

정면밀링작업에서 가공면의 형상에측에 관한 연구

백 대균*, 김희술**

* : 영남대 대학원

** : 영남대 기계공학과

1. 서론

최근 기계가공이 CAD/CAM화 되고 가공기술이 고정밀화, 고능률화 되어감에 따라 절삭공정에 대한 정확한 모델이 필요하다. 절삭공정에서 공작물의 정밀도나 가공능률이 가장 큰 영향을 미치는 것이 절삭력과 표면거칠기로서 이의 해석을 위해서 절삭력 모델과 표면거칠기 모델이 사용되고 있다. 정면밀링에서 절삭력 모델은 비절삭저항과 칩단면적의 곱으로 표시되는 정절삭력 모델로부터 커터형상과 공작물의 형상, 그리고 인서트 초기위치오차 등을 고려하여 정교한 절삭력 모델을 개발하였다[1-4]. 표면조도에 대한 모델은 선삭에서는 비교적 적용이 쉬우나 다인공구인 밀링에서는 인서트 초기위치오차(Run-Out)에 의해 어렵게 된다. 밀링작업에서 인서트 초기위치오차는 피할 수 없는 것으로 절삭력의 해석과 표면조도의 해석에서 반드시 고려해야 한다. 밀링작업에서 표면조도 모델을 살펴보면 초기에는 인서트 초기위치오차를 고려하지 않고 표면조도 모델을 개발하였고, 그 후에 인서트 초기위치오차와 공구의 치짐을 고려한 표면조도 모델을 개발하였다[5-8]. 그러나 밀링가공에서는 커터의 정적인 치짐에 더하여 단속절삭에 의한 강제채터를 고려해야한다. 특히 정면밀링가공은 커터의 정적인 치짐보다는 강제채터의 효과가 더 크다. 따라서 본 연구에서는 정면밀링가공에서 인서트 초기오차와 날의 형상을 고려하여 보다 쉬운 표면조도 모델을 세우고, 절삭과정을 진동계로 모델링하여 3차원 동적 표면형상을 예측하고자 한다. 또한 본 모델을 이용하여 정면밀링작업에서 최적의 절삭조건을 찾아가자 한다.

밀링가공에서 표면조도는 날당 이송과 함께 인서트 초기위치오차에 의하여 크게 좌우 되기 때문에 최적의 이송을 찾아서 알맞은 표면조도를 얻고 절삭효율을 높이는 힘들다. 따라서 본 연구에서 개발한 표면조도 모델을 이용하여 최적의 이송을 찾아서 목적에 합당한 표면조도를

얻고, 또한 절삭효율도 높일 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 표면조도 모델

2.1 정적 표면조도모델(Static surface roughness model)

표면조도는 절삭가공면의 좋고나쁨을 판단하는 한가지 기준으로, 다인공구인 정면밀링의 이송에 따른 표면조도는 인서트 초기위치오차에 의해 단인공구인 선삭과는 다른 경향을 나타내게 된다.

밀링작업에 있어서는 커터제작시의 오차와 인서트규격의 오차로 인하여 축방향 인서트 초기위치오차(axial runout)와 반경방향 인서트 초기위치오차(radial runout)가 존재하게 되고, 축방향 인서트 초기위치오차는 절삭깊이를 변화시키고, 반경방향의 인서트 초기위치오차는 날당이송을 변화시켜 표면조도를 변화시킨다.

정면밀링은 앞날과 후속하는 날의 상대적인 인서트 초기위치오차가 일정하지 않으므로, 절삭후 표면형상의 형성에 관여하는 날은 이송에 따라 다르게 나타난다. Fig.1은 이송이 인서트 초기위치오차에 비해 비교적 작은 경우 표면형상의 형성에 관여하는 날이 불규칙함을 보인 한 예이다.

