

고속 가공을 이용한 금형의 효율적 생산 제 1 부: 이송 위상차와 런아웃이 가공면에 미치는 영향

김민태#, 제성욱*, 이해성**, 주종남***

High Speed Machining Considering Efficient Manual Finishing Part I: Phase Shift and Runout Affecting Surface Integrity

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

ABSTRACT

In this work, the surface integrity smoothed with a ball end mill was investigated. Because surface integrity mainly affects the manual finishing process, RV_{AM} (Remaining Volume After Machining) was introduced, and it gives the relation between machining process and finishing process. Runout and phase shift which adversely affect surface integrity were considered in the generation of surface topography. Cutting points in ball end milling were identified with positional vectors and a set of vectors which have the minimum height in unit area was selected for the generation of surface and RV_{AM} . RV_{AM} variation according to runout and phase shift was calculated and experimentally verified in proposed HSM conditions for mold machining. From the simulations and the experiments, a desirable High Speed Machining condition was suggested.

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

기호설명

1. 서론

e_x, e_y	Eccentricity of tool axis,	λ	Helix angle of cutter
R	Ball end mill radius,	r_o	Runout
F_t	Feed per tooth,	τ_x, τ_y, τ_z	Tilted angle
τ	Tilted axis,	C1, C2	Center of cutter
V	Removed volume,	K	Wear coefficient
P	Hardness of work material,	L	Total stroke length
F	Finishing force along to stroke direction		

금형생산의 효율성에 관한 연구는 금형생산공정의 체계화, 최적 공구경로 형성, 최적 공구선정 및 공작기계의 성능향상과 같은 가공 공정에 주로 집중되어왔다.¹ 그러나 최근에는 금형생산의 효율성 증대를 위해 사상공정을 체계화하려는 연구도 활발하게 진행되고 있다.^{2,3} 일반적으로 가공공정 후의 가공면은 이송량, 피크피드, 주축회전수 및

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

교신저자: 서울대학교 대학원 기계항공공학부

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

* LG 전자 생산 기술원

** 서울대학교 대학원 기계항공공학부

*** 서울대학교 기계항공공학부

가공깊이와 같은 정삭가공조건에 영향을 받는다. 그러나 실제 가공에서는 가공면을 왜곡시키는 효과가 발생하게 되며, 런아웃과 이송 위상차가 대표적인 예이다. 런아웃에 의한 가공면 왜곡 현상은 주된 연구의 대상이었으며, 엔드밀 가공에서 런아웃이 존재하는 경우 공구의 기하학적 형상과 절삭력을 예상하기 위한 모델이 제시되었고,^{4,5} 가공중의 절삭력으로부터 런아웃 양을 예측하기 위한 연구⁶와 런아웃을 조절하기 위한 실시간 런아웃 측정법에 관한 연구⁷ 등이 진행되어왔다. 이들 연구는 주로 평엔드밀 가공에서 표면형성과 절삭력 변화에 관한 것이었으며, 금형생산의 효율성 측면에서 런아웃과 이송위상차의 영향을 자세히 검토한 연구는 드물었다. 본 논문에서는 가공공정뿐 아니라 사상공정까지 모두 고려하여 금형생산의 효율성을 향상시키기 위한 방안을 고찰하였으며, 제 1부에서는 가공공정과 사상공정을 매개시킬 수 있는 잔류부피의 개념을 도입하여 런아웃과 이송위상차가 가공면에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 가공면 왜곡에 영향을 미치는 요소

2.1 이송위상차

이송위상차(Phase shift)란 인접한 공구경로 간 절입위치의 차이를 의미하며, 이로 인해 가공면은 예상과 달리 왜곡될 수 있다. 이송위상차는 주축회전수, 이송속도, 공구경로의 길이 등의 가공조건에 의하여 결정되며 가공면을 통해 확인할 수 있을 뿐 가공중에 그 양을 제어하기는 매우 어렵다.

