

밀링가공의 절삭조건 검증시스템 개발

김 찬 봉, 양 민 양

(한국과학기술원, 정밀공학과)

Abstract

In this paper, the fast algorithm to calculate cutting force of milling and its application to NC verification system have been studied. The fast force algorithm can calculate the maximum cutting force fastly during one revolution of tool. The NC verification using the fast force algorithm can verify excessive cutting force which is the cause of deflection and breakage of tool, and can so adjust the feed rate as to manufacture with the maximum force criterion or maximum machining error criterion. So, the fast force algorithm has been added to the NC verification system, the NC verification system can verify the physical problems in NC code effectively.

1. 서 론

엔드 밀링 및 볼엔드 밀링은 금형, 항공기 부품의 가공등 CNC가공의 많은 부분을 차지하고 있다. 그러나 CNC공작기계와 CAD/CAM 기술의 지속적인 발전에도 불구하고 자유곡면이 포함된 복잡한 부품의 황삭 및 정삭가공에서 적절한 절삭조건을 설정하여 최적의 가공을 수행하는 것은 매우 어렵다. 특히, 볼엔드 밀링 작업의 절삭조건은 볼엔드 밀링 역학의 복잡성으로 인하여 경험적으로 부여되는 것이 대부분이기 때문에 적절한 가공이 이루어 지지 않고 있다. 이런 이유로 인하여 그동안 엔드 밀링 및 볼엔드 밀링의 절삭기구 해석에 관하여 많은 연구들이 수행되어 왔다.

그러한 연구는 크게 평균 절삭력 모델과 미소 절삭날 모델로 분류할 수 있다. Wang(1)은 공구의 이동에 의하여 제거되는 공작물의 단위시간당 절삭량(Material Removal Rate)에 단위 체적당 작용하는 비저항(specific cutting energy)을 곱하여 평균 절삭력을 구하였다. 반면, Kline(2), 박희덕(3) 등은 가공에 참여하는 절삭날을 미소요소로 나누고 각 미소 절삭날에 걸리는 절삭력을 합하여 총 절삭력을 계산하는 미소 절삭날 모델을 이용하였다. 이 모델은 공구의 형상오차(run-out)(4), 공구의 처짐(5,6) 및 채터(7)등을 고려한 연구의 기본이 되기도 하였다. 평균절

삭력 모델은 효율성면에서 장점이 있는 반면 정확성이 결여되는 단점을 가지며 미소절삭날 모델은 그와 상반되는 성질을 가지고 있기 때문에, 지금까지 발표된 절삭력 계산 모델은 CAD/CAM 시스템의 중요한 기능으로 요구되는 절삭력 계산 및 절삭조건 설정기능에 효과적으로 이용되지 못하고 있는 실정이다.

NC 파트프로그램은 여러가지 이유로 인하여 기하학적인 오류와 물리적인 오류를 포함하게 되는데, 이러한 오류를 실 가공전에 검증시스템을 이용하여 제거하면 무인가공을 실현할 수 있어 생산성 향상에 많은 도움을 줄 수 있다(8). 현재 이용되고 있는 대부분의 공구궤적 검증시스템은 기하학적인 문제만을 검증할 수 있기 때문에 작업자의 판단에 의하여 절삭조건이 부여되어 작업자의 능력에 따라 가공능률이 달라지고 전반적으로 보수적인 절삭조건을 부여함으로써 인하여 생산성이 떨어지는 것이 실정이다.

