

절삭부하 예측을 통한 NC코드 후처리시스템

이기우*, 노상도*, 신동목*, 한형상*

NC Code Post-Processor Considering Metal Removal Rate

Kiwoo Lee*, Sang-do Noh*, Dongmok Sheen*, Hyung Sang Hahn*,

ABSTRACT

This paper presents an NC code post-processor that adjusts feedrates to keep the variation of metal removal rate along the tool paths minimum. Metal removal rate is estimated by virtually machining the part, whose surface model is built from a series of NC codes defined in operation plan, with cutting-tool-assembly models, whose geometry are defined in a machining database. The NC code post-processor modifies the feedrates by the adjustment rules, which are based on the machining knowledge for effective machining. This paper illustrates a procedure for grouping machining conditions and we also show how to determine an adjustment rule for a machining-condition group. An example part was machined and it shows that the variation of cutting force was dramatically reduced after applying the NC code post-processor. The NC code post-processor is expected to increase productivity while maintaining the quality of the machined part.

Key Words : NC Code(NC코드), Post-Processing(후처리), Metal-Removal Rate(금속제거율), Feedrate Adjustment(이송속도 조정), Virtual Machining(가상가공)

1. 서론

소비자 욕구의 다양화에 따른 극도의 제품 수명 주기 단축과 시장개방에 따른 기업간 경쟁 격화로 신속하고 경제적으로 제품을 생산하는 기술의 확보는 기업생존의 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히 자동차 산업은 소비자의 기호 변화에 더하여 환경 보호와 안전도 향상 그리고 연비 향상에 대한 사회적 요구의 증가 등으로 모델의 수명주기 단축 추세가 가속화되어 이에 대응하는 기술력 향상이 시급히 요구되고 있다. 자동차 차체 프레스 금형은 차량의 외관을 구성하는 차체용 박판 구조물의 프레

스 성형에 필요한 공구로서 종류별로 하나씩만 제조되고 장시간의 가공작업이 소요되는 전형적인 기계가공 제품이다. 금형 설계 및 제작에 소요되는 시간은 자동차의 모델개발 및 양산에 소요되는 기간 중에서 가장 오랜 기간을 점유하고, 개발일정상 중요경로에 속하여 금형 제작시간 단축의 효과는 매우 크다.^[1] 이에 따라 금형의 설계와 가공분야에서 CAD/CAM 기술이 적극적으로 활용되고 있으며,^[6] 특히 실제의 가공 공정의 과정과 결과를 가시화하고 검증하며, 관련된 여러 정보를 통합, 관리할 수 있는 가상가공(Virtual Machining) 기법의 적용이 활발히 시도되고 있다.^{[4][5]}

* 고등기술연구원 생산기술연구소

본 논문에서는 자동차 차체 프레스 급형의 기계 가공작업을 대상으로, 가공품질을 유지하면서 가공 생산성을 증가시키는 NC코드 후처리시스템을 개발하였다. 이를 위하여 가공방법, 공구/홀더 형상 등의 각종 정보를 통합하여 관리하고, 하나의 급형 가공에 순차적으로 사용되는 여러 개의 NC데이터를 분석하여 가공형상 모델링을 수행, 가공물 형상과 절삭부하를 예측할 수 있는 가상가공 기능을 구현하였다. 개발된 소프트웨어를 이용하면, 가상가공 수행결과를 바탕으로 가공과정과 최종 가공 결과를 검증할 수 있으며 전문가의 가공지식을 기반으로 한 룰베이스를 구성, 자동으로 가공조건을 결정하고 이송속도를 조정하는 데이터를 기반으로 한 가공을 실현하여 다양한 종류의 급형 가공작업의 가공 생산성을 높일 수 있다. Fig. 1은 절삭부하 예측을 통한 NC코드 후처리시스템을 적용한 경우, NC데이터를 작성하고 가공 작업을 수행하는 순서이다.

