

〈論 文〉

5축 CNC가공의 검증에 관한 연구

김찬봉* · 양민양**

(1993년 6월 10일 접수)

A Study on the Verification of 5-Axis CNC Machining

Chan Bong Kim and Min Yang Yang

Key Words : 5-axis NC(5축 수치제어), CAD/CAM(컴퓨터원용설계 및 가공), Verification (검증), Z-Map, Part Program(파트프로그램)

Abstract

5-axis CNC machining is being used in the manufacturing of tire mold, screw, and turbine blade because it can produce complex workpiece more efficiently and accurately than 3-axis CNC machining does. However, it is difficult to calculate the CL data in 5-axis CNC machining. This paper describes an efficient method to modify and edit the NC code and a data structure for representation of the workpiece produced by 5-axis CNC machining. Wireframe display of tool path and shading display of workpiece are used to represent verification results. Machining errors can be evaluated quantitatively using the data structure based on the workpiece data model. The methods are implemented in a program with an IBM-PC and MS-Windows.

1. 서 론

5축 CNC가공은 3축 가공으로는 불가능한 형상을 가공할 수 있고 가공시간 및 후처리 시간을 줄일 수 있기 때문에 높은 생산성과 정밀도를 얻을 수 있다. 이러한 장점 및 특성으로 인하여 5축 가공은 스크류, 타이어 금형, 터빈블레이드, 항공기 부품 생산 등에 많이 사용되고 있다.⁽¹⁾

그러나, 3축 가공에서는 곡면과 공구의 접촉(cutter contact : CC)에서 곡면의 법선방향으로 공구의 반경만큼 이동하여 공구중심점(cutter location : CL)을 구하게 되지만, 5축 가공에서는 공구의 중심점과 공구의 두 방향의 기울임을 함께 계산해야 한다. 그러므로 3축 가공에 비하여 5축 가공에서는 기하학적 복잡성이 증대되어 공구제작 산출이 매우 어

렵다.

현재 CAD/CAM시스템은 3축 가공에는 많이 이용되고 있지만 5축 가공에는 널리 이용되고 있지 못하다. 더욱이 NC 공구제작의 검증시스템도 3축에 국한된 것이 많고, 5축 가공의 검증시스템은 대부분 제한된 기능만 사용할 수 있기 때문에 5축 가공의 사용이 어려운 실정이다.

3축 가공은 공구의 움직임을 와이어프레임(wireframe)으로 도시하여 검증할 수 있고, 가공된 공작물을 기존의 솔리드모델을 이용하여 쉽게 검증할 수 있다. 그러나, 5축 가공의 검증은 단순히 공구의 3차원 이동을 와이어프레임으로 도시하는 것만으로는 불충분할 뿐만 아니라 기존의 솔리드모델을 이용하여 5축 가공에 의하여 생성되는 공작물을 표현하는 것은 부적절할 경우가 많다.

컴퓨터를 이용한 NC 검증은 컴퓨터의 빠른 처리속도와 그래픽의 우수성으로 인하여 NC 파트프로그램내의 오류를 효과적으로 찾을 수 있게 하지

*한국과학기술원 정밀공학과

**정회원, 정밀공학과 한국과학기술원

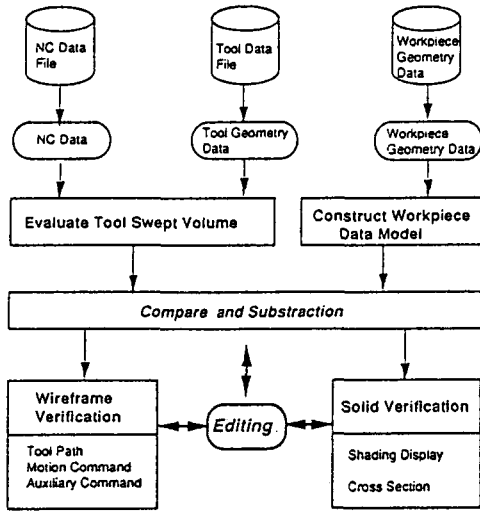


Fig. 1 Structure of 5-axis CNC verification system

만 완벽한 검증은 어렵다. NC 파트프로그램의 오류는 어느정도 컴퓨터의 검증을 이용하여 찾아낼 수 있지만 불가능할 경우에는 시가공(test cutting)을 거치거나 실가공을 한 후에 측정결과를 바탕으로 다시 수정해야 한다.

