

Z-map 을 이용한 임의의 절삭영역에서의 볼 엔드밀의 절삭력 예측에 관한 연구 The Study on the Cutting Force Prediction in the Ball -End Milling Process at the Random Cutting Area using Z-map

김 규만*(서울대 대학원), 조 필주(서울대 대학원),
김 병희(강원대 정밀기계과), 주 종남(서울대 기계설계학과)

ABSTRACT

In this study, a method is proposed for the cutting force prediction of Ball-end milling process using Z-map is proposed. Any types of cutting area generated from previous cutting process can be expressed in Z-map data. Cutting edge of a ball-end mill is divided into a set of finite cutting edges and the position of this edge is projected to the cross-section plane normal to the Z-axis. Comparing this projected position with Z-map data of cutting area and determining whether it is in the cutting region, total cutting force can be calculated by means of numerical integration. A series of experiments such as side cutting and upward/downward cutting was performed to verify the simulated cutting force.

Key words : Z-map, random cutting area(임의의 절삭영역), cutting force(절삭력), finite cutting edge(미소절삭날)

1. 서 론

새로운 제품의 디자인에 대한 욕구의 증가와 더불어 3 차원자유곡면의 가공이 늘어남에 따라 가공 시 발생하는 형상오차를 줄이기 위하여 공구변형의 주원인이 되는 절삭력에 대한 정확한 예측에 대한 요구가 증가하고 있다. 일반적으로 공구축방향의 절삭력은 수직 방향의 절삭력에 비하여 공구변형에 대한 기여도가 무시될 수 있으므로 공구의 수직방향으로의 절삭력을 예측하는 것이 필요하다.

한편 볼엔드밀은 헬릭스각과 선단부분의 구형의 평상에 의하여 복잡한 절삭기구를 가지므로 기존의 연구들은 보다 해석이 용이한 평 엔드밀의 2 차원절삭력해석^[1]과 볼엔드밀의 슬로팅 절삭(slotting cutting)에 국한되어 이루어져 왔으나 실제 3 차원자유곡면의 가공에 있어서는 축벽의 가공과 상방향, 하방향밀링이 주로 이루어지고 있으므로 이들 가공시의 절삭력을 정확하게 예측할 수 있는 모델의 개발이 필요하다.

또한 일반적인 자유곡면에서 발생하는 이진 공구경로에 의한 커스프(cusp) 등으로 인하여 공구와 가공물간의 접촉부위가 매우 다양하게 변하게 되므로 이들의 영향을 고려할 수 있는 임의의 절삭영역에 대한 절삭력 예측모델이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 절삭날을 미소절삭날로 나누어 Z-map 데이터를 이용하여 얻어진 임의의 절삭영역안의 미소절삭날에 걸리는 절삭력을 적분함으로써 공구회전각에 따른 절삭력을 예측하고 여러가지 각도의 축벽가공실험을 통하여 절삭력을 평가하였다.

2. Z-map 데이터를 이용한 임의의 절삭영역 평가

z - map 은 공작물의 일정한 간격을 가진 위치 (x,y)에서의 공작물의 높이 z 를 이용하여 공작물의 형상을 표현하는 방법으로써^[2] 가공이 진행됨에 따른 각각의 위치 (x,y)에서의 공구의 높이와 공작물의 높이를 비교하여 공구와 공작물의 접촉위치를 얻을 수 있으며 이를 공구중심을 원점으로 하고 이송방향을 y 축으로 하는 xy 평면에서의 위치데이터로 변환함으로써 절삭중의 절삭영역을 쉽게 표현할 수 있다.

볼엔드밀의 가공의 경우 가공후에 공작물에는 커스프가 남게 되며, 이는 다음 가공에 있어서 접촉부위가 바뀌게 됨으로써 절삭력에 영향을 주게된다. 커스프는 이진가공의 가공경로에 따라 불규칙적으로 형성이 되므로 수치적인 분석에 어려움이 있으므로 이진가공에 의한 영향은 일반적으로 무시되어 왔으나, Z-map 데이터를 사용함으로써 이진가공에 의한 임의의 절삭영역에서의 절삭력의 예측이 가능하다.

