

## 이송률 자동조정을 위한 2차원 칩로드 해석

배석형\*, 고기훈\*, 최병규\*\*

### Two-dimensional Chip-load Analysis for Automatic Feedrate Adjustment

Bae, S. H.\*, Ko, K. H.\* and Choi, B. K.\*\*

#### ABSTRACT

To be presented is two-dimensional chip-load analysis for cutting-load smoothing which is needed in unmanned machining and high speed machining of sculptured surfaces. Cutter-engagement angle and effective cutting depth are defined as chip-loads which are the geometrical measures corresponding to cutting-load while machining. The extreme values of chip-loads are geometrically derived in the line-line and line-arc-line blocks of the two-dimensional NC-codes. AFA(automatic feedrate adjustment) strategy for cutting-load smoothing is presented based on the chip-load trajectories.

**Key words :** Cutting-load smoothing, Chip-load, Cutter-engagement angle, Effective cutting depth, Automatic feedrate adjustment

#### 1. 서 론

자유곡면가공(sculptured surface machining)의 생산성 향상을 위하여 고속가공(high speed machining)이 도입되고, 가공기의 이용효율을 높이기 위한 무인가공의 필요성이 절실해짐에 따라서, 가공면의 품질 보장을 위한 가공부하 균일화(cutting-load smoothing) 기술의 구현이 현실적으로 대두되고 있다.

특히 정삭의 경우, 사용하는 공구의 직경보다 상대적으로 매우 작은 절삭깊이로 가공이 이루어지므로, CL면(cutter location surface)의 곡률 변화에 따라 순간적으로 가공부하의 급격한 변화가 나타난다. 이때 공구의 휨 현상(deflection)이나 떨림 현상(chattering), 심한 경우 공구가 부러지는 현상(tool breakage)이 발생할 수 있고, 이는 결과적으로 가공면의 품질 저하를 야기하므로, 고속가공 및 무인가공 활용상의 주요 저해요인이 되고 있다. 이런 문제는 황삭 단계에서도 마찬가지여서 포켓 가공의 경우, 코너 부위에서 가공부하의 급격한 변화가 발생하므로, 효과적이고 안정적인 가공부하 균일화 방안이 절실

하게 요구된다.

가공부하 균일화를 구현하기 위한 기존의 연구들은 주로 절삭력 모델(cutting-force model)에 근거한 가공부하 추정에 집중되어 왔다. 이들 연구에서 수립된 절삭력 모델은, 소재제거율(MRR: material removal rate)의 추정값을 이용하는 부피 모델(volumetric model)과 공구의 이산 모델(discrete model)을 이용하여 순간적인 절삭력을 예측하는 기계적 모델(mechanistic model)로 나누어볼 수 있다. 부피 모델은 MRR과 절삭력간의 관계식에 나타나는 상수들을, 사용하고자 하는 피삭재와 공구를 이용하여 초기화 가공(calibration cut)을 수행함으로써 비교적 간단하게 결정할 수 있다. MRR을 이용하는 특성상 가공시 연속적으로 나타나는 순간적인 절삭력이 아니라, MRR이 정의되는 일정구간의 평균 절삭력을 예측할 수 밖에 없으므로, 가공부하 균일화의 본질적인 문제 해결에 이용되기에는 어려움이 있다. 한편 기계적 모델은 순간적인 가공부하를 예측하기 위한 것으로서, Thusty<sup>11</sup>가 제안한 이후 DeVor<sup>12</sup>, Kline<sup>13,14</sup> 등에 의하여 개선되었으며, 피삭재 형상의 변화<sup>15</sup>나 절삭동력학(dynamics)<sup>16,17,18</sup>을 고려하는 등 많은 발전을 보여왔다. 그러나 기계적 모델 역시 모델 내에 존재하는 상수들을 결정하기 위해서는 피삭재, 공구, 가공 형상 등

\*학생회원, 한국과학기술원 산업공학과

\*\*중신회원, 한국과학기술원 산업공학과

의 주어진 조건하에서 초기화 가공을 수행하여야만 하고, 모델의 복잡함에도 불구하고 아직 만족스러운 절삭력 추정 결과를 보여주지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 자유곡면 가공의 가공부하 균일화를 지원하기 위해 2차원 가공에서의 칩로드(chip-load)를 기하학적으로 분석한다. 실제 가공에서 나타나는 물리적인 가공부하를 직접 예측하기 보다 이에 대응하는 기하학적 척도인 칩로드를 공구접촉각(cutter-engagement angle) 또는 유효절삭깊이(effective cutting depth)로 정의하고, 직선과 원호로 이루어진 2차원 NC-code 블록에서 나타나는 칩로드 값의 변화와 특이값들을 기하학적으로 유도한다. 한편 칩로드 변화 궤적에 근거한 AFA(automatic feedrate adjustment) 방안을 제시한다.

## 2. 2차원 칩로드

### 2.1 2차원 칩로드 정의 및 연구 대상

물리적으로 금속을 절삭할 때 공구날에 작용하는 힘을 절삭저항(cutting resistance)이라고 하며, 일반적으로 서로 수직인 세 방향의 합력-주분력(main cutting force component), 이송 분력(feed cutting force component), 배분력(thrust force)-으로 나타난다. 그러나, 물리적인 절삭저항 값의 정확한 계산이나 안정적인 추정에는 어려움이 따르므로, 이를 잘 반영하고, 기하학적으로 쉽게 계산 가능한 값 즉, 칩로드의 도입이 필요하다. 칩로드 척도로는 날당이송(feed per tooth), MRR, 공구 접촉각등이 이용될 수 있다.

공구의 축방향으로 일정한 값을 갖는 2차원 가공의 경우, 축방향 절삭깊이(axial depth of cut)의 변화는 이론적으로 존재하지 않으므로, 경방향 절삭깊이(radial depth of cut)가 가공 부하에 주로 영향을 미치는 요소가 된다. 따라서 별도의 언급이 없는 한 절삭깊이라는 용어는 경방향 절삭깊이를 지칭하였으며, 모든 길이 값들은 공구반경으로 정규화(normalization)하여 표현하였다.

본 연구는 2차원 윤곽(profile)이 주어진 경우, 일정한 여유를 갖는 피삭재를 가정하고, 평엔드밀을 이용한 가공에서의 칩로드를 대상으로 한다. Table 1은 본 연구에서 사용할 기호들을 정리한 것이다.

