

엔드밀에 의한 슬롯가공의 최적화에 관한 연구

최종근⁺, 김형선^{*}

(논문접수일 2006. 5. 30, 심사완료일 2006. 9. 6)

A Study on the Optimization of Slot Cut in the End Milling Processes

Jong-Guen Choi*, Hyung-Sun Kim⁺

Abstract

A slot cut in end milling processes is one of the laborious works because the cutting force is likely to deflect the tools excessively, then to make large errors or to fracture the tool. This difficulty is owing to the poor stiffness of slender shaped end mills. Though, in most cases, additional finish cuts are followed after rough cuts, the accuracy of rough cuts is still important because it affects the final accuracy after finish cuts and productivity. The accuracy in slot cuts depends on the tool stiffness and the cutting conditions including depth of cut and feed. In order to meet the desired accuracy, diameter of end mill and cutting allowance have to be selected carefully. This study suggests several guidances for selecting the end mill diameter and the slot cut allowance to improve machining accuracy and productivity in slot end millings. Some experiments were done with the various cutting parameters of tool diameter, depth of cut and feed.

Key Words : Slot cut(슬롯가공), Machining error(가공오차), Tool deflection(공구처짐), Slot cut allowance(슬롯가공여유)

1. 서론

근래 제품의 품질향상에 대한 요구와 고속, 고정밀 공작기계의 개발로 정밀가공에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 그러나 대표적인 절삭공정의 하나인 엔드밀 가공은 크게 향상된 공작기계의 정도에도 불구하고 낮은 강성을 갖는 공구형상에 기인하여 여전히 큰 가공오차를 발생시키는 절삭공

정으로 인식되고 있다. 따라서 이를 극복하기 위한 많은 연구가 해석적 혹은 실험적 방법으로 진행되어 왔다⁽¹⁾.

대표적인 예로서 Lee⁽²⁾ 등은 엔드밀 슬롯가공시 칩두께 계산 모델을 제시하고 이를 바탕으로 엔드밀 절삭력을 예측하였으며, Lee와 Ko⁽³⁾는 엔드밀 깊은 홈 가공에서 절삭력의 모델을 이용한 가공면 형상의 예측과 상향절삭에 있어서 가공 정밀도를 향상시키기 위한 방안을 연구하였다. 또한, Choi⁽⁴⁾

* 순천대학교 기계·우주항공 공학부 (jgchoi@sunchon.ac.kr)
주소: 540-742 전남 순천시 매곡동 315번지
+ 한국폴리텍V대학 순천캠퍼스 컴퓨터응용기계과

등은 엔드밀 측면가공에서 가공오차를 줄이기 위한 최적 피삭여유와 정삭횟수에 따른 가공오차의 변화에 대한 실험적인 값을 제시하였다. 그러나 지금까지의 많은 연구에도 불구하고 엔드밀 가공에서의 공구치침에 의한 가공오차는 여전히 이 공정을 통한 생산성 향상의 장애로 작용하고 있다. 엔드밀 가공에서 흔히 발생하는 슬롯(slot)가공에서 현장 작업자들은 작업시간의 단축과 가공정도의 달성을 목적으로 엔드밀의 지름, 측면여유 및 절입깊이를 결정한다. 그러나 이 값들은 아직까지 작업자의 경험과 습관에 의존하고 있는 실정이며, 그 결과로 얻어지는 가공정도와 작업시간 또한 작업자의 능력에 좌우되고 있다. 따라서 가공정밀도와 생산성 향상을 위해서는 주어진 슬롯의 크기에 따른 엔드밀 지름과 가공여유 및 절입깊이에 대한 최적조건에 대한 정보가 필요하다.

본 연구의 목적은 엔드밀에 의한 슬롯가공에 있어 엔드밀의 지름과 절입깊이의 변화로부터 얻어지는 가공정도와와의 관계를 규명함으로써 슬롯가공시 가공정도와 생산성 향상에 필요한 엔드밀 지름과 절입깊이 및 가공여유를 최적화하는데 있다. 이를 위해 다양한 공구지름으로 얻어지는 공구강성의 변화와 공구지름에 비례한 공구축방향 절입깊이 및 이송과 절삭속도 등의 변화를 통한 다양한 가공조건에서 실험을 진행하였다.

