

자유곡면 NC 절삭가공시간 예측

허은영*, 김보현**, 김동원***

Estimation of Sculptured Surface NC Machining Time

Heo, E. Y.*, Kim, B. H.** and Kim, D. W.***

ABSTRACT

In mold and die shops, NC machining process mainly affects the quality of the machined surface and the manufacturing time of molds and dies. The estimation of NC machining time is a prerequisite to measure the machining productivity and to generate a process schedule, which generally includes the process sequence and the completion time of each process. It is required to take into account dynamic characteristics in the estimation, such as the ac/deceleration of NC machine controllers. Intensive observations at start and end points of NC blocks show that a minimum feedrate, a key variable in a machining time model, has a close relation to a block distance, an angle between blocks, and a command feedrate. Thus, this study addresses regression models for the minimum feedrate estimation on short and long NC blocks considering these parameters. Furthermore, machining time estimation models by the four types of feedrate behaviors are suggested based on the estimated minimum feedrate. To show the validity of the proposed machining time model, the study compares the estimated with the actual machining time in the sculptured surface machining of several mold dies.

Key words : nominal machining time, actual machining time, minimum feedrate, command feedrate, machining time estimation, sculptured surface machining

1. 서 론

NC 가공의 생산성 향상을 위해서 많은 연구가 수행되고 있는바, 최근에는 공구경로 생성 및 연결 분야에서 활발히 연구가 이루어지고 있다^[1]. 공구경로의 패턴이나 경로간격은 금형의 종류 및 가공단계에 따라 다르게 설정되는데^[2], 이것은 가공면의 품질 및 가공의 생산성과 밀접한 관련을 가지고 있다. 최근 들어 금형업체에 고속가공기가 활발하게 도입됨에 따라, 고속가공기의 생산성 향상을 위해서 새로운 공구경로 패턴이나 자동이송속도 조절기능 등에 대한 연구가 수행되고 있다^[3]. 이러한 연구와 더불어 금형가공 생산성 평가에 필수적으로 요구되는 가공시간을 정확하게 예측하고, 가공시간을 최소화할 수 있는 공구경로

생성에 관한 연구도 중요하게 부각되고 있다. 금형 제작공정의 일정계획 수립 및 진도/부하 관리 측면에서 볼 때, 단위 작업공정들 간에 상충되지 않는 장비 사용계획 수립과 가공공정순서 결정을 위해서도 가공시간 예측에 대한 연구는 필수적이다^[4].

일반적으로 통용되는 NC 가공시간인 명목 가공시간(nominal machining time)은 NC 프로그램에 포함되어 있는 공구의 위치정보와 이송속도 정보로부터 쉽게 계산할 수 있다^[5]. 그렇지만 실제 가공에서는 매 NC 블록마다 발생하는 가·감속과 같은 NC 제어기의 기계적인 특성 때문에 가공시간은 명목 가공시간보다 훨씬 늘어나게 된다. 이러한 현상은 자유곡면 가공과 같이 수많은 짧은 NC 블록들로 가공할 때에 뚜렷하게 나타난다.

정확한 가공시간을 예측할 수 없기 때문에 현장의 관리자들은 명목 가공시간에 자신들의 경험에서 획득한 조정계수를 곱하여 실제 가공시간의 예측 값으로 사용한다. 최근 들어 가·감속을 고려한 실제 가공시간의 예측에 관한 연구가 소개되었다^[6-8]. Erkorkmaz

*전북대학교 공과대학 산업정보시스템공학과

**한국생산기술연구원, IMS팀

***전북대학교 공과대학 산업정보시스템 공학과

- 논문투고일: 2003. 06. 16

- 심사완료일: 2003. 07. 04

와 Altintas(2001)는 고속가공을 위하여 부드러운 이송을 꾀적을 구할 수 있는 5차 스플라인 보간법을 제시하였지만¹⁾, 모델이 복잡해서 실제 절삭시간을 예측하는데 사용하기에는 적합하지 않은 부분도 있다. Yan et al.(1999)은 가·감속 구간에서 이송속도를 잘 표현할 수 있는 단순한 선형 및 지수함수 이송속도 변화 모델을 제시하였다²⁾. 그런데, 가공시간 예측 모델의 주요 변수인 두 NC 블록이 만나는 지점의 최소 이송속도를 추정할 수 있는 방법은 제시하지 못하고 있다. Montreal과 Rodriguez(2003)은 모든 NC 블록의 시작과 끝에서 공구는 정지한다는 가정 하에 가·감속 구간에서의 선형적인 이송속도 모델을 사용하여 순환적인 공구경로(cyclic tool path)의 가공시간을 예측하는 방법을 제시하였다³⁾.