### 2.2 2차원 칩로드 척도의 제안

본 연구에서는 2차원 가공에서의 칩로드 척도로 공구접촉각( $\gamma$ )과 유효절삭깊이( $\delta$ )를 제안한다. 공구접촉각은 가공 중 공구와 피삭재간의 접촉면의 넓이

Table 1. Nomenclature

$\alpha$	concave angle(오목각)
$\gamma$	cutter-engagement angle(공구접촉각)
$\gamma_0$	nominal cutter-engagement angle(명목접촉각)
$\gamma_p$	peak cutter-engagement angle(최대접촉각)
$\gamma_{ARC}$	원호구간에서의 공구접촉각
$\delta_e$	effective cutting depth(유효절삭깊이)
$\delta_n$	nominal effective cutting depth(명목절삭깊이)
$\delta_p$	peak effective cutting depth(최대절삭깊이)
$d_b$	braking distance(제동거리)
$d_a$	acceleration distance(가속거리)
$R_{CL}$	CL curve상의 원호 반경
$\rho_{pre}$	이전단계에서의 공구 반경

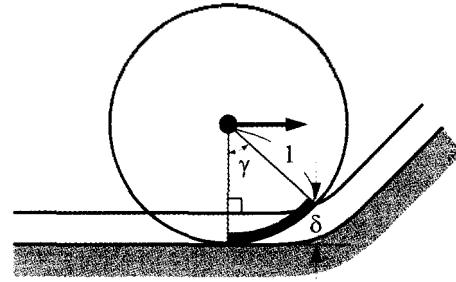


Fig. 1. Definition of 2-dimensional chip-load measures.

에 관련되어 있고, 유효절삭깊이는 가공시 피삭재의 순간부피제거량과 연관되어 있다(Fig. 1참조). 한편, 유효절삭깊이와 공구접촉각 사이에는 다음과 같은 관계식이 존재한다.

$$\delta = l \cdot \cos \gamma \quad (1)$$

## 3. 직선과 원호로 구성된 NC-code상의 2차원 칩로드 분석

### 3.1 단일구간에서의 칩로드

#### 3.1.1 직선구간

직선구간의 가공은 가공부하 균일화의 기준이 되므로, 칩로드 척도의 명목치(nominal value)들도 역시 직선구간의 칩로드 값을 기준으로 정의된다.

Fig. 2는 전형적인 직선가공을 나타낸 것으로서, 주어진 일정한 절삭깊이는 직선가공시 유지되는 명목절삭깊이  $\delta_n$ 로 정의되고, 공구의 접촉면과 공구중심점으로부터 정의되는 공구접촉각의 명목치 즉, 명목접촉각  $\gamma_0$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_0 = \cos^{-1}(1 - \delta_n) \quad (2)$$

#### 3.1.2 원호구간

Fig. 3은 오목(concave) 원호구간의 공구접촉각  $\gamma_{ARC}$

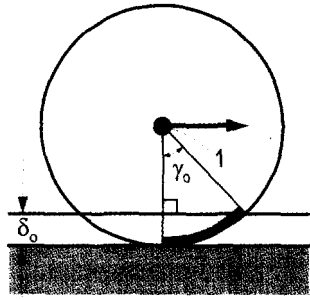


Fig. 2. Nominal values of chip-load(\$\gamma\_0, \delta\_0\$).

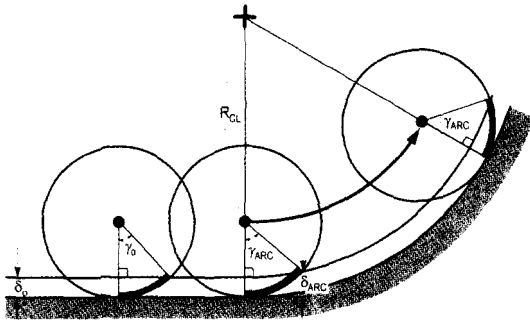


Fig. 3. Chip-load in arc block(\$\gamma\_{ARC}, \delta\_{ARC}\$).

및 유효절삭깊이 \$\delta\_{ARC}\$를 직선구간과 비교하여 나타낸 것이다. \$\gamma\_{ARC}\$를 다음과 같이 계산할 수 있으며, 자세한 수식 유도는 부록 A에 나타나 있다.

$$\gamma_{ARC} = \cos^{-1}\left(1 - \delta_0 + \frac{\delta_0^2 - 2\delta_0}{2R_{CL}}\right), R_{CL} > 0 \quad (3)$$

위의 식에서 \$R\_{CL} \to \infty\$인 경우 \$\gamma\_{ARC} \to \gamma\_0\$가 되므로, 직선구간의 가공은 원호구간의 특수한 경우(\$R\_{CL} \to \infty\$)임을 확인할 수 있다. 한편 유효절삭깊이는 식 (1)에 의하여 \$1 - \cos \gamma\_{ARC}\$의 값을 가진다.

한편 볼록(convex) 원호구간의 공구접촉각은 앞서 구한 오목 원호구간과 비슷하게 다음과 같은 식으로 계산되어 진다.

$$\gamma_{ARC} = \cos^{-1}\left(1 - \delta_0 + \frac{\delta_0^2 - 2\delta_0}{2R_{CL}}\right), R_{CL} > 0 \quad (4)$$

원호반경 \$R\_{CL}\$의 부호를 오목은 양(+), 볼록은 음(-)으로 정의하면, 원호구간의 공구접촉각은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{ARC} = \cos^{-1}\left(1 - \delta_0 + \frac{\delta_0^2 - 2\delta_0}{2R_{CL}}\right), |R_{CL}| > 0 \quad (5)$$

### 3.2 오목(concave) 연속 구간에서의 칩로드

#### 3.2.1 직선-직선구간

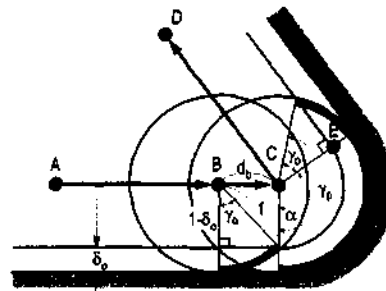
직선과 원호로 구성된 NC-code상에서 흔히 나타나는 오목 직선-직선구간은 코너부에서 칩로드가 급격히 증가하는 부분으로 가공부하 균일화의 주요 적용대상이 된다. 직선구간과 직선구간이 만나는 점을 오목점(concave point)이라 하고, 두 직선이 이루는 각을 오목각이라 한다. 오목각의 크기에 따라서 다음의 두 경우로 나누어서 해석하였으며, 판별식과 기타 자세한 계산은 부록 B를 참조한다.