본 연구에서는 물리적인 오류를 검증하기 위하여 절삭력을 효과적으로 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였고, 이것을 이용하여 절삭조건을 검증할 수 있는 검증시스템을 개발하였다. (Fig. 1)

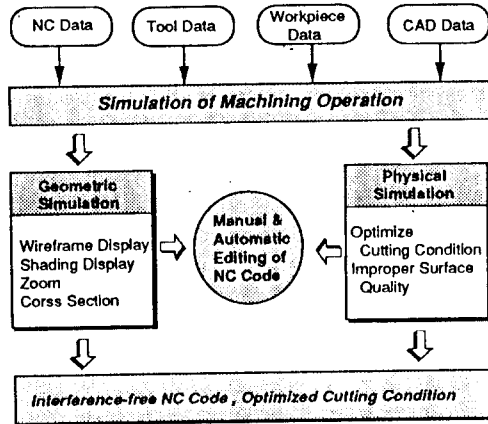


Fig.1 Structure of the NC Verification System

2. 기존의 절삭력 모델

기존에 제시된 엔드밀링의 절삭력 계산 과정(2)은 절삭에 참여하는 모든 절삭날을 미소요소로 나누고, 각각의 미소절삭날에 작용하는 절삭력을 구한 후 합해야 하므로 다음과 같은 많은 계산과정을 거치게 된다.

$$FC = \sum_{j=1}^{N_x} \sum_{i=1}^{N_y} \sum_{k=1}^{N_z} \{C_1 \Psi(i, j, k) + C_2 \Psi(i, j, k)\} \quad (1)$$

where, C_1, C_2 : constants

$\Psi(i, j, k)$: angular position of the disk elements

또한, 볼엔드밀링의 절삭력 계산을 위해 제안된 모델(3)도 절삭날을 미소요소로 나누어 각 미소절삭날에 작용되는 절삭력을 2차원 절삭실험을 통하여 얻은 관계수식으로 부터 계산한 후 합하는 과정을 거치므로 다음과 같이 많은 계산을 해야한다.

$$FC = \sum_{j=1}^{N_x} \sum_{i=1}^{N_y} \sum_{k=1}^{N_z} \{C_3 f(v, f, \alpha) \Psi(i, j, k)\} \quad (2)$$

3. 무차원 절삭력 모델

3.1 엔드밀링의 무차원 절삭력 모델

본 연구에서는 이러한 계산의 복잡성을 줄여 효과적으로 계산할 수 있도록 무차원화된 절삭력 함수를 이용하였다. 고속도 공구강으로 S45C 강을 가공할 때

Fig.2와 같이 엔드밀의 절삭날을 높이 방향으로 1mm씩 나누어 미소 절삭날을 만든다. 이 미소절삭날 한 개가 0° 에서 180° 까지 회전하면서 가공할 경우 절삭속도(cutting speed), 이송속도(feed rate), 공구의 위면 경사각(normal rake angle) 및 절삭날의 비틀림각(helix angle)의 변화에 따라 절대적인 절삭력의 크기는 다르나 최대 절삭력을 1로 하여 무차원화 하면 평균적인 하나의 곡선식으로 나타낼 수 있다. 이러한 현상으로 인하여 13가지 경우의 절삭조건 및 공구의 형태에 대하여 무차원 절삭력 선도를 구한 후 평균을 취하여 다음과 같이 평균적인 무차원 절삭력 함수를 구하였다. (Fig. 3)

$$F_{nx} = 3.795E-2 - 1.315E-30 + 7.279E-40^2 - 1.034E-50^3 + 4.647E-80^4 - 6.266E-110^5 \quad (3)$$

$$F_{ny} = 6.344E-3 + 1.746E-20 - 1.022E-40^2 - 5.287E-60^3 + 5.386E-80^4 - 1.3353E-100^5 \quad (4)$$

$$F_{nz} = 0.141 \sin \theta \quad (5)$$

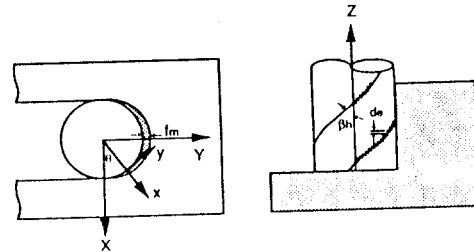


Fig.2 End Milling Cut Geometry

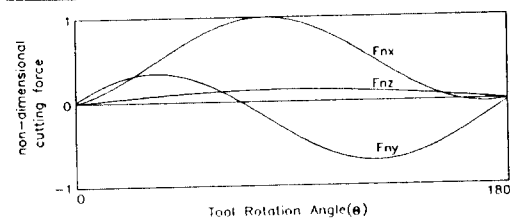


Fig.3 Non-dimensional Cutting Forces for Disk-element of End-mill

무차원화된 절삭력함수로 부터 공구날 한개가 1회 회전하는 동안 절삭날이 Fig.4(b)와 같이 공작물과 접촉했을 경우 상대적인 절삭력은 Fig.4(c)와 같이 빗금친 부분이 된다.