2. 엔드밀 가공의 특징과 가공오차

엔드밀 가공은 절삭날의 절입과 이탈이 반복적으로 이루어지는 단속절삭이며, 공구 반지름방향의 절입량에 해당하는 칩 두께 또한 지속적으로 변화한다. 따라서 절삭력은 공구의 회전각 위치에 따라 그 크기와 방향이 다르게 나타나며, 그에 따른 공구치침도 계속 변화한다. 그 결과 가공면에 남게 되는 가공오차는 공구치침의 방향 및 절삭날의 위상(phase)에 따라 달라진다. 따라서 절삭날이 일정한 비틀림을 갖고 있는 일반적인 엔드밀 공구를 사용하는 경우, 가공면 형상은 어느 한 순간의 공구치침에 의해서 결정되지 않고 나선형으로 비틀린 절삭날이 가공면에 남긴 연속적 자취로 이루어진다. Fig. 1은 엔드밀 가공시 나타나는 가공면의 예로서 지름 10mm의 엔드밀로 공구 축방향 절입깊이(d_a : axial depth of cut)를 10mm(공구지름의 1.0배)로 하여 슬롯가공 한 후 공구경로 방향에서 가공면을 바라본 형상이다. 슬롯가공은 공구경로의 좌측에서는 상향절삭이 우측에서는 하향절삭이 동시에 발생하는 가공특성으로 인하여 슬롯의 형태는 공구진행방향의 좌측으로 휨이 발생한다. 또한 앞서

설명한 바와 같이 가공면 형태는 굴곡이 있는 곡선으로 나타나는데 해석의 편의를 위하여 최대오차(maximum error)와 굴곡오차(waviness error)로 표시할 수 있다. 여기서 최대오차는 강제공구를 가정하여 공구 치침이 없이 얻어질 수 있는 이상적인 가공면에 대한 최대 평행이동 성분을 나타내며, 굴곡오차는 최대오차와 최소오차사이의 차를 말한다. 이들의 크기 및 형상은 사용공구와 절입깊이를 비롯한 여러 가공조건에 따라 달라지게 된다.

3. 가공실험

3.1 피삭재 및 실험장치

피삭재는 프레스 다이, 다이캐스팅 다이, 압출 다이 등에 주로 활용되는 SKD61종의 열간 금형용 재료를 사용하였다. 또한 가공실험을 위한 절삭공구로는 고속도강 표준엔드밀에 코발트가 8% 함유된 양지원(YG-1)사의 2날 엔드밀을 사용하였으며, 실험에 사용된 전체 엔드밀의 상세한 제원은 Table 1과 같다.

엔드밀 가공실험을 위한 공작기계로는 Fanuc사의 18M 컨트롤러가 장착된 대우 중공업의 머시닝 센터를 사용하였으며, 가공후 가공면의 오차측정은 슬롯의 크기가 큰 경우 머시닝센터와 인디게이터를 사용하였고, 작은 경우에는 Nikon사

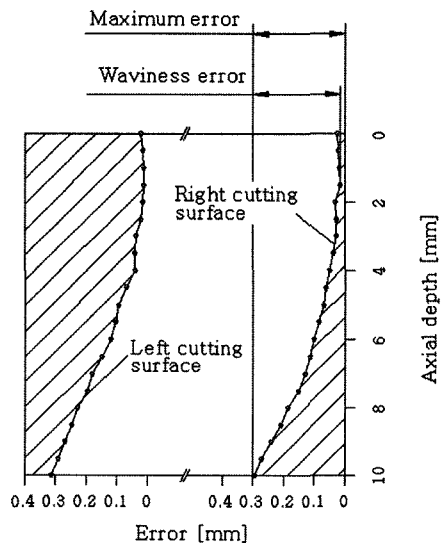


Fig. 1 Machined surface profiles by the end mill($D=\varnothing 10\text{mm}$, $F_z=0.02\text{mm/flute}$, $N=325\text{rpm}$, helix angle=30degree)

Table 1 Specification of the end mills

End mill	Specification					
	Ø2	Ø3	Ø4	Ø6	Ø10	Ø16
Tool diameter [mm]	Ø2	Ø3	Ø4	Ø6	Ø10	Ø16
Number of flutes [EA]	2	2	2	2	2	2
Tool length [mm]	55	55	60	65	80	105
Flute length [mm]	6	10	12	15	26	40
Helix angle [o]	30	30	30	30	30	30

의 공구 현미경을 사용하였다.