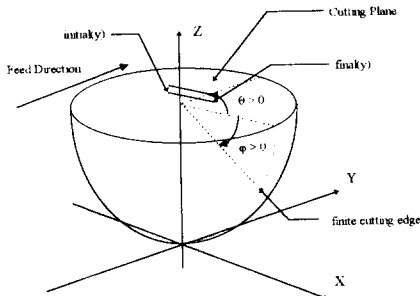
3. 절삭력 예측 모델

3-1. 절삭력 예측 알고리즘

Feng 은 절삭날을 여러 개의 미소절삭날로 나누고 각각의 미소절삭날에서의 절삭기구를 2 차원으로 근사하여 각각의 미소절삭날에서의 미소절삭력을 구한 후에 이들을 절삭날을 따라 적분함으로써 얻

기의 공구회전각에서의 절삭력에측방법을 제시하였다. [3], [4]

본 연구에서는 Feng의 방법을 응용하여 절삭력의 예측모델을 구축하고 이를 Z-map 데이터에서 얻은 접촉부위에서 해석하였다. 미소절삭날의 위치를 나타내기 위하여 본 연구에서 사용된 좌표계는 [그림 3-1]과 같다.



[그림 3-1] 볼렌드밀 절삭력 예측모델의 좌표계

본 연구에서는 절삭날을 φ 방향의 미소절삭날로 나누어 미소 절삭날에서의 절삭력을 합하여 계산하였다. 결과적으로 n 개의 절삭날이 있는 공구날의 i 번째 미소 절삭날의 공구회전각은 다음과 같다.

$$\theta_i(\theta, \varphi) = -\theta - \sin\varphi \tan\beta + (i-1)\frac{2\pi}{n} \quad (1)$$

0:1번 절삭날을 기준으로한 $\varphi = 0$ 에서의 공구회전각

β : helix angle

미소절삭날에 작용하는 접선방향미소절삭력과 반경방향미소절삭력은 더변형칩의 두께에의한 치수효과(size effect)를 고려하여 다음과 같이 절삭력과 더변형칩의 치수승의 곱으로 표현된다.

$$\begin{aligned} dF_t &= K_T(\varphi)[f \sin\theta_i(\theta, \varphi)]^{m_T} R \cos\varphi d\varphi \\ dF_r &= K_R(\varphi)[f \sin\theta_i(\theta, \varphi)]^{m_R} R \cos\varphi d\varphi \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 치수효과(size effect)특성을 나타내는 지수 m_T, m_R 은 공작물에 따라 결정되는 상수로 가정한다. K_T, K_R 는 비례상수로서 절삭력과 미절삭 힘 두께 이외의 변수들의 영향을 포함하므로 미소절삭날의 위치의 함수로 표현될수 있으며, 본 연구에서는 K_T, K_R 를 미소절삭날원치각의 3 차식으로 근사하였다.

$$\begin{aligned} K_T(\varphi) &= a_0 + a_1\varphi + a_2\varphi^2 + a_3\varphi^3 \\ K_R(\varphi) &= b_0 + b_1\varphi + b_2\varphi^2 + b_3\varphi^3 \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 임의 순간의 절삭력의 합을 구하기 위해 미소 접방향, 반경 방향을 곱한 xy 좌표계로 환산한 후, 절삭에 참여한 미소 절삭날에 걸리는 절삭력들을 합하여 절삭력의 합을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x(\theta) &= \int_{-\pi}^{\pi} \{-K_T(\varphi)[f \sin\theta_i]^{m_T} \sin\theta_i - K_R(\varphi)[f \sin\theta_i]^{m_R} \cos\theta_i\} R \cos\varphi d\varphi \\ F_y(\theta) &= \int_{-\pi}^{\pi} \{K_T(\varphi)[f \sin\theta_i]^{m_T} \cos\theta_i - K_R(\varphi)[f \sin\theta_i]^{m_R} \sin\theta_i\} R \cos\varphi d\varphi \end{aligned} \quad (4)$$

