

요동형 공구와 AE센서를 이용한 연마면 향상에 관한 연구

김정욱(부산대 대학원 지능기계공학과), 김성렬(부산대 대학원 지능기계공학과),
안중환(부산대 기계공학부)

A study on the improvement of polishing surface using Oscillation-type tool and AE sensor

J. U. Kim(Dept. Mecha. & Intel. Eng. PNU), S. R. Kim(Dept. Mecha. & Intel. Eng. PNU)

J. H. Ahn(Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

Die polishing technology is very critical to determine quality and performance of the final products. Generally, the rotation-type tool is used most widely in the polishing process. However it is difficult to make the mirror surface, because the method using the rotation-type tool causes a lot of tiny scratch on the polished surface. This paper proposes a new method using the oscillation-type tool that reduces the scratch and improves the surface roughness. As result, the mirror surface was able to obtain by using the oscillation-type tool.

AE is known to be closely related to material removal rate(MRR). As the surface is rougher, MRR gets larger and AE increase. The surface roughness can be indirectly estimated using the AE signal measured during automatic die polishing process. In this study, an AE sensor based monitoring system was developed to investigate the relation the level of AE RMS with the surface roughness during polishing process.

Key Words : Rotation-type tool(회전형 공구), Oscillation-type tool(요동형 공구), Polishing process(연마가공),
AE sensor(음향 방출 센서), Monitoring system(감시 장치),

1. 서론

최근 다품종 소량 생산 및 소비자의 미적 욕구가 높아짐에 따라 고품위의 금형 제작수요가 증대되고 있다. 따라서 제품제작의 전 단계인 절삭가공에 있어서 고속가공기만으로도 요구되는 품질을 빠른 시간 내에 가공할 수 있지만, 렌즈나 CD 금형 등과 같은 초정밀 경면을 요하는 고품질의 제품을 얻기 위해서는 연마가공이란 공정은 반드시 필요하다.^[1] 그러나 연마가공은 숙련된 기술자로서도 상당한 시간이 걸리는 까다로운 작업이기 때문에 기술자들의 기피현상과 함께 인력 부족현상을 드러내고 있다.

이에 국내외에서도 금형 자동연마기에 대한 필요성이 증가하여 왔고, 연마공정을 자동화하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 기존의 회전형 공구에 의한 연마가공은 가공물 표면에 미세한 스크래치를 발생시켜 요구되는 표면을 악화시키는 문제점이 있다.^[2] 따라서 이러한 문제점을 효과적으로 제거하여 최종적으로 요구하는 금형 표면상태를 달성하는 것은 매우 중요하다. 본 연구는 기존의 회전형 연마가공에서 발생하는 미세한 스크래치를 제거하여 고품질의 연마면을 얻기 위해 요동형 공구를 설계, 제작하여 실험을 수행하였고, 연마가공 중 연마면 상태에 영향을 미치는 공구마모 및 이상

상태를 검출하기 위한 AE 센서 및 신호처리 장치를 제작하여 연마가공 감시 가능성을 검토해 보았다.

2. 연마가공 특성 및 AE 감시

2.1 연마가공 특성

연마가공이란 연마공구와 가공물을 접촉시키고 적당한 연마압력을 주면서 가공을 수행함으로써 연마공구의 입자가 가공물의 표면으로부터 극히 미량의 칩을 깎아내어 표면을 평활하게 연마하는 가공법이다. Fig. 1은 연마입자가 가공물에 접촉하여 연마가 일어나는 과정을 나타내고 있으며, Luo's 이론식에 의한 절삭깊이(Δ)는 식 (1)과 같다.

$$\Delta = \frac{2r_{avg}P}{H_w\rho} \quad (1)$$

여기서 r_{avg} 은 연마입자의 크기, ρ 는 연마입자의 밀도, P 는 연마압력, H_w 는 가공물의 경도이다. 또한, 연마 제거률(Metal Removal Rate)은 식 (1)을 이용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$MRR = k\Delta \left(\rho \frac{s}{f} \right) = \frac{2kr_{avg}P}{H_w} \frac{s}{f} \quad (2)$$

여기서, k 는 상수, s 는 연마 속도, f 는 feedrate이다.

식 (1)과 (2)에 의하면 거친 연마(연마입자가 큰 경우)를 할 때에는 연마압력 P 와 연마속도 s 가 클수록, feedrate가 작을수록 제거률이 커지나, feedrate가 너무 작으면 과도한 제거가 일어나 형상정밀도에 영향을 미친다.