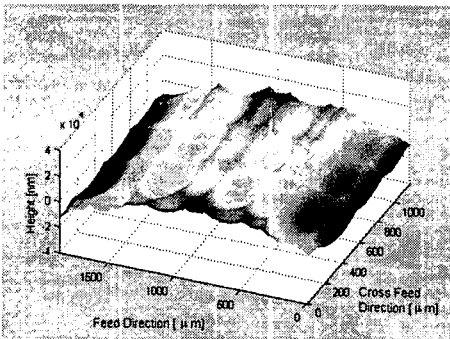


Fig. 1 Ball end milled surface according to phase shift

이송위상차가 0% 또는 100%인 경우 인접한 공구경로는 동일위상을 가지며, 이송위상차가 50%인 경우 인접한 공구경로는 날당 이송의 절반만큼 교

차한다. 한편, 이송위상차가 50~100%인 경우는 이송위상차의 정의에 의해 0~50%인 경우와 중복되므로 0~50%인 경우만 논의하면 충분하다. 가공면 품질은 가장 나쁘며, 때문에 가공면 품질이 가장 우수하다. 이송위상차 0%의 가공면을 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 7 및 Fig. 9을 참조하면, 이송위상차가 0%인 경우 가공면의 품질은 가장 나쁘고 이송위상차가 50%인 경우 가공면의 품질은 가장 우수하다. 상세한 내용은 후술하겠다.

2.2 런아웃을 고려한 표면 형성 모델

런아웃이란 가공중 공구의 회전중심이 공작기계 주축의 기하학적 회전중심으로부터 벗어난 상태를 의미하며, 주축 결합부 회전 중심의 불일치나 공구 각 날 끝의 불일치 등으로 발생하는 정적 런아웃과 절삭력 변화나 공구마모의 진행에 따른 동적 런아웃으로 대별된다.

그러나 가공조건이 과다하지 않은 정삭가공 영역에서는 후자의 영향을 배제할 수 있으며, Fig. 2에 정적 런아웃에 의한 공구 회전반경의 변화를 기하학적으로 도시하였다.

런아웃을 고려하여 볼엔드밀로 가공한 가공면을 형성하기 위해서 런아웃이 발생한 경우 2 차원 볼엔드밀 가공 기구를 Fig. 3~5에 제시하였다. Fig. 3에서 XYZ는 공작기계주축을 xyz는 공구회전축을 나타내는 좌표이고, 각각의 좌표축을 Fig. 4에 {A}, {B}로 표시하였다. 이 때 가공되는 날 끝의 위치 벡터를 P라고 표현하면 {A}좌표에서 본 벡터 P는 식 (1)과 같이 표현된다.

$${}^A P = {}^A R {}^B P + {}^A P_{ECC} \quad (1)$$

이 때, ${}^B P$ 는 {B}좌표에서 본 P의 위치 벡터이고, ${}^A R$ 는 {A}좌표와 {B}좌표간의 회전 벡터이며 ${}^A P_{ECC}$ 는 {A}좌표에서 본 편심 벡터를 의미한다. 식 (1)은 식 (2)와 같이 쓸 수 있으며 ${}^A P_{ECC}$ 와 ${}^A R$ 는 각각 식 (3), (4)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A R & {}^A P_{ECC} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^A P_{ECC} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^A_B R = {}^A_{\beta} R_y {}^A_{\beta} R_z = \begin{pmatrix} \cos \tau_y & 0 & -\sin \tau_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \tau_y & 0 & \cos \tau_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \tau_z & -\sin \tau_z & 0 \\ \sin \tau_z & \cos \tau_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

