

초정밀 폴리곤미러 가공기의 공작물 장착용 치구설계

한 철 호

금오공과대학 생산기계공학과 교수



● 1955년생
● 塑性加工 및 塑性變形 해석을 전공하였으며 금속성형과 금형의 CAD/CAM, 정밀가공분야에 관심이 있다.

이 태 원

금오공과대학 기계설계공학과 교수



● 1958년생
● 최적설계를 전공하였으며 구조물의 비선형해석 및 동해석에 관심이 있다.

1. 머리말

종래 $1\mu\text{m}$ 의 차수(order)가 일반적이었던 절삭가공의 가공정도는 최근 정밀가공기술이 발달하면서 미국, 일본, 영국과 독일등의 선진공업국에서는 이미 100nm에서 10nm에 달하는 초정밀가공기가 개발되는 수준에 도달하고 있으며 초정밀부품을 요하는 반도체, 전산기, 정보, 영상기기등과 연관된 첨단 전자산업과 광학기기, 측정기기, 우주 항공산업의 눈부신 발전과 더불어 초정밀가공기술에 대한 필요성은 일층 증가하고 있다. 선진제국에서는 일찍부터 초정밀기술이 미래산업을 좌우하는 기반요소가 될 것을 인식하고 막대한 투자를 하여 연구개발(1~3)에 열중하고 있으며 국내에서도 근래 이 분야에 대한 관심이 고조되어 기초연구가 진행되고 있는 실정이다.

초정밀가공기술의 개발을 위해서는 정밀가공용 공작기계의 구조, 기계요소, 절삭공구등에 관한 설계와 가공기술, 측정기술, 미세변위 제어기술의 개발과 공작물의 장착기술의 개발등

이 필요하다. 이중 공작물의 장착의 역할은 정확한 위치결정과 안정적 체결에 있으며 초정밀가공의 정밀도결정에 중요한 요소중의 하나이다. 이는 고도의 치수와 형상정밀도가 요구되는 초정밀가공에서는 공작물을 장착하는 힘에 의한 변형이나 열응력에 의한 변형 및 고정방법에 따른 변형등 통상적으로 무시해도 좋을 제반문제까지 신중히 고려해야 하기 때문이다. 안정적 체결을 위해서는 고체결력이 요구되지만 이 경우는 공작물의 변형이 커지고 체결력이 작으면 안정성을 상실하고 정확한 위치결정이 어려운 서로 상반되는 특성을 갖기 때문에 변형을 최소화하며 요구기능을 만족하는 치구를 설계한다는 것은 대단히 어려운 일이다.

초정밀 치공구를 개발하기 위해서는 체결력에 대한 치공구의 응력과 변형해석, 열영향에 해석, 변형최소와 최적설계등 여러 연구가 복합적으로 수행되어야 한다. 일반적으로 정밀가공용 공작기계와 연관된 문헌은 거의 없는 실정이며 이는 이른바 노하우로 정밀도를 좌우하는 요소이며 또한 체계화하기 힘들기 때문인 것 같다.

필자는 초정밀가공기 개발의 핵심기술 중 공작물을 장착하는 치구분야의 연구를 하고 있으며 레이저프린터의 초정밀 부품인 폴리곤미러를 가공하는 초정밀가공기의 공작물 장착용치구에 대한 현재까지의 연구상황을 간략하게 기술하고자 한다.

2. 변형요인의 분석

2.1 정밀도를 지배하는 요인

초정밀가공기술의 연구분야는 기계와 공구의 재료 및 설계, 구동기구, 측정, 제어, 절삭가공법, 공작물장착 및 가공시스템등이 있으며 이들 요소들이 상호 복합연계되어 있어 초정밀도를 얻기 위해서는 각 요소별 가공정밀도는 요구 종합정밀도보다 한단위 높은 정도를 갖추어야 한다. 초정밀가공의 정밀도를 지배하는 요소는 크게 공작기계에 의한 요소와 공작물에

의한 요소 두가지로 분류할 수 있으며 이들은 다시 표 1과 표 2⁽⁴⁾에 예시된 오차요인에 의해 결정되며 이들 오차요인의 정량적 값은 각 오차요인의 세부 지배인자들에 의해 좌우된다. 표 1, 2의 오차 정도는 $0.1\mu\text{m}$ 이하의 종합가공 정밀도를 얻기위해 요구되는 정도를 표시한다.

