

초정밀 표면 형상 가공기술 개발

이웅숙*, 제태진, 강재훈, 이재경
(한국기계연구원)

Development of High Precision Machining Technology

Eung-Sook Lee*, Tae-Jin Je, Jae-Hoon Kang, Jae-Kyung Lee (KIMM)

Abstract

In this study, we aims to develop the machining technology for the ultra precision surface and profile accuracy. For this purpose, we construct the electrolytic in process grinding system (ELID grinding) and apply to the cylindrical and internal grinding.

Through the various machining experiments such as SCM steel, ceramics, tungsten carbide etc., we have obtained nanometer surface roughness. And we have applied this mirror grinding technique to hydraulic manual valve and mold core of mini disk optical pick-up base.

For the development of fine mechanical part machining technology, we have made multi fiber optical connector using fine grinding technology. And constructed micro drilling system with process monitoring system which is possible to drill 50 μ m diameter hole.

1. 서론

초정밀 부품 생산에 필요한 표면 형상 가공기술은 나노미터 수준의 표면조도를 기초로 한 평면 가공, 비구면 복잡형상의 가공, 미세형상의 가공 등 초정밀화, 초평활화, 초미세화를 요구하며 가공의 극한을 요구하고 있다. 본 연구에서는 이러한 초정밀의 표면거칠기와 형상정밀도를 요구하는 요소부품의 가공을 위한 기반기술 및 응용기술확보를 위하여 초정밀 경면 연삭 및 미세 절삭 가공기술에 관련된 연구를 수행하고자 하였다.

초정밀 경면 연삭기술로서는 전해 인프로세스 드레싱법에 의한 원통 및 내경의 초정밀 경면 연삭 시스템을 구축하고, 개발 시스템의 특성실험 및 각종 재료의 가공실험을 수행하였으며, 본 기술 보급을 위한 산업화 및 실용화 적용 연구도 수행하였다. 실험에 사용된 재료는 세라믹, 초경 합금, 강재 등이며, 실용화 적용대상의 초정밀 요소부품은 유압 Manual Valve, 픽업베이스용 금형 코어, Ball Screw 등이다. 미세형상부품 가공기술 개발을 위해서는 첨단 통신용 부품인 8심 광케이블 금형의 초정밀 가공을 통한 사출성형시제품 개발과 더불어 미세구멍의 가공을 위한 마이크로 드릴링 시스템을 구축하여 50 μ m급의 미세구멍을 가공하였다.

2. 초정밀 경면 원통 연삭기술 개발

2.1 원통 경면 연삭시스템 구성 및 특성실험

본 연구에서 개발하고자 하는 전해연속드레싱(ELID:Electrolytic In-process Dressing)법에 의한 초정밀 경면 원통 연삭시스템의 개략적 원리는 Fig.1과 같다.

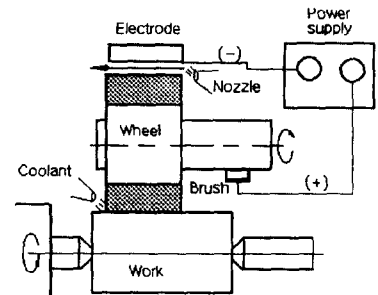


Fig.1 ELID 원통연삭시스템 원리

Fig.2에는 본 연구를 위하여 구성된 초정밀 ELID 경면 원통 연삭시스템의 모습을 나타내었

고, 개략적인 시스템의 특성 및 실험가능 조건을 Table 1에 나타내었다.

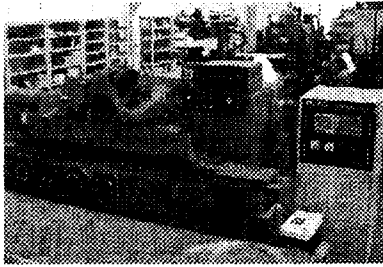


Fig.2 ELID용 연삭반 및 전원장치

Table 1 초정밀 경면 연삭시스템 특성

연삭반	만능연삭	Toyoda GUX100, 3.75kw 0.5 μ m 절입제어
ELID 장치	적용숫돌	FCI Diamond휠:φ350×W10 입도 # 325,2000,4000,8000
	전원장치	TRUELID 630, PULSER On-Off Time 2 μ s
	전극장치	전극:SUS,Wheel 1/4 cover Brush : Graphite
	전 해 액	Noritake AFG-M, CEM 50배 희석 사용
	인 버 터	LG SV075-iS3, 속도변경

