

점탄성연마재 개발 및 전해가공특성에 관한 연구 (A Study on the Development of Nonwoven Abrasive Pads and Characteristics of Electrolytic Machining)

김정두 · 서언맹* (한국과학기술원 기계공학과)
Jeong-Du Kim and Yan-meng Xu* (KAIST)

ABSTRACT

The requirement of precision products about difficult-to-cut materials such as Cu and Aluminium alloy is becoming more and more. Because of soft materials, the exist narrow grooves on surface are difficult to gotten off even on the polishing stage. It has been proved that Magnetic-Electrolytic-Abrasive Polishing (MEAP) is a efficient method to resolve this problem by using the nonwoven-abrasive pads together [1, 2]. In this study, through the experiments, their machining properties of newly developed polishing material of SiC, Al₂O₃ and diamond nonwoven abrasive pads have been proved. Through the experiments, the optimal machining conditions on larger cylinder shape workpiece of Cu and Aluminium alloy have been found, through the Taguchi[3] method the optimal machining conditions can be selected.

1. 서론

최근의 초정밀 가공기술은 다종의 에너지를 복합화함으로써 새로운 정밀가공공정을 추구하고 있으며, 이것은 고능률, 고정밀가공의 양산화를 실현하고 제품의 품질을 대폭 개선하고자 하는 산업사회의 요구를 기존의 가공법으로는 만족시키기 어렵기 때문이다. 국내에서는 최근 기존의 전해가공공정에 자기장을 인가하며 전해이온의 운동을 다원화시켜 가공능률을 향상시킨 자기전해가공 기술이 많은 실험을 통해서 Cr코팅 롤러등의 경면가공에 대하여 매우 효과적인 방법임이 증명되었다.

동, 알루미늄합금등의 정밀품에 대한 수요가 급증하고 있다. 이와 같은 연질재료를 고품질 마무리 가공할 때는 공작물에 좁은 흠이 발생하기 때문에

공작물의 표면거칠기가 악화되어, 공작물 표면에 존재하는 찰상을 줄이기 어렵게 된다. [4] 이러한 연질재료에 화학반응을 기초한 자기전해원리와 점탄성연마재를 적용하면, 일반적인 기계가공의 단점을 극복할 수 있으며 표면 손상이 없는 경면을 얻을 수 있을 것으로 사료된다. [5,6]

따라서 본 연구에서는 원통형상의 동, 알루미늄합금과 같은 연성재에 대한 자기전해 경면가공 실험을 통하여 자기전해 가공공정특성을 분석하고 다꾸지 방법을 이용한 경면연마가공의 최적 조합을 도출한다.

2. 점탄성연마재의 개발

2.1 점탄성연마재의 구조 및 제작

점탄성 연마재는 자기전해연마(MEAP) 시스템에 이용되는 절삭재로서 전해공정에 의해 공작물 표면에 생성된 얇은 절연 피막을 제거시켜 전해가공은 연속적으로 일어나도록하게 하는 중요한 역할을 한다. 점탄성 연마재의 성질상 점탄성이 있기 때문에 부가적인 가공스크래치(scratch)를 남기지 않으므로 경면가공이 가능하게 된다. 따라서 점탄성 연마재는 반드시 점탄성을 갖고록 제작되어야 하며 필요한 압력을 가할 수 있도록 적절한 두께로 제작되어야 한다.

