

볼엔드밀 고속가공에서 곡면형상에 따른 절삭속도 일정제어기법 가공기술

김경균* · 문성준* · 강명창** · 이득우** · 김정석**

The Machining Technique of Curved Surface through Constant Control of Cutting Speed Method in Ball End Milling

K. K. Kim*, S. J. Moon*(Graduate School, Pusan National Univ)

M. C. Kang**, D. W. Lee**, J. S. Kim**(ERC/NSDM, Pusan National Univ)

Key Words: High Speed Machining(고속가공), Connecting Rod Die(커넥팅 로드), Constant Control of Cutting Speed(절삭속도 일정제어), Free Form Surface(자유곡면)

Abstract

The purpose of this study is to suggest the machining technique of the constant control of cutting speed in order to improve precision machining and tool life in high speed machining using ball end mill. Cutting speed is changed in machining free form surface like free form surface. So, we don't have supreme surface form and toll life on machining. The way to solving this problem is that we should be settled to optimal cutting speed in free form surface machining. And, to improve precision machining is executed high speed machining method to output optimum NC data with developed constant control of cutting speed program after modeling of CAD/CAM. In this paper, a comparison was made of the cutting precision and tool life in conventional cutting and those in free form surface machining applying the program developed.

1. 서 론

산업의 발달로 항공산업, 자동차 산업, 금형산업 등에서 내구성과 내마멸성이 뛰어난 고경도 재료가 주류를 이루면서 정삭에 의한 고정밀도의 가공을 행하고, 마무리 공정을 불필요하게 만들 수 있는 고속가공이 보다 많이 대두되고 있다.

현재의 고속가공은 금형강등 고경도재에의 적용이 이루어지고 있고, 고능률, 고정도의 가공을 실현한다는 측면에서 그 효용가치가 매우 높으며 현재 가장 연구가 활발히 진행되고 있는 가공기술중의 하나이다.^(1,2) 특히 볼록한 곡면과 오목한

곡면이 복합적으로 조합된 자유곡면형상의 제품이 많이 요구되고 있는데, 이러한 자유곡면형상은 대부분 CNC 머시닝센터에서 볼 엔드밀 가공에 의해 만들어진다.

이러한 고속가공시에도 절삭속도에 따라서 제품의 생산성과 정밀도에 많은 영향을 미친다.^(3,4) 볼 엔드밀 공구는 선단부분이 반구형으로 공구의 강성이 떨어지고 가공면에 커스프(Cusp)가 발생하여 다듬질 공정을 필요로 하므로, 이와 같은 공정시간을 줄이는데 곧 금형 산업에서 경쟁력을 향상시킨다고 할 수 있다. 그러나 3차원 자유곡면은 피삭재의 경사각과 볼 엔드밀의 접촉 부위에 따라 절삭특성의 변화가 심하게 일어나며, 같은 경사면에서도 공구경로에 따라 공구에 작용하는 절삭작용점의 변화로 가공면에 커스프(Cusp)가 다르게 생성되어 표면형상도 서로 다르다. 그리고 볼 엔드밀은 공구의 기하학적 형상특

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계공학부, ERC/NSDM

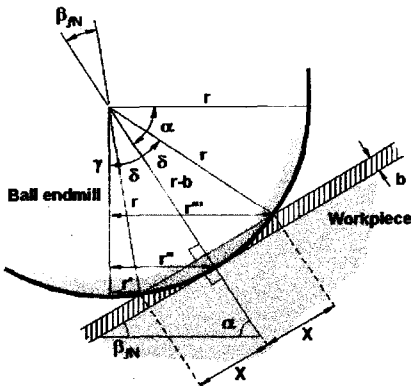
정으로 동일한 주축회전수에서도 절삭속도가 변화한다. 이러한 절삭속도의 변화는 공구의 수명 단축 및 제품의 가공정밀도에 많은 영향을 미친다.⁽⁵⁾

따라서 본 논문에서는 고속가공을 통해 절삭속도 일정제어(Constant Control of Cutting Speed, CCCS)기법으로 블록형상과 오목형상의 자유곡면에 적용하고자 한다. 그리고 주축 회전수의 변화에 따른 절삭속도 일정제어 기법으로 열간 금형재(STD61)인 고경도(HRC52) 소재를 고속가공함으로써 일정한 절삭속도와 공구경로에 따른 절삭력, 표면형상, 가변되는 주축회전수의 오차율, 공구마멸, 칩 형상을 토대로 절삭특성을 파악하고, 개발된 프로그램으로 최적화된 NC데이터로 가공함으로써 절삭속도 일정제어 기법의 타당성을 보이고자 한다.

