

2차원 윤곽가공에서 이송률 자동 조정

고기훈*, 서정철**, 최병규***

Automatic Feedrate Adjustment for 2D Profile Milling

Ko, K. H.*, Seo, J. C.** and Choi, B. K.***

ABSTRACT

Proposed in this paper is a model-based AFA (automatic feedrate-adjustment) method for maintaining smooth cutting-loads (i.e., cutting-force) during 2D-profile milling. Before the cutting-force model was established, some assumptions were verified through a series of preliminary cutting experiments (The results found that the cutting-force was independent of the cutting speed and the cutting action at the cutter bottom.). From the data obtained during the main cutting experiments, a "chip-load/cutting-force model" representing the cutting-force as a function of the chip-load (i.e., effective cutting-depth) and a feedrate is proposed. Based on the model, an AFA scheme for maintaining smooth cutting-force by adjusting the feedrate (i.e., F-code) according to the changes in chip-load was proposed. To check the validity of the proposed AFA scheme, another set of cutting experiments was conducted by using feedrate-adjusted NC-data while monitoring the actual machining processes using an accelerometer. The experimental results showed that the proposed AFA-scheme was quite effective.

Key words : Cutting-force, chip-load, chip-load/cutting-force model, effective cutting-depth, AFA (automatic feedrate adjustment)

1. 서 론

절삭가공의 효율을 높이기 위해 고속가공, 무인가공이 널리 이용되고 있지만, 가공중에 과부하가 걸림돌이 되어 원하는 만큼 효과를 보지 못하고 있다.

과부하를 방지하기 위해 절삭조건을 조절하는 접근방법으로, 다양한 센서를 이용하여 부하를 감지하고 온라인(on-line)으로 조절하는 연구가 있으나^{1,2)}, 입력신호에 대한 안정성(robustness)과 반응시간(time lag)의 문제점을 갖고 있다. 본 연구에서는 NC 데이터를 생성하는 시점에 가공에서의 부하를 예측하고 자동적으로 절삭조건을 조절하는 오프라인(offline) 방법을 채택한다.

절삭조건을 조절하는 RPM과 이송률(feedrate) 조절이 가능하지만, 일반적으로 이송률이 가공부하에 영향을 미치는 요인으로 알려져 있다. 따라서 실체가

공을 수행하기 전에 오프라인으로 가공부하가 균일하도록 NC 블록별로 이송률을 조정하는 것을 이송률 자동조정(AFA: automatic feedrate adjustment)이라고 하고, 상업용 CAM 시스템에서도 이 기능의 필요성을 강조하고 있다³⁾.

AFA에 관한 연구는 크게 두가지 방법으로 분류할 수 있다. 첫번째 방법은 공구의 절삭날을 세분하여 각각의 미소절삭날에서의 가공부하를 계산하여 합산하는 방법이다^{4,5)}. 그러나, 현장에서 공구의 미소절삭날의 형상을 구하기 어려울 뿐더러 미소절삭날의 역학도 잘 알려져 있지 않고, 모델이 모수에 민감하여 아직 실험단계에 머물러 있다.

보다 실용적인 방법으로 가공부피(material removal volume)나 칩단면(chip cross-section)을 이용하여 평균절삭력을 계산하는 방법이 있다^{6,7)}. Wang⁸⁾에서는 물체 모형(solid model)으로 가공부피를 계산하여 이용할 수 있다는 가능성만을 제시하였고, 상업용 시스템에서는 모의가공 방식을 이용하는 것으로 보이나, 내부 로직은 공개되지 않은 상태이다⁹⁾. 이 방법

*학생회원, KAIST 산업공학과

**동부정보기술(주) SMI팀

***중신회원, KAIST 산업공학과

은 계산이 비교적 간단하여 적용이 용이하지만, 가공 상황에서의 갑작스런 순간절삭력(instantaneous cutting-force)의 변동을 보다 정확히 예측 할 수 있는 방안 에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 평엔드밀(flat endmill)을 이용하여 2차원 윤곽가공에서의 이송률 자동조정에 관한 방법을 제안하고자 한다. 즉, 계산 가능한 칩로드 척도를 정의하고, 실제 절삭실험을 통하여 절삭력과 관계 모델을 수립한다. 구축된 모델을 기반으로 이송률 자동조정 방법을 제안한다.

2. 절삭력 해석 및 실험적 사실들

본 장에서는 우선 2차원 칩로드를 정의하고, 문헌에서 알려진 사실들과 가정들을 실험을 통해서 확인한다. 이를 토대로 칩로드와 절삭력간의 유용한 관계 모델을 수립한다. 모델 수립에 필요한 의문점들을 정리하면 다음과 같다.

- 절삭력이 가공의 안정성을 반영하는 좋은 척도인가?
- 칩로드 척도로 어떤 것이 적당한가?
- 2차원 가공에서 축방향 절삭깊이의 영향과 피삭재의 밀면의 영향은 무시할 만 한가?
- 절삭력에 미치는 가공속도의 영향은 무시할 만 한가?
- 공구 크기에 따른 절삭력의 추이는 유사한가?

2.1 2차원 가공에서의 칩로드

본 연구에서 사용되는 기호들은 Table 1에 나타나 있다.