이 연마재는 입자(Abrasive), 수지(Resin), 섬유(Filament)등의 세 가지 기본성분으로 구성되어 있다. 본 연구에 대해 개발된 점탄성 연마재는 화학전문용어로서 폴리우레탄 폼(Polyurethane Foam)이라고 한다. Fig.1은 점탄성연마재 내부에 함유되어 있는 연마입자에 따른 현미경 사진이다. 연마입자가 폴리우레탄폼 수지에 안정적으로 결합되어 있음을 알 수 있다. 폴리우레탄 폼의 생성기구는 복잡한 것이지만 기본적으로 우레탄 결합에 의한 화학 반응과 발포 반응으로 나뉜다. 제

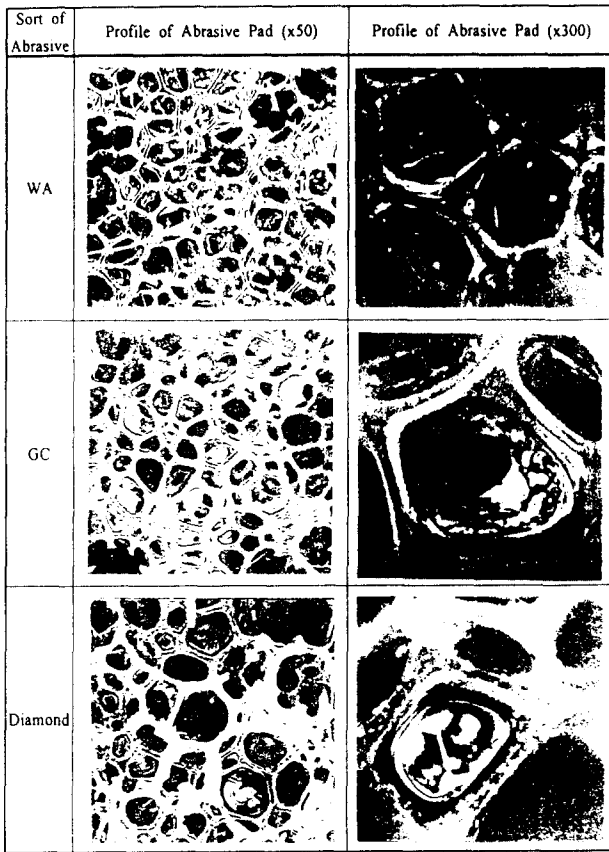


Fig.1 Profile of different kinds of developed nonwovne abrasive pads

품의 제작공정은 ① 원재료를 혼합, 반응, 발포시키기 위해 필요한 원재료를 각각의 탱크(Tank)에 채우는 배합 준비공정 → ② 이들 원재료를 일정 비율로 계량하여 완전 혼합후 토출하는 혼합공정 → ③ 토출된 반응물이 반응과 발포를 일으켜 발포체를 형성하는 발포공정 → ④ 반응, 발포된 생성물을 경화하는 수성공정 → ⑤ 숙성된 block을 용도에 따라 화학약품 처리하여 재가공하는 재가공 공정 → ⑥ 재단기에 의해 일정한 제원과 형태로 재단하는 재단공정으로 나뉜다.

2.2 점탄성연마재의 특징

폴리우레탄 폼은 쉽게, 경제적으로 만들 수 있어 여러 가지 장점을 갖고 있고 용도에 따라 다음과 같은 특징이 있다.

- ① 점탄성연마재의 기본 특징은 낮은 밀도, lofty, 개방성, 다공성등 기본적인 특성을 포함하여야한다. 그리고 교차방향으로 충분한 인장강도를 가지기 위해서 연속적으로 열소성 조직체로 함께 엉켜 있다.
- ② 일반적으로 점탄성연마재는 안정된 성질을 가

지고 있고 점탄성연마재 내부에 포함된 입자들은 가공 하지 않은 경우에도 언제나 점탄성연마재안에 붙어있다.

- ③ 가공할 때 많이 열을 발생하기 때문에 점탄성연마재가 열경화성과 영속성을 가지고 있어야 한다.
- ④ 안정된 조건하에서 가공할 수 있도록 입자들이 점탄성연마재속에서 균일하게 분포되어야 한다.
- ⑤ 일반적으로 점탄성연마재는 전해폴리싱에 사용되기 때문에 즉 전해액과 함께 사용되므로 연마부 직포속의 입자들이 붙어있는 수지는 특히 높은 온도의 산성(acidic) 조건에서 내부식성과 방수성을 가지고 있어야 한다.
- ⑥ 가공할 때 복잡한 가공력이 작용하기 때문에 점탄성연마재는 긴 수명을 가지고 있어야 하고 모양을 그대로 보존할 수 있어야 가공이 균일한 조건하에서 일어날 수 있다.