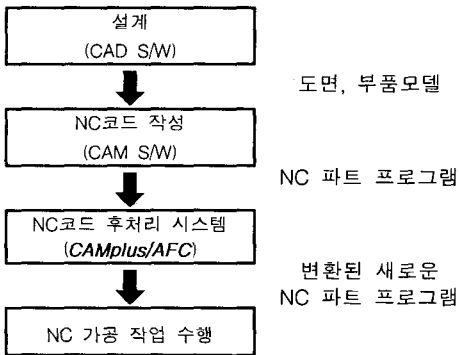


Fig. 1 Procedure for post-processing of NC codes

2. 절삭부하 예측 및 이송속도 조절

각 가공작업에 대한 NC코드와 공구종류, 홀더 형상, 가공방법 등의 정보를 통합, 관리하고 이를 기반으로 가공형상과 품질, 절삭부하 등을 예측할 수 있는 가상가공 기능을 개발하였다. 가상가공 모델은 단순한 공구경로 시뮬레이션과는 달리 가공이 이루어지는 전과정과 최종 가공결과에 대하여 가공된 형상, 가공면 품질, 절삭부하 등 각종 정보를 미리 예측하고 모의 검증할 수 있다. Fig. 2는 NC코드를 분석하여 형상모델링과 가공부하 예측을 수행하고, NC코드를 후처리하는 순서도이다.

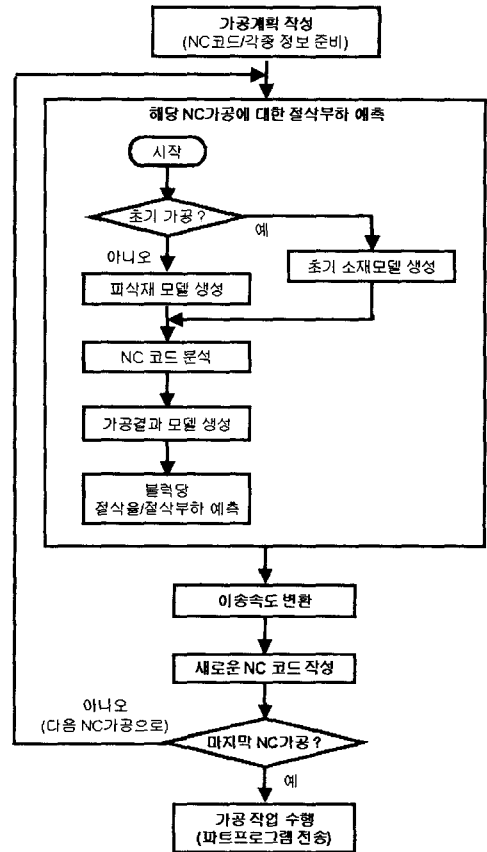


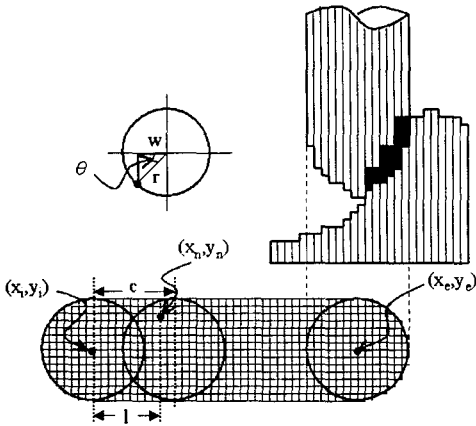
Fig. 2 Flowchart for post-processing of NC codes

2.1 가공형상 모델링

NC코드를 이용하여 가공형상을 계산, 표현하는 방법에 대하여는 많은 연구가 진행되어 왔으며, 대체로 솔리드모델을 이용하는 방법들과 Point Set을 이용하는 방법들, 그리고 그래픽 이미지를 이용하는 방법들로 나눌 수 있다.^[2] 여러 방법들이 각각의 장·단점을 가지고 있으나, Point Set으로 가공형상을 표현하는 방법들 중 일정한 격자점에서만 높이 값을 가지는 방법인 Z-map 방법은 가공형상을 실제형상과 유사하게 표현할 수 있으며, 간단한 데이터 구조이므로 효율적인 계산방법을 개발하기 쉽다는 장점 등으로 인하여 많이 사용되고 있다.^{[3][4]}

