

최적 근사 직교평면을 이용한 폴리곤 모델의 필렛 반지름 측정

한 영 현*

Radius Measurement of Fillet Regions of Polygonal Models by using Optimum Orthogonal Planes

Han, Y.-H.*

ABSTRACT

This paper presents a novel method for radius measurement of fillet regions of polygonal models by using optimum orthogonal planes. The objective function for finding an optimum orthogonal plane is designed based on the orthogonality between the normal vectors of the faces in a fillet region and the plane that is to be found. Direct search methods are employed to solve the defined optimization problem since no explicit derivatives of the object function can be calculated. Once an optimum orthogonal plane is obtained, the intersection between the orthogonal plane and the faces of interest is calculated, and necessary point data in the fillet region for measuring radii are extracted by some manipulation. Then, the radius of the fillet region in question is measured by least squares fitting of a circle to the extracted point data. The proposed radius measuring method could eliminate the burden of defining a plane for radius measurement, and automatically find a necessary optimum orthogonal plane. It has an advantage in that it can measure fillet radii without prior complicated segmentation of fillet regions and explicit information of neighboring surfaces. The proposed method is demonstrated through some measurement examples.

Key words : Radius measurement, Optimum orthogonal planes, Fillet radii, Reverse engineering

1. 서 론

3차원 스캐너를 이용한 역 설계¹⁾는 제품의 형상을 스캐닝한 레인지 데이터(점 데이터)로부터 폴리곤 모델을 만들고, 이 폴리곤 모델과 이로부터 측정된 여러 측정값을 이용하여 최종적인 3D CAD 모델을 형성하게 된다. 이 과정에서 필렛 영역은 그 크기가 원래 형상에 비해 아주 작고, 스캐닝 방향 등의 문제로 인해 노이즈가 심하여 형상이 잘 얻어지지 않는다. 따라서, 스캔 데이터를 직접 이용하기 보다는 일단 다른 부분의 CAD 모델을 모두 구성한 후에 기존의 CAD 시스템으로 이동해서 그 시스템의 필렛 기능을 이용하여 최종적으로 필렛팅 작업을 수행하게 된다. 이런 경우에 해당 필렛 영역의 반지름 정보가 필요하므로, 스캐닝되어 구성된 폴리곤 모델로부터 필렛 영역의 반지름을 측정해야 할 필요가 있다. 한

편, 역 설계뿐만 아니라 인스펙션 과정 중에서도 제작된 제품을 스캐닝하여 얻어진 폴리곤 모델의 필렛 반지름을 측정하여 최초에 설계된 CAD 모델과 비교해 볼 필요도 있다.

필렛 반경을 측정하는 여러 방법에 대한 연구는 참고문헌²⁾에 잘 나타나 있는데, 여기에서는 고정 반경 블렌딩의 반경 측정 문제를 다루고 있다. 인공적으로 모사된 모델에 대한 실험에서 제안된 대부분의 방법들이 상당히 정확한 결과를 보여준다. 실제 데이터를 이용한 실험에서는 정확도가 상당히 떨어짐을 알 수 있는데, 그래도 역 공학에 필요한 정도의 유용한 정보는 제공해 줄 수 있음을 보여 주고 있다. 이 논문에서 제시된 방법들은 모두 블렌딩 영역과 주변 곡면들에 대한 복잡하고 번거로운 영역분리 작업이 이미 수행된 것을 전제로 하고 있다. 또한, 주변의 곡면들이 알려져 있고 적절한 방법을 이용하여 수학적으로 표현되어 있다고 가정하고 있다. 예외적으로 곡률 평가법은 주변 곡면에 대한 아무런 가정도 하지 않지만, 이 경우에 측정 값은 그다지 좋은 결과를 보여 주지 못하

*정회원, (주)아이너스기술
- 논문투고일: 2004. 08. 26
- 심사완료일: 2004. 10. 25

는 단점이 있다.

