

1. 개요

캠코더, 빔 프로젝터, 대형 프로젝션 TV, CD-ROM 드라이브, DVD Player, 레이저 프린터 등의 많은 광학 제품들이 대중화되어 일반 소비자에게 널리 판매되고 있다. 제품 및 서비스의 디지털화에 부합하여 이들 광학 제품의 시장 규모와 중요성은 점점 커지고 있다. 본 기사에서는 최근 광학제품의 핵심부품으로서 널리 이용되고 있는 비구면 렌즈의 제조 과정에서 CAD/CAM 응용기술이 어떻게 활용될 수 있는지를 살펴보고자 한다. CAD/CAM이란 Computer-Aided Design과 Computer-Aided Manufacturing의 약어로서 제품의 설계와 제조 과정에서 컴퓨터를 활용하는 기술을 의미한다. 구체적으로 말하자면, 제품의 기하학적 형상정보를 표현하고 조작하는

한 광선들이 한 점에 모이는 것이 불가능하다는 점인데, 이러한 결함을 줄이기 위해 여러 구면 렌즈들을 조합하여 광학계(optical system)를 구성한다^[2]. 이러한 구면 렌즈들을 조합하는 방식은 렌즈 수차(aberration)의 누적, 조립 단계에서 발생하는 렌즈 배열 오차 등으로 인해 높은 정도의 광학적 성능을 얻기가 어렵다. 여기서 수차(aberration)란 렌즈에서 상을 맺을 때 한 점에서 나온 빛이 렌즈를 지난 다음, 한 점에 모이지 않아 영상이 빗잡이 있어 보이거나 일그러지는 현상을 말한다^[2]. 비구면 렌즈(aspheric lenses)를 이용하면 평행한 광선들을 한 점에서 모이게 할 수 있으며 렌즈 개수를 크게 줄일 수 있기 때문에 높은 정도의 광학적 성능을 낼 수 있다. 따라서, 오늘날에는 비구면 렌즈를 많은 광학시스템에 적용하고 있다. 최근에는 휴대용 개인 디스플레이(HMD:

특집 ■ 비구면 렌즈기술

광학 제품용 비구면 렌즈 제조를 위한 CAD/CAM 응용기술

박형준*

기능을 바탕으로 제품의 설계에서 제조에 이르는 다양한 기술활동을 지원하고 그 기술 정보를 관리함으로써 설계 및 제조 과정을 합리화하고, 기술자 간의 의사소통을 원활하게 하는 컴퓨터 응용 기술을 말한다^[1].

2. 비구면 렌즈

렌즈는 광학제품의 성능에 직접적인 영향을 미치는 핵심 부품으로서 크게 구면 렌즈(spherical lens)와 비구면 렌즈(aspheric lens)로 나뉘어진다. 그림 1은 레이저 프린터의 LSU(Laser Scanning Unit)에 사용되는 렌즈 조합 방식들을 보여준다. 구면 렌즈의 이론적 결점은 평행

Head Mounted Display) 등에 이용되는 자유곡면 렌즈가 대두되고 있다.

비구면 렌즈의 기능적 특성으로 인해 렌즈의 양쪽 면은 매우 복잡한 함수로 정의된다^[2-7]. 광학제품 설계 및 분석을 위한 각종 문헌(예: ISO 10110-12), 상용 소프트웨어(예: 미국 Optical Research Associates사의 CODE V), 그리고 선진 업체 등의 조사 분석을 토대로 광학제품 설계에 널리 이용되는 대표적인 비구면을 분류하면 회전 대칭형(rotationally symmetric) 비구면, 회전 비대칭형(rotationally asymmetric) 비구면으로 나뉘어진다^[8-12]. 회전 비대칭형 비구면은 사출형(extruded) 비구면과 일반형(general) 비구면으로 나뉘어진다. 그림 2(a)는 빔 프로젝터에 이용되는 회전 대칭형 비구면 렌즈를 나타내

* 조선대학교 산업공학과 교수

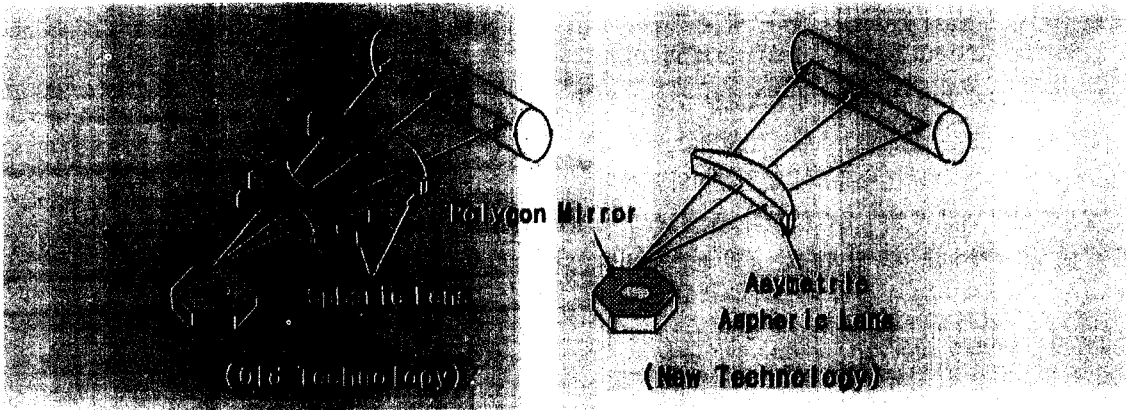
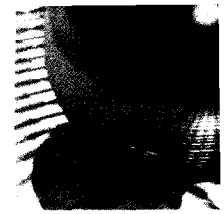


