

자유곡면의 정압연마에 관한 연구

조종래⁺, 정윤교^{*}

(논문접수일 2005. 11. 29, 심사완료일 2006. 1. 12)

A Study on Hydro-Static Polishing for Sculptured Surface

Jong Rae Cho⁺, Yoon Gyo Jung^{*}

Abstract

The finishing process of die requires the processing technique of a height efficiency and precision. Because the precision of die gives the quality of goods the influence directly. The hydro-static polishing device employs the hydro-static axis and is able to polish the structure of complex picture under the constant pressure and is got constant surface roughness at all polished plane. Therefore, In order to polish precision sculptured surface, it was used the hydro-static polishing device. Polishing device's polishing characteristic is estimated by polishing conditions which are size of abrasive, material of tools. And, because the surface quality of workpiece depends on polishing pattern which relates to motion of abrasive grain. The polishing characteristic according to polishing pattern was evaluated.

Key Words : Die(금형), Hydro-static polishing(정압연마), Polishing pattern(연마패턴), Surface roughness(표면거칠기), Sculptured surface(자유곡면)

1. 서론

최근 소비자의 다양한 요구에 따라 제품이 소형화, 다기능화, 정밀화하고 있어 제품생산의 필수적인 도구로 사용되는 금형도 복잡해지고 정밀성이 강조되고 있다. 금형의 정밀도는 제품의 품질에 직접적으로 영향을 주기 때문에 금형의 최종다듬질 가공은 고능률, 고정밀의 가공기술을 필요로 한다. 그러나 금형의 제조공정에 있어서 다듬질 가공은 대부분 수

련된 기능공의 감각과 경험에 의존하고 있을 뿐만 아니라 수작업으로 이루어지고 있다. 공작기계를 이용한 다듬질 작업의 자동화에 대한 연구⁽¹⁻³⁾가 활발히 연구되어져 왔지만 모서리나 좁은 홈 및 자유곡면 등 자동다듬질이 곤란한 부위들은 여전히 사람에 의해 다듬질할 수밖에 없어, 다듬질 가공의 자동화에 걸림돌이 되고 있다.

정압연마장치는 정압주축을 채용하여 복잡한 형상의 공작물도 일정한 압력으로 연마할 수 있고, NC 수치제어와 로봇의

⁺ 창원대학교 대학원

^{*} 창원대학교 기계공학과 (ygjung@changwon.ac.kr)
주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지

티칭기술이 조합된 HMI(Human Machine Interface)기술이 적용되어 비숙련자도 공구경로를 쉽게 생성할 수 있고, 또한 다양한 형상의 공구를 사용할 수 있어 모서리나 좁은 홈 및 자유곡면을 자동 다듬질할 수 있을 뿐만 아니라, 공압을 이용하여 정압을 유지하며 연마하기 때문에 연마하는 모든 면에 일정한 표면거칠기를 얻을 수 있다⁽⁶⁾. 연마는 공구와 공작물사이의 연마입자의 상대운동에 의해 공작물을 미소하게 절삭하는 가공법이므로 연마입자의 상대운동 형태에 따라 연마면의 품위가 달라지므로 정압연마에 있어서 연마입자 상대운동 형태에 따른 연마특성을 고찰할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 정압연마장치로 자유곡면을 정밀 연마하기 위해, 연마입자의 크기, 연마공구의 재질, 연마패턴 등 연마조건에 따른 정압연마장치의 연마특성을 평가하였다.

2. 정압연마 장치 및 실험방법

2.1 정압연마장치

실험장치는 화인ATC(주)에서 제작한 연마장치로 정압주축을 채용하여, 요철이 심한 자유곡면도 일정한 연마압력으로 연마할 수 있다. Fig. 1은 정압주축에 의한 정압연마 기구를 나타낸 그림이다. 그림과 같이 공작물의 요철이 주축의 여유프로크 내에 있으면, 설정공구경로가 직선운동을 하여도 실제공구경로는 공작물의 복잡한 형상을 추종하게 된다. 이러한 정압특성에 의해 복잡한 단면의 공작물도 XY운곽 데이터만으로도 공구경로를 생성할 수 있고, 모든 공작물 표면에 일정한 연마압력으로 연마하므로 일정한 표면거칠기를 얻을 수 있다.