본 논문에서는 가공형상 모델로 Z-map 방법을 이용하였다. 가상가공 모듈에서는 실제 가공에서처럼 공구가 NC코드의 한 블럭에 따라 한번 움직일 때마다 가공물의 형상변화를 Z-map모델에 반영한

다. Z-map 모델은 각 격자점에서 하나의 높이값만으로 표현되므로, 공구가 움직일 때 공구가 접촉하는 영역에 대하여, 공구궤적면을 구하고, 이를 가공하기 전 피삭면의 높이값과 비교하여 낮은 경우 가공이 이루어지는 것으로 계산한다. 가공영역의 모든 격자점들에 대하여 이러한 방법으로 계산하면 가공면의 형상 모델을 얻을 수 있다. 공구궤적면의 계산은 Fig. 3과 같이 최병규^[2] 등에 의하여 제시된 계산모델을 사용하였다.



$$\Delta x = x_e - x_i, \Delta y = y_e - y_i, \Delta z = z_e - z_i$$

$$d_p = (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}, l = \{ \Delta x \cdot (x_n - x_i) + \Delta y \cdot (y_n - y_i) \} / d_p$$

$$w = | \Delta x \cdot y_n - \Delta y \cdot x_n + x_i \cdot y_e - x_e \cdot y_i | / d_n$$

$$\phi = \tan^{-1}(\Delta z / d_n), \theta = \cos^{-1}(w / r), t = r \cdot \sin \theta$$

$$h = t \cdot \sin \phi, c = l - h, z_n = z_i + c \cdot \tan \phi - t \cdot \cos \phi$$

Fig. 3 Modeling of Cutter Swept Surfaces

2.2 절삭부하와 이송속도 조정

개발된 NC코드 후처리 시스템에서는 예측된 절삭부하에 따라 이송속도를 조절하므로, 절삭부하의 정의에 따라 이송속도 변환 규칙이 결정된다. 본 논문에서는 절삭부하를 이론적으로 최대로 가공할 수 있는 소재 제거량에 대한 상대적인 소재 제거율로 아래와 같이 정의하여 사용하였다. 정의된 절삭부하는 절삭력을 바로 사용하거나 공구와 공작물의 접촉면적을 사용하는 등의 다른 방법들에 비하여 가공방법, 공구직경 등에 관계없이 여러 종류의 가공들을 상대적으로 비교할 수 있고, 현장 작업자들이 쉽게 이해하여 사용할 수 있다는 장점이 있다.

- Z방향으로만 절삭이 일어날 경우

$$\text{절삭부하} = \frac{\text{소재제거량}}{\pi \times \text{공구반경}^2 \times \text{공구경로길이}} \times 100$$

- 그외의 경우

$$\text{절삭부하} = \frac{\text{소재제거량}}{\text{날길이} \times \text{공구직경} \times \text{공구경로길이}} \times 100$$

가상가공에 의하여 예측된 절삭부하에 따른 이송속도 변환규칙은 가공 전문가가 경험이나 실험에 의거하여 작성되며, 데이터베이스에서 통합 관리된다. 개발된 후처리 시스템에서는 기준 이송속도를 지정하고 총 20단계로 절삭부하의 범위를 구분, 예측된 절삭부하에 따라 이송속도를 가·감할 수 있도록 구성하였고 금형의 종류와 가공방법, 공구 직경 등에 따라 각종 가공조건들과 이송속도 변환 규칙을 관리할 수 있도록 하였다.

3. CAMplus/AFC

본 연구에서 개발된 NC코드 후처리 시스템인 CAMplus/AFC의 구성은 Fig. 4와 같으며, 각 모듈의 기능은 다음과 같다.