ELID 연삭가공을 위해서는 연삭숫돌의 형상정밀도 보정을 위한 트루잉(truing) 작업 후 숫돌표면에 부도체 피막형성을 위한 초기드레싱 공정을 수행한다. 초기드레싱 시에는 두께 30~40 μ m의 안정된 부도체 피막을 얻기 위하여 연삭 숫돌을 저속 회전시킨다. 본 실험에서는 연삭 숫돌의 사이즈를 고려하여 주모터의 1/6수준인 10Hz(236rpm, 260m/min)의 조건을 적용하여 드레싱 작업을 수행하였다.

Fig.3 및 Fig.4에 본 시스템을 이용하여 #325, #2000, #4000 입자의 주철분드 다이아몬드 숫돌을 이용한 초기드레싱 특성실험 결과를 시간 경과에 따른 전류치 및 전압치의 변화관계로 나타내었다.

2.2 초정밀 연삭 실험 및 결과

1) 세라믹스의 가공 및 결과

대표적 경취성재인 세라믹스 재료에 대한 경면 연삭실험을 수행하였다. Fig.5는 실험모습이며 Fig.6은 경면 연삭된 세라믹 가공품의 모습이다. 사용된 재료는 Al₂O₃, Si₃N₄, ZrO₂의 3종류이며, 대표적 가공결과는 Fig.7에 나타난 지르코니아(ZrO₂)로서 Ra 6nm, Rmax 40nm 수준의 초정밀

경면 표면 거칠기를 달성하였다. 이때의 연삭조건은 휠 회전수 950rpm, 공작물회전수 100rpm, 공작물 이송 트레이스(traverse)속도 60mm/min, 절입 형태는 양단 절입으로 1 μ m/pass 였다.

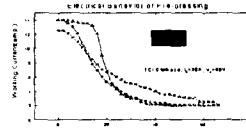


Fig.3 초기드레싱중의 전류변화

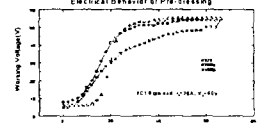


Fig.4 초기드레싱중의 전압 변화

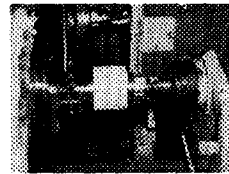


Fig.5 세라믹가공모습

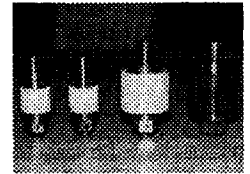


Fig.6 경면 가공된 시편

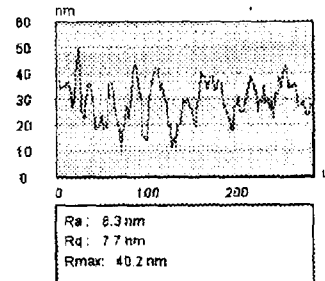


Fig.7 ZrO₂ 표면조도 측정결과

2) 초경합금의 가공 및 결과

대표적 소결 경질재인 공구용 초경합금(경도 HRC 80)의 초정밀 경면 연삭가공 실험을 수행하였다. Fig.8은 경면 가공된 초경합금시편의 모습이며, Fig.9는 대표적 가공시편의 표면조도를 측정된 것이다. 본 실험을 통하여 나타난 가공표면의 정밀도는 #325 숫돌 사용에서 Ra 0.11 μ m, Rmax 1.06 μ m 정도였고, #2000 숫돌로서는 Ra 11.9nm, Rmax 84.3nm 정도였다. 나아가 본 실험을 통하여 달성한 최고 표면거칠기 정밀도는 #4000 숫돌을 이용한 실험에서 Ra 6.0nm, Rmax 44nm 였으며, 10개 시편의 평균조도는 Ra 8nm, Rmax 50nm 정도였다.

Fig.10은 진원도 측정 예로서 본 연구를 통하여 0.1 μ m의 초정밀 진원도를 달성하였다.