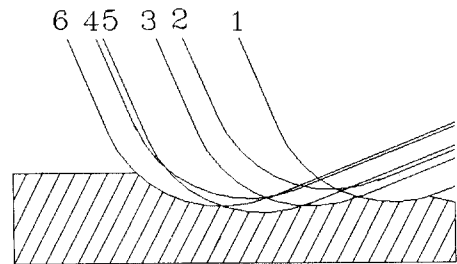


Fig.1 Surface profile according to small feed

그림에서 1-6번째의 날이 차례로 절삭을 하는 경우, 2번째 날이 절삭한 후의 최대높이는 1번째 날과 2번째 날에 의해 결정되지만, 3번째 날이 절삭한 후의 최대높이

는 1번째 날과 3번째 날에 의해 결정된다. 그 다음 거칠기의 형성은 3번째 날과 5번째 날에 의해 형성되고, 인서트 초기위치오차가 상대적으로 아주 작은 4번째의 날은 절삭작용에도 관여하지 않게 된다. 이와 같이 절삭을 완전히 끝마친 후의 표면조도는 앞날과 후속하는 날의 상대적인 인서트 초기위치오차와 이송에 따라 결정된다.

Fig.1에서 빗금친 부분의 표면형상을 시뮬레이션하기 위해 i 번째 인서트에 초기위치오차가 존재하는 경우의 그림을 자세히 도시하면 Fig.2와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 i 번째 인서트의 반경방향 초기위치오차가 $\epsilon_r(i)$, 축방향 초기위치오차가 $\epsilon_a(i)$ 일 때 인서트는 O 에서 O' 로 이동하게 된다. i 번째 인서트의 궤적은 a, p, q, d 로 이루어지고, $i+1$ 번째 날은 날당이송거리인 f_t 만큼 이동한 위치에서 인서트 초기위치오차량에 따라 궤적을 그리게 된다.

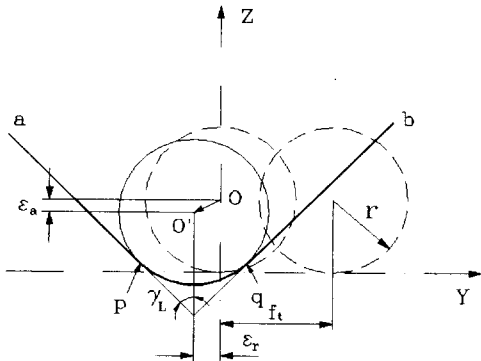


Fig.2 Theoretical surface roughness with run-out

가공후의 표면형상은 다음과 같이 모델링할 수 있다. 먼저 표면형상의 y 좌표는 커터날의 수를 Z_c , 커터의 순번을 i , y 좌표의 증분치를 Δy , 데이터수를 n 으로 나타낼 때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y(i, j) = \Delta y j - \epsilon_r(1), \quad i=1 \dots Z_c, \quad j=1 \dots n$$

$$\Delta y = [(Z_c - 1) \cdot f_t - \epsilon_r(Z_c)] / n \quad (1)$$

인서트 곡률반경이 r 이고, 커터의 리드각이 γ_L 일 때 i 번째 인서트의 궤적을 구하기 위해 직선과 곡율이 만나는 교점 p 의 위치를 구하면 다음과 같다.

$$y(i, p) = -r \cos \gamma_L - \epsilon_r(i)$$

$$= \Delta y p$$

$$z(i, p) = r(1 - \sin \gamma_L) - \epsilon_a(i) \quad (2)$$

교점 q 의 위치는 다음과 같다.

$$y(i, q) = r \sin \gamma_L - \epsilon_r(i)$$

$$= \Delta y q$$

$$z(i, q) = r(1 - \cos \gamma_L) - \epsilon_a(i) \quad (3)$$

Fig.2에서 보는 바와 같이 a 와 p 사이에서는 (2)식을 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$z(i, j) = a_1 y(i, j) + b_1, \quad 1 \leq j < p$$

여기서 $a_1 = -\tan(\gamma_L)$

$$b_1 = z(i, p) - a_1 y(i, p) \quad (4)$$

p 와 q 사이의 궤적은 반경이 r 인 원의 방정식으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$z(i, j) = -\sqrt{r^2 - [y(i, j) + \epsilon_r]^2} - \epsilon_a(i) + r,$$

$$p \leq j < q \quad (5)$$

q 와 b 사이에서는 (2)식을 이용하면 다음과 같다.

$$z(i, j) = a_2 y(i, j) + b_2, \quad q \leq j < \Delta y n$$

여기서 $a_2 = \tan(\gamma_L)$

$$b_2 = z(i, q) - a_2 y(i, q) \quad (6)$$

(4), (5), (6)식을 이용하여 각 날의 궤적을 계산할 수 있고, 이 궤적으로부터 피드방향의 표면형상을 시뮬레이션할 수 있다.