NC코드 모듈

NC코드 표시기 ; NC코드를 나타내고, 가공/비가공 길이, 시간 등 각종 정보를 표시
 NC코드 편집기 ; NC코드를 불러오고 편집 수행
 공구경로 표시기 ; 해당 NC코드의 공구경로 표시

작업계획 모듈

작업계획 관리기 ; 하나의 금형 가공을 위한 작업 계획의 입력/수정/저장 수행
 공구정보 관리기 ; 각각의 작업에 대하여 사용되는 공구정보의 입력/수정/저장 수행
 계산정보 관리기 ; NC코드 분석, 모델링 등을 위한 각종 설정값들의 입력/수정 수행

가상가공 모듈

NC코드 해석기 ; NC코드 해석 기능 수행
 가공형상 해석기 ; NC코드에 따른 공구궤적면을 산출하여 가공형상을 예측
 피삭면 산출/표시기 ; 기 진행된 가공에 따른 피삭면 형상의 계산 및 표시 수행

가공결과 산출/표시기 ; 최종 가공결과와 계산 및 표시 수행

가상가공 표시기 ; 가상가공 진행 및 시각화 수행

이송속도 변환 모듈

절삭부하 표시기 ; 절삭부하 예측 결과의 시각화
 이송속도 변환규칙 관리기 ; 이송속도 변환 규칙의 입력 및 수정 수행

이송속도 변환기 ; 예측된 절삭부하와 변환 규칙에 의한 이송속도 변환

변환결과 표시기 ; 이송속도 변환 결과 표시

NC코드 모듈	작업계획 모듈
<ul style="list-style-type: none"> • NC코드 표시기 • NC코드 편집기 • 공구경로 표시기 	<ul style="list-style-type: none"> • 작업계획 관리기 • 공구정보 관리기 • 계산정보 관리기
가상가공 모듈	이송속도 변환 모듈
<ul style="list-style-type: none"> • NC코드 해석기 • 가공형상 해석기 • 피삭면 산출/표시기 • 가공결과 산출/표시기 • 가상가공 표시기 	<ul style="list-style-type: none"> • 절삭부하 표시기 • 이송속도 변환규칙 관리기 • 이송속도 변환기 • 변환결과 표시기

Fig. 4 Modules of CAMplus/AFC system

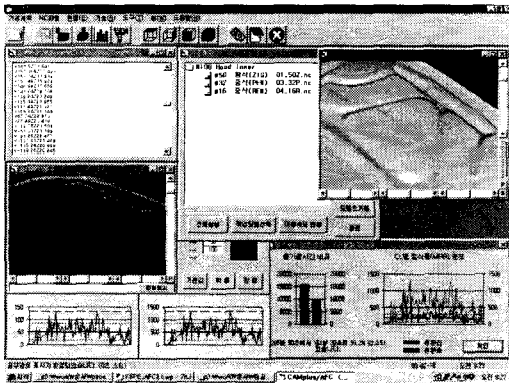


Fig. 5 CAMplus/AFC system

4. 이송속도 변환 규칙 결정

이송속도 변환 규칙을 결정하는 인자로는 여러 가지가 있으며, 크게 공구의 종류 및 직경, 공구 날

길이, 공구재질, 피삭재 재질, 가공종류 등으로 나눌 수 있다.^[7] 본 논문에서는 가공공정을 가공할 금형의 종류, 가공방법, 피삭재 재질, 공구직경으로 구분하고, 각각의 경우에 대해서 이론 및 실험적 배경, 작업자의 Know-how, 가공 Shop의 환경 등을 고려하여 여러 가지 가공조건들과 이송속도 변환 규칙을 결정하였다. 결정된 가공조건들과 규칙들은 데이터베이스에 저장되고, 추후 동일한 종류의 가공시에는 검색을 통하여 미리 정해놓은 가공조건들과 변환 규칙을 적용한다. 본 장에서는 실험적 방법으로 이송속도의 변환 규칙을 결정하는 과정을 한가지 경우의 예를 들어 설명하고, 절삭실험을 통하여 그 결과를 검증한다. 이를 위하여 가공시 절삭력을 측정, 저장하는 실험장치를 구성하였다.

4.1 절삭력 측정 실험장치

절삭조건, 이송속도 변환 규칙의 결정과 검증을 위한 절삭력 실험장치를 구성하였다. 가공기로는 수평형 머시닝센터(대우중공업, ACE-H63)를 사용하고, 절삭저항력은 Kistler사의 9366AB 압전형 공구동력계(Tool Dynamometer)를 머시닝 센터에 설치하고 그 위에 공작물을 고정하여 측정하였다. 공구동력계에서 얻어진 신호는 다채널 증폭기(5091, Kistler사)를 거쳐 PCI-MIO-16E-1 데이터 처리 시스템(National Instruments사)에서 A/D 변환을 한 후 PC로 전송하여 처리된다. Fig. 6은 구성된 절삭저항력 측정시스템의 개략도이다.