본 연구에서는 5축 가공의 검증 및 편집을 위한 시스템 개발을 위하여 공구궤적의 와이어프레임 도시방법과 5축 가공에서 생성되는 공작물의 형상을 묘사할 수 있도록 Extended Z-Buffer 개념을 응용한 데이터 구조를 개발하였다. (Fig. 1)

2. NC 공구궤적 검증시스템 분류

기존에 개발된 NC 공구궤적의 검증시스템을 분류하면 크게 공작물 데이터 기반시스템(workpiece data-based system)과 그래픽 기반시스템(view-based system)으로 나눌 수 있다. 첫번째 방법은 공작물의 형상을 솔리드모델을 이용하여 나타내고 이것으로부터 공구의 이동에 의해 형성되는 체적을 소거하여 가공상황을 묘사하는 방법이다. 이 방법은 가공에 의하여 생성되는 공작물의 형상을 정량적으로 나타낼 수 있고, 공작물의 데이터를 창성한 후 여러 각도에서 볼 수 있고, CAD 데이터와 비교 검토가 가능하다는 등 여러 가지 장점이 있다. 그러나 이 방법은 계산이 복잡하기 때문에 NC 데이터 수가 많을 경우 적용하기 어렵다. 솔리드모델(solid model)을 나타낼 수 있는 B-rep(boundary

representation), CSG(constructive solid geometry),^(2,3) Octree,^(4,5) Voxel(volume element) 등⁽⁶⁾이 공작물 기반시스템에 이용되고 있다. 또한, Z-map을 이용한 방법은 데이터 구조가 단순하면서 실제 가공상황과 매우 비슷하게 공작물의 형상을 창성할 수 있어 많이 이용되고 있다. 그러나 원하는 정밀도를 얻기 위해서는 많은 데이터 용량과 계산시간이 필요하게 된다.^(7,8)

공작물 데이터 기반시스템과는 달리 그래픽 기반시스템(view-based system)은 가공중 변하는 공작물의 형상데이터를 변경하는 것이 아니라 단순히 가공상황을 화면상에 그래픽 처리하여 시각적인 효과만을 얻는 방법이다. 이 방법은 계산속도는 상대적으로 빠르지만 가공오류를 정량적으로 평가할 수 없고, 한번 그래픽 처리한 후 다른 각도에서 보고자 할 경우 다시 계산해야 하는 번거로움이 따른다.^(9~11)

기존에 개발된 NC 공구궤적 검증시스템 중 5축 검증이 가능한 것으로는 모두 그래픽 기반시스템이기 때문에 시각효과는 신속히 얻을 수 있으나 공작물 기반시스템이 갖는 효과는 얻을 수 없는 한계를 갖는다.^(12,13)

기존 NC 검증시스템의 분류로부터 얻을 수 있는 NC 검증시스템의 요구조건으로는 가공중 발생하는 공작물의 형상을 정량적으로 나타낼 수 있는 평가 기능이 있어야 하며 이러한 작업을 빠른 시간에 수행할 수 있어야 한다는 것이다. 즉, 높은 정밀도와 빠른 처리속도를 얻을 수 있어야 한다. 본 연구에서는 이러한 요구조건을 만족시키는 5축 NC 공구궤적 검증시스템에 관하여 연구하였다. 본 연구를 통하여 개발된 5축 NC가공의 검증시스템에서는 와이어프레임을 이용하여 공구궤적을 도시하여 검증과 수정을 할 수 있도록 하였으며, Extended Z-Buffer 모델⁽¹⁴⁾을 응용하여 공작물의 형상을 묘사하였다.