그림 1. 레이저 프린터에 이용되는 렌즈 조합 방식

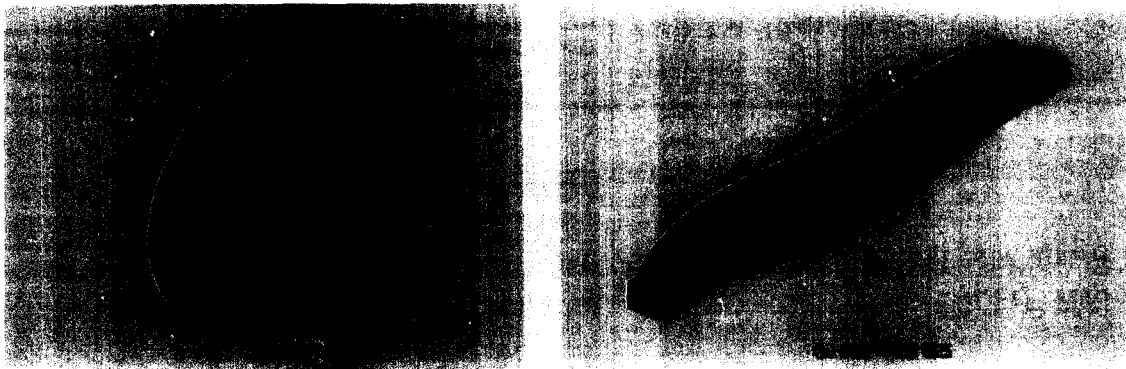


그림 2. 비구면 렌즈의 예

고, 그림 2(b)는 레이저 프린터에 이용되는 회전 비대칭형 비구면 렌즈를 나타낸다.

회전 대칭형 비구면은 XZ 평면에서 정의된 aspheric 단면곡선 $C(t)=[t f(t)]^T$ 을 z축에 대하여 360도 회전하여 얻어지는 비구면을 가리킨다^[6,7]. 식 (1)은 회전 대칭 렌즈에 이용되는 비구면식들 중의 한가지 예를 나타낸다.

$$z(r) = \frac{Cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+K)C^2r^2}} + \sum_{i=1}^{30} A_i r^i \quad (1)$$

where $r^2 = x^2 + y^2$

여기서, $C, K, A_i (i = 1, \dots, 30)$ 는 비구면식을 정의하는 계수들이다. 단면곡선으로는 conic, general asphere, odd power polynomial asphere 등의 3가지가 주로 사용된다. 대부분의 비구면 렌즈가 회전 대칭형에 포함된다. 사출형 비구면은 2차원 평면에서 정의된 aspheric 단면곡선 $C(t)$ 를 평면의 법선 방향으로 밀어서 얻어지는 비구

면을 가리킨다^[6,7]. 일반형 비구면은 $S(u, v)=[u \ v \ f(u, v)]^T$ 형태로 정의되는 비구면을 총칭하며^[6,7], 식 (2)는 회전 비대칭 렌즈에 이용되는 일반형 비구면식들 중의 한가지 예를 나타낸다.

$$z(x, y) = \frac{C_j(x^2+y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+K)C_j^2(x^2+y^2)}} + \sum_{j=1}^{66} C_j x^m y^n$$

where $1 \leq m+n \leq 10, j = [(m+n^2)+m+3n]/2+1 \quad (2)$

여기서 $K, C_j (j = 1, \dots, 66)$ 는 비구면식을 정의하는 계수들이다.

3. 플라스틱 비구면 렌즈 제조 과정

광학 제품용 렌즈는 대부분의 경우 금형(mould)을 이용한 성형 과정을 통해 대량 생산되며, 성형 재료에 따라

크게 유리 렌즈(glass lenses)와 플라스틱 렌즈(plastic lenses)로 나뉘어진다. 유리 렌즈는 성형에서 발생하는 수축 정도가 작지만 성형 시간이 상대적으로 오래 걸린다. 플라스틱 렌즈는 성형 시간이 비교적 짧지만 수축 정도가 비교적 큰 편이다^[9-5]. 수축률이 낮은 수지의 지속적인 개발로 인해 대량 생산에 유리한 플라스틱 렌즈가 많이 이용되는 추세이다. 비구면 렌즈는 구면 렌즈에 비해 제작하기가 훨씬 어려운데, 그림 3은 플라스틱 비구면 렌즈(plastic aspheric lens)를 제작하는 일반적인 절차를 나타낸 것이다. 먼저, 광학설계를 통해 렌즈 사양에 맞는 렌즈의 형상 및 크기, 비구면식과 비구면 계수들이 결정된다. 이 과정에서는 많은 시간과 전문성이 요구되며, 경험 있는 광학설계자가 CODE V와 같은 렌즈 설계용 컴퓨터 프로그램을 이용한다^[9]. 그런 다음, 금형(molds) 설계/가공/조립을 거쳐 사출성형(injection molding)을 통해 플라스틱 비구면 렌즈가 만들어진다^[9-5].