NC 가공시간은 크게 보아 급속이송 시간, 절삭이송 시간, NC 블록의 처리시간으로 이루어진다. 이 중에서, 급속이송 및 절삭이송 시간만을 고려하게 되는 바, NC 블록의 처리시간은 거의 무시될 수 있다. 따라서 급속이송과 절삭이송의 NC 블록은 가속구간, 등속구간, 감속구간으로 구분할 수 있다. 대부분의 NC 제어기에 대해서 선형함수나 지수함수의 공구 이송속도 모델을 고려할 수 있다⁴⁾. 각 NC 블록에서 가·감속 구간은 매우 짧고, 선형함수와 지수함수에서의 가·감속 시간차이가 거의 없는 것으로 나타나, 본 연구에서는 가장 일반적인 선형함수 형태의 이송속도 모델을 사용한다.

2. 짧은 NC 블록에서의 최소 이송속도

자동차 운전시 굴곡이 있는 지점에서 속도를 줄이는 것처럼, 두 NC 블록이 만나는 지점에서는 이송속

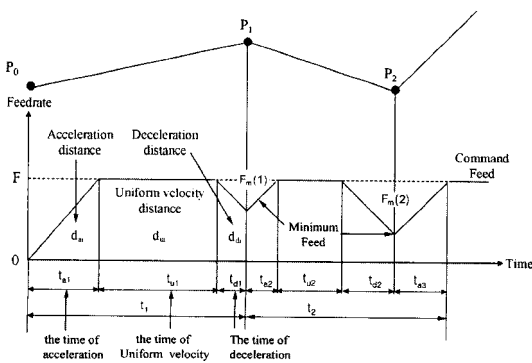


Fig. 1. Feedrate profile of an NC program.

도가 줄어드는데 이것을 두 블록 사이의 최소 이송속도(minimum feedrate)라 한다. Fig. 1에 나타난 것처럼, 두 블록 사이의 최소 이송속도는 현재 블록에서 감속구간의 시간과 다음 블록에서 가속구간의 시간을 결정하는 주요 변수이고, 실제 가공시간을 예측하기 위해서는 반드시 필요하다. 그렇지만 최소 이송속도의 결정에 영향을 미치는 인자들에 대한 정보가 없기 때문에 가공시간 예측 모델의 수립을 위해서는 많은 실험과 관찰이 필요하다.

두 블록사이에서의 이송속도 변화를 세밀히 관찰하면, 두 블록이 이루는 사이각, 블록길이, 명목 이송속도가 두 블록사이에서의 이송속도 변화와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 현재 블록의 길이가 짧은 경우 최소 이송속도는 현재 블록길이와 두 블록의 사이각의 함수형태로 표현할 수 있고, 블록길이가 긴 경우 최소 이송속도는 두 블록의 사이각과 명목 이송속도의 함수로써 표현할 수 있다. 이러한 함수적인 관계를 명확하게 규명하기 위해서는 이송속도의 변화를 측정하고 기록할 수 있는 장비가 필요하지만, 아직까지 이러한 장비가 쉽게 제공되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 특별하게 설계된 실험을 통하여 이러한 관계를 파악하도록 한다.

동일한 길이의 두 NC 블록에 대하여, 한 블록은 일정한 이송속도(F)로 움직이고 다른 블록은 선형적인 이송속도로 움직인다고 가정할 때, 전자는 명목 가공시간을 나타내고 후자는 실제 가공시간을 의미하게 된다. Fig. 2에서 음영된 부분의 면적은 공구의 실제 이송거리를 나타내고, 시간 축에서 음영된 부분의 거리가 실제 가공시간을 나타낸다. 또한 공구가 일정한 거리를 이동할 때, 가·감속 상수가 증가할수록 명목 가공시간(T_N)과 실제 가공시간(T_A)의 차이가 감소한다는 것을 알 수 있다. 고속가공을 지원하는 대부분의

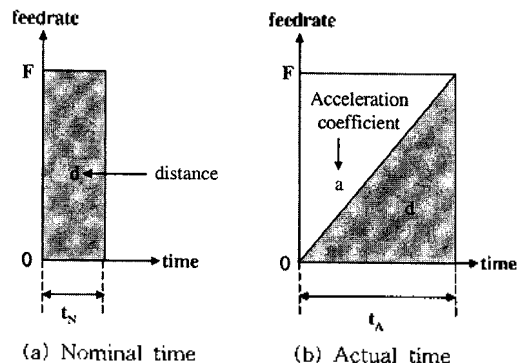


Fig. 2. Nominal and actual time in short blocks.

