

사출금형 사상공정의 체계화

박민수[#], 김민태^{*}, 이해성^{*}, 주종남^{*}

Systematic Finishing Process of Injection Molds

Minsoo Park[#], Mintae Kim^{*}, Haesung Lee^{*} and Chongnam Chu^{*}

ABSTRACT

Finishing is the final process in molds manufacturing and consumes much process time. Also, it influences on surface quality of molds. But, there are few systematic methods to control the process. In this work, basic experiments were carried out to study the machining characteristics of the finishing tools. From the experiments, critical surface roughness and wear coefficient are suggested to reduce the number of finishing steps and to plan a systematic finishing procedure. Comparison experiments were carried out between the expert's method and the new method, which is based on the results of this research. From the experiments, it is verified that the systematic method takes less time and generates less form error in the machined surface than the worker's method.

Key Words : Ra(표면조도), CSR(임계표면조도), Wear Coefficient(마모계수), Flatness(편평도)

1. 서론

금형 제작의 마지막 단계인 후처리(Manual finishing & Adapting/finishing) 공정은 Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 전체 금형 제작시간에서 15-40 %의 높은 비중을 차지하며 제품의 표면 품질을 직접 좌우하기 때문에 중요하다. 또, 수작업으로 이루어지는 특성상 현행의 공정 기술은 체계적, 과학적 가공 조건을 전혀 갖추지 못하고, 숙련공의 주관적 경험에 의존하여 진행된다. 즉, 사상 공정은 금형 제작의 마무리 단계로서 금형 품질에 중대한 영향을 미침에도 불구하고 가공 기술 및 평가 방법에 관한 연구가 미흡한 상태이다. 따라서 사상 공정을 체계화 한다면 고품질의 제품을 저가의 비용으

로 제작할 수 있고, 사상 시간의 단축을 통하여 생산성의 향상을 도모할 수 있다.

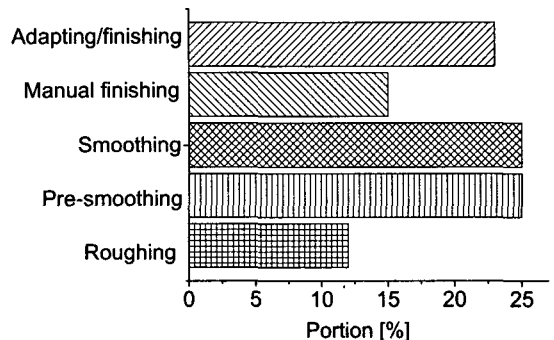


Fig. 1 Cost per process in molds production ¹

접수일: 2004년 4월 30일; 게재승인일: 2004년 8월 13일

교신저자: 서울대학교 기계항공공학부

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

* 서울대학교 기계항공공학부

한편, 최근에는 사상의 위와 같은 특성에도 불구하고 3 차원 모델링을 통한 밀링 가공면 형상의 예측과 다축 CNC 머시닝 센터의 발전 등과 더불어 단순한 연마 기계가 아닌 기술자의 수작업을 그대로 구현해 낼 수 있는 자동화 로봇 제작에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^{2,3} 따라서 사상 과정에 관한 연구는 상기 분야의 이론적 체계화를 위해 매우 중요하다고 할 수 있다.^{4,5} 본 논문에서는 현재 널리 사용되고 있는 고속가공면에 대한 사상 공정에 대해 중점적으로 고찰하였다.

2. 사상공정과 관련된 변수들

Fig. 2 는 사상이 진행됨에 따라서 표면 형상이 변화하는 양상을 보여주고 있다. 사용 시편은 AISI P20 (KP4M)을 사용하였다. 제일 위의 면은 볼 엔드밀($\phi 10$)을 사용하여 가공한 표면의 형상이다. 그 아래쪽 면들은 각각 직전면의 이송과 수직인 방향으로 사상을 하여 생긴 면의 표면 형상이며 제일 아래쪽 면은 사상이 완전히 끝난 후 마지막 표면의 형상을 나타낸다. 처음 시편의 가공 조건과 각 단계에 사용된 사상 도구 및 횟수는 Table 1 과 같다. 측정은 모두 Rank Taylor Hobson의 접촉식 표면 조도계로 사상 도구를 교환할 때 마다 직전 사상방향과 수직인 방향으로 측정을 시행하였다. 이 결과에 의하면 사상이 진행됨에 따라 사상 도구가 공작물의 표면을 제거한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 체계적 사상 계획을 세우기 위해서는 다음과 같은 변수들을 고려해야만 한다.