Fig. 2는 정압연마장치 사진으로, 그림과 같이 정압주축이 채용되어 있고, 주축의 X축, Y축, Z축의 이동과 테이블의 회전, 공구의 틸팅 등 5축 제어가 가능하여 3차원 자유곡면 및 복잡한 형상의 공작물도 정압연마할 수 있다. 또한 주축의 최대 이송속도가 20,000mm/min이며, 회전공구 및 비회전공구 등 다양한 형태의 연마공구를 사용할 수 있다. 정압연마장치의 사양은 Table 1과 같다.

2.2 연마패턴의 생성

연마는 공구와 공작물 사이에 연마입자의 상대운동에 의해 공작물을 가공하는 것으로 연마입자의 상대운동 형태 즉 연마패턴에 따라 공작물의 표면품위가 달라지므로, 정압연마에 있어서 연마입자의 상대운동 형태에 따른 연마특성을

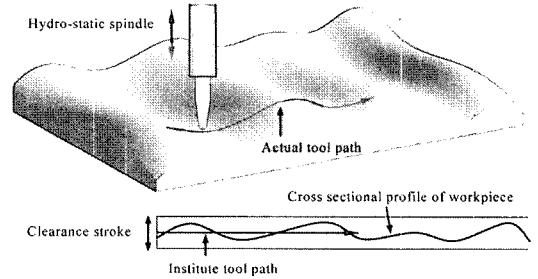


Fig. 1 Schematic diagram of hydro-static polishing

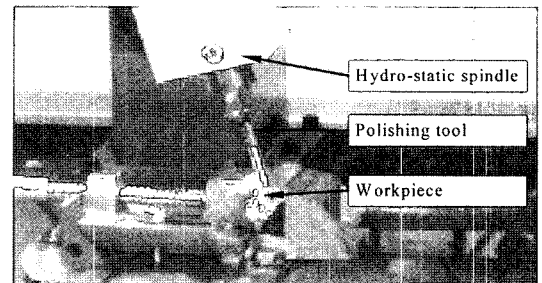


Fig. 2 Photograph of hydro-static polishing device

Table 1 Specifications of hydro-static polishing device

Items	Specifications
Axis	5 axis control
Axis stroke	x axis : 550 mm y axis : 390 mm z axis : 250 mm B axis : 110°
Table type	Rotational table(φ530mm)
Polishing pressure	Max 5kgf(hydro-static)
Clearance stroke	50 mm
Max. speed	20,000mm/min

고찰할 필요가 있다. 그러나 본 정압연마장치로는 다양한 연마패턴의 생성이 곤란하여 연마패턴생성을 위해 XY 스테이지를 제작하였다.

Fig. 3은 제작된 XY 스테이지의 사진이며, 각축은 반복정밀도 ±0.02mm인 알파 로보틱스사의 볼스크류구동형로봇을 사용하여, 정확하고 다양한 동작을 수행할 수 있도록 하였다. XY 스테이지의 각축은 X축 위에 Y축이 올려져 있어,

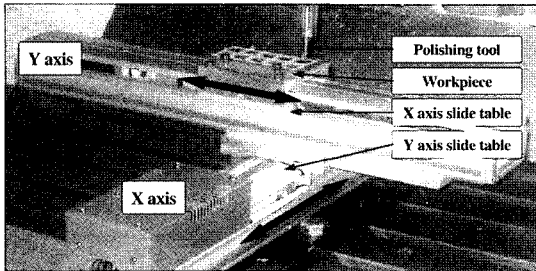


Fig. 3 Photograph of XY stage system

Table 2 Specifications of XY stage system

Items	Specifications
Drive type	Ball screw, LM guide
Motor	AC servo motor, 3,000rpm x : 200W, y : 100W
Stroke	x : 200mm, y : 200mm
Speed	30,000mm/min
Max. load	x : 38(H), 16(V)kgf y : 24(H), 7(V)kgf
Repeatability	±0.02mm
Motion controller	MCU-MP2

X축이 Y축의 무게와 연마압력을 견딜 수 있도록 X축과 Y축의 모터동력과 슬라이드 테이블형식을 달리하였으며, 각축의 끝단에 리미트스위치를 두어 장치를 보호하도록 하였다. 각축의 스트로크는 200mm로 하여 충분한 작업공간을 확보하도록 하였고, 최대 속도는 500mm/sec 이며, XY 스테이지의 사양은 Table 2와 같다.

2.3 실험조건

정압연마장치로 자유곡면을 정밀연마하기 위해, 먼저 연마조건에 따른 정압연마장치의 연마특성을 분석하였다. 공작물 표면의 정밀도와 품질에 영향을 미치는 연마조건은 연마속도, 연마압력, 연마공구의 재질, 연마입자의 종류와 크기, 연마슬러리의 양, 연마패턴 등이 있으며, 본 실험에서는 연마입자의 종류와 크기, 연마슬러리의 양, 연마공구의 재질과 연마패턴에 따른 연마특성을 연마면 거칠기를 측정하여 분석하였다.

