

액체호닝에 의한 금형 자동 사상기계 개발 및 가공 특성

김재도*, 류기덕**, 홍정석**

Polishing Characteristics and Development of Automatic Die Polishing Machine by Liquid Honing

Jae-Do Kim*, Kee-Deug Ryu**, Jung-Seok Hong**

ABSTRACT

The automatic die polishing machine by liquid honing has been developed and experimented on the surface of machined die. The goal of development in the automatic die polishing machine by liquid honing is to increase the accuracy and the productivity in die polishing. To reach this goal, the polishing machine consists of the automatic measuring device for contour of die, the nozzle and pumping system to spray the powder mixed with liquid, and the 3-axis guides. Before polishing, the measuring device with a semiconductor laser scans the surface of mould to get the data of contour. The data store a PC and use to control the nozzle head to move above a couple of centimeters on the machined surface of die.

The experimental parameters are the spraying time, the pressure, the size of abrasive grain and the mixing ratio between abrasive grain and liquid. The surface roughness is measured on the polished die which are SKD11 and Al7075 machined by NC. The surface roughness indicates the values of $R_{max} 0.5\mu m$ for Al7075 and $R_{max} 1.4\mu m$ for SKD11. It reduces the polishing time significantly and reduces the monotonous work for labors. As the results, the liquid honing system is useful method to apply for the die polishing and the automatic die polishing machine using liquid honing shows that it's very effective processing ability.

Key Words : Liquid honing(액체호닝), Polishing(연마), Spraying time(분사시간), Abrasive grain(연마입자), Spraying pressure (분사압력), Surface roughness(표면조도)

1. 서론

일반 기계가공으로 제작된 금형들은 가공표면의 표면조도가 정밀하지 못하므로 사상 가공을 하여 표면조도를 정밀하게 향상시키는 것이 필수적이다. 이러한 후처리 가공은 운영에 있어서 사용자의 오랜 경험을 바탕으로 한 높은 숙련도가 요구되며 긴

가공시간과 높은 생산비용이 소요된다.

현재 국내 금형 업체들은 그 규모의 영세성으로 인해 전문 기술 인력의 부족과 낮은 기술 수준으로 어려움을 겪고 있다. 높은 생산성이 요구되는 제조 현장에서 이러한 후처리 기술에 대한 연구와 개발 그리고 그 응용에 있어서 상당한 곤란을 겪고 있다. 금형 제조에서 전공정의 30~50%를 차지하고

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 대학원

있는 현재의 후처리 가공 단계인 연마 단계는 전해 인프로세스 드레싱법, 전해 연마, 전해 연삭, 전해 화학 연마, 전해 자력 연마법, 래핑(lapping), 폴리싱(polishing), 슈퍼피니싱(superfinishing)등의 고가의 가공시스템 및 높은 기술을 요하는 방법이나 대부분 수 작업으로 이루어지고 있다. 따라서 생산성 향상이 무엇보다 중요해지는 금형 사상공정에서 이러한 후처리 가공의 자동화 개발이 더욱 절실히 요구되고 있다.^[1,2]

본 연구는 저가의 자동 연마기를 개발하여 금형산업의 생산성 향상 및 가공기술 수준을 한 단계 높이는 것을 그 목적으로 하였다. 개발되는 자동 연마기는 첫째 표면조도 $1\sim 3\mu\text{m}$ 의 높은 가공 정밀도가 요구된다. 둘째 기존 방법에 비하여 연마 가공시간의 단축이 요구된다. 셋째 쉽고 편리한 운영 방식이 요구된다. 넷째 자동 기계의 저렴한 가격이 요구된다. 다섯째 다양한 종류(형상, 재질)의 금형에 적용이 가능해야 한다. 이런 조건을 만족하는 금형 사상 자동 기계의 개발을 위하여 본 연구는 3축 직교 로봇, 레이저 측정기, 액체 분사 시스템 등으로 자동기계를 구성하였다. 연마 방법에서는 액체 호닝에 의한 연마 방법을 채택하였다. 비접촉식 가공법인 액체 호닝법을 연마 자동화에 도입하여 정밀가공에서 그 효용성을 입증하고 최적 가공변수를 도출하였다. 비접촉 분사가공인 액체호닝법은 연마흔을 남기지 않으며 적은 비용으로 가공이 가능하다. 자동 연마를 위한 액체 호닝 연마에서는 금형 재료, 노즐 분사 압력, 분사 시간, 연마 입자의 크기, 연마액과 연마입자의 혼합비 등을 변화시켜 실험하여 연마 정도와 이를 변수 사이의 관계를 분석하였다. 분석 결과 얻어진 최적의 결과값을 자동 금형 연마기 개발에 있어서의 기본적인 설정값으로 삼았다.^[3,4]

