

커터 런 아웃과 가공표면 생성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Machined Surface due to Cutter Runout

황 준*, 이기용**, 신승준***, 정의식**

* 충주산업대학교, ** 대전산업대학교, *** 국방과학연구소

J. Hwang*, K.Y. Lee**, S.C. Shin***, E.S. Chung**

*(Chungju Nat'l Univ.), **(Taejon Nat'l Univ. of Polytecnic), ***(ADD)

ABSTRACT

This paper presents experimental results to know the characteristics of machined surface due to cutter runout. Cutter runout is a common but undesirable phenomenon in multi-tooth machining such as end-milling process because it introduces variable chip loading to insert which results in a accelerated tool wear, amplification of force variation and hence enlargement vibration amplitude.

To develop in-process cutter runout compensation system, set-up the micro-positioning mechanism which is based on piezoelectric translator embeded in the work holder to manipulate the depth of cut in real-time. And feasibility test of system was done under the various experimental cutting conditions. This results provide lots of information to build-up the precision machining technology.

Key words : Cutter runout, Chip-loading, Multi-tooth machining, Machined surface, Surface roughness, In-process cutter runout compensation system, Micro-positioning

1. 서 론

최근 전자, 기계, 자동차, 우주항공산업의 급격한 발전과 함께 초정밀부품의 설계 및 제작의 수요가 급증함에 따라, 각 기업들은 이에 걸맞는 초정밀 가공기의 도입을 경쟁적으로 서두르고 있다. 그러나, 이와같은 고가의 초정밀가공기 도입은 국내 공작기계업체의 대외 경쟁력을 약화시킬 뿐만 아니라, 고비용 원가와 경제적 손실을 초래하는 주요 원인이 되고 있어, 이에 대한 대응책 마련이 시급한 실정이다.

이러한 상황에 적극적으로 대처하기 위하여, 본 연구에서는 기존의 범용 및 수치제어 공작기계를 보다 고능률화, 고정도화하여 생산성을 극대화할 목적으로, 저비용으로 초정밀 부품의 가공을 실현할 수 있는 미세위치 정밀제어시스템을 개발하고자 한다.

본 연구에서는 밀링가공공정에서 가공품질향상에 절대적인 개선이 요구되는 커터 런아웃(cutter runout) 현상을 제거하기 위한 미세위치제어 시스

템 개발 및 적용에 목표를 두고, 1단계로 런아웃과 가공표면 생성 특성을 고찰하고자 한다.

밀링공정에서 발생하는 커터 런아웃 현상은 생산성 및 가공표면품질의 저하에 직접적인 영향을 미치며, 이는 공구에 주기적인 부하변동과 불균일한 하중분포를 야기시켜 공구마멸 및 파손을 가져와 공구의 수명을 단축시키고, 가공물표면에 런아웃 마-크라는 불균일 절삭날 자국을 남김으로서 제품의 요구 정밀도를 충족시키지 못하는 중요한 장애요인이 되고 있다 /1-2/.

현재, 이에 대한 해결책으로서, 생산현장에서는 일반적으로 정지한 스피들 주축의 정적보상, 즉 커터의 설치 및 작동시 편심이 발생하지 않도록 주의를 기울이는 등, 시행착오적인 방법이나, 고정도의 스피들 베어링을 사용하는 정도의 처방책을 마련하는 수준에 머무르고 있다. 그러나 실제의 가공프로세스는 고속, 고정밀도의 동적프로세스로서 스피들 회전시 상기의 정적성분과 함께 순간적인 절삭력 변화나 커터의 미세한 형상 불균일과 불균형, 불균일한 공구의 마멸진전 등, 소위 사전에

예측이 불가능한 요인들이 중첩되어 복잡한 양상의 커터 런아웃 현상이 발생하게 된다.

따라서, 이와같은 동적 런아웃 현상의 발생을 가공도중에 보상하거나 이를 제거할 목적으로 미세 위치 정밀제어방식을 이용한 인프로세스 정밀보상 시스템 (in-process precision compensation system) 의 개발은 제품의 생산성 극대화, 품질 향상, 그리고 기존의 범용 및 NC, CNC 공작기계, Machining Center 등의 가공기능에 유연성을 부여한다는 측면에서 매우 중요한 핵심연구과제로서, 이에 대한 연구의 필요성이 강조되고 있다.