2. 절삭속도 일정제어 메커니즘

2.1 절삭속도 일정제어 기법

볼 엔드밀 공구의 실제 공구 유효직경에 따라 동일한 주축회전수에서도 절삭속도가 변화하게 된다. 절삭속도가 변화하게 되면 공구와 공작물의 상대운동 차이에 의해 공구수명 및 가공정밀도가 저하된다. 볼 엔드밀 가공에서 공구와 공작물 기울기 변화에 따른 실제 공구 유효직경을 구하는 방법을 Fig. 1에 나타내었다. 블록형상과 오목형상이 복합적으로 조합된 자유곡면에서 식 (4)와 같이 절삭속도를 일정제어하기 위해서는 실제 공구 유효직경(D)을 구하여 공구 유효직경에 따라서 주축 회전수(N)를 변화시키는 것이 필요하다.



β_{FN} : tilt angle

b : normal depth of cut

r' : axial maximum effective radial

r'' : axial minimum effective radial

Fig. 1 Effective diameters of ball end mill according to title angle

$$r' = r \sin \left[\beta_{FN} - \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{r}{r-b} \right)^2 - 1} \right] \quad (1)$$

$$r'' = r \sin \beta_{FN} \quad (2)$$

$$r''' = r \sin \left[\beta_{FN} + \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{r^2 - (r-b)^2}}{r} \right) \right] \quad (3)$$

$$V = \frac{\pi DN}{1000} \quad (4)$$

2.2 알고리즘 및 프로그램 구성

절삭속도 일정제어 기법의 알고리즘을 Fig. 2에 나타내었다. 기존의 CAD/CAM에서 생성된 원시 NC 코드를 역 후처리(Reverse Post Process) 과정을 통하여 가공할 영역을 선정 한 뒤 프로그램의 Z-map 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 행한다. 그리하여 공구의 절삭영역을 설정한 뒤 실제 공구 유효직경을 계산하고, 실제 공구 유효직경에 따라 주축회전수를 가변 시키는 NC 코드로 수정한다. 일반적으로 NC 코드 출력은 모델링 후 CL 데이터를 생성한 뒤 NC 코드를 산출하기 위해 후처리(Post Process) 과정을 거친다. 하지만, 절삭속도 일정제어를 하기 위해서는 그와 반대로 기존의 NC 코드에서 CL 데이터로 변환하여 공구 위치점을 찾는 과정이 필요하다. 이러한 과정을 역 후처리과정이라 한다.

위의 과정을 토대로 블록한 형상과 오목한 형상을 개발되어진 절삭속도 일정제어 프로그램을 통하여 시뮬레이션 한 것을 Fig. 3에 나타내었다. 이 프로그램에는 NC 데이터의 블록 처리상태를 실시간에서 감시 할 수 있는 기능과 공구의 직경, 공작물의 좌표, Z-map의 간격설정, 주축 회전수의 가변되는 상태, 권장 절삭속도뿐만 아니라 NC 데이터에서 시뮬레이션된 형상의 특정 구간을 볼 수 있도록 블록의 번호를 알 수 있다. 그리고 현재 가공중인 NC데이터를 볼 수 있는 창

에서 임의의 블록을 지정하면, 화면창에서 작업자가 선택한 블록의 현재 가공위치를 파악할 수 있는 기능까지 설정하였다. CAD/CAM 소프트웨어인 유니그래픽스에서 원조적인 CL(Cutting Location) 데이터를 산출한 뒤 절삭속도 일정제어 프로그램에서 공구의 직경, 공작물의 좌표, 권장 절삭속도와 같은 옵션들을 설정한다. 그리고 프로그램을 구동시키면, 주축 회전수의 가변량에 따른 최적의 NC 데이터가 산출된다.