Fig. 1에 나타난 것처럼 일정한 두께의 소재를 가

Table 1. Nomenclature

Ad	Axial cutting depth(축방향 절삭깊이)
Rd	Radial cutting depth(경방향 절삭깊이)
γ	Cutter-engagement angle(공구접촉각)
γ_0	Nominal cutter-engagement angle(명목접촉각)
γ_p	Peak cutter-engagement angle(최대접촉각)
δ_0	Nominal cutting depth(명목절삭깊이)
δ_e	Effective cutting depth(유효절삭깊이)
δ_p	Peak effective cutting depth(최대절삭깊이)
F_0	Nominal feedrate(명목 이송률)
F_A	Adjusted feedrate(조정 이송률)
d_b	Braking distance(제동거리)
α	Concave angle(오목각)

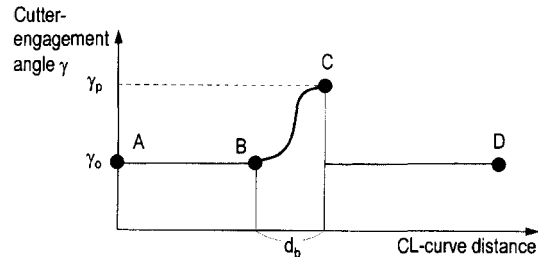
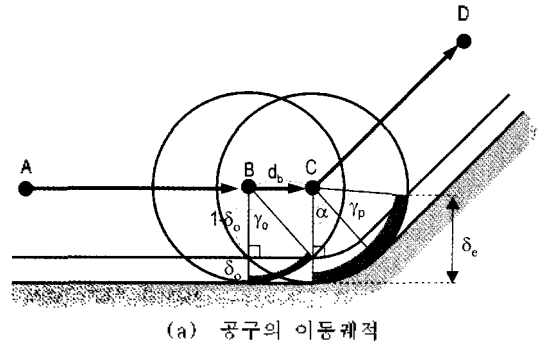


Fig. 1. Geometric meaning of chipload measure.

공할 때 경방향 절삭깊이를 공구반경으로 정규화(normalize)한 값을 명목절삭깊이(δ_0)라 하고, 실제적으로 공구가 소재와 접촉한 값을 공구반경으로 정규화한 값을 유효절삭깊이(δ_e)라 한다. 본 연구의 대상이 2차원 가공이기 때문에 이후부터의 절삭깊이는 경방향의 절삭깊이의 의미로 사용한다.

공구가 소재와 접촉한 각도를 공구접촉각(γ)이라 하는데, 이것은 절삭깊이의 함수로 표현될 수 있다. 칩로드(혹은 가공부하)를 안정적으로 유지하면서 명목절삭깊이 크기의 소재를 가공할 때의 이송률을 명목 이송률(F_0)이라하고, 변동되는 칩로드에 적합하도록 조정된 이송률을 조정 이송률(F_A)이라 한다. Fig. 1(a)는 2차원 가공에서 공구가 A를 출발하여 C까지 직선으로 이동하고 C에서 오목각(α)만큼 벗어나서 직선으로 D에 이르는 직선-직선 구간의 가공 상황을 나타낸 것이다. 배⁷⁾에서는 이와 같은 가공에서 칩로드 척도로써 유효절삭깊이와 공구접촉각을 제안하고 있는데, 이 둘 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\delta_e = 1 - \cos \gamma \quad 0 \leq \gamma \leq \pi \quad (1)$$

두 칩로드 척도는 가공부하가 큰 과도구간(BC)에서 점차 증가하고, 나머지 구간에서는 일정한 값을 갖는다. Fig. 1(b)는 공구가 진행되는 거리에 따른 공구접촉각의 변화를 나타내고 있다.

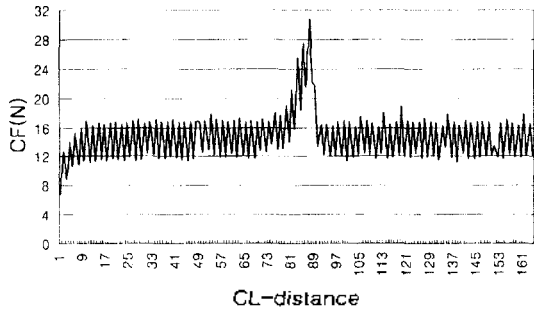


Fig. 2. Cutting force in cutting experiments.

Fig. 2에는 오목각 30도, 명목절삭깊이 0.1, 명목 이송률 150으로 수행한 가공실험에서의 절삭력이 나타나 있는데, Fig. 1(b)에 나타난 것과 비슷한 경향을 발견할 수 있다.

2.2 절삭력 실험으로부터 얻은 사실들

본 절에서는 절삭력 실험을 위한 장치와 실험 방법을 설명하고, 가공실험을 통해서 앞서 제기한 의문점들을 해결한다.

2.2.1 실험 장치 설치 및 절차

본 연구에서 절삭력은 SATO사의 공구동력계(tool dynamometer) AST-MM을 사용하여 측정하였으며, 측정된 절삭력 신호는 전하 증폭기(charge amplifier) DPM0612A를 통과하고, A/D 변환하여 저장된다. 진동은 PCB사의 W353B02/002020 가속도계(accelerometer)를 이용하여 측정하였다. 동일한 데이터수집 장비로 절삭력과 진동 데이터를 동시에 수집하면, 두 데이터

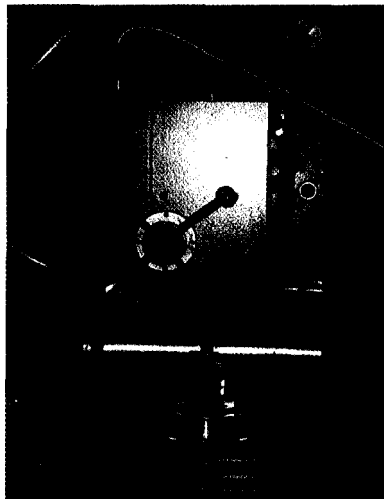


Fig. 3. Apparatus for cutting force experiments.

