

회전곡면의 직접·적응 단면화에 있어서 정밀도 향상

박정환*, 신양호**

Accuracy Enhancement in Direct & Adaptive Slicing of a Rotational Surface

Jung Whan Park*, Yang Ho Shin**

ABSTRACT

Direct & adaptive slicing of sculptured surfaces in RP improves quality & accuracy of the final product, compared to the slicing with uniform layer thickness or the slicing of facets (ie, STL). Present D&A slicing procedures adaptively compute the next layer thickness based on the surface information of current sliced contour, which assumes constant normal curvature values. In some cases, however, such assumption leads to intolerable slicing result which cannot correctly consider the entire local feature shape. We propose improved adaptive slicing algorithms which can determine near-optimal layer thickness, including illustrated examples.

Key Words : Rapid Prototyping (쾌속조형), direct and adaptive slicing (직접·적응 단면화)

1. 서론

일반적으로 RP (rapid prototyping) 기술을 이용하여 실제 형상을 제작하는 과정은 데이터 준비, 모델 제작, 후처리 단계로 구분하며, RP 장비의 표준 입력파일은 STL 파일이다^[1]. 그리고 RP 장비에서는 STL 정보를 수평으로 단면화 (slicing) 하여 최하단 단면부터 차례로 적층해 나가는 과정으로 실제 형상을 제작한다^[1]. 또한 일반적으로 평면영역 (flat area), 피크 (peak) 등의 특징형상은 미리 파악하여 각 경계에서 단면화를 수행함으로써 성형물의 정밀도를 저하시키는 일이 없도록 고려한다^[2]. 이러한 STL 이용은 몇가지 문제점을 안고 있으며^[1], 이를 해결하기 위하여 제시된 방안의 하나가 직접·적응 단면화 (direct & adaptive slicing)이다^[1-7].

직접·적응 단면화는 각 단면에서 곡면의 법선 곡률 (normal curvature) 및 법선 (normal vector) 정보를 이용하여 커스높이 (cusp-height: δ) 를 만족하는 층두께 (layer thickness)를 계산함으로써, 일정한 층두께로 수행하는 단면화보다 정밀도를 향상시키는 장점을 가진다.

기존의 적응 단면화 관련 연구를 살펴보면, Dolenc & Makela^[2] 및 Hur & Lee^[3]의 경우 다면체 (facet) 모델에 대해 δ 를 고려한 가변 층두께 계산을 다루었으며, Sabourin 등^[5]은 균일한 층두께로 단면화를 수행한후 각 층에 대해 δ 를 고려한 추가적인 단면화를 수행하는 방안을 제시하고 있다. 또한 Choi & Lee^[1], Kulkarni & Dutta^[4]는 국소곡면 (local surface)을 곡률이 일정한 구로 가정하여 층두께를 계산하는 방식을 제안하고 있으며, Hope 등^[6]

* 영남대학교 기계공학부, 정회원

** 영남대학교 기계공학부, 대학원

은 sloping layer surface에 대한 적응 단면화를 다루었다.

그러나 기존의 적응 단면화에서 제안하는 층두께 계산은 기본적으로 단면과 단면 사이에서의 수직방향 곡률 변화가 없거나 또는 무시할수 있다는 가정을 하고 있다. 따라서 G-1 연속을 만족하는 미소한 국소형상이 존재할 경우, 국소형상의 일부 또는 전부를 고려하지 못하여 정밀도를 저하시킬 가능성이 있다 (즉 곡면모델과 RP 성형물간의 오차 > δ).

본 연구는 회전곡면의 직접 및 적응 단면화에 있어서, 곡률변화가 심한 미소 국소형상의 성형 정밀도를 개선할 수 있는 단면화 방식을 제안하고, 예를 살펴보고자 한다

2. 기존의 직접 · 적응 단면화 과정 및 문제

2.1 단면화 과정

적응 단면화 과정은 주어진 단면 높이에서 CAD 모델의 단면 (contour)을 계산하고 이 단면정보로부터 다음 층 (layer)의 높이를 결정하는 과정을 되풀이하는 작업이다 (Fig. 1).

