

고속 가공을 이용한 금형의 효율적 생산 제 2 부: 사상 공정 및 가공 조건의 선정

김민태[#], 제성욱^{*}, 이해성^{**}, 주종남^{***}

High Speed Machining Considering Efficient Manual Finishing Part II: Optimal Manual Finishing Process and Machining Condition

Min Tae Kim[#], Sung Uk Je^{*}, Hae Sung Lee^{**} and Chong Nam Chu^{***}

ABSTRACT

In this work, optimal finish machining condition considering total time for mold or electrode manufacturing was investigated. First, manual finishing time according to the machining condition was analyzed for the work material. The effect of runout and phase shift of tool path on surface finish was also considered in those analyses. Secondly, optimal manual finishing processes were determined for various machining conditions. Finally, finish machining time and corresponding manual finishing time were taken into account for the estimation of the total time of manufacturing mold. Though small feed per tooth and pick feed reduced the manual finishing time, the finish machining time increased in such conditions. With a machining condition of feed per tooth of 0.2 mm and pick feed of 0.3 mm, the minimum total time of manufacturing mold was achieved in our machining condition.

Key Words : Runout (런아웃), Phase shift (이송 위상차), Mold-manufacturing (금형생산), HSM(고속가공)

1. 서론

금형생산성 향상은 최근의 다품종 소량생산과 소비자의 다양한 욕구 등으로 인해 꾸준히 요구되고 있으며, 고속 가공기의 도입으로 이러한 생산성 향상은 일견 이루어지고 있다. 금형의 생산성 향상을 위해서는 공정 계획, 폐속 금형의 제작, 공구 경로의 형성, 가공공정, 사상공정을 포함한 후처리 공정 등 금형공정 전반의 최적화가 요구된다.¹ 특

히 금형 생산공정 중 가장 높은 비율을 차지하는 가공 및 사상공정의 최적화가 절실하다.⁸ 이와 관련하여 고속가공에서 가공조건 및 공구선정 등에 관한 연구가 다수 진행되어 왔으며, 사상공정에 관한 연구도 최근 진행되고 있다.^{2,3} 본 논문에서는 가공공정과 사상공정을 모두 고려하여 금형 생산성 향상을 위한 방안을 고찰하였으며, 제 2 부에서는 금형의 재료특성을 바탕으로 최적 사상공정을 제안한 후, 제 1 부에서 논의한 잔류부피의 개

☞ 접수일: 2005 년 10 월 31 일; 게재승인일: 2006 년 11 월 9 일

교신저자: 서울대학교 대학원 기계항공공학부

E-mail mint@prema.snu.ac.kr Tel. (02) 880-7147

* LG 전자 생산 기술원

** 서울대학교 대학원 기계항공공학부

*** 서울대학교 기계항공공학부

념을 이용하여 금형의 고속가공 시 금형생산시간을 최소로 할 수 있는 가공조건을 제안하였다.

2. 사상공정의 선정

2.1 고속가공에서 사상시간의 예측

사상공정에서 사용되는 숫돌과 사포는 각각의 종류마다 임계표면조도(Critical Surface Roughness: CSR)를 갖고 있으며, 임계표면조도란 더 이상의 사상작업에도 표면의 품질이 향상되지 않는 표면조도값을 의미한다.^{2,3} CSR의 개념을 이용하여 이해성²은 식 (1)을 제안하였고, 식 (1)의 T/C의 값을 통해 사상공정에서 사용되는 도구에 따른 사상시간을 예측할 수 있다.^{2,3}

$$T = C \left[\frac{v_0 + \frac{C_g}{2} CSR_1}{K_1} + \frac{C_g}{2} \sum_{i=2}^n \frac{CSR_{i-1} + CSR_i}{K_i} \right]$$

$$= C \left[\frac{v_0 + 3.62 CSR_1}{K_1} + 3.62 \sum_{i=2}^n \frac{CSR_{i-1} + CSR_i}{K_i} \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 T는 사상시간, C는 공작물의 물성치 및 사상력과 관련된 상수, v_0 는 사상공정을 통해 제거되어야 할 부피, CSR_i 및 K_i 는 i 번째 사상도구의 CSR값 및 마모계수이다.