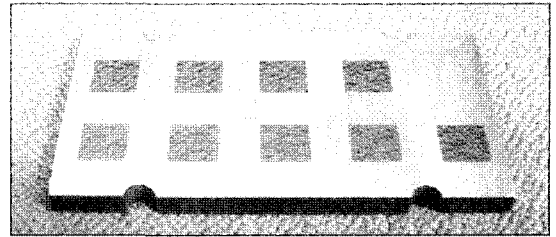


Fig. 4 Shape of workpiece(100×50×6mm)

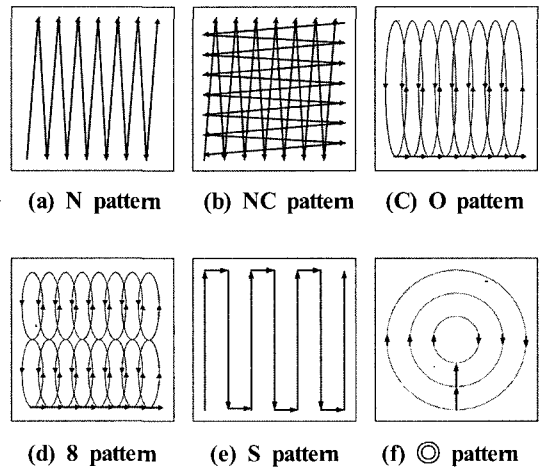


Fig. 5 Polishing patterns

실험에 사용된 연마슬러리는 Struers사의 제품으로 윤활제와 다이아몬드 입자가 혼합된 제품으로, 입자크기가 1 μ m, 3 μ m, 6 μ m인 제품을 사용하였다. 연마공구는 3차원 형상부품이나 자유곡면의 연마에 적합하도록 공구끝단이 뾰족하게 제작하였고, 공구재질은 주철, 청동, 황동, 나무로 되어있다. 공작물은 합금공구강(STD11)을 열처리한 후 연삭하여 일정한 표면거칠기를 갖게 하여, 공작물의 초기 표면거칠기가 연마면 거칠기에 미치는 영향을 최소화하였으며, 공작물의 형상은 Fig. 4와 같다. 연마패턴은 평면, 경사면, 구면, 자유곡면 등 모든 면에서 적용할 수 있어야 하며, 연마스크레치를 남길 수 있는 일정한 방향성을 가지는 연마패턴보다는 임의의 방향과 불규칙한 방향의 연마패턴 생성이 중요하며, 본 실험에 사용된 연마패턴은 Fig. 5와 같이 N패턴, NC패턴, O패턴, 8패턴, S패턴, ◎패턴 등 총 6종이다. 연마조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Experimental conditions

Items	Conditions
Workpiece	STD11(HRc 61)
Polishing tools	Cast iron, Bronze, Brass, Wood
Polishing slurry	Diamond 1 μ m, 3 μ m, 6 μ m
Polishing speed	3,000mm/min, 13,000mm/min
Pitch	0.1mm, 0.2mm
Polishing pressure	25~30N
Polishing pattern	6type(N, NC, O, 8, S, ◎)

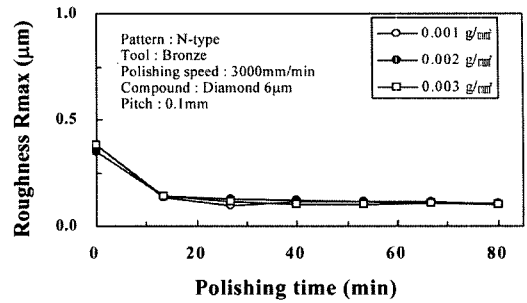
3. 연마조건에 따른 연마면 거칠기

3.1 연마슬러리의 공급

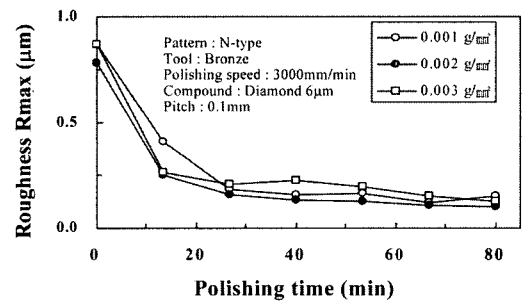
연마는 연마슬러리에 함유된 연마입자가 공작물 표면을 가공하는 것으로 연마슬러리의 공급량에 따라 연마에 관여하는 입자수가 달라지므로, 연마슬러리의 공급량에 따른 연마특성을 고찰하여 적절한 연마슬러리 공급량의 결정은 필수적이다.