머시닝 센터는 급속한 가·감속기능을 가지고 있기 때문에, 특히 블록 길이가 짧은 경우에 가·감속효과에 의해서 명목 가공시간과 실제 가공시간의 차이가 많이 나타나고 있다.

동속구간이 존재하지 않는 블록길이가 짧은 경우에 있어서, 가공시간 모델은 가·감속 구간에서의 이송 속도 모델이 선형이고 동일한 가속도 상수 값을 갖는다($a = a_{acc} = a_{dec}$)는 가정으로부터 유도할 수 있다. i 번째 블록에서 가·감속 구간의 길이와 절삭시간은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$d_{ai} = \frac{F_M^2(i) - F_m^2(i-1)}{2a} \tag{1}$$

$$d_{di} = \frac{F_M^2(i) - F_m^2(i)}{2a} \tag{2}$$

$$d_i = d_{ai} + d_{di} \tag{3}$$

$$t_i = t_{ai} + t_{di} = \frac{F_M(i) - F_m(i-1)}{a} + \frac{F_M(i) - F_m(i)}{a} \tag{4}$$

여기서, d_i 는 i 번째 블록의 길이, $F_m(i-1)$, $F_m(i)$ 은 $i-1$, i 번째 최소 이송속도, $F_M(i)$ 는 i 번째 블록의 최대 이송속도, a 는 가·감속도 상수, t_{ai} , t_{di} 는 i 번째 블록의 가·감속구간의 시간이다.

NC 블록의 각 끝점에서 최소 이송속도를 구하기 위하여 본 연구에서는 사이각이 일정한 정다각형을 사용하여 실험하였다. Fig. 3에는 정육각형과 정팔각형의 예가 나타나 있는데, 이 경우 사이각은 각각 60° , 45° 이다. 본 실험은 각도의 변화에 따라 가공시간의 차이를 측정하는 것인데, 이때 측정오차를 줄이기 위하여 공구로 하여금 주어진 정다각형을 충분한 회수만큼 반복하여 이동하도록 하였다.

공구가 정 m 각형을 n 회 반복 이동하는 경우 총 가

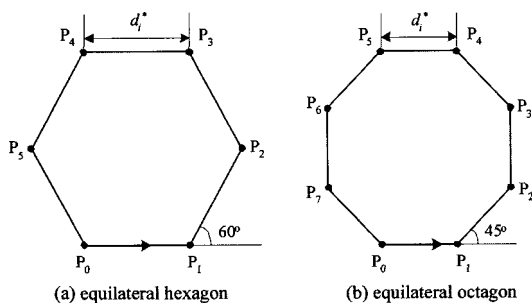


Fig. 3. Equilateral polygon example.

공시간은 식 (4)로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$T = \sum_{i=1}^{mn} t_i = \sum_{i=1}^{mn} (t_{ai} + t_{di}) = \sum_{i=1}^{mn} \left\{ \frac{F_M(i) - F_m(i-1)}{a} + \frac{F_M(i) - F_m(i)}{a} \right\} \tag{5}$$

이때 nm 이 충분히 크다면, 총 가공시간은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$T = 2 \frac{F_M(1)}{a} + (2mn - 2) \frac{F_M - F_m}{a} \equiv 2mn \frac{F_M - F_m}{a} \tag{6}$$

여기서, $F_{m(0)} = F_m(nm) = 0$, $F_{m(1)} = F_{m(2)} = \dots = F_m(nm-1)$, $F_{M(1)} = F_{M(2)} = \dots = F_M(nm-1)$.

실험에 의해서 블록의 가·감속 시간(t_a^*)을 얻을 수 있으면, 최소 이송속도는 식 (6)으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$t_a^* = t_d^* = \frac{F_M - F_m}{a} = \frac{T^*}{2mn} \tag{7}$$

$$F_m = \frac{d_a^*}{t_a^*} - \frac{1}{2} a t_a^* \tag{8}$$

여기서 $F_M = F_m + a t_a^*$, d_a^* = (정다각형 한 변의 길이) / 2, T^* 는 총 절삭시간이다.

최소 이송속도 예측 모델을 수립하기 위하여 다음과 같은 조건하에서 실험을 하였다: 블록 길이는 0.05, 0.21, 0.5 mm, 두 블록의 사이각은 10° , 20° , 30° , 40° , 45° , 60° , 72° , 90° , 120° , 블록의 최대 이송속도가 명목 이송속도를 초과하지 않도록 명목 이송속도를 5000 mm/min, 블록당 반복회수가 약 10,000회 정도가 되도록 정다각형의 반복회수를 설정하였다. 실험에 사용한 머시닝 센터는 FANUC-18M 제어기가 장착된 (주)화천기공의 SIRIUS-U로 절삭이송 가감속 상수는 1,200,000 mm/min², 급송이송 가감속 상수는 18,000,000 mm/min², 최대 추축 회전수는 10,000 RPM, 스트로크 크기는 500×500×500 mm이다.