표면거칠기는 초기 절삭깊이에 의해 영향을 받으므로, 거친 연마입자로 오랜 시간동안 연마가공을 수행해도 이론식과는 달리 표면거칠기가 개선되어지지 않는 한계 거칠기가 존재할 것이고, 이때는 고운 연마입자를 이용하여 요구되는 표면거칠기를 달성해야 한다.^[3] 따라서 효과적인 연마가공은 각각의 연마입자의 한계 거칠기를 찾아서 거친 연마

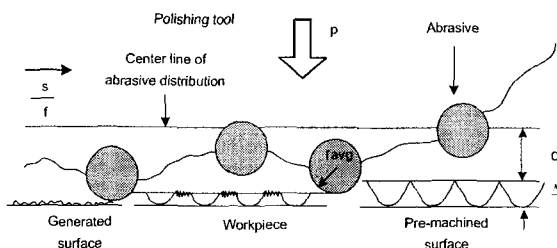


Fig. 1 Contact model of abrasives with workpiece

입자에서 고운 연마입자 순으로 빠른 시간내에 요구되는 표면거칠기를 찾는 것이 중요하다.

2.2 연마가공에서의 AE 감시

AE란 고체 재료가 소성변형이나 파괴될 때 발생하는 탄성에너지가 음파로 고체를 통해 전송되는 과정을 말한다. 따라서 연마가공에서의 AE 신호는 연마입자가 가공물을 가공할 때 발생하며 연마입자의 크기에 따라 발생하는 AE 신호의 레벨의 크기가 달라진다.

AE 신호의 해석적 기법으로는 AE 에너지, 진폭, Count rate 등 여러 가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 AE의 RMS(Root Mean Square) 값을 이용하였는데, 이의 이점은 1) data를 해석적인 함수로 모델링하기 용이한 AE data의 평탄화(smoothing), 2) Count rate 기술과 같은 높은 민감성(sensitivity)의 불필요, 3) 센서 변환자의 결합효율 또는 연마입자에 덜 민감, 4) 방출신호에 포함된 에너지에 RMS data를 관련시키기 용이하기 때문이다.

AErms의 정의는 식(3)과 같다.

$$AErms = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} Vin^2(t) dt} \quad (3)$$

여기서, $Vin(t)$ 는 AE 원신호이며, ΔT 는 AErms 값을 취하는 평균시간을 의미한다.

Fig. 2는 연마가공이 진행되어감에 따라 연마면의 변화를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 연마숫돌과 연마면은 초기 점접촉 형태에서 연마가 진행될수록 면접촉 형태로 바뀌어가게 되므로 연마면이 받는 단위면적당 압력은 점점 감소하고, 소재의 제거형태는 국부적 과단 형태에서 소성변형 형태로 바뀌어 간다. 따라서 연마 제거량은 점점 감소하게 되고 이것은 AE 에너지의 감소로 나타나게 되므로 AE 신호를 이용한 연마가공 감시가 가능하다.

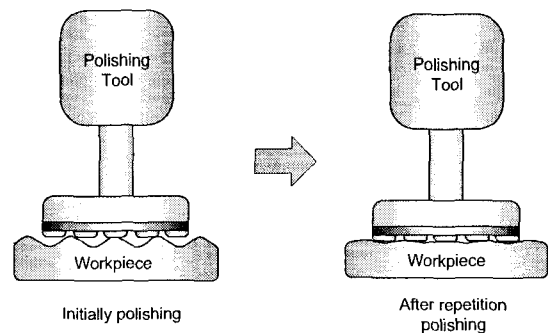


Fig. 2 Contact form according to repetition polishing

3. 실험조건 및 장치 구성도

3.1 요동형 공구의 원리 및 실험조건

본 연구에서 사용된 가공물은 금형가공재료로 가장 널리 쓰이는 SKD-11 을 사용하였고, 연마 공구는 회전형과 요동형 공구로 실험을 수행하였다.