절삭속도 일정제어 프로그램의 특징은 빠른 데이터 처리속도와 Open GL기능을 부가한 깨끗한 화면을 제공하고, 작업자가 원하는 View Point를 전 방향에서 관찰할 수 있도록 설정하였다. 본 연구에서 개발한 이 프로그램은 사용자가 작업 환경과 조건에 알맞게 작업할 수 있도록 구성하였다.

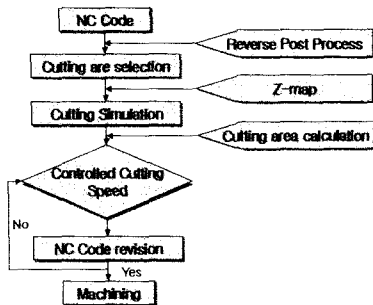


Fig. 2 Program algorithm

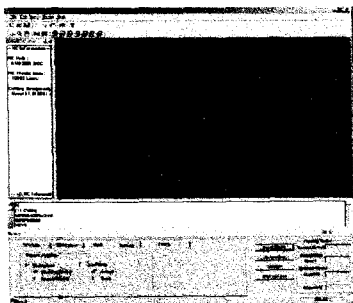
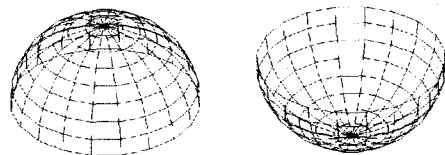


Fig. 3 Constant control of cutting speed program

2.3 실험 방법

본 실험에서는 유니그래픽스를 이용하여 볼록 형상과 오목한 형상을 Fig. 4와 같이 모델링 하고, CAM Tool에서 생성된 NC 데이터를 산출한 후 Fig. 4에서 보여준 프로그램을 실행시켜 최적

화된 NC 데이터를 산출한다. 그리고 절삭속도 일정제어를 한 형상과 하지 않은 것파를 비교 실험하였다. 공작기계는 최대 20,000rpm 까지 회전속도가 가능한 수직형 고속가공기(MAKINO V55)를 사용하였고, 실험조건은 Table 1과 같다. 여기서 날당 이송량은 가변되는 회전수에 따라서 변화되는 것을 알 수 있다. Fig. 5에서 본 실험의 실험장치도를 보듯이, 공구 동력계(Kistler 9257B)로 획득한 절삭력은 디지털 오실로스코프로 통해 획득하였고, 신호의 획득은 절삭속도 일정제어기법을 도입한 한 것과 하지 않은 피삭재에서 같은 절삭구간을 파악하여 실험하였다. 그리고 공구마멸과 칩 형상은 CCD 카메라를 사용하여 측정하였고, 표면형상은 디지털 카메라를 사용하여 비교



(a) Convex (b) Concave

Fig. 4 Modeling of surface form

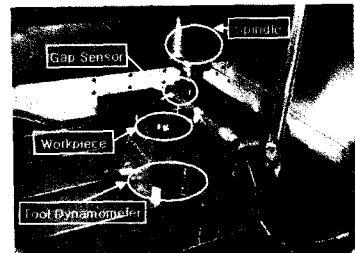


Fig. 5 Experimental setup for measuring cutting force and run-out

Table 1 Machining condition

	General Machining	CCCS
Workpiece	STD61(HRc52)	
Spindle revolution(rpm)	12,000	6,000~12,000
Feed rate(mm/min)	1,500	1,500
Depth of cut(mm)	0.15	0.15
Pick feed(mm/min)	0.3	0.3
Feed per tooth(mm)	0.06	Variable
Tool(OSG, Coating TiAlN)	φ 6, 2 teeth	

촬영하였다. 마지막으로 볼록한 형상과 오목한 형상의 차이에 따른 오차율을 설정함으로써 최적의 절삭조건을 선정한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 절삭력 파형 비교 특성