의 혼합된 결과가 나타나므로 동일한 실험을 두 번 실시하여 독립적으로 데이터를 수집하였다. 공구동력계와 가속도계가 장착된 실험장치에 대한 사진이 Fig. 3에 나타나 있다.

본 연구의 실험에서는 두 날짜리 고속도강(HSS: high speed steel) 평엔드밀, 공구직경 $\phi 20$ mm, 공구장 65 mm인 공구를 사용하였고, 피삭재로는 사출 금형에 이용되는 인장강도 90-100 kg/mm², 경도 H_RC 26-32인 HP4를 사용하였다. 실험은 50 mm정도의 길이를 가공하면서 데이터를 수집한다.

축방향 절삭깊이 3 mm, 600RPM으로 고정하였고, 명목절삭깊이는 6개 수준(0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0), 이송률은 4개 수준(50, 100, 150, 200)에서 실시하였다.

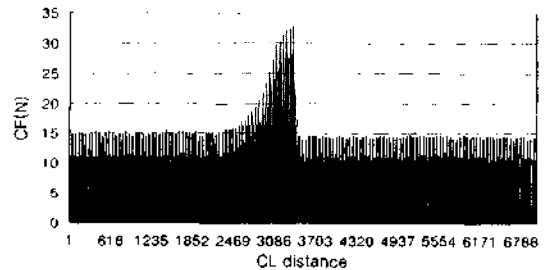
2.2.2 절삭력과 가공 안정성과의 관계

절삭가공 중에 가공부하가 커지면 공구가 휘고 심하게 떨리는 현상이 발생하여 가공이 매우 불안정하게 된다^[11]. Fig. 4의(a)와 (b)는 오목각 60도에서 실험한 절삭력과 진동의 측정 결과이다.

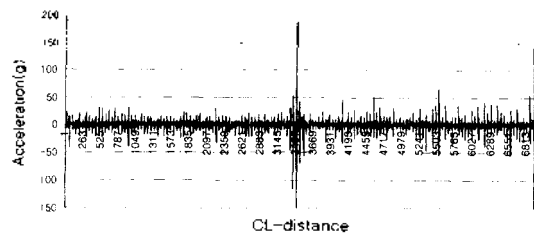
실험결과에서 알 수 있듯이, 모서리 부위에서 절삭력 및 진동폭이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있고, 절삭력이 가공안정성을 결정하는 중요한 요소라는 사실을 확인할 수 있다.

2.2.3 두 가지 칩로드 척도의 비교

이 실험은 두 가지 칩로드 척도 중에서 조정이 용이한 척도를 찾기 위한 것이다. 명목절삭깊이 0.1, 오

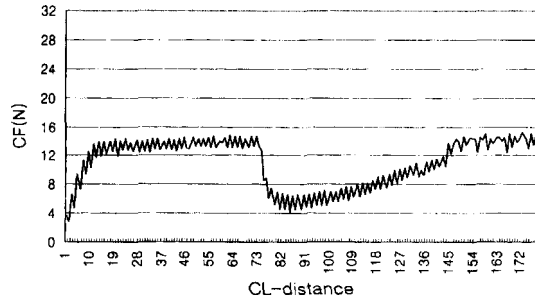


(a) cutting force profile

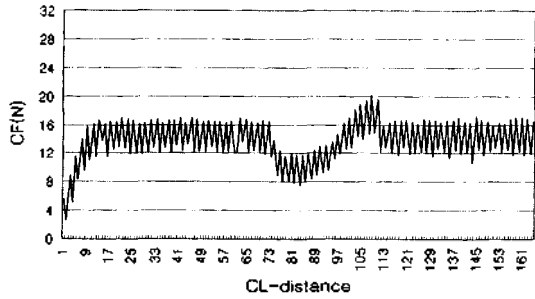


(b) vibration profile(accelerometer 이용)

Fig. 4. Relationship between cutting force and machining stability.



(a) 유효 절삭깊이 ($F_0=150, F_{A\delta}=37$)



(b) 공구 접촉각 ($F_0=150, F_{A\gamma}=71$)

Fig. 5. Comparison of two chipload measures.

목각 30도, 명목 이송률 150으로 실험을 수행하였다. 이때 유효절삭깊이는 0.439, 공구접촉각은 명목치 25.84도, 최대치 55.84도가 된다. 조정된 이송률을 두 식 (2)와 (3)을 만족하도록 계산하면, 각각 37과 71을 얻게된다.

$$F_o \times \delta_o = F_{A\delta} \times \delta_e \quad (2)$$

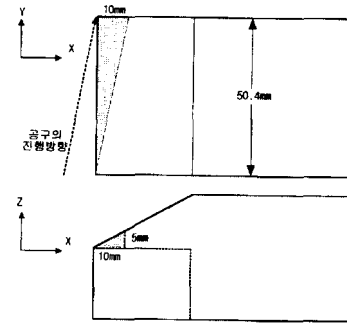
$$F_o \times \gamma_o = F_{A\gamma} \times \gamma_p \quad (3)$$

과도구간에서 두개의 칩로드 최대값에 해당하는 조정된 이송률을 적용하여 절삭력의 추이를 나타낸 것이 Fig. 5의(a)와 (b)에 나타나 있다. 결론적으로 말하면, 유효절삭깊이에 따라 이송률을 조정하는 것이 특정한 값 이하로 절삭력을 유지하기가 용이한 것으로 판단되었다.