금형 연마 자동화에 필수 요소인 금형 형상인식을 위해 기존에 있는 고가의 측정방법 대신 저가의 비용으로 제작이 가능한 레이저 거리 측정기술을 개발하였다. 레이저 거리 측정기술은 가공되는 금형의 형상을 자동으로 인식하고 가공경로를 자동으로 설정할 수 있게 한다. 모든 작업은 미리 입력된 데이터에 따라 프로그램된 컴퓨터에 의해 제어된다. 본 연구에서는 이 레이저 거리 측정 시스템을 도입하여 금형과의 상대거리 측정 및 이를 응용한 금형 형상 측정 시스템을 구축하였고, 자체 개발한 제어용 프로그램으로 이를 제어하여 가공시 노즐의 이송경로를 자동으로 결정해 가공하게 하였다.^[5]

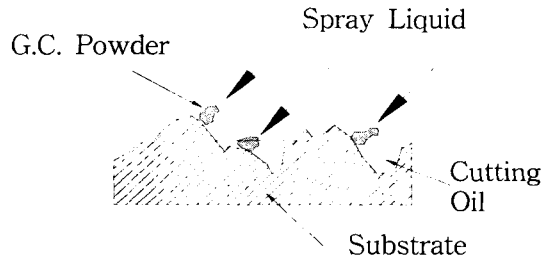


Fig. 1 Mechanism of liquid honing

2. 액체 호닝 시스템

2.1 액체 호닝법

액체호닝은 연삭입자를 가공액과 함께 노즐에서 고속으로 분출시켜 이를 가공물의 표면에 부딪히므로서 평활한 다듬질면을 얻는 가공법이다.

Fig.1에 가공 기구를 표시하였다. Fig.1에서와 같이 가공물 표면은 가공액에 덮여 있다. 돌출부에는 고속의 연삭입자가 정면 충돌하므로 연마량이 많으나 오목부에서는 가공액 중에서 감속되므로 연마량이 적어진다. 이러한 원리를 이용하여 돌기부가 선택적으로 많이 다듬질된 평활한 다듬질 면을 얻을 수 있는 가공법으로 다음과 같은 특성을 갖는다.

1. 단시간에 무방향성의 평활면을 얻는다.
2. 가공물의 피로강도를 10%증가시킨다.
3. 복잡한 형상을 쉽게 가공할 수 있다.
4. 표면잔류의 산화막 및 버(burr)를 쉽게 제거한다.
5. 표면조도는 연삭입자에 의해 최우된다.
6. 연삭입자의 비산을 차단한다.

2.2 액체 호닝 시스템

실험장치는 펌프시스템과 교반기를 사용하였고 절삭액이 비산하는 것을 방지하기 위하여 실험용 챔버를 제작하여 시편을 이송하는 이송장치와 고정식 노즐 마운트가 챔버 안에 장착되도록 하였다. 시편 이송장치는 스텝모터, 감속기, 벨트 구동장치로 구성하였으며 PC의 프린터 포트로 구동하였다. 연마 분말이 구동부의 베어링과 풀리에 비산되어 구동이 어려워지므로 시편이 놓이는 치차는 간단한 풀리를 바꾸고 이용하여 분말에 의한 구동의 방해해 최소화했고 절삭액의 고압 분사시 위치가 달라지는 것을 방지하기 위하여 시편 고정장치를 치차 위에 설치하