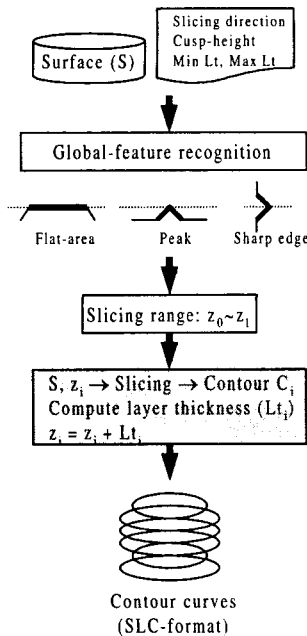


Fig. 1 Adaptive slicing procedure

즉 곡면 CAD 모델, 커스높이 (δ) 및 단면화 방향 (slicing direction)이 주어지면 최종적으로 RP 기계의 입력정보 (예: SLC 파일)를 계산하는 과정이다. 본 논문에서는 단면화 방향을 xy 평면으로 간주하였다.

2.2 층두께 계산

적응 단면화 과정에서 핵심적인 부분은 층두께 계산이라 할수 있다. 한 단면높이 (z_i)에서 단면곡선 C를 계산한 후 다음 층두께를 계산하는 일반적인 방식으로는 최소 층두께 (minimum layer thickness) 방식이 있는데, (1)단면 C 상의 각 점 {P_k;k=0,...,n}에서 층두께 (d_k) 계산, (2)다음 층두께 (Lt_i) = MIN{d_k} 의 과정을 거친다^[4].

여기서 d_k는 곡면상의 점 P_k에서 수직방향 법선 곡률반경 (ρ = 1/κ |, κ : 법선곡률), 법선벡터 (N)와 수평면간의 각도 (θ)를 이용하여 식 (1)을 사용하여 계산할 수 있다^[4].

$$d = -\rho \sin \theta + \sqrt{\rho^2 \sin^2 \theta + 2\rho\delta + \delta^2} \quad (1-a)$$

where κ < 0 (convex) and Nz ≥ 0,
Nz = z-component of the normal,

$$d = +\rho \sin \theta - \sqrt{\rho^2 \sin^2 \theta - 2\rho\delta - \delta^2} \quad (1-b)$$

where κ < 0 and Nz < 0,

$$d = +\rho \sin \theta + \sqrt{\rho^2 \sin^2 \theta + 2\rho\delta + \delta^2} \quad (1-b')$$

where κ < 0 and |Nz| ≪ 1,

$$d = -\rho \sin \theta + \sqrt{\rho^2 \sin^2 \theta + 2\rho\delta - \delta^2} \quad (1-c)$$

where κ > 0 (concave) and Nz ≥ 0,

$$d = +\rho \sin \theta - \sqrt{\rho^2 \sin^2 \theta - 2\rho\delta + \delta^2} \quad (1-d)$$

where κ > 0 and Nz < 0,

$$d = 2\rho \sin \theta \quad (1-d')$$

where κ > 0 and |Nz| ≪ 1.

이 계산식은 δ > 0인 경우 (양의 tolerance)이며, 단면위치의 국소곡면을 곡률이 일정한 구 (sphere)로 간주하여 층두께를 계산한다.

2.3 문제점

2.2절의 층두께 계산은 연속되는 단면 사이 (층 내부)에서 수직방향 곡률 변화가 없는것으로 가정한다. 대부분의 곡면모델은 이러한 가정을 만족하

겠지만, 곡률이 급격하게 변화하는 미소 국소형상 (local feature)이 존재하는 경우에는 국소형상의 일부 또는 전부를 고려하지 못하는 문제가 발생할 수 있다 (Fig. 2). 물론 최소 및 최대 층두께 ($L_{t,min}$, $L_{t,max}$)를 조절함에 따라서는 이러한 문제가 없을 수도 있지만, 주어진 커승높이에 대한 최적 층두께 계산은 쉽지 않다.