3.2 실험 조건

공구강성과 이에 따른 공구치짐은 공구의 지름과 매우 밀접한 관계가 있으므로 가공조건은 사용공구의 지름을 기준으로 설정하였다. 공구의 날당 이송은 황삭가공시 일반적인 현장 자료를 참고하여 공구 지름의 0.002배로 하였으며, 주축의 회전속도는 절삭속도를 일정하게 하기 위하여 각각 1625, 1083, 813, 542, 325, 217rpm으로 하였다. 공구 축방향 절입깊이는 다양한 가공조건을 시험하기 위하여 공구지름의 0.5배, 1.0배, 1.5배의 세 가지 경우로 하였으며, 툴 홀더(tool holder)로부터의 공구 돌출길이(tool hang over length)는 각각 엔드밀의 날부 길이에 공구지름(1.0D)만큼을 더하여 결정하였다. 또한 공구의 강성은 머시닝 센터에 장착한 상태에서 여러 방향에 대하여 측정된 결과 방향에 따른 차이가 미미하였으므로 그 결과를 평균하여 사용하였다. 이상의 가공조건을 정리하면 Table 2와 같다.

정확한 절입량의 조절과 측정을 위해 먼저 가공 소재의 좌측표면에 측정기준면을 형성하였다. 이를 위해 설치된 가공소재의 한 면을 지름이 큰 엔드밀을 이용하여 5회 이상 반복가공하였으며, 이렇게 함으로써 공구 런아웃(run-out)과 공구 치짐에 의한 오차를 최소화하여 가공오차가 없는 측정기준면으로 적용할 수 있었다. Fig. 2는 설명한 실험방법의 개략도를 나타낸다. 앞서 주어진 가공조건에 따라 가공

된 슬롯의 형상과 가공오차는 미리 준비된 측정기준면을 이용하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 엔드밀 슬롯가공에 의한 가공오차

Fig. 3은 슬롯가공 후 공구진행방향의 후방에서 바라 본

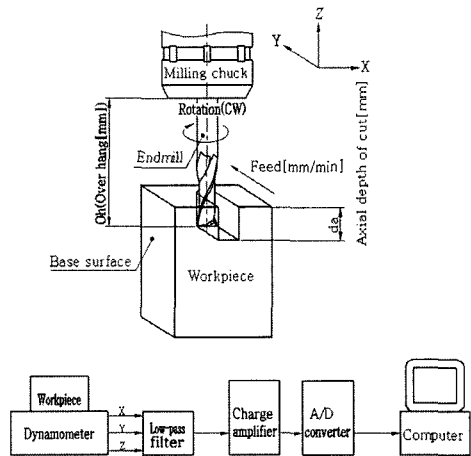


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

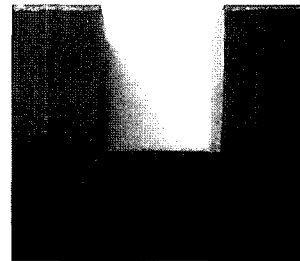


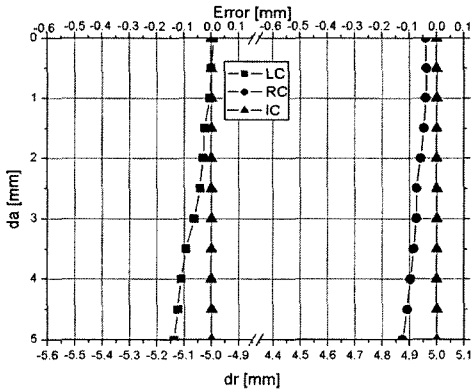
Fig. 3 Shape slotting result

Table 2 Cutting conditions

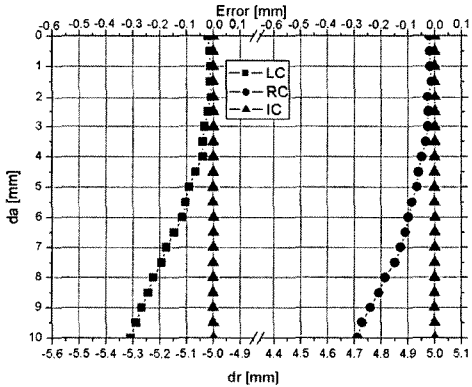
Diameter of the end mill [mm]	Ø2	Ø3	Ø4	Ø6	Ø10	Ø16
Tool hang over length(Flute length + 1.0D)[mm]	12	16	20	23	36	56
Tool strength[MN·mm ²]	0.03	0.14	0.47	2.2	22.3	100
Feed rate(0.002D)[mm/flute]	0.004	0.006	0.008	0.012	0.02	0.03
Spindle speed[rpm]	1625	1083	813	542	325	217
Axial depth of cut(0.5D, 1.0D, 1.5D)[mm]	1, 2, 3	1.5, 3, 4.5	2, 4, 6	3, 6, 9	5,10, 15	8, 16, 24