3-2. K_T, K_R 의 결정

슬로팅절삭의 경우 공구 한 회전당 평균절삭력을 구하면 미소날들에 작용하는 절삭력의 상쇄작용을 통하여 식(4)는 다음과 같이 간략화 된다.

$$\begin{aligned} \bar{F}_x(\theta) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} \{-K_T(\varphi)[f \sin\theta_i]^{m_T} \sin\theta_i\} R \cos\varphi d\varphi d\theta \\ &= -f^{m_T} R(a_0A_0 + a_1A_1 + a_2A_2 + a_3A_3) \\ A_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} \sin^{m_T+1}\theta_i \cos\varphi d\varphi d\theta \\ A_1 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} \varphi \sin^{m_T+1}\theta_i \cos\varphi d\varphi d\theta \\ A_2 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} \varphi^2 \sin^{m_T+1}\theta_i \cos\varphi d\varphi d\theta \\ A_3 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} \varphi^3 \sin^{m_T+1}\theta_i \cos\varphi d\varphi d\theta \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{F}_y(\theta) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} \{-K_R(\varphi)[f \sin\theta_i]^{m_R} \sin\theta_i\} R \cos\varphi d\varphi d\theta \\ &= -f^{m_R} R(b_0B_0 + b_1B_1 + b_2B_2 + b_3B_3) \\ B_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} \sin^{m_R+1}\theta_i \cos\varphi d\varphi d\theta \\ B_1 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} \varphi \sin^{m_R+1}\theta_i \cos\varphi d\varphi d\theta \\ B_2 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} \varphi^2 \sin^{m_R+1}\theta_i \cos\varphi d\varphi d\theta \\ B_3 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{2\pi} \varphi^3 \sin^{m_R+1}\theta_i \cos\varphi d\varphi d\theta \end{aligned} \quad (6)$$

윗 식(5), (6)으로부터 $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4$ 는 수치적으로 구하고 다양한 이송량에서의 평균슬로팅절삭력을 구하여 이로부터 m_T, m_R 을 구하고, 다양한 축방향 절삭깊이에서의 평균슬로팅절삭력으로부터 피귀름 통하여 K_T, K_R 를 구할 수 있다.

4. 임의의 절삭영역의 해석

전술한 바와 같이 형상표현모델로 Z-map 을 사용하면, 공작물의 제거율(material removal rate)은 공구경로에 무관하게 가공진후의 z 값만을 체크함으로써 가능해진다[6]. 따라서 임의의 절삭부위에 대한 절삭력 해석을 위해서는, 주어진 Z-map 데이터에 대해서 볼렌드밀의 축방향의 증가에 따른 미소절삭날들의 절삭참여부위를 결정하는 알고리즘이 필수적이다.

이를 위해 본 논문에서는 Z-map 데이터가 축방향에 수직인 단면에 대한 2 차원 평면(이하 절삭평면으로 정의한다)에 전사됨을 고려하여 축방향의 증가에 따른 미소절삭날들의 위치를 절삭평면에 전사시켜 각 미소절삭날의 절삭참여부위를 결정하는 알고리즘을 개발하였다. 먼저 [그림 3-1]에 보듯 미소절삭날의 Z 방향 각위치 φ 를 주어진 디스크 갯수만큼 나누었을때, k 번째 디스크에 해당하는 Z 위치 Z_k 는 아래식으로 표현된다.

$$Z_k = R(1 - \sin(k\Delta\varphi + \Delta\varphi/2)) \quad (7)$$

어때 불릿부분에서의 회전각 θ 에서 날의 헬릭각을 고려한 미소절삭날이 각위치 $\theta(\theta, Z_k)$ 를 구하고, 이에 따른 Z_k 위치에서의 절삭평면의 반경 $r(Z_k)$ 과 미소절삭날의 위치 $(x(Z_k), y(Z_k))$ 를 아래식으로

구한다.