4. 비구면 렌즈 제조 과정에서 필요한 CAD/CAM 응용기술

광학제품의 품질 향상을 위해서는 무엇보다도 설계 사양에 최대한 충실하게 비구면 렌즈를 제작하는 것이 중요하다. 렌즈 제조 과정에서 발생하는 오차는 크게 금형 가공에서 발생하는 가공오차와 사출성형에서 발생하는 수축 등에 의한 변형오차로 나뉘어진다. 형상 정확도 측면에서는 변형오차가 지배적이지만 표면 조도(surface roughness) 측면에서 가공오차가 미치는 영향을 무시할 수 없다. 따라서, 렌즈의 품질 향상을 위해 금형 가공의 정밀도를 향상시키려는 노력과 사출 변형오차를 최소화하려는 노력이 동시에 수행되어야 한다^[9-5]. 일반적으로 비구면 렌즈의 금형 가공오차를 줄이기 위해서는 매우 정밀한 정삭/연삭/polishing 기능이 요구되며, 변형오차를 줄이기 위해서는 변형 정도를 고려한 비구면 렌즈식의 보정 기능이 요구된다. 비구면 렌즈 제조 과정에서 파생되는 주요한 CAD/CAM 응용 기술들을 나열하면 다음과 같다.

- 비구면식에 대한 상용 시스템과의 호환성 확보
- 비구면 렌즈 금형 정삭용 CNC 공구 경로 생성
- 금형 측정 데이터를 이용한 가공 오차 산출

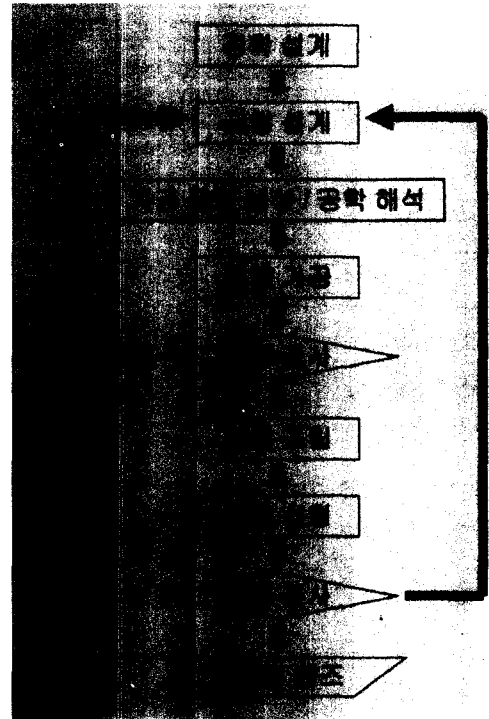


그림 3. 비구면 렌즈 제작의 일반적 절차

- 금형 가공오차 감소를 위한 정삭용 CNC 공구 경로 보정
- 렌즈 시제품 측정 데이터를 이용한 변형 오차 산출
- 사출 변형오차 감소를 위한 비구면 렌즈식 보정

4.1 비구면식에 대한 상용 시스템과의 호환성 확보

형상 표현을 위한 산업계 표준 방식으로서 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline)이 널리 사용된다^[1,13]. NURBS에 의한 형상 표현 방식은 공학제품(engineered products) 데이터 교환을 위한 IGES 또는 STEP과 같은 중립 파일 규격들(neutral file formats)에 의해 지원되며, 모든 상용 CAX 시스템에서도 지원된다^[1,13]. CAX (Computer-Aided X)는 컴퓨터를 이용한 공학적 행위를 총칭하며, 여기에는 설계(design), 생산(manufacturing), 공학해석(engineering), 검사(test) 등이 포함된다^[1].

그런데, 비구면 렌즈 설계에 이용되는 비구면식들은 대부분 NURBS 형태로 표현될 수 없거나 NURBS 형태로의 정확한 표현이 가능하더라도 차수가 매우 높아져서 실용성이 없기 때문에 상용 CAX 시스템과의 원활한 호



환을 어렵게 만든다. 또한, 이러한 비구면은 $1 \sim 10^4 \mu m$ 이하의 모델링 및 가공 공차를 요구하기 때문에 $10^1 \sim 10^3 mm$ 단위 공차를 위해 설계된 상용 CAX 시스템을 비구면 렌즈 제작에 적용하기가 곤란하다. 비구면식의 상용 CAX 시스템과의 비호환성으로 인해 비구면 렌즈 제작 과정에서 파생되는 문제점들은 다음과 같다.

- 상용 CAX 시스템과의 연계 미흡
- 상용 CAD 시스템을 이용한 정확한 렌즈 모델링 곤란
- 2D 데이터 기반 프로세스 의존도 심화
- 3D 데이터 생성 공정의 부정확 및 시간소요
- 상용 CAE 시스템을 이용한 공학해법 활용 곤란
- 상용 CAM 시스템을 이용한 황삭용 공구경로 생성 곤란

이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 주어진 비구면을 허용오차 이내로 NURBS 곡면으로 근사 시킨 후, NURBS 근사곡면을 IGES 또는 STEP 파일 형태로 표현하는 방식을 채택할 수 있다. 비구면식의 유형에 따라 NURBS 곡면 생성 방식들을 적용하여 NURBS 곡면으로 근사할 수 있다^[6.7.14-15].