Table 1의 실험결과에는 실제 가공시간(T)과 식 (8)에 의한 계산된 최소(F_m) 및 최대 이송속도(F_M)가 나타나 있다. 일반적으로 블록 사이각이 증가할수록 최소 이송속도가 줄어들 것으로 예상할 수 있다. 그런데, Table 1에 나타난 것처럼, 두 블록의 사이각이 90° (정사각형)일 때 최대 이송속도(F_M)가 가장 크게 나타나고 최소 이송속도(F_m)와 최대 이송속도(F_M)의 차

Table 1. Minimum feedrate (unit:mm/min)

# of side	# of iter.	Distance of the acceleration range (d_a)											
		0.05 mm				0.21 mm				0.5 mm			
		T' (sec)	F_m	F_M	F_m-F_M	T' (sec)	F_m	F_M	F_m-F_M	T' (sec)	F_m	F_M	F_m-F_M
3	3400	304	52	350	298	304	697	995	298	304	1864	2162	298
4	2500	291	60	352	291	291	672	1011	291	291	1916	2207	291
5	2000	301	49	350	301	301	687	988	301	301	1843	2144	301
6	1700	307	49	350	301	307	687	988	301	307	1843	2144	301
8	1300	313	49	350	301	313	687	988	301	313	1843	2144	301
9	1200	329	45	349	304	329	675	980	305	329	1817	2122	305
12	850	311	44	349	305	311	674	979	305	311	1815	2120	305
18	600	333	40	349	309	333	663	971	308	333	1792	2100	308
36	300	334	39	349	310	334	660	969	309	335	1779	2089	310

이가 가장 작아지는 것을 알 수 있다.

본 실험결과를 토대로 블록길이가 짧은 경우 ($d_a \leq 0.5$)의 최소 이송속도 모델은, 다음과 같이 결정 계수(R^2)가 0.99이상인 선형 회귀 모델로 추정할 수 있다.

$$F_m(d_a^*, \theta) = \alpha + \beta d_a^* + \gamma \theta \tag{9}$$

여기서, $\alpha = -191$ mm/min, $\beta = 3971$ /min, $\gamma = 42.1$ mm/min/radian, θ 는 두 블록의 사이각(radian)이다.

3. 긴 NC 블록에서의 최소 이송속도

NC 블록의 길이가 충분히 긴 경우, 가공시간의 대부분을 등속구간이 차지하기 때문에 실제 가공시간과 명목 가공시간과의 차이는 매우 작아지게 되며, 가공시간은 다음과 같이 계산된다.

$$t_i = t_{ai} + t_{ui} + t_{di} = \frac{F(i) - F_m(i-1)}{a} + \frac{d_i - d_{ai} - d_{di}}{F(i)} + \frac{F(i) - F_m(i)}{a} \tag{10}$$

여기서, $d_{ai} = \frac{F^2(i) - F_m^2(i-1)}{2a}$, $d_{di} = \frac{F^2(i) - F_m^2(i)}{2a}$,

t_{ui} 는 i 번째 구간의 등속구간의 가공시간이다.

앞 절에서 기술한 바와 같이, 긴 블록의 경우 최소 이송속도에 영향을 미치는 주요 인자는 명목 이송속도와 두 블록의 사이각이다. 따라서 명목 이송속도와 두 블록의 사이각을 변화시키면서 최소 이송속도를 측정하는 실험이 필요하다. Fig. 4에 나타난 것처럼, 명목 이송속도, 두 블록의 사이각(θ)에 의해서 생성된

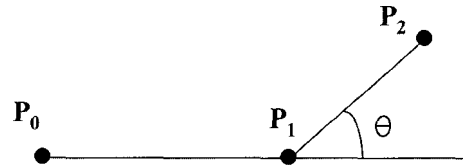


Fig. 4. Experimental Design for long NC blocks.

공구경로를 반복적으로 수행하면서 머시닝 센터의 디스플레이 패널에 표시되는 이송속도 값을 관찰하고 가장 작은 값을 최소 이송속도로 기록한다.