절삭력을 파악하는 것은 공구와 피삭재와의 가공특성을 파악하기 위해서는 아주 중요한 측정인자이다.⁽⁵⁻⁸⁾ Fig. 6과 Fig. 7은 종래 가공법으로 획득한 신호와 절삭속도 일정제어 기법으로 볼록 형상과 오목형상의 절삭력 파형을 똑같은 구간에서 50초간 신호를 획득하였다. 그리고 절삭속도 일정제어를 한 것은 주축 회전수의 오차율을 각각 주었다. 여기서 오차율이란 절삭속도 일정제어의 권장 주축회전수에서 10~30% 정도의 가변 범위량을 주는 것을 말한다. 오차율을 적당한 크기만큼 주는 이유는 오차율이 너무 크면 NC 데이터의 주축 회전코드 부분이 컴퓨터가 처리하는데 너무 오래 걸릴 정도로 데이터 량이 많아지고, 오차율을 너무 작으면 종래 가공법과 차이가 별로 없기 때문에 우수한 표면형상을 얻을 수가 없기 때문이다. 그리고 절삭속도 일정제어 한 것에서는 오차율을 각각 10~30%(step 5%)정도를 주어 그 파형을 비교 하였다. 그 결과, 일반적인 가공법(a)에서는 큰 절삭력이 걸려 파형의 진폭이 절삭속도 일정제어를 한 것보다 높게 나타났다. 그리고 볼록 형상에서 절삭속도 일정제어를 한 것에서는 오차율을 10~30%를 준 것 모두가 일반적인 가공법보다 안정적인 경향이 나타났고, 그 중에서 오차율을 30%주었을 때가 가장 우수한 경향이 나타났다. 그와 반대로 오목 형상에서는 Fig. 7과 같이 오차율이 10% 주었을 때가 가장 우수한 경향을 보였다. 이를 볼 때 일반적인 가공법보다 절삭속도 일정제어 기법으로 가공한 것이 더 우수한 경향이 나타난 것을 알 수 있고, 절삭속도 일정제어를 한 것 중에서도 볼록 형상에서는 오차율을 30%주었을 때가 가장 좋은 경향이 나타났고, 오목 형상에서는 오차율 10%일 때가 가장 안정적으로 나타났다.

이를 볼 때 오차율 설정은 볼록 형상 일때는 오차율을 높게 주고, 오목 형상 일때는 오차율을 낮게 설정하여 프로그램을 구동하는 것이 가공성이 우수하다.