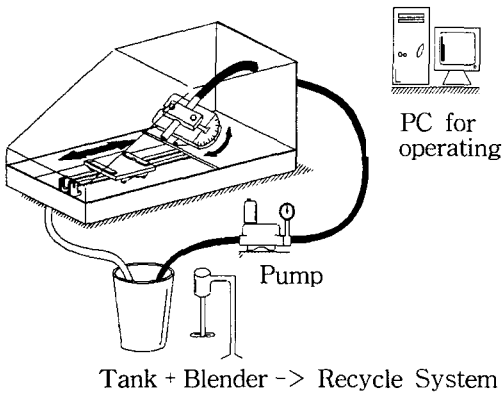


Fig. 2 Schematic diagram of experiment system

였다. 중요한 변수인 연마액 분사 압력은 펌프에서 고압호스로 이어지는 부분에 압력계를 설치하여 그 값을 분사 압력값으로 삼았다. Fig. 2는 액체 호닝 시스템의 장치 개념도를 나타낸 것이다.

2.3 연마 분말 및 절삭액

연마분말은 절삭공구의 역할을 하는 것으로 강도, 인성, 조성, 형상이 다듬질면 조도에 밀접한 영향을 미치며 가공물보다도 단단하고 강인한 것이 요구된다. 본 연구에서는 탄화규소계의 G.C(Green- Silicon Carbide)를 사용하였다. G.C의 특징은 탄화규소의 순도가 높고 녹색반투명의 결정을 이루며 다른 연마분말보다 경도는 높으나 인성이 낮아 예리한 절삭날의 생성에 우수한 특징을 갖고 있다.^[6,7]

본 연구에서는 액체호닝에 사용되는 혼합액으로 각종 금속의 절삭 가공용에 사용되는 수용성 절삭액을 사용하였다. 이 절삭액은 연마 분말의 예리한 절삭날이 금형면에 나쁘게 작용하는 것을 방지하여 다듬질면 평활도 향상, 가공시 발생하는 칩 제거, 표면의 눈메움 방지, 냉각효과로 열적 영향 감소, 연마 입자 비산 차단이 가공효과가 있다.

2.4 레이저 측정 이론

레이저 상대거리 측정은 발광소자와 검출소자로 구성되며 반도체 레이저 변위 센서와 변위계는 삼각 측정 방식으로 대상 물체를 검출한다. 발광소자로는 반도체 레이저가 사용되며 발광된 레이저빔은 렌즈에 의해 물체로 집광된다. 물체는 광선을 반사하고 광선은 위치 검출 소자에 집광되어 빔의 스폿을 형

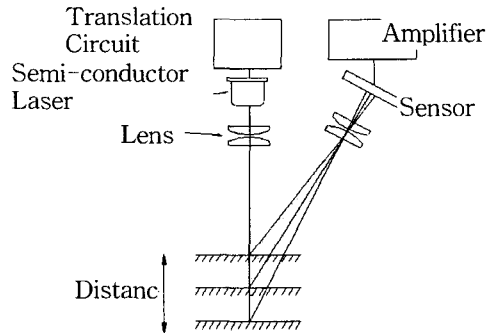


Fig. 3 Schematic diagram of distance measurement by using semi-conductor laser

성후 대상 물체 위를 측정기가 이동함에 따라 검출 소자상을 이동하고 물체의 변위는 빔 스폿의 이동을 검출함으로써 결정된다. 레이저 거리 측정원리를 Fig. 3에 나타냈다.^[5]

3. 액체호닝에 의한 연마 실험

3.1 실험시편 및 재료특성

실험재료는 Pet병 금형재료인 Al7075와 일반금형 재료인 SKD11을 사용하였다. Table 1과 Table 2는 재료의 성분 값, Fig. 4는 시편의 모습이다.

