

자유 곡면 금형 연마기 개발

박 정훈(한국공작기계) 안 대균(한국공작기계) 정 해도(부산대학교)

Development of Polishing Machine for Free Form Surface Die

Jeong-Hoon Park Dae-Kyun Ahn Hae-Do Jeong

ABSTRACT

In the process of die manufacturing, according to increasing demand of die and molds, the efficient machining of dies and molds has been increased. However, while the cutting process has been automated by the progress of CNC(computer numerical control) and CAD/CAM, the polishing process still depends on the experienced knowledge of an expert. Also, even when workers are skilled in polishing dies, it takes much time to obtain the required roughness and smoothness on the surface of a die. Moreover, many workers gradually avoid doing polishing work because of the poor working conditions caused by dust and noise. Therefore, to improve productivity and to solve the potential shortage of skilled workers, a user-friendly automatic polishing system was developed in this research. The developed polishing system with five degrees of freedom is able to keep the polishing tool normal to the die surface during operation and is able to maintain a pressure constantly by the developed pneumatic system. Also, to evaluate polishing performance of the developend system and find the polishing conditions, the various polishing experiments were carried out.

Key words : cutting process(절삭 공정), polishing system(연마 시스템), pneumatic system(공압 시스템), polishing condition(연마 조건)

1. 서론

최근 다품종 소량 생산의 추세로 인한 금형의 수요가 증가함에 따라 능률적인 금형 가공의 요구가 증가되고 있다. 금형의 가공 공정 중에서 형상 가공의 경우는 NC 공작기계 및 CAD/CAM의 발전으로 말미암아 자동화가 많이 진전되고 있으나, 금형 품질에 직접적인 영향을

미치는 연마 공정은 자동화가 미진하여 대부분 경험적 지식에 의존하는 숙련공의 수작업으로 수행되고 있다. 그러나, 이와 같은 연마공정은 작업 시 발생하는 먼지, 소음, 진동 등으로 인한 작업자들의 기피현상으로 기술인력이 점차 줄어들고 있는 실정이므로 이에 대한 자동화는 결실히 요구되고 있다. 한편, 3차원 자유곡면을 이루고 있는 금형의 경우는 연마작업이 매우 어렵고, 시간 또한 많이 소요되는 작업이다. 이러한 자유곡면을 가진 금형의 연마공정을 자동화하여 연마시간의 단축, 인력난 해소, 품질향상, 후 공정 및 형상가공의 단축 등을 통한 생산성 향상을 추구하고자 하는 연구가 국내외에서 활발히 진행되어 왔다. 국내의 경우 수직 다관절 로봇을 이용한 연마전용 시스템이 개발되었으며, 일본의 경우 Daikin, Nagase 등의 회사에서 5축 전용 자동연마 시스템이 이미 상품화되어 판매되고 있다. 그러나, 수직 다관절 로봇의 형태로 개발된 연마 로봇은 작업 영역의 제한 및 연마력에 대응하는 강성이 문제가 된다. 또한 5축 전용 연마 시스템을 구성할 경우에는 비용이 고가가 되는 문제점이 있다. 이러한 비용문제를 해결하기 위해 산업현장에서 보편화된 3축 머시닝 센터(machining center)를 이용하여 연마작업을 하는 경우에는 충분한 자유도를 가지지 못하므로 3차원 자유곡면의 연마에는 제약이 따른다. 즉, 금형 형상이 복잡할 경우는 공작물을 여러 번 고정해야 하며, 금형의 형상에 따라 복잡한 고정구가 필요하게 되어 이의 제작에 많은 시간과 인력이 소비된다. 반면에, 3차원 곡면의 가공에 가장 적합한 것으로 알려져 있는 5축 연마 시스템을 이용할 경우에는 충분한 자유도의 부여로 인하여 공작물의 준비 대체 시간과 고정구의 제작에 소요되는