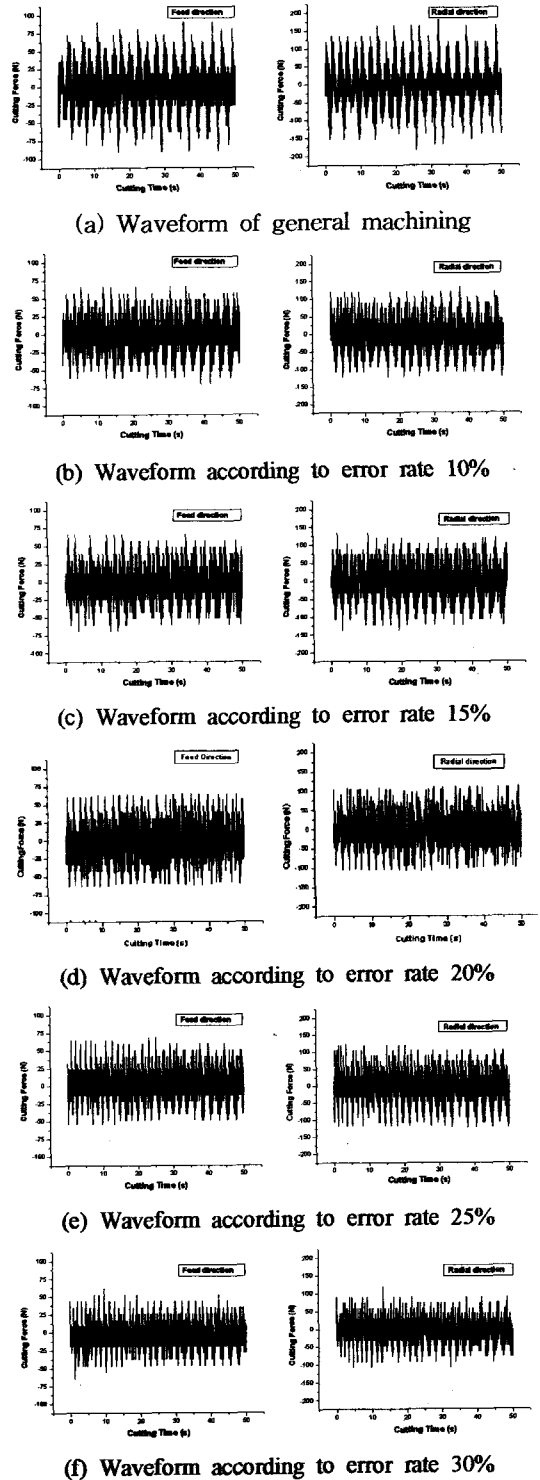


Fig. 6 Waveform of cutting force in convex form

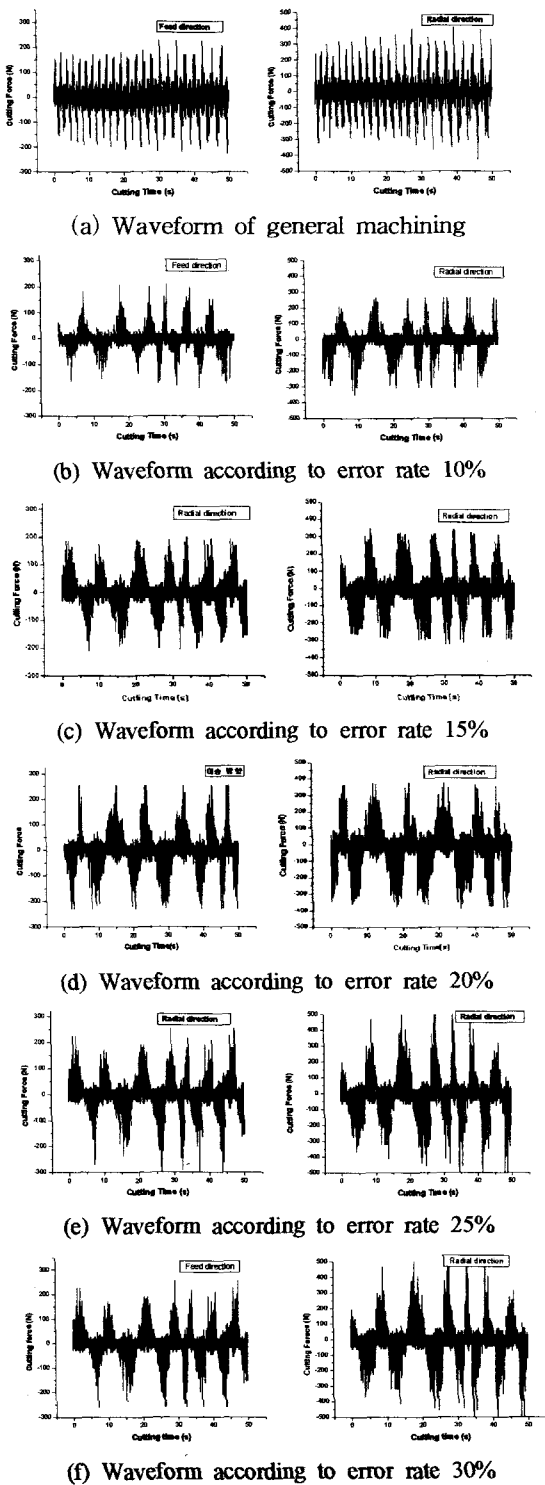
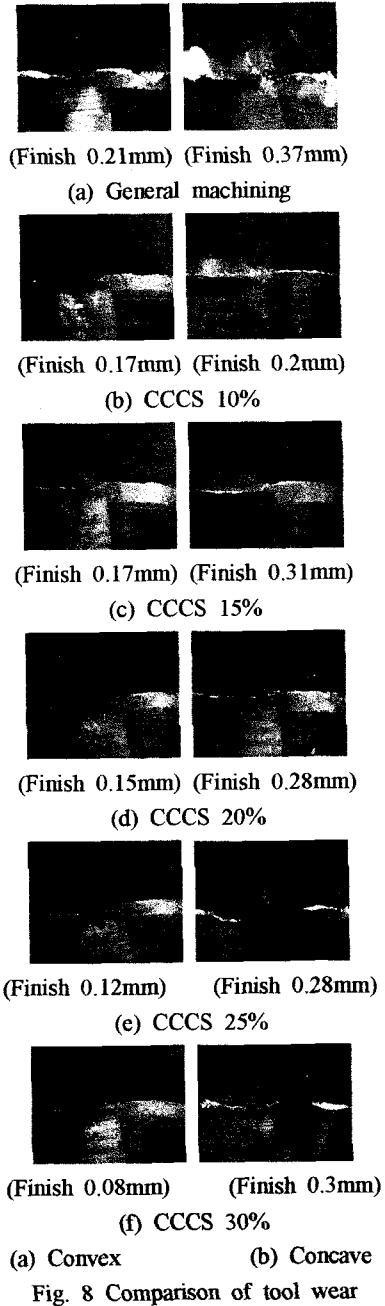