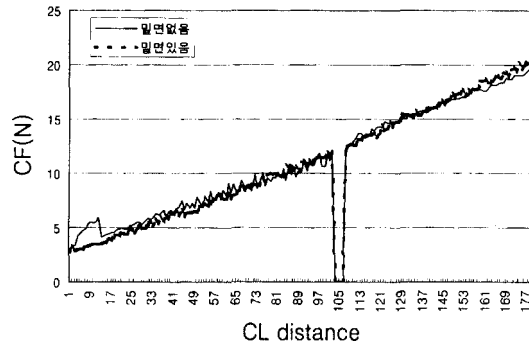
2.2.4 축방향 절삭깊이와 밀면의 영향

절삭면적에 있어서 조합되는 경방향과 축방향 절삭깊이의 비의 변화는 절삭력에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다^[12]. 특히, 피삭재 밀면의 유무에 따른 절삭력의 차이가 미미하다면, 축방향 절삭깊이의 효과를 독립적으로 고려할 수 있다.

가공 피삭재 형상은 Fig. 6(a)에 나타난 것처럼 밀면이 있는 것과 없는 것 두개를 준비하였다. 가공이 진행됨에 따라 축방향과 경방향 절삭깊이가 각각 1:2



(a) 가공 피삭재 형상



(b) 절삭력 결과 비교

Fig. 6. Effect of axial depth of cut and bottom face.

비율로 증가하도록 하였다. 실험에서 공구의 영향을 배제하기 위해서 두개의 공구로 각 피삭재를 절반씩 가공하고, 서로 바꾸어 나머지 절반을 가공하였다. Fig. 6(b)에 나타난 결과를 살펴보면, 두개의 피삭재에서 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

위의 실험결과로부터 일정하게 고정된 절삭깊이를 다른 값으로 변경하여도 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 동일한 조건에서 축방향 절삭깊이가 변동되는 경우의 절삭력 변화에 대한 연구는 다루지 않기로 한다. 그렇지만 이러한 경우에는 위의 실험결과를 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

2.2.5 절삭력에 대한 가공 속도의 영향

일반적으로 가공속도(cutting speed)가 절삭력에 미치는 영향은 미미한 것으로 알려져 있는데^[11,12], 이를 실험을 통해 입증하고자 한다. 실험은 날당이송(feed per tooth)을 0.1로 고정하고 주축 회전수를 300RPM에서 900RPM까지 변화시키면서 절삭력의 추이를 살펴보았다.

절삭깊이 0.1인 경우와 1.0인 경우의 실험결과가 Fig. 7의 (a)와 (b)에 각각 나타나 있다. 두 실험에서 공회 가공속도의 변화와 무관하게 절삭력이 일정하

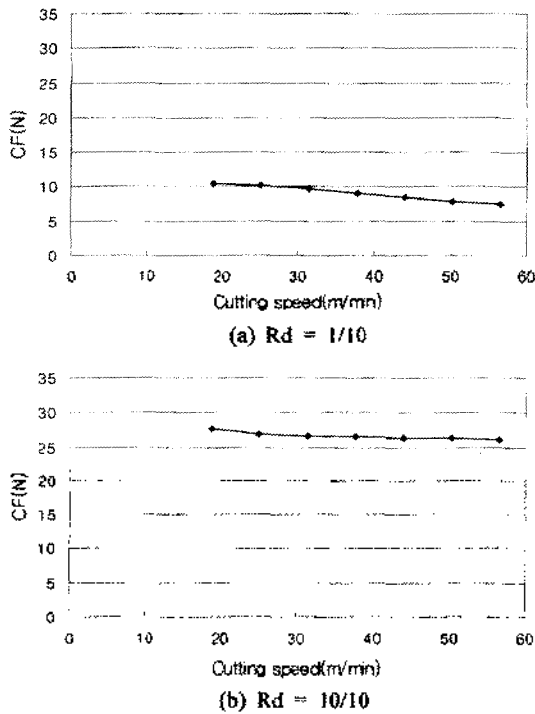


Fig. 7. Effect of cutting speed.

게 나타났다.

2.2.6 절삭력에 대한 공구 크기(직경)의 영향

본 실험은 공구직경의 변화에 따른 절삭력의 경향을 파악하기 위한 것이다. 즉, 평앤드밀 $\phi 20$ mm와 $\phi 30$ mm를 이용하여 절삭깊이와 이송물을 몇 개의 수준으로 나누고, 각각의 경우에서 실험을 수행하여 절삭력 곡면을 생성한다. 그리고 그 결과 나타난 곡면을 비교함으로써 공구크기에 따른 영향을 평가하는 것이다. Fig. 8에 나타난 것처럼 두 실험에서 비슷한 형태의 절삭력 곡면을 발견할 수 있다.

2.2.7 기타

여러 차례의 수행된 실험결과를 보면, 두 날의 공구로 반경이상의 절삭깊이를 가공하면 절삭력이 일정하게 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 9는 이송률이 50, 100, 150, 200, 절삭깊이가 1/10, 2/10, 3/10, 4/10, 5/10, 10/10, 15/10, 20/10인 경우에 절삭력의 추이를 나타낸 것이다. 여기서 절삭깊이가 공구반경보다 큰 경우에는 네 수준의 이송률에서 절삭력이 모두 일정한 값을 갖는 것을 확인하였다.

