum_k \sum_i \cos \alpha_r \cos \phi \cos \theta_h + \sin \alpha_r \sin \phi \cdot t_c(\phi) \\ A_{12} &= B_1 \sum_k \sum_i \frac{1}{f_2} \sin \alpha_r \cos \phi \cos \theta_h - \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r \sin \phi \\ &\quad - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \cos \phi \sin \theta_h \cdot t_c(\phi) \\ A_{13} &= B_1 \sum_k \sum_i \left(-\frac{f_1}{f_2} \sin \phi + \frac{1}{f_2} \cos \phi \sin \theta_h \right) \cdot t_c(\phi) \\ A_{21} &= B_1 \sum_k \sum_i \cos \alpha_r \sin \phi \cos \theta_h - \sin \alpha_r \cos \phi \cdot t_c(\phi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{22} &= B_1 \sum_k \sum_i \frac{1}{f_2} \sin \alpha_r \sin \phi \cos \theta_h + \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r \cos \phi \\ &\quad - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \sin \phi \sin \theta_h \cdot t_c(\phi) \\ A_{23} &= B_1 \sum_k \sum_i \frac{f_1}{f_2} \cos \phi + \frac{1}{f_2} \sin \phi \sin \theta_h \cdot t_c(\phi) \\ A_{31} &= B_1 \sum_k \sum_i (-\sin \theta_h \cos(\phi - \alpha_r)) \cdot t_c(\phi) \\ A_{32} &= B_1 \sum_k \sum_i -\sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \sin \theta_h \\ &\quad - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \cos \theta_h \cdot t_c(\phi) \end{aligned}$$

$$A_{33} = B_1 \sum_k \sum_i \frac{1}{f_2} \cos \theta_h \cdot t_c(\phi)$$

$$\begin{aligned} B_1 &= \cos \alpha_r (\Delta a / \cos \theta_h) \\ K_1 &= K_n, \quad K_2 = \cos \theta_c K_n K_f, \quad K_3 = \sin \theta_c K_n K_f \\ f_1(z) &= \frac{(z - R_0)}{\sqrt{R_0^2 - (z - R_0)^2}}, \quad f_2(z) = \sqrt{f_1^2 + 1} \end{aligned}$$

식 (1)과 (2)와 같이 절삭력은 절삭력 계수와 미변형 칩두께에 의하여 결정된다. 본 논문에서 사용된 절삭력 모델은 절삭 조건에 관계없이 시편의 재질에 따라 결정되는 절삭력 계수를 사용한다. 절삭력 계수는 치수 효과(Size effect)를 고려하여 Weibull 함수 형식으로 입력되고, 공구의 런아웃(run-out)과 변형을 고려하여 미변형 칩두께를 계산함으로써 매우 정밀한 절삭력 예측이 가능하다.

2.3 이송속도 스케줄링 모델

NC 코드에 대한 시뮬레이션을 수행하여 계산되어진 절삭력에서 F_x 와 F_y 의 최대 합력이 기준 절삭력이 되도록 이송속도를 조절함으로써 이송속도 스케줄링^{[9][10]}이 이루어진다. 절삭력의 변화에 따라 NC 코드를 분할하고, 분할된 NC 코드에서 기준 절삭력이 발생하도록 최적의 이송속도를 계산한다. NC 코드를 분할할 때는 동작기계의 가감속 특성을 고려하여 한 블록이 일정한 크기 이상을 반드시 가지도록 함으로써, 항상 원하는 이송속도에 도달하도록 하였다. 이송속도 스케줄링을 통하여 NC 코드의 모든 블록에서 항상 일정한 절삭력이 발생하게 됨으로써, 높은 생산성 향상 효과를 얻을 수 있다.