3. 5축 공구궤적의 검증

공구궤적의 와이어프레임 도시는 처리속도가 빠르기 때문에 검증에 효과적으로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 와이어프레임을 이용하여 화면상에 그려지는 공구궤적과 그 공구궤적에 해당하는 NC 파트프로그램을 이중 연결구조(double linked list)로 연결하여 검증할 뿐만 아니라 편집도 용이하게 하

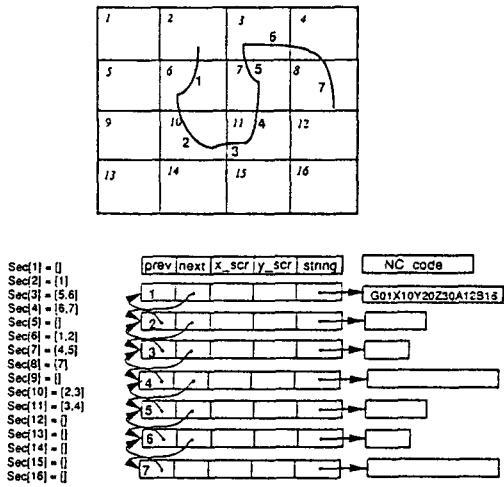


Fig. 2 Data structure and sectioning of the graphical screen

였다. 즉, NC 파트프로그램의 각 라인과 그에 대한 공구궤적을 연결하여 공구궤적을 선택했을 때 그에 해당하는 NC 파트프로그램을 찾아 수정하거나, 잘못된 NC 파트프로그램의 일부분을 선택했을 때 그에 대한 공구궤적을 찾아 확인 및 수정할 수 있도록 하였다.⁽¹⁵⁾

Fig. 2에 나타낸 것과 같이 전체 그래픽 화면을 16등분하여 각각의 구간을 지나는 공구궤적에 대한 정보를 Sec[]에 저장한다. NC 파트프로그램의 이 중 연결구조는 화면에 도시된 2차원 좌표를 갖고, 가변길이를 갖는 문자열(string)을 이용하여 NC 파트프로그램을 저장하였다. 만약, 화면위의 공구궤적을 선택하였을 경우 그 영역에 속하는 공구궤적중에서 화면 좌표를 이용하여 최단 거리에 있는 공구궤적과 그에 대한 NC 파트프로그램을 찾을 수 있으며, NC 파트프로그램을 선택할 경우도 그 화면좌표로부터 공구궤적을 직접 찾을 수 있다.

4. 공작물 형상의 검증

4.1 5축 가공물을 위한 데이터 구조

기존의 3축 가공의 검증에 이용된 Z-map은 공작물이 차지하는 x-y 평면을 일정한 크기로 분할하고 각 격자에 대한 높이를 저장하는 형태이다. 이러한 Z-map의 데이터는 이차원 배열을 이용하면 간단하게 나타낼 수 있다. 그러나 Z-map은 격자에 대하여 하나의 높이만을 나타낼 수 있으므로 5축 가공