Fig. 3 은 연마가공에 사용된 회전형 공구와 요동형 공구의 사진이고, Fig. 4 는 요동형 공구의 요동 원리를 나타낸 것으로 회전운동을 직선운동으로 변환하는 구조로 되어 있으며, 그림에서 보듯이 중심

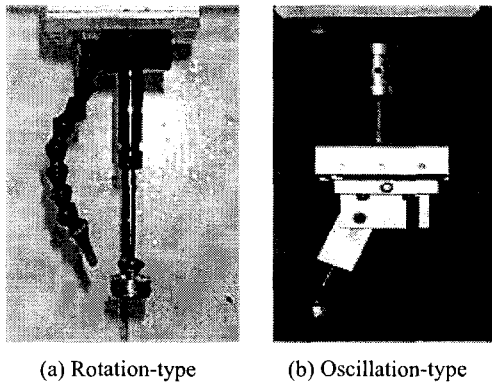


Fig. 3 Photograph of the Polishing tools

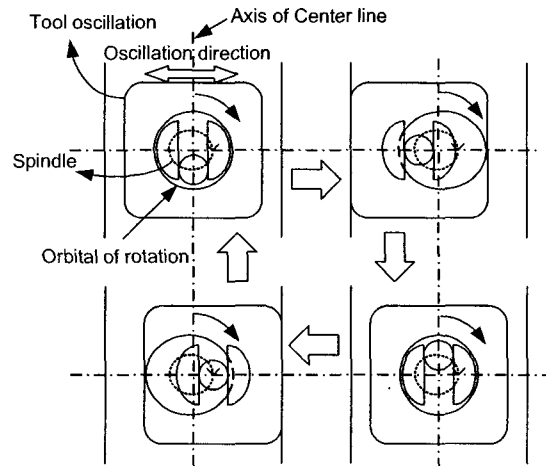


Fig. 4 Principle of oscillation

Table. 1 Condition of polishing

Polishing - type	Rotation	Oscillation
Polishing Machine	POLYEM-1205	
Spindle Speed	900rpm	500rpm
Workpiece	SKD-11(60 X 260 mm)	
Feedrate	400 (mm/min)	
Pressure	5 (kgf / cm ²)	
Grain Size(mesh)	100, 600, 1000 2000, 5000	5000

축을 기준으로 스피ndl의 끝에 부착된 작은 회전체가 반달모양의 직선구조물에 구속된 상태로 원 궤적을 따라 운동하면서 직선운동으로 변환시킨다. Table 1 은 실험에 사용된 연마가공조건을 보여 준다.

3.2 실험장치 구성 및 방법

Fig. 5 는 실험장치 구성도를 나타낸 것으로 제작된 AE 센서의 특성을 알아보기 위해 상용 AE 센서와 함께 가공물에 부착하여 실험을 수행하였다. 연마가공시에 발생하는 음향 신호는 AE 센서에 의해 검출된 후 AE 신호처리 장치에 의해 원신호 또는 AErms 신호로 변환되고, 실시간으로 오실로스코프를 통해 관찰하거나 A/D 변환기를 거친 후 컴퓨터에 의해 신호분석을 하였다.

일반적으로, AE 센서에서 나오는 신호는 고임피던스이며 아주 미약하여 신호 손실과 노이즈를 최소화시켜야 한다. Fig. 6 은 제작된 AE 센서 및 신호처리 장치의 내부 블록도를 나타낸 것으로 장치의 내부는 주위의 잡음에 강인하도록 알루미늄 케이스를 제작하여 완전히 차폐시켰다. 제작된 AE 센서는 압전소자(PZT)로 구성되어져 있으며 AE 신호처리 장치는 센서에 의해 검출된 미약한 신호를 요구되는 신호크기로 증폭하기 위해 전하증폭기(x10 ~ x100)와 전압증폭기(x100 ~ x1000)로 구성되어져 있고, 특정범위안의 주파수 성분만 통과시키기 위해 밴드패스필터(50 kHz ~ 500 kHz)를 사용하여 불필요한 노이즈 성분이 제거된 원신호를 출력할 수 있게 하였다. 또한 신호 레벨 감시가 용이하도록 RMS-DC 변환기가 내장되어 있다.

