

런아웃의 양에 따른 잔류 부피의 변화

김민태*, 이해성(서울대 기계공학부 대학원), 제성욱(LG전자 생산기술원),
주중남(서울대 기계공학부)

Remaining volume after smoothing(RVAS) variation according to runout

M. T. Kim, H. S. Lee(Mechanical Eng. Dept., SNU Graduate School), S. U. Je(LG PRC),
C. N. Chu(Mechanical Eng. Dept., SNU)

ABSTRACT

Mold-manufacturing process consists of machining and finishing process that are strongly related in each other. But there are few studies about mold-manufacturing process to control those two processes simultaneously. Especially, runout distorts the machined surface from expected so it changes the finishing process and mold-manufacturing time. In this work, basic analyses and experiments were carried out to study RVAS variation according to runout in HSM. To perform those analyses, firstly surface generation analysis was done including runout in ball end milling and then the RVAS that could relate machining and finishing process was proposed. And the optimal finishing process in HSM according to RVAS was also proposed. Through experiment runout occurrence and above analyses were verified.

Key Words : Runout(런아웃), RVAS(잔류부피), Mold-manufacturing(금형생산), HSM(금형생산)

1. 서론

금형 생산의 효율성 제고를 위한 연구는 주로 고성능 공작 기계 제작이나 최적 가공 조건의 선정 등을 포함한 가공 공정에 관한 연구와 사상 단계의 최적화 등을 포함한 사상 공정에 관한 연구로 대별된다. 공작 기계의 제작과 관련된 연구를 변론으로 할 때, 최근까지의 주요 연구의 대상은 가공 공정에 관한 것이었다. 그러나, 이해성[8]과 김민태[7]의 연구를 통해 사상 공정의 최적화를 통하여도 금형 생산의 효율성을 제고시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 다만, 지금까지의 연구에서는 금형 생산의 효율성 제고라는 관점에서 가공 공정과 사상 공정을 서로 연관시킨 내용은 없었다.

본 연구에서는 가공 공정과 사상 공정을 매개시킬 수 있는 잔류 부피량의 개념을 도입한 후, 고속 가공에서 발생하는 런아웃이 가공면 형성에 미치는 기하학적인 영향에 대한 해석을 바탕으로 런아웃의 발생에 따른 잔류 부피량의 변화 추이를 제시하였

다. 또, 고속 가공에서 최적 사상 공정에 관한 이해성[8]의 연구를 바탕으로 잔류 부피량 변화에 따른 사상 공정의 변화와 최적 사상 공정을 제시하였다.

2. 런아웃과 잔류 부피

2.1 런아웃의 의미 및 해석

런아웃이란 공작 기계의 회전 중심과 공구의 회전 중심 사이의 불일치 현상을 말하며, 엔드밀링에서는 런아웃의 존재로 인하여 가공 조건과 왜곡된 가공면이 형성된다. 런아웃은 공구와 아머간 결합부 또는 아머와 주축간 결합부에서 발생하는 장착 오차에 의해 주로 발생하는데, 이들의 영향은 공작 기계의 회전 중심축과 공구의 회전 중심축의 편차로 표현된다. Fig. 1 은 런아웃이 존재하는 경우 날 끝의 궤도를 나타내며, 회전장착에 의한 런아웃은 Fig. 1 에서와 같이 주축 중심과 공구 중심의 편심양 ϵ , 두 축간의 틸팅각 τ 에 의한 공구 중심 축의 이동량 λ , 그리고 편심과 틸팅 사이의 각도 편차를

나타내는 인자들로 분리할 수 있다.

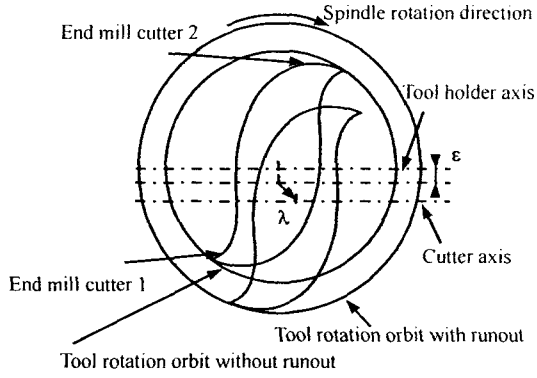


Fig. 1 Tool rotation orbit with or without runout

두 날 블렌드밀 가공에서 런아웃이 존재하는 경우 가공된 표면의 2차원 형상은 Fig. 2와 같다.