2. 연구방법 및 실험장치 제작

밀링가공에서의 커터 런아웃 발생을 극소화하거나 이를 제거하기 위한 연구를 성공적으로 수행하기 위해서는, 먼저 런아웃 현상을 규명하기 위한 가공역학과 올바른 절삭현상의 파악이 필요하며, 보상 시스템의 제어를 위한 하드웨어의 구성 및 제어알고리즘의 개발, 신호 및 데이터처리의 방법, 그리고 런아웃 감시 및 제어시스템의 구축을 위한 연구가 중점적으로 수행되어야 한다.

커터 런아웃은 엔드-밀 공정과 같은 다인공구를 이용한 기계가공에서 자주 발생하는 대표적인 가공오류로서, Fig.1(a) 에 나타낸 바와같이, 절삭공구가 기하학적인 중심에서 벗어나 회전함으로써

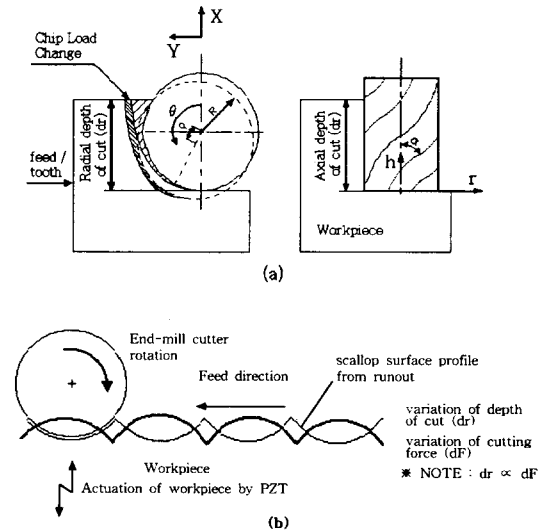


Fig.1 Schematic Diagram of the Cutter Runout Geometry(a) & Variation of Cutting Force with Chip Load Change(b)

절삭날 홈사이에 칩부하가 불균일하게 되어 가공 안정성의 저해로 인한 가공품질의 악화라는 치명적인 생산손실을 초래하게 된다.

본 연구에서는, 이와같은 런 아웃 발생에 대응하는 절삭력을 측정하고, 절삭력은 절삭깊이와의 비례관계가 있으므로, 절삭깊이의 제어, 즉 슬라이딩 테이블에 고정된 공작물을 미소변위제어하는 방법에 의해 런 아웃을 제거한다는 것에 착안하고 있으며(Fig.1(b)), 자동차 · 우주항공산업분야의 금형제작공정에서 많이 이용되고 있는 엔드-밀 기계가공을 대상으로, Fig.2에 나타낸 실험장치를 이용하여, 다음에서 기술하는 세부적인 연구방법에 의해 본 연구를 수행하고자 한다.

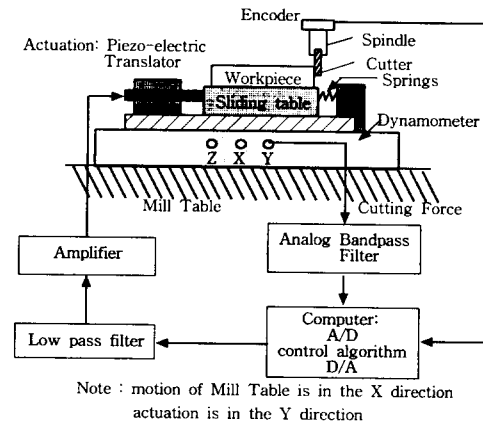


Fig.2 Schematic Diagram of Experimental Loop

커터 런아웃 보상을 위한 인프로세스 정밀보상 시스템의 하드웨어 구성은 Fig.2에 나타낸 바와 같이, CNC 밀링머신, 검출기구, 서보기구, 마이크로 프로세서 등으로 구성한다.