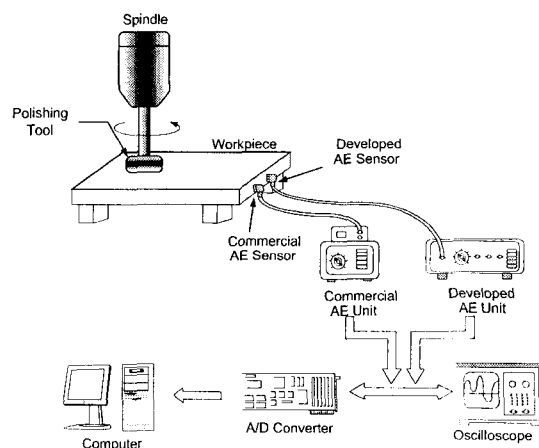


Fig. 5 Experimental arrangement for polishing process monitoring

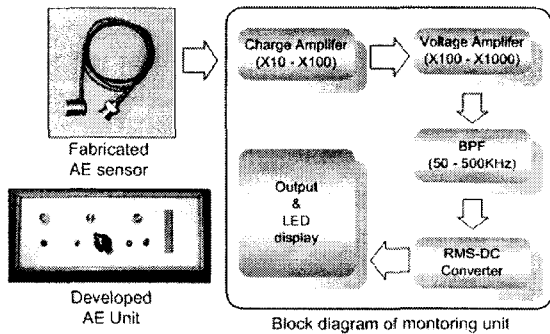


Fig. 6 Fabricated AE sensor and signal processing unit

4. 실험결과

4.1 연마가공면 비교

기존의 회전형 공구에 의한 연마가공은 가공물 표면에 미세한 스크래치를 발생시켜 요구되는 고품위를 얻는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 회전형 공구에 의해 발생하는 결함을 효과적으로 제거하기 위해 요동형 공구를 이용하여 연마가공을 수행하였다. Fig. 7은 표면거칠기가 $0.05 \mu\text{m}$ 으로 되도록 회전형 공구로 연마가공한 후, 요동형 공구를 이용했을 때의 표면거칠기 변화를 보여주고 있다. 경면가공에서 기존의 회전형 연마가공방식과 본 연구에서 이용한 요동형 연마가공방식이 연마면에 미치는 특성을 알아보기 위해 연마패드 #5000에서 회전형 공구와 요동형 공구를 이용하여 연마속도 900rpm, 500rpm과 Feedrate 400 mm/min, 연마회수 16회, 연마압력 $5 \text{kgf}/\text{cm}^2$ 의 조건으로 가공을 수행하였다.

Fig. 8은 회전형과 요동형 공구로 연마가공을 했을 때 표면거칠기의 변화와 연마면 사진을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 표면거칠기를 측정할 결과로서 요동형 방식이 회전형 방식보다 표면거칠기가 $0.01 \mu\text{m}$ 향상된 것을 볼 수 있고, 또한 마이크로스코프에 의해 측정된 사진에서도

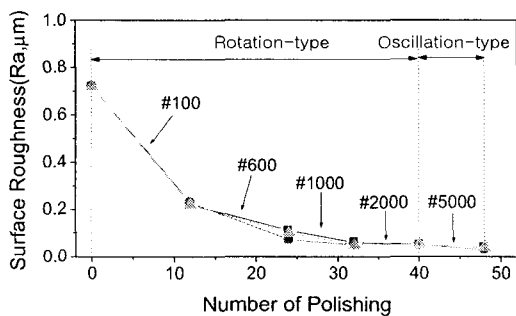


Fig. 7 Variations of surface roughness of rotation and oscillation polishing

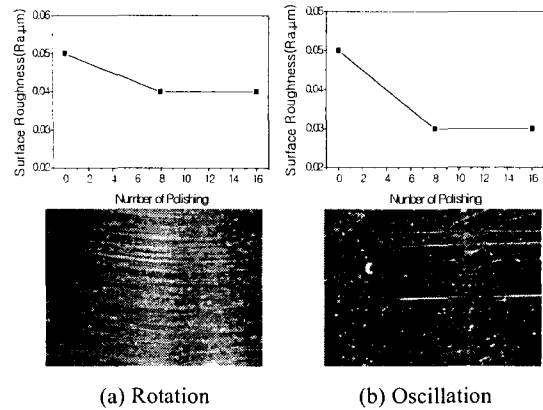


Fig. 8 Comparison of surface roughness of rotation and oscillation polishing

회전형으로 가공한 연마면은 회전방향으로 미세한 스크래치가 나타나 있지만 요동형으로 가공한 연마면은 스크래치가 제거된 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 회전형 공구로 가공한 면과 요동형 공구로 가공한 면에 대한 표면 반사도를 비교한 것으로 회전형 공구로 가공한 표면에는 미세한 스크래치 때문에 표면반사도가 고르지 않아 y 축 이송방향으로 빛이 반사되어 나타나는 것을 볼 수 있다.