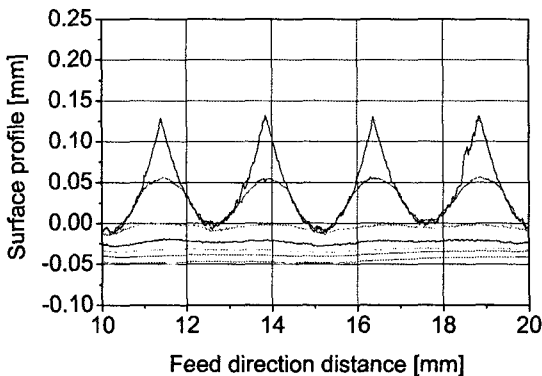


Fig. 2 Change of surface profiles during finishing step⁶

Table 1 Cutting and finishing conditions

Cutting condition	Finishing process & Back and forth number
Inclined angle : 35°	Stone #180 (1120) ⇒
Depth of cut : 0.2mm	Stone #240 (750) ⇒
Spindle speed : 1000rpm	Stone #400 (750) ⇒
Feedrate : 300mm/min	Paper #400 (375) ⇒
Pickfeed : 2.44mm	Paper #600 (375) ⇒
	Paper #800 (375)

2.1 임계표면조도

Fig. 3 은 슛돌 #400 의 반복 사상작업에 의한 표면조도의 변화를 보여준다. 사상의 횟수가 반복되어도 시편의 Ra 값이 더 이상 작아지지 않는 현상을 관찰할 수 있다. 즉, #400 은 130 회 이상에서 Ra 가 약 0.6 μm 이하로 작아지지 않는다. 이 현상은 모든 슛돌과 사포에서 공통적으로 일어나는 것으로 이를 임계표면조도라고 정의한다. 임계표면조도에 이르면 더 이상의 사상 작업은 표면조도의 향상에 기여하지 못하며 결국 불필요한 시간이 투여되는 것이다. 이를 방지하기 위하여서는 각 사상 도구의 전환시점을 정확하게 파악할 수 있는 기준이 필요하다. 즉, 작업자가 사상 작업의 중간 단계에서 가공면의 표면조도 값을 측정하여 각 도구의 임계표면조도 값과 비교하여 도구의 변경 시점을 결정할 수 있어야 하며, 이 때 각 도구의 임계표면조도 값은 실험적으로 구할 수 있다.