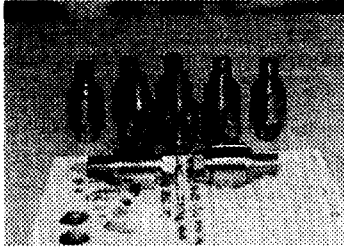


Fig.8 경면 가공된 초경 시편

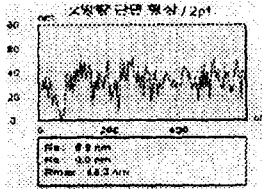


Fig.9 표면 거칠기

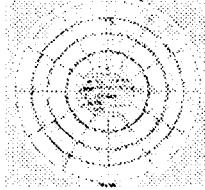


Fig.10 진원도

Fig.11과 Fig.12에 본 실험에 사용된 3가지 슷들의 입자 크기가 표면조도에 미치는 영향과 각각의 가공조건에 대한 영향을 고찰하여 나타내었다. 각 가공조건에서 1회 절입량은 $2\mu\text{m/pass}$ 으로 고정되었고 가공조건에 따른 영향 고찰을 위하여 마무리 공정인 스파크아웃(spark-out)은 실시하지 않았다.

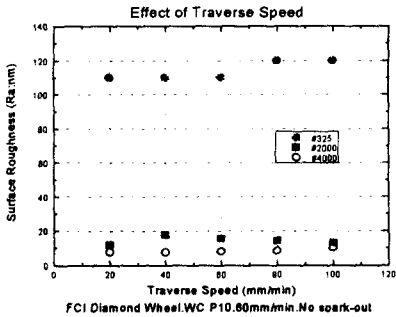


Fig.11 이송속도에 따른 조도변화

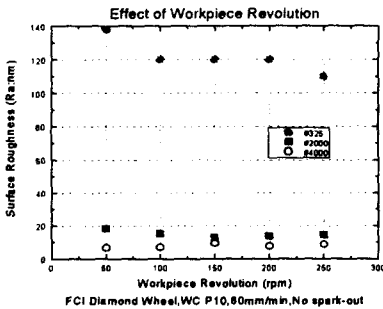


Fig.12 회전수에 따른 조도변화

3) SCM강의 가공 및 결과

고경밀 기계요소부품에 대표적으로 사용되는 재료인 기계 구조용 강의 연삭 특성을 알아보기 위하여 SCM22H(경도 Hrc62) 강재에 대한 초정밀 연삭 실험을 수행하였다. 실제의 연삭 가공 모습을 Fig.13에 나타내었으며, 가공제품의 예를 Fig.14에 나타내었다.

본 실험을 통하여 달성한 최고 표면정밀도는 Ra 10nm, Rmax 58nm 수준으로 고경도 강재(Rc60 이상)의 경우에도 nm 수준의 초정밀 경면 가공이 가능함을 알 수 있다.



Fig.13 SCM 가공모습

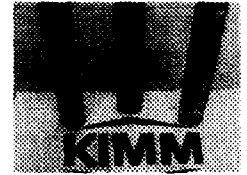


Fig.14 가공 시편 예

Fig.15, Fig.16, Fig.17에 가공조건별 영향에 따른 표면조도의 변화를 나타내었다. 전체적으로 가공 조건의 변화보다는 슷들입자 사이즈에 의한 표면 거칠기의 변화가 확실하게 나타나고 있다.

이송속도의 경우에는 주어진 조건내에서는 큰 영향이 없음을 알 수 있고, 공작물 회전수 및 절입량의 영향에서는 거친가공에서는 영향이 있으나 경면 가공시에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

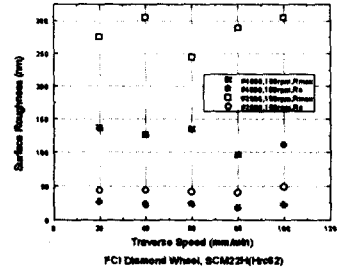


Fig.15 Traverse 속도 영향

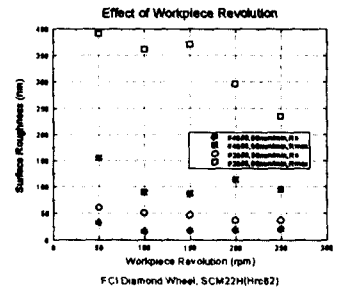


Fig.16 공작물 회전수 영향

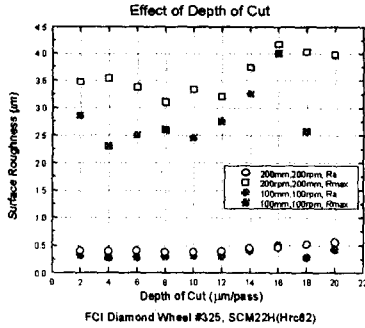


Fig.17 절입량 영향

4) 유압용 Manual Valve 가공실험

개발된 ELID 원통 연삭기술을 적용하여 실제 농기계 및 산업기계에 활용되고 있는 유량 및 방향제어용 Manual Valve에 대한 가공실험을 수행하였다. 재료는 SCM415를 열처리한 것으로 경도는 Hrc57 정도이다.