(1) 오목점 이전에서 이후 직선구간 가공이 나타나지 않는 경우:

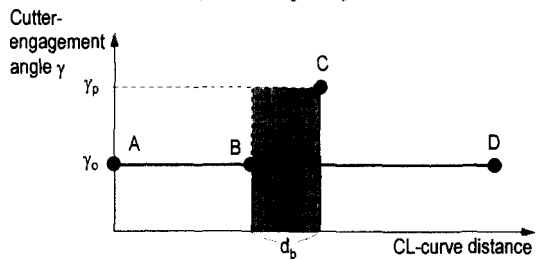
$$\alpha < \pi - \sin^{-1}\left\{\frac{\delta_0}{\sqrt{\delta_0(2-\delta_0)}}\right\}$$

Fig. 4(a)와 같이 첫번째 직선구간 AC에서 오목점 C에 이르는 동안 이후 직선구간 CD에서 가공할 피삭재 영역을 가공하지 않는 경우이다. 즉, 오목점 C에서 공구접촉각이 최대접촉각 \$\gamma\_0\$에서 명목접촉각 \$\gamma\_0\$으로 변화하게 된다. 최대접촉각은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_p = \min\{\alpha + \gamma_0, \pi\} \quad (6)$$



(a) Cutter trajectory



(b) Cutter-engagement angle

Fig. 4. Line-line block: latter line region is not cut before concave point.

Fig. 4(b)는 CL곡선(CL-curve)의 거리에 따른 공구접촉각의 궤적을 나타낸 것이다. 여기서 피삭재의 직선부위와 원호부위의 경계점(C점 아래)을 가공하는 B점으로부터 접촉각이 단순 증가하여 최대값을 나타내는 오목점인 C점에 이르는 BC구간을 과도(transient) 구간이라 한다. 과도 구간은 단일 직선구간에 비해 가공부하가 증가하므로, 이송률 감소를 통한 가공부하 균일화 기술 적용이 요구된다. 따라서, 이 구간의 길이를 제동거리( $d_b$ )라고 정의할 수 있으며, Fig. 4(a)에서 다음과 같이 간단하게 계산 가능하다.

$$d_b = \sqrt{\delta_o(2-\delta_o)} \quad (7)$$

과도구간에서의 공구 접촉각의 계산식은 부록 E를 참조한다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 과도구간의 길이를 n등분하여, 세분된 구간별로 칩로드를 계산하고 이송률을 지정할 수 있다. Fig. 5에서 실선은  $\alpha=\pi/3$ ,  $\delta_o=0.1$ 인 경우의 공구접촉각의 궤적으로써, 과도구간은 1에서 1.435까지이다. 과도구간을 3등분했을 때(x로 표시)와 하나의 구간(o로 표시)으로 표현했을 때의 칩로드 궤적이 나타나 있다.

그러나, 전체 가공길이에 비해 과도구간의 길이는 상대적으로 매우 작으므로, 과도구간의 공구접촉각의 최대값을 무난하게 가공할 수 있는 이송률을 과도구간에 부여하는 방법이 구현 측면에서 용이하고, 가공 시간 면에서도 큰 차이를 보이지 않는다<sup>19)</sup>.

(2) 오목점 이전에서 이후 직선 구간 가공이 나타나는 경우:

$$\alpha \geq \pi - \sin^{-1}\left(\frac{\delta_o}{\sqrt{\delta_o(2-\delta_o)}}\right)$$

이 경우는 Fig. 6(a)와 같이 오목점에 이르기 이전에 이후 직선구간 CD에서 가공할 영역 가공이 부분

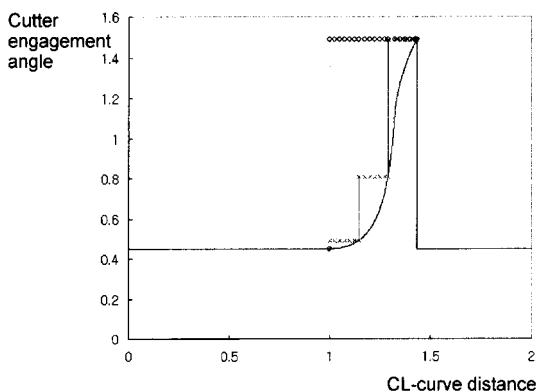
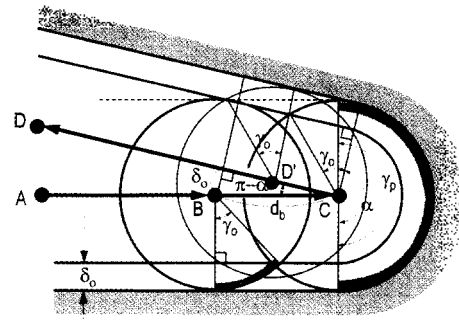
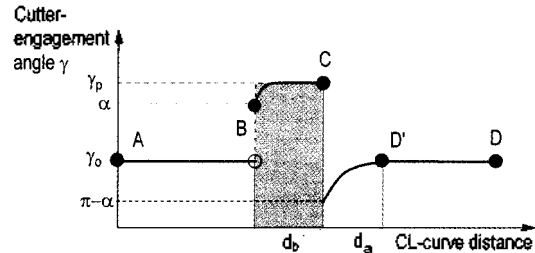


Fig. 5. Cutter-engagement angle in transient region( $\alpha=\pi/3$ ,  $\delta_o=0.1$ ).



(a) Cutter trajectory



(b) Cutter-engagement angle

Fig. 6. Line-line block: latter line region is cut before concave point.

적으로 존재하는 경우이다. 이 경우, Fig. 6(b)와 같이 공구접촉각이  $\gamma_p$ 에서  $\gamma_o$ 보다 작은  $\pi-\alpha$ 로 변화하고, 공구접촉각이 명목치보다 작은 구간(CD)이 존재한다. 최대접촉각  $\gamma_p$  및 제동거리  $d_b$ 와 가속거리  $d_a$ 는 다음과 같다.

$$\gamma_p = \min\{\alpha + \gamma_o, \pi\} \quad (8)$$

$$d_b = \frac{\delta_o}{\sin(\pi-\alpha)} = \frac{\delta_o}{\sin\alpha} \quad (9)$$

$$d_a = \cot\frac{\alpha}{2} + \frac{\delta_o}{\sin\alpha} - \sqrt{\delta_o(2-\delta_o)} \quad (10)$$

Fig. 7(a)은 직선-직선구간의 NC-code 블록에서 나타나는 최대접촉각  $\gamma_p$ 을 주어진 절삭 깊이  $\delta_o$ 와 직선-직선구간의 오목각  $\alpha$ 에 따라 나타낸 것이다. 전체적으로  $\delta_o$ 와  $\alpha$ 의 증가에 따른  $\gamma_p$ 의 증가 경향을 확인할 수 있고,  $\gamma_p$ 는  $\pi$ 이상의 값을 가질 수 없음을 볼 수 있다. 한편 Fig. 7(b)는 직선-직선구간의 꺾임에 의하여 칩로드의 증가현상이 나타나는 NC-code상의 길이 즉, 제동거리  $d_b$ 를  $\delta_o$ 와  $\alpha$ 에 따라 나타낸 것으로, 역시 전체적으로  $\delta_o$ 와  $\alpha$ 의 증가에 따른  $d_b$ 의 증가 경향이 뚜렷하며, 특히  $\delta_o$ 가 1에 접근하는 값을 가지는 경우  $\alpha$ 의 증가에 따른  $d_b$ 의 급격한 증가를 확인할 수 있다.

