

곡면 다듬질용 유연공구 개발

조성산*, 유용균**, 이승영**

Development of Flexible Tool for Curved Surface Finishing

Sung-San Cho*, Yong Kyoon Ryu**, and Seung Young Lee**

ABSTRACT

A flexible tool is developed for automatic finishing of curved surfaces without any complicated control technique on three-axes machining center. The tool is made of thermosetting polyurethane elastomer on the surface of which aluminum oxide abrasives are mounted. Performance and durability of the tool are examined by finishing ball-end milled surfaces of high-alloyed tool steel. It is demonstrated that the tool removes cusp successfully without changing overall surface shape in relatively short time.

Key Words : Finishing (다듬질), Curved surface (곡면), Flexible tool (유연공구), Abrasive (경질입자)

1. 서론

고정밀 자유곡면으로 구성된 성형품을 제작하기 위해서는 형상정밀도 및 표면거칠기가 우수한 금형이 필요하다. 금형은 일반적으로 볼엔드밀이나 방전가공으로 제작한 후 표면거칠기를 향상시키기 위해 수작업 다듬질을 수행한다. 수작업 다듬질은 작업속도가 느리고 가공면의 정밀도 및 거칠기가 작업자의 기능 및 숙련도에 크게 좌우된다. 따라서, 품질이 균일하면서 정밀도가 우수한 금형을 효율적으로 제작하기 위해서는 다듬질 작업의 자동화가 필요하다.

곡면 다듬질을 자동화하기 위한 기존의 연구는 주로 연삭숫돌을 공구로 사용하면서 사람의 기능을 로봇으로 대체하는 방향으로 진행되었다^(1~5). 이 방법은 로봇 사용에 따른 작업효율의 증대를 기대할 수 있으나, 강성이 큰 숫돌의 형상이 가공

면에 전사되므로 곡면을 생성하는데 한계가 있다. 또한, 가공면의 형상에 따라 숫돌의 상대적 위치를 조정하기 위해서 복잡한 제어기법이 필요하다. 이 외에 숫돌 표면에 작용하는 압력을 균일하게 유지하여 작업의 성능 및 균일성을 개선하려는 가공기구 측면의 연구⁽⁶⁾와 PVA 에 피혁을 부착한 공구를 사용하여 숫돌을 사용했을 때보다 우수한 표면을 얻으려는 공구개발 측면의 연구⁽⁷⁾ 등이 있다. 그러나, 곡면을 자동으로 다듬질하는 만족할 만한 방법의 개발은 아직 미흡한 상황이다.

본 연구에서는 복잡한 제어기법을 사용하지 않고 3축 머시닝센터에서 곡면을 효율적으로 다듬질할 수 있는 공구를 개발하였다. 가공면의 형상에 순응하여 공구가 변형되면서 표면 요철을 제거하기 위해 유연성이 우수한 재료 표면에 경질입자를 부착한 일종의 유연공구를 개발하였다. 볼엔드밀로 가공된 면을 유연공구로 다듬질하면서 공

* 홍익대학교 기계공학과

** 홍익대학교 대학원 기계공학과

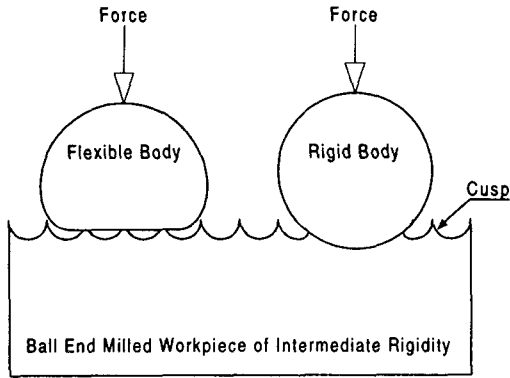


Fig. 1 Contact between bodies of different rigidity

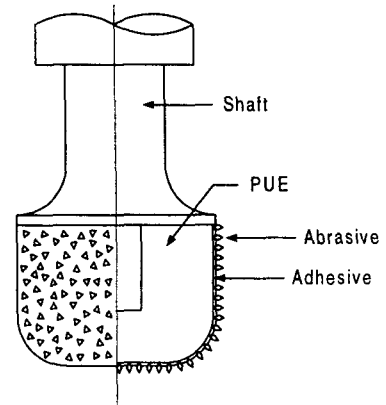


Fig. 2 Structure of flexible tool

구의 성능과 내구성을 검증하였다.