Fig. 6은 다이아몬드 6 μ m의 연마슬러리를 0.001g/mm², 0.002g/mm², 0.003g/mm²로 각각 공급했을 때, 연마시간에 따른 연마면 거칠기의 변화를 나타낸 그림으로, Fig. 6의 (a), (b)는 각각 수평방향 거칠기와 수직방향 거칠기이다. Fig. 6 (a)의 수평방향 거칠기는 연마슬러리의 공급량 변화에 따른 거칠기 변화는 적었으나, Fig. 6 (b)의 수직방향 거칠기는 연마슬러리의 공급량에 따라 거칠기에 차이가 나타났고, 공급량이 0.002g/mm²일 때 거칠기가 양호하였다. 따라서 이후 실험에서는 연마슬러리 공급량을 0.002g/mm²로 실험하였다.

연마입자는 시간이 경과할수록 마모되거나 파쇄되어 연마성능을 상실하게 된다. 이때 연마성능을 상실한 연마입자를 제거하고 새로운 연마입자를 공급하였을 때, 연마면 거칠기의 변화를 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 7에서 슬러리 No change(●)는 초기에 공급된 연마입자가 연마성능을 상실할 때까지의 연마면 거칠기의 변화는 나타낸 결과이며, 여기서 17분 이후에 연마면 거칠기가 향상이 둔화되어 연마슬러리 교환시기로 결정하였다. 슬러리 Change(○)는 초기 공급된 연마슬러리를 연마슬러리 교환시기로 결정된 17분경에 제거하고 연마슬러리를 재공급하였을 때, 연마면 거칠기의 변화를 나타낸 결과이다. 그림에서 재공급 이후 오히려 연마면의 거칠기가 악화된 것으로 나타났는데, 이는 연마



(a) // roughness Rmax



(b) ⊥ roughness Rmax

Fig. 6 Roughness according to polishing slurry amount

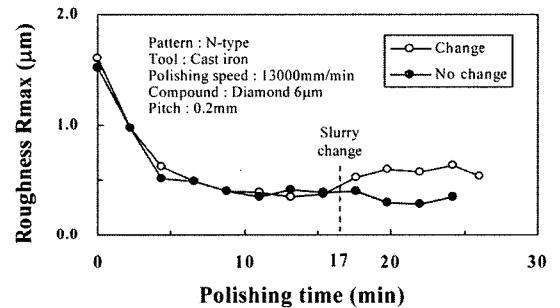


Fig. 7 Roughness according to polishing slurry exchange

시간이 경과함에 따라 연마입자가 파쇄되어 작은 입자로 되고, 작은 입자들이 연마에 관여하여 좋은 연마면을 창성하게 되는데, 작은 입자로 창성된 연마면을 큰 입자가 긁어버리기 때문이라 생각된다.

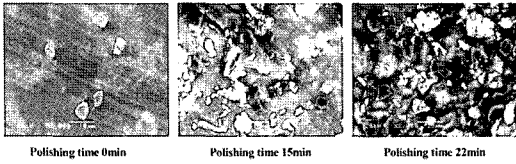


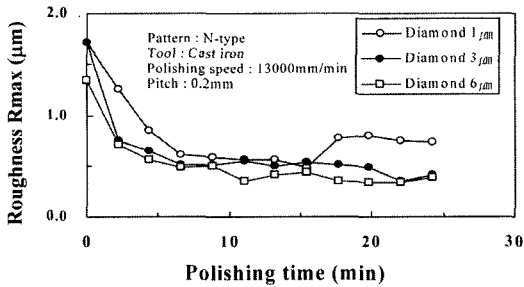
Fig. 8 Photograph of polishing slurry according to polishing time

Fig. 8은 연마시간에 따른 연마입자의 변화를 전자현미경으로 관찰한 사진으로, 초기 6 μ m 연마입자가 시간에 경과함에 따라 파쇄되어 작은 입자로 변화함을 관찰할 수 있다.