가공면의 단면 형상이다. 사진에서 보여지는 바와 같이 엔드 밀은 공구진행방향의 좌측으로 치지게 되어 큰 가공오차를

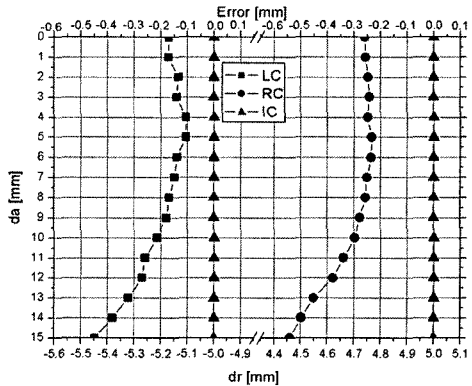
발생시킴을 알 수 있다. Fig. 4는 여러 가지 실험 결과중의 하나의 예로서 지름 10mm의 엔드밀로 가공 조건에 따라 축방향 절입깊이를 5mm, 10mm, 15mm로 하여 가공된 슬롯의 단면을 공구 축방향으로 측정한 결과이다.



(a) $da=5\text{mm}$



(b) $da=10\text{mm}$



(c) $da=15\text{mm}$

Fig. 4 Result of the slotting experiment ($D=\varnothing 10\text{mm}$, $Fz=0.02\text{mm/flute}$, $N=325\text{rpm}$)

강성공구 가정에 의한 공구치침이 없는 이상적인 가공면 (IC : ideal cutting surface)에 대한 실제 가공오차의 크기는 슬롯의 상단 보다는 바닥으로 갈수록 증가함을 알 수 있으며, 우측 가공면에 나타나는 가공오차는 엔드밀 지름과 축방향 절입깊이에 관계없이 슬롯의 상단부터 바닥까지 미절삭이 발생함을 알 수 있다. 또한 가공면의 형상은 매 순간 공구의 치짐량이 변화하는 동특성의 결과로 굴곡이 있는 곡면을 형성하게 되고, 결과적으로 슬롯의 형상은 가공에 사용한 공은 엔드밀이 지나갈 수 없을 정도로 크게 휘어짐을 알 수 있다.

4.2 절입깊이에 따른 가공오차 변화

Fig. 5 ~ Fig. 10은 엔드밀 지름 2mm, 3mm, 4mm, 6mm, 10mm, 16mm에 대하여 공구 축방향 절입깊이를 엔드밀 지름의 0.5배, 1.0배, 1.5배로 하여 슬롯가공 후 공구진행방향을 기준으로 좌측가공면(LC : left cutting surface)과 우측가공면(RC : right cutting surface)에 나타난 최대오차와 굴곡오차를 측정하였다. 전체적으로 동일 지름의 엔드밀에서 공구 축방향 절입깊이가 증가 할수록 최대오차 및 굴곡오차가 증가함을 알 수 있다. 좌측가공면의 경우 전체구간에서 축방향 절입깊이가 공구지름의 0.5배인 경우 공구지름의 1.9%, 1.0배인 경우에는 4.6%, 1.5배인 경우는 6.2% 정도의 과절삭이 발생하므로 공구지름이나 정삭여유의 선정 시에 상응하는 충분한 가공여유가 필요함을 알 수 있다.