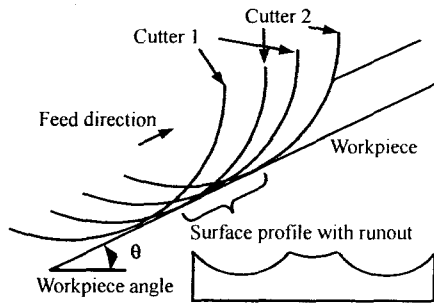
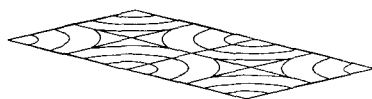


Fig. 2 Two dimensional surface profile with runout



(a) Phase shift: 0%, Runout: 0 μ m



(b) Phase shift: 50%, Runout: 4.5 μ m

Fig. 3 Surface texture distortion with runout

Fig. 3의 (a)는 날당 이송과 피크 피드량이 모두 0.2mm 인 가공 조건에서 런아웃과 이송 위상차가 없는 경우의 이상적인 가공면이고, (b)는 대표적으로 런아웃과 이송 위상차가 발생한 경우의 왜곡된 가공면이다. 이를 통해 런아웃이나 이송 위상차는 가공면의 왜곡에 상당한 영향을 미친다는 사실을

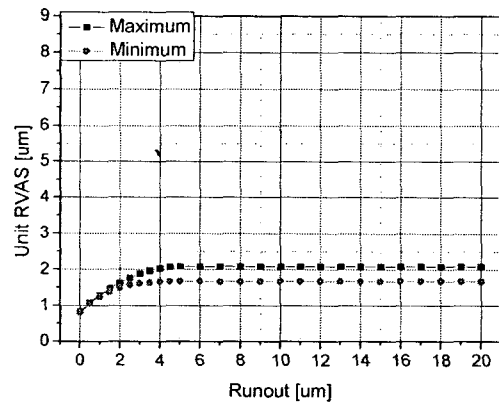
알 수 있다.

2.2 잔류 부피의 개념

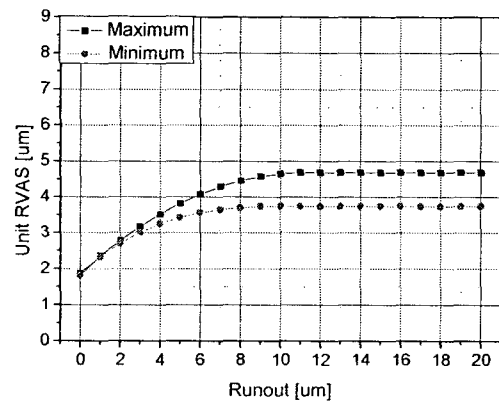
이해성[8]은 사상 시간을 최소화할 수 있는 최적 사상 공정이 정상 가공면의 품질에 따라 달라진다고 하였다. 따라서 가공면 품질 평가를 위해 잔류 부피의 개념을 도입한다. 잔류 부피(Remaining volume after smoothing: RVAS)란 금형 제작의 완성을 위해서 사상 단계를 통해 가공되어야 할 양으로 정상 가공이 완료된 후에 공작물에 남아 있는 절삭 흔적들의 부피의 총합을 말한다. 이 개념을 통해 정상 가공 조건에 따른 최적 사상 공정을 선정할 수 있다.

2.3 런아웃과 잔류 부피의 관계

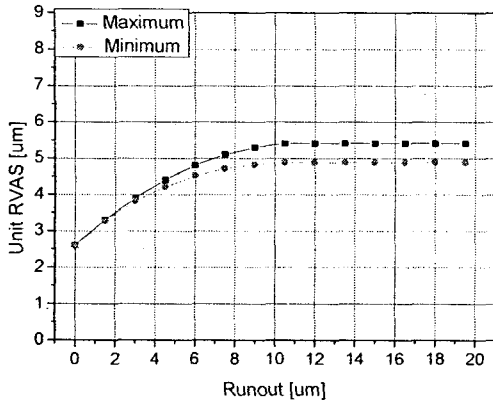
런아웃의 존재로 인한 가공면 왜곡 현상은 잔류 부피의 양을 변화시켜 결국 사상 공정을 포함한 금형 생산 시간을 변화시킨다. 따라서 금형 생산 시간을 줄이기 위한 가공 조건을 선정하려면 런아웃이 정상 가공 후 가공면 왜곡에 미치는 영향을 살펴볼 필요가 있다.