시간이 감소되고, 인적비용의 절감 효과를 기대할 수 있으며, 유효 가동률의 증가, 연속 부인 운전이 가능하고, 가공 정밀도의 향상 및 복잡한 금형 연마가 용이하다는 등의 장점을 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 3차원 곡면의 가공에 가장 적합한 것으로 알려져 있는 5축 연마 시스템을 구현하기 위하여 3축의 직선 운동부에 2축의 회전 운동부를 추가한 5자유도의 곡면 금형 연마기를 개발하였다. 개발된 연마 시스템은 연마 공구가 임의의 자유곡면과 항상 법선 방향을 유지하며 일정한 연마력으로 연마할 수 있는 정압·변직 시스템으로 구성되어 있으며, 개발된 5축 연마 시스템에 의해 연마 작업을 할 경우 충분한 자유도의 부여로 인하여 공작물의 준비대체 시간과 고정공의 제작에 소요되는 시간이 감소되고, 인적비용의 절감 효과를 기대할 수 있다. 또한 유효가동률의 증대 및 연속부인운전을 가능하게 하고, 가공 정밀도의 향상 및 복잡한 금형 연마가 용이할 것으로 예상된다. 또한 고품위의 연마면을 위한 연마공구도 개발하였다.

숙련공에 의한 연마공정은 작업자의 감각과 경험 즉, 숙련도에 의하여 제품의 품질 및 생산성이 좌우된다. 따라서 자동화 및 고능률, 고정밀도를 위해서는 작업자의 숙련도를 대신할 연마지식이 필요하게 된다. 본 연구에서는 3차원 형상을 가진 채도우 마스크 금형을 제작하여 다양한 연마조건으로 연마 실험을 수행하여 연마 성능을 평가하고 연마품질 및 생산성에 영향을 미치는 인자들인 연마숫돌, 수직가공력 등의 가공조건에 대한 정량적 특성을 파악하고자 한다. 또한 본 연구에서는 개발된 연마 시스템의 연마성능을 평가하기 위해 금형 전체에 대한 경면 가공 실험을 수행하였다.

2. 자동연마 시스템의 개발

2.1 연마 로봇 시스템의 기구학적 구조

금형의 연마 가공에 있어서 가공물의 곡면에 항상 법선방향으로 공구자세가 유지하는 것이 중요하다. 3자유도의 구조를 가지는 연마기구에 의해 곡면 금형을

연마할 경우에는 곡면의 경사가 급격할수록 연마숫돌이 곡면과 접촉하는 부분이 좁아지므로 균일한 연마가 곤란하게 되는 문제점을 가지게 된다. 또한 숫돌이 접촉면에 가하는 수직 가공력이 편중되고 숫돌의 회전으로 인해 Fig. 1과 같이 원하는 곡면보다 깊게 연마하는 현상이 발생할 수 있기 때문에 양호한 연마면을 얻을 수 없게 된다. 따라서, 3축 연마 기구일 경우에는 연마숫돌의 연결부분을 볼 조인트(ball joint)나 유니버설 조인트(universal joint) 등의 유연한 구조를 가지도록 구성하여 절삭 현상을 방지하고, 접촉면적을 넓혀야 한다. 그러나, 이 경우도 Fig. 2와 같이 연마숫돌의 회전에 의해 접촉면에 발생하는 마찰력 F_t 의 분포가 달라지므로 이에 따라 연마력 F_n 의 분포가 곡면의 곡률에 따라 변하므로 양호한 연마성능을 발휘할 수 없다는 문제점을 가지고 있다. 반면에, 5축 연마기구에 의한 곡면연마는 Fig. 3과 같이 충분한 자유도로 인하여 연마숫돌의 자세가 곡면과 법선방향을 유지할 수 있다. 따라서, 곡면의 각 연마지점에서의 연마력 F_n 은 항상 일정하게 유지할 수 있으므로 보다 양호한 연마표면을 얻을 수 있다. 또한, 3축 연마기구에서 나타날 수 있는 접근 불가능한 곡면에 대해서도 5축 연마기구의 경우는 자세제어를 통해 보다 유연하게 대처할 수 있다. 그러나, 다관절 로봇에 의한 5축 연마기구의 경우에는 동작기계와 비교해서 강성과 위치결정정도가 떨어지는 단점이 있다.