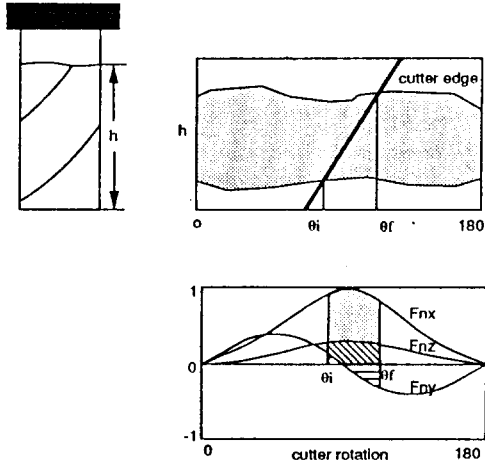


Fig.4 Contact Area and Non-dimensional Cutting Forces of End-mill

$$nFC = \int_{\theta_i}^{\theta_f} F_{nc} d\theta, [C = X, Y, Z] \quad (6)$$

무차원화된 절삭력 함수를 이용하면 공구가 1회전할 때 작용하는 절삭력의 상대적인 크기를 빠른 시간에 계산할 수 있고, 1회전 하는동안 상대적인 절삭력이 최대가 되는 회전각도에서 절대적인 절삭력이 최대로 작용하게 된다. 즉, 상대적인 절삭력의 크기로 부터 최대 절삭력이 어느 회전각도에서 발생하는지 쉽게 계산할 수 있게된다. 식(6)의 값은 공구날 한개가 임의의 순간에 공작물과 접촉한 상태에서 작용하는 절삭력의 상대적인 크기를 나타낸다. 상대적인 크기로부터 한 방향의 절삭력 또는 총 절삭력의 합력이 최대가 되는 공구의 회전각도를 구할 수 있고, 그때의 절대적인 절삭력은 기존의 절삭력 모델을[3] 이용하여 구할 수 있게 된다. 무차원 절삭력 함수를 이용하여 상대적인 절삭력을 구하는 과정은 기존의 방법인 식(1)과 식(2)에 비하여 다음과 같이 매우 간단히 나타낼 수 있다.

$$FC = \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{N_f} [nFX, nFY, nFZ] \quad (7)$$

미소절삭날 모델에 의하여 절삭력을 계산할 경우 절삭에 참여하는 절삭날을 미소요소로 나누고 각 미소절삭날에 식(1) 또는 식(2)에서 보인 계산과정을 적용하여야 하므로 많은 계산을 수행해야 한다. 그러나 본 연구에서 제시한 무차원화된 절삭력 모델을 이용할 경우 식(6)으로 계산할 수 있기 때문에 계산이 훨씬 간단

하다. 공구가 1회전하는 동안 n_θ 각도마다 계산을 하고 미소절삭날의 개수가 n_z 개 일때, 미소절삭날 모델은 $O(n_\theta n_z)$ 의 계산이 필요한 반면 무차원 절삭력 모델은 $O(n_\theta)$ 에 가까운 계산만이 필요하게 된다.