이 때, 마모계수(K)란 각각의 사상도구가 공작물과의 관계에서 갖는 무차원수이며, 사상공정 해석에 기본이 되는 관계식이다. 마모계수는 식 (2)를 통해 구할 수 있으며, P는 비커스 경도값, V는 사상공정을 통해 제거된 부피량, F는 사상방향의 사상력, 그리고 L은 총 사상거리를 의미한다.³

$$K = \frac{VP}{FL} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터 사상도구가 결정되었을 때 전체 사상시간을 구할 수 있으며, 사상시간을 최소로 할 수 있는 사상도구의 조합도 결정할 수 있다.

2.2 금형생산에서 사상공정의 선정

2.2.1 금형의 재료특성

가공공정이 완료된 경우 사상공정 및 사상시간은 공작물의 CSR 및 K값에 따라 변화하므로 금형

의 재료특성에 대한 조사가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 구리(C12200)를 사용하였으며, C12200은 인탈산동(Phosphorus deoxidized copper)으로 구성 성분과 물성치는 Table 1과 같다. Table 1의 물성치 중 비커스 경도값이 마모계수의 결정에서 가장 중요하다.³ 비커스 경도값은 같은 재료라 하더라도 가공량에 따라 달라질 수 있으므로 정확한 측정이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 1의 HMV-2 마이크로 경도 측정기(SHIMADZU社)를 사용하여 C12200 재료의 비커스 경도값을 측정하였고, 측정된 평균값은 78.4 H_V 이다.

Table 1 The properties of C12200 (1/2H)

Ingredient	Cu: 99.9%, P: 0.015~0.04%
Elongation at break	15%
Hardness, Vickers	75~120 H_V
Tensile strength, Ultimate	245~315 MPa

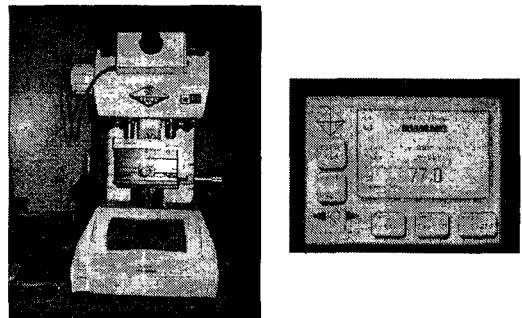


Fig. 1 HMV-2 Micro Hardness Tester

사용된 금형의 재료 특성을 바탕으로 2.1 절에서 언급한 임계표면조도와 마모계수를 구하였고, 결과를 Table 2에 나타내었다. 가공면 및 사상면의 표면 조도는 Fig. 2의 Form Talysurf Series 2(Rank Talysurf Hobson社)로 측정하였다.

한편, CSR값은 사상도구의 반복작업 횟수 및 교환시기에 따라 변하므로² 실제 생산현장에서 많이 사용되는 50과 30 strokes 두 가지를 선택하여 측정하였다.^{2,3}

Table 2 Wear coefficient and CSR of C12200 (1/2H)

Manual finishing tool	CSR [μm]		Wear coefficient,
	50 strokes	30 strokes	
Sandpaper #400	0.465	0.531	6.361×10^{-3}
Sandpaper #600	0.245	0.288	3.836×10^{-3}
Sandpaper #800	0.184	0.200	2.362×10^{-3}

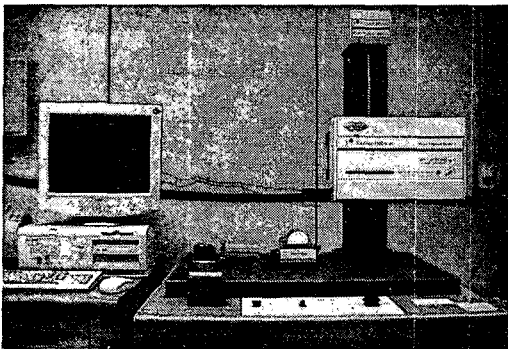


Fig. 2 Form Talysurf Series 2 measurement machine

2.2.2 단위 잔류부피(Unit RV_{AM})에 따른 사상 공정 및 사상공정의 선정

고속가공에서는 가공면의 품질이 좋기 때문에 Grinder 나 슛들을 이용한 사상공정은 불필요하고 사포를 이용한 사상공정으로 충분하다.² 따라서 사포 #800 으로 사상공정을 마무리한다고 가정할 때, 일반적으로 많이 사용되는 사포는 #400, #600, #800 이고 가능한 사상공정은 Table 3 과 같다.