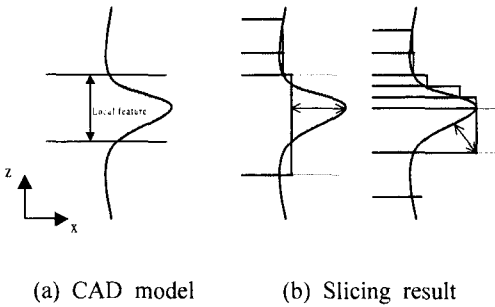


Fig. 2 Intolerable slicing of surface with local feature

3. 오차를 고려한 단면화 방안

2절에서 언급한 문제는 결국 각 단면높이에서 다음 층두께를 계산함에 있어서 현 단면상의 곡면 정보 (즉 법선곡률반경, 법선벡터)만을 고려할 뿐 단면 사이의 곡면형상과 예상 성형물간의 오차를 고려하지 않기 때문으로 사료된다. 본 절에서는 곡면모델과 성형물간의 오차를 추가로 고려함으로써 이를 해결하는 방안을 제시하고자 한다.

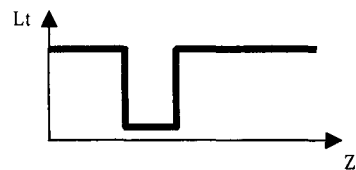
3.1 초기 층두께 및 오차 분포맵 계산

먼저 주어진 단면화 구간 ($z_0 \sim z_1$)에 대한 초기 층두께 분포 (Lt-map)를 계산한다 (Fig. 3-a). 층두께 $L_t = f(z_k); z_k \in [z_0, z_1]$ 이며, z_k 에 대한 L_t 는 식(1)을 이용하여 계산한다.

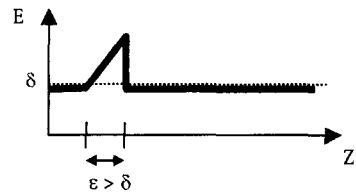
다음으로 Lt-map에 대응하는 오차 분포 (error distribution)를 나타내는 오차분포맵 (E-map)을 계산한다. 본 연구에서 '오차'는 z_k 에서 계산된 층두께 (L_t)로 성형되는 성형물과 곡면모델간의 차이로써, 계산과정은 부록 A.1에 제시하였다. 임의의 단면높이 $z_k \in [z_0, z_1]$ 에서 계산한 오차 E_k 는 z_k 의 함수 즉 $E_k = g(z_k); z_k \in [z_0, z_1]$ 으로 나타난다 (Fig. 3-b).

3.2 층두께 분포맵 수정

오차분포 (E-map)를 계산한 후 $E_k > \delta$ 인 높이 (z_k)에 대해서는 최적 층두께를 다시 계산함으로써 수정된 층두께 분포 $L_{t'} = h(z_k); z_k \in [z_0, z_1]$ 를 얻는다 (Fig. 4). 만약 $E_k > \delta$ 인 높이 (z_k)가 발견되지 않으면 초기 층두께분포를 그대로 사용하도록 한다. 임의의 단면높이 z_k 에서 $E_k > \delta$ 인 경우 최적 층두께 계산은 부록 A.2에 나타내었다.



(a) Initial Lt-map (layer-thickness distribution)



(b) E-map (error-distribution)

Fig. 3 Schematic diagrams of Lt-map and E-map

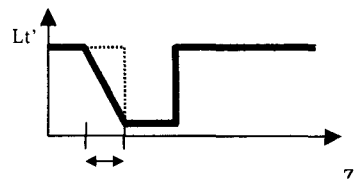


Fig. 4 Schematic diagram of corrected Lt-map

3.3 오차 및 수정 층두께 분포맵을 이용한 단면화

$E_k > \delta$ 인 구간에 대해 단면높이를 수정한 새로운 층두께 분포 ($L_{t'}$ -map: corrected Lt-map)가 얻어지면, 실제 단면화 과정에서는 $L_{t'}$ -map으로부터 해당 높이에서의 층두께를 직접 산출할 수 있다. 이상의 단면화 과정은 Fig. 5와 같이 나타낼수 있으며 정리하면 다음과 같다.