(1) 미세구동 서보기구 설계 및 제작

- 밀링 테이블에 공작물을 X-Y 방향으로 미소변위를 주기 위한 슬라이딩 테이블을 설계, 제작한다.
- 슬라이딩 테이블에 미소 변위를 주기 위한 압전형 변환기(piezo-electric translator)를 설치하고, 이를 고정하기 위한 jig를 설계, 제작한다.
- 공작물 지지용 슬라이딩 테이블은 X 방향으로 높은 강성을 갖으며, Y 방향으로 낮은 마찰운동을 할 수 있도록 한다.

- 런 아웃 보상시스템은 기본적으로 배분력 방향의 절삭깊이 제어를 수행하며, 이는 마이크로 프로세서에서 출력되는 전기적 신호로 제어되는 변환기의 미소위치결정 (micro positioning) 으로 이루어진다.

(2) 절삭력 / 주축 회전각 검출시스템 구성

- 공구동력계와 밀링주축단에 고정 설치한 엔코더를 이용하여, 절삭가공중에 엔드-밀 회전각에 따른 런 아웃량의 크기에 대응하는 절삭력을 검출한다.
- 엔코더에서 발생하는 펄스는 회전각당의 절삭력 검출과 런 아웃 오차보상을 위해 슬라이딩 테이블에 전달되는 미세위치결정 동작신호를 동기화 시키는데 사용된다.

(3) 가공공정 감시 및 제어시스템 구성

- Fig.3은 절삭력 피이드백 제어시스템의 블록 선도를 나타낸 것으로서, 절삭력의 샘플링은 엔코더를 사용하여 시간영역(time domain)이 아닌 회전각 영역(angle domain)에서 이루어지며, 이는 스피들 런 아웃에 기인하는 절삭력 변화를 정확하게 검출하고, 외란주기에 대한 정확한 정보를 얻기위함이다.
- 마이크로 프로세서에서는 검출된 엔드-밀 회전각당의 런 아웃량과 이에 대응하는 절삭력 신호를 기준입력과 비교하고, 제어 알고리즘을 이용하여 공정중 오차보상 제어

신호, 즉, 구성된 인프로세스 정밀보상시스템 (in-process precision compensation system) 에 의해 출력된 제어신호를 슬라이딩 테이블에 고정 설치한 압전소자변환기 (piezo - electric translator)로 송출하여 제어함으로써, 커터 런아웃을 보상토록 한다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 엔드-밀 가공에 있어서 런아웃 발생에 따른 가공표면 생성과 절삭력과의 관계를 고찰함으로써 향후, 인프로세스 보상에 필요한 기초자료를 확보코자 본 실험을 실시하였다.

특히, 가공중 런아웃의 변화를 감시하고, 제어하기 위한 절삭력 신호특성과 절삭력보상을 위해 제작,설치한 액츄에이터(actuator)의 성능을 중심으로 검토하였다.

Fig.4에는 런아웃이 없는 정상가공일때와 런아웃이 존재하는 가공일때의 절삭력 변동특성을 각각 나타내었다. 이때, 가공조건은 다음과 같다.

Table 1 Experimental cutting conditions

cutting variables	conditions
Radial depth of cut(dr)	0.1, 1.0 (mm)
Axial depth of cut(da)	3.0, 15.0 (mm)
Cutting speed	300, 420rpm
Feed rate	35,50,70,76,85 (mm/min)
Material	Aluminum alloy Polyethylene
end-mill(∅10)	4-flute