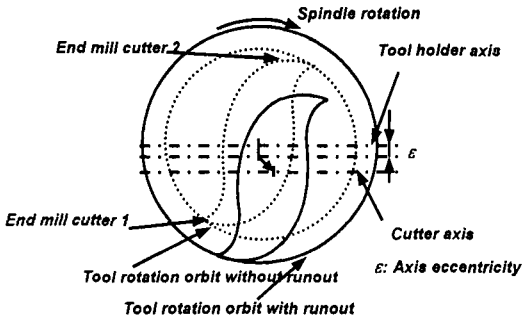


Fig. 2 Tool rotational orbit with or without runout

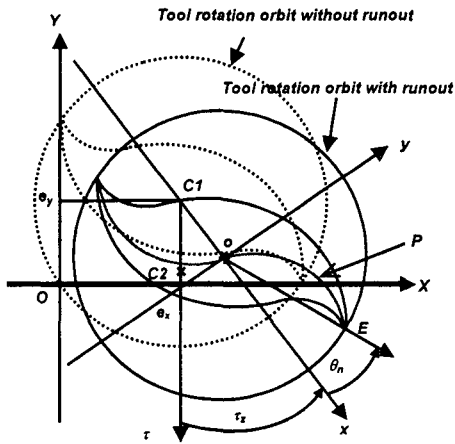


Fig. 3 Two-dimensional coordinate system with runout

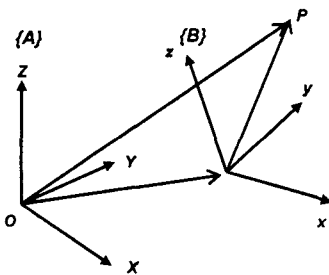


Fig. 4 Coordinate systems {A} and {B} for vector P

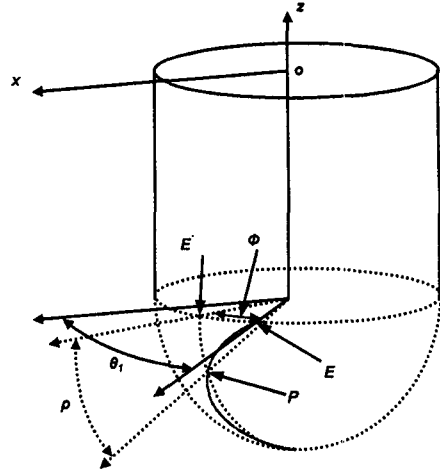


Fig. 5 Ball end mill cutter geometry and three-dimensional coordinate system with runout

Fig. 5 를 참고하여 ${}^B P$ 의 성분을 구하면 식 (5) 와 같고, 식 (3)~(5)를 식 (2)에 대입하면 ${}^A P$ 가 식 (6)과 같이 얻어진다.

$${}^B P = \left(R \cos \rho \cos(\theta_1 - \phi), R \cos \rho \sin(\theta_1 - \phi), -L + R - \frac{R\phi}{\tan \gamma} \right) \quad (5)$$

$${}^A P = \begin{pmatrix} R \cos \tau_y \cos \tau_z \cos \rho \cos(\theta_1 - \phi) - R \cos \tau_y \sin \tau_z \cos \rho \sin(\theta_1 - \phi) \\ -\sin \tau_y \left(-L + R - \frac{R\phi}{\tan \gamma} \right) + e_x \\ R \sin \tau_z \cos \rho \cos(\theta_1 - \phi) + R \cos \tau_z \cos \rho \sin(\theta_1 - \phi) + e_y \\ R \sin \tau_y \cos \tau_z \cos \rho \cos(\theta_1 - \phi) - R \sin \tau_y \sin \tau_z \cos \rho \sin(\theta_1 - \phi) \\ + \cos \tau_y \left(-L + R - \frac{R\phi}{\tan \gamma} \right) \end{pmatrix} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 가공조건에 의하여 변화하는 날 끝의 위치 벡터 P 를 모두 구한 후, 미소 단위 영역에서 위치 벡터 P 의 z 성분의 최소값, 즉 최소높이를 갖는 위치 벡터 P 를 선택하여 조합하면 블랜드밀 가공면을 형성할 수 있다.⁹

2.3 런아웃의 측정

런아웃의 양을 실시간으로 측정하는 것은 매우 어려우므로 본 논문에서는 가공 후에 가공면으로부터 런아웃의 양을 측정하였으며, Fig. 6 과 식 (7)에 방법을 나타내었다.