회전 대칭 비구면의 경우 revolving 방식에 의해 비구면을 NURBS 곡면으로 근사할 수 있는데, 먼저 비구면 단면곡선을 허용오차 이내의 NURBS 곡선으로 근사한 다음, NURBS 근사곡선을 이용하여 NURBS 회전곡면

(revolved surface)을 생성할 수 있다^[6.7.14]. 이 과정에서 NURBS 곡선과 단면곡선과의 근사 오차 보장과 NURBS 근사곡선의 조종점(control points) 수의 효율적 관리에 대한 고려가 필요하다. 그림 4는 회전 대칭 비구면의 NURBS 곡면 근사 예를 나타낸다.

회전 비대칭 비구면에 속하는 사출형 비구면의 경우 extruding 방식에 의해 NURBS 곡면으로 근사할 수 있다^[6.7.14]. 따라서, 단면곡선을 허용오차 이내의 NURBS 곡선으로 근사한 다음, NURBS 근사곡선을 이용하여 NURBS 사출곡면(extruded surface)을 생성할 수 있다^[6.7]. 회전 비대칭 비구면에 속하는 그 외의 일반형 비구면들은 lofting 방식에 의해 NURBS 곡면으로 근사적으로 표현될 수 있다^[6.7.15]. 이 과정에서 NURBS 곡면과 비구면과의 근사 오차 보장과 NURBS 근사곡면의 조종점 수의 효율적 관리에 대한 고려가 필요하다.

4.2 비구면 렌즈 금형 정삭용 CNC 공구 경로 생성

비구면 렌즈의 금형 가공은 황삭, 중삭, 정삭, 또는 윤내기(polishing) 작업을 거친다. 어느 작업이든지 공구경로를 생성한 다음, 후처리(postprocessing) 기능을 이용하여 생성된 가공경로를 CNC 가공기가 인식할 수 있는 NC 코드로 출력하고, NC 가공 simulation 기능을 이용

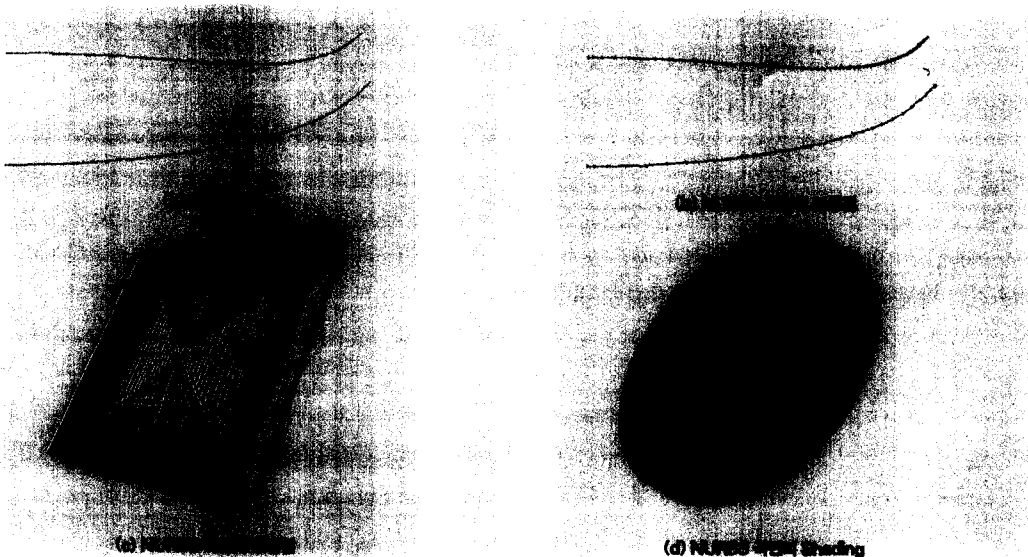


그림 4. 회전 대칭 비구면의 NURBS 곡면 근사 예

광학 제품용 비구면 렌즈 제조를 위한 CAD/CAM 응용기술

하여 가공경로를 검증한 후, NC 코드를 가공기에 전송하여 가공 작업을 수행한다^[9-5,16].

황삭이나 중삭 단계에서의 CNC 공구 경로는 비구면식에 대한 NURBS 근사곡면을 상용 CAM 시스템에서 활용하여 생성할 수 있다. 그러나, 렌즈 비구면식이 대개 $1\sim 10^3\mu\text{m}$ 단위의 정삭 가공 정밀도를 요구하므로 정삭 이후의 공정에 대해서는 상용 CAM 시스템이 정삭 가공 정밀도를 보장하지 못한다. 비구면의 정삭을 위해 초정밀 가공기나 연삭기가 사용되는데, 이러한 전용 기계에 내장된 공구 경로 생성 기능이 미흡한 점이 있다. 따라서, 비구면식을 직접 이용한 공구 경로 생성 기능이 요구된다. 렌즈 금형의 표면조도(surface roughness) 향상을 위한 윤내기 작업은 고도의 숙련공의 경험과 감각에 의존하는 경우가 많다.