2. 유연공구의 설계 및 제작

2.1 유연공구의 개념

Fig. 1 은 원통형의 유연체 및 강체가 수직하중 하에서 블엔드밀로 가공된 평면과 접촉하고 있는 상태를 상징적으로 보여준다. 유연체와 평면의 접촉에서는 주로 유연체가 변형되며 실접촉은 평면상의 돌출부와 유연체 사이에서 발생한다. 강체와 평면의 접촉에서는 평면의 형상이 강체의 형상에 순응하여 변형되며 실접촉은 평면상의 돌출부와 골부 모두에서 발생한다. 평면과 접촉하는 원통형 물체를 다듬질 공구라 가정할 때, 유연체 공구는 평면의 형상을 유지하면서 돌출부만을 제거하지만, 강체 공구는 공구와 간섭을 일으키는 평면의 소재를 모두 제거하므로 다듬질 후에 강체의 형상이 평면에 전사된다. 따라서, 공구의 유연성이 적절하면 가공면 형상을 유지하면서 표면 요철만을 효과적으로 제거하는 것이 가능하다.

2.2 유연공구의 설계

Fig. 2 는 유연체 접촉특성을 이용한 곡면 다듬질용 유연공구의 형상 및 구조를 보여준다. 공구의 형상은 하단 모서리를 원호로 처리한 축대칭 원통형이다. 공구의 대칭축에 있는 사각구멍에 축을 삽입하고 너트로 체결하여 공구를 축에 고정시

킨다. 축은 공구에 회전동력을 전달하는 기능과 공구가 가공물과 접촉할 때 반경방향 하중을 지지하는 기능을 수행한다. 공구의 상단부와 접촉하는 축 중간의 턱은 공구에 작용하는 축방향 하중을 지지한다. 유연공구의 절삭성능은 접촉하중에 비례한다. 공구와 가공면의 간섭깊이(공구/가공면 초기 접촉점에서 가공면에 수직인 방향의 공구 이송 거리를 일정하게 유지할 때 공구 표면에서 삽입 축과 축 중간 턱까지의 거리를 조절하면 반경방향 및 축 방향 접촉하중을 조절할 수 있다.

공구는 Shore Durometer Hardness A Scale 50 의 열경화성 폴리우레탄 일레스토머(이하 PUE) 표면에 입도 60 혹은 120 의 산화알루미늄 미세분말을 에폭시 수지와 폴리아미드 수지의 혼합물로 접착한 구조로 설계하였다. PUE 의 경도를 조절하면 공구의 유연성 및 절삭성능을 조절할 수 있다.

2.3 유연공구의 제작

Fig. 3 은 유연공구의 제작공정을 순서도로 보여준다. 유연공구는 공구의 기본형상인 PUE 성형품을 제작하고, 표면에 경질입자를 부착하여 제작하였다. 공구의 기재인 PUE 는 주형법⁽⁸⁾으로 제작하였다. 경질입자의 접착강도를 저해하는 PUE 표면의 이형제를 제거하면서 동시에 경질입자의 기계적 고정을 유발하는 표면 요철을 생성시키기 위해 PUE 표면을 사포로 연삭한다. 이형제가 제거된 PUE 표면에 기초접착제를 도포한 후, 그 표면에 경질입자를 살포한다. 입자의 확실한 고정을