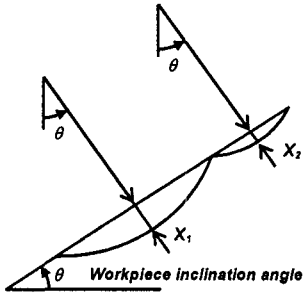


Fig. 6 Runout measurement from surface texture

$$r_o = (X_1 - X_2) \times \cos\theta \quad (7)$$

2.4 잔류부피의 개념

금형생산공정은 가공 공정과 사상 공정으로 대별될 수 있는데, 사상 공정은 가공 공정 후의 가공면에 의해 결정된다.¹ 따라서 두 공정을 동시에 고려하여 금형생산시간을 단축시키려면 가공 공정과 사상 공정을 매개시킬 수 있는 변수가 필요하며 본 논문에서는 잔류부피의 개념을 도입한다. 잔류부피(Remaining Volume After Machining: RV_{AM})란 원하는 품질의 금형을 얻기 위해 사상 공정을 통해 제거되어야 할 가공면 무늬의 양을 말한다. 잔류부피의 양은 가공 공정에서 사용되는 공구의 모양이나 가공 조건 등에 의해 결정되며, 사상 공정의 단계를 결정하는 수단이 되므로 두 공정을 연관시키는 역할을 할 수 있다.

3. 런아웃 및 이송위상차가 가공면에 미치는 영향

3.1 서설

런아웃과 이송위상차는 가공면을 왜곡시키는 중요한 요소이며, 잔류부피는 가공면을 평가할 수 있는 인자이다. 그러므로 런아웃 및 이송위상차와 잔류부피의 관계 고찰로부터 런아웃과 이송위상차가 가공면에 미치는 영향을 해석할 수 있다.

3.2 런아웃 및 이송위상차와 잔류부피의 관계

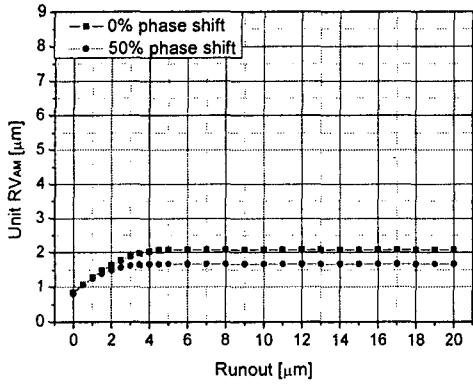
런아웃 및 이송위상차와 잔류부피와의 관계를 고찰하기 위해 Table 1 과 같이 고속가공에서 일반적으로 많이 사용되는 정삭가공조건을 제안하였다.

Table 1 Proposed cutting condition often used in HSM

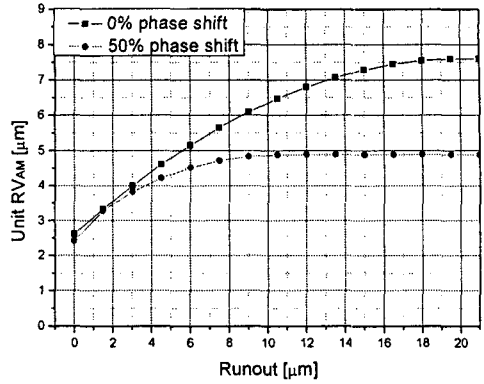
	Feed per tooth [mm]	Pick feed [mm]	Feedrate [mm/min]
Case I	0.1	0.2	2000
Case II	0.2	0.2	4000
Case III	0.2	0.3	4000
Case IV	0.3	0.3	6000
Case V	0.3	0.4	6000
Case VI	0.4	0.3	8000
Case VII	0.4	0.4	8000
Case VIII	0.5	0.5	10000
Case IX	0.6	0.6	12000
Tool	Φ = 8, 2-flute ball end mill		
Spindle speed	10,000 rpm		

소형금형의 고속가공에서는 직경 6mm 나 8mm 의 2 날 볼엔드밀을 많이 사용하므로 직경 8mm 의 2 날 볼엔드밀을 해석에 사용하였다.