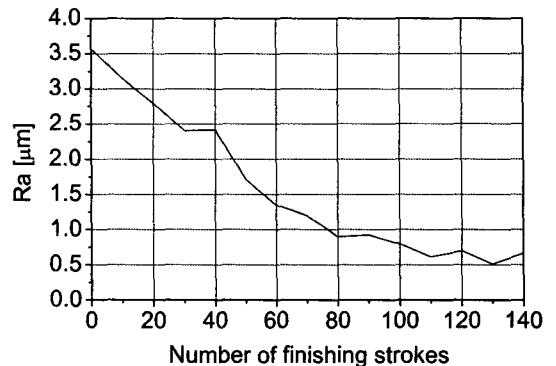


Fig. 3 Critical surface roughness of stone #400

2.2 목표 제거량

사상 시간을 예측하기 위해서 가장 선행되어

야 할 것은 제거해야 할 부피를 결정하는 것이다. 사상 첫 단계의 제거해야 할 부피는 볼 엔드밀에 의해서 생긴 절삭 흔적이며, 이는 공구 형상과 절삭 조건으로부터 계산할 수 있다. 다음 단계부터의 제거해야 할 부피는 전 단계의 사상도구에 의해서 생성된 도구 흔적이다. 모든 사상은 수작업으로 이루어지므로 실제 작업 현장에서 바로 전 단계의 사상무늬만을 정확히 제거한다는 것은 불가능하다. 따라서, i 번째 사상 도구로 제거해야 할 부피는 $i-1$ 번째 사상도구의 무늬와 i 번째 사상도구가 임계표면 조도에 도달될 때까지 제거해야 할 부피의 합이 된다. 이 부피는 Fig. 4와 같이 간략하게 구할 수 있다. 실제 사상에서 목표 제거량 도달 여부확인 은 작업자의 판단에 의한다.

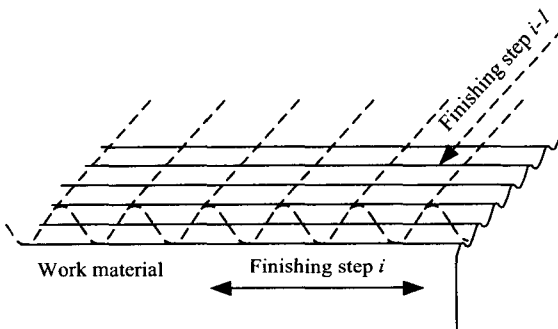


Fig. 4 The geometric relationship between the surfaces by step $i-1$ and by the one by step i

결국, Fig. 4와 같이 간략화 한 경우 i 번째 사상 도구의 목표 제거량, V_i 는 다음과 같이 계산된다.

$$R_{\max} = C_g Ra \quad (1)$$

$$V_i = \frac{C_g}{2} (CSR_{i-1} + CSR_i) \quad (2)$$

여기에서 C_g 는 형상계수이며 사상도구의 경우 실험적으로 구한 값은 약 7.24이다. CSR_i 는 i 번째 사상도구의 임계표면 조도값(Ra)을 의미한다. 여기에서 V_i 는 i 번째 사상 도구로 제거해야 할 단위길이당 최대 부피이므로 $i-1$ 번째 사상도구에 의해서 남은 표면 형상과 i 번째 사상도구에 의해서 형성되어질 임계표면형상의 부피의 합으로 구

할 수 있다. 그러므로, 만약 i 번째 사상도구로 사상된 임계 표면의 단면 형상을 삼각형으로 가정한다면, V_i 는 식(2)와 같이 구할 수 있다.

2.3 사상도구의 마모계수(K)

밀링이나 선반과 같은 절삭 공정에서 제거량은 절삭 조건으로부터 비교적 정확하게 계산할 수 있다.^{7,8} 그러나, 사상공정에서는 가해진 힘과 제거량 사이의 관계를 기하학적 해석으로 정확히 계산하는 것이 불가능하므로 실험을 통해 가해진 힘과 제거량 사이의 관계를 산출한다. 이를 통한 마모계수에 관한 식은 다음과 같다.

$$K = \frac{VP}{FL} \quad (3)$$

이 때, V 는 제거된 부피, P 는 재료의 경도, F 는 사상방향의 사상력, L 은 전체 사상길이이다. 마모계수 K 는 사상도구에 따라서 일정한 값을 갖는 무차원 상수이다. 마모계수가 구해지면, 이를 통해 최적 사상시간을 예측할 수 있다.

3. 최적 사상단계 결정

3.1 최적 사상단계가 되기 위한 조건

최적 사상단계를 결정하기 위한 중요한 두 가지 요소는 사상시간과 최종 면의 품질이다. 최종 면의 품질은 표면 거칠기와 형상오차를 의미한다. 최종면의 표면 거칠기는 마지막 사상도구의 입자 크기에 의해서 결정되므로 적합한 입자크기의 도구를 사용하여 원하는 최종 표면 거칠기를 얻을 수 있다. 형상오차를 최소화하기 위해서는 정삭 가공면의 형상을 최대한 유지해야만 하는데, 이는 전체 사상 작업 중에 작업자 밀리미터 단위 이하의 형상오차를 인지하여 수정하는 것은 사실상 불가능하기 때문이다. 따라서, 작업자는 사상 전체 표면에 일정한 사상력을 가해야 한다. 그러나, 이는 현실적으로 불가능하므로, 사상공정을 단순화하여 최적의 사상공정을 선택하는 것이 형상오차를 줄이는 방법이 된다. 또, 사상 공정을 최소화하면 사상 공정 시간도 감소하게 된다.