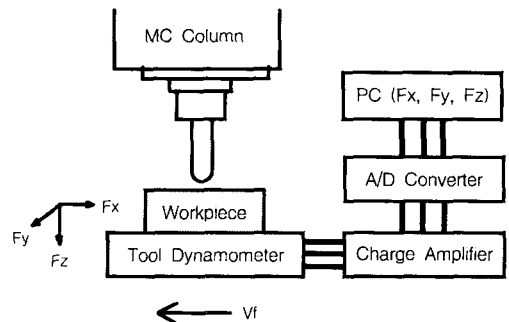


Fig. 6 Experimental setup

4.2 이송속도 변환 규칙의 결정 방법

이송속도 변환 규칙을 결정하는 과정은 크게 3 단계로 나눌 수 있다. 1단계로는 가공공정을 구분하고, 2단계로는 기준 절삭부하에 대한 기준 이송

속도를 결정하며, 3단계에서는 절삭부하에 대한 이송속도 변환 규칙을 결정한다. 본 논문에서는 가공 이송속도 변환 규칙을 결정하는 방법을 예를 들어 설명한다. Fig. 7은 이송속도 변환규칙의 결정과정을 나타낸 그림이다.

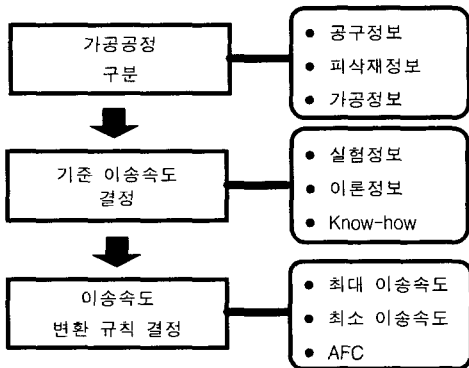


Fig. 7 Procedure for extracting rules

● 1 단계 : 가공공정 구분

금형가공에 대한 가공조건 및 이송속도 변환규칙은 공구정보, 피삭재 정보, 가공정보에 따라 하나의 그룹으로 분류하여 결정할 수 있다. 공구정보는 공구형상, 공구재질, 공구직경, 공구날길이 등으로 분류할 수 있으며, 피삭재 정보는 피삭재의 형상, 재질, 정밀도 등으로 분류할 수 있고, 가공정보는 가공방법, 가공조건 및 가공정도 등으로 분류할 수 있다.

Table 1 Grouping of rules: an example

Trunk → Outer → Draw → Lower Die → 황삭								
가공 구분	공구		피삭재 재질	가공 조건				이송속도 변환률
	직경	날장		Feed	rpm	t	Tol.	
황삭	50	40	FC30	600	1000	0.5	0.1	abc.rul
PENCIL	32	30	FC30	500	1200	0.5	0.05	bca.rul
황잔삭	16	30	FC30	1500	2500	0.5	0.05	cab.rul

Table 1은 자동차 프레스 금형의 트렁크 패널 (Panel)의 드로우 공정용 금형의 하형 다이의 형상부를 황삭할 때 황삭, 펜슬, 황잔삭의 3종류 가공공정에 대하여 이송속도 변환 규칙 대상을 분류한 일례를 나타낸 것으로서, 유사 패널(Panel)의 가공시

이전에 결정된 이송속도 변화 규칙을 사용할 수 있다.

● 2 단계 : 기준 이송속도 결정

가공조건과 이송속도 변환 규칙을 적용할 가공공정의 그룹이 결정되면, 그 대상의 절삭조건에 적합한 기준 이송속도를 결정하여야 한다. 기준 이송속도를 결정하는 방법으로는 이론에 의한 방법, 실험적 결과에 의한 방법, 작업자의 Know-how에 의한 방법 등이 있으며 본 논문에서는 실험을 통하여 결정하는 방법을 예시한다.