2.2 동적 3차원 표면조도모델(dynamic surface roughness model)

절삭과정에서 채터가 발생하게 되면 공구와 공작물의 상대운동으로 인하여 표면조도는 정적인 모델보다 더 나빠지게 된다. 밀링가공에서 채터는 재생채터와 단속절삭에 의한 강제채터가 있다. 밀링의 단속절삭가공에 있어서도 재생효과와 작용이 발생하므로 어느 한도 이상의 강력가공을 행하면 재생채터가 발생하는 것은 연속 절삭인 선삭과 마찬가지로이다. 단속절삭에 있어서는 각 절삭날에 의한 절삭의 개시와 종료에 일어나는 충격과 함께 절삭량의 변동에 따른 강제적인 변동절삭력에 기인하는 강제채터를 고려해야 한다. 이 중에서 재생채터는 강력가공에서 발생하므로 본 연구에서는 정상적인 가공에서 강제채터에 의한 상대운동을 고려하고자 한다. X, Y, Z 세 방향의 상대운동 중에서 피드방향(y)의 상대운동은 반경방향의 인서트 초기위치오차를 발생시키고 절삭깊이 방향(z)은 축방향의 인서트 초기위치오차를 발생시키고 X 방향의 상대운동은 표면형상에 거의 영향을 미치지 않는다. 실제로 표면형상에 가장 큰 영향을 미치는 것은 절삭깊이 방향(Z)이므로 본 연구에서는 Z 방향만 고려하였다.

Fig.3과 같이 절삭과정을 모델링할 때, 커터의 회전각 ϕ 에서 i 번째 인서트의 상대운동은 커터의 순간변위 Z_i 와 공작물의 순간변위 Z_w 로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_i(i, t_i(\phi)) = Z_i(i, t_i(\phi)) - Z_w(i, t_i(\phi)) \quad \text{-----}(7)$$

여기서 $t_i(\phi)$ 는 커터의 회전각이 ϕ 일때 i 번째 인서트의 시간을 나타낸다.

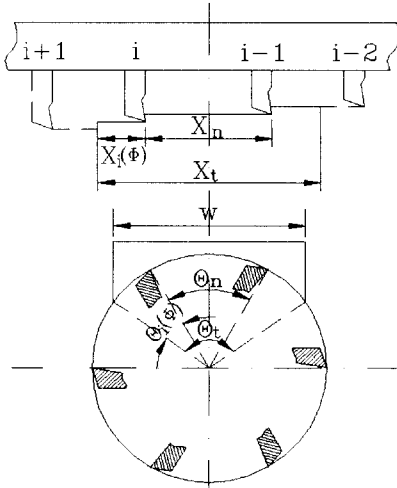


Fig.3 Face Cutter Model

단속절삭에서 각 절삭날에 의한 절삭의 개시와 종료에 일어나는 충격에 따른 강제채터를 표면형상에 고려하려면 2.1절의 2차원모델에서 3차원모델로 확장해야한다.

Fig.3에서 커터의 직경이 D 이고, 커터의 회전각이 ϕ 일때 i 번째 인서트가 절삭개시점 X_s 로부터 이동한 거리 $X_i(\phi)$ 는 다음과 같다.

$$X_i(\phi) = \frac{D \cdot \theta_i(\phi) \cdot \Pi}{360} \quad \text{-----}(8)$$

따라서 공구와 공작물의 상대운동을 고려한 동적 3차원 표면형상은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z(i, j, X_i(\phi)) = Z(i, j, X_i(\phi)) + Z_r(i, t_i(\phi)) \quad \text{-----}(9)$$

여기서 $t_i(\phi) = t_{i-1}(\phi) - t_n$

$$t_n = \frac{X_t - X_n}{V}$$

$$X_n = \frac{D \cdot \theta_n \cdot \Pi}{360}$$

$$X_t = \frac{D \cdot \theta_t \cdot \Pi}{360} \quad \text{-----}(10)$$

여기서 X_n 은 Fig.3에서 보는 것과 같이 인서트사이의 거리를 나타내고, X_t 는 한 날이 절삭개시에서 절삭완료까지 절삭을 행한 거리를 나타내고, V 는 절삭속도를 나타낸다. Fig.3에서 보는 것과 같이 만약 두 날 i 와 $i-1$ 번째날이 절삭을 행하고 있으면, 그 순간의 공구와 공작물의 상대운동은 i 날의 궤적과 $i-1$ 날의 궤적에 동시에 영향을 미치므로 (10)식과 같이 시간차를 고려해야한다.