2.4 기준 절삭력

이송속도 스케줄링은 가공 시 전체 NC 코드에서 주어진 기준 절삭력이 발생하도록 이송속도를 조절한다. 본 논문에서

서는 황삭 가공을 위하여 공구의 파손이 일어나지 않도록 하는 최대 절삭력을 기준 절삭력으로 사용하였다. 공구 회사에서 제시하는 공구의 항절력(TRS: Transverse Rupture Strength)를 이용하여 식 (3)과 같이 두 가지 기준 절삭력을 고려할 수 있다.

$$\begin{aligned} RF_1 &= SF \cdot TRS \cdot S_1 \\ RF_2 &= SF \cdot TRS \cdot S_2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, RF_1 은 공구의 몸체가 부러지는 것을 방지하기 위해 설정하는 기준 절삭력이고, RF_2 은 공구의 날 끝 부분이 파손되는 것을 막기 위해 부가하는 기준 절삭력이다. SF 는 안전계수이다. S_1 은 날 부의 등가 단면적을 보여주고, S_2 는 단위 디스크 날에서 가절된 공구 파단이 발생하는 위치(F)의 단면적을 나타내는 것으로 식 (4)와 같다.

$$S_1 = \pi \left(\frac{RL_1}{2} \right)^2, \quad S_2 = RL_2 \cdot D_a \quad (4)$$

여기서, D_a 는 단위 디스크의 높이를 가리키며, RL_1 은 그림 3(a)에 나타난 등가 반경이다. 공구 반경이 RI 일 경우 엔드밀의 등가 반경은 $0.79RI$ 이다. RL_2 는 그림 3(b)와 같이 공구 날의 파단지점의 길이를 나타낸다.

그림 3(b)에서 E_1 , E_2 의 좌표는 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

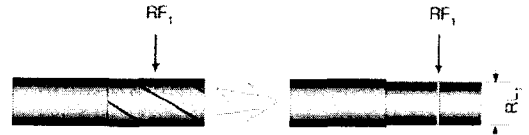
$$(x_1, y_1) = \left(\frac{F_c(1 + \tan^2 \alpha)}{(\tan \alpha + \tan \beta)}, -\tan \beta \cdot x_1 \right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} (x_2, y_2) = & \left(\frac{1}{(\tan \alpha + \tan \beta)} \cdot (L_1(\tan \alpha - \tan \beta) \right. \\ & \left. + F_c(1 + \tan^2 \alpha), -x_2 \tan \alpha + L_1(\tan \alpha - \tan \beta) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

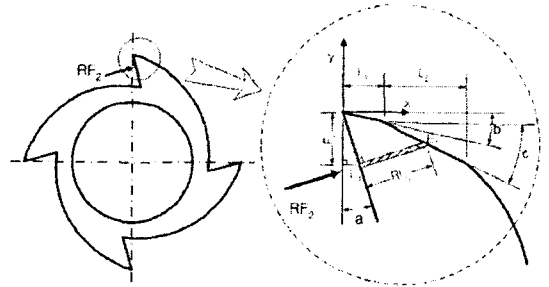
RL_2 는 E_1 , E_2 사이의 거리이므로 식 (5), (6)을 통하여 계산할 수 있다. RF_2 는 공구 상면에 수직인 힘으로 계산되므로 이를 xy 평면에서의 합력은 식 (7)과 같이 계산된다.

$$RF_2' = N_d \cdot RF_2 \cdot \sqrt{1 + B_1^2} \quad (7)$$

여기서, N_d 는 가공 시편에 물린 공구의 축방향 디스크 요소의 수이며, B_1 은 절삭력 계수 가운데 하나이다. RF_1 과



(a) To avoid breakage of tool shank



(b) To prevent breakage of tool edge

Fig. 3 Schematic diagram for determination of a reference cutting force based on a TRS of a tool.

RF_2' 가운데 작은 값이 기준 절삭력으로 사용된다.

3. 이송속도 스케줄링 S/W

제안된 ME Z-map 모델, 절삭력 모델, 이송속도 스케줄링 모델을 이용하여 그림 4와 같은 절삭 시뮬레이션 및 이송속도 스케줄링 소프트웨어를 개발하였다. 소프트웨어의 구성은 다음과 같다.

절삭 시뮬레이션 모듈

NC 코드 해석: NC 코드를 해석하여 공구 움직임 제어 기하 시뮬레이션: 공구의 움직임에 따른 공구와 공작물의 접촉 영역 해석 및 절삭 해석 정보 계산
절삭력 계산: 절삭 해석 정보를 이용하여 NC 가공의 절삭력 계산

이송속도 스케줄링 모듈

기준 절삭력 계산: 가공 조건에 따라 공구의 파손이 일어나지 않는 최대 절삭력을 계산
최적 이송속도 계산: 기준 절삭력이 발생하는 이송속도 산출
NC 코드 편집: 절삭력의 변화가 정해진 값보다 클 경우 NC 코드를 분할하고, 최적 이송속도 삽입