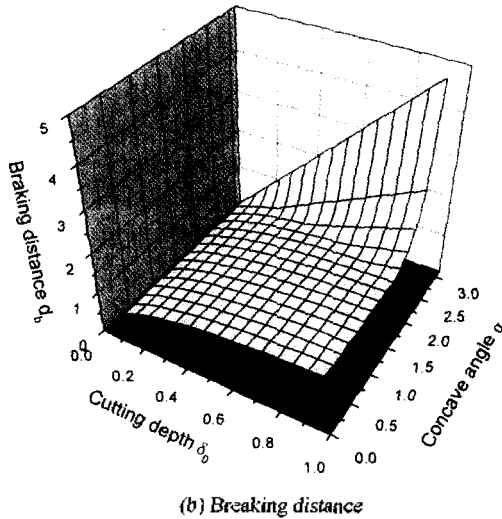
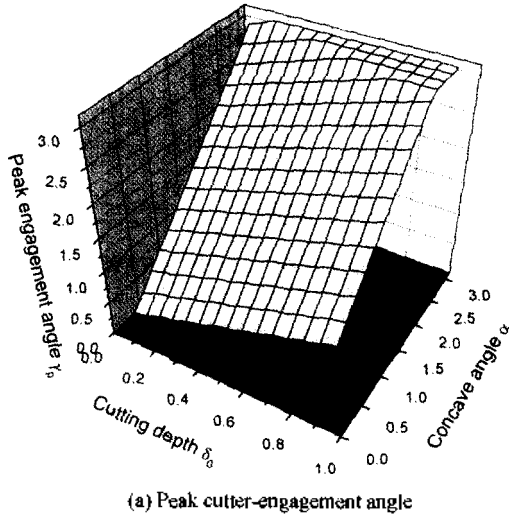


Fig. 7. Peak cutter-engagement angle and breaking distance in line-line block.

3.2.2 직선-원호-직선구간

NC-code상의 오목 직선-원호-직선구간은 오목 직선-직선구간과 함께 AFA에 의한 가공부하 균일화의 주요대상이다. 오목 직선-원호-직선구간의 칩로드 변화는 순수 원호구간 가공여부에 따라 다음과 같이 두 경우로 나누어 볼 수 있고, 판별식과 자세한 수식 유도는 부록 C를 참조한다.

(1) 순수 원호가공이 존재하는 경우:

$$\alpha > \cos^{-1} \left\{ 1 + \frac{\delta_o^2 - 2\delta_o}{2R_{CL}(R_{CL} + 1 - \delta_o)} \right\}$$

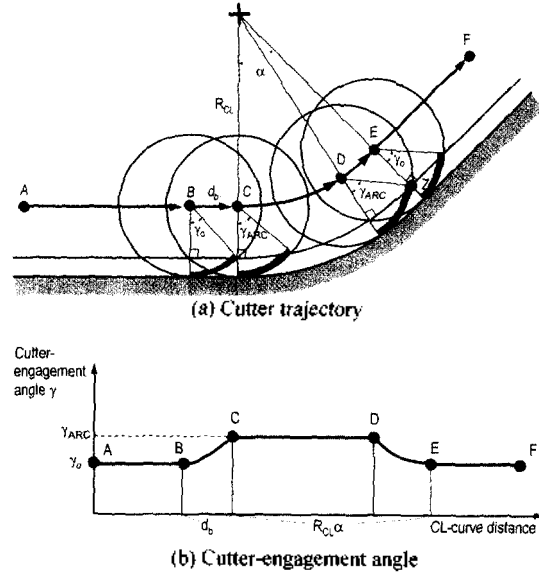


Fig. 8. Line-arc-line block: pure arc machining exists.

이 경우 첫 직선구간의 끝점(Fig. 8(a)의 C점)에서 피삭재의 원호구간을 가공하는 경우로서, 원호구간의 공구접촉각을 가지는 순수원호구간 CD가 존재한다. 즉, AB와 EF에서는 직선구간의 명목접촉각  $\gamma_o$ 가 나타나며, CD 구간에서는 원호구간의 공구접촉각  $\gamma_{ARC}$ 가 나타난다. 한편, BC는 직선구간에서 원호구간으로 진입하면서 공구접촉각이 증가하는 과도구간이며, DE는 원호구간에서 직선구간으로 진입하는 과도구간이다.

(2) 순수 원호가공이 존재하지 않는 경우:

$$\alpha \leq \cos^{-1} \left\{ 1 + \frac{\delta_o^2 - 2\delta_o}{2R_{CL}(R_{CL} + 1 - \delta_o)} \right\}$$

첫 직선구간의 끝점(Fig. 9(a)의 C점)에서 피삭재의 원호구간이 아닌 후속 직선구간을 가공하는 경우로써 순수원호구간이 나타나지 않는다. 따라서 공구접촉각은, AB와 DE에서는 직선구간의 명목접촉각 값을 가지지만, 첫 번째 직선구간이 끝나는 C점에서 다음과 같은 최대접촉각 값을 가지게 되고 이후 순수직선구간에 이르기까지 다시 감소하게 된다.

한편, 최대접촉각은 다음 식 (11)과 같이 나타낼 수 있으며, 원호반경  $R_{CL}$ 이 점점 작아져서 0에 접근하게 되면 직선-직선구간의 최대접촉각을 나타내는 식 (6)과 일치하게 된다.

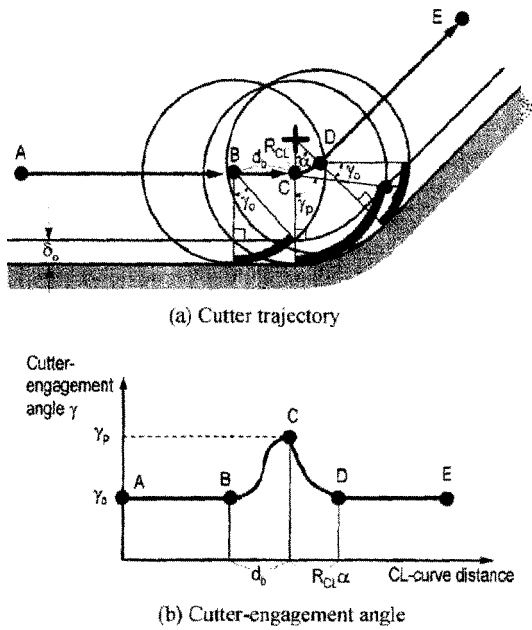


Fig. 9. Line-arc-line block: no pure arc machining exists.