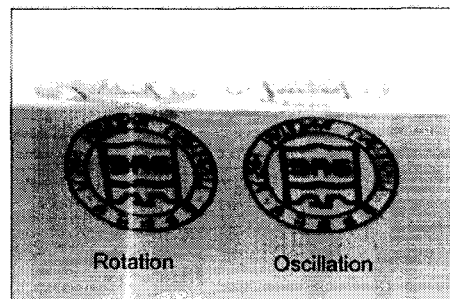


Fig. 9 Photograph of surface reflection on polishing surface of rotation and oscillation

4.2 AErms 신호와 표면거칠기의 관계

연마가공 공정에서 AErms 레벨의 변화는 연마 제거량과 비례한다는 것은 이미 알려져 있는 사실이다. 따라서 본 실험에서는 불엔드밀로 초기 표면거칠기가 $1 \mu\text{m}$ 상태로 가공한 후, 제작된 AE 센서와 감시장치를 이용하여 AErms 변화와 표면거칠기와의 연관성을 분석했다.

Fig. 10은 Table 1과 같은 실험조건에서 회전형으로 #100, #600, #1000, #2000로 연마가공했을 때의 AErms와 표면거칠기와의 관계를 나타내고 있고, Fig. 11은 요동형에 의해 #5000로 가공했을 때의 관계를 보여주고 있다. 또한 제작된 AE 센서와 신

호 처리장치의 특성을 확인하기 위해 상용 AE 센서와 비교하였다.

Fig 10 (a)와 (b)에서 #100, #600 와 같이 연마입자가 큰 경우 연마회수 8 회까지는 AERms 레벨 변화와 표면거칠기가 급격하게 감소하지만, 연마회수 8 회 이상부터는 AERms 와 표면거칠기가 거의 일정해

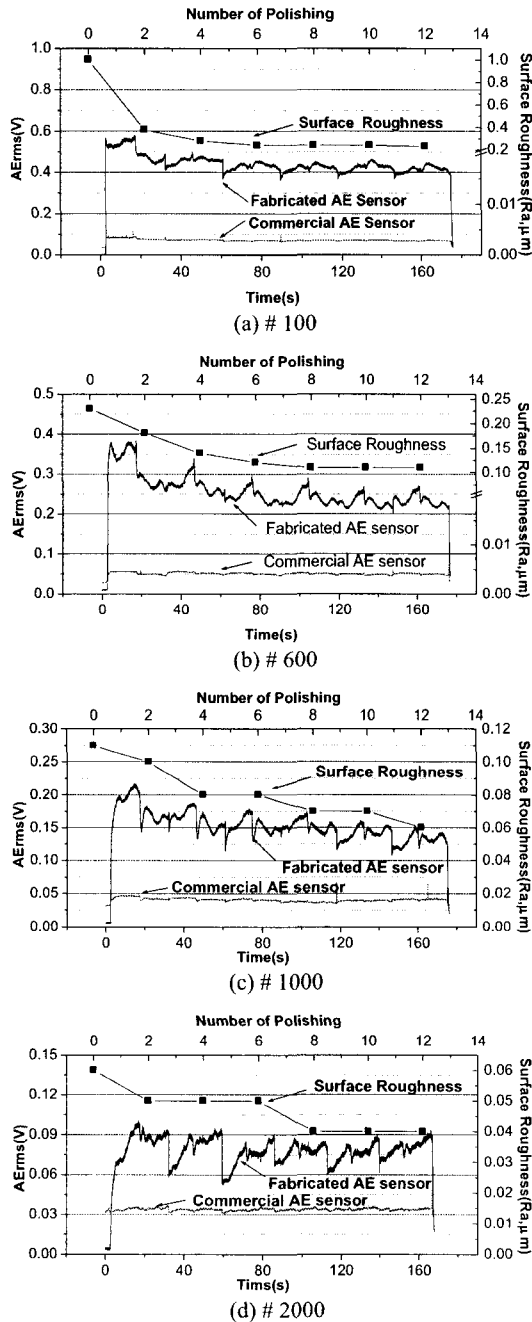


Fig. 10 Relation between AERms and surface roughness using rotation-type

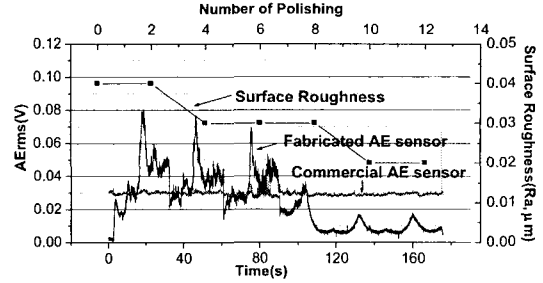


Fig. 11 Relation between AERms and surface roughness using oscillation-type

지는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 연마가공시 어느 연마회수 이상에서는 연마회수에 관계없이 연마제거가 거의 일어나지 않아 AERms 와 표면거칠기가 일정해진다고 볼 수 있으며, 이때 한계 거칠기가 존재한다는 것을 추정할 수 있다.