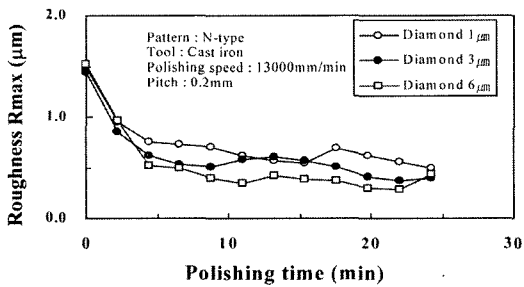
따라서 이후 실험에서는 연마슬러리의 재공급 없이 공급량 0.002g/mm²로 실험하였다.

3.2 연마입자의 크기

연마입자의 크기에 따라 입자의 연마성능 지속시간이 달라지므로 연마입자의 크기에 따른 연마특성을 분석하였다.



(a) // roughness Rmax

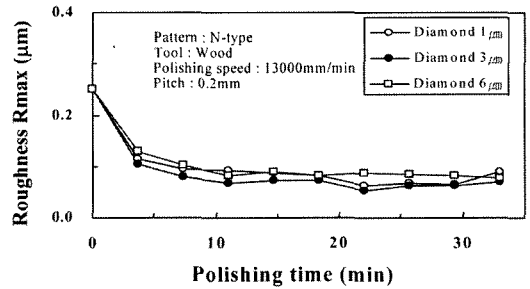


(b) ⊥ roughness Rmax

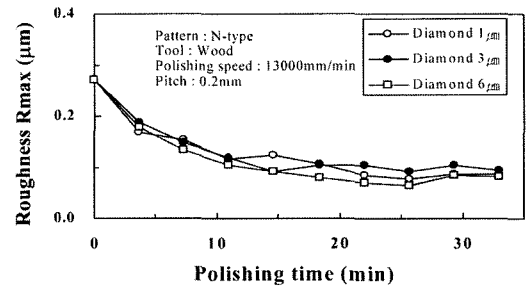
Fig. 9 Roughness according to polishing compound size (cast iron tool)

Fig. 9는 주철공구로 연마슬러리의 입자크기가 1 μ m, 3 μ m, 6 μ m일 때, 연마시간에 따른 연마면 거칠기의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 9의 (a), (b)는 수평방향 거칠기와 수직방향 거칠기이며, 그림에서 다이아몬드 6 μ m 연마입자로 연마할 때 연마면 거칠기가 양호하였는데, 이는 초기 연삭마크의 제거에 큰 연마입자가 효과적이고, 연마할수록 입자가 파쇄되어 세립화하여, 작은 입자가 연마면에 관여하여 더욱 양호한 연마면을 생성하기 때문이다. 그러나 다이아몬드 1 μ m, 3 μ m 입자의 경우는 입자크기가 작아서 연삭마크의 제거에 많은 연마시간이 소요되고, 입자의 연마성능을 빨리 상실하여 다이아몬드 6 μ m 입자에 비해 연마면이 불량하였다.

나무공구는 연마스크래치 제거에 적합한 공구이므로, 연삭된 공작물 표면을 주철공구로 먼저 연마하여 표면거칠기 Rmax 0.3 μ m까지 향상시킨 시편으로 연마입자 크기에 따른 연마특성을 관찰하여 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10의 (a), (b)는 수직방향 거칠기와 수평방향 거칠기로, 수평방향 거칠기에서는 다이아몬드 3 μ m입자로 연마한 경우가 연마면 거



(a) // roughness Rmax



(b) ⊥ roughness Rmax

Fig. 10 Roughness according to polishing compound size (wood tool)

칠기가 양호하고, 수직방향 거칠기에서는 다이아몬드 6 μ m 입자로 연마한 경우가 양호하지만 입자크기에 따른 연마면 거칠기의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

따라서 본 실험조건에서는 다이아몬드 6 μ m 연마입자로 연마하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

3.3 연마공구의 재질

연마공구와 공작물 사이의 연마입자의 운동은 연마공구에 꽃혀 이동하거나 회전하게 되는데, 연마공구의 재질에 따라 공구에 꽃히는 입자와 회전하는 입자의 분포가 다르게 되므로, 연마공구의 재질에 따른 연마특성을 분석하였다. 연마공구의 재질은 주철, 청동, 황동 및 나무로 각각의 경도(HRC)는 주철 24.6, 청동 15.8, 황동 8.3이며, 연마공구의 재질에 따른 연마결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 11은 주철, 청동, 황동 등 금속공구의 연마시간에 따른 연마면 거칠기의 변화를 나타낸 그림으로, Fig. 11의 (a), (b)는 수평방향 거칠기와 수직방향 거칠기이다. 그림에서와 같이 수직방향 거칠기와 수평방향 거칠기 모두 청동공구로 연마할 때, 연마면 거칠기도 양호하였으며, 입자수명도 다른 공구에 비해 길었다.