Fig. 7 Waveform of cutting force in concave form

3.2 오차율 변화에 따른 가공 특성

3.2.1 공구마멸 비교 특성

Fig. 8에 나타낸 바와 같이 곡면 형상과 오차율 변화에 따라서 공구마멸에도 많은 영향을 미쳤다. 볼록한 형상에서는 오차율이 클수록 공구수명에 우수한 효과를 얻을 수 있다. 그리고 절삭 속도 일정 제어 기법으로 가공한 것이 종래 가공법



(a) Convex (b) Concave
Fig. 8 Comparison of tool wear

보다 공구수명이 30% 향상 되었다. 그러나 오목한 형상에서는 블록형상과 반대로 오차율의 변화를 적게 주는 것이 우수한 경향을 보였다. 오목형상 또한 종래 가공법보다 공구수명이 15% 향상 되었다.

3.2.2 표면형상 비교 특성

표면형상 또한 곡면 형상과 오차율의 변화에 따라서 많은 차이가 있었다. Fig. 9에서는 블록형상에서 Fig. 10에서는 오목한 형상에서 각 부위별로 표면형상을 측정하였다. 종래 가공법과 절삭속도 일정제어 기법으로 가공한 표면을 비교하면 절삭속도 일정제어 기법으로 가공한 표면이 훨씬 우수한 표면을 얻을 수 있었다. 그리고 오차율의 변화량을 많이 줄수록 우수한 표면정도를 얻을 수 있었다. Fig. 9-(e)를 보면 오차율 10%, 20%를 준 것 보다 깨끗하면서 일정한 형태의 표면인 것을 알 수 있다.

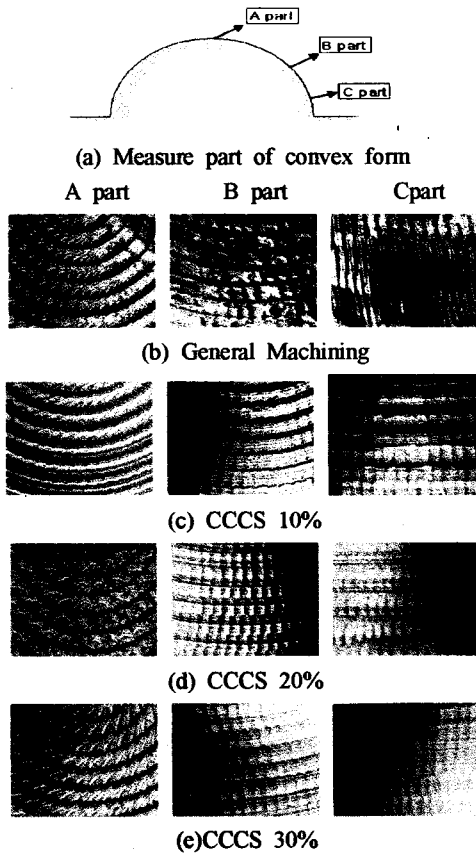


Fig. 9 Comparison of convex surface form

Fig. 10에서는 오목한 형상에서 각 부위에 따른 표면형상을 측정하였다. 그리고 표면형상을 촬영하는데 있어서 오목한 형상이라는 특징 때문에 100배 확대 촬영하였다. 여기서는 공작물과 공구와의 접촉면적이 블록한 형상보다는 크기 때문에 절삭부하가 많이 발생하여 Fig. 9보다는 우수한 표면을 획득할 수가 없었다. 그러나 종래 가공법보다는 절삭속도 일정제어 기법으로 가공한 것이 우수한 표면형상을 얻었다. 오목한 형상에서는 블록한 형과는 반대로 오차율 값을 적은 값, 즉 오차율 10%주었을 때가 가장 우수한 표면형상을 얻었다.