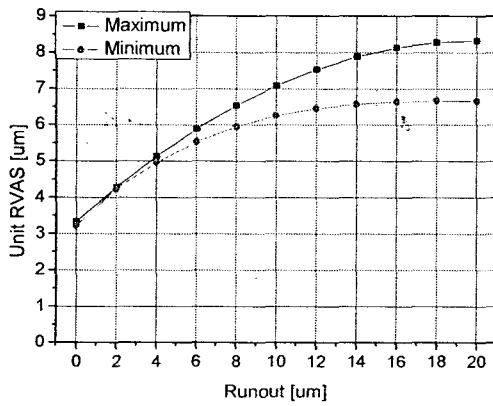
(a) Feed per tooth: 0.2mm, Pickfeed: 0.2mm



(b) Feed per tooth: 0.3mm, Pickfeed: 0.3mm



(c) Feed per tooth: 0.3mm, Pickfeed: 0.4mm



(d) Feed per tooth: 0.4mm, Pickfeed: 0.4mm

Fig. 4 Unit RVAS variation according to runout in each cutting condition

Fig. 4 는 몇 가지 고속 가공 조건에 대하여 직경 8mm 두 날 볼엔드밀로 가공한 경우 런아웃 양과 단위 잔류 부피량과의 관계를 해석한 것이다. 이 때, 단위 잔류 부피량과 잔류 부피를 공작물의 면적으로 나눈값을 말한다.

런아웃 양이 증가할수록 단위 잔류 부피량도 증가하며 각각의 가공 조건별로 단위 잔류 부피량이 극한값을 가짐을 알 수 있다. 극한값을 갖는 것은 런아웃이 일정량 이상이 되면 두 날 중 한 날에 의한 가공만이 이루어지기 때문이다. 또, 가공 조건이 과도해짐에 따라 런아웃이 없는 경우의 단위 잔류 부피량과 최대 단위 잔류 부피량과의 차이도 증가함을 알 수 있으며, (d)의 경우는 그 차이가 약 2.4 배 정도가 됨을 알 수 있다.

3. 잔류 부피에 따른 사상 공정

3.1 고속 가공의 사상 공정

이해성[8], 김민태[7]는 사상 공정은 슛돌과 사포 작업으로 구성되고 각각의 작업 도구들은 임계 표면 조도값을 갖는다고 하였다. 이해성[8]에 의하면 고속 금형 제작에서는 정삭 후 가공면의 품질이 우수하므로 사상 공정에서 슛돌 작업은 생략해도 무관하다고 하였으며, 임계표면조도의 개념을 이용하여 잔류 부피와 사상 단계에 따른 사상 시간 T에 관한 식(1)을 제안하였다.

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

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

이 때, v_0 는 잔류 부피이고, C는 공작물의 물성치, 사상력 등과 관련된 상수값이며, K_i 와 CSR_i 는 각각 i번째 사상도구의 마모계수와 임계표면 조도값(Ra)이다. 사상 도구를 선정하여 몇 가지 사상 단계를 제안한 후, 식(1)을 통하여 사상 시간을 예측하면 제안된 사상 단계 중 사상 시간을 최소화할 수 있는 사상 단계를 결정할 수 있다. 만약 사상 도구를 Paper #400, Paper #600, Paper #800로 선정한다면 가능한 사상 단계는 Table 1 과 같다.

Table 1 Finishing process

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

3.2 최적 사상 공정의 선정

단위 잔류 부피량에 따른 T/C의 변화를 Fig. 5에 나타내었다.