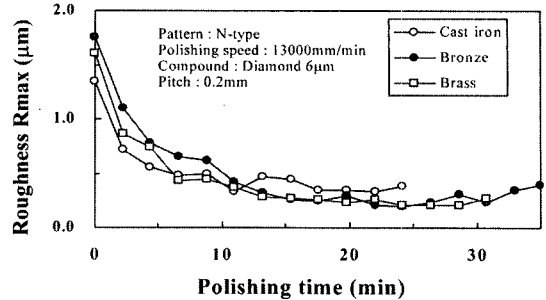
Fig. 12는 나무공구로 연마한 결과로 연마시간이 경과할수록 연마면 거칠기는 향상되지만 금속공구에 비해 많은 시간이 소요된다. 따라서 연삭후의 거친면 제거는 청동공구로 연마하는 것이 효과적이고, 나무공구는 금속공구의 사용으로 발생된 연마스크레치 제거에 효과적이라 생각된다.

4. 연마패턴에 따른 연마면 거칠기

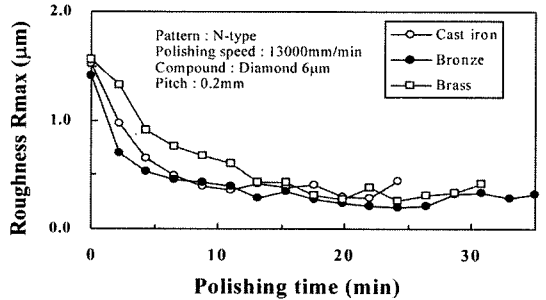
4.1 청동공구에 의한 연마

연마입자의 상대운동 형태인 연마패턴에 따라 연마면의 표면 품질이 다르므로 연마패턴에 따른 연마면 거칠기를 측정하여, 정압연마에 적합에 연마패턴을 결정하고자 한다. 연마패턴 실험의 연마조건은 앞장에서 연마면 거칠기가 양호한 연마조건인 연마슬러리 0.002g/mm³, 입자크기 6 μ m, 청동공구로 선정하였고, 연마패턴은 Fig. 5와 같이 6종의 패턴으로 실험하였다.

Fig. 13은 6종의 연마패턴으로 연마했을 때, 연마시간에 따른 연마면 거칠기의 변화는 나타낸 그림으로 Fig. 13의 (a), (b)는 수평방향 거칠기와 수직방향 거칠기이다. Fig.13(a)의 수평방향 거칠기에서는 NC패턴의 연마면 거칠기가 가장 양호하였고, Fig. 13(b)의 수직방향 거칠기에는 30분까지는



(a) // roughness Rmax



(b) ⊥ roughness Rmax

Fig. 11 Roughness according to metal polishing tools

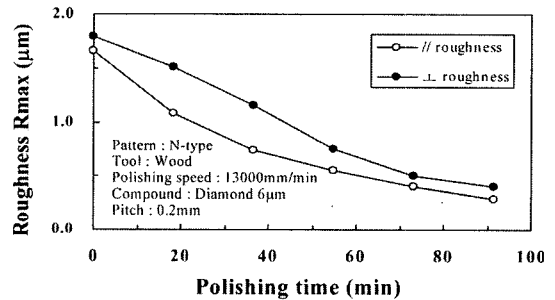


Fig. 12 Roughness according to wood polishing tool

N패턴의 연마면 거칠기가 양호하였으나 40분 이후에는 NC패턴이 양호하였다. 이는 N패턴의 경우 공구경로가 한 방향으로 이동하기 때문에 연삭마크 제거에는 효과적이거나, 연마시간이 경과함에 따라 단순한 공구경로로 인해 연마스크레치를 남겨 연마면 거칠기 향상이 둔화되는데 반해, NC패턴은