3.2 볼엔드 밀링의 무차원 절삭력 모델

고속도 공구강의 볼엔드 밀로 S45C 강을 가공할 때 Fig.5와 같이 임의의 미소절삭날 1개가 180° 회전하는 경우와, 임의의 회전각에서 절삭날 방향으로 무차원화된 절삭력 선도를 구하면 Fig.6과 같다. 이 평균적인 절삭력 신호는 볼엔드밀을 1mm의 미소요소로 나누고 공구의 위면 경사각(normal rake angle) 및 이송속도(feed rate)를 달리 하면서 구한 12번의 데이터를 평균한 것이다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 볼엔드밀은 공구의 위면 경사각이 15° 이기 때문에 위면 경사각은 이 값을 근거로 하였으며 이송속도는 절삭 조건 핸드북을 참고로 하여 설정하였다.

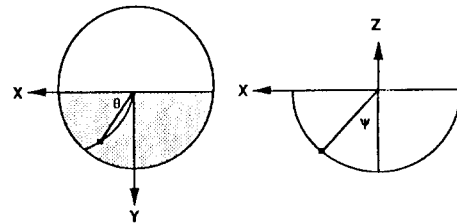
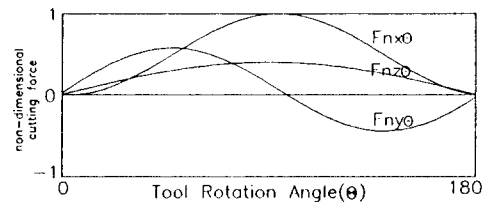
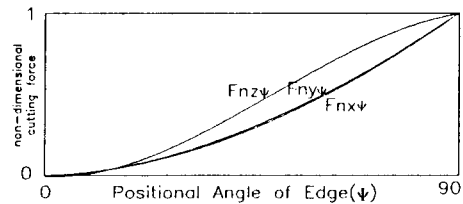


Fig.5 Cutting Position of Disk-element of Ball-end mill



(a)



(b)

Fig.6 Non-dimensional Cutting Forces for Disk-element of Ball-end Mill

$$F_{nx\theta} = 3.333E-2 - 1.038E-2\theta + 7.079E-4\theta^2 - 6.948E-6\theta^3 + 1.850E-3\theta^4 \quad (8)$$

$$F_{ny\theta} = 2.432E-2 - 1.731E-2\theta + 1.378E-4\theta^2 - 7.583E-6\theta^3 + 5.628E-8\theta^4 - 1.188E-10\theta^4 \quad (9)$$

$$F_{nz\theta} = 0.407\sin\theta \quad (10)$$

$$F_{nx\psi} = 5.601E-4\psi^{1.699} \quad (11)$$

$$F_{ny\psi} = 7.479E-4\psi^{1.600} \quad (12)$$

$$F_{ny\psi} = 4.008E-3 - 9.857E-5\psi + 3.303E-4\psi^2 - 2.287E-6\psi^3 \quad (13)$$

엔드밀링에서와 마찬가지로 절삭력 선도를 무차원화하여 나타내면 공구가 1회전 하는 동안 발생하는 절삭력의 크기를 상대적인 값으로 하여 최대값을 빠른 시간에 구할 수 있게 된다. Fig. 7 에서와 같이 공구와 공작물이 접촉하고 있을 경우 그때의 무차원화된 절삭력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_iFC = F_{nc\theta}(F_{nc\psi}(\psi_f) - F_{nc\psi}(\psi_i)) \quad , \quad [C = X, Y, Z] \quad (14)$$

이렇게 무차원화하여 나타내면 공구가 1회전할 때 상대적인 절삭력을 식 (14)와 같이 간단한 형태로 구할 수 있게 된다. 공구가 일회전하는 동안 n_θ 각도마다 계산을 하고 절삭날을 n_ψ 만큼씩 미소요소로 나눈다면 기존의 모델에서 절삭력을 구하기 위해서는 $O(n_\theta, n_\psi)$ 의 계산이 필요한 반면 무차원 절삭력 모델을 이용하여 최대 절삭력을 구하는 경우는 $O(n_\theta)$ 에 가까운 계산만이 필요하게 된다. 예를들어, 공구반경이 16mm이고, 절삭날을 90개의 미소요소로 나누고 공구가 1회전 하는 동안 1° 간격으로 절삭력을 계산할때 무차원 방법은 기존의 방법의 2.13%의 속도로 계산할 수 있었다.