Procedure Slice_Contours (S, δ , z_0 , z_1 , d_{min} , d_{max} → {C_i})

1. Input: surface S, cusp-height δ , slicing range z_0 , z_1 , min. layer thickness d_{min} , max. layer thickness d_{max} ;
2. Construct Lt-map ← S, δ , z_0 , z_1 , d_{max} , d_{min} ;
3. Construct E-map ← S, δ , Lt-map ;
4. If any $E_k > \delta$ then
 construct corrected Lt-map → Lt'-map
 Else
 Lt'-map ← Lt-map ;
5. For $z_i = z_0$ to z_1 do following
 $C_i = \text{Surface_Slicing (S, } z_i)$;
 $Lt_i = \text{Get_LayerThickness (Lt'-map, } z_i)$;
 $z_i = z_i + Lt_i$;
6. Return {C_i} ;

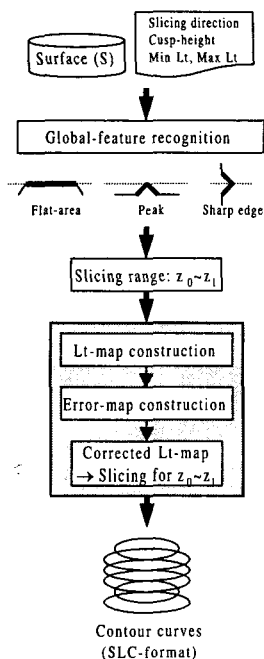


Fig. 5 Adaptive slicing procedures using error-map

3.4 개별 단면에서 오차를 고려한 단면화

결국 3.1~3.3절의 과정은 각 단면높이에서의 층 두께 계산과정에서 성형결과와 CAD 모델간의 오차를 고려하여 층두께를 수정하는 과정으로 생각할

수 있겠다. 따라서 Fig. 5에 보인 전체적인 단면화 과정은 Fig. 6과 같은 과정으로 대체할 수 있다. 즉 각 단면높이에서 단면 및 층두께값을 계산한 후, 이 정보로부터 현재 단면과 다음 단면 사이에서 발생하는 오차를 계산하고, 필요한 경우 (즉, $E_k > \delta$) 수정된 층두께를 계산한다. 이상의 과정을 정리하면 다음과 같다.

Procedure Slice_Contours (S, δ , z_0 , z_1 , d_{min} , d_{max} → {C_i})

1. Input: surface S, cusp-height δ , slicing range z_0 , z_1 , min. layer thickness d_{min} , max. layer thickness d_{max} ;
2. For $z_i = z_0$ to z_1 do following
 $C_i = \text{Surface_Slicing (S, } z_i)$;
 $Lt_i = \text{Calc_LayerThickness (C}_i, z_i)$; // eq. (1)
 $E_i = \text{Calc_Error (S, } Lt_i)$; // A.1
 If $E_i > \delta$ then
 $Lt'_i = \text{Calc_CorrectedLt (C}_i, z_i, \delta)$; // A.2
 $z_i = z_i + Lt'_i$;
3. Return {C_i} ;