Table 3 Possible manual finishing process after High Speed Machining

Process I	Paper #800
Process II	Paper#400 → Paper#800
Process III	Paper#600 → Paper#800
Process IV	Paper#400 → Paper#600 → Paper#800

Fig. 3 에 Table 3 의 사상공정에서 단위 잔류부

피(Unit RV_{AM})에 따른 T/C 의 변화를 도시하였다.

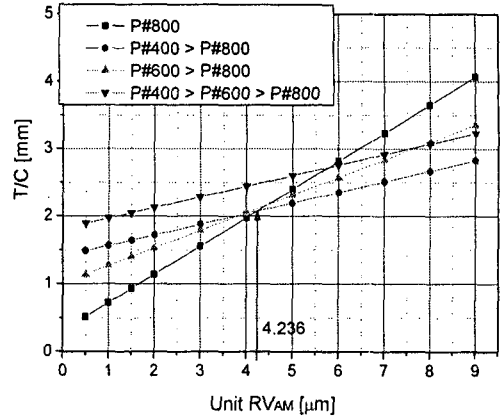


Fig. 3 T/C according to unit RV_{AM} in each manual finishing process for C12200 molds

Fig. 3 에서 T/C 의 값을 최소로 하는 사상공정이 구리(C12200) 금형의 사상에서 가장 효율적인 공정이다. 따라서 단위 잔류부피가 0~4.236 μm 인 경우는 Process I, 단위 잔류부피가 4.236 μm 보다 큰 경우는 Process II 가 가장 효율적인 사상공정이 된다. 한편, 도시하지는 않았으나, 단위 잔류부피가 13 μm 보다 크게 되면, Process IV 가 가장 효율적인 사상공정이 된다.

Table 4 에는 상기의 사상공정 선정 실험결과와 제 1 부에서 제시한 정상가공조건에 따른 단위 잔류부피의 변화 해석 및 검증실험 결과를 동시에 나타내었다. Table 4 를 통해 구리(C12200) 금형의 고속가공에서는 단위 잔류부피가 13 μm 를 초과하지 않기 때문에 사상공정 중 Process I 또는 Process II 가 중요함을 확인할 수 있다. Case VIII 및 Case IX 는 사용된 고속 가공기의 가공 조건을 벗어나는 범위이므로 실험 결과를 제시하지 않았으며, 향후 해석 결과로 이를 대체하였다.

Table 4 Unit RV_{AM} and optimal manual finishing process in each machining condition for C12200 molds

Analysis	Unit RV _{AM} [μm]	Optimal manual finishing process
Case I	1.04~1.67	I
Case II	0.81~2.08	I
Case III	1.34~2.60	I
Case IV	1.82~4.68	I or II
Case V	2.54~5.4	I or II
Case VI	2.42~7.59	I or II
Case VII	3.23~8.33	I or II
Case VIII	5.05~12.9	II
Experiment	Unit RV _{AM} [μm]	Optimal manual finishing process
Case I	1.66~1.97	I
Case II	1.39~1.94	I
Case III	2.01~2.63	I
Case IV	3.05~3.85	I
Case V	3.76~4.88	I or II
Case VI	3.76~5.02	I or II
Case VII	4.5~5.73	II

3. 고속가공을 이용한 금형 생산시간

3.1 고속가공 시간

고속가공을 이용한 가공공정은 황삭, 중삭, 정삭가공으로 이루어진다. 이 중 황삭 및 중삭가공은 최종가공면 형성과 무관하므로 사상공정에 영향을 미치지 않으며, 일반적으로 가공시간을 일정하다고 가정할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 정삭가공 시간만 가공시간에 포함하였다.