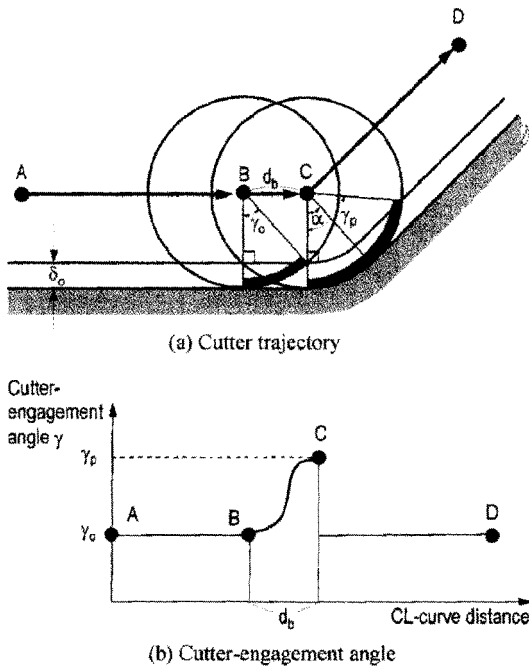


Fig. 10. Line-arc-line block:  $R_{Cl}=0$ .

$$\gamma_o = \min\{\alpha + \cos^{-1}\{1 - \delta_o + R_{Cl}(1 - \cos\alpha)\}, \pi\} \rightarrow \min\{\alpha + \cos^{-1}(1 - \delta_o), \pi\} \text{ as } R_{Cl} \rightarrow 0 \quad (11)$$

이는 직선-직선구간이 직선-원호-직선구간의 특수

한 경우임을 증명하는 것이며, 실제로 직선-직선구간은 반경 0인 원호가 존재하는 직선-원호-직선구간으로 해석 가능함을 보여준다. Fig. 10은 원호반경  $R_{Cl}$ 이 0에 완전히 접근한 경우 직선-원호-직선구간의 공구이동 및 칩모드 궤적을 보여주는 것으로 Fig. 4와 유사함을 알 수 있다.

### 3.3 가공전 피삭재 형상(preform surface)의 고려

지금까지는 피삭재 형상이 주어진 최종 가공 곡선을 절삭깊이만큼 오프셋(offset)한 것으로 가정하였다. 본 절에서는 이전단계에서 반경  $\rho_{pre} (\geq 1)$ 인 공구로 가공한 경우, 직선-직선구간의 코너 부위에  $\rho_{pre}$ 의 필렛(fillet) 형상을 포함하는 피삭재 형상을 대상으로 한다.

이 경우 역시 오목점에서 피삭재의 후속 직선구간을 가공하는 경우와 피삭재의 원호구간을 가공하는 경우로 나눌 수 있으며, 판별식과 자세한 수식 유도는 부록 D를 참조한다. 결론적으로 이전단계가공을 고려하지 않은 경우에 비하여 최대접촉각 및 재동거리가 증가됨을 관찰할 수 있다.

(1) 오목점에서 피삭재의 후속 직선구간을 가공하는 경우:

$$\alpha \geq 2 \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{\delta_o(2-\delta_o)}}{\rho_{pre} + \delta_o - 1} \right\}$$

이 경우 Fig. 11(a)에 나타난 바와같이 최대접촉각은 이전단계가공을 고려하지 않는 경우와 동일하게 식 (6)과 같이 나타나지만, 가공부하 균일화를 위하여 이송률을 줄여주어야 하는 재동거리가 Fig. 11(b)와 같이 증가하며, 이는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_b = d_o + d^* = \sqrt{\delta_o(2-\delta_o)} + (\rho_{pre} + \delta_o - 1) \tan \frac{\alpha}{2} \quad (12)$$

만약 이전단계의 가공에서, 현단계의 가공에서 사용하는 공구와 동일한 공구반경을 공구를 이용하였다면, 식 (12)은 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$d_b = \sqrt{\delta_o(2-\delta_o)} + \delta_o \tan \frac{\alpha}{2} \quad (13)$$

(2) 오목점에서 피삭재의 원호구간을 가공하는 경우

$$\alpha < 2 \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{\delta_o(2-\delta_o)}}{\rho_{pre} + \delta_o - 1} \right\}$$

이 경우는 Fig. 12에 나타난 바와같이 오목점 이후에 바로 직선구간에서의 공구접촉각을 가지는 것이 아니라, 필렛형상의 잔여 가공이 남아 있으므로 이송률을 감소해야하는 구간은  $d^*-d_o$  만큼 증가하게 된다. 최대접촉각과 재동거리는 다음과 같다.

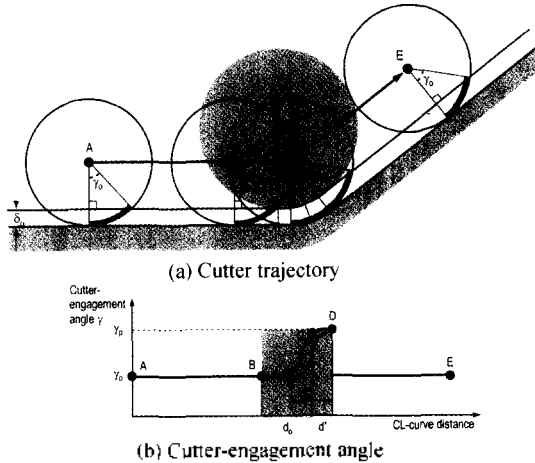


Fig. 11. Line-line block considering preform surface: latter line region of preform surface is cut at concave point.

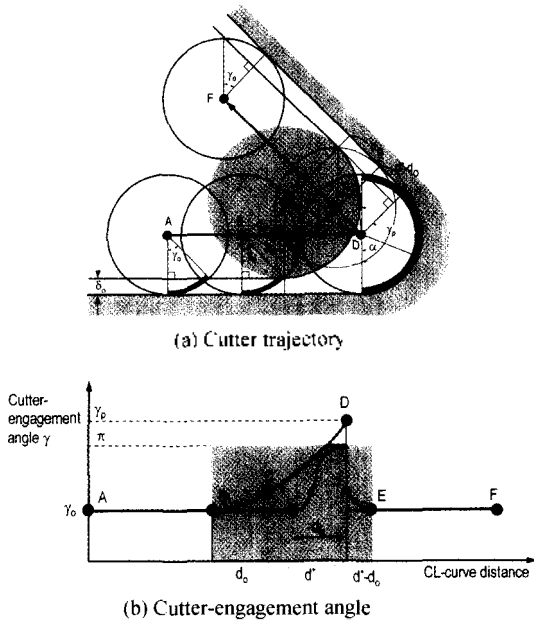


Fig. 12. Line-line block considering preform surface: latter arc region of preform surface is cut at concave point.

$$\gamma_p = \min \left\{ \pi + \frac{\alpha}{2} - \cos^{-1} y, \pi \right\} \quad (14)$$

$$\text{where, } y = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\cos \frac{\alpha}{2} (1 - \rho_{pre}^2)}{\rho_{pre} + \delta_o - 1} + \frac{\rho_{pre} + \delta_o - 1}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right\}$$

$$d_b = (\rho_{pre} + \delta_o - 1) \tan \frac{\alpha}{2} + \sqrt{\delta_o (2 - \delta_o)} \quad (15)$$

#### 4. 결론 및 추후연구과제

##### 4.1 결론

본 연구에서는 정삭 또는 황삭에 있어, 무인가공 및 고속가공에 필수적인 가공부하 균일화를 지원하기 위한 기하학적 2차원 칩로드 분석을 수행하였다.