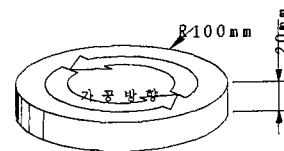


Fig. 4 Diagram of specimen

Table 1 Chemical compositions of Al7075

	Chemical compositions(wt%)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Al7075	0.40	0.50	1.6	0.30	2.5	0.23	5.6	0.25

Table 2 Chemical compositions of SKD11

	Chemical compositions(wt%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
SKD11	1.5	0.40	0.50	0.03	0.03	12	1.0	0.35

3.2 액체호닝 연마

액체호닝에 의한 사상 실험에서는 연마 분말, 절삭액의 혼합비, 연마 분말의 크기, 분사시간, 노즐의 이송속도를 주요 변수로 삼았다. 이들 변수를 변화시켜 연마 실험을 수행함으로써 표면 조도와 이물변수간의 관계 및 표면조도 향상 정도를 분석하였다. 그 외에도 분사각도, 분사압력 및 노즐과 시편간 거리등을 일정값으로 고정시키고 실험하였다. 각각의 이송속도를 먼저 선정한다 후 그 값을 입력하여 구간을 30mm만 이송하도록 속도와 시간을 계산하였다. 노즐을 시편과 20mm 간격을 두고 장착하여 왕복 운동하는 시편에 분사하도록 하였고 분사노즐은 그 자체가 부채꼴로 퍼지면서 분사되도록 설계하였다. 가공면적은 원형시편의 상부 표면적으로 7854mm² 이며 가공시 분사 모습은 Fig. 4와 같다.

3.3 상대거리 및 형상측정실험

형상측정실험을 위하여 3축 가이드 로봇을 사용하였다. 가이드 로봇의 Z축에 노즐과 레이저 거리 측정기를 장착할 수 있는 마운트를 제작하였다.^[8,9,10] 이 마운트 끝단에 장착된 레이저 거리 측정기는 원점 좌표로부터 Z축상으로 일정거리를 유지하며 지그재그 형태로 구동되면서 일정좌표마다 Z축방향으로 금형과의 상대좌표값을 측정한다. 이 좌표값을 연결하면 대략적인 금형의 표면 윤곽이 드러나며 각각의 좌표를 연결하는 직선은 노즐이 이송되는 tool-path로 사용된다.^[5,11] 대략적인 표면 윤곽을 tool-path로 사용할 수 있는 것은 액체호닝법으로 연마할 경우 노즐과 금형과의 거리가 2cm 떨어진 채로 가공되는 비접촉식이기 때문에 가능하다. 측정 대상물의 반사 정도에 따라 측정 정밀도가 영향을 받으므로 주위를 어둡게 한 후 실험하였다.

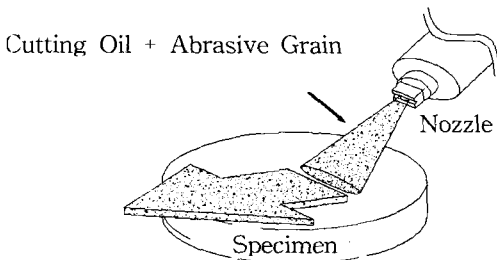


Fig. 5 System of spraying nozzle

3.4 표면조도 측정

표면조도는 접촉식 표면조도 측정기를 이용하여 연마된 시편의 표면조도를 측정하였다. 이 측정값은 액체호닝 실험에서 가공시간, 노즐 이송속도, 각도, 가공 압력 등의 가공변수를 달리하여 가공한 시편에서 임의의 세부분을 선택하여 20mm간격으로 R_{max}를 각각 세번 측정한다. 이 측정된 값을 평균한 평균값을 택하여 가공변수에 따른 표면조도의 변화 결과를 택하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 자동기계 개발

액체호닝 자동 연마기계의 기본 가공작업 순서는 Fig. 5와 같다. 자동기계에는 실험에서 도출된 최적 연마 조건들이 적용되었다. 가공기의 전체적인 외관은 머시닝 센터를 기본으로 삼았다.