회전 대칭 렌즈는 회전 비대칭 렌즈보다 가공오차가 작으며, 보통 DTM(Diamond Turning Machine)과 같은 정밀 가공기를 이용하여 선삭(turning) 방식에 의거하여 정삭 가공을 한다. 회전 대칭형 비구면의 선삭 공구경로 생성은 그림 5에서와 같이 가공기의 공구 접촉(cutter contact point)이 XZ 평면에 정의된 단면곡선을 따라 이동하도록 해주는 일련의 동작 명령들을 정하는 것을 말한다. 그런데, 공구 끝은 매우 작은 반경을 지닌 구의 형상을 가지며, 공구 접촉은 단면곡선의 형상에 따라 변하므로 공구의 중심을 기준으로 가공경로를 산출한다. 따라서, 공구경로는 공구 접촉이 단면곡선을 따라 이동할 때 얻어지는 공구 중심이 지나는 궤적곡선을 의미한다. 이 궤적곡선을 공구 반경에 대한 오프셋(offset) 곡선이라고 한다. 회전 대칭형 비구면의 선삭 공구경로 생성은 공구 중심이 오프셋 곡선을 따라 이동하도록 일련의 동작 명령들을 생성하는 것이다^[16,17].

선삭 공구경로 생성에서 고려해야 할 사항들은 보간(interpolation) 방식 선정, 보간 방식에 따른 오차 처리, 공구 간섭 발생 여부 등이 있다^[9-5,16]. 회전 대칭 비구면 렌즈 금형의 정삭용 선삭 공정에서는 반경이 작은 공구를 사용하여 공구 간섭 문제는 거의 발생하지 않는다. NC 제어기에서 지원되는 가공기의 동작 보간 방식(interpolation scheme)으로서 선형 보간(linear interpolator)과 원호 보간(arc interpolator) 방식이 대표적인데 최근 NC 제어기에 자유곡선 보간(parametric curve interpolator) 기능을 포함시켜 복잡한 형상의 가공 정밀도를 높여주는

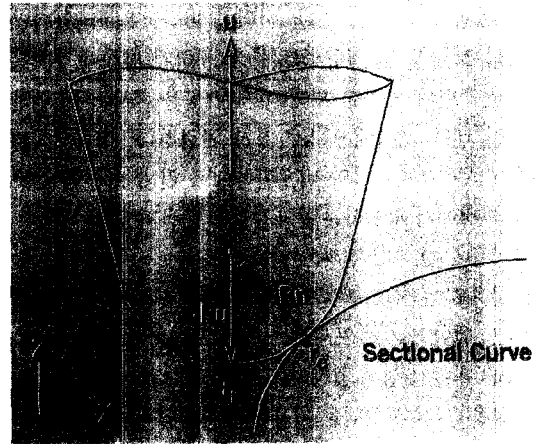


그림 5. 선삭 가공에 이용되는 공구 형상

연구가 진행되고 있다^[17-23]. 공구경로 생성을 위해 직선 보간만을 이용하는 경우에는 $1\sim 10^3\mu\text{m}$ 단위의 매우 작은 공차를 만족시키기 위해 소요되는 직선의 수가 매우 많아지는 단점이 있다. 또한, 길이가 매우 작은 직선도 생기게 되는데 이는 가공품질에 나쁜 영향을 주는 단점도 있다. 따라서, 원호 보간이나 자유곡선 보간을 이용하는 것이 바람직하다. 원호 보간이나 자유곡선 보간을 이용한 공구 경로는 공구 경로 코드의 길이를 상당히 줄일 수 있고, 공구가 접선 연속한 궤적을 이동하도록 해주므로 표면조도(surface roughness)를 향상시킬 수 있는 장점이 있다^[17-23]. 이러한 측면에서 공구경로곡선을 원호들로 이루어진 arc spline이나 NURBS 곡선으로 정확하게 근사하는 일이 중요하다^[14,17,18]. 그림 6은 원호 보간을 이용한 선삭 공구경로 생성을 위한 arc spline 곡선 근사 예를 나타낸다.

회전 비대칭형 비구면의 정삭 가공은 그림 7에서와 같이 고정밀 3축 밀링기에 의한 자유곡면 연삭(grinding) 가공 방식을 따른다. 이 과정에서 공구 형상, 공구 이송 형태(unidirectional, zigzag), 경로 생성 방식, 원호 보간 사용 여부, 보간 방식에 따른 오차 제어, 경로간 간격 결정, 공구 간섭 발생 여부 등을 고려해야 한다^[9-5,16].