3. 절삭시스템 모델링

Fig.4에서 보는 것과 같이 정면 밀링의 절삭시스템을 공구(M_1)와 공작물(M_2)을 각각 1자유도계로 모델링 할 수 있다. 동적 표면조도를 구하기 위해서는 먼저 절삭시스템의 파라메타를 구해야 한다. 충격해머(Impact Hammer)를 공구와 공작물에 Z방향으로 각각 가진하여 공작물과 공구의 가속도와 가진력을 각각 획득하면 절삭시스템의 파라메타를 구할 수 있다.

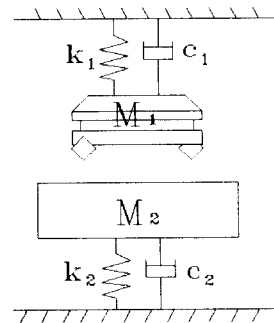


Fig.4 The cutting system as a vibratory model

공구와 공작물의 Z방향 충격력(Impact Force)과 가속도를 측정하여 ARMA(2,1)모델[9]에 적용하여 고유진동수와 감쇠비를 구하면 공구의 고유진동수는 978Hz, 감쇠비는 0.1144이고 공작물의 고유진동수는 1215Hz, 감쇠비는 0.1415이다[5]. 이 특성치들로부터 Fig.4의 절삭시스템을 다음과 같이 모델링 하였다.

$$\begin{bmatrix} 168 & 0 \\ 0 & 60 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z}_1(t) \\ \dot{Z}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 236315.5 & 0 \\ 0 & 129626.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1(t) \\ Z_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 6347133173 & 0 \\ 0 & 3496741024 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1(t) \\ Z_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_z(t) \\ F_x(t) \end{bmatrix} \quad \text{-----}(11)$$

이 모델로부터 공구와 공작물의 상대운동을 시뮬레이션할 수 있다.

4. 표면형상 시뮬레이션 및 실험결과

6개의 날을 가진 밀링커터로 370 RPM, 이송 342 mm/min에서 절삭깊이 1mm로 시편을 절삭하여 축침식 표면조도계로 표면조도를 측정하였다. 절삭을 수행한 커터로 다이알게이지로 각 인서트의 인서트 초기위치오차를 측정하여 2.1절의 표면조도모델로 표면형상을 시뮬레이션하였다.

Fig.5의 a)는 표면조도 모델로부터 구한 표면형상을 나타내었고, b)는 표면조도계로 측정한 시편의 표면형상을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 모델로부터 시뮬레이션한 결과와 실험에서 측정한 결과는 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 약간의 오차가 발생하는데 주된 이유는 인서트의 측정오차와 공작기계의 진동에 의한 공구와 공작물의 상대운동에 기인하는 것으로 생각된다.

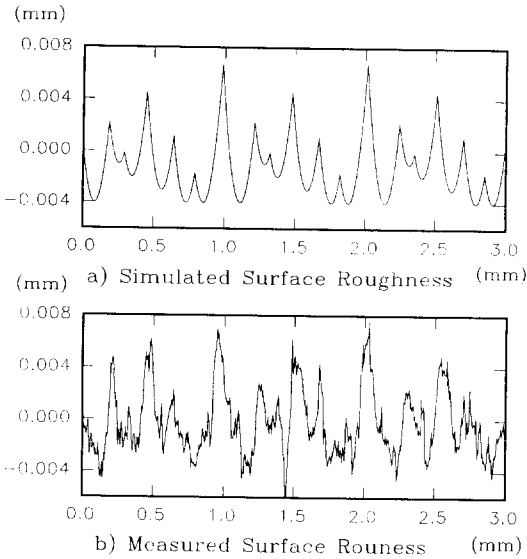


Fig.5 Simulated and Measured surface roughness profile

따라서 강제진동에 의한 표면형상의 영향을 알아보기 위하여 모델링한 절삭시스템에 동적 표면형상모델을 적용하였다. 인서트 초기위치오차를 고려한 절삭력모델로부터 [1-4] 절삭력을 시뮬레이션하고 (11)식의 절삭시스템에 가진하여 변위를 수치적분하여 상대변위를 구하여 Fig.6에 나타 내었다.