Fig.18에 가공모습을, Fig.19에 가공된 밸브의 모습을 나타내었고, Fig.20에 연속된 4개 원통부의 진원도 및 원통도를 비교 측정하여 나타내었다. 또 Fig.21에는 Traverse 이송속에 따른 표면거칠기의 변화를 측정하여 나타내었다.

#2000숫돌로 가공한 표면 거칠기는 약 45nm Ra, 진원도는 약 2 μ m으로 나타났다. 이러한 결과는 기존의 밸브 가공공정인 범용 연삭 숫돌가공 공정과 래핑가공 공정을 한 공정으로 해결할 수 있는 정밀도와 장점을 가지고 있어 현재 관련업체에 본 기술을 이전 적용 중에 있다.



Fig.18 Valve 가공장면

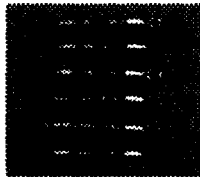


Fig.19 가공된 Valve

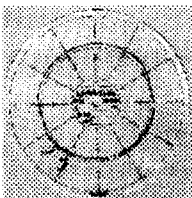


Fig.20 가공부위별
진원도, 원통도

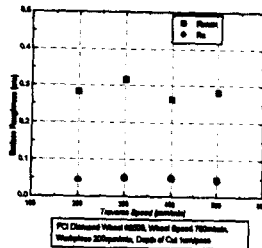


Fig.21 표면 거칠기 변화

5) Mini Disk용 금형 Core

본 기술을 정보저장기기용 핵심부품인 Pick-up 베이스 Die Casting 금형 Core의 가공에 적용하였다. Core재질은 초경(P10)이며, Fig.22는 도면, Fig.23은 가공모습, Fig.24는 완성된 Core 모습이다. 본 금형 Core의 특징은 직경이 작은 미소부위를 초정밀 경면으로 가공해야 하는 것이다. 가공품의 표면조도 측정결과는 Fig.25에 나타낸 것과 같이 #4000 숫돌로 22nmRa의 평균거칠기와 약 2 μ m의 진원도 및 원통도를 달성하였다. 현재 본 실험결과를 바탕으로 관련업체에서 CD, DVD 등 다른 첨단 정보저장기기용 픽업베이스 금형 코어에도 활용할 것을 검토하고 있다.

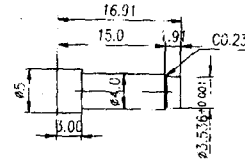


Fig.22 금형 Core도면



Fig.23 Core 가공모습

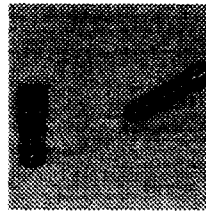


Fig.24 완성된 Core

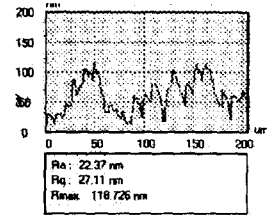


Fig.25 표면조도

3. 초정밀 경면 내경 연삭기술 개발

본 연구에서는 ELID법에 의한 초정밀 내경 경면 연삭기술개발을 위하여 Fig.26 및 Fig.27과 같은 2가지 형식의 내경 연삭시스템을 구성하였다.



Fig.26 연속 드레싱
내경연삭장치



Fig.27 간헐 드레싱
내경연삭장치

두 시스템은 간단한 치공구로 구성되기 때문에

공작물에 따라 쉽게 교체가 가능하다. 연속드레싱 방식은 가공중에 계속 드레싱이 이루어지므로 대구경 연삭에 유리하며, 간헐드레싱방식은 슷돌만 내경을 통과하기 때문에 소구경 가공에 유리하다. 본 시스템을 이용하여 #325, #2000, #4000 주철분트 다이아몬드 내경 연삭숫돌의 드레싱 특성실험 결과는 Fig.28과 같으며 Fig.29에는 가공품중 대표적 금형강인 SKD11 및 베어링강인 SUJ2의 조건에 따른 표면조도 변화를 나타내었다. Fig.30~Fig.33에는 본 실험을 통하여 초정밀 경면 가공된 대표적 내경 시편의 모습을 나타내었다.