3. 전해가공 원리 및 시스템 구성

음극전극과 양극공작물 사이에 일정한 간극을 주고 전해액을 공급하면서 양극에 전류를 흘려주면 전기화학반응에 의해 양극인 공작물의 표면에서 가공이 이루어진다. 이때 전기장과 수직한 방향으로 자기장을 인가하면 이온들의 운동경로가 복잡하게 되고 금속과 반응하는 실제 이온의 개수가 증가하게 되어 전해가공의 능률이 향상되게 된다. 이와 같이 기존의 전해가공공정에 연마효율의 증대를 위하여 자기장을 인가하는 것이 자기전해가공공정의 기본 원리이다.

양극표면에 생성된 절연피막은 금속이온(+)과 전해이온(-)의 전해반응결과로 금속표면에 생성되는 매우 얇은 산화막이다. 이 막이 생성되기 시작하면 전해이온이 금속표면에 도달하지 못하도록 방해하기 때문에 전해반응이 둔화되고 막이 두꺼워질수록 전해반응은 중단된다. 따라서 전해반응에 의한 가공이 계속적으로 일어나도록 하려면 이러한 절연피막을 제거하는 것이 필수적이다. 점탄성연마재는 자기전해연마(MEAP) 시스템에 이용되는 절삭재로서 전해공정에 의해 공작물표면에 생성된 얇은 절연 피막을 제거시켜 전해가공이 연속적으로 일어나도록하게 하는 중요한 역할을 한다. 점탄성 연마재의 성질상 점탄성이 있기 때문에 부가적인 가공스크래치를 남기지 않으므로 경면가공

이 가능하게 된다. 따라서 점탄성 연마재는 반드시 점탄성을 갖고 제작되어야 하며 필요한 압력을 가할 수 있도록 적절한 두께로 제작되어야 한다.

본 실험의 목적은 자기전해 연마시스템(MEAP)에 의한 경면가공 최적조건을 도출하는 것이다. Fig.2는 자기전해 연마시스템의 개략도를 나타낸 것이다.

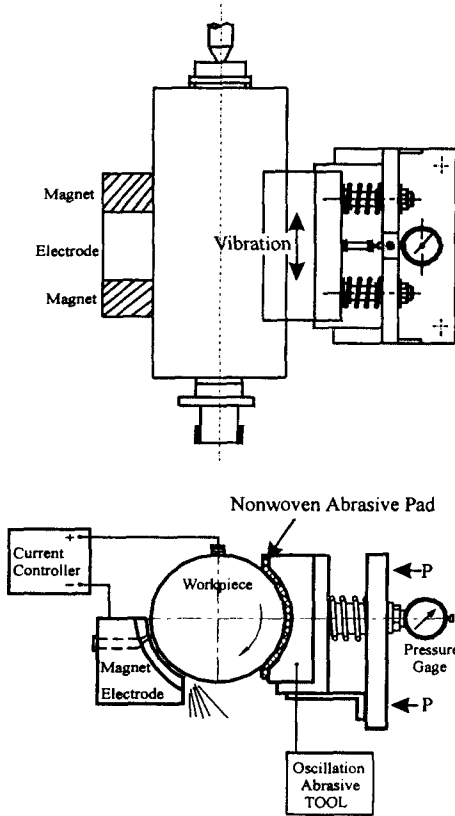


Fig.2 Schematic diagram of Magneto-Electric-Abrasive Polishing System

4. 난삭재 적용 전해가공 실험

4.1 동(Cu) 실린더의 전해가공 실험

일반적으로 연질가공물인 동이나 알루미늄은 대해서 WA와 GC등 연마재들이 적합하지 않고 최종 공작물의 경면결과를 얻을 수 없기 때문에 본 연구에서는 연질인 공작물에 대해 적용하기 위해 Diamond 점탄성 연마재를 개발하였다.