이러한 연삭 공정에서는 그림 8에서와 같이 spherical 연삭 공구와 toric 연삭 공구가 많이 사용된다. 점 CL을 연삭 공구 기준점으로 이용하는데, 이를 CL point라고 한다. Spherical 연삭 공구에 대한 공구경로 생성은 볼 엔드 밀(ball end mill)을 이용한 밀링 공구경로 생성 방식과 동일하므로 비교적 계산하기 쉽다. 그러나, 공구 마모

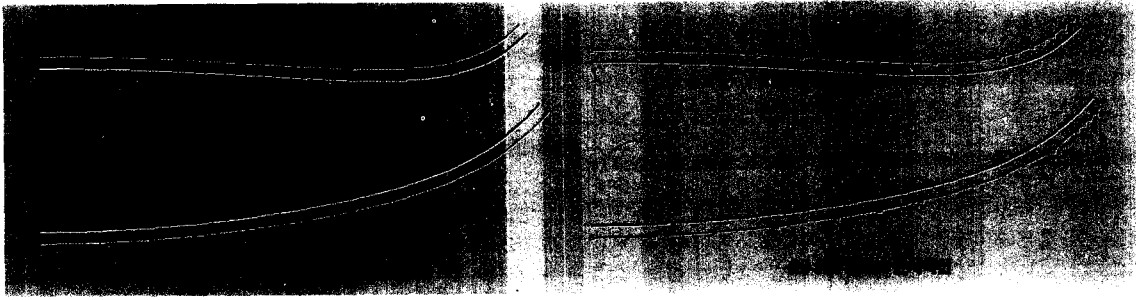


그림 6. 오프셋 곡선의 Arc spline 곡선 근사 예

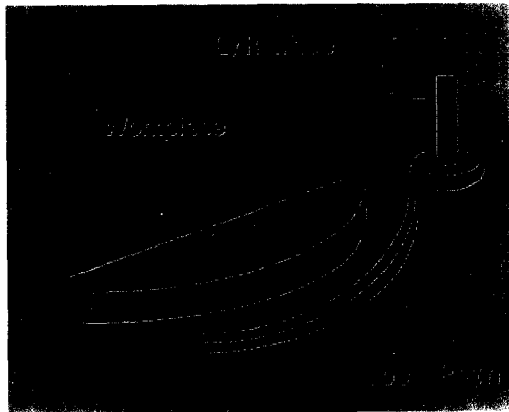


그림 7. 회전 비대칭 렌즈의 정삭용 연삭 공정

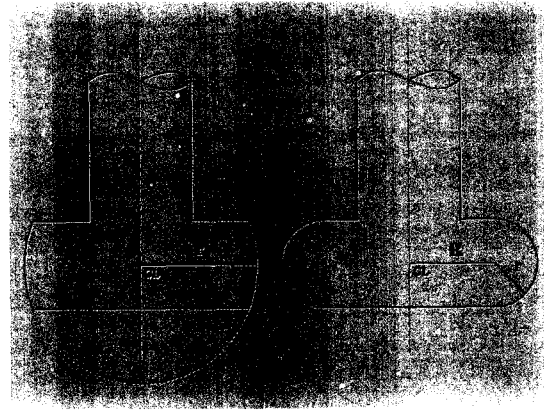


그림 8. Spherical 연삭 공구와 toric 연삭 공구

시, 연삭 공구를 다시 준비하는 과정이 번거롭고 시간을 많이 소모한다. Toric 연삭 공구에 대한 공구경로 생성은 상대적으로 어렵지만, 공구 준비가 매우 용이한 장점이 있다^[3-5].

공구경로 생성 방식에는 크게 parametric 방식과 cartesian 방식이 있다^[16]. Parametric 방식은 비구면의 등경곡선들(isoparametric curves)을 따라 공구 접촉점들을 정의하고, 이 점들에 대한 CL point들을 계산하여 곡면을 가공하는 방식이다. Cartesian 방식은 비구면에 대한 연삭 공구 기준점의 궤적 곡면과 XY 평면에 수직한 평면들을 교차시켜 얻어진 교차곡선들(intersection curves) 상에 공구 기준점(CL point)을 위치시켜 곡면을 가공하는 방식이다. Parametric 방식은 가공 경로 계산이 간단하고, 시간이 적게 소요된다. 그러나, 공구경로 곡선이 3차원 자유곡선 형태이므로 3축 동시 제어가 필요하고, 원호 보간을 적용할 수 없다^[3-5]. 가공오차가 매우 작은 경우 전체 NC 코드의 크기가 매우 커지며, 가공면의 품질에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다. Cartesian 방식은 가공 경로 계산이 다소 복잡하고, 시간이 많이 소요된

다. 그러나, 공구경로 곡선이 평면곡선(planar curve)이므로 2축 동시 제어로 가공이 가능하고, 원호 보간을 적용할 수 있다^[3-5]. 그림 9는 회전 비대칭 비구면의 연삭 공구경로 생성 예를 나타낸다. 여기서는 toric 연삭 공구와 parametric 방식이 이용되었다.

또한, 회전 비대칭형 비구면의 정삭 가공 과정에서 인접한 경로 간에는 그림 10에서와 같이 미세한 미절삭 부위(scallop)가 발생한다. 이러한 부위는 윤내기 작업에서 대부분 제거되지만 가공면 품질에 영향을 준다. 원하는 가공 품질을 얻기 위한 경로간 간격을 적절하게 결정하여야 한다^[5].