본 절삭력 알고리즘에서는 이송방향을 y 방향으로 잡았다.

$$\theta(\theta, Z_k) = \theta - \frac{Z_k}{R} \tan \beta - (i-1) \frac{2\pi}{n}$$

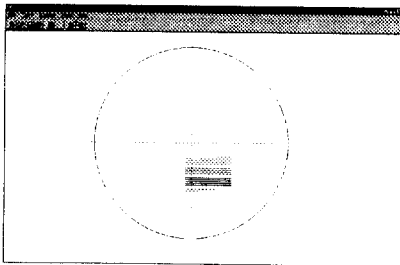
$$r(Z_k) = \sqrt{2RZ_k - Z_k^2}$$

$$x_i(Z_k) = r(Z_k) \cos \theta(\theta, Z_k) \quad (8)$$

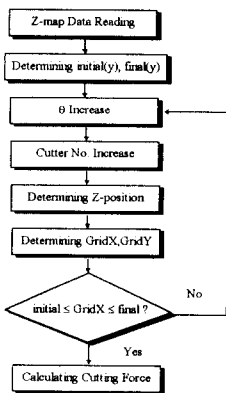
$$y_i(Z_k) = r(Z_k) \sin \theta(\theta, Z_k)$$

이 미소절삭날의 위치를 공작물의 그리드 간격(Grid Interval)에 따른 격자점으로 변환하여 미소절삭날의 절삭평면에서의 전사된 위치 GridX 와 GridY 를 반올림한 정수값으로 구한다.

위에서 구한 GridY 에 대응하는 x 방향으로의 접촉범위 initial 과 final 을, [그림 4-1]에 보이는 것과 같이 저장된 Z-map 데이터 화일로부터 읽어들이어 미소절삭날의 x 위치, GridX 가 그 접촉범위내에 포함되면 절삭력 계산알고리즘을 수행하고, 이를 벗어나면 다시 Z 위치를 상승시키고, 각 날에 대한 미소절삭날의 절삭참여부를 결정함으로써, 회전각 θ 에서의 총 절삭력을 수치적분을 통하여 계산한다. [그림 4-2]에 임의의 접촉부위에서의 절삭력계산 알고리즘에 대한 개념도를 도시하였다.



[그림 4-1] 경사각 45° 공작물을 하향절삭하는 Z-map 데이터



[그림 4-2] 절삭력 계산 알고리즘

5. 실험 및 결과 분석

5-1. 실험 장치

K_r, K_a, m_T, m_R 를 구하기 위하여 다양한 축방향 절삭깊이에서의 슬로팅절삭을 수행하였으며 [표 5-1], 모델의 검증용 위하여 다양한 각도의 축벽에서 상향절삭(up milling)과 하향절삭(down milling), 그리고 상방향절삭(upward milling), 하방향절삭(downward milling)을 수행하였다. 각각의 실험에서의 가공조건을 [표 5-2]에 나타내었다. 기계는 대우중공업에서 제작한 vertical CNC machining center ACE-V30을 사용하였다. 공구는 직경 12mm인 2날 불엔드밀을 사용하였으며, 헬릭스각(helix angle)은 30°이다. 공작물의 재질은 제품의 개발시 금형의 테스트제작용으로 많이 쓰이는 자스(ZAS)를 사용하였다. 공구의 절삭속도는 주축회전수 600rpm으로 가공하였다. 절삭력은 Kistler사의 공구동력계 9257B를 사용하였으며 전하증폭기(charge amplifier)를 통하여 컴퓨터에서 1000 Hz로 이산화(digitalizing)하여 절삭력을 저장하였다. 증폭기에서 lowpass filter로는 300 Hz를 사용하였고, 시정수(TC)는 long으로 지정하였다.