Table 2와 같은 실험조건 하에서 주축회전수와 절입깊이는 고정시키고 이송속도를 400~2,200 mm/min의 10단계로 변화시키면서 나타나는 절삭력의 분포를 분석하였다. 기준 이송속도는 절삭력의 급격한 증가, 공구진동이나 소음의 정도 등을 고려하여 가공에 무리가 나타나지 않는 최대 이송속도를 찾는 방법으로 결정한다.

Table 2 Conditions for Experiment

Workpiece	GM241 (FC계열)
Cutting tool	Ø30 Cermet Ball-endmill
Cutting speed	2000 rpm
Depth of cut	0.3 mm
Pickfeed	(Slotting)
Feedrate	400 - 2,200 mm/min
Cutting fluid	Dry

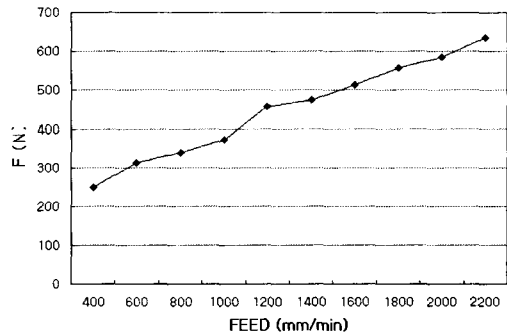


Fig. 8 Cutting force vs. Feedrate

Fig. 8은 실험결과를 나타낸 그림으로서, 각각의 절삭력은 이송분력(Fx)과 접선분력(Fy)의 합력의 크기로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 이송속도가 증가할수록 절삭력이 일정하게 증가하는 현상

이 나타났는데, 1000 mm/min과 1200 mm/min 구간에서 절삭력의 증가율이 다른 구간의 절삭력 증가율보다 크고 공구의 떨림과 소음이 증가하며, 가공 품질이 좋지 않았다. 그러므로 가공에 무리가 가지 않는 최고 이송속도 즉, 1000 mm/min을 Table 2와 같은 경우의 가공작업에 대한 기준 이송속도로 결정하였다.

● 3 단계 : 이송속도 변환 규칙 결정

가공공정과 그에 대한 기준 이송속도가 결정되면 가공시 변화되는 금속 제거율에 따른 이송속도의 변환 규칙을 결정한다. 우선, 가공기의 특성, 가공조건, 그리고 피삭재의 형상 등을 고려하여 최대 이송속도와 최소 이송속도를 결정한 후, 2 단계에서 결정한 기준 이송속도를 바탕으로 대상 절삭부하 구간에 대한 각각의 이송속도를 연산을 통하여 결정한다. Table 3은 본 논문에서 예시하고 있는 경우의 가공조건을 나타낸 것이다.

Table 3 Conditions for Experiment

Workpiece	GM241 (FC계열)
Cutting tool	Ø30 Cermet Ball-endmill
Tool Len.	30 mm
Cutting speed	2000 rpm
Depth of cut	0.3 mm
Feedrate	- Max. 3500 mm/min - Std. 1000 mm/min - Min. 100 mm/min
Cutting fluid	Dry

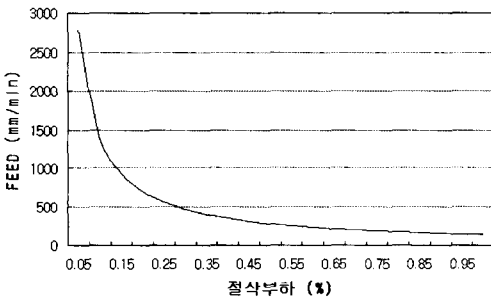


Fig. 9 Effective Feedrate vs. Metal removal rate

Fig. 9는 각각의 주 절삭부하 구간에 대하여, 계산된 적정 이송속도의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig 9에서 나타난 바와 같이 절삭부하에 따른 이송속도 변환 규칙은 비선형적 관계를 가지므로 이를

효율적으로 적용하기 위하여 이송율을 균등 분할한 후 이에 해당되는 절삭부하 구간을 정하는 것이 필요하다. 이를 위하여 절삭부하 축을 변환하는 방법으로 그래프를 선형화한 후, 절삭부하 축을 20 구간으로 균등하게 분할하였다. 이송속도 변환 규칙은 분할된 각각의 절삭부하 구간에 대하여 적합한 이송속도를 할당하는 방법으로 결정한다. Fig. 10은 개발된 NC코드 후처리시스템인 CAMplus/AFC에서 절삭부하에 대한 이송속도 변환 규칙을 입력하는 화면을 나타낸 그림이다.