가공 경로를 얻기 위해 레이저 변위 측정 센서를 이용해 금형의 3차원 형상 데이터를 얻었다. 노즐의 이송은 액체호닝 실험으로 밝혀진 결과를 자동기계 개발에 적용할 때 가장 고려해야 하는 부분이다. 자유곡면에 대하여 일정한 거리와 각도를 유지하며 노즐을 이송 후 가공하게 하여 정밀한 가공이 가능하게 하였다.^[12] 3축 가이드 운영 방식으로 기계의 서보드라 이브 3개와 Z축에는 서보모터를 설치하여 노즐의 각도를 조절하였다. 전체적인 운영을 위한

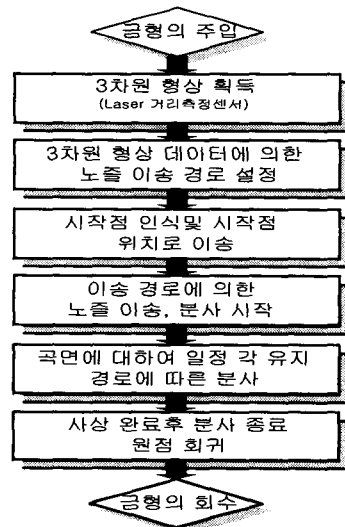


Fig. 6 Flow of die polishing processing

한 제어기는 기계의 운영에 적합하게 3축 가이드와 서보 모터 및 유압기의 제어를 수행하는 것으로 자체 제작한 프로그램에 의해 구동된다. 유압기는 펌프와 교반기를 포함하고 있는 탱크로 연마액을 약 200ℓ 저장할 수 있다. 연마액은 자동으로 회수가 가능하여 가공기의 캐빈(cabin) 내에서 자동으로 탱크에 흘러들도록 깔때기 모양으로 설계하였다.^[12,13]

4.2 레이저 형상 측정

레이저 거리측정기를 이용하여 일정 간격으로 금형의 표면을 측정하게 되면 X,Y,Z의 3차원 데이터를 측정해 낼 수 있다. 측정되어진 형상은 0.1mm 이하의 정밀도를 가지게 된다. 기존의 3차원 측정장비는 고가인데 비하여 이 레이저 측정기를 이용하게 되면 경제성을 가지면서 사상에 필요한 정확한 3차원 형상 데이터를 구할 수 있다. 측정되어진 데이터로 노즐의 가공경로를 생성하여 액체 호닝법을 이용한 연마 자동화 시스템에서 호닝 노즐의 가공경로로 사용하였다.

4.3 표면조도 분석

시편의 표면조도 분석은 시편 가공시 노즐의 이송 속도, 혼합비율, 연마입자의 크기에 따른 표면조도의 변화에 대하여 분석하였다.

Fig. 6은 혼합비율 10%, 연마분말의 크기가 8 μ m 일 때 이송속도에 따른 Al7075의 표면조도 변화 결과 값을 나타냈다. Fig. 7은 혼합비 10%, 연마분말의 크기가 8 μ m 일 때 SKD11의 경우이다. 분말의 크기를 8 μ m, 혼합비를 10%로 일정하게 했을 때 분사시간과 이송속도에 따른 표면조도의 영향을 살펴보면 Al7075의 경우 이송속도에 별다른 영향 없이 분사시간이 길수록 표면조도가 향상되는 경향이 있다. SKD11은 0.3m/min의 이송속도일 때 더욱 좋은 결과를 나타내었으나 1.2m/min일 때 역시 비슷한 결과가 나와 이송속도보다는 분사시간에 따른 가공에 의해서 표면조도의 정밀도가 좌우되는 것으로 보여진다. 20~30분 정도 분사 후 곡선이 완만해 지는 것으로 보아 30분 정도의 분사시간이 가장 효율적인 연마가공시간으로 여겨진다. Fig. 8은 혼합비율 5%, 연마분말 8 μ m인 Al7075, Fig. 9는 혼합비율 5%, 연마분말이 8 μ m인 SKD11의 이송속도에 따른 표면조도 변화값이다. 이때에도 10% 연마 때와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