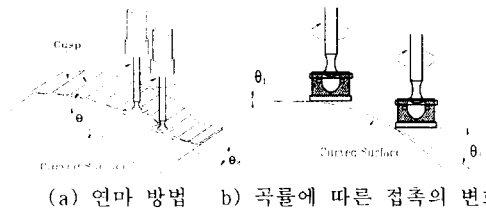


Fig. 1 3축 연마기구에 의한 연마

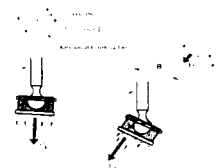


Fig. 2 연마력의 분포

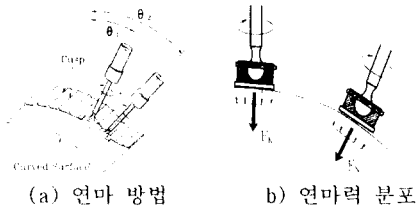
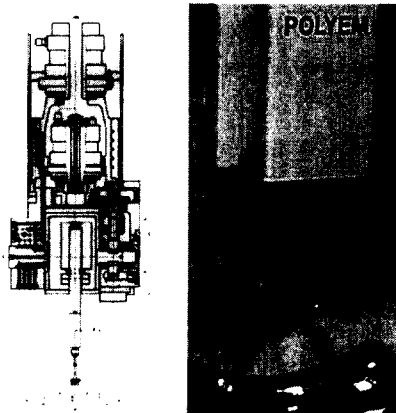


Fig. 3 5축 연마기구에 의한 연마

본 연구에서는 이러한 구조적인 문제점을 고려하면서 공작기계의 강성을 충분히 이용하기 위해 3자유도의 직선 운동부에 2자유도의 회전 운동부를 추가한 5자유도의 연마기를 제작하였다. Fig. 4는 머시닝 센터와 같은 기존의 3축 직선 운동부에 $\pm 95^\circ$ 의 선회각도 제어가 가능한 A축과 $\pm 200^\circ$ 의 선회각도 제어가 가능한 C축을 부가할 수 있는 연마 헤드(polishing head)의 외형을 나타낸다. 본 연구에서는 Z축, A축과 C축의 구동원을 동일선 속 상에 위치시킴으로써 연마가공 시 회전 관성 모멘트에 의한 연마 저항을 최소화하였다. 연마 헤드의 구동을 A, C축 서보 모터와 연마공구구동을 위한 공압 주축(Air Spindle) 및 연마력 제어를 위한 실린더를 내장하고 있다. 특수 기구를 이용하여 선회 오차를 15 arcsec 이내로 하여 연마 가공 시 공구의 궤적의 오차를 최소화하였으며, 스피들의 구동과 정압 실린더의 압력차를 제어하기 위한 공기는 내부 배관회로에 의해서 공급함으로써 연마 가공 시 주변 기기에 의한 간섭을 최소화 하였다. 연마가공 시 가공물과 공구의 마찰을 감소하기위해서 점도가 매우 낮은 연마유 KOTON 100을 사용하였다.