본 논문에서는 위와 같은 역 설계 및 인스펙션 과정에 필요한 폴리곤 모델의 필렛 반지름을 측정하는 새로운 방법을 제안한다. 이 방법은 복잡한 영역 분리나 필렛 영역 주변의 곡면 표현 등의 사전 작업 없이 간편하게 폴리곤 모델에 적용할 수 있는 장점이 있다. 필렛 반지름을 측정하기 위해서는 해당 영역에서 직교평면을 정의하는 번거로운 작업이 필요한데, 본 논문에서는 최적화 기법만을 사용하여 근사 최적 직교평면을 자동으로 구하는 방법을 제시한다. 그리고 이 직교평면을 이용하여 반지름을 측정하는 방법에 대해서도 간략하게 소개한다. 여기서 제안된 최적 근사 직교평면을 구하는 방법은 수학적으로 간단히 정의되며 노이즈 등이 존재하는 필렛 영역에서도 반지름 측정을 가능하게 해주므로, 역 설계나 인스펙션 등에 유용하게 응용될 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 본 논문의 핵심 내용인 최적 근사 직교평면을 구하기 위한 최적화 문제의 수학적 모델을 정의하고, 최적화 문제를 풀기 위한 기법에 대해 설명한다. 구해진 근사 최적 직교평면을 이용하여 반지름을 측정하는 절차가 3장에 간략히 소개된다. 4장에서는 본 논문에서 제안한 방법을 실제 적용한 예를 설명하며, 마지막으로 5장에서 본 연구에 대한 결론을 제시한다.

2. 최적 근사 직교평면

2.1 제어변수

필렛 반지름을 측정하기 위해서는 Fig. 1과 같이 먼저 필렛 영역과 직교하는 평면을 찾아내야 한다. 일반적으로 평면을 정의하기 위해서는 한 점과 법선 벡터가 필요하다. 본 연구에서는 직교평면 위의 한 점 P_0 는 사용자에게 의해 주어진다고 가정하므로, 나머지 법선 벡터 \mathbf{n} 을 찾아내야 한다. 따라서 직교평면의 법선 벡터의 성분 x, y, z 가 식 (1)과 같이 최적화의 제어변

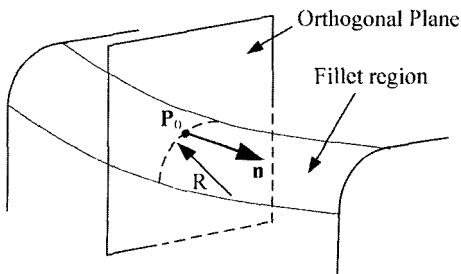


Fig. 1. Orthogonal plane of a fillet region.

수가 된다.

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3) = (x, y, z) \quad (1)$$

2.2 목적함수

Fig. 2와 같이 선택된 점 P_0 를 지나는 임의의 평면 L 과 점 P_0 주변의 관심영역(필렛 영역을 포함할 수 있는 충분한 크기로 경험적으로 정해진다)에 있는 면들 사이의 교점을 P_1, \dots, P_m (m 은 교점의 수)이라고 하면, 직교평면을 찾기 위한 목적함수는 아래와 같이 정의된다.

$$f(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^m |\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}|}{m} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{n} 은 평면의 단위 법선 벡터고, \mathbf{n}_i 는 교점 P_i 에서의 단위 법선 벡터인데, 교점이 존재하는 모서리의 양쪽 면들의 법선 벡터를 평균하여 구한다.

식 (2)에 주어진 목적함수가 최소화되는 경우는 아래 식 (3)과 같이 평면의 법선 벡터와 각 교점의 법선 벡터 간의 내적이 영이 되는 경우이다.

$$\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (3)$$

Fig. 3은 식 (3)을 만족시키는 경우를 보여 준다. Fig. 3(a)는 우리가 구하고자 하는 이상적 직교평면이

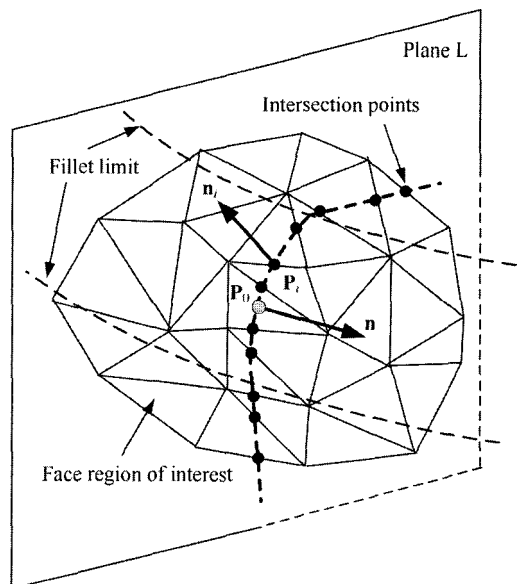


Fig. 2. Intersection between plane and faces.