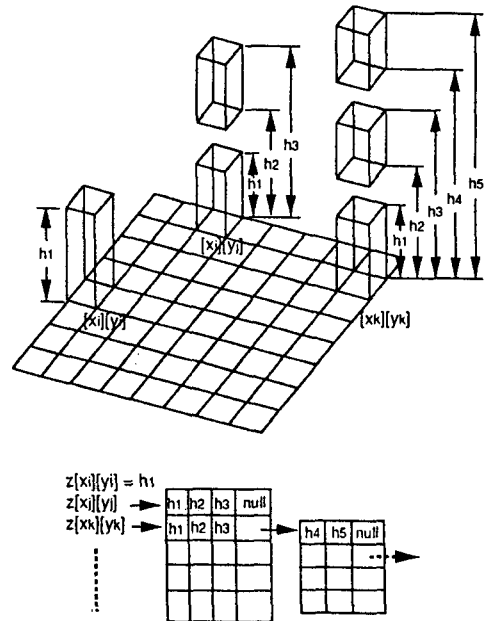


Fig. 3 The extended Z-map for 5-axis solid modeling

의 검증은 불가능하다. 즉, 5축 가공에서는 하나의 격자에서 높이가 1개 이상 있는 경우가 필요하므로 Z-map을 직접 이용할 수 없다

본 연구에서는 컴퓨터 그래픽에서 은선제거 방법으로 사용되고 있는 Extended Z-buffer 모델과 Z-map 모델을 응용하여 5축 가공으로 생성되는 공작물 형상을 기술하는데 이용하였다. Fig. 3에서 나타낸 것처럼 격자점이 하나의 높이만을 가질 때는 Z-map의 배열을 이용하고, 격자점에 하나 이상의 높이를 가질 때는 그 격자점에 대하여 별도의 데이터를 이용하였다. 대부분의 5축 가공부품에서 많은 부분은 x-y 격자점에 하나의 높이만을 가지며 특수한 부분만이 한개 이상의 높이를 요하기 때문에 Fig. 3과 같이 나타낼 경우 5축 가공물의 형상을 효과적으로 기술할 수 있으며, 격자점의 높이에 제한없이 이용 가능하다.

4.2 공작물 형상 데이터의 생성

공구의 이동에 의해 가공되는 공작물의 형상 변화를 묘사하기 위해서는 공구의 이동이 있을 때마다 공구의 이동궤적을 공작물의 형상 데이터로부터 소거하여야 한다. 공구의 이동에 의해 형성되는 이동체적(swept volume)은 하나의 포락면을 형성하는데, 이러한 포락면을 구하기 위해서는 공구의 이

동시 매 순간마다 공구의 이동체적을 합해야 한다. 공구의 이동에 의하여 형성되는 체적을 S 라 할때 S 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \bigcup_{i=0}^{\infty} G(t_i) \quad (1)$$

여기서, $G(t_i)$ 는 공구의 이동순간 t_i 에서 공구의

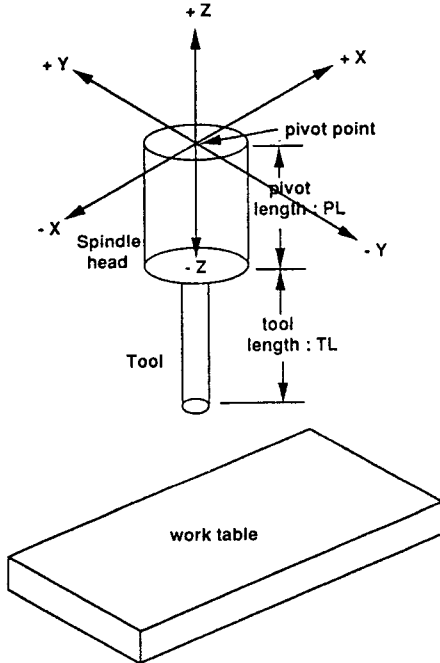


Fig. 4 Axis orientation of 5-axis vertical machine

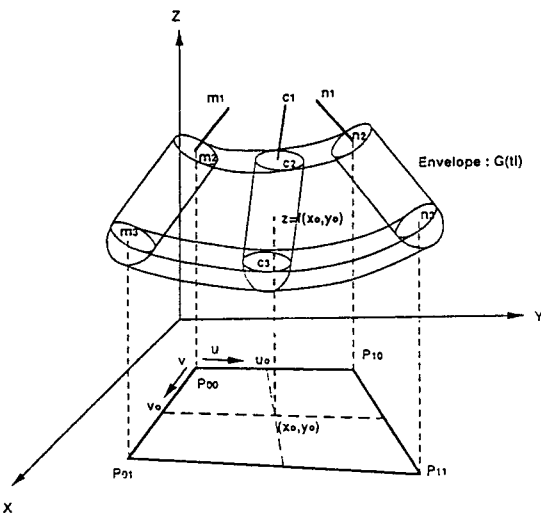


Fig. 5 Calculation of height of envelope for $x_0 - y_0$.

이동에 의한 체적이다.

Fig. 4와 같이 5축 가공기의 좌표축을 설정하였을 경우 한 스텝(step)의 공구 이동에 의하여 Fig. 5와 같이 포락면이 형성되고, 포락면을 구성하는 공구의 시작점(m_2, m_3)과 끝점(n_2, n_3)을 x-y평면에 투영시켜 단위면(patch)을 만들면, 이 단위면은 x-y 평면내에 매개변수 u, v 로 나타낼 수 있는 매개변수형 단위면 $P(u, v)$ 의 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 a_{ij} u^i v^j \quad (2)$$

여기서, $u, v \in [0, 1]$ 이다.