가공이 일어나는 매 순간 변화하는 가공부하에 대응하는 2차원 칩로드 척도로서 공구접촉각과 유효절삭깊이를 제안하고, 직선구간과 원호구간에서의 그 값들을 계산하였다. 직선과 원호로 구성된 NC-code 상에서 가공부하 균일화가 필요한 오목 직선-직선구간 및 직선-원호-직선구간에서 칩로드의 변화양상 및 그 최대값들을 기하학적으로 유도하였으며, 가공부하 균일화를 위하여 이송률의 감소가 필요한 재동거리를 계산하였다. 한편, 이전단계 가공 결과 피삭재 형상을 고려한 직선-직선구간의 칩로드 분석도 수행하였다.

##### 4.2 추후연구과제

가공 부하의 변화는 전체적으로 큰 부피를 제거하는 황삭보다 정삭가공에서 더욱 심하게 나타난다. 또한 볼엔드밀을 이용할 경우 가공 각도와 축 방향 절삭깊이에 따라 공구 접촉 부위와 면적이 변화하게 되므로 2차원에서의 결과를 직접 적용하는 데는 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 2차원 칩로드 분석 결과를 볼엔드밀을 이용한 3차원으로 확장하기 위한 한 방안으로, 다음과 같이 가공시 공구 진행방향(feed-forward direction)과 픽피드방향(pick-feed direction)을 포함하는 각각의 수직평면상의 2차원 칩로드 척도의 조합으로 3차원 칩로드 척도를 제안하고, 추가적인 실험을 통한 개선을 모색하고자 한다.

$$\Lambda_{angle} = \frac{\gamma_f}{\gamma_o} \times \frac{\gamma_{pf}}{\gamma_o} \quad (16)$$

$$\Lambda_{depth} = \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_f}{\delta_o} \times \frac{\delta_{pf}}{\delta_o} \right) \quad (17)$$

**참고문헌**

1. Tlustý, J. and MacNeil, P., "Dynamics of cutting forces in end milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 24, No. 1, 1975.
2. DeVor, R. E., Kline, W. A. and Zdeblick, W. J., "A mechanistic model for the force system in end milling with application to machining airframe structures," *Proceedings of the 8th North American Manufacturing Research Conference*, Rolla, Missouri, pp. 297-303, May, 1980.
3. Kline, W. A., DeVor, R. E. and Lindberg, J. R., "The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts," *Int. Jr. of Machine Tool Design and Research*, Vol. 22, No. 1, pp. 7-22, 1982.
4. Kline, W. A. and Devor, R. E., "The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling," *Int. Jr. of Machine Tool Design and Research*, Vol. 23, pp. 123-140, 1983.
5. Fussell, B. K., *Modeling and Adaptive Force Control of End Milling Operations*, PhD Dissertation, Dept. of Mechanical Engineering, Ohio State University, 1987.
6. Fussell, B. K. and Srinivasan, K., "An investigation of the end milling process under varying machining conditions," *Trans. of ASME, Jr. of Engr. for Industry*, Vol. 1, pp. 27-36, Jan., 1989.
7. Fussell, B. K., Ersoy, C. and Jerard, R. B., "Computer generated CNC machining feedrates," *Japan/USA Symposium on flexible Automation*, Vol. 1, ASME, pp. 377-384, 1992.
8. Ersoy, C., *Automatic Generation of Feedrates for Three Axis End Mill Process Planning*, MSc Thesis, Mechanical Engineering, University of New Hampshire, 1993.
9. 서정철, 최병규, "2차원 윤곽가공에서 이송률 자동 조정에 관한 연구", '99 한국 CAD/CAM 학회 학술대회 논문집, pp. 93-98, 1999.

**부 록**

**A. 원호구간 공구접촉각 유도**

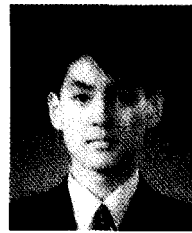
Fig. 3의 원호구간 가공 그림을, 원호중심을 원점으로 하는 2차원 좌표계에 나타내면 Fig. A. 1과 같다.

공구가 원호구간이 시작되는 A에 위치하였을 때, 공구의 형상과 원호구간의 가공전 피삭재 형상을 다음과 같이 각각 원의 방정식 C<sup>0</sup>, C<sup>1</sup>으로 표현할 수 있다.

$$C^0: x^2 + (y + R_{CL})^2 = 1 \tag{A.1}$$

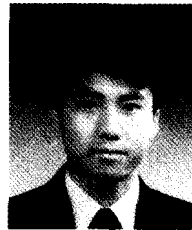
$$C^1: x^2 + y^2 = (R_{CL} + 1 - \delta_0)^2 \tag{A.2}$$

한국CAD/CAM학회 논문집 제5권 제2호 2000년 6월



**배 석 형**

1994년 한국과학기술원 기계공학과 학사  
 1996년 한국과학기술원 기계공학과 석사  
 1996년~현재 한국과학기술원 산업공학과 박사과정  
 관심분야: surface modeling, CAD/CAM, reverse engineering



**고 기 훈**

1995년 성균관대학교 산업공학과 학사  
 1997년 한국과학기술원 산업공학과 석사  
 1997년~현재 한국과학기술원 산업공학과 박사과정  
 관심분야: Cutter path generation & CAPP, CAM system development, Sculptured surface machining, Cutting force modeling & Cutting condition decision



**최 병 규**

1973년 서울대학교 산업공학과 학사  
 1975년 KAIST 산업공학과 석사  
 1982년 미국 Purdue대 산업공학과 박사  
 1982년~현재 KAIST 산업공학과 교수 및 KAIST CIM 연구센터장  
 관심분야: Surface Modeling, CAD/CAM, CAPP, 자동화제조시스템 모델링 및 시뮬레이션

위의 식 (A.1)과 (A.2)에서  $x^2$ 을 소거하여 공구가 원호구간의 가공전 피삭재 형상면에 접촉하는 C의 y 좌표값  $y_C$ 를 구하면 다음과 같다.

$$y_C = -R_{CL} - 1 + \delta_0 - \frac{\delta_0^2 - 2\delta_0}{2R_{CL}} \tag{A.2}$$