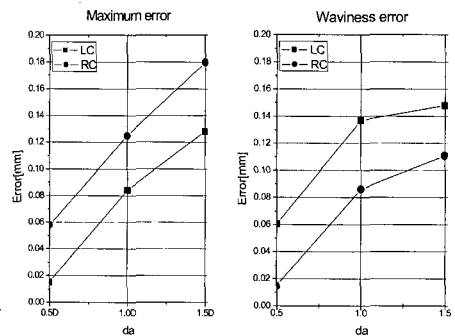


Fig. 5 Maximum and waviness errors according to change of the axial depth of cuts ($D=\varnothing 2\text{mm}$, $Fz=0.004\text{mm/flute}$, $N=1625\text{rpm}$)

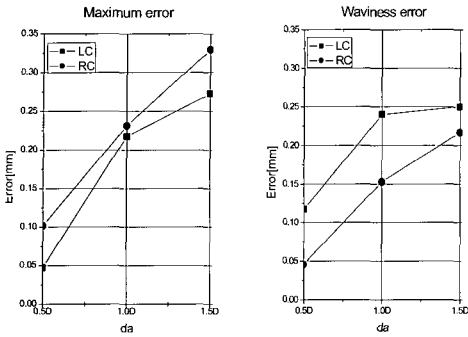


Fig. 6 Maximum and waviness errors according to change of the axial depth of cuts($D=\text{Ø } 3\text{mm}$, $F_z=0.006\text{mm/flute}$, $N=1083\text{rpm}$)

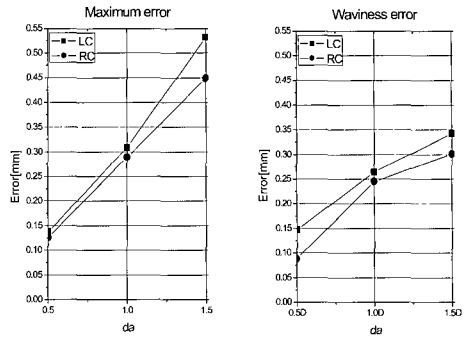


Fig. 9 Maximum and waviness errors according to change of the axial depth of cuts($D=\text{Ø } 10\text{mm}$, $f_z=0.02\text{mm/flute}$, $N=325\text{rpm}$)

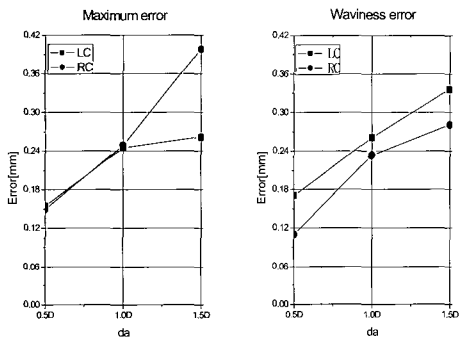


Fig. 7 Maximum and waviness errors according to change of the axial depth of cuts($D=\text{Ø } 4\text{mm}$, $F_z=0.008\text{mm/flute}$, $N=813\text{rpm}$)

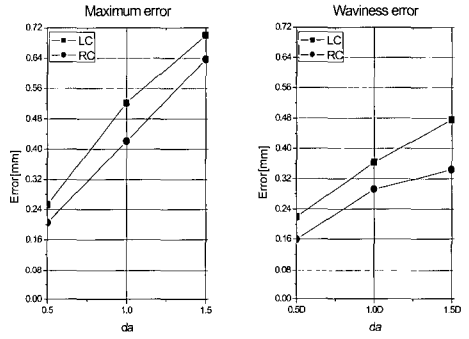


Fig. 10 Maximum and waviness errors according to change of the axial depth of cuts($D=\text{Ø } 16\text{mm}$, $d_z=0.032\text{mm/flute}$, $N=217\text{rpm}$)

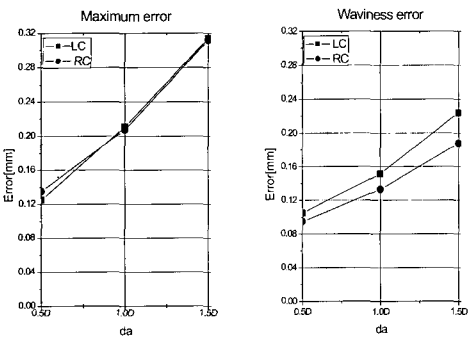


Fig. 8 Maximum and waviness errors according to change of the axial depth of cuts($D=\text{Ø } 6\text{mm}$, $F_z=0.012\text{mm/flute}$, $N=542\text{rpm}$)

4.3 엔드밀 지름에 따른 가공오차 특성

Fig. 11과 Fig. 12는 표 2에 나타난 6가지 공구 지름에 대하여 절삭속도를 일정하게 하고, 이송량은 각각의 공구지름에 대하여 0.002배, 공구 축방향 절입깊이를 공구지름의 0.5배, 1.0배, 1.5배로 하여 슬롯가공을 하였을 때 나타나는 좌우 가공면의 오차를 나타낸 것이다.