포락면이 차지하는 x-y 평면내에 높이값 Z 를 구하고자 하는 격자 x_0, y_0 가 주어졌을 때 그 격자에 해당하는 포락면의 높이를 얻기 위해서는 x_0, y_0 에 해당하는 단위 면의 매개변수 u_0, v_0 를 구해야 한다. x_0, y_0 가 주어졌을때 그에 대응하는 u_0, v_0 를 구하기 위해서는 Newton Raphson방법을 이용하여 비선형 방정식을 풀어야 한다. 즉, x_0, y_0 에 대한 u_0, v_0 의 값을 구하기 위하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1u} & m_{1v} \\ m_{2u} & m_{2v} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_0 - p_x(u_i, v_i) \\ y_0 - p_y(u_i, v_i) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$$m_{1u} = \frac{\partial p_x(u_i, v_i)}{\partial u}$$

$$m_{1v} = \frac{\partial p_x(u_i, v_i)}{\partial v}$$

$$m_{2u} = \frac{\partial p_y(u_i, v_i)}{\partial u}$$

$$m_{2v} = \frac{\partial p_y(u_i, v_i)}{\partial v}$$

식(3)에 나타난 매개변수의 증분에 대한 정보를 이용하여 새로운 매개변수 u, v 값을 다시 설정하여 반복적으로 매개변수를 구한다.

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u \quad (4)$$

$$v_{i+1} = v_i + \Delta v \quad (5)$$

이때, 매개변수 u 는 NC코드의 한 블록에 의하여 이동하는 공구의 시작점과 끝점 사이에 놓인 공구의 위치를 나타내게 된다.

공구의 피벗점(pivot point)이 시작점(m_1)에서 끝점(n_1)으로 이동을 하였을 경우 공구의 삼차원 좌표 x, y, z 와 두 방향 기울임 각도 a, b 의 변화량을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_i = n_i - m_i, [i=x, y, z, a, b] \quad (6)$$

공구시작점($u=0$)과 끝점($u=1$) 사이 임의의 위치에 공구가 놓여 있을 때 피봇점을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_{1i} = m_i + d_i u, [i=x, y, z, a, b] \quad (7)$$

이러한 계산식으로부터 높이값을 알고자 하는 격자 x_0, y_0 에 해당하는 공구의 위치는 u_0 로 나타낼 수 있고, 그 때의 공구의 위치(c_2, c_3)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} c_{2x} &= c_{1x} - PL \sin(c_{1a}) \\ c_{2y} &= c_{1y} + PL \sin(c_{1a}) \\ c_{2z} &= c_{1z} - PL \cos(c_{1a}) \cos(c_{1b}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} c_{3x} &= c_{1x} - (PL + TL) \sin(c_{1a}) \\ c_{3y} &= c_{1y} + (PL + TL) \sin(c_{1a}) \\ c_{3z} &= c_{1z} - (PL + TL) \cos(c_{1a}) \cos(c_{1b}) \end{aligned} \quad (9)$$

공구의 이동체적에 대한 격자정보가 결정되면 공작물의 격자정보와 비교하여 공작물에 대한 정보가 갱신된다. 초기 공작물의 형상을 $W(0)$ 라 하고, i 번째 공구의 이동에 의하여 생성되는 공작물의 형상을 $W(i)$ 라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W(i) = W(i-1) - S(i) \quad (10)$$

여기서, $W(i)$ 는 i 번째까지 공구이동에 의하여

생성되는 공작물의 형상이고, $S(i)$ 는 i 번째 공구 이동에 대한 체적

5. 시스템의 개발 및 적용예

본 연구에서 제시한 방법을 이용한 5축 NC 가공의 검증시스템은 IBM486 PC에서 MS-Windows 환경하에서 운용될 수 있도록 MS-C와 MS-SDK (software development kit)를 이용하여 개발하였다. MS-Windows 환경을 이용하였기 때문에 다중 화면분할(multi-windows)이 가능하고 사용자가 사용하기 편한 그래픽 기능을 부여할 수 있도록 하였다.