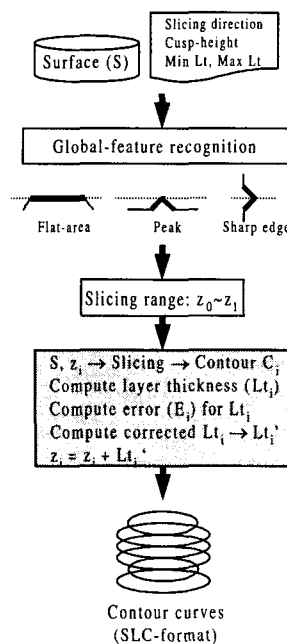


Fig. 6 Proposed adaptive slicing procedures

4. 예제

본 절에서는 완만한 기본곡면에 오목한 국소형상을 가지는 모델을 예로 살펴보자 (Fig. 7). 본 예는 $z \in [-10, 10]$ 범위이며 국소형상은 $z \in [-0.5, 0.5]$ 이다. 본 예의 곡률 분포는 Fig. 8에 보이고 있다.

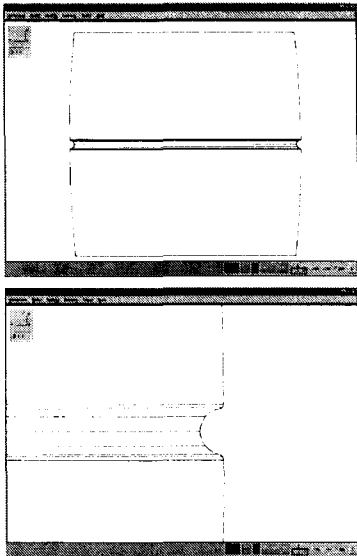


Fig. 7 Convex rotational shape with a local feature

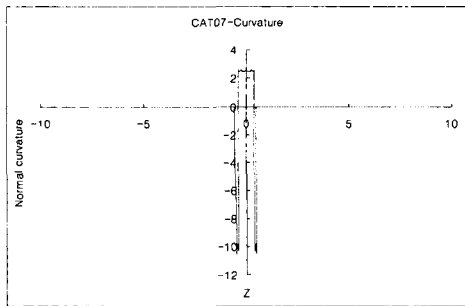
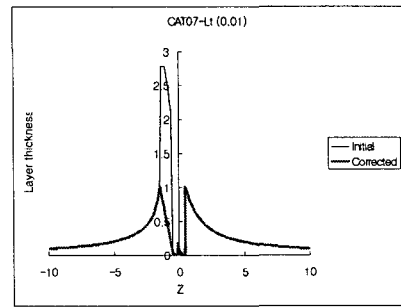


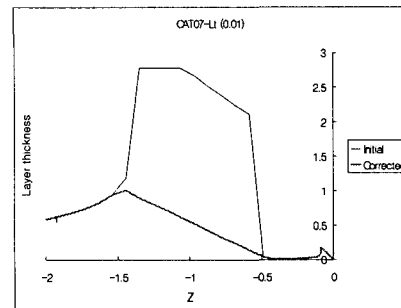
Fig. 8 Normal curvature distribution along z

이 예에 대해 $\delta = 0.01$ 로 초기 층두께 및 수정된 층두께 분포를 계산한 결과를 Fig. 9에 보였다. 층두께 수정은 오차분포법을 활용하였으며, 초기 오차분포 및 수정후 오차분포는 Fig. 10에 보였다.

Fig. 11 및 Fig. 12는 $\delta = 0.01$ 및 0.05에 대해 기존의 방식과 제안한 방식으로 적용 단면화를 수행한 결과를 보이고 있다.