표 3은 미국 Union Carbide사가 POMA (point one micro accuracy)의 초정밀가공기를 개발⁽⁵⁾하기 위해 표 1과 표 2의 오차요인에 의한 초정밀가공기의 중요요소별 도달목표를 설정한 예를 보여주고 있다. 표에서도 나타나 있는 것처럼 가공물의 지지는 초정밀가공기의 종합밀도를 결정하는 핵심요소가 된다. 표 1, 2, 3을 종합해 보면 초정밀용 가공물 고정치구는 고정방법, 고정력, 자중, 열변형, 위치결정등 여러 지배인자의 영향을 받으며 일반 정밀공작기계에서 통상 무시할만 변형요인도 고려하지

표 1 공작기계에 의한 가공정도 요인

오차요인	오차정도	지배인자	비고
열 변 형	10^{-7}	온도제어 0.01K, 주위온도 가공열 각종 발열, 전도	10^{-6} - 10^{-5} /K
역학적 변형	$0.01\mu\text{m}$	자중, 난력, 절삭력, 편심중량	10^8N/m
위치결정정도	$0.02\mu\text{m}$	계측의 분해능, 운동분해능	10nm이하
운동재현성	$0.002\mu\text{m}$	계면의 물리적 확률적 거동	구동계, 모터

표 2 공작물에 의한 가공정도 요인

오차요인	오차정도	지배인자	비고
역학적 변형	$0.01\mu\text{m}$	자중, 절삭력, 편심하중 체결력, 기압차	$\phi 30 \times 60$ 10nm
열 변 형	10^{-6}	가공열, 주위온도, 전열특성	절삭량 μm 절삭량 10N 0.1K
경년 변화	10^{-5}	잔류응력, 고용체 변태	Al
결정립 차이	$\sim 0.02\mu\text{m}$	결정의 이방성, 입경	재료불균일
이립자에 의한 차이	$\sim 0.03\mu\text{m}$	계재물, 석출물	
피삭성	$\sim 0.05\mu\text{m}$	변형파괴 특성, 열특성 공구재의 상호작용	

표 3 POMA 달성을 위한 요소별 오차설정

구성요소	오차요인	목표오차(μm)
슬라이드	위치측정	0.01
	위치제어	0.05
	요잉, 피칭, 롤링	0.02
	직선성	0.02
스핀들	휘둘림	0.02
	열팽창	0.05
	구동	0.01
가공물지지	위치결정	0.05
	역학적변형	
열 변 형		0.05
총 합 정 밀 도		0.1

않으면 안된다. 이와같은 개개 요인을 최소화 할 수 있는 공작물장착용기구를 설계한다는 것은 쉽지 않으며 이를 위해서는 일차적으로 공작물의 변형을 예측할 수 있는 응력해석이 선행되어야 할 것이다.

3. 設計基準 및 1次 設計案

초정밀 폴리곤미러 가공기의 공작물장착치구의 정밀도 요구사항과 각 사양을 만족하기 위한 1차 설계방안에서 고려한 사항을 소개하면 다음과 같다.

3.1 設計基準

(1) 최종 제품의 평면도와 평행도 유지

平面度 :

A	□	0.0005
---	---	--------

平行度 :

A	//	0.0005
---	----	--------

(가) 治具의 공작물 접촉부위의 평면도 및 평행도 보장 → 부품정도

(나) 均一 접촉압력 보장 → 공작물 고정방법 (thrust bearing)