Fig.3은 Diamond 점탄성 연마재의 성능 test 실험결과를 나타낸 것이다. 난삭재인 동 실린더 공작물의 초기 표면거칠기는 Rmax 2.3 μ m이고 Ra 0.28 μ m이다. Diamond 점탄성 연마재는 연질 가공물 동에 대해 적용한 결과, WA 점탄성 연마재보다 더 좋은 효과를 갖고 있음을 확인하였다.

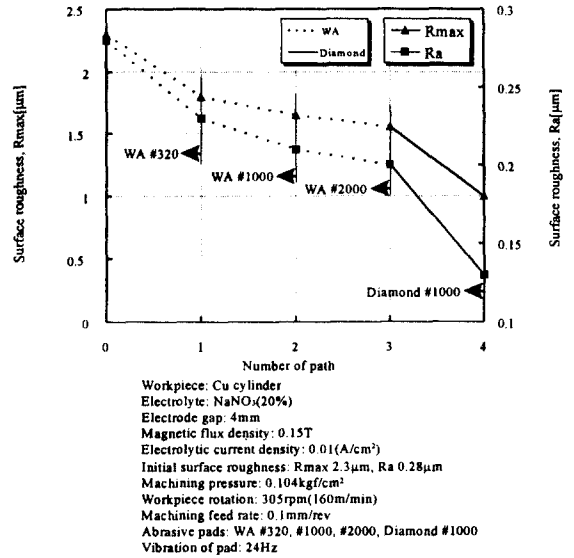


Fig.3 Effect of Diamond nonwoven abrasive pads on surface roughness (Cu)

Fig.4는 가공압력에 따른 공작물 표면거칠기 영향결과를 나타낸 것이다. 가공압력은 0.052kgf/cm²부터 0.26kgf/cm²까지 변화시킬 때 0.156kgf/cm²에서 공작물 표면거칠기가 좋은 결과를 나타났음을 알 수 있다.

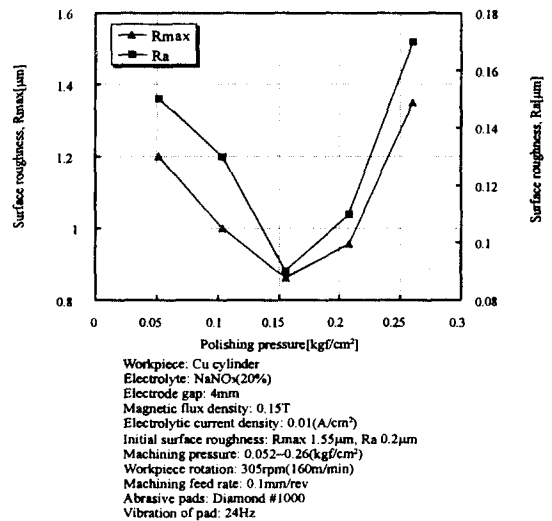


Fig.4 Effect of machining pressure on surface roughness (Cu)

MEAP시스템에 의하여 실린더 형상인 공작물을 가공할 때는 연마 이송속도와 가공압력은 공작물의 최종결과에 대해 중요한 영향을 미친다. 때문에 본 실험에서는 연마 이송속도와 가공압력이 공작물 표면거칠기에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 일반적인 MEAP시스템에 의한 Cr코팅 롤러와 같은 경질공작물 마무리 연마가공할 때는 초기 연마가공할 때 보다 큰 압력과 미소 이송속도를 인가해야지만 동은 연질 공작물이기 때문에 큰 압력

과 작은 이송속도를 인가하면 오히려 연마스크래치를 발생시키고 또한 가공하면서 많은 가공열이 발생하여 공작물 표면에 손상을 시키는 결과를 초래한다.