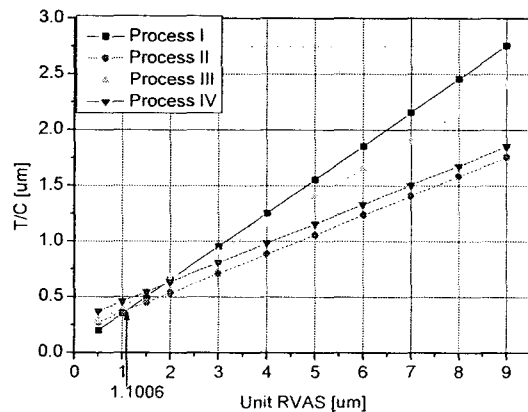


Fig. 5 T/C of each process according to Unit RVAS

Fig. 5 를 통해 고속 금형 제작에서 정삭 후 가공면의 단위 잔류 부피값으로부터 최적 사상단계를 결정할 수 있다. 고속 금형 제작에서 단위 잔류 부피값은 0-10 μm 이므로 Process 1 또는 II 가 중요하다.

4. 검증 실험

4.1 가공 조건의 선정

런아웃 양과 단위 잔류 부피값과의 관계를 해석한 Fig. 4 의 결과에 대한 검증 실험을 Table 2 및 Table 3 의 가공 조건에 대하여 수행하였다.

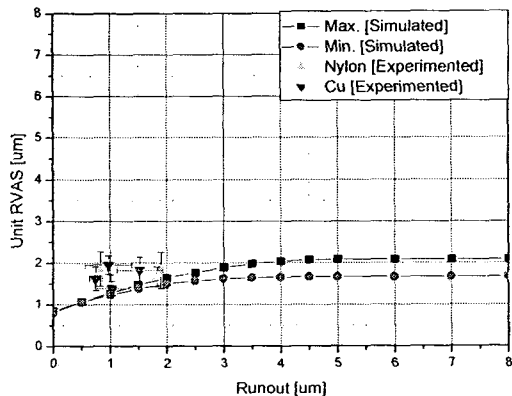
Table 2 Machining condition I

Machining center	MIKRON HSM 700
Tool	Mstar $\Phi 8$ Ball End Mill
Work piece, Inclination	Cu 99% & Mc-nylon, 30°
Tool path	Uni-directional machining

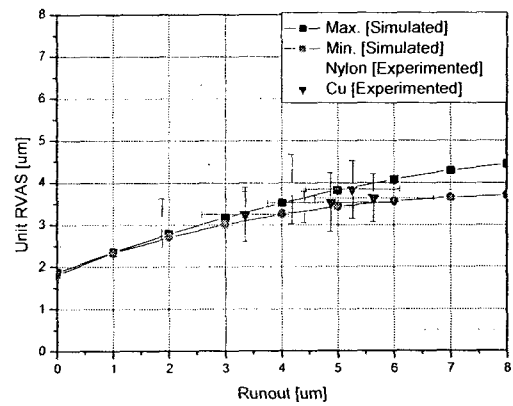
Table 3 Machining condition II

	Case I	Case II	Case III	Case IV
Spindle speed [rpm]	10,000			
Federate [mm/min]	4,000	6,000	6,000	8,000
Feed per tooth [mm]	0.2	0.3	0.3	0.4
Depth of cut [mm]	0.2			
Pick feed [mm]	0.2	0.3	0.4	0.4

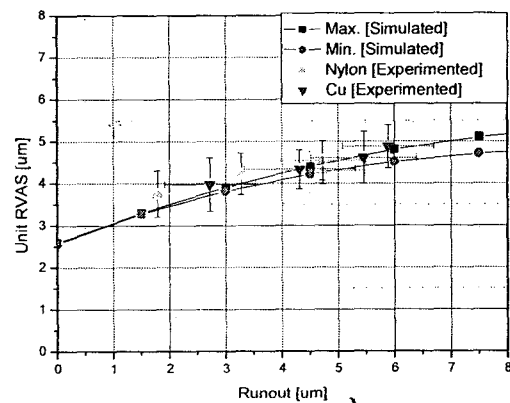
4.2 런아웃과 잔류 부피 관계 검증



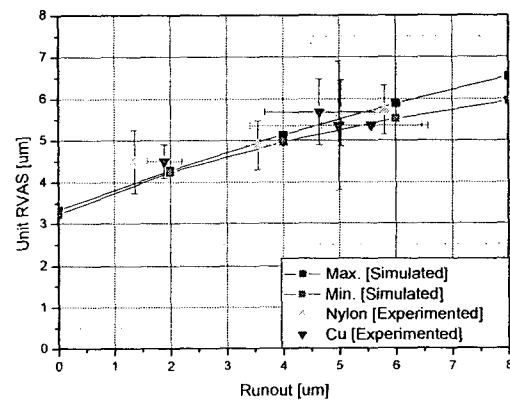
(a) Feed per tooth: 0.2mm, Pickfeed: 0.2mm [Case I]