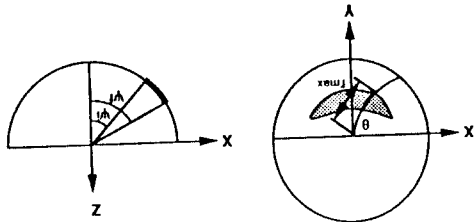


Fig.7 Contact Area between Ball-end Mill and Workpiece

4. 이송속도 및 절삭속도의 결정

밀링가공에서 발생하는 대부분의 문제들은 가공상황에 따라 이송속도(feed)와 절삭속도(cutting

speed)등을 적절히 조절하지 못하여 절삭력이 과대하게 작용하기 때문에 발생한다. 이러한 이유에서 최대 절삭력 또는 최대 가공오차 이내로 가공할 수 있도록 절삭조건을 조절해 주는 것은 정밀성 및 생산성 향상을 위하여 매우 중요하다.

이송속도의 변화를 통하여 얻고자하는 효과를 크게 두가지 관점에서 생각 할 수 있다. 첫째는 총절삭력의 합력이 설정한 최대값 이상 넘지 못하도록 이송속도를 조절하는 것이고, 두번째는 공구의 힘을 고려하여 가공오차가 최대값 이하로 발생되도록 이송속도를 조절하는 것이다.

총절삭력의 합력이 설정한 최대값 이상 넘지 못하도록 이송속도를 조절하기 위해서는 먼저 무차원 절삭력 함수를 이용하여 공구 1회전중 최대 절삭력이 발생하는 각도를 구하고 그 각도에서 식(2)를 이용하여 절대적인 총 절삭력을 구한다. 이 때의 총 절삭력이 설정한 최대 절삭력보다 큰 값이면 이송속도를 조절해 주어야 하는데 절삭력과 이송속도의 관계는 비선형적인 관계이기 때문에 bisection 방법을 이용하여 구하였다.

$$F_{total} = f(feed) \quad (15)$$

가공오차가 최대값 이하로 발생되도록 이송속도를 조절하기 위해서는 가공후 남은 면방향으로 발생하는 절삭력이 최대가 되는 각도를 구하고 그 방향으로의 절삭력과 공구의 상당스프링 상수를 이용하여 공구의 힘을 구한다. 공구의 힘과 이송속도의 관계도 비선형관계이기 때문에 bisection방법을 이용하여 구하였다.

$$\delta = \frac{F_{total}}{K_{eq}} \quad (16)$$

블랜드 밀링은 대부분 3차원 자유곡면의 가공에 사용되는데 공구와 공작물간의 접촉상태가 수시로 변하여 절삭력의 변동을 유발하여 가공불량을 초래한다. 특히 블랜드 밀의 기하학적 특성으로 인하여 공구의 정점에서는 가공이 일어나지 않고, 공구의 외각에서는 절삭속도가 최대가 되기 때문에 공구의 마모가 심하게 일어난다. 절삭속도는 공구수명에 직접적인 영향을 주며, 이송속도는 가공시간과 표면기질 및 절삭력에 밀접한 관계가 있다. 이러한 이유로 인하여 블랜드 밀링의 가공에서 적절한 절삭조건을 부여하기 위해서는 이송속도(feed)뿐만아니라 절삭속도(cutting speed)를 적절히 조절해야한다. 즉, 공작물과 접촉하는 공구의 최외각 반지름에 따라 절삭속도가 일정하게 유지될 수 있도록 공구 회전수를 조절하는 것이 필요하며 최대 절삭력 또는 최대 가공오차 이내로 가공할 수 있도록 이송속도를 조절해 주어야 한다. (9)

Fig. 7과 같이 공구와 공작물이 접촉하고 있을 때 접촉하고 있는 공구의 최 외각 반지름(r_{max})으로 부터 최대 절삭속도(V_{max})이내로 작용할 수 있도록 공구 회전수를 다음과 같이 조절하여야 한다.