예측모델을 수립하기 위해서 수행한 실험조건은 다음과 같다: 명목 이송속도는 200, 400, 600, 800, 1200, 1600, 2000, 2400, 3200 mm/min, 두 블록의 사이각은 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°, 100°, 그리고 각 공구경로에 대해서 100회를 반복하였다. Table 2에 나타나 있는 실험결과에 의하면, 두 블록의 사이각이 90°일 때 최소 이송속도가 가장 작아지는 것을 알 수 있다. 3축 기계의 자유곡면 가공에서 두 블록의 사이각이 대부분 90° 이하라는 것을 감안하여 본 연구에서는 0-90°의 사이각 구간에서 결정계수 0.95을 만족하는 다음과 같은 선형 회귀 모델을 구하였다.

$$F_m(\theta, F) = 0.00373558 + 0.000950213\theta + 0.000428506\theta^2 + 0.000297818\theta^3 + 0.000342609\theta^4 + 0.998778F - 0.0107682\theta F - 0.110314\theta^2 F + 0.00354889\theta^3 F + 0.00000239189F^2 + 0.00000491826\theta F^2 - 0.00000541529\theta^2 F^2 - 0.00000000237796F^3 \tag{11}$$

Table 2. Minimum feedrate in long blocks

Angle (deg.)	Feedrate (mm/min)									
	200	400	600	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200
0	200	400	600	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200
10	199	398	599	796	1195	1594	1992	2391	2789	3188
20	196	394	591	788	1182	1535	1972	2363	2757	3151
30	193	386	579	773	1159	1545	1932	2318	2705	3091
40	190	376	564	755	1128	1508	1880	2255	2648	3018
45	185	370	555	745	1109	1463	1848	2218	2587	3001
50	181	363	543	729	1096	1450	1813	2196	2547	2906
60	180	350	519	728	1039	1388	1755	2079	2426	2772
70	164	328	493	657	1011	1319	1638	1969	2296	2629
80	153	306	459	613	927	1229	1532	1842	2148	2462
90	142	284	424	566	849	1175	1431	1700	1983	2265
100	155	307	460	616	930	1234	1534	1843	2150	2463

4. 가공시간 예측 모델

Fig. 5에 나타난 것처럼, 본 연구에서는 블록 내에서의 이송속도 형태는 크게 4가지로 분류하였다. 이것은 Yan에 의해 제안된 3가지 이송속도 형태에 Fig. 5(d)와 같은 이송속도가 계속 감소하는 형태를 추가한 것이다. 이송속도가 감소하는 형태는 현재 블록의 길이와 짧고 이전 블록과 현재 블록의 사이각 보다 현재 블록과 다음 블록의 사이각이 더 큰 경우에 나타난다.

CASE 1. 모든 구간이 존재 하는 경우: 블록 내에 가속구간, 등속구간 및 감속구간이 모두 존재하는 경

우로(Fig. 5(a)) 식 (10)으로부터 절삭시간 t_i 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_i = \frac{2F(i) - F_m(i-1) - F_m(i)}{a} + \left\{ \frac{d_i}{F(i)} + \frac{2F^2(i) - [F_m^2(i-1) + F_m^2(i)]}{2aF} \right\} \quad (12)$$

CASE 2. 가속구간과 감속구간 만 존재하는 경우: 블록은 가속구간과 감속구간 만으로 구성된 경우로 (Fig. 5(b)), 이송속도가 증가하다가 명목 이송속도에도달하기 전에 감속하기 시작한다. 이 경우 블록의 가공시간은 다음과 같이 계산된다.

$$t_i = \frac{2F_M(i) - F_m(i-1) - F_m(i)}{a} \quad (13)$$

여기서, $F_M(i) = \{ad_i + 0.5[F_m^2(i-1) + F_m^2(i)]\}^{1/2}$

CASE 3. 가속구간 만 존재하는 경우: Fig. 5(c)와 같이 가속구간 만 존재하는 경우로서 현재 블록의 최소 이송속도가 전 블록의 최소 이송속도보다 매우 클 때 나타난다. 이 경우 이송속도가 계속 증가하더라도 예측 모델에 의해 계산된 최소 이송속도에는 도달할 수 없기 때문에, 최소 이송속도는 증가될 수 있는 최대 이송속도 $F_M(i)$ 로 대체되며 가공시간은 다음과 같이 계산된다.

$$t_i = \frac{F_M(i) - F_m(i-1)}{a} \quad (14)$$

여기서, $F_M(i) = [F_m^2(i-1) + 2ad_i]^{1/2}$

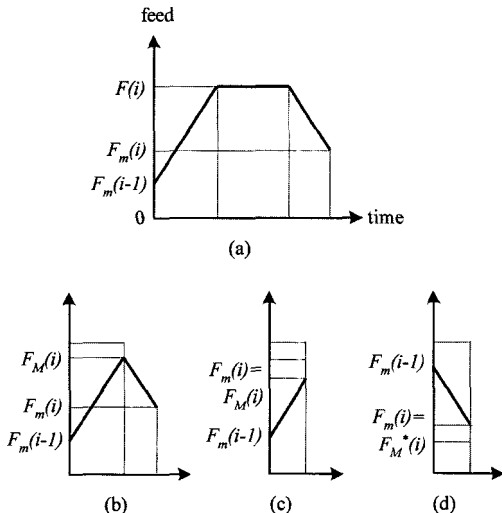


Fig. 5. Four cases of feedrate behaviors.