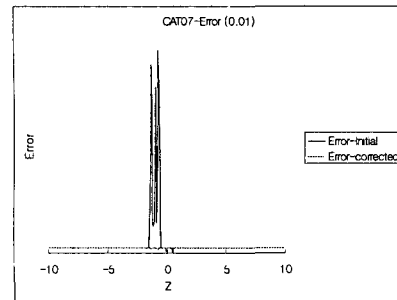


(a) $z \in [-10, 10]$

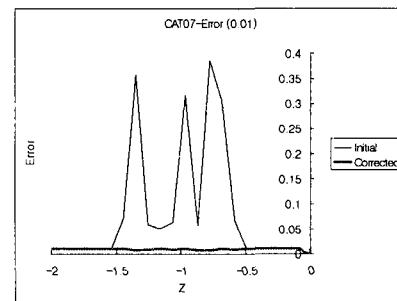


(b) $z \in [-2, 0]$

Fig. 9 Layer thickness distribution

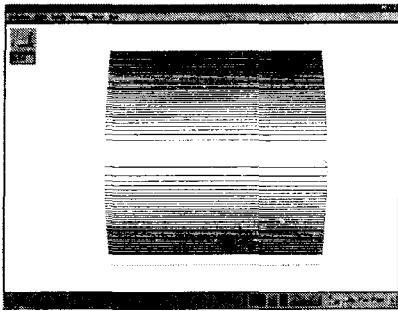


(a) $z \in [-10, 10]$

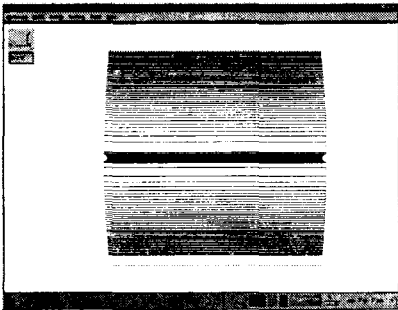


(b) $z \in [-2, 0]$

Fig. 10 Error distribution

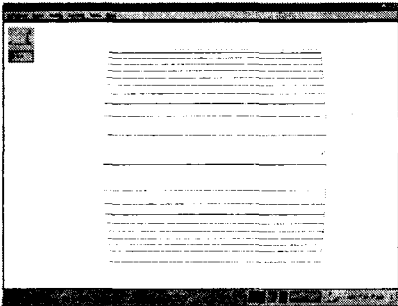


(a) Previous (90 contours)

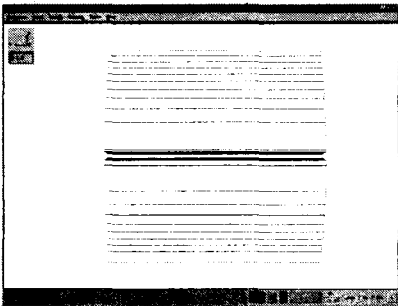


(b) Proposed (139 contours)

Fig. 11 Result of adaptive slicing ($\delta = 0.01$)



(a) Previous (19 contours)



(b) Proposed (28 contours)

Fig. 12 Result of adaptive slicing ($\delta = 0.05$)

5. 결론

본 연구에서는 회전곡면의 적응 단면화에 있어서, 곡률변화가 심한 미소 곡소형상의 단면화시 발생할 수 있는 오차를 고려하여 층두께를 수정함으로써 성형물의 정밀도를 향상하는 방안을 제안하였다. 또한 새로운 층두께를 계산함에 있어서 주어진 키스높이를 만족하는 최대 층두께 (즉, 최적 층두께)를 계산하였고, 예를 살펴보았다.

본 연구에서 제안한 개념은 회전곡면이 아닌 곡면모델에 대해서도 적용이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 최광일, 이관행, "등고선 간격과 수직방향 특성선을 이용한 RP 파트의 adaptive 단면화 방법," 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제 3권, 제 1호, pp. 15-21, 1998.
2. A. Dolenc and I. Makela, "Slicing procedures for layered manufacturing techniques," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 9, pp. 119-126, 1994.
3. 허정훈, 이진우, "SLA를 이용한 신속 시작작업에서 최적 성형방향의 결정," 한국정밀공학회지, 제 13권, 제 4호, pp. 163-173, 1996.
4. P. Kulkarni and D. Dutta, "An accurate slicing procedures for layered manufacturing," *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 9, pp. 683-697, 1996.
5. E. Sabourin, S. Houser and J. Bohn, "Adaptive slicing using stepwise uniform refinement," *Rapid prototyping journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 20-26, 1996.
6. R. Hope, R. Roth and R. Jacobs, "Adaptive slicing with sloping layer surfaces," *Rapid prototyping journal*, Vol. 3, No. 3, pp. 89-98, 1997.
7. R. Jamieson and H. Hacker, "Direct slicing of CAD models for rapid prototyping," *Rapid prototyping journal*, Vol. 1, No. 2, pp. 4-12, 1995.
8. C. Kai and L. Fai, *Rapid prototyping: principles and applications in manufacturing*, John Wiley & Sons, 1997.
9. B. K. Choi, *Surface modeling for CAD/CAM*, Elsevier, 1991.