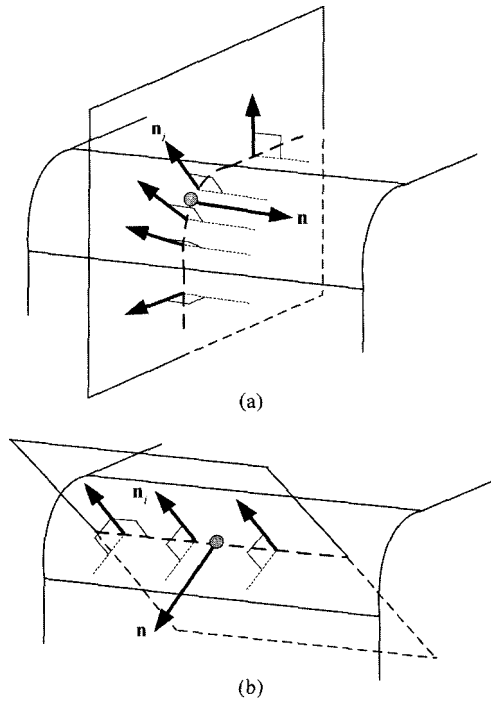


Fig. 3. Orthogonal planes of fillet regions.

고, Fig. 3(b)는 직교평면이기는 하지만 우리가 구하고자 하는 것은 아니다.

2.3 구속조건

식 (2)에 주어진 목적함수를 최적화할 때 Fig. 3(b)와 같은 경우로 수렴하는 경우를 막기 위해서 아래와 같은 부등식 구속조건을 부가한다.

$$g(x) = \text{Angle}(\mathbf{n}^0, \mathbf{n}) - \alpha = \arccos\left(\frac{\mathbf{n}^0 \cdot \mathbf{n}}{|\mathbf{n}^0| |\mathbf{n}|}\right) - \alpha \leq 0 \quad (4)$$

여기서 \mathbf{n}^0 는 제어변수인 법선 벡터의 초기값을 나타내고, \mathbf{n} 은 우리가 구하고자 하는 직교평면의 단위 법선 벡터다. 식 (4)의 구속조건에 의해 찾고자 하는 법선 벡터는 초기 벡터 \mathbf{n}^0 로부터 일정한 각도(본 연구에서는 $\alpha = 30^\circ \sim 45^\circ$ 를 사용) 이내로 구속된다. 즉, 초기 벡터를 Fig. 3(a)의 경우에 근접하게 주고, 해를 찾는 과정에서 이 값으로부터의 과도한 이탈을 방지함으로써 Fig. 3(b)와 같은 경우로 수렴하는 것을 방지할 수 있다.

2.4 비 구속 최적화 문제로 변환

앞에서 정의한 최적화 문제를 표준 형태로 표현하면 아래와 같은 구속 최적화 문제로 정리할 수 있다.

Minimize:

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^m |\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}|}{m} \quad (5)$$

Subject to:

$$g(x) = \text{Angle}(\mathbf{n}^0, \mathbf{n}) - \alpha = \arccos\left(\frac{\mathbf{n}^0 \cdot \mathbf{n}}{|\mathbf{n}^0| |\mathbf{n}|}\right) - \alpha \leq 0 \quad (6)$$

이 구속 최적화 문제를 풀기 위해 벌칙함수법을 이용하여 비 구속 최적화 문제로 변환하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

Minimize:

$$\phi(x) = \frac{\sum_{i=1}^m |\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}|}{m} + r \cdot \max(0, g(x)) \quad (7)$$