| 실험번호 | 축방향절삭깊이 [mm] | 이송량 [mm/min] |
|--------|------------------|------------------------|
| s1-24 | 0.3, 0.6, 1, 1.5 | 25, 36, 54, 60, 72, 90 |
| s25-55 | 2, 3, 4, 5, 6 | 12, 25, 36, 54, 72, 90 |

[표 5-1] 슬로팅 가공시의 절삭조건 (주축속도 600rpm)

| 실험번호 | 절삭종류 | 축벽각도 | 이송량 [mm/min] |
|--------|-------|--------------------|---------------|
| um1-15 | 상향절삭 | 15, 30, 45, 60, 75 | 120, 200, 300 |
| dm1-15 | 하향절삭 | 15, 30, 45, 60, 75 | 120, 200, 300 |
| us1-15 | 상방향절삭 | 15, 30, 45, 60, 75 | 120, 200, 300 |
| ds1-15 | 하방향절삭 | 15, 30, 45, 60, 75 | 120, 200, 300 |

[표 5-2] 축벽가공시의 절삭조건 (주축속도 1200rpm)

5-2. 계산된 결과

K_T, K_R 을 구하기 위하여 슬로팅절삭 실험을 통해 구한 모든 조건에서의 평균절삭력을 계산하고 주어진 가공조건에서 식(5), (6)의 계수들을 계산하여 최소오차자승법을 이용하여 K_T, K_R 을 구하였다. 결과는 다음과 같다.

$$K_T(\varphi) = 321.7 + 803.1\varphi - 1165.5\varphi^2 + 550.7\varphi^3$$

$$K_R(\varphi) = 104.1 + 139.1\varphi - 213.1\varphi^2 + 69.3\varphi^3$$

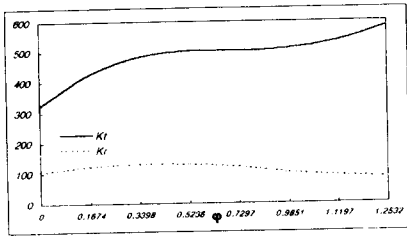
$$m_T = 0.7053$$

$$m_R = 0.4788$$

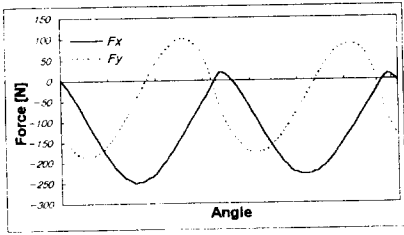
절삭날의 위치각 φ 에 따른 K_T 와 K_R 의 변화는 [그림 5-1]과 같다.

개발된 불엔드밀 절삭력 예측모델의 성능을 평가하기 위하여 다양한 축방향절삭깊이에서의 슬로팅 절삭시 실험치와 예측된 절삭력을 비교하였다. [그림 5-2]에서는 실제절삭력과 예측된 절삭력이 완

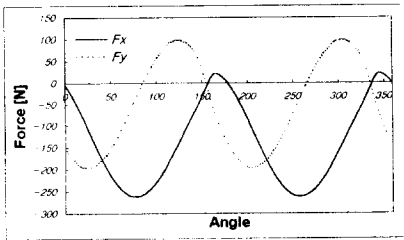
전히 일치함을 보여준다.