$$RPM = V_{max} / (2\pi r_{max}) \quad (17)$$

5. NC 검증시스템의 개발 및 적용

본 연구에서 제시된 절삭력 모델을 이용하여 물리적 오류를 검증할 수 있는 검증시스템을 개발하였다. 공작물을 Z-map 형태로 표현한 후 공구와 공작물의 접촉상태를 구하였다. 공구와 공작물의 접촉 상태를 이용하여 접촉각을 구하고 공구가 1회전 동안 발생하는 최대 절삭력을 효과적으로 구하고 총 절삭력 또는 가공 오차를 원하는 값 이내가 되도록 이송속도를 조절 하였다.

본 연구에서 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 8과 같이 S45C 재료를 코사인 커브의 형태를 갖는 공구궤적으로 절삭실험을 수행하였고, 공구는 지름이 10mm이고 날간 형상오차(run-out)가 0.005mm인 HSS 볼엔드밀을 이용하였다.

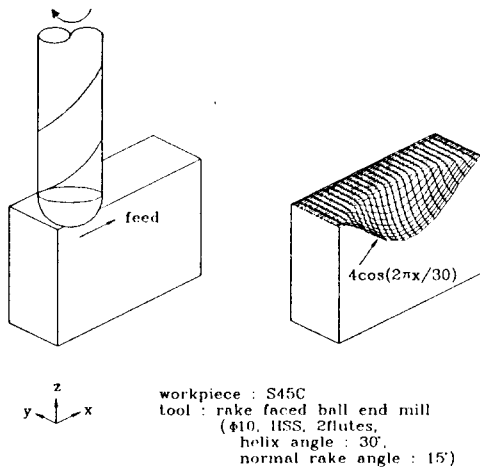


Fig.8 Prepared Workpiece and Tool for Experiment

Fig. 9은 공구와 공작물이 접촉하고 있는 공구의 최 외각 부위에서 절삭속도가 25m/min으로 유지될 수 있도록 공구의 회전수를 변화시켜 주면서 이송속도를 0.1mm/tooth로 가공한 실험이다. 공구와 공작물의 접촉이 공구의 외각부위로 갈수록 공구의 회전수는 감소하고 (Fig. 9(f)) 그때의 이송속도도 또한 감소하는

(Fig. 9(e)) 결과를 볼 수 있다. 절삭력의 크기와 형태는 실험한 결과와 본 연구에서 제시한 알고리즘을 통해 얻은 예측값과 비교적 잘 일치함을 볼 수 있었다.

Fig. 10은 IBM PC상에서 MS-Windows환경하에서 작동되도록 개발된 NC 코드의 물리적인 오류 검증 시스템을 보여주고 있으며 공구궤적과 그때의 최대 절삭력을 도시하고 있다. Fig. 11은 주어진 NC코드로 가공할 때 절삭력이 100Kgf이내로 작용하도록 절삭속도와 이송속도를 조절한 후의 절삭력을 보여주고 있다.