한편  $\triangle ABC$ 에서  $\cos \gamma_{ARC} = \overline{AB}$ 이므로, 원호구간의 공구접촉각  $\gamma_{ARC}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_{ARC} &= \cos^{-1}(\overline{AB}) = \cos^{-1}(|y_C| - R_{CL}) \\ &= \cos^{-1}\left(1 - \delta_0 + \frac{\delta_0^2 - 2\delta_0}{2R_{CL}}\right) \end{aligned} \tag{A.3}$$



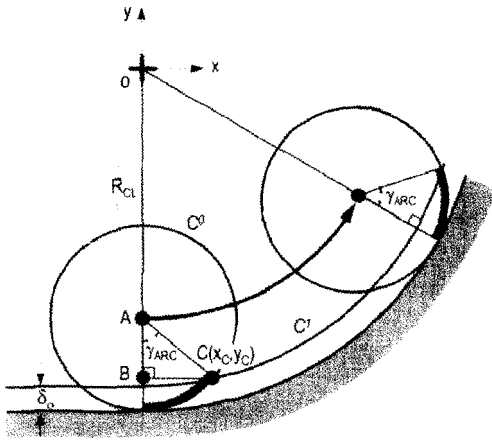


Fig. A. 1. Cutter-engagement angle in arc block.

**B. 직선-직선구간 최대공구접촉각 및 제동거리 유도**  
 직선-직선구간의 가공은, 오목점 이전에서 이후 직선구간의 가공이 나타나는지 여부에 따라 두 가지 경우로 나눌 수 있다.

Fig. B. 1(a)는 오목점 이전에 이후 직선구간의 가공이 나타나지 않는 경우로서, 제동거리는  $\triangle BEF$ 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$d_p = \overline{BC} = \overline{EF} = \sqrt{\overline{BF}^2 - \overline{BE}^2} \\ = \sqrt{1^2 - (1 - \delta_o)^2} = \sqrt{\delta_o(2 - \delta_o)} \quad (B.1)$$

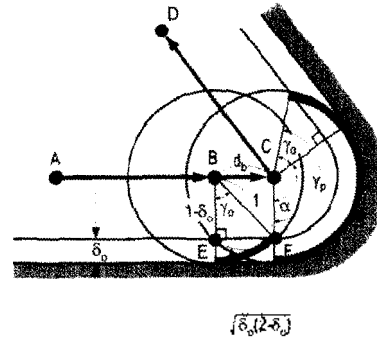
Fig. B. 1(c)는 오목점 이전에 이후 직선구간의 가공이 나타나는 경우로서, 공구가 이후 직선구간의 가공전 피삭재 형상에 접촉할 때의 공구중심 B와 오목점 C의 거리가 제동거리가 되어야 한다.

Fig. B. 1(c)에서  $\angle EBJ = \angle FCG = \alpha$ 이므로  $\angle BCI = \pi - \alpha$ 이다.  $\overline{BJ} = \overline{IH} = 1$ 이므로  $\overline{BI} = \delta_o$ 이다. 따라서 제동거리는 다음과 같이 계산된다.

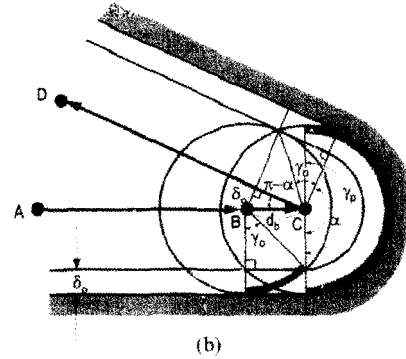
$$d_p = \overline{BC} \\ = \frac{\delta_o}{\sin(\pi - \alpha)} = \frac{\delta_o}{\sin \alpha} \quad (B.2)$$

결과적으로 직선-직선구간의 제동거리는 식 (B.1)과 (B.2)의 최대값으로 결정되므로, 임의의 직선-직선구간 즉, 임의의 오목각 및 접삭깊이가 주어진 경우, 다음과 같은 판별식에 의하여 위의 두 경우를 판별할 수 있다.

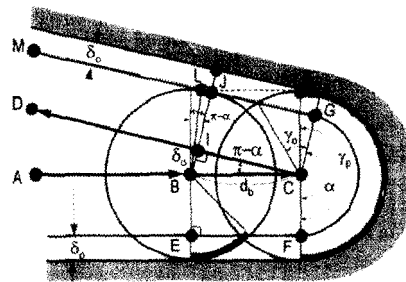
• 오목점 이전에서 이후 직선구간 가공이 나타나지 않는 경우



(a) Lateral line region is not cut before concave point



(b)



(c) Lateral line region is cut before concave point

Fig. B. 1. Line-line block.

$$\sqrt{\delta_o(2 - \delta_o)} > \frac{\delta_o}{\sin(\pi - \alpha)} \Rightarrow \alpha < \pi - \sin^{-1} \left\{ \frac{\delta_o}{\sqrt{\delta_o(2 - \delta_o)}} \right\}$$

• 오목점 이전에서 이후 직선구간 가공이 나타나는 경우

$$\sqrt{\delta_o(2 - \delta_o)} \leq \frac{\delta_o}{\sin(\pi - \alpha)} \Rightarrow \alpha \geq \pi - \sin^{-1} \left\{ \frac{\delta_o}{\sqrt{\delta_o(2 - \delta_o)}} \right\}$$

그럼 Fig. B. 1(b)는 위의 두 경우를 모두 만족하는 특수한 경우로서 식 (B.1)과 식 (B.2)의 제동거리가 동일한 값을 갖는다.

Fig. B. 1(c)에서 점 L은  $\overline{BC}$ 에 평행한  $\overline{LK}$ 와  $\overline{CD}$

에 평행한  $\overline{GM}$ 의 교점으로 이전 구간에서 가공한 피삭재 영역의 시작점이다. 따라서  $\overline{LG}$ 에서  $\sin \gamma_0$ 만큼 변한 거리가 가속구간( $d_u$ )이 되고,  $\triangle BJL$ 에서  $\angle LBJ = \frac{\pi - \alpha}{2}$  이므로,  $d_u$ 는 다음과 같이 계산 가능하다.

$$\begin{aligned} d_u &= \overline{LG} - \sin \gamma_0 \\ &= \overline{LJ} + \overline{GJ} - \sin \gamma_0 \\ &= \tan \frac{\pi + \alpha}{2} + \frac{\delta_o}{\sin \alpha} - \sqrt{\delta_o(2 - \delta_o)} \\ &= \cot \frac{\alpha}{2} + \frac{\delta_o}{\sin \alpha} - \sqrt{\delta_o(2 - \delta_o)} \end{aligned} \quad (B.3)$$

한편, 직선-직선구간의 공구접촉각은 항상 다음의 식으로 계산된다.

$$\gamma_p = \min(\alpha + \gamma_0, \pi) \quad (B.4)$$

**C. 직선-원호-직선구간 최대공구접촉각 유도**

직선-원호-직선구간의 가공은 첫 직선구간의 끝점에서 피삭재의 원호구간을 가공하는 경우와 피삭재의 후속 직선구간을 가공하는 두 가지 경우로 나누어 볼 수 있다.