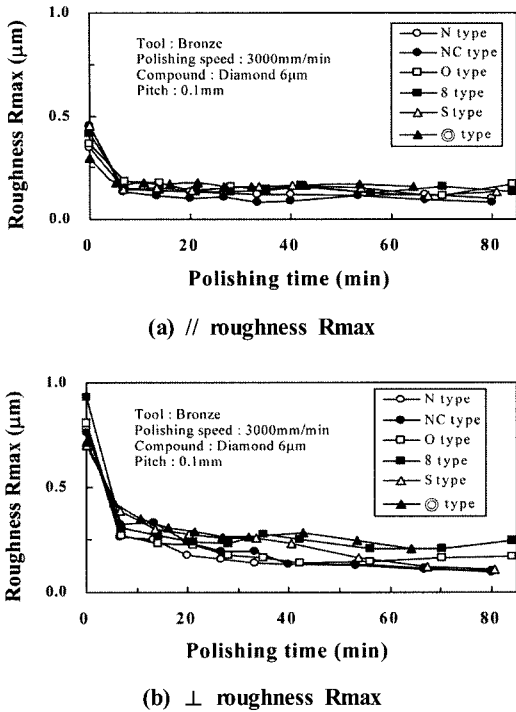


Fig. 13 Roughness according to polishing patterns (bronze tool)

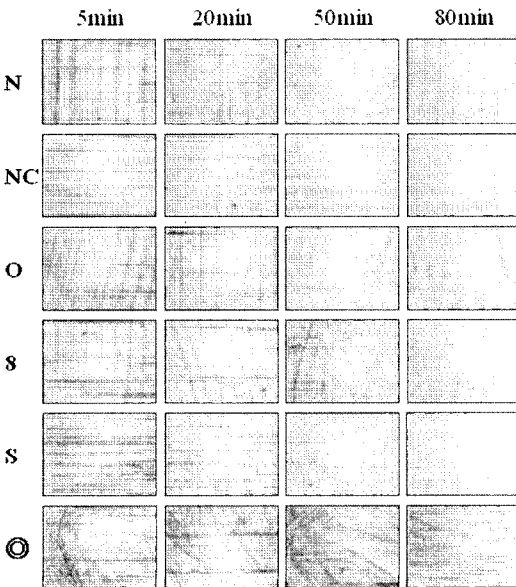


Fig. 14 Photograph of polished plane (bronze tool, x60)

공구경로가 서로 교차하기 때문에 초기의 연삭마크 제거에는 부적절하지만 교차하는 공구경로로 인해 연마스크레치 발생을 억제하여 연마면 거칠기가 양호한 것으로 생각된다. 이러한 결과는 Fig. 14의 연마면을 현미경으로 관찰한 결과에서도 확인할 수 있는데 N 패턴의 경우 연마시간이 경과할수록 연마스크레치가 뚜렷해지는 반면, NC패턴은 연마스크레치 발생이 적었다.

이외의 O패턴, 8패턴, S패턴, ◎패턴은 NC패턴과 N패턴에 비해 연마면 거칠기가 불량하였다.

따라서 청동공구에 의한 연마에서, 한 개의 공구로 연마작업을 완료한다면 NC패턴이 효과적이며, 연삭마크 제거이후 나무공구를 사용하여 더욱 양호한 연마면 거칠기를 얻고자 한다면 N패턴을 선택하는 것이 경제적이라 생각된다.

4.2 나무공구에 의한 연마

나무공구에 의한 연마특성을 평가하기 위해 공작물 표면을 청동공구로 연마하여 Rmax 0.2μm내외의 표면거칠기로 만든 다음 연마실험을 수행하였다. 연마조건은 청동공구와 동일한 조건으로 하였고, 연마결과는 Fig. 15에 나타났다.

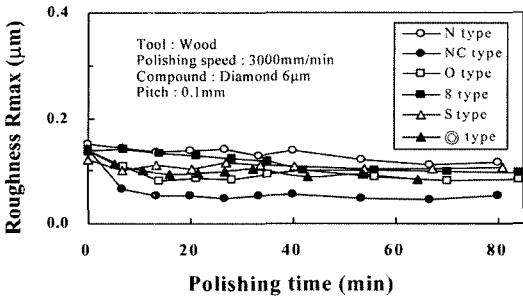
Fig. 15의 (a), (b)는 수직방향 거칠기와 수평방향 거칠기이다. 그림에서 NC패턴이 수평방향 거칠기와 수직방향 거칠기 모두에서 가장 양호하였는데, 이는 NC패턴의 공구경로가 서로 교차하기 때문에 연마스크레치 발생을 억제하기 때문이며, Fig. 15(b)의 수직방향 거칠기에서 N패턴, 8패턴, S패턴, ◎패턴의 경우 연마면거칠기 향상이 적었는데, 이는 공구경로가 한 방향으로 일정하여 연마스크레치가 쉽게 발생하기 때문이다. Fig. 16은 나무공구로 연마한 연마면을 현미경으로 관찰한 결과로 NC패턴의 경우가 연마면이 가장 우수하였으며, N패턴, 8패턴, S패턴은 많은 연마스크레치가 발생함을 보여주고 있다.