절삭깊이 2mm에서 시뮬레이션한 상대운동을 (9)식에 적용하여 동적 표면형상을 시뮬레이션하여 Fig.7에 나타 내었다. 그림에서 보는 것과 같이 초기에 인서트가 공작물에 진입할 때에 큰 충격력이 상대운동을 유발하고 이 상대운동은 진입하는 날의 표면형상과 절삭진행중인

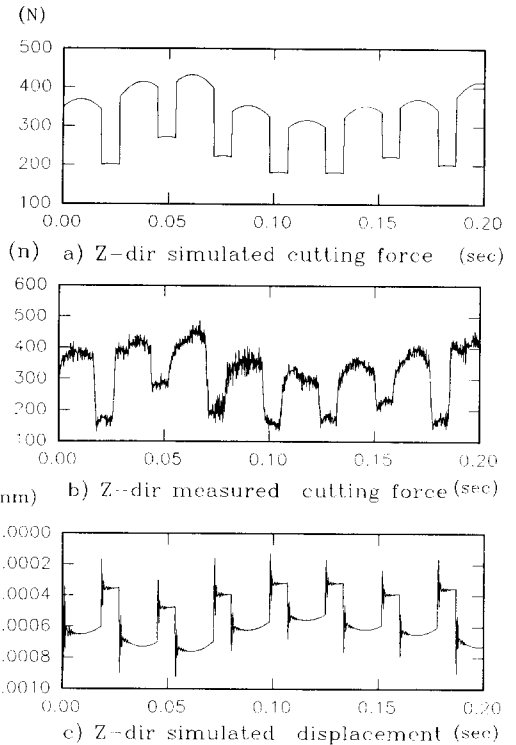


Fig.6 Z-dir. cutting force and relative displacement

날의 표면형상에 관여 한다는 것을 알 수 있다. 그 후 일정 시간동안 2날이 절삭을 행한 후 앞날이 공작물표면을 이탈하고 그 때의 충격력이 뒷날의 상대운동을 유발하여 표면을 악화 시킴을 알 수 있다. 날이 절삭면을 떠난 다음은 한개의 날이 절삭을 행하므로 Fig.6의 절삭력에도 알 수 있는 것과 같이 정절삭력이 급격이 감소하므로 공작물이 위로 처지게 되므로 경계가 뚜렷이 나타남을 알 수있다. 절삭날이 이탈한 이후에는 한개의 날이 절삭을 행하고, 뒤이어서 다음날이 공작물에 충격을 주게되어 정적인 힘의 변화로 위로 처진 공작물에 더욱 큰 충격력을 주게 되므로 날이 이탈할 때 보다 상대운동이 크다는 것을 알 수 있다.

시뮬레이션한 표면형상을 살펴보면 인서트 초기위치오차가 표면조도에 크게영향을 미친다는 것을 알 수 있고 중절삭에서는 절삭력의 변화에 따른 정적인 처짐과 동적인 상대운동이 상당히 표면조도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. Fig.8은 Fig.7을 공작물의 폭방향(X방향)에서 바라본 그림으로써 상대운동에 기인한 영향을 알 수 있다.

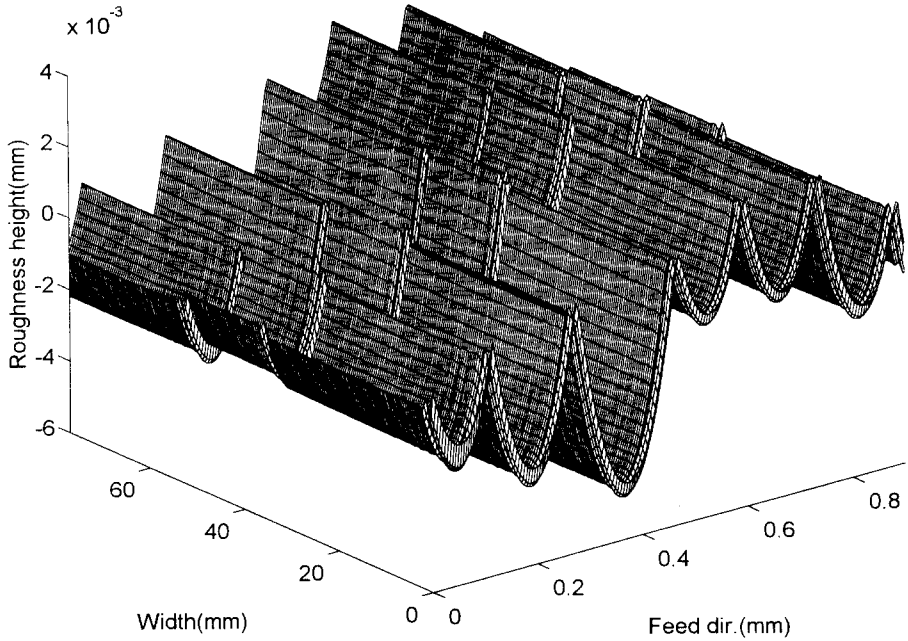


Fig.7 Simulated 3-dim. surface profile.