Fig. 6은 지름이 16 mm인 터빈블레이드 형상을 음영처리한 모습과 가공하기 위한 공구궤적을 와이어프레임으로 도시하고 각 공구궤적에 대한 NC 파트프로그램을 연결하여 보여주는 모습이다. 이렇게 함으로써 잘못된 공구궤적을 수정할 수 있도록 하였다. Fig. 7은 검증한 결과를 와이어프레임과 음영처리한 모습, 그리고 단면을 동시에 나타낸 것이다. 공작물 형상데이터를 생성하였기 때문에 여러 각도에서 볼 수 있을 뿐만 아니라 단면까지도 도시해 볼 수 있는 효과를 얻을 수 있다. Fig. 8은 검증이 완료된 터빈블레이드를 Cincinnati Millacron

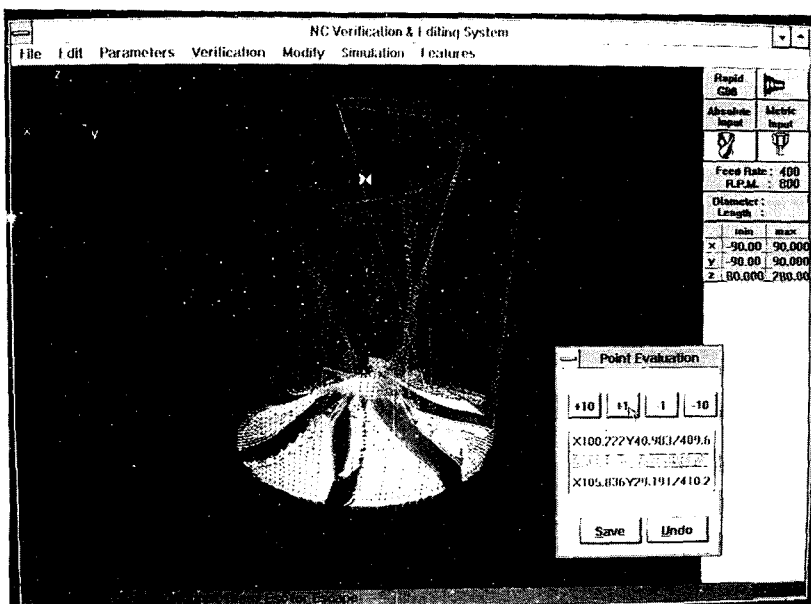


Fig. 6 Co-display of NC data and NC tool path for efficient editing

5축 가공기에서 공구 반경이 5 mm인 블엔드밀을 이용하여 가공하는 모습이며, Fig. 9는 가공이 완료된 터빈블레이드의 모습을 보여주고 있다.

지름이 16 mm인 공작물을 가로 세로 각각 100개의 격자로 나타냈기 때문에 격자간의 간격은 1.6 mm가 되고, 이러한 격자간의 간격은 음영처리할 경우 직선으로 근사화하여 나타나기 때문에 오차를

포함하게 된다. 이러한 표본오차를 줄이기 위해서는 많은 격자로 나누어야 하는데 그렇게 될 경우 많은 기억용량과 계산속도를 필요로 하게 된다.⁽¹⁶⁾ 그러므로 효과적인 검증을 하기 위해서는 검증하고자 하는 공작물의 크기와 형태, 가공정밀도 그리고 컴퓨터의 용량 등을 종합적으로 검토하여 격자수를 설정하여야 한다.