(다) 하중의 편심방지 → 구면 미끄럼 구조

(2) 운동의 정밀도

(가) 인덱스 테이블 중심과 治具중심의 동심도 보장

φ25-H7×2 tief, 2 guide pin

(나) 인덱스와 治具의 고정방법

직접고정 : M8×8, guide pin 구조

간접고정 : clamp

(3) 취부 및 착탈 용이 → 공작물 상부 고정부위의 일체구조

(4) 가공물 고정력의 미세조정 구조

세목나사, 토오크의 고정면 전달 차단

(5) 가공물 갯수에 대한 융통성

스페이서 활용 → 간격조정, 상하면 손상방지

3.2 1次 設計案

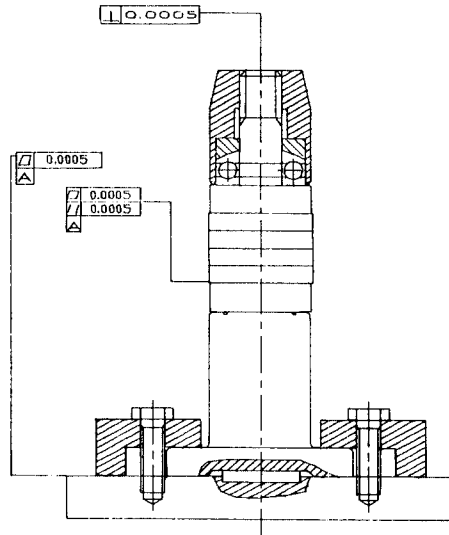


그림 1 폴리곤미러 장착용치구

4. 응력 및 변형해석을 위한 전산 프로그램 개발

4.1 공작물의 응력 및 변형해석 전산 프로그램

가공대상인 폴리곤 미러는 허용공차가 일반

가공물과 달리 나노(n) 단위가므로 공작물을 지지하는 지그의 역할이 중요하다. 기존의 공작 기계에서는 지그와의 접촉력으로 인한 가공물의 변형은 허용공차 보다 상당히 작았으나 현 연구대상인 폴리곤 미러에서는 지그와의 접촉력과 공구에 의한 절삭력 및 열로 인한 가공물의 변형은 허용공차에 상당한 영향을 미친다. 그러므로, 추후로 모든 변형 요인을 고려한 치공구의 최적설계를 목표로 먼저 아래의 기능을 갖는 해석용 프로그램을 완성하고자 한다.

(1) 6각형 미러 가공물의 3차원 FEM 모델의 자동 생성을 위한 상용 전처리(pre-processor) 프로그램과의 연계 또는 전용프로그램을 개발한다.

(2) 지그와의 가공물의 온도해석 및 탄성해석을 위한 3차원 FEM 프로그램을 완성한다. 현재의 방법은 기존의 상용코드가 많이 있으나 추후에 개발 예정인 coupled thermoelasticity 해석 프로그램 및 최적설계에 필요한 민감도 해석을 위하여 개발이 필요하다.

(3) 폴리곤 미러의 변형 후 형상의 가시화를 상용 후처리(post-processor) 프로그램과 연계를 검토하고 변형후 가공물의 평면도와 다각형의 모서리 각도 변형을 검토한다.

앞에서 설명한 것은 현재까지 열탄성 해석에 많이 사용되는 방법으로 탄성 변형에 의한 열발생이 적다는 가정하에 먼저 열전달 식으로부터 구조물의 온도 분포를 구한 다음 계산된 온도차로 인한 열응력을 해석하도록 구성되어 있다. 그러나, 이 방법은 기존의 열탄성문제에는 잘 적용될 수 있을지 모르나, 현재의 연구대상과 같이 가공정도가 나노(n)단위인 경우에는 정확하지 않을 수 있다. 그러므로, 열과 탄성 문제가 결합된 열탄성 해석방법의 연구가 다음 단계로 진행되어야 한다.

한편, 3차원 고체 FEM 유한요소해석은 실제 구조물의 형상을 정확히 정의하는 장점이 있으나, 계산시간이 너무 많이 걸린다는 단점이 있으므로 효율적 관점에서 2차원 요소로 근

사화하여 해를 구하는 방법의 검토도 필요하다.

이 연구의 궁극 목적은 치공구 설계이고 앞서 설명한 해석 방법들은 설계과정의 일부일 뿐이다. 그러므로, 민감도 해석을 통한 새로운 지그설계 방향을 자동으로 찾아가는 최적화 기법 도입이 요구된다. 이 최적설계 프로그램에는 물론 연구된 열탄성해석이 포함된다.

4.2 문제정의 및 모델링

가공물을 지그로 고정하였을 때 가공물은 변형된다. 이러한 변형은 지그의 자중 및 가공물의 지지를 위한 체결력으로부터 발생하기 때문에 설계자가 의도한 가공물의 변형한도에 맞추어 지그 설계가 이루어져야 한다. 즉, 하중조건 설정이 지그 설계의 핵심이다. 이러한 이유로 탄성해석은 가공물만 대상으로 하였고 프로그램의 개발 진행상의 문제로 하중조건을 단순화하여 공구의 절삭력 및 열에 의한 변형을 무시하고 가공물과 지그가 접촉하는 부분의 하중만 고려하였다. 또한, 실제 공작물 장착시는 공작물(polygon mirror)을 1개 이상 장착하는 경우도 있으나 1차적으로 1개만을 장착하는 경우에 대해 해석하였다.