공구지름에 따라 동일 비율의 이송량과 공구 축방향 절입깊이를 가지고 슬롯가공을 할 경우 오히려 공구지름이 클수록 가공오차가 좌·우측 가공면 모두에서 보다 커짐을 알 수 있다. 또한 슬롯가공 시 공구의 지름에 따른 가공여유는 축방향의 절입깊이가 증가함에 따라 더 커져야 함이 명백하나, 공구지름에 대한 비율로 공구축방향 절입깊이가 결정될 때에 있어서는 공구직경이 클수록 가공여유는 더욱더 증가하여야 함을 알 수 있다.

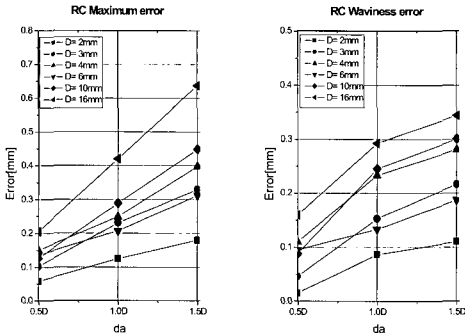


Fig. 11 Maximum and waviness errors of the right cutting surface according to the axial depth of cut and tool diameters

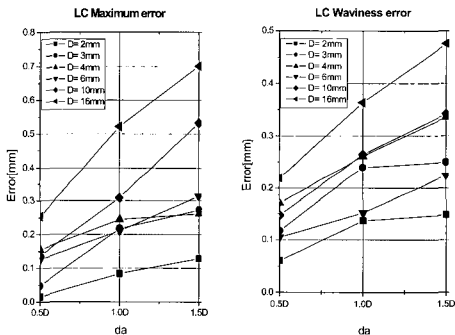


Fig. 12 Maximum and waviness errors of the left cutting surface according to the axial depth of cut and tool diameters

5. 결론

본 연구에서 금형강의 엔드밀에 의한 슬롯가공에서 주어진 슬롯크기에 대하여 가공정도 향상 및 가공시간 단축을 위해 필요한 엔드밀 지름과 가공오차와의 상관관계를 찾고자 하였다. 이를 위해 다양한 공구직경과 이에 비례하는 공구 축방향 절입깊이의 조합을 가지고 실험을 진행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 엔드밀의 지름에 관계없이 공구진행방향의 우측면에 생성된 가공오차는 공구 축방향 절입깊이가 증가함에 따라 가공오차의 크기도 증가하지만 과절삭이 발생하지 않으므로 가공여유는 최소화 할 수 있으며, 슬롯가공시 공구진행방향의 우측면을 기준면으로 하여 가공을 하는 것이 정밀도 향상에 유리하다.

- (2) 공구진행방향의 좌측면의 가공오차는 엔드밀의 지름이 작을수록, 축방향 절입깊이가 증가할수록 그 크기가 어느 정도 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 엔드밀의 지름은 슬롯크기와 사용할 수 있는 공구지름에 따라 예상되는 가공오차를 고려하여 선정해야 한다.
- (3) 공구지름에 따른 동일 비율의 이송량과 공구 축방향 절입깊이에 의한 슬롯가공의 경우 공구지름이 클수록 오히려 가공오차가 증가함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 순천대학교 산학협력중심대학 및 NURI 기계·우주항공 교육사업단의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Yang, M. Y. and Choi, J. G., 1997, "On-line Tool Deflection Compensation System for Precision End-milling," *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers(A)*, Vol. 21, No. 2, pp. 189~198.
- (2) Lee, D. K., Lee, K. Y., Lee, K. W., Oh, W. Z. and Kim, J. S., 2005, "Improvement of Chip Thickness Model in 2-flutes Slot End Milling," *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 32~38.
- (3) Lee, S. K. and Ko, S. L., 1999, "Improvement of the Accuracy in Machining Deep Pocket by Up milling," *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 220~236.
- (4) Choi, J. G., Kim, H. S. and Kim, S. C., 2004, "A study on the Optimum Allowance for Machining Accuracy Improvement in the End Milling Processes," *Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 3, pp. 8~15.
- (5) Wang, D. H. and Park, H. C., 2001, "Tool Deflection and Geometric Accuracy to the Change of Inclination Position Angle During Machining Sculptured Surface," *Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 4, pp. 55~64.