Fig.5는 0.156 kgf/cm^2 가공압력을 인가하고 2.0mm/rev 부터 3.0mm/rev 까지 가공이송속도를 변화시켜 줄 때 가공이송속도에 따른 표면거칠기에 대한 영향을 나타낸 것이다. 2.5mm/rev 이송속도에서 가장 좋은 결과를 나타내었음을 확인하였다.

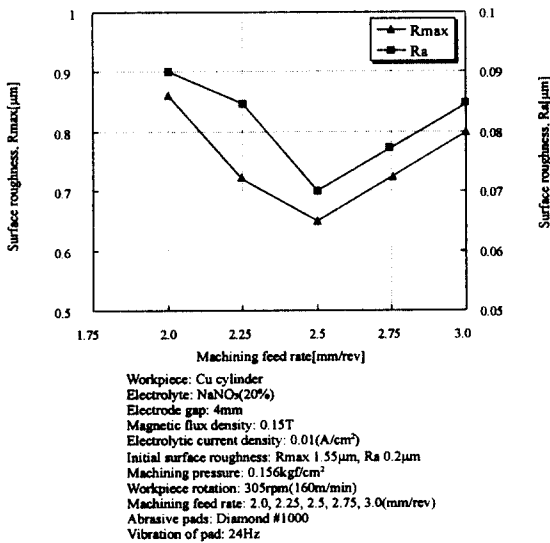


Fig.5 Effect of machining feed rate on surface roughness (Cu)

4.2 알루미늄합금(AI2024) 실린더의 전해가공 실험

Fig.6은 AI2024 실린더에 대해 Diamond 점탄성 연마재의 성능 test실험결과를 나타낸 것이다. 난삭재인 AI2024 실린더의 초기 표면 거칠기는 Rmax $1.9\mu\text{m}$ 이고 Ra $0.15\mu\text{m}$ 이다. Diamond 점탄성 연마재는 연질 가공물 등에 대해 적용한 결과, GC 점탄성 연마재보다 더 좋은 효과를 갖고 있음을 확인하였다.

Fig.7은 가공압력에 따른 공작물 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이다. 가공압력은 0.017kgf/cm^2 부터 0.056kgf/cm^2 까지 변화시킬 때 0.034kgf/cm^2 에서 공작물 표면거칠기가 가장 좋은 결과를 나타내었음을 알 수 있다.

Fig.8은 1.75mm/rev 부터 2.5mm/rev 까지 가공이송속도를 변화시켜 줄 때 가공이송속도에 따른 표면거칠기에 대한 영향을 조사한 결과를 나타낸 것이다. 가공효율에 대하여 생각하면 2.0mm/rev 이송속도의 선택이 바람직하다.

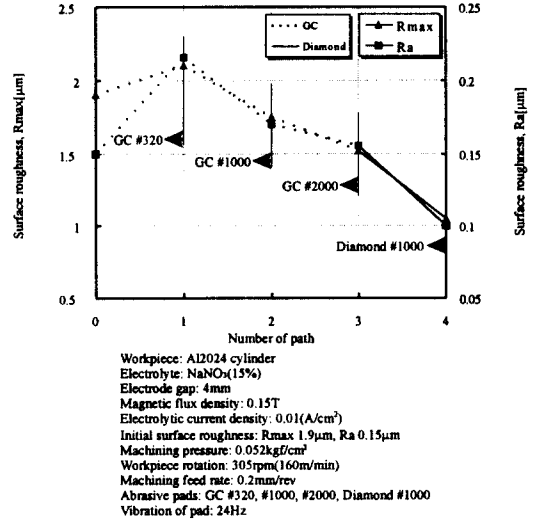


Fig.6 Effect of Diamond nonwoven abrasive pads on surface roughness (AI2024)