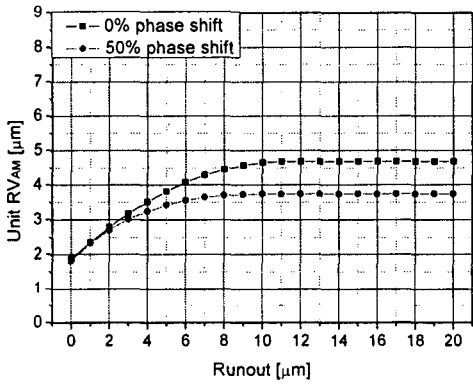
Fig. 7 에 Table 1 에서 제안한 각각의 가공조건에서 런아웃에 따른 단위 잔류부피 변화의 해석 결과를 제시하였다. Fig. 7 의 해석 결과는 2.2 절의 모델을 사용하였으며⁹, 단위 잔류부피란 잔류부피의 양을 가공면의 총면적으로 나눈 값으로 가공 후 남아있는 가공면 무늬의 평균 높이를 의미한다. 한편, 이송위상차는 실제 가공중 제어가 매우 어렵기 때문에 최대값과 최소값을 제시하여 그 영향을 해석하였다. 한편, Table 1 에 제시된 가공조건 중 Fig. 7 에 제시하지 않은 결과는 추이가 Fig. 7 에 제시된 결과와 같으므로 생략하였다.



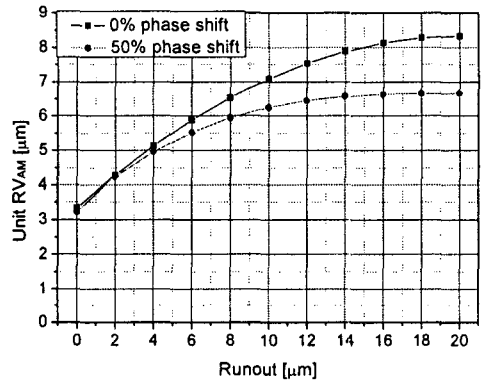
(a) Machining condition: Case II



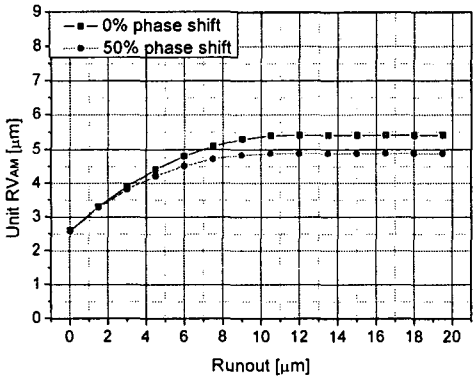
(d) Machining condition: Case VI



(b) Machining condition: Case IV



(e) Machining condition: Case VII



(c) Machining condition: Case V

Fig. 7 Unit RV_{AM} variation according to runout in each machining condition [Analysis]

Fig. 7로부터 단위 잔류부피는 모든 가공조건에서 런아웃이 증가함에 따라 증가하지만, 각각의 가공조건 별로 더 이상 증가하지 않는 임계값을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 단위 잔류부피가 임계값을 갖는 것은 정상가공에서는 절삭 깊이와 같은 가공조건이 작아 런아웃이 일정량 이상 증가하면 2 날 볼랜드밀의 경우 1 날만 가공에 참가하기 때문이다. 한편, 런아웃이 없는 경우의 단위 잔류부피의 값과 단위 잔류부피의 최대값(임계값) 간의 차이는 가공 조건이 증가하면서 더 커짐을 알 수 있고, Case VI의 경우 최대값(임계값)이 최소값의 3 배 이상 된다.

Fig. 7 에서는 이송위상차에 의한 단위 잔류부피 변화도 확인할 수 있다. 이송위상차가 0%인 경우, 즉 인접 경로간의 공구의 절입위치가 일치할 때, 단위 잔류부피는 최대값을 갖고, 이송위상차가 50%인 경우, 즉 인접 경로간의 공구의 절입위치가 공구 반경만큼 차이 날 때, 단위 잔류부피는 최소 값을 갖는다.

Fig. 7 의 (c) 와 (d)를 비교해 보면, 이론적으로 Case V 와 Case VI 의 가공면은 동일해야 함에도 불구하고, 이송위상차에 의한 단위 잔류부피의 최대값과 최소값의 차이가 Case VI 의 가공조건에서 더욱 커짐을 확인할 수 있다. 그러므로 좋은 품질의 가공면을 얻기 위해서는 Case V 의 가공 조건, 즉 낱당이송이 피크피드보다 크지 않은 가공조건을 선정하는 것이 유리하다. 이송위상차를 가공중에 제어하거나 확인할 수 없음을 고려하면 이러한 가공조건의 선정은 필수적이다.