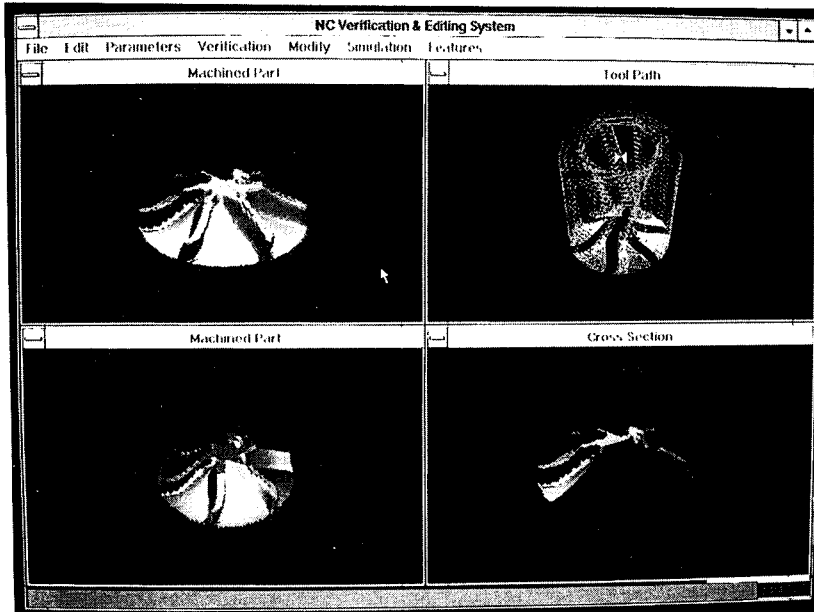


Fig. 7 Display of verification results

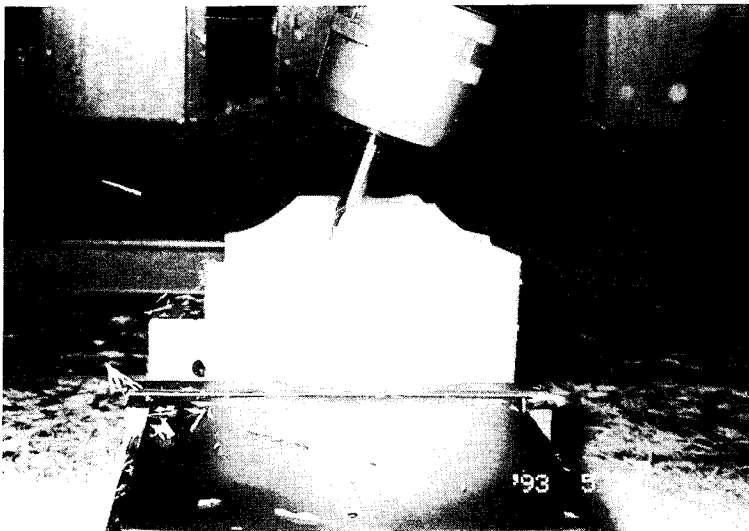


Fig. 8 5-axis machining of turbine blade

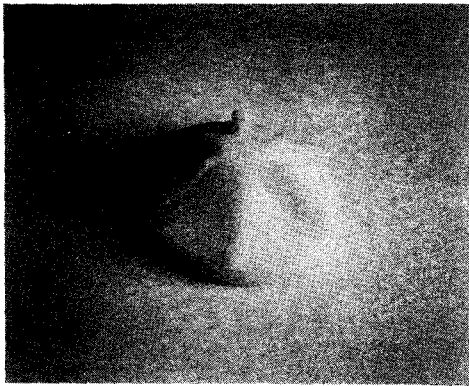


Fig. 9 Machined part of turbine blade

6. 결 론

본 연구에서는 5축 CNC 가공의 검증을 위한 시스템을 개발하였다. 5축 가공의 효과적인 검증을 위해서 와이어프레임을 이용한 공구궤적도시와 5축 가공시 형성되는 공작물의 모양을 적절히 묘사할 수 있는 데이터 구조를 이용하였다. 3축 가공의 검증시스템이나 그래픽 처리중심의 5축 가공시스템보다 발전된 개념을 도입한 것이라 할 수 있다. 가공 상황을 빠른 속도로 처리할 수 있었으며, 가공중 발생하는 공작물의 형태를 적절히 표현 할 수 있어서 가공중인 공작물의 형상을 여러각도에서 볼 수 있었고, 이로 인하여 가공상태를 정량적으로 평가할 수 있었다. 즉, 5축 가공의 검증을 위한 공작물 기반 검증시스템을 개발함으로써 계산속도와 정확성에서 한층 향상된 검증결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서 이용한 데이터 모델을 x-y 평면을 일정한 격자로 나누는 과정에서 표본오차(sampling error)를 갖는 문제점이 있으며 원하는 정밀도를 갖기 위해서는 많은 격자로 나누어야 하며 그렇게 될 경우 많은 계산량이 필요하다는 한계를 갖지만, 기존의 솔리드모델을 이용할 경우보다 빠른 처리속도와 검증 결과를 나타낼 수 있으며, 공작물 형상 데이터모델을 이용하였기 때문에 가공오차에 대하여 정량적으로 평가가 가능한 특징을 갖는다.