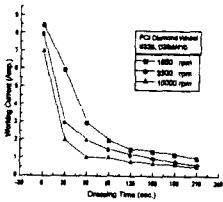


Fig.28 내경 휠 초기 드레싱특성

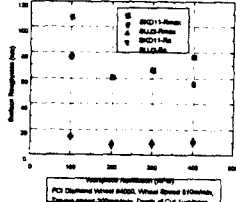


Fig.29 가공조건 및 표면조도



Fig.21 공구강(SKH51)

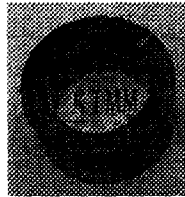


Fig.31 초경합금(P10)

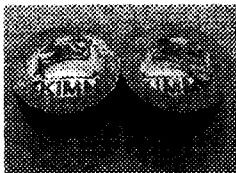


Fig.32 SKD11 금형강

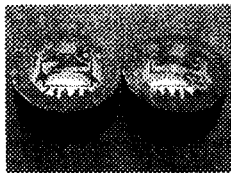


Fig.33 SUJ2 베어링강

연속드레싱과 간헐드레싱의 가공 중 변화를 관찰한 결과 연속식에서는 1 μ m의 연속적인 절입량에서 2~4 암페어의 전류치를 갖는 부도체 피막을 안정적으로 유지하는데 비하여, 간헐식에서는 가공을 마친 연삭휠의 피막이 점차 소멸되어 5회 정도의 왕복가공으로 7~8 암페어 수준의 전류치로 변화하였다. 따라서 간헐식을 이용할 경우에는 드레싱 시간을 길게 할 필요가 있다.

가공결과 평균 표면거칠기는 초경합금 8nmRa, SKD11강 12nmRa, SUJ2 강 10nmRa 수준으로

초정밀 경면 가공이 가능하였다.

이들의 가공조건은 회전전수 6500rpm 및 10,000 rpm, 공작물 회전수 100, 200, 300rpm, Traverse 속도 200mm/min, 절입량은 황삭 2 μ m, 정삭 1 μ m이며, 최종 마무리 공정인 스파크아웃은 완전히 가공이 완료될 때까지 수 차례 진행하였다.

4. 미세 형상 가공기술 개발

4.1 다심 광커넥터 금형 가공기술 개발

본 연구에서는 미세 형상부품의 초정밀 가공 기술개발의 일환으로 첨단 통신용 부품인 8심 광커넥터 금형코어를 가공하였다. 8심 광커넥터는 L8 \times W7 \times T2.5mm 정도로 소형이며 피치 250 μ m으로 배열된 8개의 광섬유 장착 Groove가 있고 외곽에 ϕ 0.7mm의 가이드 핀 홈이 있으며 그루브 간 정밀도 및 조립오차는 \pm 1 μ m을 요구하는 대표적 초정밀 소형 미세 형상부품의 일종이다.

Fig.34와 Fig.35는 미세 연삭가공으로 V-Groove 및 원형 Groove 타입 사출성형용 금형을 제작한 모습이며, Fig.36 및 Fig.37은 이 금형을 이용하여 실제 제작한 사출성형시제품 형상이다. Fig.38 및 Fig.39에는 이들 금형과 성형품의 정밀도를 측정하여 나타내었다. 금형은 \pm 1 μ m, 성형품은 \pm 2 μ m의 정밀도로 제작되어 미세 연삭가공법으로도 광커넥터 금형제작이 가능함을 알 수 있다.