부록

A.1 층두께에 대한 오차 계산

임의의 단면 (C_k)에서 층두께 (L_{tk})를 계산하였을 때 RP 성형물의 수직단면을 C_k 에서 C_{k+1} 에 이르는 선분 (L)으로 모델링 한다 (Fig. A.1).

여기서 선분 L 을 $0 \leq t \leq 1$ 인 매개변수형 직선 $L(t)$ 로 보고, 증분량 δt ($0 \leq t \leq 1$)를 주어 직선상의 점 $\{P_i; i=0, \dots, n\}$ 를 계산한다. 그리고 모든 P_i 에 대해 *Jacobian Inversion*^[9]을 수행하여 곡면상의 점 S_i 를 구하고 각 거리를 d_i 라 하면, 오차 $\epsilon_k = \text{MAX}\{d_i\}$ 이다 (Fig. A.2).

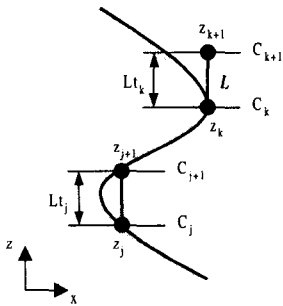


Fig. A.1 Modeling of vertical section

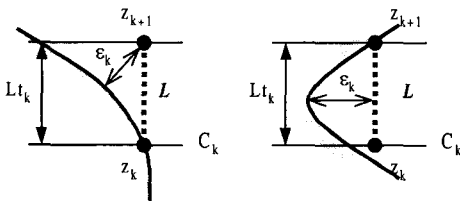


Fig. A.2 Error estimation for a given layer thickness

A.2 Cusp-height에 대한 최적 층두께 계산

임의의 단면높이 (z_k)에서 δ 를 만족하는 층두께 (L_{tk}') 결정은 A.1의 오차계산식을 이용하여 binary search 방식으로 수행한다. 즉 현재 층두께 L_{tk} 가 δ 를 만족하지 아닐 경우 ($\epsilon_k > \delta$) 다음과 같은 과정을 수행하여 층두께 L_{tk}' 을 구한다.

Procedure Calc_CorrectedLt ($S, \delta, z_k, L_{tk} \rightarrow L_{tk}'$)

1. Input: surface S , cusp-height δ , current layer height z_k , initial layer thickness L_{tk} ;
2. $z_0 = z_k, z_1 = z_{k+1}$;
3. $z_c = (z_0+z_1)/2$; // Fig. A.3
4. Compute $\epsilon_c \leftarrow L_{tk}' = |z_c-z_0|$
5. If $\epsilon_c \leq \delta$ then {
 - $z_0 = z_c, z_1 = z_{k+1}$;
 - If $|z_0 - z_1| \leq \text{tol}$ then return L_{tk}' ;
 - } Else
 - $z_0 = z_k, z_1 = z_c$;
6. Goto 3 ;

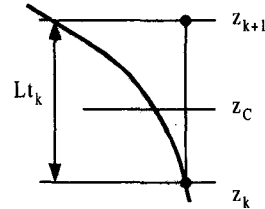


Fig. A.3 Determination of optimal layer thickness for a given cusp-height (δ)

이와같은 계산방식은 δ 를 만족하는 최대 층두께를 계산할수 있으며, 따라서 최적 층두께가 된다.