여기서 r 은 벌칙계수로서 $f(x)$ ($0 \leq f(x) \leq 1$)에 비해 상당히 큰 수를 지정한다. 한편, $g(x) \leq 0$ 이면 $\max(0, g(x)) = 0$ 이고, $g(x) > 0$ 이면 $\max(0, g(x)) > 0$ 가 된다. 따라서, 구속조건인 식 (6)이 위배되는 $g(x) > 0$ 인 경우에 식 (7)의 두 번째 항이 아주 큰 값을 가지게 되어 목적함수 전체도 큰 값을 갖게 된다. 따라서 식 (7)을 최적화(최소화)하게 되면 벌칙함수 $\max(0, g(x)) = 0$ 이 되도록 $g(x) \leq 0$ 인 범위에서 해를 찾게 되어 구속조건인 식 (6)을 만족하게 된다.

2.5 최적화

식 (7)에서 정의된 목적함수는 미분 값을 가지지 않는다. 이런 비구속 최적화 문제를 풀기 위해서는 목적함수의 도함수가 없어도 최적 해를 찾을 수 있는 직접 탐색법을 사용해야 한다. 본 연구에서는 Hooke & Jeeve의 패턴 검색 알고리즘^[6]과 Powell의 공역 방향 탐색법^[6]을 이용하여 식 (7)의 최적 해를 구하였다. 이 두 방법의 비교는 4장 적용 예에서 설명한다.

3. 반지름 측정

이 장에서는 앞에서 구한 최적 직교평면을 이용하여 필렛 반지름을 측정하는 방법에 대해 기술한다. 이 부분은 구현 방법론적인 내용이어서 여러 가지 방법이 가능하데, 이들에 대해 간단히 언급을 하고, 주로 본 연구에서 채택, 구현한 방법에 대해서 개략적으로 소개를 한다.

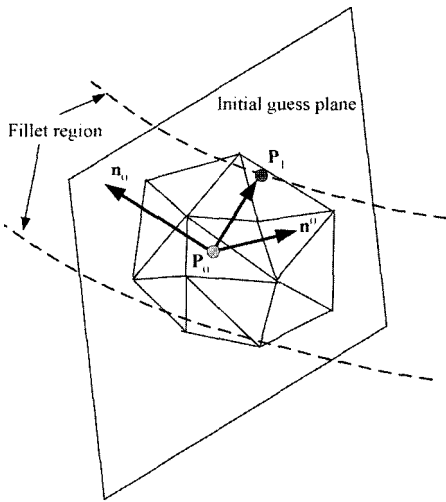


Fig. 4. Initial orthogonal plane of a fillet region.

3.1 초기 직교평면 및 근사 최적 직교평면

먼저 사용자는 반지름을 측정하고자 하는 필렛 영역을 지정해야 하는데, Fig. 4에서와 같이 한 점 P₀를 선택하여 관심영역을 지정하게 된다. 이 점은 구하고자 하는 최적 직교평면이 지나야 하는 평면 위의 한 점으로도 사용된다.

평면 위의 한 점은 위와 같이 사용자 입력으로 정해지고, 다음으로 직교평면의 초기 법선 벡터 n⁰를 정해야 한다. 이 벡터를 정하기 위해 먼저 선택한 점 P₀로부터 필렛 영역의 최대 곡률 방향으로 위치한 한 점 P₁을 더 선택한다. 이 정보를 이용하여 직교평면의 초기 법선 벡터 n⁰는 아래와 같이 정한다.

$$n^0 = (P_1 - P_0) \times n_0 \quad (8)$$

여기서 n₀는 점 P₀를 포함하고 있는 면의 법선 벡터다.

앞에서 구한 P₀와 n⁰를 이용하여 임의의 한 평면을 정의할 수 있고 이 평면을 초기 평면으로 하여 2장에서 정의한 최적화 문제를 풀면 P₀를 지나는 최적 근사 직교평면을 구할 수 있다.