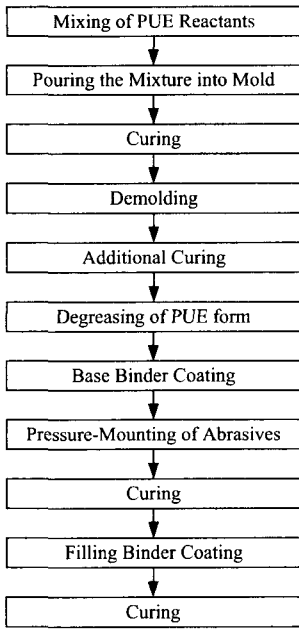


Fig. 3 Manufacturing procedure of flexible tool

위해 표면을 가압하고 약 24 시간 상온에서 건조시킨다. 건조된 공구표면에 상인접착제를 도포한 후 다시 상온에서 약 24 시간 건조시킨다.

3. 다듬질 성능평가

3.1 실험

볼엔드밀로 가공된 고합금 공구강 STD-11 표면을 대상으로 유연공구의 다듬질 성능을 평가하였다. 유연공구의 표면은 형상적 특징에 따라 바닥, 모서리 및 원통으로 구성되므로, 경사각이 0°, 45°, 90°인 평면의 전가공면을 대상으로 공구 각 표면의 다듬질 성능을 개별적으로 평가하였다. 또한 공구가 가공면 형상에 순응하여 변형되면서 다듬질을 수행하는 능력을 평가하기 위해 곡면 다듬질 실험을 수행하였다.

전가공면은 직경 10mm의 볼엔드밀로 주축 분당 회전수 700rpm, 이송속도 350mm/min, 축방향 절삭깊이 1mm, pick feed 1mm의 조건으로 가공하였다.

Table 1 Finishing performance of tool surfaces

Tool Surface	Roughness (μm)			
	Milled Surface		Finished Surface	
	Ra	Rmax	Ra	Rmax
Bottom	5.10	24.68	0.81	1.81
Periphery	5.04	19.94	0.23	1.29
Corner	2.94	26.85	0.21	1.61

다듬질 실험은 예비실험으로 선정된 다듬질 속도 33m/min, 이송속도 60mm/min, 상향이송, 공구/가공면 수직 접촉력 100N, 그리고 공구 경로간 간격 1mm 조건에서 수행하였다. 다듬질 속도와 수직 접촉력을 근간으로 주축의 분당 회전수와 간섭깊이를 선정하였다.

볼엔드밀 가공과 유연공구 다듬질은 통일중공업 TNV-40A 3축 수직형 머시닝센터에서 수행하였다. 실험은 동일 조건에서 4회 이상 수행하였다. 다듬질 전후의 표면을 Kosaka Lab. SE-3400 표면조도기로 측정하고, 다듬질 과정에서 발생하는 힘을 Kistler 9257B 공구동력계로 측정하여 다듬질 성능을 평가하였다.

3.2 공구 표면별 다듬질 성능

Table 1은 볼엔드밀로 가공된 면과 유연공구로 다듬질된 면의 거칠기를 보여준다. 중심선 평균 거칠기 Ra 3~5μm, 최대높이 거칠기 Rmax 20~27μm의 볼엔드밀로 가공된 면을 Ra 0.2~0.8μm, Rmax 1.3~1.8μm인 면으로 다듬질이 가능하였다. 이 결과는 일반적으로 정밀금형에서 요구되는 Rmax 2~5μm의 요건⁽⁶⁾을 만족시킨다. 따라서, 공구 각 표면의 다듬질 성능은 매우 우수한 것으로 판단된다. 공구 바닥은 다른 표면에 비해 다듬질 성능이 상대적으로 낮은 것으로 판명되었다. 본 실험에서 사용된 유연공구는 공구 바닥에서 축의 중간 턱까지의 거리가 상대적으로 멀고 공구 바닥이 평면으로 구성되어 있으므로 공구 바닥과 가공면 사이에 상대적으로 낮은 접촉압력이 형성되어 공구의 절삭성능이 저하된 것으로 판단된다. 따라서, 공구의 높이를 줄이고 공구 바닥을 요철 형상으로 설계하여 접촉압력의 증가를 도모하면 공구 바닥부의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