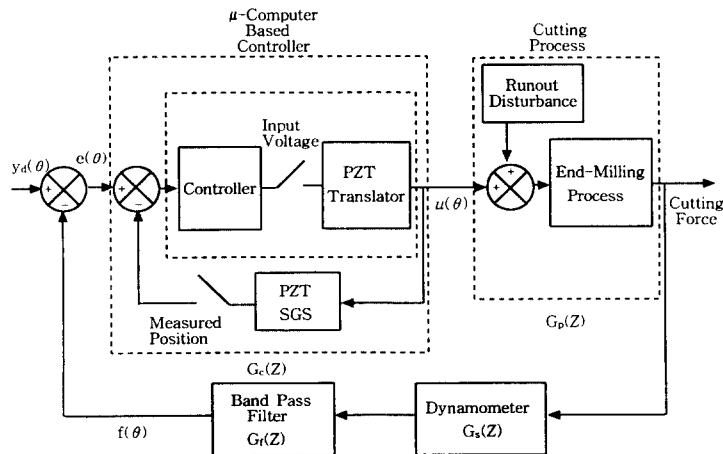
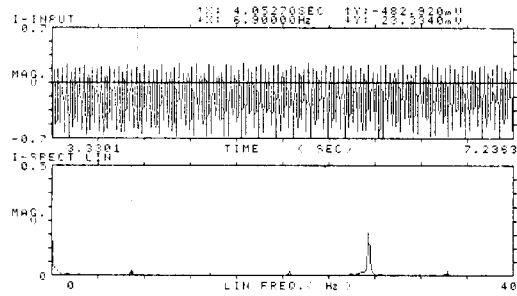


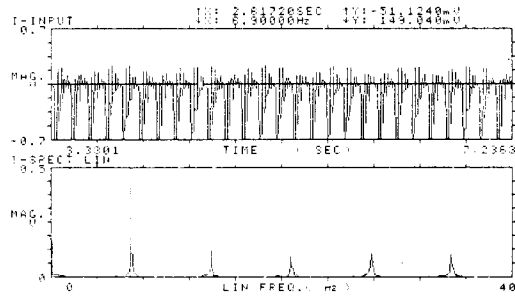
Fig.3 Block Diagram of Cutter Runout Compensation System

Fig.4에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭가공중 측정된 절삭력의 주파수 분석결과, 주축의 회전 주파수(rotating frequency)와 엔드-밀 날수에 비례하는 절삭력 특성성분이 나타나고 있으며, 특히 커터 런아웃이 발생한 가공에서는 회전주파수에 해당하는 첫 번째 하모닉이 급증하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 여러 가지 주축회전수와 이송률의 변화에서도 동일한 특성을 발견할 수 있었다.

따라서, 향후 커터 런아웃의 발생에 따른 절삭력 적응제어에 있어서 주축회전수에 비례하는 절삭력 주파수 성분의 감시와 제어에 의해 인프로세스 가공오차 보상이 가능하다고 판단된다.



(a) No Cutter Runout



(b) Cutter Runout

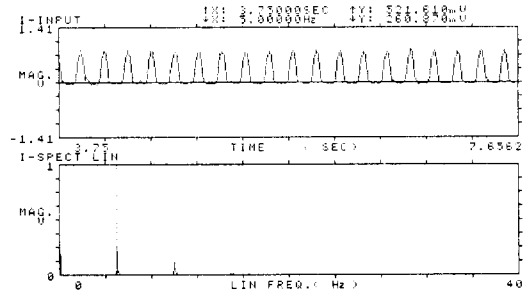
Fig.4 Comparison of Cutting Force Variation with respect to Cutter Runout

Fig.5(a)에는 먼저, 커터 런아웃의 발생유무에 따른 가공표면 거칠기(surface roughness) 차이를 측정된 결과를 나타내었으며, 또한 Fig.5(b)에는 인프로세스 절삭력 적응제어를 통한 커터 런아웃 오차보상에 관한 유용성 실험으로, Fig.4에서 확인한 바와 같이 절삭력에 포함되어 있는 특정 회전

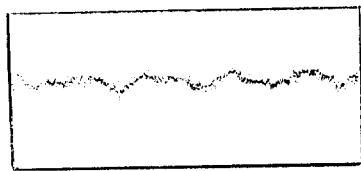
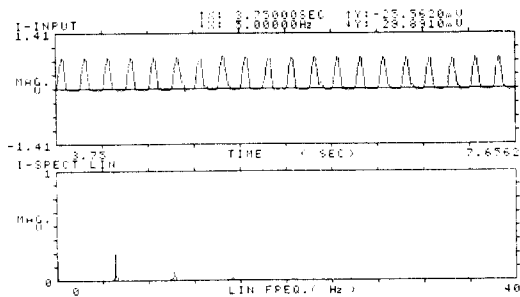
주파수의 1, 2, 4배수 만큼의 신호를 액추에이터를 이용하여 슬라이딩 테이블에 미소변위를 인가했을 경우의 절삭력 거동과 가공표면 생성과의 관계를 고찰하였다.