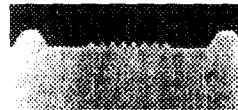


Fig.34 V-groove금형



Fig.35 원-Groove금형

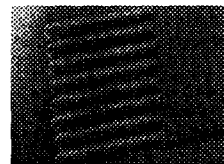


Fig.36 V-Groove시제품

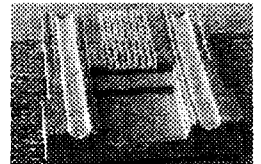


Fig.37 원-Groove시제품

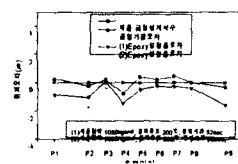


Fig.38 V-Type 측정

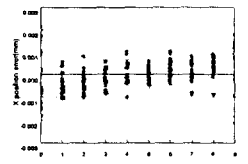


Fig.39 원-Type 측정

4.2 미세 드릴링 기술 개발

본 연구에서는 마이크로 드릴링 기술개발을 위하여 Fig.40과 같은 미세 드릴링 시스템을 구축하고, 미세 드릴의 절삭력 및 공구수명을 예측하기 위하여 Fig.41과 같은 측정장치를 개발하였으며, Fig.42에는 직경 50 μ m급의 미세 구멍가공실험 결과를 나타내었다. 이 시스템으로 Fig.43과 같은 미세 가공 중의 절삭력 신호특성 분석실험을 수행하고 Fig.44 및 Table 2, Table 3에 나타낸것과 같이 가공조건 및 공구의 접촉각 등에 따른 공구수명을 분석하였다.

이들 결과는 미세 구멍가공을 위한 최적 드릴형상의 설계 및 드릴제조에 관련된 기술개발에 활용될 예정이다.



Fig.40 미세드릴장치

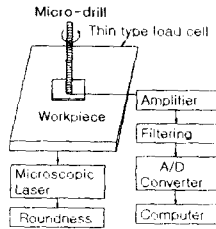


Fig.41 측정시스템



Fig.42 $\phi 50\mu$ m가공예(A)

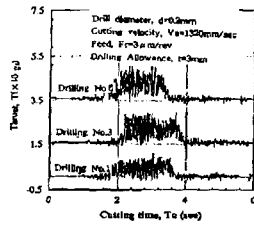


Fig.43 절삭력 신호특성

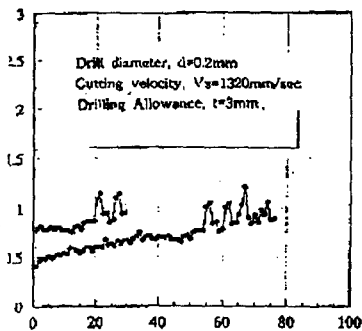


Fig.44 절입속도와 공구수명 관계

Table 3 드릴직경과 공구수명 관계

구분	d=200 μ m	d=500 μ m
1	34sec	3min 42sec
2	1min 40sec	4min 40sec
3	28sec	5min over
4	1min 25sec	3min 29sec
5	48sec	5min over

Table 4 접촉각에 따른 절단 공구수명

구분	No. 1	No.2
86 $^{\circ}$	19sec	23sec
88 $^{\circ}$	26sec	33sec
90 $^{\circ}$	1min 25sec	1min 6sec

5. 결론

1. 전해드레싱 방법에 의한 원통 및 내경의 초정밀 경면 연삭 시스템을 구축하였고, 개발 시스템의 특성실험 및 각종 재료의 가공실험, 산업화 적용을 위한 실험 등을 통하여 다양한 관련기술을 축적하였다.
2. 초정밀 경면 연삭실험 결과 원통가공에서 표면 거칠기 6nmRa, 진원도 0.1 μ m 수준의 초정밀 표면 형상 정밀도를 달성하였고, 내경에서는 최고 표면 거칠기 8nmRa수준을 달성하였다.
3. 미세형상부품 가공기술개발을 위하여 광통신용 8심 광커넥터 급형의 초정밀가공 및 사출성형시제품 개발을 통하여 연삭가공을 통한 미세형상부품의 실용화 가능성을 확인하였으며, 마이크로 드릴링 시스템 및 공구수명 측정시스템의 구축을 통하여 50 μ m급의 미세 구멍가공을 실현하고 미세 드릴링 관련 기반기술을 축적하였다.

참고문헌

1. 이후상 외, "Nanotechnology를 위한 가공시스템 연구-초정밀 표면 형상 가공기술개발" 1,2,3차년도연구보고서, 한국기계연구원, 과학기술부, 1998.1999,2000
2. H.Ohmori, "Electrolytic In-process Dressing (ELID) Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining", JSPE 59-09, pp.1451-1457, 1993