가공 상태 가시화 모듈

공구 움직임 표시: 현재 공구의 위치를 표시

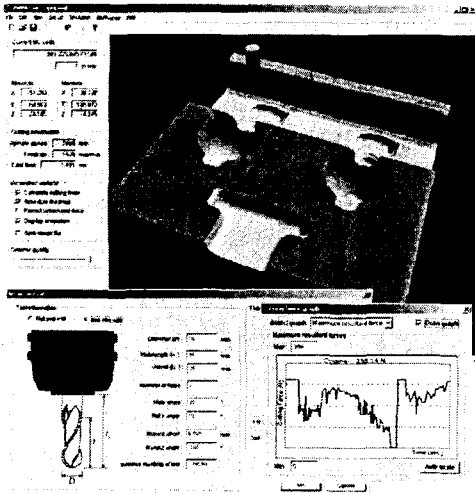


Fig. 4 Cutting simulation and feedrate scheduling S/W.

공작물 가시화: 공작물의 현재 가공 상태 및 형상을 표시
 절삭력 가시화: 현재 발생하는 절삭력의 그래프 작성
 공구경로 표시: 현재 NC 코드 및 전체 NC 코드의 공구 경로 표시

4. 적용 결과

개발된 절삭 시뮬레이션 및 이송속도 스케줄링 시스템을 이용하여 실제 가공에서 이송속도 스케줄링을 수행하였다. 그림 5와 같은 포켓 가공 형상을 평 엔드밀을 이용하여 가공하였고, 이에 대한 이송속도 스케줄링을 시험하였다. 그림 6과 같이 이송속도 스케줄링 후 절삭력은 기준 절삭력인 300N 정도로 일정하게 유지되고 있으며, 가공 시간이 약 33% 단축되는 효과를 보여준다. 볼 엔드밀링에 대한 이송속도 스케줄링을 그림 7과 같은 홈이 있는 시편의 경사 가공에 적용하여 보았다. 그림 8은 스케줄링 전·후 절삭력의

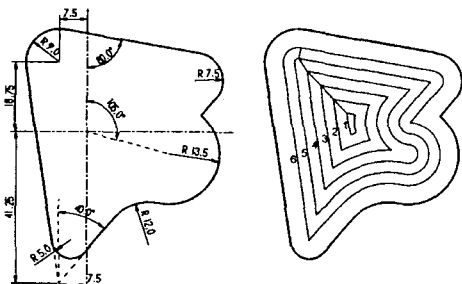


Fig. 5 Workpiece geometry for flat end milling.

측정값이며, 기준 절삭력인 150N으로 일정하게 유지되고 있음을 볼 수 있다. 가공 시간은 약 10% 단축되었으며, 스케줄링 전의 과도한 절삭 조건으로 인한 공구 파손 위험을 제거하였다. 그리고 이송속도 스케줄링을 그림 9와 같은 실제 금형 형상의 가공에 적용하였다. 총 5개의 NC 코드로 이루어진 금형 가공에서 스케줄링 후 전체 가공 시간은 25,052초에서 14,267초로 43% 감소하였다.

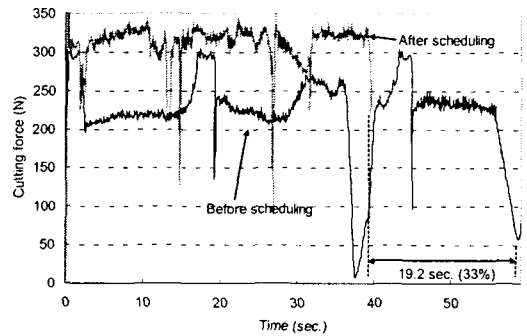


Fig. 6 Comparison of cutting force in flat end milling before /after feedrate scheduling.

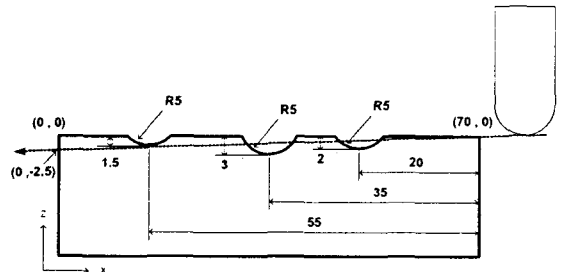


Fig. 7 Workpiece geometry for ball end milling.