CASE 4. 감속구간만 존재하는 경우: Fig. 5(d)와 같이 감속구간 만 존재하는 경우로서 현재 블록의 최소 이송속도가 전 블록의 최소 이송속도보다 매우 작을 때 나타난다. 이 경우 이송속도가 계속 감소하더라도 예측 모델에 의해 계산된 최소 이송속도까지 떨어질 수 없기 때문에, 최소 이송속도는 가장 낮은 이송속도 $F_m^*(i)$ 로 대체되며 가공시간은 다음과 같이 계산된다.

$$t_i = \frac{F_m(i-1) - F_m^*(i)}{a} \quad (15)$$

여기서, $F_m^*(i) = [F_m^2(i-1) - 2ad_i]^{1/2}$
 대부분의 자유곡면 가공용 NC 프로그램은 CASE 2, 3, 4와 같이 매우 짧은 수많은 NC 블록으로 구성되어 있기 때문에 가공시간을 예측할 때 반드시 가·감속 효과를 고려해야 한다. 실험을 통해서도 알 수 있듯이, 비록 명목 이송속도가 5,000 mm/min 이상으로 설정되더라도 실제 가공에서의 이송속도는 1,000 mm/min 이하에서 변동한다.

본 연구에서는 블록 내의 4가지 이송속도 형태에 대해서 가공시간을 계산할 수 있는 반복 알고리즘을 제안한다(Fig. 6). 가공시간 계산의 첫 번째 단계에서는 총 가공시간과 가공 시작점에서의 최소 이송속도 ($F_m(0)$)를 초기화한다. 두 번째 단계에서는 현재 블록의 가공시간을 계산하는데 필요한 변수들(블록길이(d_i), 최소 경유 이송속도($F_m(i)$), 블록의 가·감속 구간 거리(d_{ur} , d_{ud}))을 계산한다. 특히 최소 이송속도는 실험을 통해서 얻어진 선형 회귀 모델을 사용한다. 세 번째 단계에서는 정의된 기준에 의해 이송속도 형태를 구분하고, 해당 CASE에서 블록의 가공시간(t_i)을 계산한다. 다음 단계에서는 다음 블록의 가공시간 계산을 위해서 총 가공시간과 최소 이송속도를 갱신한다. 마지막 단계에서는 종료조건을 확인하는 것으로 계산할 블록이 없으면 전체 알고리즘을 종료하게 된다.

5. 명목/예측/실제 가공시간의 비교

제안된 가공시간 예측 모델을 검증하기 위하여 본 연구에서는 머신링 센터의 실제 가공시간과 모델을 통한 예측시간을 비교한다. Fig. 7에 나타난 것처럼, 비교실험을 위해서 자유곡면으로 구성된 4개의 실제 사출금형 성형곡면을 가공할 수 있는 NC 프로그램을 준비하였다. NC 프로그램은 CAM 소프트웨어인 Soft-Master[®]를 사용하였고 공구경로 패턴은 급속이송을 최소화하기 위하여 지그재그 공구경로 패턴을 사용하였다.

비교실험을 위해서 명목 가공시간은 NC 프로그램 정보로부터 계산하고, 예측 가공시간은 제안된 모델을 통하여 계산하며, 실제 가공시간은 측정용 통해서 얻는다. 명목 이송속도 변화에 대한 가공시간의 변화 추이를 살펴보기 위해서 각 NC 프로그램은 2000, 3000 mm/min의 명목 이송속도를 설정하여 가공하였다. Table 3에는 비교실험에 사용된 각 NC 프로그램의 절삭조건(공구정보, 공구경로 간격), 총 블록 수뿐만 아니라 명목, 예측, 측정 가공시간 값과 이들 간의 차이를 분석한 결과가 나타나 있다.