Table 5 에는 제 1 부에서 제안된 각각의 정삭가공조건으로 10000 mm² 넓이의 공작물을 가공할 때 가공하지 않는 경로(Dead path)를 제외한 가공시간과 포함한 가공시간을 각각 나타내었다.

3.2 가공하지 않는 경로(Dead path)

Table 5 에서 가공시간을 해석할 때 가공하지 않는 경로(Dead path)를 포함하였다. 공작기계의 주축은 실제 가공공정에서 이전 경로가 종료된 후 다음 경로시작점으로 되돌아와야 하며, 입력된 이송

속도에 도달하기 위해 가속 또는 감속을 수회 반복해야 한다. 이러한 가공하지 않는 경로는 일반적으로 폐속 이송으로 이루어지나, 고속가공에서는 가공경로도 이송속도가 매우 빠르며 종종 가공하지 않는 경로의 이송속도와 동일한 경우도 있다. 따라서 가공시간의 계산시 이를 고려해야 한다. 물론 가공하지 않는 경로는 작업자의 의사에 의하여 결정되는 주관적인 것이나 수 년간의 노하우에 의한 결과이므로 신뢰할 수 있는 여지는 있다. Fig. 4 에 가공하지 않는 경로를 예시하였다.

Table 5 Time comparison of cutting path and non-cutting path in finish machining 10000 mm²

Cutting condition	Cutting path only [min] (%)	Non-cutting path only [min] (%)	
		Experiment	Analysis
Case I	25 (100)	21.7 (86.8)	21.7 (86.8)
Case II	12.5 (100)	21.7 (173.6)	21.7 (173.6)
Case III	8.33 (100)	12.2 (146.5)	14.47 (173.7)
Case IV	5.56 (100)	12.2 (219.4)	14.47 (260.3)
Case V	4.16 (100)	9.22 (221.6)	10.85 (260.8)
Case VI	4.16 (100)	12.2 (293.3)	14.47 (347.8)
Case VII	3.125 (100)	9.22 (295.0)	10.85 (347.2)
Case VIII	2 (100)	7.36 (368) Estimation	8.68 (434)
Case IX	1.39 (100)	6.13 (441) Estimation	7.23 (520.1)

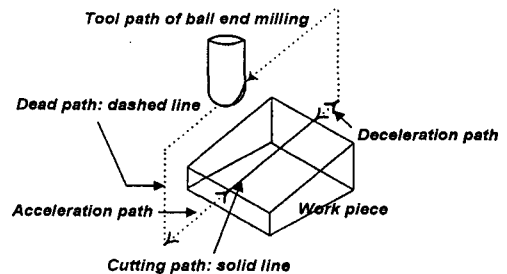


Fig. 4 Dead path in cutting process

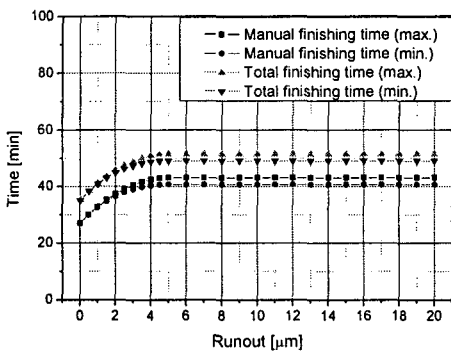
3.3 고속가공에서 가공조건 별 런아웃에 따른 사상공정 변화

제 1 부에서 런아웃과 이송위상차는 가공면 품질에 나쁜 영향을 미쳐 사상시간을 증가시킬 수 있다고 이미 설명하였다. 이를 검증하기 위해 2.2 절의 가장 효율적인 사상공정과 3.1 절의 고속가공 시간 실험 결과를 바탕으로 제안된 가공조건에서 런아웃에 따른 사상시간 및 금형 생산시간의 변화를 Fig. 5 에 나타내었다.