Fig. 10은 두 날 공구의 한 사이클동안, 각 날의 궤적으로, 음영 처리된 두 영역은 절삭깊이가 반경인 경우와 그 이상인 경우에 한 날이 가공할 양을 나타낸

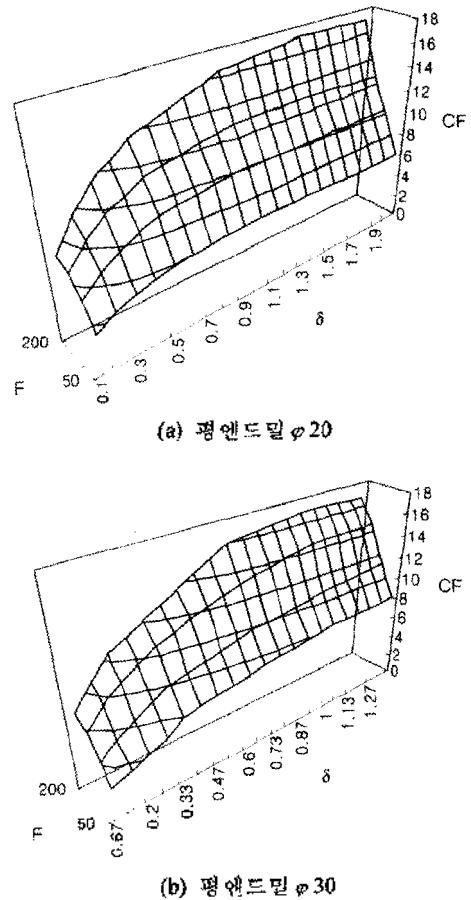


Fig. 8. Effect of cutting tool size.

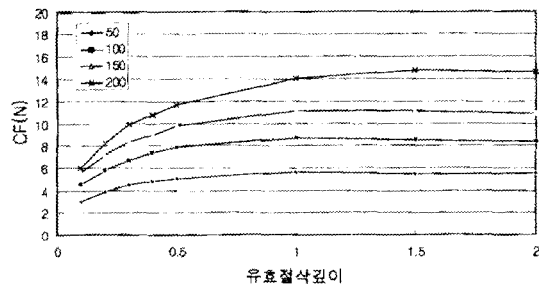


Fig. 9. Cutting force according to radial depth of cut.

다. 후자가 가공 면적이 크므로 평균적인 절삭력이 크게 나타날 수 있다.

그러나, 본 연구에서의 절삭력은 순간 절삭력으로, 가공 면적보다는 절삭두께의 함수로 표현된다. 특히, 한 사이클에서 최대치를 집계하여 계산하므로(부록 참조), 반경이상의 절삭깊이에서의 절삭두께 최대치 (tpeak)는 동일하고, 실험적으로도 일치한다.

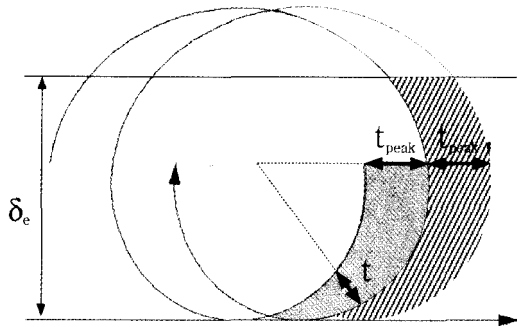


Fig. 10. Comparison of chip thickness with two-flute tool.

따라서, 본 연구에서는 절삭깊이가 공구반경이하인 경우에만 절삭실험을 수행하여 절삭력모델을 생성한다. 이때 절삭깊이가 공구반경 이상인 경우에는 공구반경에서의 이송률을 적용하기로 한다.

3. 절삭력 모델생성과 이송률 자동조정

3.1 절삭력 모델 생성

여기서는 칩로드와 절삭력 간의 관계를 표현하는 모델을 구축하는 절차를 기술한다. 먼저 실험에 사용될 피삭재, 공구, 절삭깊이와 주축 회전수 등의 실험조건을 결정한다. 유효절삭깊이와 이송률 수준을 결정하여 실험을 수행하고, 데이터를 수집하고 분석한다(부록 참조). 실험결과 데이터로부터 Table 2와 같은 절삭실험 테이블을 작성한다(Table 2는 2.2.1에서 기술된 실험조건으로부터 얻은 절삭실험 테이블이다).

절삭실험 테이블이 얻어지면 이로부터 비매개변수 비지어 곡면(non-parametric Bezier surface)식을 이용하여 절삭력 곡면을 생성한다. 표현된 곡면에서 X축은 유효절삭깊이, Y축은 이송률, Z축은 절삭력을 나타낸다.