3.2 필렛 영역의 점 데이터 추출 및 반지름 측정

최적 근사 직교평면이 구해지면, Fig. 5(a)와 같이 이 평면과 관심영역의 면들과의 교점을 구한다. 이 교점들을 이용하여 반경을 측정하는 방법으로서, 크게 필렛 영역의 데이터 점을 추출한 후에 반경을 측정하는 순차적 방법과 필렛 영역 추출 및 반경 측정을 동

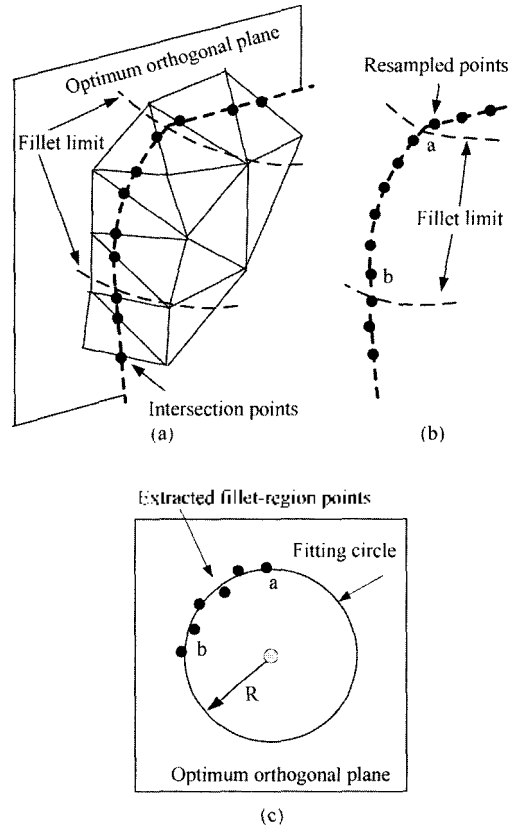


Fig. 5. Point data of a fillet region and a fitting circle.

시에 진행하는 방법으로 나눌 수 있다. 후자의 예로서는 필렛 영역에 속하는 최소한의 데이터 점(최소한 세 점)으로부터 시작하여 데이터 점들을 점차 늘려 가면서 최소 자승법¹⁸⁾⁹⁾을 이용하여 원을 반복적으로 근사하는 방법이 있다. 이 방법은 필렛 영역과 반경을 동시에 찾을 수 있는 장점이 있는 반면, 원을 반복적으로 근사하는 것에 따른 계산 시간 상의 손실이 크며 노이즈에 민감한 단점이 있다. 본 연구에서는 순차적 방법을 채택하였는데, 그 내용은 아래와 같다.

먼저, Fig. 5(a)와 같이 교점을 구한 다음, 이 교점들로부터 실제 필렛 영역에 해당하는 점 데이터를 구해야 된다. 이 교점들은 스캔 과정 및 후속 작업에서 발생하는 여러 가지 요인들 때문에 노이즈를 포함하고 있어서 먼저 스무딩 작업을 통해 노이즈를 제거해야 할 필요가 있다. 뿐만 아니라, 이 교점들은 간격이 불규칙적이고 데이터 양이 많지 않기 때문에 이들 데이터를 그대로 이용하기에는 어려움이 많다. 따라서 이들로부터 새로운 데이터 점들을 재생성해야 할 필요도 있다. 그러므로, 단순한 스무딩 작업보다는 노이

즈를 제거하는 동시에 균일하고 적절한 양의 점 데이터를 재생성할 수 있는 방법이 필요하다. 이를 위해 Fig. 5(b)와 같이 곡선 근사법^[10]을 이용하여 평활한 NURBS곡선을 생성하고 이 곡선으로부터 다시 균일한 샘플링을 통하여 충분한 양의 점 데이터를 새로이 생성하는 과정을 거친다.

이들 점 데이터로부터 필렛 영역에 속한 점들을 추출하기 위해 곡률을 이용한다. 불연속적인 점 데이터들의 곡률을 정의하기 위해 k-cosine^[11]을 사용하였다. 필렛 영역의 점들은 주변 영역의 점들보다 곡률이 크기 때문에 적절한 역차 값을 정하여 필렛 영역의 점들을 분리해 낼 수 있다. 이때 보다 정확한 측정을 위해서는 경계에 위치한 점들은 버리고 조금 안쪽 영역에 있는 점들(Fig. 5(b)의 a, b 참조)을 기준으로 추출하는 것이 유리하다.

마지막으로, 추출된 필렛 영역의 데이터 점들을 근사하는 원을 구하여 Fig. 5(c)와 같이 필렛 반지름을 측정할 수 있다. 데이터 점을 근사하는 원은 최소 자승법^[8,9]을 이용하여 구하였다. 여기서 구해진 원의 반지름이 바로 우리가 측정하고자 하는 필렛 영역의 반지름이다.