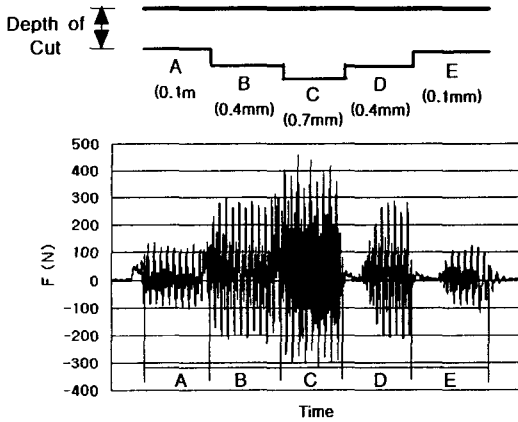
Fig. 10 Feedrate adjustment rule

4.3 가공실험 결과

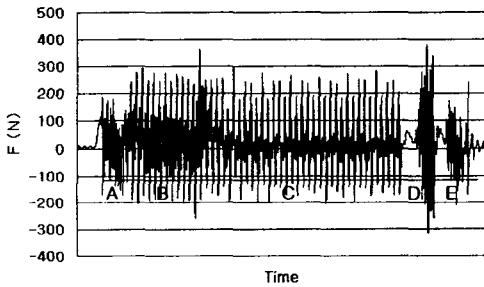
가공실험을 통해 NC코드를 후처리하는 경우와 그렇지 않은 경우의 절삭력 분포를 측정하여, 결정된 절삭조건 및 이송속도 변환규칙을 이용한 NC코드 후처리결과를 검증해 보았다.

이송속도 변환규칙을 적용하지 않은 경우와 이송속도 변환규칙을 적용한 경우의 절삭력 분포를 비교하기 위하여 Fig. 11과 같이 각각의 경우에 대하여 절입깊이를 그림과 같이 0.1mm에서 0.7 mm 까지 5단계로 변화시키면서 절삭력을 측정, 비교하는 실험을 수행하였다. Fig. 11에서 이송속도 변환규칙을 적용한 경우에는 절삭력이 상대적으로 균일하게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 절삭시간도 약 40% 이상 감소하는 것을 확인하였다. 실험결과, 본 논문에서 개발한 방법을 이용하여 NC코드를 후처리하여 이송속도를 변환하여 가공을 수행함으로써 절삭력을 균일하게 유지하여 가공품질을 향상시키

고, 가공 생산성을 크게 단축시킬 수 있음을 확인하였다.



(a) Cutting with Constant Feedrate



(b) Cutting with Feedrates Adjusted by AFC

Fig. 11 Feed Forces Measured during Test Cutting

5. 적용사례

본 논문에서 개발된 NC코드 후처리시스템을 실제 자동차 차체 프레스 금형의 황삭가공에 적용하여 본 결과 금형과 가공작업의 종류에 따라 차이는 있으나, 대체로 약 15~35% 정도의 가공 생산성 향상을 얻을 수 있었다.

Table 4는 자동차 차체의 Roof 패널 제작용 상형 금형의 황삭가공에 본 논문에서 개발된 NC코드 후처리 시스템을 적용한 결과이다. Fig. 12는 개발된 후처리 시스템을 이용하여 가상가공을 수행한 결과 얻을 수 있는 최종 가공 형상을 나타내는 화면이며, Fig. 13은 후처리된 NC코드를 이용하여 실제 가공을 수행한 결과물의 사진이다.