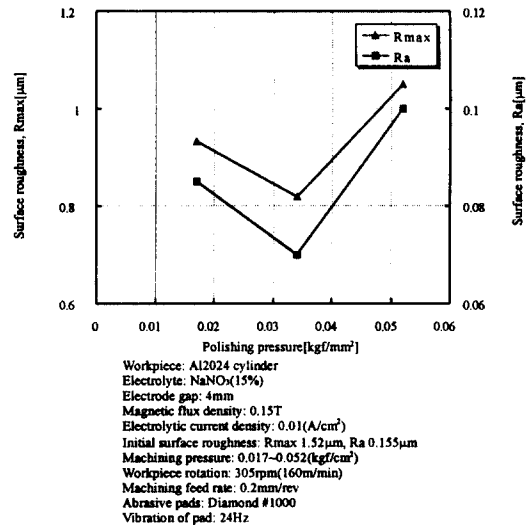


Fig.7 Effect of machining pressure on surface roughness (AI2024)

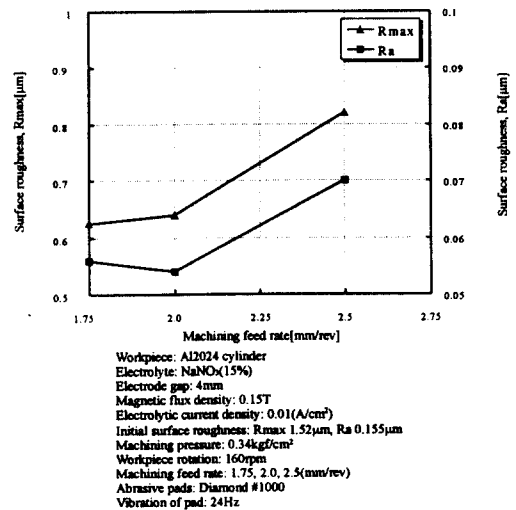


Fig.8 Effect of machining feed rate on surface roughness (AI2024)

5. 전해가공조건 최적화

5.1 다구찌 방법을 이용한 변수설계

본 연구의 최종 목표는 실린더 형상 난삭재인 Cu와 Al2024에 대한 자기전해경면연마 최적가공조건을 구하는 것이다. 위에 언급했던 자기전해경면연마 실험을 하여 전류밀도, 자기장강도, 전극간격, 전해액농도, 연마압력, 가공이송속도 등과 같은 자기전해경면연마에 밀접 관련된 가공변수들의 부합한 특정치를 결정할 수 있지만 이런 가공변수의 특정치를 간단히 조합하면 최적 가공조건 조합이란 할 수 없다. 다구찌 방법은 기존의 실험계획법보다 훨씬 적은 실험횟수로 공작물의 가장 좋은 가공결과에 대한 영향변수들의 최적 조합을 찾을 수 있다.

본 연구는 다구찌 방법의 기본원리에 의하여 난삭재인 Cu과 Al2024에 대한 자기전해경면연마 가공과정에 영향변수들을 제어인자와 제어하지 못하는 인자(잡음 인자)로 나눌 수 있다. 그 영향인자들중에서 전해액농도 (ρ), 자기장 강도 (B), 전극간격 (δ) 및 가공이송속도 (f)와 같은 인자들을 일정한 값으로 고정시켜 줄 수 있기 때문에 제어인자로 분석하였으며 가공압력 (p)과 전해전류밀도 (i)는 가공과정중의 가변성을 고려하여 조음인자로 분석하였다. 신뢰성이 높은 조합실험을 수행하려고 하면 다구찌 방법에 의하여 제어인자들을 -10.0~10.0%의 특정치부근이내로 3(1, 2, 3) level로 나누고 잡음인자들을 -10.0~10.0%의 특정치부근이내로 2(1, 2) level로 나눈다. Table 1은 본 연구에서 연질재인 Cu와 Al2024에 대한 자기전해경

Table 1 Classification of Polishing Conditions (Factors)