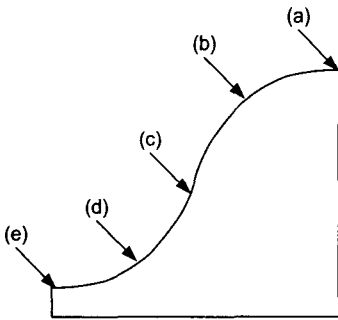


Fig. 4 Sine-curved surface

Table 2 Roughness of milled and finished curved surface

Location	Roughness (μm)			
	Milled Surface		Finished Surface	
	Ra	Rmax	Ra	Rmax
(a)	10.31	59.60	0.13	1.06
(b)	7.93	68.30	0.11	0.89
(c)	4.96	35.55	0.12	0.94
(d)	7.53	92.65	0.10	0.67
(e)	10.33	67.85	0.14	0.93
Average	8.21	64.79	0.12	0.90

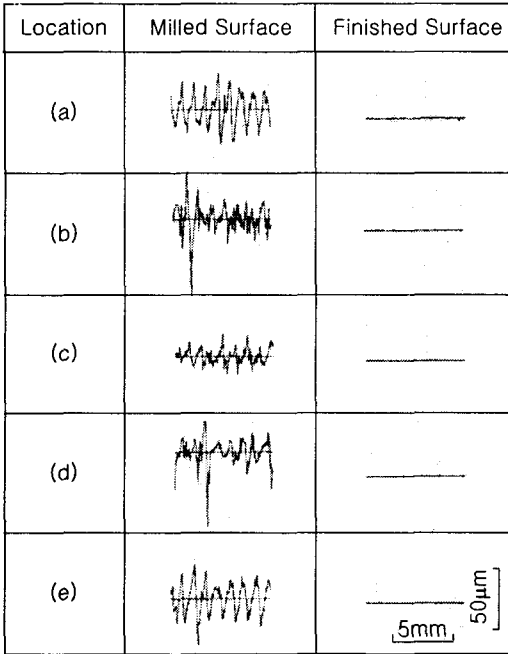


Fig. 5 Milled and finished curved surface profiles

Fig. 5는 볼랜드밀 가공과 다듬질 후의 곡면상의 특징적 지점(Fig. 4)에서 측정된 표면 형상을 보여준다. 측정된 모든 지점에서 볼랜드밀로 가공된 표면의 매우 심한 요철이 유연공구에 의해 완벽하게 제거되었음을 알 수 있다.

Table 2는 Fig. 5에 제시된 면의 거칠기를 보여준다. 평균 Ra 8.21 μm , Rmax 64.79 μm 인 볼랜드밀로 가공된 면을 평균 Ra 0.12 μm , Rmax 0.90 μm 인 면으로 다듬질이 가능함을 알 수 있다. 이 결과는 일반적으로 정밀금형의 표면에서 요구되는 거칠기 조건을 상회하는 결과이다. 경사면(지점 (b), (c), (d))에 비해 수평면(지점 (a), (e))에서 상대적으로 미흡한 다듬질 결과를 얻었다. 경사면은 공구 모서리와 접촉하지만 수평면은 다듬질 성능이 상대적으로 미흡한 공구 바닥과 접촉하기 때문이다. 공구 각 표면의 성능실험 결과(Table 1)에 비해 곡면 다듬질 실험에서 상대적으로 매우 우수한 표면을 얻었다. 그 이유는 곡면 다듬질의 경우 공구 표면의 여러 부분을 사용해서 다듬질이 수행되므로 상대적으로 공구표면 각 부분의 사용 빈도가 낮고, 그 결과 공구의 다듬질 성능이 우수한 상태에서 작업이 수행되었기 때문이며, 또한 동일면에 대해 2회의 다듬질을 수행했기 때문이다.