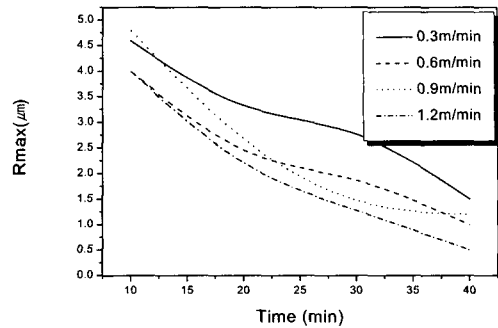


Fig. 7 Relationship between feed speed and spraying time (powder size - 8 μ m, mixing rate - 10%, material - Al7075)

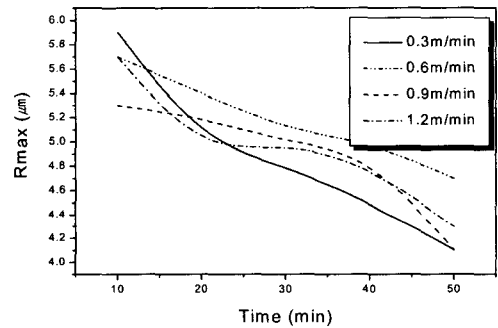


Fig. 8 Relationship between feed speed and spraying time (powder size - 8 μ m, mixing rate - 10%, material - SKD11)

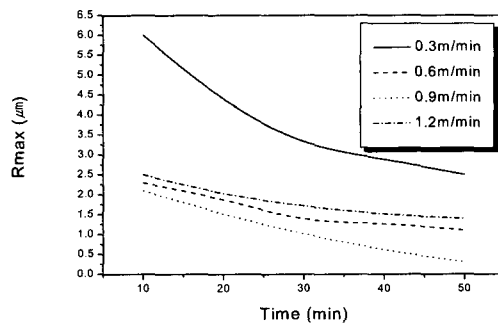


Fig. 9 Relationship between feed speed and spraying time (powder size - 8 μ m, mixing rate - 5%, material - Al7075)

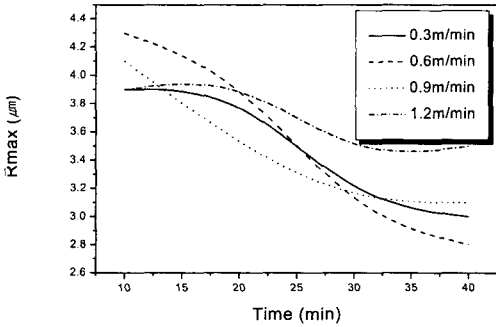


Fig. 10 Relationship between feed speed and spraying time (powder size - $8\mu\text{m}$, mixing rate - 5%, material - SKD11)

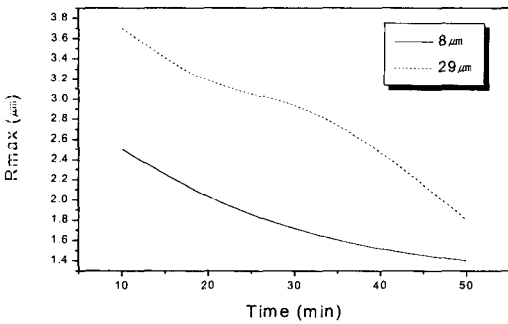


Fig. 11 Effect of powder size on surface roughness (material - Al7075)