(b) Feed per tooth: 0.3mm, Pickfeed: 0.3mm [Case II]



(c) Feed per tooth: 0.3mm, Pickfeed: 0.4mm [Case III]



(d) Feed per tooth: 0.4mm, Pickfeed: 0.4mm [Case IV]

Fig. 6 Unit RVAS variation according to runout in each cutting condition (Experimental results)

Fig. 6 에는 Fig. 4 의 해석 결과와 검증 실험의 결과를 나타내었다. Fig. 6 을 통해 알 수 있듯이 Case I 을 제외한 Case II-IV 는 런아웃 양과 단위 잔류 부피값의 관계에 대한 해석 결과와 검증 실험의

결과가 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Case I의 경우 런아웃에 대응되는 단위 잔류 부피의 값이 해석 결과보다 큰 것으로 나타났고, 실제 가공면 역시 상당히 불규칙적인 형상을 갖고 있다. 이는 가공 조건이 매우 작으므로 런아웃을 포함한 다른 영향들이 표면을 왜곡시켰기 때문이라고 판단된다.

한편, Case II~IV의 경우 가공면으로부터 측정된 런아웃은 1.5~6.5 μ m 범위 내로 나타나는데, 이를 통해 검증 실험에 사용된 MIKRON HSM 700 고속 가공기는 고속 가공 조건 범위내에서 위 범위의 런아웃을 가진다고 할 수 있다.

5. 결론

1) 금형 생산 공정은 가공 공정과 사상 공정으로 구별되며 사상 공정 단계 및 시간은 잔류 부피(RVAS)에 영향을 받는다.

2) 고속 금형 생산에서 잔류 부피를 고려한 최적 사상 공정은 Paper #800 또는 Paper #400→Paper #800 이다.

3) 런아웃이 존재하는 경우 가공면이 왜곡되어 잔류 부피도 변화한다. 이러한 변화는 가공 조건이 과도할수록 더욱 커지며 잔류 부피는 각각의 가공 조건별로 극한값을 갖는다.

4) 런아웃의 양에 따른 단위 잔류 부피의 변화에 대한 관계가 검증 실험을 통해 확인되었다.

5) 검증 실험에 사용된 MIKRON HSM 700 고속 가공기는 고속 가공 조건에서 1.5~6.5 μ m 범위의 런아웃을 갖는다.

6) 고속 가공 조건별 런아웃 양과 단위 잔류 부피량의 해석 및 검증 결과와 잔류 부피량에 따른 최적 사상 공정 해석을 통해 런아웃 양에 따른 고속 금형 전체 생산 시간을 도출해 낼 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 LG 전자 생산기술원 FDM 사업부와 협력연구의 결과이고 관련 담당자 분들께 감사 드립니다.

참고문헌

1. S. Smith, J. Tlustý, "Current Trends in High-Speed Machining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 664-666, 1997
2. H. Schulz, T. Moriwaki, "High-Speed Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 41, pp. 637-643, 1992

3. W. A. Kline, R. E. Devor, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 23, No. 2/3, pp. 123-140, 1983
4. S. Y. Liang, S. A. Perry, "In-Process Compensation for Milling Cutter Runout via Chip Load Manipulation," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 116, pp. 153-160, 1994
5. T. Altan, B. W. Lilly, "Advanced Techniques for Die and Mold Manufacturing," *Annals of CIRP*, Vol. 42, pp. 41-61, 1993
6. 박민수, 김민태, 이해성, 주종남, "사출금형 사상 공정의 체계화," *한국정밀공학회지*, 제 21 권, 제 10 호, pp. 50-56, 2004
7. 김민태, "블렌드밀 가공면의 사상 특성 및 시간 예측," *서울대학교 공학 석사 논문*, 2000
8. 이해성, "사출금형 표면의 체계적 사상가공," *서울대학교 공학 박사 논문*, 2004
9. 이희상, "고속 가공에서 사상 시간을 고려한 정삭 조건의 최적화," *서울대학교 공학 석사 논문*, 2001