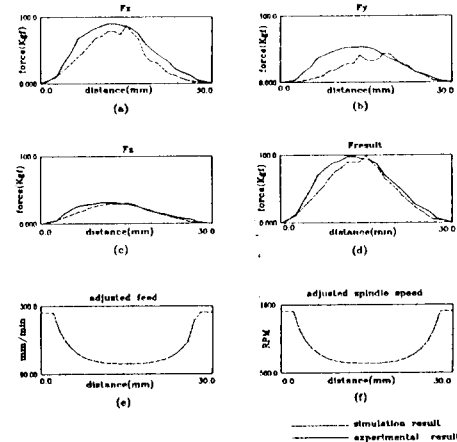


Fig.9 Cutting Forces for Simulation and Experiment

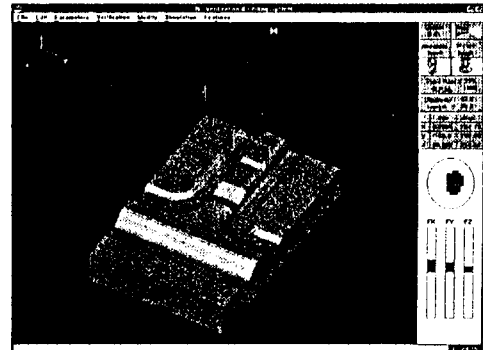


Fig.10 The CNC Tool Path Verification System

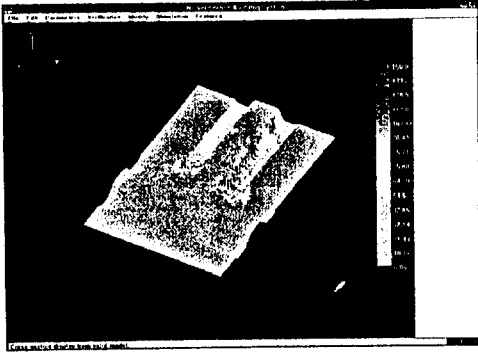


Fig.11 Force-map Generated Maximum Force Control

6. 결론

본 연구에서는 불 엔드밀의 절삭력 계산을 위해 제안된 절삭력 모델을 이용하여 엔드 밀링 및 불엔드 밀링의 절삭력을 효과적으로 구하는 알고리즘을 제안하였다. 기존의 알고리즘은 공구날을 미소요소로 나누어 계산하였기 때문에 많은 계산량이 필요하며 시스템화 하는데 많은 문제가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서 제시한 알고리즘의 정확성은 기존의 모델과 유사하면서 계산은 한층 줄임으로 인하여 시스템화하는데 기여할 수 있었다.

이러한 절삭력 모델은 절삭실험을 통하여 나타낸 것처럼 가공상황이 변하는 경우라도 계산된 값과 실험값이 잘 일치함을 볼 수 있었으며, 최대 절삭력 또는 가공오차 관점에서 이송속도를 조절할 수 있어 적절한 가공조건을 부여할 수 있었다. 이러한 정밀성과 효율성으로 인하여 NC공구제작의 물리적 검증시스템으로 발전이 가능하였고, NC 지원 CAM 시스템이나 CAD/CAM 시스템에서 절삭력을 계산하는데 매우 유용할 것이다.

참고문헌

- [1] Wang,W.P. 1988, "Solid Modeling for Optimizing Metal Removal of Three Dimensional End Milling ", J.of Mfg.Sys., Vol. 7, No. 1, pp.57~66
- [2] Kline,W.A., DeVor,R.E., Lindberg,J.R., 1982, " The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts", Int.J. Mach.Tool Des.Res., Vol.22, No.1, pp.7~22
- [3] 박희덕, 양민양, 1989, "불엔드밀에 의한 곡면가공의 절삭력 예측에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제

13 권, 제3호, pp.433~442

[4] Kline,W.A., DeVor,R.E., 1983, " The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling ", Int. J. of MTDR, Vol. 23, 1983, pp. 123~140

[5] Sutherland,T.W., DeVor,R.E., 1986, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling System", ASME, J.Eng.for Ind. , Vol. 108, Nov. pp.269~279

[6] 심충건, 양민양, " 유연 불 엔드밀에 의한 가공오차의 off-line 제어", 대한기계학회논문집, Vol. 16, No. 3, pp. 468~484., 1992

[7] Tlustý,J., Ismail,F., 1983, " Special Aspects of Chatter in Milling ", ASME, J. Vibration, Acoustics and Reliability in Design, Vol. 105, Jan. .pp. 24-32

[8] 김찬봉, 박세형, 양민양, 1993, "NC 파트프로그램의 검증 및 오류수정에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 제 17권, 제 5호, pp. 1074~1083

[9] Sehyung Park, Min-Yang Yang, Chong-won Lee "Determining the Cutting Conditions for the Sculptured Surface" Int. J. Advanced Manufacturing Technology, Vol.8, pp.61-70, 1993.