3.2 단계 결정을 위한 기초실험

앞선 이론을 바탕으로 최적의 사상단계를 결정하려면 실험을 통해서 몇 가지 상수값을 얻어야

한다. 목표 제거량은 전 단계의 표면 형상으로부터 계산을 통해 구할 수 있다. 그러나, 마모계수와 CSR 값은 실험을 통해서 얻어야 한다. CSR 값은 Fig. 5 에 제시하였다. 직경 10 mm 볼앤드밀로 날당이송과 경로간격을 각각 0.3 mm 로 금형강인 AISI P20 (KP-4M)을 가공하였으며 표면거칠기는 Ra 0.60 μm 였다.

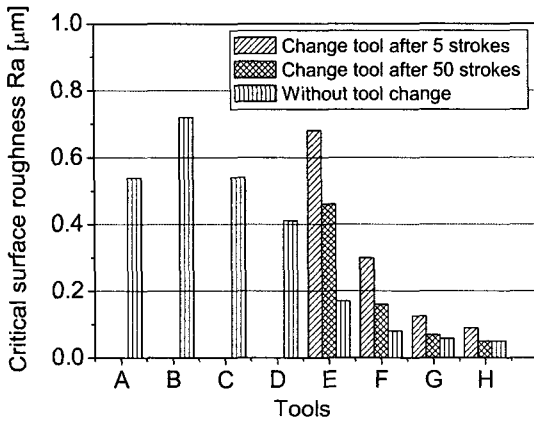


Fig. 5 Critical surface roughness using different tools
 (A: original surface, B: finishing stone #400, C: stone #600, D: stone #800, E: sandpaper #220, F: sandpaper #400, G: sandpaper #600, H: sandpaper #800)

마모계수(K)는 식(3)을 통해 구할 수 있으며, 이 때 제거 부피(v)는 사상 전 표면의 형상으로부터 얻어진다. 사상 전 표면의 형상은 Rank Taylor Hobson 사의 접촉식 표면 조도계를 이용하여 측정하였다. 재료의 경도(P)는 재료별로 다른 고유한 값을 가진다. 수평력은 Kistler 사의 9257B 동력계를 사용하여 측정한 후 Kistler 사의 5019A 증폭기를 사용하여 그 값을 얻었다. 이로부터 얻은 사상력의 평균값을 수평력으로 사용하였다. 마지막으로 전체 사상길이(L)는 전체 사상횟수와 시편의 길이의 곱으로 구할 수 있다. 4 회 실험의 평균값으로 마모계수를 구하였으며, 그 결과는 Table 2 와 같다.

CSR 을 구한 실험 결과에서 볼 수 있듯이 사포는 사상시 사포입자가 마모되므로 새로운 사포로의 교환 횟수에 따라서 사포 특성이 달라지게 된다. 결국 사포 사용 횟수에 따라서 마모계수의 값도 변화할 것이다. 사상 작업자들은 25~30 회 정

도 사용 후 새로운 사포면으로 교체한다고 알려져 있는 바 Table 2 에서 구한 마모계수는 30 회 사용 후 새로운 사포면으로 교체하는 것을 기준으로 구한 값이다.