(a) 연마헤드의 구조 (b) 연마헤드의 외형

Fig.4 Polishing Head

2.2 정압 시스템 개발

금형의 사상 가공에 있어서 공구는 가공물에 항상 일정한 압력을 유지하면서 가공을 하여야 균일한 가공면을 얻을 수 있다. 따라서 가공면과 공구의 접촉면에서 발생하는 압력의 변화는 형상 정밀도 및 가공면 품질에 악영향을 미치므로 이의 기구학적인 제어가 필요하게 되어진다. 일반적으로 상하의 이송을 제어하는 Z축은 복잡하면서 미소한 곡률의 변화에 NC 데이터 생성이 곤란하므로 본 연구에서는 공압을 이용하여 상하의 압력을 조절하는 기구를 채택함으로써 자유곡면에 일정한 압력을 부여하도록 하였다. Fig. 5에서 연마력 F가 작용할 때의 실린더 로드의 변화량 x 에 의한 단면적 변화(ΔA) 한다. 그러므로 식 1과 같이 상부에서 작용하는 힘은 하부의 실린더의 힘과 연마력 F의 합과 일치함으로써 연마면에 일정한 압력을 공급한다. 따라서 본 연구에서는 상하의 압력차에 의해서 연마력을 부가하였을 때 연마면에는 항상 일정한 압력이 작용하도록 하여 최적의 표면 조도 및 형상 정밀도를 얻고자 하였다.

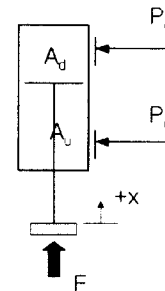


Fig.5 정압의 원리도

$$\text{Const} = P_d \times A_d = (P_u \times A_u) + (F \times \Delta A) \quad (\text{식 1})$$

2.3 탄성 연마 공구 개발

금형을 기계가공(황삭, 정삭가공)한 후에는 커터 자국(cut mark, cusp)이 생성된다. 연마작업은 기계가공에 의해 발생하는 커터 자국을 제거하고, 금형 표면을 경면화 하는 작업으로 이러한 연마작업에는

연마공구가 중요한 부분을 차지한다. 연마작업을 위한 연마공구의 조건 및 고려 사항은 다음과 같다.

1) 연마공구의 자세는 곡면과 항상 법선방향을 유지하도록 한다.

2) 연마공구는 연마면이 바닥에만 존재하도록 해야 한다.

3) 연마공구와 단말 효과기(end effector)에 해당하는 연마숫들의 연결은 유연성을 가지도록 볼 조인트(ball joint)나 유니버설 조인트(universal joint)와 같이 유연성을 가져야 한다.

4) 연마력 부여를 위한 정압 기구로 공압 실린더가 사용될 경우에는 공작물과 공구의 법선 방향 거리는 유효구간(공압 실린더의 행정거리)내에서는 연마 깊이에 영향을 주지 않도록 해야 한다.

5) 공작물의 경면 가공을 위한 균질한 표면 처리를 위해서 연마 패턴도 중요한 고려 대상에 해당한다.

6) 플랫 엔드밀(flat end-mill)이나 볼 엔드밀과 같은 측면 절삭에 의한 공구는 연마작업에 적용될 수 없다.

이러한 점들을 고려하여 본 연구에서는 가공입자 부분은 금형의 형상에 접촉하여 다듬질 가공을 수행하면서 가공 중 금형의 형상에 가공입자 부분이 효과적으로 대응할 수 있는 다듬질 공구를 고안하였다. 고안된 연마 공구는 Fig. 6과 같이 경, 연질의 2층 구조를 가진다. 경질(rigid)의 가공 부분은 실제 금형면과 접촉하여 다듬질 가공을 수행하며 연질부분은 탄성을 가짐으로 해서 다듬질 가공 중 금형의 형상에 적절히 대응할 수 있다. 경질의 다듬질 공구는 연마펠렛(Finishing Pellet)을 이용하여 가공 중 자생 작용이 이루어져 긴 가공수명을 갖도록 하였으며, 연질의 탄성 부분은 실제 가공 중 연마 펠렛의 자세를 일정하게 유지하며 곡면형상의 금형에 대응할 수 있게 하였다. 본 연구에서는 직접 연마 가공을 담당하는 경질부분에 레진 본드(resin bond) 펠렛을 이용하고 연질부분은 일정한 탄성을 지닌 탄성체(elastic material)를 사용하여 형상 왜곡이 거의 없이 고능률 가공을 실현하고자 한다. 기구학적인 자유 곡면을 추종하기 위해서 연마 지석과 스핀들 사이에 유니버설

조인트 방식을 채택하였으며 안내 핀과 O-Ring에 의해서 지석부분의 유동성을 부가하였다. Fig. 7은 본 연구에서 개발한 연마공구를 나타낸다.