설계에서는 지그와 가공물에 접촉부위의 결정이 주관심이 된다. 그러므로, 위의 가정하에

표 4 FEM 입력 자료 및 하중상태

탄성계수 : 6.8E4 N/mm²
 프와송 비 : 0.34
 폴리곤 미러의 내반경 : 11mm
 폴리곤의 내접원의 반경 : 17.32mm
 폴리곤 가공물의 두께 : 5mm
 지그의 내반경 : 11mm
 지그의 외반경 : 16mm
 하중 case : 전체 체결력=106N

No.	하중이 작용하는 부위		수직압력 (N/mm ²)
	내반경(mm)	외반경(mm)	
1	11	16	1.00
2	11	14	1.80

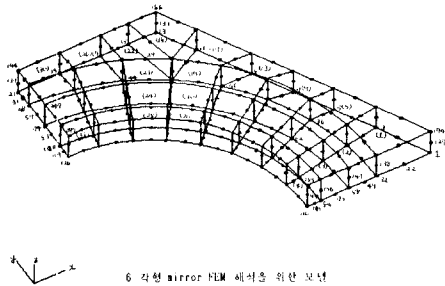


그림 2 6각형미러 FEM 해석을 위한 모델

서 일정한 체결력이 환형의 접촉부위에서 균일 분포하중으로 작용하도록 설계된 지그에서 환형폭을 변화시키면서 변형을 해석하였다. 하중 상태는 표 4에 서술한 바와 같이 2가지 경우를 고려하였다. 또한, 설계된 가공물의 재질 및 크기에 대한 자료 역시 표 4에 있으며 6각형 미러의 FEM 해석 모델은 그림 2와 같다. FEM의 해석결과는 분할 요소의 증가로 정확도가 좌우되나, 계산량의 문제로 그림 2와 같이 모델링 하였다. 사용된 요소는 20개 절점 가진 3차원 고체 요소이며 지지력 및 형상의 대칭성을 고려하여 그림과 같이 6각형의 1/4을, 두께방향의 1/2만 해석 대상으로 하였다.

4.3 해석 결과 분석

6각형 mirror 가공물의 해석 관심대상은 응력 분포가 주가 아니라 가공 후의 형상에 대한 것이다. 지그로 고정된 상태에서 가공을 하여 완성된 가공물은 지그에서 이탈시 탄성회복을 하여 의도한 형상과 오차가 있다. 그러므로 해석대상은 주어진 하중하에서 결정된 가공물의 형상에서 하중이 없는 상태에서 미지의 형상을 찾는 문제가 된다. 그러나, 극히 작은 변형하에서는 초기의 형상을 가공된 형상으로 하고 하중을 역으로 가하는 문제로 변환하여 해석하여도 되나 여기서는 설명의 편의를 위하여 주어진 초기형상에 지그와의 체결력으로 인한 분포하중하에서 변형된 형상을 찾는 문제를 다루었다.

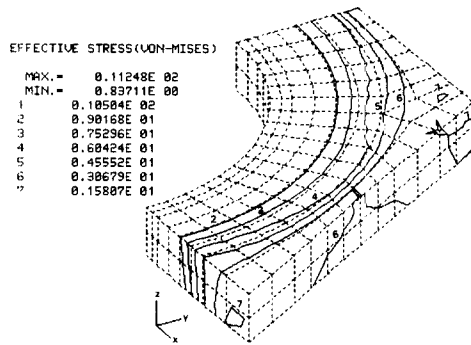


그림 3 유효응력 분포 (하중상태 1)

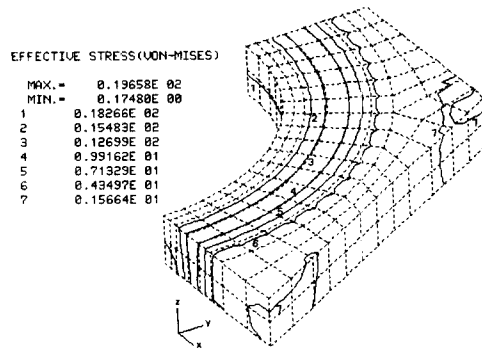


그림 4 유효응력 분포(하중상태 2)

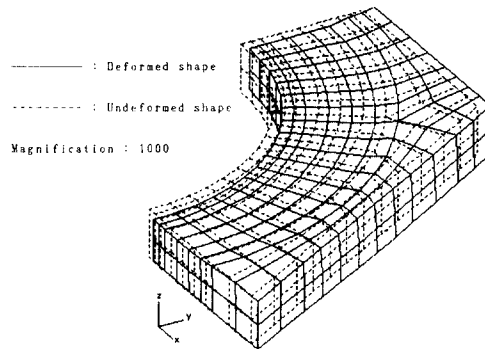


그림 5 공작물의 기하학적 변형(하중상태 1)

2개의 하중조건에 대한 FEM 해석결과는 그림 3부터 그림 6에 도시하였다. 그림 3, 4에서 보듯이 각 경우에서 요소의 최대상당응력은 2.0 N/mm^2 이하이며 이 값은 재질의 항복응력 136 N/mm^2 보다 상당히 작기때문에 가공