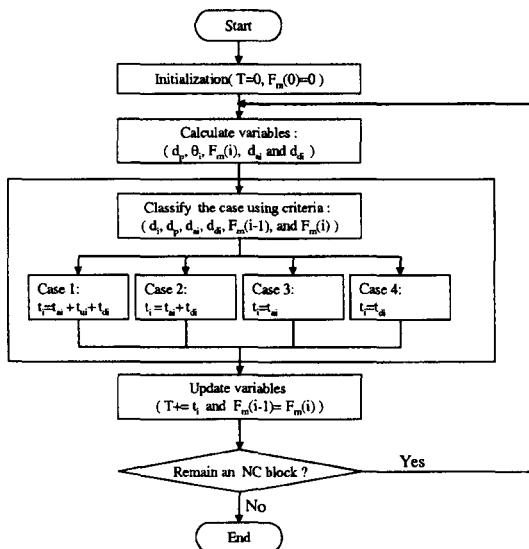


Fig. 6. Procedure for NC machining time estimation.

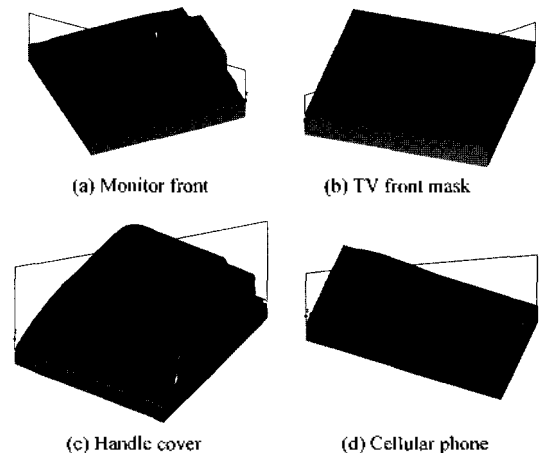


Fig. 7. Molding dies and tool paths for comparison tests.

Table 3. Comparison between the machining times

Mold. Dies	Mach. condition		No.of blocks			Machining time(min.)			Difference	
	Tool/PI	Feed	Case2-4 (S)	Case1 (L)	S/(S+L)	Nom. (N)	Act. (A)	Est. (E)	A/N	(E-A)/A
Moni. front	20φBEM /1.5 mm	2,000	59190	71713	0.45	85.03	96.30	99.73	1.13	.0356
		3,000	95751	35152	0.73	56.72	86.47	88.88	1.52	.0279
TVfront mask	20φBEM /1.0 mm	2,000	1059	78260	0.01	87.73	87.94	87.95	1.00	.0001
		3,000	50003	29316	0.63	58.52	70.12	72.06	1.20	.0277
Hand. cover	8φBEM /0.2 mm	2,000	73431	38739	0.65	39.90	58.00	63.05	1.45	.0871
		3,000	89125	23045	0.79	26.60	54.13	52.93	2.03	-.0222
Cell. phone	8φBEM /0.2 mm	2,000	83689	19357	0.81	23.80	48.45	47.65	2.04	-.0165
		3,000	92860	10186	0.90	15.89	47.15	42.97	3.02	-.0887

*) PI : path interval

가공시간을 비교한 결과 이러한 가공시간들 사이에는 특별한 특이성은 없는 것으로 나타났다. 제안된 모델을 사용한 예측 가공시간은 약 10% 정도의 정밀도를 갖으며, 일정계획 수립하는데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 Table 3의 실험결과로부터, 예측 가공시간과 실제 가공시간의 오차는 실제 가공시간대 명목 가공시간의 비율(A/N)이 커질수록 증가하고, 전체 블록 수에서 짧은 블록 수의 비율(S/(S+L))이 커질수록 오차가 감소한다는 사실을 알 수 있다. 또한 금형공장의 일정관리자들이 명목 가공시간에 1.5-3.0의 조정계수를 곱하여 실제 가공시간을 예측한다는 것이 현실적으로 타당하다는 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

머시닝 센터의 기계적인 특성 때문에 발생하는 가·감속은 실제 가공시간에 가장 크게 영향을 미치는 인자이며, 이러한 효과는 블록 길이가 짧을수록 크게 나타난다. 특히, 수많은 짧은 블록들로 구성된 자유곡면 가공용 NC 프로그램에서는 실제 가공시간과 명목 가공시간의 차이가 매우 크게 나타난다. 본 연구에서는 가공시간 모델에서 중요 변수인 최소 이송속도를 예측하는 모델을 개발한바, 이때 블록길이에 따라 최소 이송속도에 영향을 미치는 인자들이 다르다는 것을 알 수 있었다. 즉, 실험과 실험을 통하여 최소 이송속도는 블록길이가 짧은 경우에는 블록길이와 두 블록의 사이각과 밀접한 관계를 갖으며, 블록길이가 긴 경우에는 명목 이송속도와 두 블록의 사이각과 관계가 있음을 파악하였다. 제안된 절삭시간 예측 모델은 블록길이, 명목 이송속도, 예측된 최소 이송속도를 매개

변수로 사용하고 있고, 4가지의 이송속도의 거동에 따라 각각 구분하고 가공시간을 계산하도록 하였다.