Variables	Levels					
	1		2		3	
	Cu	Al2024	Cu	Al2024	Cu	Al2024
Electrolyte density	13.5	18	15	20	16.5	22
Magnetic flux density	0.135	0.135	0.15	0.15	0.165	0.165
Electrode gap distance	3.6	3.6	4	4	4.4	4.4
Polishing feed rate	2.25	1.75	2.5	2.0	2.75	2.25
Polishing pressure	0.14	0.03	0.156	0.034	—	—
Electrolytic current density	0.022	0.225	0.025	0.25	—	—

면연마에 영향변수들을 다구찌 방법에 의하여 결정된 가공조건변수들을 나타낸 것이다. Table 2는 변수인자들의 값을 지정한 후에 실험계획법의 직

교배열 방법에 의하여 조합변수설계를 만든 것이다. 제어인자에 대해 L9 직교배열로 설계하였으며 잡음인자에 대해 L4 직교배열로 설계하였다. 이렇게 설계한 이유로는 잡음인자들이 실험결과에 미치는 영향을 최대한 줄일 수 있고 얻을 모든 변수의 최적 조합의 신뢰성이 향상 시켜 줄 수 있기 때문이다. [7]

Table 2 Designs for Polishing Conditions (Factors)

(a) L ₉ Orthogonal Array for the Easy Controllable Factors					(b) L ₄ Orthogonal Array for the Difficult Controllable Factors		
Run	Variable				Run	Variable	
	f	B	δ	ρ		P	i
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	1	2
3	1	3	3	3	3	2	1
4	2	1	2	3	4	2	2
5	2	2	3	1			
6	2	3	1	2			
7	3	1	3	2			
8	3	2	1	3			
9	3	3	2	1			

5.2 가공조건 최적화 실험결과 및 분석

Fig.9(a)은 공작물인 Cu 실린더에 대한 각 제어인자가 표면거칠기의 평균 감소치 \bar{y} 에 미친 영향을 곡선으로 나타낸 것이다. Fig.9(b)는 SN비로 각 제어인자가 실험의 결과에 미친 영향을 나타낸 것이다.

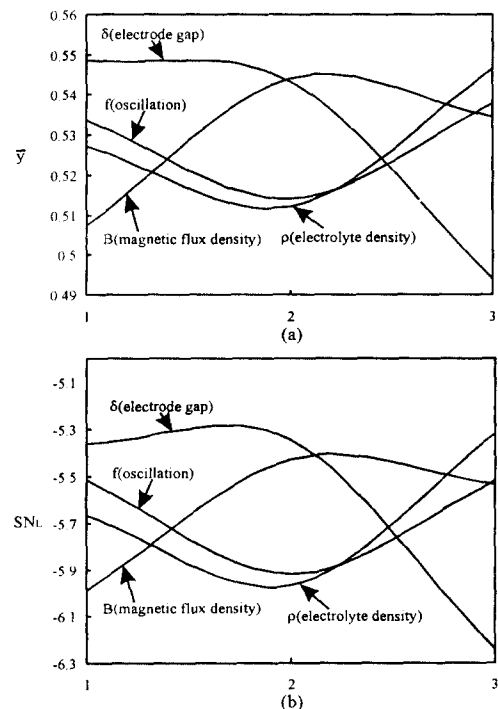


Fig.9 The effects of conditions on \bar{y} and SN_i about Cu cylinder

Fig.10(a)와 (b)는 공작물인 Al2024 실린더에 대해 각 제어인자가 실험결과 표면거칠기의 평균값 \bar{y} 와 SN비에 미치는 영향을 곡선으로 나타낸 것이다. Cu의 경우와 같은 분석방법을 통해 Al2024에 대한 제어인자와 잡음인자의 최적 조합 가공조건을 선정할 수 있다.