Fig 10 (c)와 (d)에서는 #1000 와 #2000 와 같이 연마입자가 작은 경우의 AERms 레벨과 표면거칠기의 변화를 보여주고 있으며, #100, #600 일 때보다 감소폭은 작지만 전체적으로 떨어지는 것을 알 수 있다.

Fig 11 은 요동형 기구를 이용하여 #5000 로 연마가공 했을 때의 AERms 레벨과 표면거칠기의 변화를 보여주고 있다. 연마회수 8 회까지는 AERms 레벨 변화가 크지만 연마회수 10 회 이상에서는 신호변화가 거의 없다. 이는 연마회수 8 회까지는 회전형 기구로 가공할 때 발생한 미세한 스크래치를 제거하면서 발생된 것으로 추정되고, 연마회수 10 회 이상에서 신호의 변화가 없는 것은 스크래치가 거의 제거된 것으로 추정된다. 이때의 표면면거칠기의 변화를 살펴 보아도 연마회수 10 회 이상에서는 변화가 없는 것을 볼 수 있다.

위의 결과에서 알 수 있듯이 연마회수가 증가할수록 AERms 신호가 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 특히 연마회수가 8 회 이상이 되면 AERms 레벨이 일정해지는데 이는 각각의 연마패드가 가공할 수 있는 연마 제거량의 한계에 도달했다는 것을 의미한다. 따라서 연마가 진행됨에 따라 각각의 연마패드에 대한 한계 연마회수와 한계 거칠기가 존재한다는 것을 실험을 통해 추정할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 빙면연마 가공시 고품위의 연마면을 얻기 위해 기존의 회전형 연마가공에서 발생하는 미세한 스크래치를 제거하기 위한 요동형 기구를 설계, 제작하여 실험을 수행하였고, 또한 AE 센서 및 신호처리장치를 제작하여 연마가공 감시에

적용함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고품위의 연마면을 얻기 위한 요동형 기구를 개발하여 기존의 회전형 기구를 이용한 연마 가공에서 발생하는 미세한 스크래치를 제거함으로써 고정도의 경면을 얻을 수 있었다.
- 2) 압전소자를 이용한 저가의 AE 센서와 연마 가공상태 감시에 적합한 AE 신호처리장치를 개발하여 성능을 테스트한 결과 연마가공 감시에 적용 가능함을 알 수 있었다.
- 3) 회전형과 요동형 기구를 이용한 연마가공에 있어서 AErms 레벨 변화와 표면거칠기의 연관성, 한계 연마회수 및 한계 거칠기가 존재한다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. 佐佐木哲夫, 三好隆志 他 2 名, "金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究(第 1 報)-金型熟練工の手磨き特性", 精密工學會誌, Vol. 57, No. 3, pp. 497-503, 1991
2. 이두찬, 정해도, 안중환, 三好隆志, "자동금형연마의 최적조건선정 전문가시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제 14 권, 제 10 호, pp. 58 ~ 67, 1997
3. J.H.Ahn, M.C.Lee, "Intelligently automated polishing for high quality surface formation of sculptured die"Journal of Materials Processing Technology 130-131 (2002) pp339-344
4. 김동환, 申云峰, 김화영, 안중환, "AE 신호를 이용한 자동 연마가공에서의 연마면 상태감시," 한국공작기계학회, 춘계학술대회논문집, 2000
5. Dornfeld, D. and Cai, H. G., "An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission", Transactions of the ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 106, FEB., pp. 28-33, 1984
6. E. Kannatey Asibu, D.A.Dornfeld, "A Study of Tool Wear Using Statistical Analysis of Meta Cutting Acoustic Emission", Wear, Vol. 76., pp. 247-261, 1982
7. 김영환, 김병국, 박영기, 윤동선, "음향방출센서 개발", 한국표준과학연구원 연구보고서, 1992
8. 이태문, 정해도, 황찬해, 조규갑 "금형의 자동 연마작업 지원 전문가 시스템의 개발" 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 7 호, pp. 73 ~ 83, 1999