따라서 나무공구의 경우는 NC패턴으로 연마하면 양호한 연마면을 얻을 수 있다.

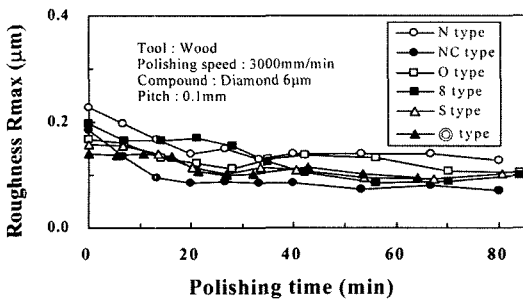
5. 결론

정압연마장치로 자유곡면을 정밀연마하기 위하여 연마조건에 따른 연마면 거칠기를 측정하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 정압연마장치에 적합한 연마공급량 및 연마공급 방식을 결정하였다.
- (2) 본 실험조건에서는 다이아몬드 6μm 연마입자로 연마할



(a) // roughness Rmax



(b) ⊥ roughness Rmax

Fig. 15 Roughness according to polishing patterns (wood tool)

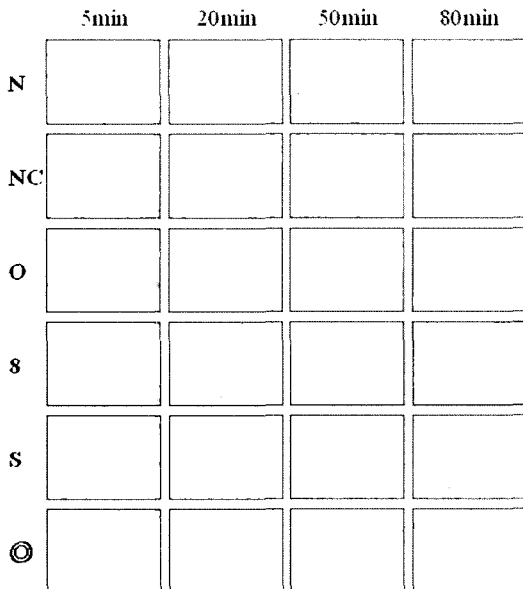


Fig. 16 Photograph of polished plane (wood tool, x60)

경우 연마공구의 재질에 관계없이 양호한 연마면을 얻을 수 있었다.

- (3) 연마공구의 재질이 연마면 거칠기에 미치는 영향을 분석한 결과, 연삭마크 제거에는 청동공구가 효과적이고, 연마스크래치 제거에는 나무공구가 효과적이었다.
- (4) 연마패턴에 따른 연마면 거칠기와 연마면 성상을 관찰한 결과, 연삭마크 제거에는 N패턴이, 최종마무리 연마에는 NC패턴이 효과적인 것으로 나타났다.

후기

본 연구는 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원 및 2005년도 창원대학교 연구비의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Chung, S. C., Kuk, K. H. and Choi, G. B., 1991, "Development of off-line Robot Task Programming System for Polishing Process of Sculptured Surface," *Journal of KSPE*, Vol. 8, No. 4, pp. 84~94.
- (2) Park, G. M., Jang, J. H. and Han, C. S., 1994, "Development of the Automatic Fine Polishing System," *Autumn Conference on KSPE*, pp. 389~394.
- (3) Lim, D. J., Jeong, H. D., Ahn, J. H. and Ahn, G., 2000, "Improvement of Form Accuracy in Curved Dies and Molds Using Compensation of Finishing Tool," *Spring Conference on KSPE*, pp. 866~869.
- (4) Park, J. M. and Jeong, H. D., 1998, "A Study on the Intergrated Finishing Characteristics for Dies and Molds," *Journal of KSPE*, Vol. 15, No. 2, pp. 14~20.
- (5) Park, S. M., An, J. S., Song, M. S., Kim, J. H. and Ryuh, B. S., 2003, "The Development of Automatic Tool Change System for Polishing Robot and Windows-Environment Intergration Program for Application," *Journal of KSPE*, Vol. 20, No. 7, pp. 147~154.
- (6) Jung, Y. G., Cho, J. R., Yoon, S. D. and Kim, N. K., 2004, "A Study on the Improvement of Polishing Surface Roughness using Polishing Machine with Constant Pressure," *Proceeding of the KSMTE Autumn Conference*, pp 139~144.