[그림 5-1] 절삭날 위치각에 따른 K_t, K_r



(a) Experiment

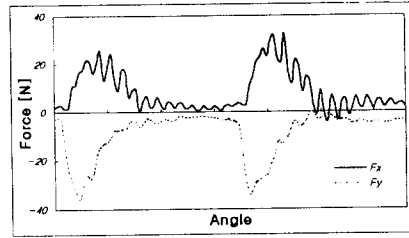


(b) Simulation

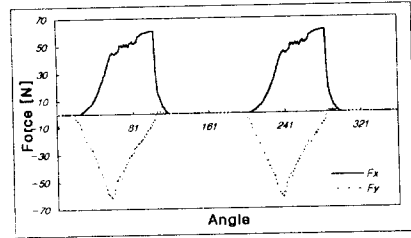
[그림 5-2] 슬로팅절삭시 예측된 절삭력과 실제절삭력의 비교
축방향절입량 3 mm 이송량 90 mm/min 주축속도 600rpm

5-3. 측벽가공을 통한 검증

일반적인 3차 자유곡면의 가공에 있어서는 슬로팅절삭보다는 측벽 가공과 상방향, 하방향절삭이 주를 이루고 있으며 또한 이 과정에서 발생하는 공구의 변형이 공작물의 형상오차에 가장 큰 영향을 미치고 있으므로 이 과정들에 관한 정확한 절삭력 예측이 필요하므로 여러 가지 측벽의 각도와 이송량에서 측벽가공과 상방향, 하방향절삭을 수행하였다. [그림 5-3],[그림 5-4]는 30°의 측벽에 있어서는 상향 절삭과 하방향절삭에서의 실제 절삭력과 예측된 절삭력을 비교한 것으로 대체적으로 일치된 절삭력현상을 보이고 있다. [그림 5-5]는 여러 가지 측벽의 각도에 따른 측벽가공시 상향절삭, 하향절삭과 하방향절삭에서의 최대 절삭력의 경향과 예측된 최대절삭력을 보이고 있으며 측벽의 각도에 따른 절삭력의 경향은 일치하고 있으나 대체적으로 절삭력이 크게 예측되고 있음을 알 수 있다. 이에 대한 이유는 실제절삭이 이루어짐에 따라서 발생하는 공구의 수평방향 변형에 의하여 공구면수직방향으로의 실제절삭깊이가 감소함으로써 절삭력의 감소를 가져오기 때문으로 생각된다.



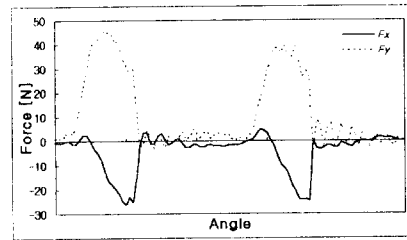
(a) Experiment



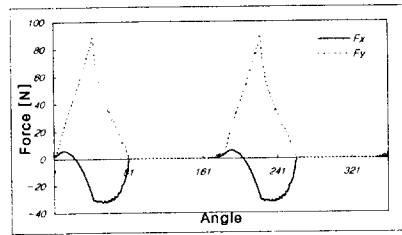
(b) Simulation

[그림 5-3] 측벽가공시의 실제절삭력과 예측된 절삭력의 비교

측벽 각도 30° 이송량 200mm/min
주축속도 1200rpm 절삭형태 상향절삭



(a) Experiment

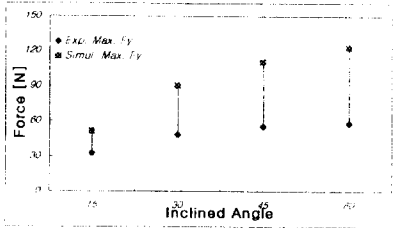
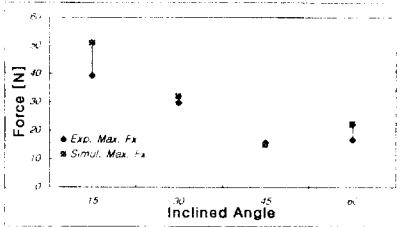