4. 적용 예

Fig. 6은 실제 폴리곤 모델의 필렛 반지름을 측정할 예를 보여준다. 그림에는 초기 평면, 최적 근사 직교 평면, 샘플링된 교점, 근사 원 등이 나타나 있다. Fig.

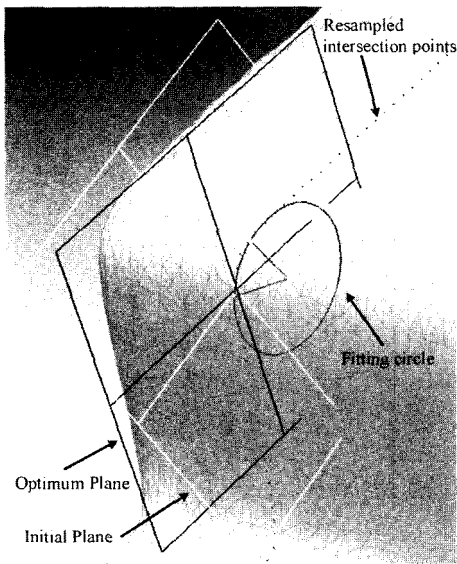


Fig. 6. Measuring fillet radius.

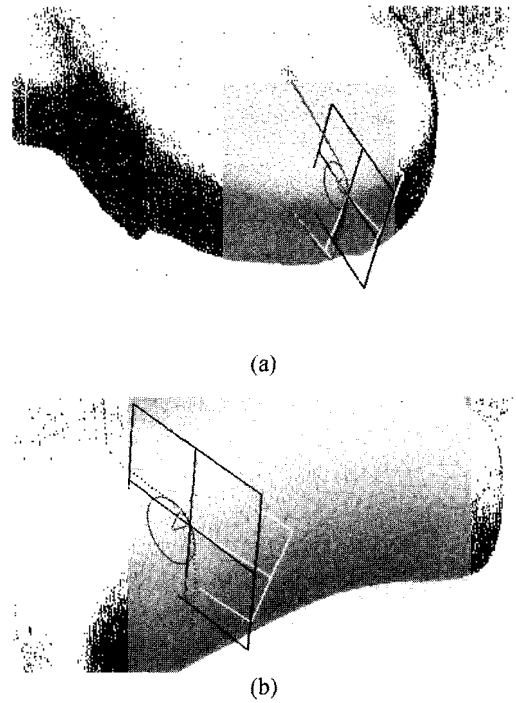


Fig. 7. Examples of measuring fillet radii.

7에 반경 측정의 다른 예가 나타나 있다. 이들은 필렛 영역이 곡선을 이루는 경우의 측정 예이다.

본 논문에서 제시한 알고리즘의 정확도를 알아보기 위해 이상적인 데이터를 인위적으로 생성하여 측정에 보았다. CAD 시스템에서 육각형 형상을 만들어 필레팅 작업을 하고 폴리곤 모델로 변환하여 실험에 필요한 모델들을 얻었다. Fig. 8(a)는 고정 반경 필레팅으로 모델을 생성한 예이고, Fig. 8(b)는 가변 반경 필레팅으로 모델을 생성한 예이다.

Table 1은 고정 반경(R=5 mm와 R=10 mm)으

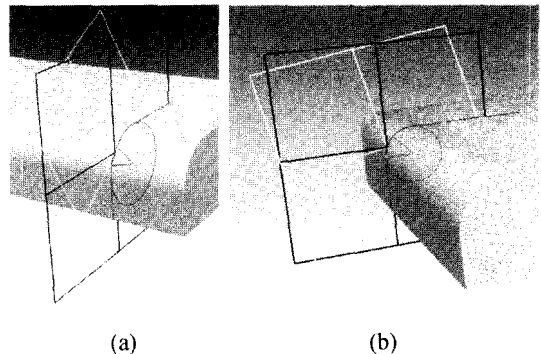


Fig. 8. Synthetic simulated polygonal models.