현재 출시되는 대부분의 머시닝 센터는 고속가공을 지원하며 부가적으로 가공부가 큰 코너 부위에서 자동으로 이송속도를 조절하는 기능을 가지고 있으며, 급속한 가·감속이 가능하다. 따라서 이러한 기계적인 특성을 반영하고 다양한 형태의 자유곡면 가공에서도 본 연구에서 제안된 모델을 응용하기 위해서는 이송율의 변화에 따른 추가적인 실험과 고찰이 이루어져야 한다. 아울러, 예측의 정확도를 제고하기 위하여 CNC 제어기의 최소 이송속도를 정확히 측정할 수 있는 장비의 개발이 요구된다.

참고문헌

1. Byoung K. Choi, and Robert B. Jerard, *Sculptured Surface Machining*, Elsevier, pp. 94-146, 1999.
2. Ko, K., Kim, B. H., Kim, D. H. and Choi, B. K., "A Hierarchical CAPP System Architecture for Die Cavity Machining," *International IFIP Conference: FEATS 2001 Feature Modeling in Advanced Design-for-the-life System*, pp. 12-14, June, 2001.
3. Seok H. Bae, Keyhoon Ko, Bo H. Kim, and Byoung K. Choi, "Automatic Feedrate Adjustment for Pocket Machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 35, No. 4, pp. 495-500, 2003.
4. Choi, B. K. and Kim, B. H., "MES(manufacturing execution system) Architecture for FMS Compatible to ERP(enterprise planning system)," *International Journal of CIM*, Vol. 15, No. 3, pp. 274-284, 2002.
5. Maropoulos, P. G., Baker, R. P. and Paramor, K. Y. G., "Integration of Tool Selection with Design Part 2: Aggregate Machining Time Estimation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 107,

pp. 135-142, 2000.

6. Yan, X., Shirase, K., Hirao, M. and Yasui, T., "NC Program Evaluator for Higher Machining Productivity," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 1563-1573, 1999.

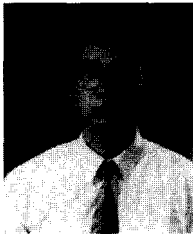
7. Kim, B. H. and Choi, B. K., "Machining Efficiency Comparison Direction-parallel Tool Path with Contour-parallel Tool Path", *Computer-Aided Design*, Vol. 34, pp. 89-95, 2002.

8. Manuel Montreal and Ciro A. Rodriguez, "Influence

of Tool Path Strategy on the Cycle Time of High-speed Milling," *Computer-Aided Design*, Vol. 35, pp. 395-401, 2003.

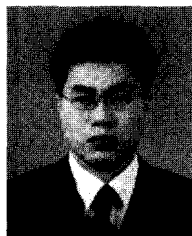
9. Kaan Erkorkmaz and Yusuf Altintas, "High Speed CNC System Design. Part I: Jerk Limited Trajectory Generation and Quintic Spline Interpolation," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, pp. 1323-1345, 2001.

10. FANUC Korea, FANUC Series 16/18/160/180-Model Parameter Manual, 1998.



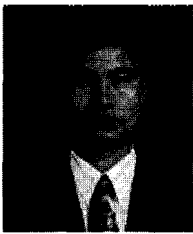
허 은 영

1993년 전북대학교 산업공학과 학사
 1995년 전북대학교 산업공학과 석사
 2000년~현재 전북대학교 산업정보시스템
 공학과 박사과정
 관심분야: CAPP, CAD/CAM, 시스템
 통합



김 보 현

1991년 전남대학교 산업공학과 학사
 1993년 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1998년 한국과학기술원 산업공학과 박사
 1998년~2000년 한국과학기술원 CIM연
 구센터
 2001년~2002년 해양시스템안전연구원
 선임연구원
 2002년~현재 한국생산기술연구원 선임
 구원
 관심분야: 제조정보시스템, VMS, CAPP,
 CAD/CAM, Virtual Reality



김 동 원

1982년 서울대학교 산업공학 학사
 1984년 한국과학기술원 산업공학 석사
 1994년 일본 Hokkaido대 정밀공학과 박
 사
 1988년~현재 전북대학교 산업정보시스템
 공학과 교수
 관심분야: Robotic Process Planning,
 CAPP, IMS, 회합물반도체 생산
 및 일정계획