Table 4 Comparison of cutting time

가공작업	공구 직경	CAMplus/AFC 미적용시		CAMplus/AFC 적용시		가공 생산성증가율 (%)
		이송 속도	가공 시간 (분)	이송 속도	가공 시간 (분)	
황삭 (3D Drive)	50 φ	400	196.5	150~700	160.4	18.4
황삭 (3D Drive)	50 φ	400	350.2	150~800	274.9	21.5
황삭 (Zig-zag)	50 φ	400	634.9	150~1000	444.1	30.1
황삭 (Zig-zag)	50 φ	400	727.7	150~1000	552.0	24.1

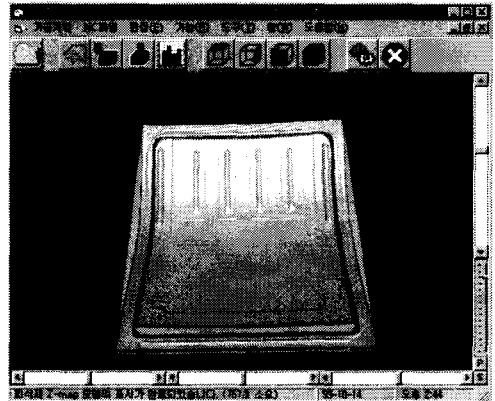


Fig. 12 Virtually Machined Part



Fig. 13 Machined part with NC code post-processed by AFC

6. 결론

본 논문에서는 자동차 차체 프레스 금형의 기계 가공작업을 대상으로, 가공품질을 유지하면서 가공 생산성을 증가시키는 NC코드 후처리시스템을 개발하였다. 일련의 작업계획을 기준으로 공정별로 소요되는 NC 프로그램과 공구형상 정보로부터 가공면에 대한 형상 모델링을 수행, 가공면 품질과 절삭부하를 예측할 수 있는 가상가공 기능을 구현하였으며, 전문가의 가공지식을 룰베이스로 구성하여 절삭부하에 따라 이송속도를 조절함으로써 황삭 가공의 경우 금형 형상에 따라 약 15~35%의 가공 생산성을 높일 수 있었다.

본 연구에서 개발된 NC 코드 후처리 시스템은 특정 CAD/CAM 소프트웨어에 종속적이지 않아서 기존의 CAM 시스템과 연계하여 활용할 수 있으며, 따라서 금형공장 등 기계가공 공장에서 추가적인 투자 없이 제품의 생산성과 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. P-L Hsu, W-T Yang, "Real-time 3D simulation of 3-axis milling using isometric projection," *Computer Aided Design*, Vol. 25, No. 4, pp. 215~224, 1993.
2. 최병규, 정연찬, "Z-map을 사용한 모의가공과 NC-code의 검증," *산업공학*, Vol. 8, No. 3, pp. 155~169, 1995.
3. B. K. Choi, Y. C. Chung, J. W. Park and D. H. Kim, "Unified CAM-system Architecture for Die and Mould Manufacturing," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 235~243, 1994.
4. 송수용, 최석일, "Z-map모델을 이용한 3차원 CNC가공계획 및 절삭시뮬레이션에 관한 연구," *한국정밀공학회 추계학술대회논문집*, pp. 683~688, 1995.
5. 정대혁, 서석환, "가상가공 CAM 시스템에서의 가공면 예측," *대한산업공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 900~904, 1998.
6. Y. Takeuch, M. Sakamoto, Y. Abe, R. Orita, "Development of personal CAD/CAM system for mold manufacture based on solid modeling techniques," *Annals of CIRP*, Vol. 38/1/1989, pp. 429~432.
7. S. Takata, M. D. Tsai and M. Inui, "A Cutting Simulation System for Machinability Evaluation Using a Workpiece Model," *Annals of CIRP*, Vol. 38/1/1989, pp. 417~420.
8. 김찬봉, 양민양, "5축 CNC가공의 검증에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, Vol. 18, No. 1, pp. 93~100, 1994.
9. 김규만, 조필주, 김병희, 주종남, "Z-map을 이용한 임의의 절삭영역에서 블엔드밀의 절삭력 예측," *한국정밀공학회지*, Vol. 14, No. 3, pp. 57~65, 1997.