3.3 곡면 다듬질 성능

Fig. 4는 곡면 다듬질 실험에 사용된 반주기 sine 곡면의 가공물 시편 (수평길이 100mm, 높이 100mm)을 보여준다. 볼랜드밀 가공은 매우 거친 곡면을 생성시켰기 때문에 다듬질 효율의 증대를 위해 입도 #60과 #120의 공구를 사용하여 동일면에 대해 2회 다듬질을 수행하였다.

4. 내구성 평가

곡면 다듬질은 주로 공구의 모서리 부분으로 수행되므로, 공구 모서리의 내구성이 공구 전체의 내구성을 결정짓는다. 따라서 공구의 모서리 부분에서 접평면의 각도가 45°인 지점을 대상으로 내

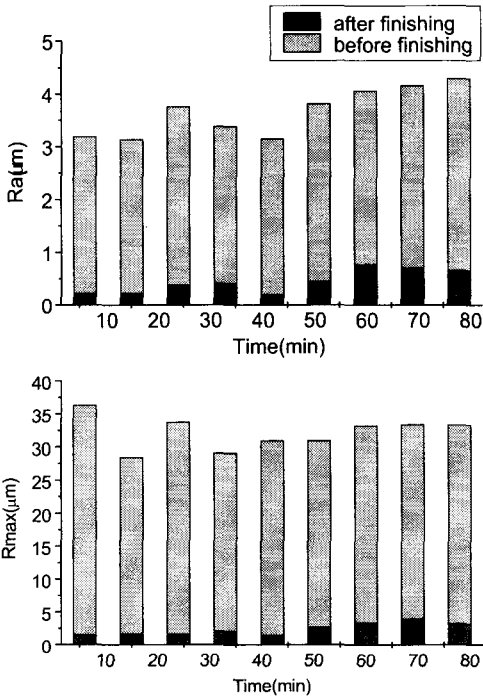


Fig. 6 Variation of roughness with finishing time

구성 실험을 수행하였다. 실험은 공구의 한 지점만을 사용하여 80 분간 지속적으로 다듬질을 수행하여 공구의 내구성을 평가하였다.

Fig. 6 은 공구의 사용시간 증가에 따른 다듬질된 면의 거칠기 변화를 보여준다. 블엔드밀로 가공된 면의 거칠기도 비교를 위해 함께 제시하였다. 다듬질 초기에는 매우 우수한 면이 생성되며, 다듬질 시간이 경과하면서 면의 거칠기도 다소 증가한다. 그러나 80 분간의 다듬질을 수행한 상태에서 생성된 면의 거칠기는 일반적으로 정밀금형에서 요구되는 조건을 충족시킨다. 따라서, 공구의 한 지점은 80 분 이상 다듬질 성능을 유지함을 알 수 있다. 곡면 다듬질은 공구의 다양한 지점을 사용하여 수행되므로 공구의 내구성은 80 분을 크게 상회할 것으로 사료된다.

Fig. 7 은 공구의 사용시간 증가에 따른 다듬질 분력(공구회전에 의한 공구 표면의 선속도 방향 분력) F_p 의 변화를 보여준다. 다듬질 분력의 크기는 간섭깊이에 의해 결정되는 가공면에 수직한 방