Table 2 Wear coefficients of finishing tools

Tools		K(10 ⁻³)
Stone	#240	3.95
	#400	2.96
	#600	2.61
	#800	2.54
Sandpaper	#400	5.75
	#600	4.04
	#800	3.33

4. 비교 실험

시편은 YASDA 사의 고속가공기 YBM-8120V 를 사용하여 가공하였고, AISI P20 (KP-4M)을 날당이송과 경로간격을 각각 0.3 mm 로 가공하였다. 가공면의 표면조도는 Ra 는 경로방향으로 0.67 μm , 경로 수직방향으로 0.55 μm 이었다.

4.1 단계결정 방법

4.1.1 기존 사상법

사상 작업자들은 일반적으로 가공면의 표면 거칠기를 측정하지 않고, 매우 거친 면인 경우 핸드 그라인더를 이용하거나 비교적 고운 면인 경우 숫돌 #400 을 이용하여 사상을 시작한다. 실험에 사용된 가공면의 표면조도 Ra 값은 약 0.6 μm 이며 이는 비교적 고운면이라 판단되어 숫돌 #400 부터 사상을 시작하였다. 또, 사용한 사상 도구의 순서는 숫돌 #400, 숫돌 #600, 숫돌 #800, 사포 #400, 사포 #600, 사포 #800 이었다. 각 단계의 전환 시기는 전 사상 도구의 무늬가 사라지고 현 사용 사상 도구의 무늬만이 존재할 때이다.

4.1.2 실험 사상법

각 도구별로 제거 능력과 임계표면조도가 서로 다르며, 일반적으로 거친 사상도구일수록 제거 능력은 뛰어나지만 생성된 면의 표면조도는 나쁘게 된다. 그러므로 사상시간을 최소화하면서 적절

한 표면조도를 얻기 위해서는 가공된 시편의 표면 상태에 근거하여 적절한 사상 단계를 선정할 필요가 있다. Fig. 4 로부터 알 수 있듯이 사상작업은 전 단계의 사상도구의 무늬를 모두 제거한 후 다음 단계의 사상도구의 임계표면조도까지 행해진다. 그러므로, 사상에 소요되는 총 시간은 식(3)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = \frac{VP}{FL} = \frac{vAP}{F(2lf)} \quad (4)$$

$$T = \frac{v}{K} \left(\frac{AP}{2Flf} \right) = C \frac{v}{K} \quad (5)$$

이 때 v 는 단위면적당 제거해야 할 부피이며, l 은 한번 사상시 사상길이, f 는 단위시간당 사상횟수, T 는 소요시간, F 는 사상 방향과 평행한 방향으로의 힘을 나타낸다. 숙련된 작업자의 경우 F 는 거의 일정하여 평균 38.9N 이며, 단위시간당 사상횟수는 평균 2Hz 이고, 한번 사상시 사상길이는 약 70 mm 이다. 결국 l, f, F, A, P 는 시편의 재료에 따라 다를 뿐, 각 사상 도구와는 무관한 상수이므로 $AP/2F1f$ 를 C 로 표현할 수 있다. 그러므로 여러 개의 사상도구를 사용하여 사상을 수행 할 경우 총 소요되는 사상시간 T 는 다음과 같다.

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

$$= C \left[\frac{v_0 + 3.62 CSR_1}{K_1} + 3.62 \sum_{i=2}^n \frac{CSR_{i-1} + CSR_i}{K_i} \right] \quad (6)$$

Table 3 Calculations of 7cases to determine the optimal process with minimized T/C

Tools	T/C
S #400->S #600->S #800->P#400 ->P#600->P#800	4.91
S#600->S#800-> P#400->P#600 ->P#800	3.10
S #800->P#400->P#600->P#800	1.60
P#400->P#600->P#800	0.55
P#600->P#800	0.54
P#400->P#800	0.43
P#800	0.48

이 때, i 는 i 번째 사용하는 사상도구의 특성 값을 의미한다. C 는 상수이므로 T/C 가 최소가 되는 단계가 목표 표면조도를 얻기 위한 최적 단계이다. 사상 최후면의 표면조도는 마지막 사상 도구에 의해서 결정되므로 마지막 사상도구는 사상 단계와는 무관하다. 이에 근거하여 슛돌 #400 부터 사포 #800 까지의 사상도구들로 사상 단계를 구성하여 T/C 값을 구한 결과는 Table 3 과 같다. 여기에서 S 는 슛돌, P 는 사포를 의미한다. Table 3 에서 알 수 있듯이 실험에서 사용한 시편의 경우 사포 400 과 사포 800 을 사용하여 사상작업을 수행하는 것이 최적단계라고 판단된다.