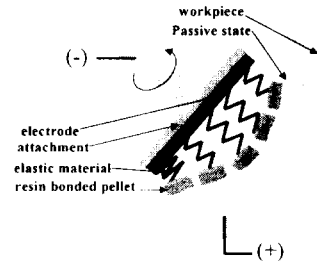


Fig. 6 공구개발의 개념도

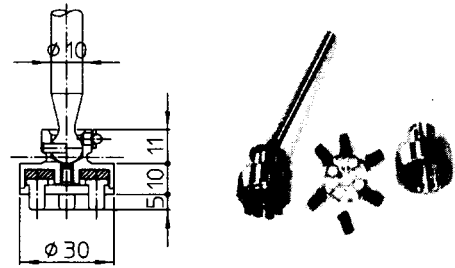


Fig. 7 제품화된 연마 공구

2.4 자동 금형 연마 시스템의 개발

대부분의 동작기계 구조물은 굽힘과 비틀림을 받는 빔으로 표현된다. 그러므로 구조설계는 굽힘과 비틀림에 의한 변형상태를 고려하여 설계를 한다. 이 경우 변형하중은 기계의 운동부분에 작용하는 중량과 공작물의 중량에 가공에 의한 저항이 대표적이며 이들은 힘의 크기와 방향 및 작용점의 변화 등 변형조건의 종류에 따라 여러 가지 형태로 변형을 하게 된다. 본 연구에서 개발한 자동연마기인 POLYEM-1814는 문형 구조(portal type)를 채택하여 대형 공작물에 적합하며 작업 면적은 1800 X 1400 X 800 mm이다. 그리고 POLYEM-1205는 컬럼 이동형으로 작업 면적은 1250 X 560 X 500 mm의 공간을 차지하여 좁은 공간에 효율적이다. 주축은 공압 모터를 채용하였으며, 일정한 연마력을 가하기 위하여 정밀 레플레이터에 의해서 작동하는 실린더를 사용하였으며, X, Y, Z, A, C축인 5축을 기본으로 제어하며, 직선 운동

가이드(liner motion guide)를 채용함으로써 유지 보수 및 정·동적 강성을 증대 시켰으며, A, C 및 Z축을 동일선상에 설계하여 연마 시 연마저항을 최소화할 수 있도록 하였다. Fig. 8은 POLYEM-1814의 외형을 나타내며 Fig. 9는 POLYEM-1205의 외형이다. 그리고 Table. 2는 개발된 금형연마기의 주요 사양을 나타낸다.

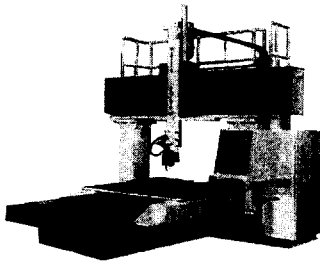


Fig. 8 POLYEM-1814

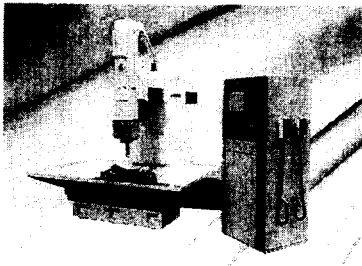


Fig. 9 POLYEM-1205

Table. 1 금형연마기의 주요 사양

항 목		POLYEM -1205	POLYEM -1814
기계	기계형태	문형	수직 형태
	제어 축 수	동시 5축(X,Y,Z,A,C) 제어	
능력	작업 면적	1.250 x 560	1.800 x 1.400
	최대적재중량	4.000 Kg	10.000 Kg
	이송	X축 이동량	1.250
량	Y축 이동량	560	1.400
	Z축 이동량	500	800

	A축 선회각도	$\pm 95^\circ$
	C축 선회각도	$\pm 200^\circ$
	이송 속도	X, Y, Z축 3,000 mm/min A축 선회속도 13 deg/sec C축 선회속도 240 deg/sec
기 능	ATTACHMENT	회전형/요동형
	ATC	6 Ports
	DATA전송	NC Data / Teaching / CAM
CONTROLLER		PC-NC

3. 연마 성능 평가

3.1 곡면 연마 시편의 절삭가공

곡면 연마면 거칠기 측정실험에 사용된 시편은 Fig. 10와 같은 웨도우 마스크 (250mm x 145mm) 금형이며 금형의 재질은 SKD11이다. 절삭조건은 Table. 2과 같다.