4. 실험 및 검증

Fig. 7 에 제시된 런아웃과 단위 잔류부피의 관계를 검증하기 위해 Table 2 와 Table 3 에 제시된 가공조건으로 검증실험을 수행하였다. 검증실험에 사용된 공작기계는 Fig. 8 의 MIKRON 社 HSM 700 고속가공기이며 제원은 Table 4 에 나타내었다. 사용된 공작물은 구리(C12200)와 Mc-nylon 이며 구리(C12200)의 물성치는 Part II 에 자세히 설명하였다. 본 논문에서는 런아웃과 이송위상차가 표면에 미치는 영향을 검토하기 위한 것이므로 다른 인자에 의한 표면 변화를 최소화할 필요가 있다. Mc-nylon 은 플라스틱 계열의 합성수지로 금속 계열의 재료보다 가공시 절삭력이 매우 작다. 따라서, 절삭력에 의한 공구 변형량을 거의 무시할 수 있어, 표면에 영향을 미치는 인자 중 런아웃과 이송위상차의 영향을 보다 정확히 검토할 수 있게 된다. Fig. 9 에서 알 수 있듯이, 구리(C12200)의 정삭가공에서도 Mc-nylon 의 정삭가공에서와 비슷한 범위의 결과도 출되었으므로, 사용된 시편에서는 절삭력에 의한 공구 변형량은 무시할 수 있다고 판단된다.

Table 2 Experimental setup

Machining center	MIKRON HSM 700
Tool	Mstar $\Phi 8$ 2-flute ball end mill
Workpiece, Inclination	C12200 & Mc-nylon, 30°
Tool path	Uni-directional machining

Table 3 Experimental condition

	Feed per tooth [mm]	Pick feed [mm]	Feedrate [mm/min]
Case II	0.2	0.2	4000
Case IV	0.3	0.3	6000
Case V	0.3	0.4	6000
Case VI	0.4	0.3	8000
Case VII	0.4	0.4	8000
Spindle speed [rpm]	10,000		
Depth of cut [mm]	0.2		



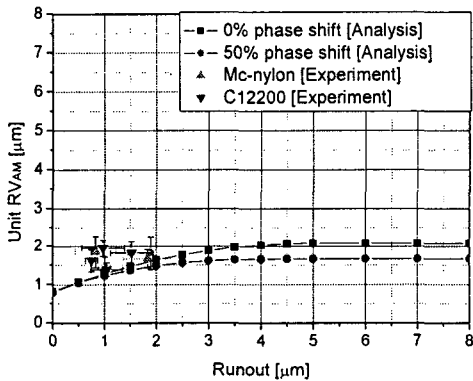
Fig. 8 MIKRON HSM 700 Machining center

Table 4 Specification of machining center

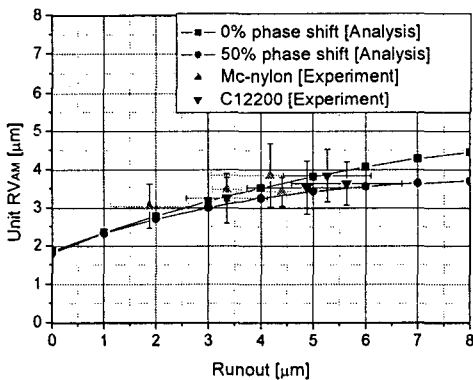
Model	MIKRON HSM 700
Maximum spindle torque	445 Nm
Vertical milling speed range	3,000 ~ 42,000 rpm
AC motor capacity at 44% ED(100%ED)	14 kW(5 kW)
Feedrate	0 ~ 20,000 mm/min

Fig. 9 에 런아웃에 따른 단위 잔류부피의 변화의 검증실험 결과를 나타내었다. 이 때 런아웃의 측정은 2.3 절의 방법을 사용하였다.