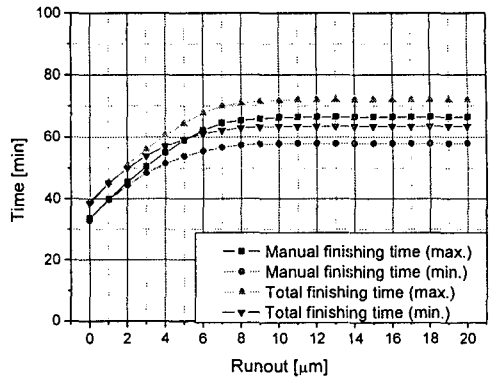
구체적으로, Fig. 5 의 사상시간은 2.2 절에서 논의한 구리(C12200)의 사상공정 중 가공면의 상태에 따라 가장 효율적인 공정으로 선정되는 사상공정으로 가공면을 사상한 경우의 시간을 의미한다. 따라서 가공조건 뿐만 아니라 런아웃 및 이송 위상차도 가공면의 상태에 영향을 미치므로(제 1 부) 이에 따라 사상시간도 변화하게 됨을 관찰할 수 있다.

한편, Fig. 5 의 금형생산시간은 상기 사상시간과 정삭시간을 포함한 시간을 의미하는데, 상기 정삭시간은 3.2 절에서 검토한 가공하지 않은 경로의 시간을 포함한 값이 된다. 나아가, 금형 생산시간에서 정삭시간만 고려하고 황삭 및 중삭 가공시간은 배제하였는데 이는 3.1 절에서 논의하였으며, 황삭 및 중삭 가공시간을 고려하더라도 Fig. 5 의 경향은 동일하다.

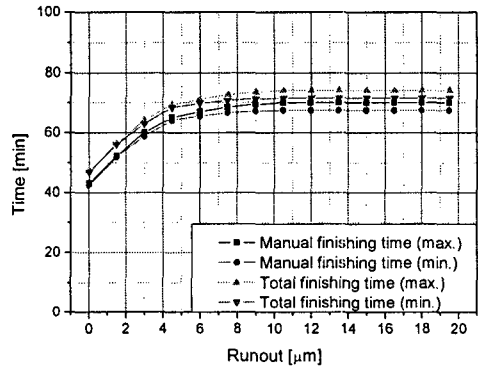
Fig. 5 는 제안된 가공조건에 대하여, 런아웃의 영향을 검토하기 위해 한 축을 런아웃의 값으로 정하였고, 이송 위상차의 영향을 검토하기 위해 이송 위상차에 따른 표면 상태를 제 1 부에서 논의한 대로 최대값과 최소값의 두 가지로 나누어 사상시간 및 금형 생산시간의 변화를 제시하였다.



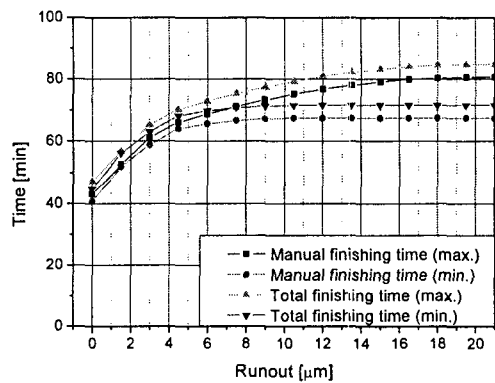
(a) Machining condition: Case III



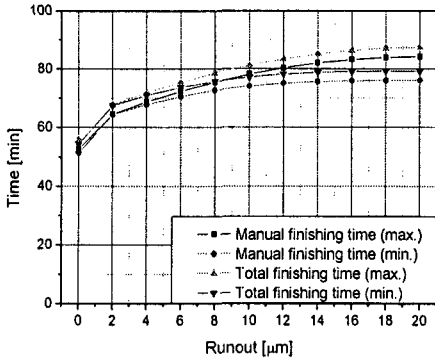
(b) Machining condition: Case IV



(c) Machining condition: Case V



(d) Machining condition: Case VI



(e) Machining condition: Case VII

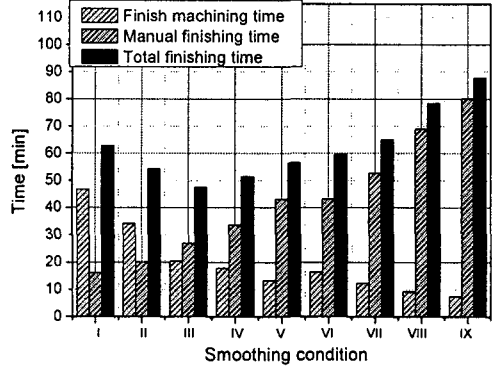
Fig. 5 Time variation of manufacturing C12200 molds according to runout in proposed machining condition