4.2 실험 결과

앞장에서 설명한 바와 같이 기존 사상 작업자의 방법과 이론을 바탕으로 제안된 방법으로 각각 실험을 수행하였다. 각 실험에서 사상 단계 전환 판단은 모두 사상 작업자가 결정하였으며 최종 사상면의 표면거칠기는 모두 0.05 μm 로 사포 #800 의 임계표면조도와 일치하였다. 실험 결과는 Fig. 6 과 같다.

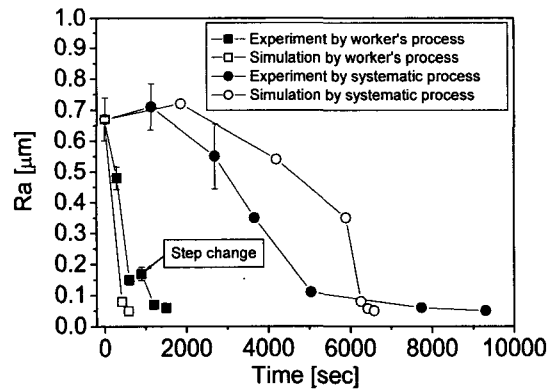


Fig. 6 Surface roughness changes by systematic method and by worker's method

Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 기존의 사상 방법으로 약 155 분이 소요된 작업이 제안된 사상 방법에 의하면 약 25 분만에 완료됨을 알 수 있다. 기존 사상법의 경우 처음 사용한 도구의 임계표면조도가 고속 가공기로 가공한 면보다 좋지 않으므로 처음에는 오히려 표면조도가 나빠짐을 볼 수 있다. 이는 불필요한 공정에 해당하며 다음 도구가 제거

해야 할 부피를 더욱 증가시키게 된다. 실제 실험한 시간과 예측한 시간이 차이를 나타내는 이유는 다음과 같다. 첫째, 작업자의 피로로 인해 사상력이 일정하게 유지되지 못했기 때문이다. 둘째, 사포의 경우 도구의 제거능력을 일정수준 이상으로 유지하기 위해 계속 새로운 면으로 교체해 주어야 하지만 시간 예측시는 사포 교체 시간을 고려하지 않았기 때문이다.

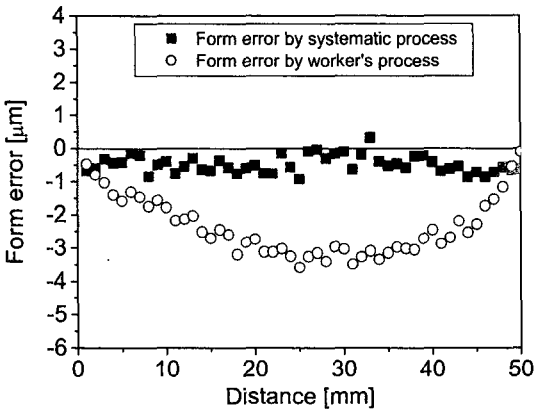


Fig. 7 Surface profiles of specimens after finishing

Fig. 7 은 가공기로 가공한 원하는 형상과 사상 작업 후의 형상을 비교하여 사상 후에 발생한 형상오차의 양을 나타내는 그림이다. R.T.H 사의 표면 조도측정기를 이용하여 측정하였으며 최대 오차는 기존 사상법의 경우 약 3.5 μm, 실험 사상법의 경우 약 0.8 μm 정도이다.