곡면을 생성하는 첫번째 단계는 YZ평면상에서 최소자승법(least square method)을 이용하여 단면곡선

Table 2. 절삭실험 테이블

F_s	50	100	150	200
0.1(1/10)	3.49	5.27	6.52	7.05
0.2(2/10)	4.52	6.73	8.36	9.56
0.3(3/10)	5.20	7.72	9.75	11.55
0.2(4/10)	5.62	8.59	10.47	12.53
0.5(5/10)	5.88	9.14	11.45	13.62
1.0(10/10)	6.61	10.14	12.94	16.35

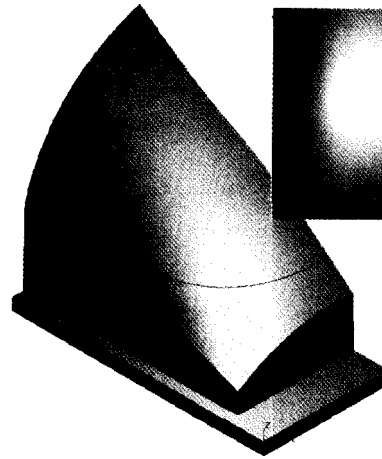


Fig. 11. Generation of cutting-force surface and iso-cutting-force curve.

들(section curves)을 2차 비지어(Bezier) 곡선으로 근사(fitting)한다. 생성된 단면곡선들의 도메인상에서 각 1/4단위의 파라미터로 점을 샘플링해서 최종적으로 망(net)을 구성한다. 두번째 단계는 망의 각 격자점에서 원호를 이용하여 양 방향의 접선벡터를 추정하여 복합 비매개변수 비지어 곡면을 생성한다. 비지어 곡면생성 방법에 대한 자세한 내용은 Choi¹⁶⁾에 잘 나타나 있다.

Fig. 11은 Table 2의 데이터를 이송률 30까지 Y축으로 외삽(extrapolate)하여 얻은 곡면을 Z-map으로 표현한 것이다. 이송률 150, 명목절삭깊이 0.1일 때의 등절삭력 곡선(등고선)이 3차원 곡면상에 나타나 있다(우상단 사각형 내는 평면도).

3.2 이송률 자동조정 활용 방안

여기서는 절삭력 모델(곡면)을 이용하여 이송률 자동조정을 수행하는 방법을 기술한다. 첫번째 단계는 기준이 되는 명목절삭깊이와 명목 이송률을 결정하고, 절삭력 곡면으로부터 명목 절삭력을 계산한다. 두번째 단계는 명목 절삭력의 등 절삭력 곡선(Fig. 12에서의 점선)을 계산하는데, 이것은 곡면에서 일정한 높이의 등고선을 계산하는 것과 동일하다. 세번째 단계는 주어진 오목각에 대한 유효절삭깊이를 계산하고, 등절삭력 곡선으로부터 조정 이송률을 계산한다.

배¹⁷⁾에 따르면, 과도구간(Fig. 1에서 BC)의 거리를 제동거리(d_b)라고 하는데, 직선-직선구간의 가공에서 제동거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

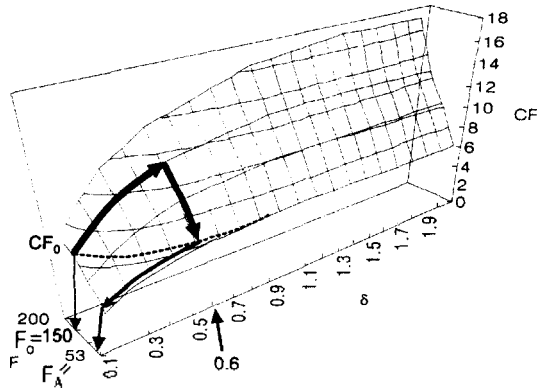


Fig. 12. Schematic procedure of automatic feedrate adjustment.

$$d_b = \begin{cases} \frac{\sqrt{\delta_o(2-\delta_o)}}{\sin\alpha} & \text{if } \alpha \leq \pi - \sin^{-1} \frac{\delta_o}{\sqrt{\delta_o(2-\delta_o)}} \\ \delta_o & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

제동거리 구간에서의 이송률을 조정하는 방법은 매 순간 변하는 유효절삭깊이에 적절한 이송률을 연속적으로 부여하는 방법과 최대절삭깊이에서의 이송률을 부여하는 방법이 있다. 후자의 경우에는 보수적이기 때문에 가공시간이 길어지는 경향이 있지만 적용이 용이하다. 특히 전체 윤곽가공 길이에 비해 제동구간의 길이가 짧은 경우에는 가공시간에서의 손실은 무시할 만하다(Table 3참조).

4. 적용 예제

Fig. 13은 절삭력 모델과 이송률 자동조정의 적용 가능성을 설명하기 위한 예제이다. 적용된 윤곽가공용 NC코드는 총 591개 블록으로 구성되어 있고, 가공범위는 X방향 431 mm, Y방향 371 mm이다. 가공형상의 특징은 좌우대칭이고, Fig. 13에 나타난 것처럼 반절의 형상에 대해서 오목 코너부위가 5군데 있으며, 각도는 65도에서 78도 정도이다.

절삭력 모델은 3.1절에서 생성한 모델을 이용하였으며, 명목절삭깊이 0.1, 명목 이송률 150을 기준으

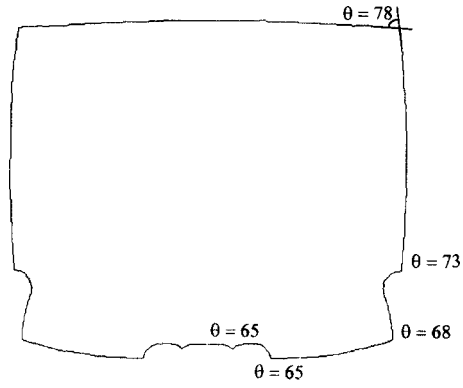


Fig. 13. Example shape of NC-data.