Table 1. Angle errors of plane normals (Degree)

Sample	Average	Min.	Max
R = 5 mm	0.4210	0.0248	1.8312
R = 10 mm	0.3380	0.0326	1.4341
R = 5~10 mm	1.3546	1.0642	1.5543

Table 2. Radius measurement (R = 10)

Measurements	Measured radii (mm)
1	10.00821
2	10.00475
3	9.96506
4	10.00756
5	9.98674
Average	9.994464

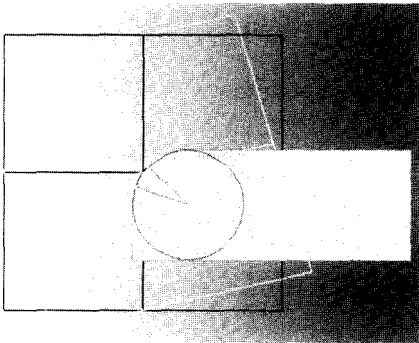


Fig. 9. Side view for radius measurement.

로 필레팅한 모델, 그리고 가변 반경(R = 5~10 mm)으로 필레팅한 모델에 대하여 실험해서 구해진 최적 근사 직교평면의 법선 벡터와 이론적 법선 벡터 사이의 각도 오차를 보여준다. Fig. 8의 모델들은 길이 방향이 x축을 따라 배치되어 있기 때문에 필렛 영역에서 이론적 직교평면의 법선 벡터는 (1, 0, 0) 또는 (-1, 0, 0)이 되어야 한다. 실험 결과 Table 1에 나타난 대로 고정 반경 필레팅인 경우에는 평균 오차가 0.5° 이내이며, 가변 반경 필레팅인 경우에는 평균 오차가 조금 더 큰 1.5° 이내임을 보여주고 있다.

Table 2는 고정 반경(R = 10 mm)으로 필레팅한 모델에서 필렛 영역을 따라 가며 반경을 측정할 예를 보여준다. 측정된 반경의 평균값은 R = 9.994464로서 오차는 0.05%이다. Fig. 9는 Fig. 8(a)의 모델에 대한 반경 측정 결과를 측면에서 본 모습인데, 근사 원이 정확하게 필렛 영역을 근사하고 있음을 알 수 있다.

다음으로, 실제 스캔 데이터를 이용한 측정 결과를 살펴 보자. Table 3는 Fig. 6에 보여진 모델의 필렛

Table 3. Radius measurements for real scan data

Measurements	Measured Radii (mm)
1	9.86374
2	10.18038
3	10.99056
4	9.97074
5	10.44676
Average	10.29044

Table 4. Comparison of two optimization methods (Sec)

Samples	Hooke & Jeeve	Powell
#1	0.0671	0.1408
#2	0.0693	0.1313
#3	0.0555	0.1705
#4	0.0829	0.1935

반경을 측정할 예를 보여 준다. 이 모델의 설계 상의 필렛 반경은 R = 10 mm인데, 필렛 영역을 따라 측정된 반지름의 평균은 R = 10.29044 mm이며, 오차는 약 2.9%로 앞에서 설명한 인공적 모델의 경우와 비교할 때 오차가 큰 편이다. 일반적으로 실제 스캔 데이터를 이용한 측정은 여러 가지 오차 요인들, 예를 들면 제조 과정의 오차, 3D 스캐너 자체의 측정 오차, 여러 측정 데이터 군의 등록 오차, 측정 알고리즘의 오차 등이 포함되어 있기 때문에 오차가 큰 편이다.

마지막으로, 본 연구에서는 최적화 기법으로 Hooke & Jeeve의 패턴 검색 알고리즘과 Powell의 공액 방향 탐색법 두 가지를 적용해 보았다. Table 4는 몇 가지 모델에 대하여 위의 두 방법을 이용해서 필렛 반경을 측정하는데 소요된 평균 시간을 보여 준다. 일반적으로는 Powell의 공액 방향 탐색법이 좀더 빠르다고 알려져 있으나⁷⁾, 본 논문의 문제에 있어서는 Hooke & Jeeve의 패턴 검색 알고리즘이 약 2배 이상 더 빠른 결과를 나타내었다. 앞에서 제시된 여러 실험 결과들은 Hooke & Jeeve의 패턴 검색법을 사용하여 측정된 결과임을 아울러 밝혀 둔다. 한편, 최적화 계산 시간은 식 (2)의 목적함수를 계산하는데 이용되는 교점의 수 m에 선형적으로 의존하는데, 이 교점의 수는 결국 관심영역에 포함된 면들의 개수에 의해 지배적으로 결정된다. 따라서, 관심영역에 포함된 삼각형의 개수와 계산 시간은 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 최적화 기법을 이용하여 폴리곤 모