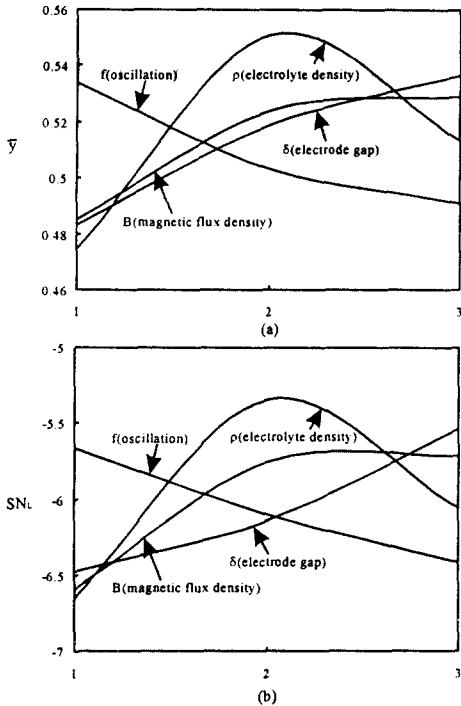


Fig.10 The effects of conditions on \bar{y} and SN_L about Al2024 cylinder

다꾸지 방법을 통해서 실린더 형상인 Cu와 Al2024에 대해 자기전해 경면연마가공공정에 관련된 가공조건들의 최적 조합을 선정하였으며 결과는 Table 6에 나타나 있다.

6. 결론

자기전해입자연마 (MEAP) 시스템을 이용하여 동 (Cu) 및 알루미늄합금 (Al2024)과 같은 연질 난삭재의 경면가공을 효과적으로 수행하기 위해 다양한 종류의 점탄성 연마재를 개발하고 경면가공 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 개발된 점탄성 연마재는 크롬코팅 롤러 등 경질 재료는 물론 동, 알루미늄합금과 같은 연질 재료에 대해서도 능률적인 경면연마가 가능하다.

(2) 개발된 점탄성 연마재는 입자함유량이 30%일 때 연질 난삭재의 자기전해입자 경면가공에

가장 효과적이며 고정밀·고능률 경면연마가 가능하다.

(3) 점탄성 연마재는 함유된 입자의 종류에 따라 제작되었으며 연질 재료인 동과 알루미늄합금에 대한 연마능률 및 표면거칠기는 실리콘카바이드 (GC) 또는 알루미나 (Al2024)계 점탄성 연마재보다 다이아몬드 연마입자를 함유한 점탄성 연마재가 우수한 성능을 나타낸다.

(4) 다꾸지 방법을 이용하여 최적 자기전해경면연마 조건을 선정하였다.

참고문헌

- (1) 김정두, 최민석, "자기전해복합경면 개발에 관한 연구(제1보)", 1995 한국공작기계기술학회지 제 4 권 제 3 호, pp. 25~30.
- (2) Jeong-Du Kim, "Development and Application of the Surface Finishing System Using Magneto-Electrolytic Process", Int. Manufacturing Engineering Conference, 1996, U.S.A, pp. 175~181.
- (3) Douglas C. Montgomery, "DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS", Third Edition
- (4) J.Dash and W.W. King, "Electrothinning and Electrodeposition of Metals in Magnetic Fields", January 1972, J. Electrochem. Soc. Vol. 119, No. 1, pp. 51~56.
- (5) Hidehiko MAEHATA and Hiroshi KAMADA, "Studies on the Electrolytic-abrasive Mirror Finishing (II)--Roughness of Finished Surface", Bull. JESP, Vol. 19, No. 2(June 1985) pp. 131~132.
- (6) Takeo SHINMURA, Koya TAKAZAWA, Eiji HATANO and Toshio AIZAWA, "Study on Magnetic-Abrasive Process--Finishing Characteristics", Bull. JESP, Vol. 18, No. 4 (Dec. 1984), pp. 347~348.
- (7) Byoung-Chan Lee and Dong-Yol Yang, "Estimation of Formability for Sheet Metal Forming of Electronic Parts", 한국과학기술원 논문집, 1994,12.