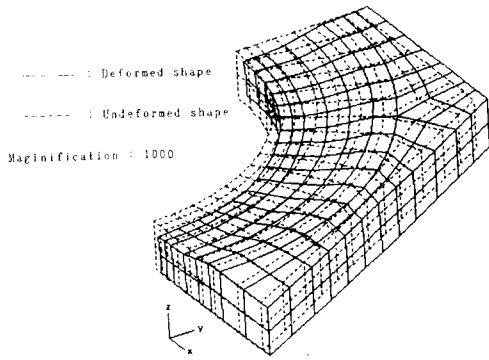


그림 6 공작물의 기하학적 변형(하중상태 2)

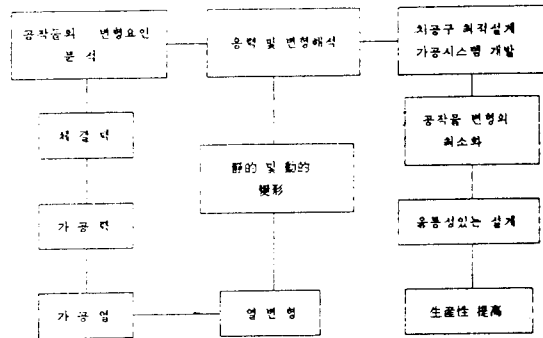
물은 탄성 영역에서 있음을 알 수 있다. 폴리곤 미러의 가공물의 변형을 나타낸 그림 5, 6을 보면 6각형의 꼭지점보다 모서리의 중간부분이 더 변형이 크게 되어 바깥으로 튀어나움을 알 수 있다. 이 사실로부터 6개의 평면으로 구성된 정육각형의 가공물은 지그에 고정함으로써 평면이 곡면으로 변형되고 모서리와 모서리의 각도가 120°를 초과하며 이러한 변형정도는 접촉부위의 형상에 좌우된다. 즉, 지그와의 환형 접촉폭이 넓은 case 1이 평면의 변형이 적다. 참고로 미러평면의 돌출정도는 case 2에서 상대적으로 최고 0.02 μ m 정도이고 6각 모서리의 각도변화는 0.001° 정도이다.

결론으로, 가공물은 고정하는 지그의 체결력 및 가공물과의 지지방식에 따라 폴리곤 미러의 정밀도가 결정되며 현재 기초 설계된 지그는 다른 여러요인에 의한 가공오차를 제외한 경우도 순수 체결력만으로도 약 0.02 μ m, 0.001°의 가공오차를 유발할 요인을 갖고 있다. 그러나, 이러한 해석결과는 앞서 설명하였듯이 적은 요소개수를 사용한 점, 열 변형을 고려하지 않은 점등으로 실제의 상황과 약간 다른 결과를 얻을 수도 있다.

5. 맺음말

초정밀 폴리곤미러 가공기의 공작물 장착용

표 5 超精密加工機用 治工具設計시스템 開發 段階



치구를 설계하기 위해서는 공작기계와 공작물의 변형요인의 분석이 필요하고 특히 공작물의 및 고정력의 크기에 따른 변형도 고려해야 하며 가공에 의한 열적변형까지를 포함한 변형을 최소화하는 최적설계가 이루어져야 한다. 또한 치구자체가 다양한 제품과 수량을 장착할 수 있으며 동시에 경제성을 갖는 구조가 되어야 할 것이며 이 분야에 대한 깊은 연구가 요망된다. 참고로 추후 더욱 연구가 필요한 초정밀가공기의 치공구 시스템의 구성분야를 종합해 보면 표 6과 같다.

참고 문헌

- (1) 谷口紀男, 1984, “超精密加工技術の發達と今後の課題”, 日本機械學會誌, 第87卷, 第791號, pp. 15~22.
- (2) 星野 滿, “レーザプリンタ用ポリゴンミ러の超精密加工”, 機械技術, 第35卷, 第9號, pp. 84~91.
- (3) 大野木敬, 1985, “ポリゴンミ러加工機による鏡面切削”, 機械と工具, 2月號, pp. 39~47.
- (4) Ikawa N. and Shimada S. 1984, “초정밀 다이아몬드 절삭가공의 문제점”, 日本機械學會誌, 第87卷 第791號, pp. 38~44.
- (5) “초정밀 다이아몬드 절삭의 가공정밀도에 관한 최근의 동향”, 월간정밀기계설계, 1987, pp. 1~51.