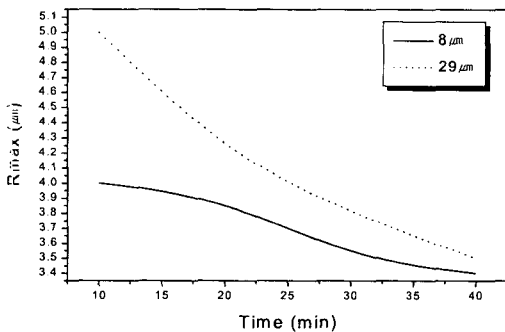


Fig. 12 Effect of powder size on surface roughness (material - SKD11)

Table 3 Optimal condition by liquid honing

기준면적 (100cm ²)	시간 (분)	혼합비 (%)	입자 (μm)	이송 (m/min)	분사 거리 (cm)	분사 각 ($^{\circ}$)
Al 7075	20~30	10	10	10	1~2	45
SKD 11	60	15	20	5~7	1~2	45

Fig. 6과 Fig. 8의 결과를 비교하면 이송속도를 1.2m/min으로 일정하게 했을 경우 혼합비와 분사시간과의 관계를 보면 Al7075의 경우 10%로 혼합한 경우의 초기 표면조도가 5%로 혼합한 경우보다 높았음에도 불구하고 40분 가공 후에 연마정도가 더욱 향상되었음을 보여준다. SKD11의 경우는 초기 표면조도가 상당히 차이가 있으나 그 감소 폭을 분석하면 역시 5% 혼합비를 갖는 경우보다 10%의 경우가 더 좋은 결과를 가져왔다. 혼합비를 높일수록 연마효과가 좋아지지만 펌프시스템과 노즐의 마모를 고려해서 10% 내외가 가장 적당한 혼합비로 판단되었다.

Fig. 10과 Fig. 11은 Al7075와 SKD11의 연마입자와 가공시간에 따른 조도 변화이다. 이 두 재료에 분말크기 $29\mu\text{m}$ 와 $8\mu\text{m}$ 를 사용한 경우를 비교하면 $29\mu\text{m}$ 분말이 짧은 시간에 표면조도를 향상시키는 것을 알 수 있었다. 그러나 $29\mu\text{m}$ 분말로 연마할 경우 표면조도를 낮추는 데 한계가 있었다. 효과적인 연마를 위해선 먼저 $29\mu\text{m}$ 분말로 거친 연마를 한 후 $8\mu\text{m}$ 분말로 다듬질하는 것이 최적의 방법이였다. 연질 재료 경우에는 입자의 크기를 늘리는 것이 역효과의 가능성이 있으므로 $10\mu\text{m}$ 이내의 입자를 사용하는 것이 바람직하였다. SKD11의 경우에는 좀더 경질의 분말을 사용하면 보다 정밀한 표면조도를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다. 실험에 의한 최적 연마조건을 Table 3에 나타내었다.

4.4 연마 가공효율

가공된 시편(재료:Al7075, 면적: 7854mm^2)을 경면에 가까운 $0.5\mu\text{m}$ 의 표면조도로 가공하는 시간은 약 30분이 소요되었다. 수작업에 의한 1.5ℓ 펌트병급형(재료:Al7075, 면적:약 41000mm^2)을 경면 가공하는 데 소요되는 시간(동아금형(주)의 숙달된 기능인 기준)은 약 12시간 이다. 결국 자동사상은 수작업보다 약4.6배의 가공효율을 가지고 있었고, 이 수치값은 표면 형상에 따라서 조금씩의 차이는 있으나 대략적

인 가공기의 높은 가공 효율성을 입증하였다.

5. 결론

[1] 레이저 거리 측정기에 의한 자동금형 형상측정 시스템과 액체호닝에 의한 연마 시스템 그리고 적정 가공 변수를 입력한 자동 프로그램으로 자동 금형 사상 연마기계를 개발 하였다.

[2] 액체 호닝연마 가공에서 AI7075는 최대 $0.5\mu\text{m}$ 의 표면 조도를 얻을 수 있었다. 이 값은 공업적 의미에서 경면이라 칭하는 $0.1\mu\text{m}$ 의 표면조도 값에 접근하는 값이다. SKD11는 최대 $1.4\mu\text{m}$ 의 표면 조도를 얻었다.