4.3 금형 측정 데이터를 이용한 가공 오차 산출

가공된 비구면 렌즈 금형을 초정밀 측정기를 이용하여 측정한 다음, 측정 데이터를 바탕으로 주어진 비구면식과 가공면과의 가공 오차를 정확히 산출해내는 일이 필요하며, 이러한 일은 가공오차 보정(compensation)을 위해 필수적이다^[15]. 회전 대칭 비구면 렌즈 금형의 경우, 보

광학 제품용 비구면 렌즈 제조를 위한 CAD/CAM 응용기술

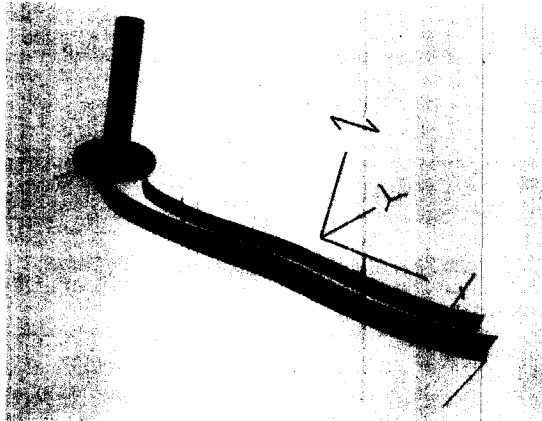


그림 9. 연삭 공구경로 생성의 예

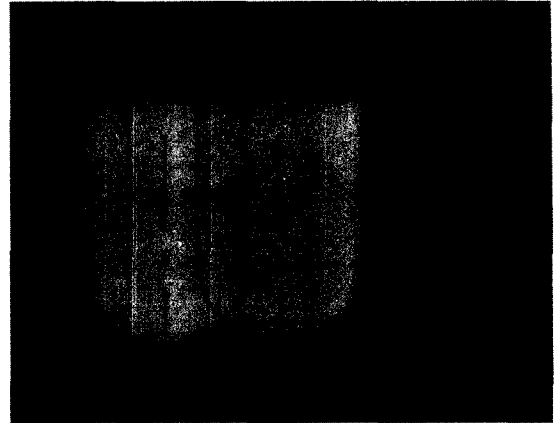


그림 10. 경로 간 미협삭 부위

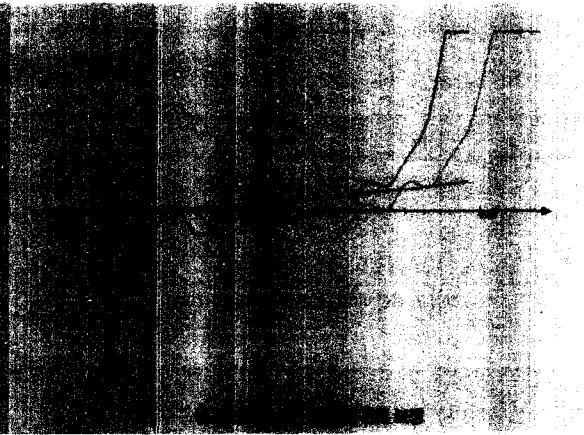
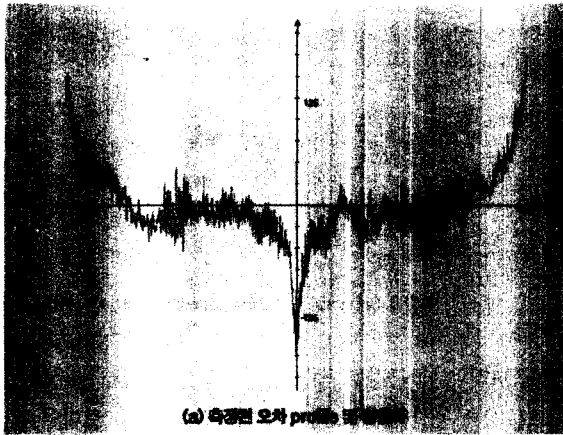


그림 11. 선삭 공구경로 보정의 예

통 $10^1 \mu\text{m}$ 이하의 정확도를 갖는 초정밀 측정기를 이용하여 가공면을 측정한다.

4.4 렌즈 금형 측정 데이터를 이용한 가공 오차 보정

비구면 렌즈 금형 가공 과정에서 공구마모, 공구 휨, 기계 오차, 진동, 온도 등으로 인하여 발생하는 미세 가공 오차는 렌즈의 품질에 큰 영향을 준다. 따라서, 초정밀 측정기를 이용하여 비구면 렌즈 금형 가공면을 측정하고, 산출된 미세 가공 오차를 가공경로에 반영하는 보정(compensation) 과정이 요구된다^[3,5]. 그림 11은 회전대칭 비구면 렌즈의 공구경로 보정의 예를 나타낸다. 여기서 x축의 단위는 mm이고, y축의 단위는 nm이다($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$).

4.5 렌즈 시제품 측정 데이터를 이용한 변형 오차 산출

비구면 렌즈 금형을 이용한 사출성형(injection molding)을 통해 비구면 렌즈의 시제품을 생산한다. 이러한 렌즈 시제품을 초정밀 측정기를 이용하여 측정한 다음, 측정 데이터를 바탕으로 주어진 비구면식과 시제품 비구면과의 형상 변형 오차를 정확히 산출해내는 일이 필요하다^[6]. 이러한 일은 사출 변형 오차 보정(compensation)을 위해 필수적이다^[6].