Fig. 5 의 시간변화 그래프는 몇몇 그래프의 급격한 기울기 변화를 제외하고 제 1 부의 Fig. 7 과 비슷한 경향을 갖는다. 즉, 구리(C12200) 금형의 사상 및 금형 생산시간은 런아웃의 증가에 따라 증가하지만 더 이상 증가하지 않는 임계값을 가지며, 가공조건이 커질수록 증가비율도 커진다. 반면, 사상공정이 단위 잔류부피 4.236 μm 에서 Process I 로 바뀌므로 그래프의 급격한 기울기 변화가 발생하며, 이는 Fig. 5 의 (c), (d), (e)에서 확인할 수 있다. 한편, Table 5 에서 가공경로만 고려한 가공시간이 동일한 Case V 와 Case VI 의 경우 Fig. 5 의 (c)와 (d)를 비교해 볼 때, Case V 의 가공조건이 가공하지 않는 경로를 포함한 가공시간 및 사상시간 모두 적게 소요됨을 확인할 수 있다. 따라서 날당이송이 피크피드보다 크지 않은 가공조건 선정이 유리함을 다시 확인할 수 있다.

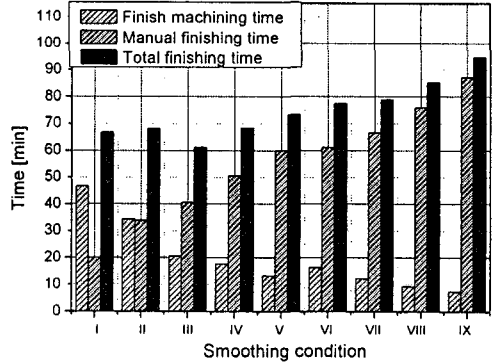
3.4 금형에서 고속가공 조건 선정

구리(C12200) 금형 생산시간을 줄이기 위한 고속가공조건을 선정하기 위해 Fig. 6 에 런아웃이 일정할 때 가공조건과 금형 생산시간의 관계를 나타내었다. Fig. 6 의 금형 생산시간은 제 1 부에서 논의한 런아웃이 가공면에 미치는 영향과 2 절에서 논의한 가공면에 따른 사상공정 선정 결과를 바탕으로 가공하지 않는 경로를 고려한 결과이다. 런아웃이 각각 0, 3, 6, 12 μm 인 경우에 대하여만 제시하였

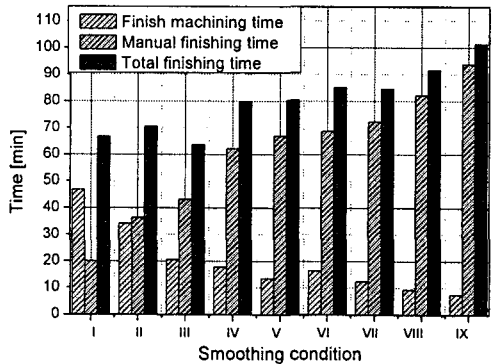
으며, 이송위상차의 영향을 분석하기 위해 Maximum case 및 Minimum case 로 구분하였다.