Fig. 10 웨도우 마스크 금형

Table 2 새도우 마스크 금형의 절삭조건

재 질	SKD 11
공 구	Ball End mill (O10)
주축 속도	1000 rpm
이송량	500 mm/min

3.2 자유 곡면의 연마 가공

곡면 연마 시편에서 최적의 가공 조건을 얻기 위해서 Fig. 11과 같이 각각의 입도에 대하여 수직 연마력,

Spindle 회전수, 이송 속도를 설정하고 주축 회전수와 이송 속도를 종류에 따라 영역으로 나누고, 다시 각각의 영역에 대해 수직 연마력을 20N, 30N, 40N, 50N으로 설정하여 표면거칠기를 측정하였다.

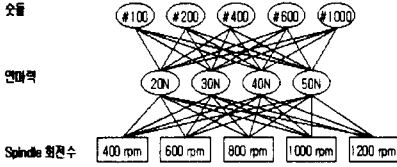


Fig. 11 연마 실험 조건



Fig. 12 말안장 연마 장면

3.3 측정 결과

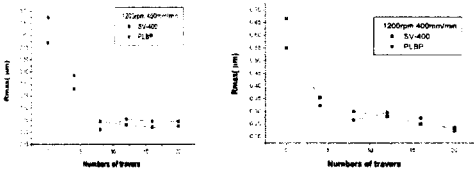


Fig. 14 30N에 측정 Fig. 13 20N에 의한 측정

Fig. 14 40N에 의한 마무리 표면거칠기 측정

4. 결론

본 연구를 통하여 금형의 연마에 있어서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 5축 금형 연마기를 개발함으로써 복잡한 형태를 갖는 프레스 금형의 사상가공을 자동화를 이룩하였다.
2. 일반적으로 프레스 금형에 사용되는 STD11 연마실험에서 주축의 회전수 800rpm, 연마력 40N에서 최적의 표면조도 및 형상 정밀도를 얻을 수

있었다.

3. 연마 시 자유 곡면에 대응하기 위해서 개발된 전도성 탄성공구는 금형의 가공 시 우수한 곡면 대응성을 지니며 고품위 가공 능력을 갖는 연마 공구를 개발하였다.

후기

본 연구는 산업 자원부에서 시행한 공업 기반 기술 개발 사업의 연구비로 수행한 것입니다.

참고 문헌

- [1] Takashi MIYOSHI, "The latest optical precision measurement technology fraunhofer diffraction method", JSPE, 1992.
- [2] L. H. Tanner, M. Fahoum, "A Study of the Surface Parameters of Ground and Lapped Metal Surfaces, Using Specular and Diffuse Reflection of Laser Light". Wear, Vol. 36, pp. 299-316, 1976
- [3] 工作機械技術研究會, 工作機械 시리즈 高精測定, 大河出版, 1986
- [4] 吉田政弘, 國枝正典, 他2名 "電解研削による曲面の仕上げ加工", 砥粒加工學會誌, Vol.37 No.2 pp. 34-40, MAR, 1993
- [5] N.Itoh, "A Study on The Lapping Machining Using Conductive
- [6] 유재구, "특수가공", 대광서림, pp.239~241,
- [7] 森口一豊, 近藤 司, 五十風悟, 齋藤勝政, "金型磨キ作業の自動化に關する研究 - 工具滯留時間を考慮した定壓磨キ加工", 日本石氏 粒加工學會 學術講演會 講演文集, pp. 431~434, 1995.