참고문헌

(1) 조현덕, 1993, "자유곡면을 위한 5축 정밀가공에 관한 연구" 한국과학기술원, 박사학위논문.

- (2) Mikami, S. and Kakazu, Y., 1990, "A Hardware Engine for NC Tool Paths Generation/Simulation-a CSG Oriented Approach." Proceedings of the First International Conference on New Manufacturing Technology, Chiba, pp. 141~146.
- (3) Shpitalni, M., Letan, A. and Maaian, G., 1987, "Switching Functions Based Geometric Modeling Language and Its Application to Numerical Control Program Verification," Annals of the CIRP, vol. 73~76.
- (4) Kawashima, Y., Itoh, K., Ishida, T., Nonaka, S. and Ejiri, K., 1990, "Development of and NC Machining Simulator-System Configuration-," JSPE-56-05, pp. 115~120.
- (5) Yamaguchi, K., Kunii, L., Rogers, D.F., Satterfield, S.G. and Rodriguez, F.A., 1984, "Computer Integrated Manufacturing of Surfaces Using Octree Encoding," IEEE CG & A, 1984, pp. 60~65.
- (6) Kishinami, T., Kanai, S., Shinjyo, H., Nakahara, H. and Saito, K., 1989, "An Application of Voxel Representation to Maching Simulator," JSPE-55-01, pp. 105~110.
- (7) Saito, T. and Takahashi, T., 1991, "NC Machining with G-Buffer Method" Computer Graphics, vol. 25, No. 4, July.
- (8) 최병규, 1990, "Soft-Master CAM System," CIM을 위한 차세대 솔리드모델러: 이론 및 응용, 한국과학기술원 산학협동공개강좌, pp. 240~258.
- (9) Oliver, J. H. and Goodman, E. D., 1990, "Direct Dimensional NC Verification," CAD, Vol. 22, No. 1, Jan./Feb., pp. 3~9.
- (10) Wang, W. P., "Solid Modeling for Optimizing Metal Removal of Three-Dimensional NC End Milling," Journal of Manufacturing System, Vol. 7, No. 1.
- (11) Wang, W. P. and Wang, K. K., 1986, "Geometric Modeling for Swept Volume of Moving Solids," IEEE CG & A, pp. 8~7, Dec.
- (12) Takeuchi, Y. and Idemura, T., 1991, "5-Axis Control Machining and Grinding Based on Solid Model," Annals of the CIRP, Vol. pp. 455~458.

- (13) Takeuchi, Y. and Watanabe, T., 1992, "Generation of 5-Axis Control Collision Free Tool Path and Post Processing for NC data," Annals of the CIRP, Vol. pp. 539~542.
- (14) Takata, S., Tsai, M. D., Inni, M. and Sata, T., 1989, "A Cutting Simulation System for Machinability Evaluation Using a workpiece Model," Annals of the CIRP, Vol. pp. 417~420
- (15) Kim, C. B., Park, S. H. and Yang, M. Y., 1992, "Tool Path Verification and NC Program Editing Under a Multi-Window Environment," Proceedings of Japan/USA Symposium on Flexible Automation, Vol. 1, ASME, pp. 409~414.
- (16) 박세형, 1992, "볼엔드밀을 이용한 3차원 CNC 가공의 시뮬레이션" 한국과학기술원 박사 학위논문, pp. 35~40.