그림에서 알 수 있는 바와같이, 커터 런아웃이 발생한 엔드밀 가공에서의 표면거칠기 결과는 정상가공에 비하여 R_{max} 의 증가와 함께 중간중간에 돌출적인 거칠기 분포가 존재하고 있음을 알 수 있으며, 이러한 가공표면을 갖는 가공물을 정밀 부품으로 사용할시에는 접촉마찰부의 이상마모등이 예상된다. 또한, 특정회전주파수의 1, 2, 4배수만큼의 신호를 액추에이터를 이용하여 슬라이딩테이블에 미소변위를 인가했을 경우의 가공표면 거칠기의 측정결과에서 알 수 있듯이 회전주파수의 첫째 하모닉은 엔드밀의 첫번째 커터가 공작물과 닿는 주기와 같으며, 이 성분의 배수로 증가하는 미소 변위신호를 인가한 결과 각 부분별 R_{max} 는 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 가공면의 평활도(waviness)가 증가하는 결과를 얻었으며, 이는 유사 주파수에 의한 비트현상(beatting phenomena)에 기인한 것으로 판단된다.

따라서, 가공중 측정된 절삭력에 대응하는 미소 변위와 주축회전주파수 또는 그 배수에 대응하는 주기로 슬라이딩 테이블에 미소변위를 인가하면, 커터 런아웃에 의해 발생하는 가공오차를 인프로세스 상태에서 보상할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Cutter Runout



(b) Rotating Frequency

Fig.5 Comparison of Micro Positioning Feasibility with respect to Rotating Frequency and its Surface Roughness

4. 결 론

- 1) 커터 런아웃은 절삭깊이의 변화에 기인한 칩-하중변화(chip-load variation)를 야기시켜 절삭력의 변동과 이로 인한 가공표면 품질에 악영향을 미치고 있음을 확인하였다.
- 2) 엔드-밀 가공중 발생하는 커터 런아웃은 주축 회전 주파수와 엔드-밀 날수에 비례하는 특정 절삭력 성분을 감시함으로써 그 발생과 가공표면정도를 예측할 수 있다.
- 3) 커터 런아웃을 고려한 엔드밀 공정의 절삭력 적응제어에 있어서 주축회전수에 비례하는 절삭력 주파수 성분의 감시와 제어에 의해 인프로세스의 오차보상이 가능하다.

참고문헌

- 1) Sutherland, J. W., and Babin, T. S., 1988, "The Geometry of Surfaces Generated by the Bottom of and End Mill," Proceedings of 16th North American Manufacturing Research Conference, pp. 202-208.
- 2) Gu, F., Kapoor, S. G., Devor, R. E., and

Bandyopadhyay, P., 1991, "An Approach to On-Line Cutter Runout Estimation in Face Milling," Trans. of the North America Manufacturing Research Institute of SME, pp. 240-247.

- 3) Bifano, T. G., and Dow, T. A., 1985, "Real Time Control of Spindle Runout," Optical Engineering, Vol. 24, No. 5, October, pp. 888-892.
- 4) Francis, B. A., and Wonham, W. M., 1975, "The Internal Model Principle for Linear Multi-variable Regulators," Appl. Math. Opt., Vol. 2, pp.170-194.
- 5) Tomizuka, M., Tsao, T., Chew, K., 1989, "Analysis and Synthesis of Discrete Time Repetitive Controllers," ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol. 111, pp.353-358.
- 6) Liang, S. Y., Horng, M. C., and Liu, M., 1989, "Runout Compensation in Peripheral Milling Using Repetitive Control," Proc. of Symposium on Advances in Manufacturing System Engineering, ASME Winter Annual Meeting, San Francisco, CA, December, pp.77-87.
- 7) Tsao, T. C., Burke, J., Burke, B., and Ferreira, P. M., 1989, "Control of Radial Runout in Face Milling," Proc. of Symposium on Control Issues in Manufacturing Processes: Controlling Manufacturing Processes, ASME Winter Annual Meeting of ASME, San Francisco, CA, December, pp. 99-105.