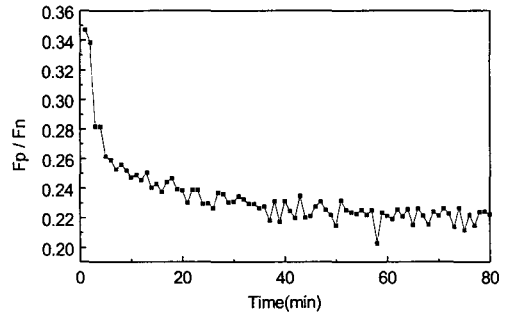


Fig. 7 Variation of F_p/F_n with finishing time

향의 분력 F_n 의 크기에 비례하므로 간섭깊이에 무관하게 다듬질 성능을 관찰하기 위해 F_p 를 F_n 으로 무차원화하였다. 다듬질 분력은 다듬질 시작 시점에 약 0.35 의 큰 값을 나타내지만 초기 약 5 분 동안에 급격히 감소한다. 그 후 약 20 분까지는 점진적으로 감소한 후, 실험이 종료되는 시점까지 거의 일정한 값을 유지한다.

새로운 공구 표면에는 예리한 경질입자가 높이가 불균일하게 부착되어 있기 때문에 다듬질 시작 시점에 큰 다듬질 분력이 발생한다. 다듬질 초기에는 불완전하게 부착되어 있던 경질입자가 급속히 탈락하지만 점진적으로 탈락율이 감소하기 때문에 다듬질 분력도 급격한 감소 후 점진적 감소 경향을 나타낸다. 그 이후에는 안정적으로 부착된 경질입자에 의해 다듬질이 수행되므로, 다듬질 분력도 일정한 값을 유지한다. 부가적으로 다듬질 분력의 변화를 관찰하면 공구의 다듬질 성능의 저하를 지속적으로 감시하는 것이 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

폴리우레탄 일레스토머 표면에 산화알루미늄 미세분말을 접착한 유연공구를 개발하였다. 유연공구는 블엔드밀로 가공된 곡면의 형상을 유지하면서 전가공면에 존재하는 cusp 를 포함한 요철을 효율적으로 제거하여 일반적으로 정밀금형에서 요구되는 표면조건을 만족하는 면을 생성시킨다. 공구 표면의 한 지점만을 80 분 이상 사용해도 공구

의 다듬질 성능은 유지된다. 유연공구를 사용하면 3축 머시닝센터에서 복잡한 제어기법을 사용하지 않고도 효율적인 곡면 다듬질이 가능하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구(981-1007-047-2) 지원에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Kunieda, M., Nakagawa, T., and Higuchi, T., "Robot Polishing of Curved Surface with Magnetically Pressed Polishing Tool," JSPE, Vol. 54, pp. 125-131. 1988.
2. Kamijyo, K., Sakamoto, M., Asao, T., and Takeuchi, Y., "Development of an Automatic Polishing System for Metal Molds and Dies (1st Report)," JSME (C), Vol. 55, pp. 193-196, 1989.
3. Kamijyo, K., Mizugaki, Y., and Sakmoto, M., "Development of an Automatic Polishing System for Metal Molds and Dies (2nd Report)," JSME (C), Vol. 57, pp. 1019-1023, 1991.
4. Kamezaki, S., Aoyama, T., and Inasaki, I., "Development of a Robot Polishing System," JSME (C), Vol. 57, pp. 3714-3719, 1991.
5. 이민철, 하덕주, "곡면금형 연마를 위한 머시닝 센터 장착형 연마로봇 시스템 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 4 호, pp. 163-177, 1999.
6. Zhao, J., Saito, K., Kondo, T., Narahara, H., Igarashi, S., Sasaki, T., and Zhang, L., "A New Method of Automatic Polishing on Curved Aluminium Alloy Surfaces at Constant Pressure," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 35, No. 12, pp. 1683-1692, 1995.
7. Jeong, J. H., Miyoshi, T., and Saito, K., "Geometrical Characteristics and Polishing Properties of a Dual-Axis Spherical Polishing Tool," JSPE, Vol. 53, No. 5, pp. 119-807, 1987.
8. Schwartz, S. S., and Goodman, S. H., "Plastics Materials and Processes," Van Nostrand Reinhold, pp. 376-395, 1986.