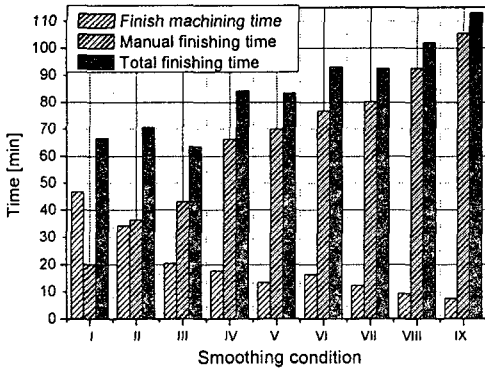
(a) Runout 0 μm , Maximum case



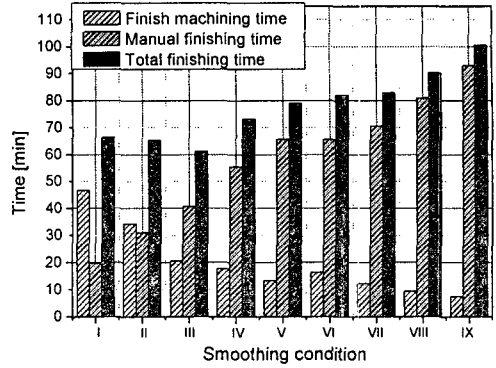
(b) Runout 3 μm , Maximum case



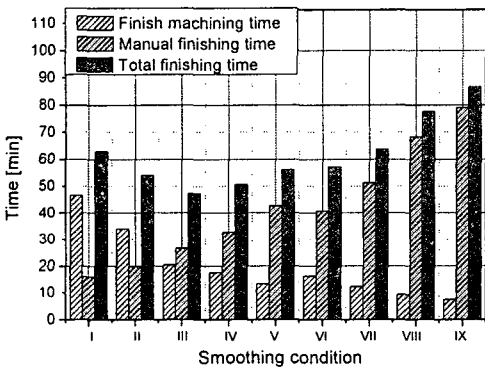
(c) Runout 6 μm , Maximum case



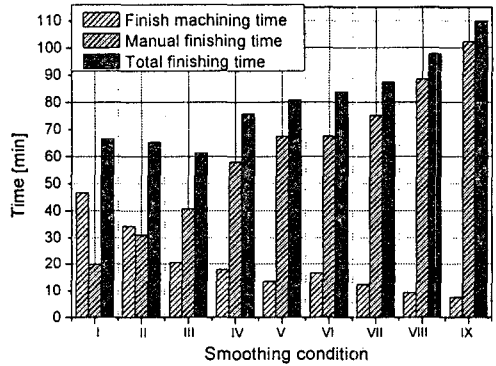
(d) Runout 12 μm, Maximum case



(g) Runout 6 μm, Minimum case



(e) Runout 0 μm, Minimum case

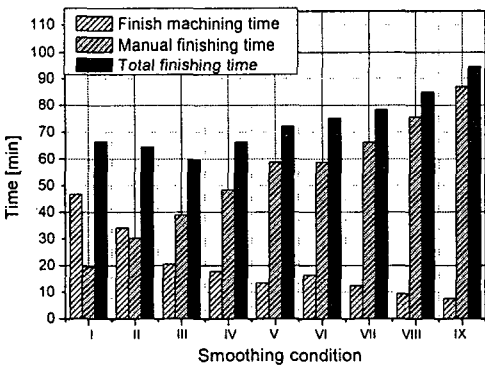


(h) Runout 12 μm, Minimum case

Fig. 6 Time variation of manufacturing C12200 molds according to machining condition

Fig. 6에서 대부분의 경우 Case IV의 가공조건에서 금형 생산시간이 급격하게 증가하는데, 이는 Case IV에서 가장 효율적인 사상공정이 Process I에서 Process II로 변화하기 때문이다.

한편, 가공하지 않는 경로로 인한 시간변화는 가공조건 중 피크피드의 영향을 주로 받는데, Case III의 가공조건에서 피크피드는 Case II보다 150% 증가하였으므로 정상가공시간이 약 67% 정도 감소하게 된다. 결국, Fig. 6로부터 가공 및 사상시간을 모두 고려한 구리(C12200) 금형의 생산시간은 날당이송이 0.2 μm, 피크피드가 0.3 μm인 Case III의 가공조건일 때 최소가 됨을 확인할 수 있다.