Table 4. 오목각별 조정 이송률.

α	β	F _A
10	0.189	95
20	0.303	70.8
30	0.438	56.3
40	0.591	
50	0.755	
60	0.927	

로 하였다. 이때 명목 절삭력은 6.52N이고, 오목각별 조정 이송률은 Table 4에 나타난 것과 같다. 여기서 웨이딩된 영역의 이송률 값은 외삽에 의해 계산된 값이다.

Fig. 13의 NC 데이터가 좌우 대칭이기 때문에 적용실험은 오른쪽 반절 부분만 수행하였다. Table 3에는 이송률을 결정하는 4가지 대안과 각 대안에 대한 이송률, 가공시간 및 안정성 여부를 나타낸 것이다. 여기서 대안 4의 경우에는 가공이 불안정하기 때문에 실제가공에서는 사용하지 곤란한 것으로 판단되었다. 대안 1과 2는 가공시간에서 별 차이가 없고, 대안 3보다는 3배정도 작은 것으로 나타났다.

대안 1과 4에 대해서 명목절삭깊이가 0.1 일 때, 각도 68도인 코너부위에서의 절삭력을 비교한 것이 Fig. 14에 나타나 있다. 코너부위에서 이송률을 조정함으로써, 일정한 값 이하로 절삭력을 유지할 수가 있었다. 마찬가지로 대안 1과 4에 대하여, 오른쪽 반

Table 3. 이송률 결정 방법에 따른 가공시간과 가공 안정성 비교

대안	이송률 결정		F ₀	F _A	가공 시간(δ _o =0.1)	가공 안정성
1	과도구간에서	한번	150	150-48	10.69분	안정
2	이송률 조정	연속	150	48	10.07분	안정
3	조정 안함	최저	48	-	38.84분	안정
4		최고	150	-	9.87분	불안정

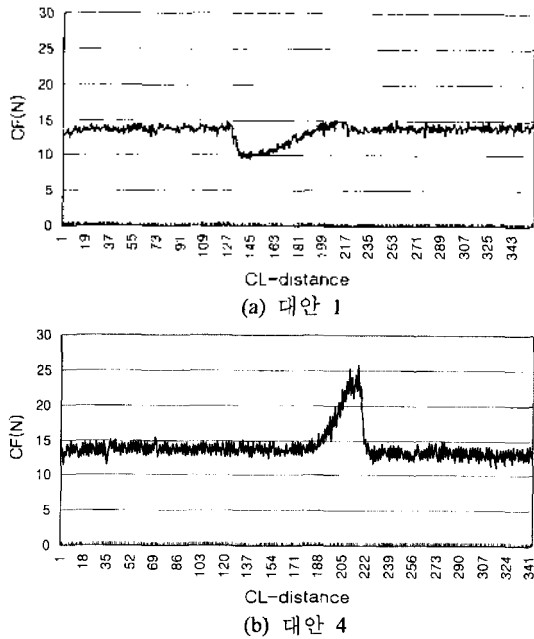


Fig. 14. Comparison of cutting force according to AFA..

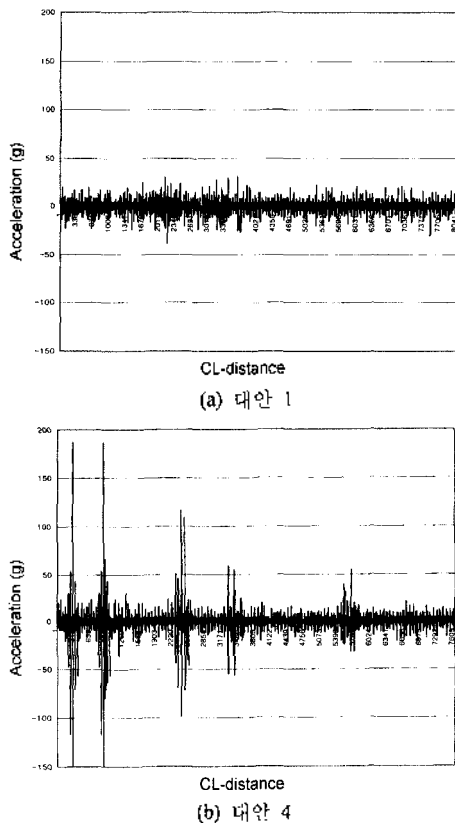


Fig. 15. Comparison of machining stability according to AFA.

절을 가공하는 동안에 측정된 진동결과가 Fig. 15에 나타나 있다. Fig. 15(b)에서는 다섯 개의 코너부위에서 진동의 폭이 크다는 것을 발견할 수 있다.

5. 결론 및 추후 연구 과제

본 연구에서는 평엔드밀을 이용한 2차원 윤곽가공에서의 이송률 자동조정을 위한 방안을 제시하였다. 즉, 모델을 수립하기 이전에 궁금한 의문사항들을 정리하여 실험을 통해 해결하고, 칩로드와 절삭력간의 관계모델을 제안하였다. 또한 제안된 모델을 이용하여 간단한 이송률 자동조정 방법을 제시하였으며, 예제를 통하여 실제적인 적용가능성을 보였다.

본 연구의 결과는 2차원 상에서 일정한 소재여유를 갖는 피삭재의 윤곽가공에 적용될 수 있다. 추후에는 포켓(pocket)이나 스캔(scan) 가공처럼 경로가 인접된 경우에도 적용이 가능하도록 수행된 연구를 확장할 필요가 있다.