[3] 연마변수에서 가장 큰 영향을 미치는 연마변수는 분사시간이다. 적정 분사시간을 넘으면 분말에 의한 스크래치가 발생하여 분사 시간에는 한계가 있었다.

[4] 굵은 분말로 거친 연마를 한 후 고운 분말로 마무리 다듬질을 하는것이 가장 효율적이고, 거칠기가 $1\mu\text{m}$ 이내에 도달한 후 입자 크기를 낮추어 가공하는 것이 필요하다.

후기

본 연구는 "1999년도 인하대학교 연구 진흥비" 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 이두찬 외 2인, 三好隆志, "자동 금형 연마의 최적조건 선정 전문가 시스템 개발," 한국정밀공학회지 제14권, 제10호, pp. 58~67, 1997.
2. 정재현 "금형 곡면의 연마가공 시스템," 부산대학교 ERC 연구 결과 보고서, 1995.
3. 한국 기계연구원, "사상용 로봇 개발," 한국과학기술처, pp. 22~29, 1989.
4. 한국과학기술연구원, "로봇트를 이용한 금형의 연마작업 자동화 연구," 제2차년도 연차 보고서, pp. 13~24, 1990.
5. 김봉채, "He-Ne레이저와 CCD카메라를 이용한 비접촉 3차원 측정기 개발," 인하대학교 석사학위논문, 1997.
6. 백남주 외, "최신 공작기계," 文運堂, pp. 28

- 3~377, 1996.
7. 김정두, "초정밀 기계산업의 현황과 응용전략," 월간 금형저널, pp. 40~49, 1995.
8. 류병렬, "최신 금형 제작기술," 기전 연구사, pp. 52~61, 176~193, 1989.
9. Chi-Tsong Chen, "Linear system theory and design," Oxford univ. pp. 70~125, 1984.
10. Norman J. Brown. "Lapping : Polishing and Shear Mode Grinding," JSPE-56-05, pp. 24~29, 1990.
11. 이민석, "금형 연마작업을 위한 5축 CAM 시스템 개발," 한국과학기술처, 1993.
12. Rusinoff, "Manufacturing Process," American Technical Society, pp. 1~8, 103~130, 212~245, 592~637, 1963.
13. 백대균 외 2인, "정면밀링 작업에서 절삭력을 이용한 On-Line 표면 조도 감시에 관한 연구," 한국정밀공학회지 제14권, 제01호, pp. 185~192, 1997.
14. 이지환 외 3인, "비철금속재료," 원창 출판사, pp. 105~149, 1995.
15. 류기덕, "액체 호닝에의한 금형 사상 자동기계 개발," 대한기계학회 추계학술대회논문집, 1998.
16. 강성철, 외 2인, "금형 연마작업을 위한 로봇 오프라인 프로그래밍 시스템의 개발 및 적용," 한국정밀공학회지 제14권, 제1호, 1997.
17. 고석조, "머시닝센터 장착형 연마 로봇의 성능 향상 및 성능 평가," 대한기계학회 춘계학회 논문집, pp. 589~594, 1998.
18. 최태주, "최신 금형 공작법," 기전 연구사, pp. 21~30, 49~78, 101~116, 1993.
19. 김남훈, 최종순, "알기 쉬운 금형," 기전 연구사, pp. 105~133, 1988.
20. 서남섭, "최신 정밀공작법," 大光書林, pp. 1~309, 370~440, 1996.
21. 김홍배, 김기수, 남궁석, "마이크로 연마필름을 이용한 경면 가공 시스템에 관한 연구," 한국정밀공학회지 제14권, 제10호, pp. 68~80, 1997.
22. 佐佐木哲夫, 三好降志 他2名, "金型研き 作業の知識獲得と自動化に關す研究(第2報)- 金形研きエキスパートシステム," 精密工學會誌, Vol. 57, No. 12, pp. 2151~2156, 1991.