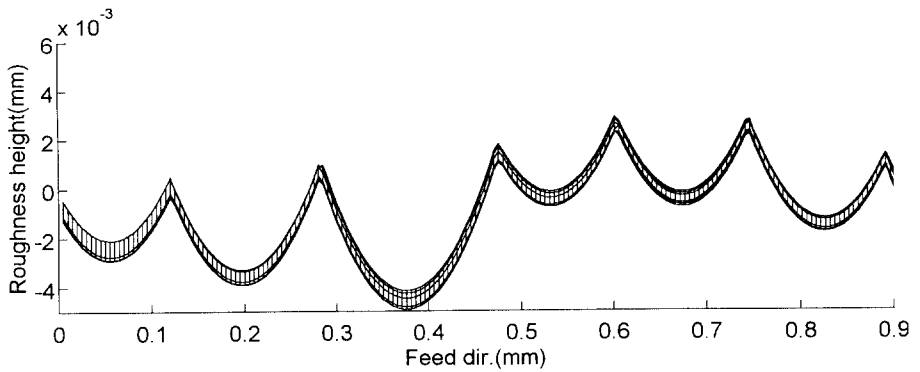


Fig.8 Simulated surface profile viewing from X-direction.

5. 표면형상모델에 의한

최적절삭조건 선정

정삭가공에서는 절삭속도를 빠르게하고 이송을 천천히 함으로써 정밀한 표면을 얻을 수 있다. 마지막 마무리 가공에서 깨끗한 표면을 얻기 위해서 일반적으로 이송을 늦추어서 표면조도를 좋게하고 있다. 그러나 위에서 살펴본 것처럼 표면조도는 인서트 초기위치오차에 의하여 좌우되므로 최적의 이송을 찾아서 알맞은 표면조도를 얻고 절삭효율을 높이는 힘들다. 따라서 본 연구에서 개발한 표면조도 모델을 이용하면 최적의 이송을 찾아서 목적에 합당한 표면조도를 얻을 수 있고, 또한 절삭효율도 높일

수 있다.

4장의 절삭조건에서 인서트 초기위치오차가 없는 경우와 오차가 발생하는 경우에 대하여 날당 이송을 변화시키면서 표면조도 모델을 이용하여 최고거칠기와 중심선 평균거칠기를 구하여 Fig.9에 나타내었다. 모든 경우에 날당 이송이 작을 수록 표면은 좋아지지만, 인서트 초기위치오차의 발생정도에 따라서 표면조도값은 서로 다르다는 것을 알 수 있다.

날당 이송이 0.154 mm/tooth일 때 최고거칠기는 $7\mu\text{m}$ 인데, 지금 최고거칠기를 $7\mu\text{m}$ 에서 $3\mu\text{m}$ 로 낮추려고 한다고 가정하자. 2.1절의 표면조도모델에 수치해석 알고리즘인 Bisection method[10]를 적용하여 $3\mu\text{m}$ 의 최고거칠기를

얻을 수 있는 최적의 날당이송(0.042 mm/tooth)을 구하였다. 공차(Tolerance value)를 0.001 μm로 하였음에도 불구하고 12번의 반복수행(Iteration)에 최적값을 찾을 수 있었다. 마찬가지로 중심선 평균거칠기에 대해서도 같은 방법으로 최적의 절삭조건을 구할 수 있다.