형상오차는 잘못된 반복 연마 작업으로 발생하며, 이로 인해 사상 공정의 결과면에는 잘못된 작업에 의한 형상오차의 가능성이 존재한다. 형상오차는 수정하기도 매우 어려울 뿐만 아니라 금형 정밀도에도 매우 악영향을 미치게 된다. 따라서 사상도구의 사용 시간 단축이 주는 효과는 비단 가공시간의 단축에 한정되지 않으며 금형의 형상 정밀도 향상에도 큰 효과를 나타낸다.

고속 가공면의 경우 숫돌 작업은 필요하지 않다는 것을 앞의 실험결과에서 알 수 있다. 즉, 고속 가공의 경우 가공면의 품질이 우수하므로 숫돌을 사용하는 것은 오히려 표면의 품질을 떨어뜨리게 된다. 그러나 실제 작업자는 일반 가공면에 비하여는 가벼운 정도이지만 고속 가공면에서도 숫

돌 작업을 실시하고 있다. 이는 숫돌의 특성상 치명적인 형상 오차의 발생이나 스크래치 형성을 통한 표면 거칠기에 악영향을 미친다고 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 사상 공정의 효율과 품질을 향상시키기 위하여 사상 공정을 체계화하는 방법을 제안하였다. 앞에서 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 각 사상 도구마다 가공 표면의 표면조도가 더 이상 좋아지지 않는 반복 횟수(작업 시간)가 존재한다. 이를 임계표면조도로 정의하였다. 가공 시간의 측면에서 효율적인 사상을 위해서 각 단계별로 임계표면조도에 도달하는 순간 다음 단계로 전환하는 것이 가장 효율적이다.
- 2) 사상 도구에 의해서 제거되는 양을 예측하기 위해서 마모계수의 개념이 도입되었다. 마모계수와 임계표면 조도 등의 값으로부터 구한 계산식을 통해 최적 사상단계를 결정할 수 있다. 이는 사상도구들 중 유사하거나 중복되는 것을 판단하여 이를 배제함으로써 작업 도구의 수를 줄여 작업공정을 간소하게 할 수 있다는 것을 의미한다.
- 3) 중복, 낭비되는 작업을 제거함으로써 사상면의 형상 오차가 발생할 수 있는 가능성을 줄일 수 있다. 작업도구 중 사포는 사용 방법에 따라 다른 표면거칠기를 생성할 수 있으며, 이를 일정하게 규정하여야 사상시간과 사상면의 품질을 일정하게 관리할 수 있다.

참고문헌

1. Schulz, H. and Hock, S., "High-Speed Milling of Dies and Moulds - Cutting Conditions and Technology," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 35-38, 1995.
2. Yang, M. and Lee, H., "A study on PC-NC Based Aspherical Lens Polishing System with Minimum Translation Mechanism," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 7, pp. 65-71, 2001.
3. Yang, M. and Lee, H., "The development of CAM

- Software for Ultra-precision Aspheric Surface,”
Journal of the Korean Society of Precision
Engineering , Vol. 19, No. 4, pp. 79-86, 2002.
4. Altan, T. and Lilly, B. W., “Advanced Techniques for
Die and Mold Manufacturing,” Annals of the CIRP,
Vol. 42, pp. 41-61, 1993.
 5. Lilly, B. W., Bailey, R. W. and Altan, T., “Automated
Finishing of Dies and Molds: A State of the Art
Review,” Proc. of ASME Winter Annual Meeting,
Chicago, 11/27-12/2, pp. 75-90, 1988.
 6. Kim, M., “Pattern Characteristics and Time
Estimation in Manual Finishing Process of Ball End
Milled Surface,” M.S. thesis school of Mech. And
Aero. Eng. Seoul National University, 2000.
 7. Rabinowicz, E., “Friction and Wear of Materials,”
John Wiley & Sons, Inc., 2nd ed., pp. 124-190, 1995.
 8. Eyre, T. S., “Wear Characteristics of metals,”
Tribology International, Vol. 10, pp. 203-212, 1976.
 9. Mulhearn, T. O. and Samuels, L. E., “The Abrasion
of Metals: A Model of the Process,” Wear, Vol. 5, pp.
478-498, 1962.