(b) Simulation

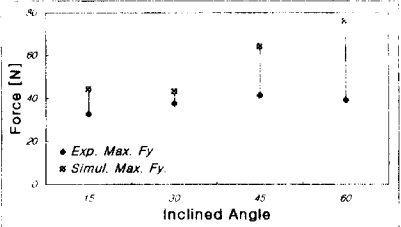
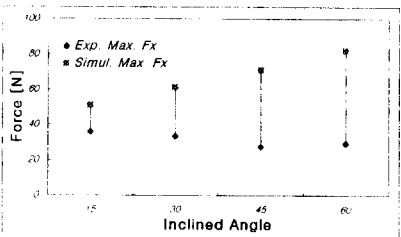
[그림 5-4] 측벽가공시의 실제절삭력과 예측된 절삭력의 비교

측벽 각도 30° 이송량 200mm/min
주축속도 1200rpm 절삭형태 하방향절삭

(a) 상 향



(b) 하 향



(c) 하 방향

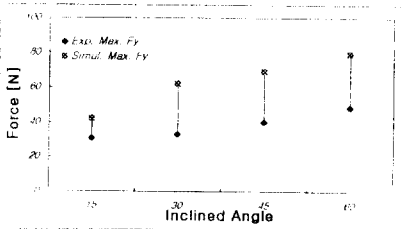
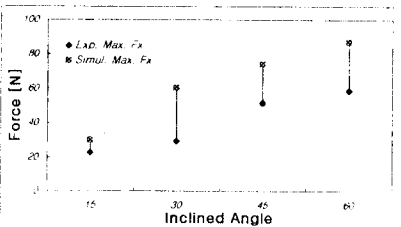


그림 5-5] 측면가공시의 측면각도에 따른 최대절삭력의 변화
이송량 200 mm/min 주축속도 1200 rpm

6. 결론

볼랜드밀의 절삭력 예측을 위하여 기존의 팽의 방법을 응용하여 볼부분절삭날을 따라서 미소절삭날로 나눈 후 미소절삭날의 위치를 Z-map 데이터에서 구하여진 절삭영역과 비교하여 이에 포함되는 미소절삭날들에서의 절삭력을 적분함으로써 절삭과정에서 발생하는 임의의 절삭영역에서의 공구회전각에 따른 절삭력의 예측모델을 구성하였다.

3차원곡면가공에서 주로 사용되는 측면상향밀링, 측면하향밀링, 상방향밀링 그리고 하방향밀링을 여러가지 측면의 각도에 따라서 수행하여 이들 절삭력의 경향을 알아보았으며 이를 예측된 절삭력과 비교하였다. 대체로 절삭력의 변화 경향은 일치하였으나 실제절삭날에 비하여 보다 크게 절삭력을 예측하였으며 이는 실제절삭에 있어서 발생하는 공구의 변형에 기인하는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. W.A.Kline, R.E.DeVor, "The prediction of cutting forces in ball end milling with application to cornering cuts", Int.J.Mach.Tools Des.Res, Vol. 22, No.1, pp7-22, 1982
2. P-L Hsu and W-T Yang, "Realtime 3D simulation of 3-axis milling using isometric projection", computer aided design, Vol. 25, No. 4, pp215-224, 1993
3. His-Yung Feng, Chia-Hsiang Menq, "The prediction of cutting forces in the ball-end milling process-I. Model formulation and model building procedure", Int.J.Mach.Tools Manufact., Vol. 34, No.5, pp697-710, 1994
4. EE Meng Lim, His-Yung Feng, et.al. "The prediction of dimensional error for sculptured surface productions using the ball end milling process. Part 1: Chip geometry analysis and cutting force prediction" Int.J.Mach.Tools Manufact., Vol.35, No.8, pp 1149-1169, 1995
5. 최종근, 양민양, "고정밀 밀링가공을 위한 공구치침 보전시스템 개발", 한국정밀공학회 94년도 추계학술대회논문집, pp 42-46, 1994
6. Zeki Yazar, Karl-Friedrich Koch, Tom Merrick and Taylan Altan, "Feed Rate Optimization based on cutting force calculations in 3-axis milling of dies and molds with sculptured surfaces", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.34, No.3, pp.365-377, 1994