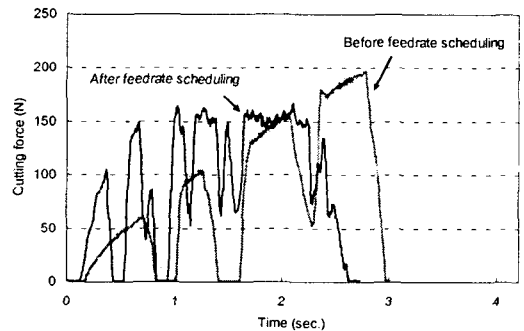


Fig. 8 Comparison of cutting force in ball end milling before/after feedrate scheduling.

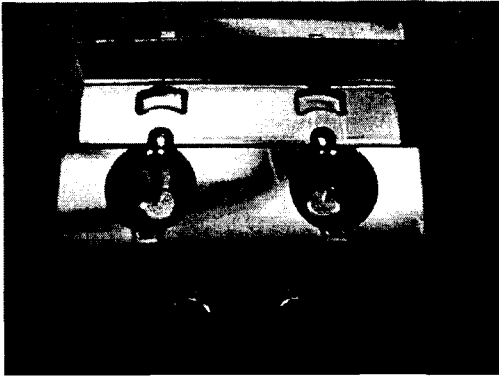


Fig. 9 Machined part with feedrate scheduled NC codes.

5. 결론

본 논문에서는 CNC 가공의 정밀 절삭 시뮬레이션 및 이송속도 스케줄링 시스템을 개발하였다. ME Z-map과 절삭 조건에 독립적인 절삭력 계수를 사용한 절삭력 모델을 사용함으로써 시뮬레이션의 정밀도 및 효율성을 높였다.

개발된 시스템은 공작기계 사용자에게 절삭력 예측을 통한 절삭 조건의 검증 및 최적의 이송속도를 제공해 주기 때문에 생산성 향상, 다품종·소량 생산 체제에 대한 적응성, 초보자도 쉽게 전문적인 가공을 수행할 수 있다는 점 등 여러 가지 측면에서 매우 유용한 도구가 될 것이다. 또한 현재의 CAM 기술과 병합된다면 CAM 기술의 진보를 유도할 수 있고 국내 CAM 소프트웨어의 국제 경쟁력 향상에도 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 (주)터보테크 주관의 2003년도 산업기반기술개발사업의 위탁과제의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) <http://www.cgtech.com>
- (2) W. P. Wang, 1988, "Solid Modeling for Optimizing Metal Removal of Three-dimensional NC End Milling," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 57-65.
- (3) K. W. Lee, S. D. Noh, D. M. Sheen, H. S. Hahn, 2000, "NC Code Post-Processor Considering Metal Removal Rate," *J. Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 116-123.
- (4) A. D. Spence, Y. Altintas, 1994, "A Solid Modeller Based Milling Process Simulation and Planning System," *J. of Engineering for Industry*, Vol. 116, pp. 61-69.
- (5) Y. S. Tarn, Y. Y. Shyur, B. Y. Lee, 1995, "Computer-added Generation of the Cutting Conditions in Pocket Machining," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 51, pp. 223-234.
- (6) B. K. Fussell, R. B. Jerard, J. G. Hemmett, 2001, "Robust Feedrate Selection for 3-Axis NC Machining Using Discrete Models," *J. of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 123, pp. 213-224.
- (7) H. U. Lee, D. W. Cho, 2003, "Accurate Milling Process Simulation Using ME Z-map Model," *Proceedings of 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress*, Washington, D.C., November 15-21.
- (8) W. S. Yun, D. W. Cho, 2001, "Accurate 3D Cutting Force Prediction Using Cutting Condition Independent Coefficients in End Milling," *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, No. 4, pp. 463-478.
- (9) J. H. Ko, D. W. Cho, 2002, "Accurate 3D Cutting Force Prediction Using Cutting-Condition-Independent Coefficients In Ball-End Milling," *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, Vol. XXX, pp. 321-328.
- (10) H. U. Lee, D. W. Cho, 2003, "An Intelligent Feedrate Scheduling Based on Virtual Machining," *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 22, pp. 873-882.