4.6 사출 변형오차 감소를 위한 비구면 렌즈식 보정

렌즈 시제품에서 발생한 사출 변형 오차를 줄이기 위해서는 원래의 비구면식을 적절하게 보정해야 한다^[5]. 먼저,



렌즈 시제품에 대한 측정데이터를 원래의 비구면식 형태와 동일한 비구면식으로 근사를 한다. 결과로서 비구면식의 형태는 같지만 비구면식을 정의하는 계수들(parameters)은 다르게 나타나는 비구면식이 얻어진다. 이러한 과정을 비구면 fitting이라 한다. 비구면 fitting을 통해 얻어진 비구면식을 원래의 비구면식에 적절하게 보정해줌으로써 사출 변형오차를 줄일 수 있다⁽⁵⁾.

5. 맺음말

지금까지 비구면 렌즈 제조 과정에서 요구되는 CAD/CAM 응용기술에 대해 살펴 보았다. 가속화되어 가는 제품 및 서비스의 디지털화에 부합하여 광학 제품의 시장 규모는 지속적으로 증가하고 있다. 비구면 렌즈는 이러한 광학제품의 성능에 직접적인 영향을 미치는 부품으로서 매질 균일성, 성형 변형도, 금형 가공 정밀도 등 여러 가지 측면에 의해 렌즈 품질이 결정된다. 렌즈 품질 향상을 위해서는 여러 부문에서의 지속적 연구 개발을 통한 선진 수준의 기술 확보가 요구된다. 또한, 본 기사에서 언급된 CAD/CAM 응용기술을 바탕으로 한 체계적인 비구면 렌즈 제조 프로세스를 정립하는 것이 시급히 요구된다.

(8) ISO. <http://www.iso.ch>, International Organization for Standardization.
 (9) CODE V, <http://www.opticalres.com>, Optical Research Associates.
 (10) APOMA, <http://www.apomanet.org>
 (11) Corning Precision Lens, <http://www.uspl.com/>
 (12) Cannon technology, <http://www.canon.com/technology/index.html>
 (13) L. Piegl and W. Tiller, *The NURBS Book*, Springer-Verlag, New York, 1995.
 (14) H. Park, "An error-bounded approximate method for representing planar curves in B-splines", *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 21, No. 5, pp. 479-497, 2004.
 (15) H. Park, "An approximate lofting approach for B-spline surface fitting to functional surfaces", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 18, No. 7, pp. 474-482, 2001.
 (16) 최병규 외, *CAD/CAM시스템과 CNC 절삭가공*, 회중당, 1996.
 (17) H. Park, "Optimal single biarc fitting and its applications", *Proceedings of International CAD Conference, May 24-28, 2004, Pattaya Beach, Thailand*.
 (18) H. Park, "Error-bounded biarc approximation of planar curves", *Computer-Aided Design*, 2003 (in press).
 (19) Y. J. Tseng, Y. D. Chen, and C. C. Liu, "Numerically controlled machining of freeform curves using biarc approximation", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, No. 11, pp. 783-790, 2001.
 (20) M. K. Yeung and D. J. Walton, "Curve fitting with arc splines for NC toolpath generation", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 11, pp. 845-849, 1994.
 (21) D. S. Meek and D. J. Walton, "Approximating smooth planar curves by arc splines", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 59, pp. 221-231, 1995.
 (22) D. C. H. Yang and T. Kong, "Parametric interpolator versus linear interpolator for precision CNC machining", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 225-234, 1994.
 (23) M. Shipitalni, Y. Koren, and C. C. Lo, "Realtime curve interpolators", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 11, pp. 832-838, 1994.

(1) I. Zeid, *CAD/CAM Theory and Practice*, McGraw-Hill, New York, 1991.
 (2) R. Fischer and B. Tadic-Galeb, *Optical System Design*, McGraw-Hill, New York, 2000.
 (3) 박형준, 공대영, "비구면 렌즈 전용 CAD/CAM 시스템 ALIS", 한국CAD/CAM학회 학술대회논문집, pp. 247-252, 2001년 2월 9일, 서울, 한국.
 (4) 박형준, "비구면 렌즈 전용 CAD/CAM 시스템 개발", 생산기술연구 (조선대), 제23권, 1호, pp. 77-86, 2001.
 (5) 박형준, "광학 제품용 비구면 렌즈 제조를 위한 CAD/CAM 기술", 포항공대 산업공학과 정기 세미나, 2001년 11월 9일, 포항, 한국.
 (6) H. Park, "A solution for NURBS modeling in aspheric lens manufacture", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 23, No. 1-2, pp. 1-10, 2004.
 (7) H. Park, "A solution for improving product data interoperability in aspheric lens manufacture", *Proceedings of APIEMS*, pp. 767-770, December 18-20, 2002, Taipei, Taiwan.

약 령



박형준

2001년 3월~ 현재 : 조선대학교 산업공학과 조교수.
 1996년 3월 ~ 2001년 2월 : 삼성전자 책임연구원.
 1996년 2월 : 포항공과대학교 산업공학과 공학박사학위.
 삼성전자에서 상용 CAD/CAM 시스템 Vx Vvision(www.vx.com) 개발에 참여하였으며, 비구면 렌즈 전용 CAD/CAM 시스템 개발하였다. 저자의 연구 관심분야는 형상모델링 (geometric modeling), CAD/CAM, 가상 프로토타이핑 (Virtual Prototyping), 전산 역설계(Reverse Engineering), 고정밀 절삭가공 및 레이저가공, 비구면 렌즈 설계 및 제조 등이다.