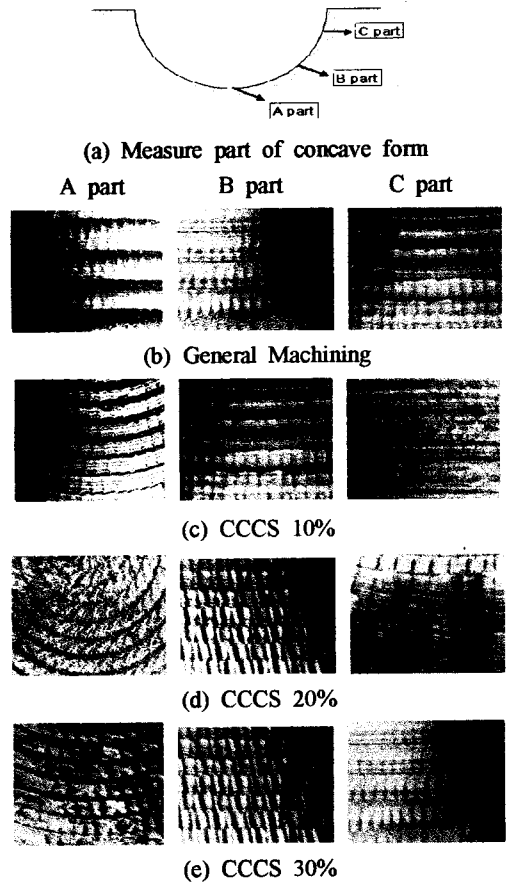


Fig. 10 Comparison of concave surface form

4. 결론

절삭속도 일정제어 기법으로 열간 금형제인 고경도 금형(STD61, HRc 52)을 가공함으로써 다음

경도 금형(STD61, HRc 52)을 가공함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다. 절삭속도 일정제어 기법으로 가공한 것이 절삭력이 안정적이다. 이러한 안정적인 절삭력을 통하여 표면형상 뿐만 아니라 공구수명도 15~30%정도 향상되었다. 또한 주축회전수의 가변 범위량을 볼록 형상 일때는 높은 오차율을 설정하고, 오목 형상 일때는 낮은 오차율을 설정하는 것이 가공성이 우수하다.

볼록한 형상에서는 오차율을 30%주었을 때가 표면형상이 가장 우수하였고, 공구수명은 30%향상되었다. 그리고 오목한 형상에서는 오차율을 볼록한 형상과 반대로 오차율 10%주었을 때가 가장 우수한 표면형상을 얻을 수 있었고, 공구수명은 15% 향상 되었다.

후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원금 및 기계공학부 장학지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) J. Tlusty, S. Smith, 1997, " Current Trends in High-Speed Machining" Journal of Manufacturing Science and Engineering ASME, Vol. 119, pp. 664-666
- (2) Shut, H., 1995, "High Speed Machining of Dies and Moulds-Cutting Condition and Technology", CIRP, Vol.44
- (3) Ikeda, T., 1995, "고속·高精度切削을ために工
作機械と狙加工技術", 形技術 세미나
- (4) Smith S. and Tlusty J., 1997, "Current Trends in High Speed Machining," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 119, pp. 664~666
- (5) Tae Jo Ko, Hee Sool Kim, 1999, "Mechanistic Cutting Force Model in band sawing" International Journal of Machine Tool & Manufacture Vol. 39, pp. 1185-1197
- (6) 1998, '98 NC 공작기계 기술세미나', 한국기계 연구원
- (7) Lee, P., Altintas, Y., 1996, "Prediction of ball end milling force from orthogonal cutting data", Journal of MTM, Vol. 36, No. 9, pp.1059~1072
- (8) Seo Tae Il, 1999, "Tool Trajectory Generation Base on Tool Deflection in the Flat-End Milling Process," KSME International Journal, Vol. 13, No. 12, pp. 918~930
- (9) Feng, H. Y. and Menq, C. H., 1996, "A Flexible Ball End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118 pp.461 - 469
- (10) Liu, C. R. and Barash, M. M., 1976, "The Mechanical State of the Sublayer of a Surface Generated by Chip-Removal Process," Part 2; Cutting with a Tool With Flank Wear. Journal of Engineering for Industry, pp. 203 - 1208