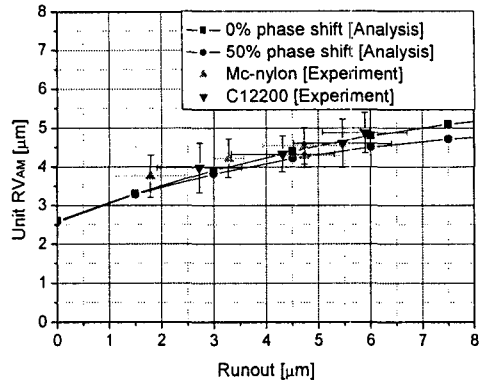
Fig. 9에서 알 수 있듯이 런아웃과 단위 잔류부피의 관계에 대한 검증실험 결과는 Fig. 7의 해석결과와 매우 잘 일치한다. 다만, 모든 가공조건에서, 런아웃이 3 μm 보다 작은 경우는 측정된 단위 잔류부피 값이 해석 결과보다 큰 것을 알 수 있다. 이것은 런아웃이 3 μm 보다 작은 경우 가공면 품질이 좋기 때문에 문지름이나 굽힘 현상 등에 의한 가공면 왜곡 현상이 런아웃이 큰 경우보다 상대적으로 많이 반영되었기 때문이다. 실제로 측정된 가공면의 불규칙성도 상기의 영향으로 증가함을 관찰할 수 있다. 한편, Table 3의 Case VI는 Fig. 9에 도시한 바와 동일한 결과를 가지므로 생략하였다.



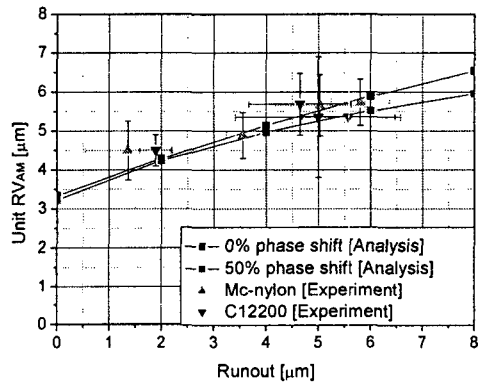
(a) Machining condition: Case II



(b) Machining condition: Case IV



(c) Machining condition: Case V



(d) Machining condition: Case VII

Fig. 9 Unit RV_{AM} variation according to runout in each machining condition [Experiment]

한편, 상기의 검증실험을 통해 MIKRON 社의 HSM 700 고속가공기는, 제안된 정삭가공조건에서 1.5~6.5 μm 범위의 런아웃을 가진다는 사실도 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 금형생산의 효율성 제고에 관한 연구의 일환으로 가공면에 영향을 미치는 인자를 분석하고 그 영향을 검증실험을 통해 확인하였다. 앞에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 가공면에 영향을 미치는 인자 중 중요하고 해석 가능한 것은 이송위상차와 런아웃인데, 가공시의 공구 날 끝 위치벡터 중 최소값을 선택함으로써 두 인자를 모두 고려한 가공면 형성모델을 제안하였다.
 - 2) 금형생산의 효율성을 제고하기 위해서는 가공공정과 사상공정을 동시에 고려하여야 하는데, 사상공정을 통해 제거되어야 할 가공면 무늬의 양을 의미하는 잔류부피의 개념을 도입하여 두 공정을 관련시키기 위한 초석을 마련하였다.
 - 3) 런아웃 및 이송위상차와 단위 잔류부피의 관계로부터 두 인자가 가공면에 미치는 영향을 해석과 검증실험을 통해 확인하였다.
 - 4) 런아웃이 증가함에 따라 단위 잔류부피도 증가하지만 런아웃이 일정량 이상 되면 두 날 중 한 날에 의한 절삭만 이루어지므로 단위 잔류부피도 증가하지 않는 임계값을 갖는다.
 - 5) 이송위상차의 양이 0%일 때 단위 잔류부피는 최대가 되며, 50% 단위 잔류부피는 최소가 된다. 이송위상차의 영향을 고려할 때 날당이송이 피크피드보다 크지 않은 가공조건을 선정하는 것이 필요하다.
- “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.

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.,