참고문헌

1. Fussel, B.K. and Srinivasan, K., "On-line identification of end milling process parameters", *ASME trans. Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 322-330, 1989.
2. Asai, A. and Tsuruhashi, T., "Development of die-cutting feed rate control system", *JSAE Review*, Vol. 9, pp. 72-82, 1988.
3. "Automatic feedrate adjustment thins down machining time", *American Machinist*, p. 38, April 1999.
4. Wang, W. P., "Solid modeling for optimizing metal removal of three-dimensional NC end milling", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 57-65, 1988.
5. Kline, W. A., DeVor, D. A. and Lindberg, J. R., "The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 22, No. 1, pp. 7-22, 1982.
6. Yang, M. Y. and Park, H. D., "The prediction of cutting force in ball-end milling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 31, No. 1, pp. 45-54, 1991.
7. 배석형, 고기훈, 최병규, "이송률 자동조정을 위한 2차원 칩로드 해석", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제 5권, 제 2호, 2000.
8. Choi, B. K., *Surface modeling for CAD/CAM*, Elsevier, pp. 334-336, 1991.
9. 서정철, 2차원 윤곽가공에서 이송률 자동조정에 관한 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원, 1999.
10. 양구봉, 황영동, 최신 절삭공구와 가공기술, 기전연구사, p. 156, 1987.

- 11. 손명환, 절삭가공론, 문운당, pp. 142-146, 1993.
- 12. 엄영하, 공작기계의 절삭이론, 동명사, p. 75, pp. 255-272, 1983.

부록: 데이터 수집 및 처리 방법

절삭 실험에 앞서 공구 동력계와 데이터 수집 장비에 대한 초기화와 교정(calibration) 작업이 필요한데, 이를 간단히 기술하면 다음과 같다.

공구 동력계의 X, Y, Z 방향이 받는 힘은 세 개의 채널을 통해서 데이터 수집장비로 저장된다. 부하가 없는 상태에서는 채널의 값이 0이 되도록 조정한다. 그리고 공구 동력계 위에 몇 가지 특정한 무게의 추를 올려놓고 Z축이 받는 힘을 측정하여, kg중당 나타나는 값을 기록한다.

실험은 각 명목절삭깊이 별로 한 개의 공구를 이용해서 이송률 수준별(50, 100, 150, 200)로 실험한다. 미리 준비된 두 날짜리 평엔드밀 $\phi 20\text{ mm}$, 주축 회전수 600RPM으로 절삭실험을 수행하면서 절삭력 데이터 수집한다. 데이터의 샘플링개수는 가공하는 길이와 데이터 수집장비의 메모리 등을 고려하여 결정한다. Fig.16에는 샘플링된 X, Y축 방향의 절삭력의 합력을 나타낸 것인데, 이것으로부터 2차원상에서 절삭력의 분포를 전체적으로 파악할 수 있다. 여기서는 극대값들이 70정도 마다 나타나기 때문에 초

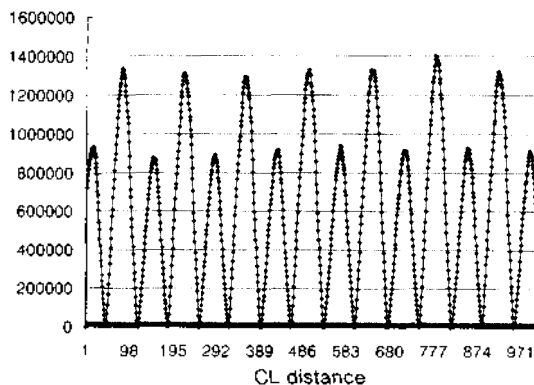
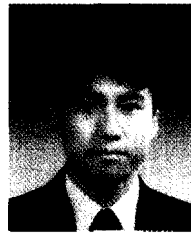


Fig. 16. Partial plot of cutting force acquired in experiments(F100 82.0).

당 1,400개 정도의 데이터가 샘플링되었음을 알 수 있다.

예를 들어 100, 명목절삭깊이 0.1로 절삭실험을 수행하여 각 날의 극대값 평균을 각각 계산하고, 두날의 평균을 계산해서 480.0982을, 특정 무게의 물체를 올려놓았을 때 9.3/kg중의 값을 얻었다고 하자. 이때 뉴튼(N: newton) 단위로 변환하면 $480.0982 / (9.3 \times 9.8) = 5.2677(N)$ 이 되고, 이 값을 Table 2와 같은 절삭력 테이블의 셀에 기록하면 된다.



고 기 훈

1995년 성균관대학교 산업공학과 학사
 1997년 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1997년-현재 한국과학기술원 산업공학과 박사과정
 관심분야: Cutter path generation & CAPP, CAM system development, Sculptured surface machining, Cutting force modeling & Cutting, condition decision



서 정 철

1997년 전남대학교 산업공학과 학사
 1999년 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1999년-현재 동부정보기술연구소 연구원
 관심분야: Cutter path generation & CAPP, CAM system development, Sculptured surface machining, Cutting force modeling & Cutting, condition decision



최 병 규

1973년 서울대 산업공학과 학사
 1975년 KAIST 산업공학과 석사
 1982년 미국 Purdue대 산업공학과 박사
 1982년-현재 KAIST 산업공학과 교수 및 KAIST CIM 연구센터장
 관심분야: Surface Modeling, CAD/CAM, CAPP, 자동화 제조시스템 모델링 및 시뮬레이션