(f) Runout 3 μm, Minimum case

즉, Fig. 5 와 Fig. 6 을 참조하면, 가공조건이 커질수록(Case I->Case IX) 가공시간은 감소하므로 전체 금형 생산시간에서 가공시간이 차지하는 비율은 감소하게 되며, 가공조건이 작아질수록(Case IX->Case I) 전체 금형 생산시간에서 사상시간이 차지하는 비율이 감소하게 된다. 결국, 금형의 생산시간을 가장 줄이면서 금형을 생산할 수 있는 가공조건은 Case III 이라고 할 수 있다.

Fig. 6 에서 가공조건이 Case III 보다 증가하면 금형 생산시간은 사상시간의 증가로 증가하며, 가공조건이 Case III 보다 감소하면 정상 가공시간의 증가로 금형 생산시간은 증가한다. 물론 숙련된 사상작업자가 제안된 가장 효율적인 사상공정을 잘 따른다면 사상시간은 보다 감소할 것이고, 가장 효율적인 가공조건은 변할 수 있으나 Fig. 6 의 경향은 변화지 않을 것이다. 만약, 작업자가 대칭된 가공면을 필요로 하는 경우라면 Fig. 6 (a), (e), (f), (g), (h)의 경우 Case II 의 가공조건을 선정하면 될 것이다.

Fig. 6 을 통해 Case V 와 Case VI 를 비교할 때, Case V 의 가공조건이 모든 경우 금형 생산시간이 적게 소요되는 사실을 다시 한번 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 금형생산의 효율성 제고에 관한 연구의 일환으로 구리(C12200) 금형의 사상공정 및 가공조건을 선정하였다. 앞에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 구리(C12200) 금형의 사상공정은 고속가공면에 대하여 단위 잔류부피가 $4.236 \mu\text{m}$ 이하이면 Process I(Paper #800)이고 단위 잔류부피가 $4.236 \mu\text{m}$ 이상이면 Process II(Paper #400→Paper #800)가 가장 효율적이다.
- 2) 런아웃과 이송위상차가 금형 생산시간에 미치는 영향을 분석하였는데, 이 영향은 제 1 부에서 논의한 런아웃과 이송위상차가 단위 잔류부피에 미치는 영향과 비슷한 경향을 갖는다. 다만, 가장 효율적인 사상공정의 변화로 금형 생산시간의 증가량이 급격하게 감소하는 추세가 발생하였다.
- 3) 실제 생산현장에서의 가공공정과 사상공정을 모두 고려하여 구리(C12200) 금형의 생산시간을

최소화 할 수 있는 고속가공조건은 날당이송이 $0.2 \mu\text{m}$ 이고 피크피드가 $0.3 \mu\text{m}$ 이다. 다만, 가공면의 대칭성을 요구한다면 날당이송이 $0.2 \mu\text{m}$ 이고 피크피드가 $0.2 \mu\text{m}$ 인 가공조건이 적절하다.

참고문헌

1. Altan, T., Lilly, B. and Yen, Y. C., "Manufacturing of Dies and Molds," *Annals of the CIRP*, Vol. 50, pp. 405-423, 2001.
2. Lee, H. S., "Systematic Finishing Process of Injection Molds," Ph.D. Thesis, Seoul National University, 2004.
3. Kim, M. T., "Pattern Characteristics and Time Estimation in Manual Finishing Process of Ball End Milled Surface," Ms. Thesis, Seoul National University, 2000.
4. Kline, W. A. and Devor, R. E., "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 23, pp. 123-140, 1983.
5. Sutherland, J. W. and Babin, T. S., "The Geometry of Surfaces Generated by the Bottom of an End Mill," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 16, pp. 202-208, 1988.
6. Armarego, E. J. A. and Deshpande, N. P., "Computerized End Milling Force Prediction with Cutting Models Allowing for Eccentricity and Cutter Deflections," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, pp. 25-29, 1991.
7. Hekman, K. A. and Liang, S. Y., "In-process Monitoring of End Milling Cutter Runout," *Mechatronics*, Vol. 7, pp. 1-10, 1997.
8. Schulz, H. and Hock, St., "High-Speed Milling of Dies and Moulds - Cutting Conditions and Technology," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 35-38, 1995.
9. Kim, M. T., "High Speed Machining of Copper Electrode Considering Efficient Manual Finishing," Ph.D. Thesis, Seoul National University, 2006.