델의 필렛 영역에서 최적 근사 직교평면을 구하고 이를 이용하여 반지름을 측정하는 방법을 설명하였다. 먼저 반경을 측정하고자 하는 영역의 한 점과 최대 곡률방향을 나타내는 다른 한 점을 입력 받아 이를 기반으로 해당 필렛 영역을 직교하는 최적 근사 평면을 최적화 기법을 사용하여 구한다. 최적화를 위한 목적함수는 필렛 영역의 면들의 법선 벡터와 평면의 법선 벡터 간의 직교성을 이용하여 간단하게 정의되었고, 목적함수의 도함수를 구할 수 없기 때문에 직접 탐색법을 이용하여 최적화하였다. 그리고 이 최적 근사 직교평면을 이용하여 필렛 반경을 측정하는 방법에 대해서도 간략하게 소개하였다.

본 논문에서 제안한 방법은 반경 측정을 위한 번거로운 평면 정의 작업이 필요 없으며, 최소한의 입력을 이용하여 자동으로 최적 근사 직교평면과 필렛 반경을 구해준다. 제안된 직교평면을 이용한 방법은 복잡한 필렛 영역 분리 작업을 미리 수행할 필요도 없으며 주변 곡면들에 대한 정보도 필요 없이 간편하게 필렛 반경을 측정할 수 있다. 제안된 직교평면 방법은 목적함수가 라인을 따라 정의되므로 관심 필렛 영역이 최대 곡률 방향으로 어느 정도 온전하다면 주변의 노이즈에 관계없이 비교적 정확하게 반경을 측정할 수 있는 장점이 있다.

참고문헌

1. Chivate, P. N. and Jabłokow, A. G., "Solid-model Generation from Measured Point Data", *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 9, pp. 587-600, 1993.
2. Varady, T., Martin, R. R. and Cox, J., "Reverse Engineering of Geometric Models-An Introduction", *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, 1997.
3. Kos, G., Martin, R. and Varady, T., "Methods to Recover Constant Radius Rolling Ball Blends in

Reverse Engineering", *Computer-Aided Geometric Design*, Vol. 17, No. 2, pp. 127-60, 2000.

4. Arora, J. S., *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, 1989.
5. Lewis, R. M., "Direct Search Methods: Then and Now", ICASE Report No. 2000-26, May 2000.
6. Hooke, R. and Jeeves, T. A., "Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems", *Journal of the ACM*, Vol. 8, pp. 212-229, 1961.
7. Press, W. H. et al., *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, 1992.
8. Coope, I. D., "Circle Fitting by Linear and Nonlinear Least Squares", *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 76, No. 2, 1993.
9. Watson, G. A., "Least Squares Fitting of Circles and Ellipses to Measured Data", *BIT Numerical Mathematics*, Vol. 39, No. 1, pp. 176-191, 1999.
10. Piegl, L. and Tiller, W., *The NURBS Book*, Springer-Verlag, 1995.
11. Rosenfeld, A. and Weszka, J. S., "An Improved Method of Angle Detection on Digital Curves", *IEEE Transaction on Computers*, Vol. C-24, pp. 940-941, 1975.



한영현

1989년 서울대학교 기계설계학과 학사
1993년 서울대학교 기계설계학과 석사
1999년 서울대학교 기계설계학과 박사
1999년~2000년 (주)아이너스기술 객원연구원

2000년~2001년 미국 University of Wisconsin - Madison 방문연구원
2001년~2003년 미국 표준기술연구소 (NIST) 객원연구원
2003년~현재 (주)아이너스기술 연구위원
관심분야: Reverse engineering, Geometric & Solid modeling, Intelligent CAD, Design theory and methodology