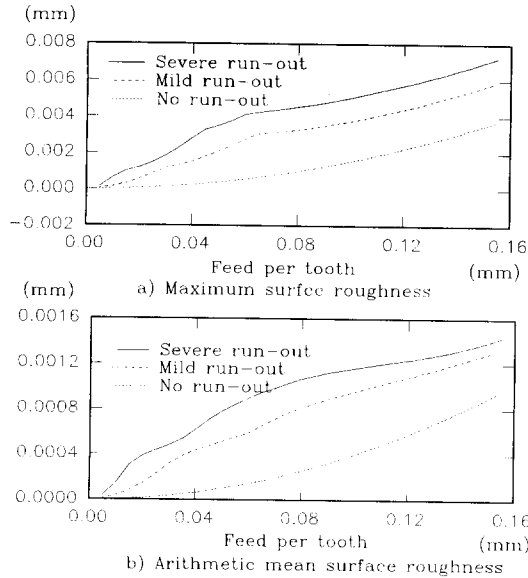


Fig. 9 Surface roughness by run-out effect

Fig. 10은 표면조도모델에 의하여 구한 최적절삭조건에서 구한 표면형상과 초기의 표면형상을 나타내고 있다. 초기절삭에서는 6날 모두가 표면형상에 관여하고 있으나 최적의 절삭조건에서는 3날만이 표면형상에 관여하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 보는 것과 같이 초기절삭에서는 거칠기 중심선이 위에 나타나지만, 최적의 조건에서는 절삭에 주로 관여하는 날이 2날이므로 거칠기 중심선이 초기절삭보다 아래에 나타남을 알 수 있다.

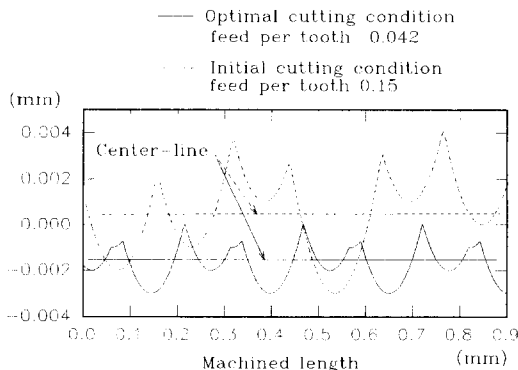


Fig. 10 Surface roughness profile of initial and optimal cutting condition

이러한 현상은 공작물의 치수오차를 유발할 수 있으므로 인서트의 초기위치오차를 고려하여 절삭조건을 선정해야함을 알 수 있다.

6. 결론

정면밀링작업에서 표면형상을 시뮬레이션하고 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인서트 초기위치오차와 인서트 형상을 고려하고, 절삭 시스템의 모델링으로부터 공작기계의 상대운동을 고려한 3차원 표면형상모델을 개발하였다.
2. 본 모델을 이용할 경우 정적인 처짐과 동적인 상대운동을 함께 고려하여 표면형상을 예측할 수 있다.
3. 본 모델을 이용하여 목적의 표면조도를 얻을 수 있는 최적절삭조건을 구할 수 있고, 또한 치수 정밀도를 높일 수 있다.

이 연구는 1994년도 한국과학재단 핵심전문연구(과제번호 941-0000-064-2)의 일부로 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1)Fu, H. J., Devor, R. E. and Kapoor, S. G., Trans of ASME, J. of Engr for Ind., Vol. 106, Feb., pp. 81-88, 1984.
- (2)Kline, W. A. and Devor, R. E., J. of MTDR, Vol. 23, No. 2/3, pp. 123-140, 1983.
- (3)Ruzhong, Z and Wang, K. K. CIRP, Vol. 321, pp. 21-26, 1983.
- (4)김희술, 이상석, 이병철, "대한기계학회논문집, 제16권, 12호, pp. 1807-1815, 1992.
- (5)W. A. Kline, R. E. Devor and I. A. Shareef, Trans of ASME, J. of Engr for Ind., Vol. 104, Aug., pp. 272-278, 1982.
- (6)J. W. Sutherland and R. E. Devor, Trans of ASME, J. of Engr for Ind., Vol. 108, Nov., pp. 269-279, 1986.
- (7)S. J. You and K. F. Eman, Trans of ASME, J. of Engr for Ind., Vol. 111, Aug., pp. 213-219, 1989.
- (8)M. A. Elbestawi, F. Ismail and K. M. Yuen Int. J. Mach. Tools Manuf. Vol. 34, No2, pp. 245-255, 1994.
- (9)Pandit, S. M. and Wu, S. M., "Time Series and System Analysis with Applications," John Wiley and sons, USA, 1983.
- (10)Curtis F. G. and Patrick O. W., "Applied Numerical Analysis," Addison-Wesley Publishing Company, 1989.