Fig. C. 1에서  $\widehat{ZW}$ 를 포함하는 중심 O, 반지름  $R_{CL} + 1 - \delta_o$ 인 원과 중심 C, 반지름 1인 원의 교점을 H라고 하였다.  $\angle WOH$ 를  $\beta$ 라고 하면, Fig. C. 1(a)의  $\triangle GHO$ 에서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \beta &= \cos^{-1} \left( \frac{\overline{GO}}{\overline{HO}} \right) \\ &= \cos^{-1} \left( \frac{R_{CL} + \overline{CG}}{R_{CL} + 1 - \delta_o} \right) \\ &= \cos^{-1} \left( \frac{R_{CL} + \cos \gamma_{ARC}}{R_{CL} + 1 - \delta_o} \right) \\ &= \cos^{-1} \left\{ 1 + \frac{\delta_o - 2\delta_o}{2R_{CL}(R_{CL} + 1 - \delta_o)} \right\} \end{aligned} \quad (C.1)$$

$\alpha > \beta$ 이면, Fig. C. 1(a)와 같은 이전 직선구간의 끝점에서 피삭재의 원호구간을 가공하게 되므로 최대접촉각은  $\gamma_{ARC}$ 이고, 반대로  $\alpha \leq \beta$ 이면, Fig. C. 1(c)와 같은 경우 피삭재의 이후 직선구간을 가공하게 되므로 최대접촉각은  $\gamma_p$ 이다. Fig. C. 1(b)는  $\alpha = \beta$ 인 경우로,  $\gamma_p = \gamma_{ARC}$ 인 특수한 경우이다. 결론적으로 판별식은 다음과 같다.

- 순수 원호가공이 존재하는 경우

$$\alpha > \cos^{-1} \left\{ 1 + \frac{\delta_o^2 - 2\delta_o}{2R_{CL}(R_{CL} + 1 - \delta_o)} \right\}$$

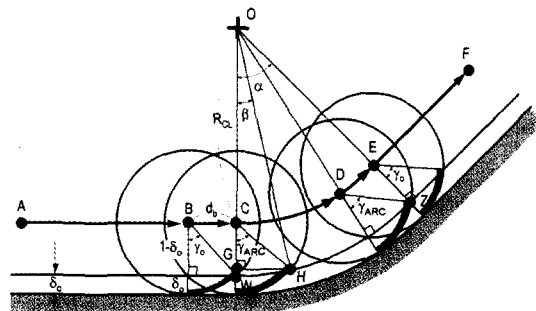
- 순수 원호가공이 존재하지 않는 경우

$$\alpha \leq \cos^{-1} \left\{ 1 + \frac{\delta_o^2 - 2\delta_o}{2R_{CL}(R_{CL} + 1 - \delta_o)} \right\}$$

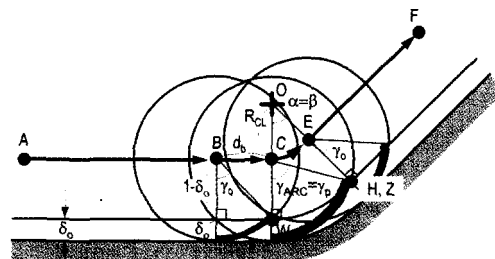
이전 직선구간의 끝점에서 이후 직선구간을 가공하는 경우 최대접촉각은, 직선구간이 끝나는 C에서 가진다. Fig. C. 2과 같이, O를 원점으로 2차원 좌표계를 설정하면, 피삭재 형상의 두 번째 직선구간의 시작점 Z를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z((R_{CL} + 1 - \delta_o) \sin \alpha, -(R_{CL} + 1 - \delta_o) \cos \alpha) \quad (C.2)$$

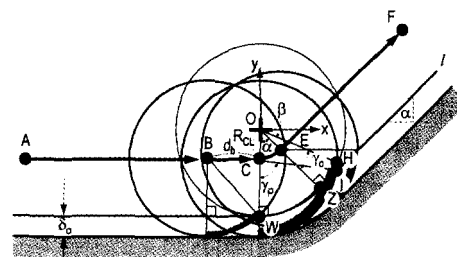
두 번째 직선구간을 나타내는 직선 l은 점 Z를 지나고 기울기  $\tan \alpha$ 를 가지므로, 다음과 같이 나타낼 수 있다.



(a) Pure arc machining exists



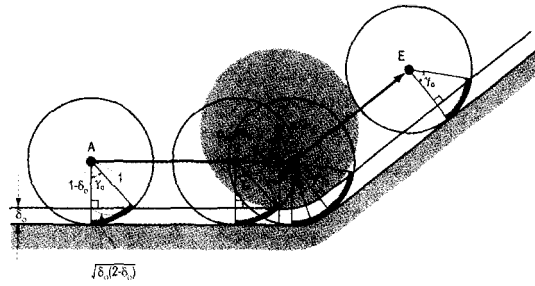
(b)



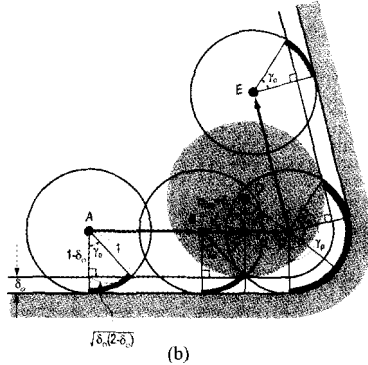
(c) No pure arc machining exists

Fig. C. 1. Line-arc-line block.

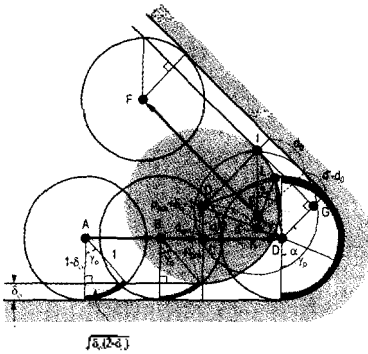




(a) Latter line region of preform surface is cut at concave point



(b)



(c) Latter arc region of preform surface is cut at concave point

Fig. D. 1. Line-line block considering preform surface.

선의 교점이다. 점 B를 원점으로 하면, 점 E는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E(ex, ey) = ((1-\delta_o)\cos(\alpha-\pi/2)+d_b, (1-d_b)\sin(\alpha-\pi/2)) \quad (E.1)$$

점 E를 지나는 공구의 중심점과 점 B와의 거리를  $F_x$ 라 하고 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_x = ex - \sqrt{1-ey^2} \quad (E.2)$$

공구가 점 B를 출발하여  $F_x$ 까지는 피삭재의 원호 구간을 가공하게 되고, 그 이후에는 직선구간을 가공하게 된다. 점 B로부터의 거리를  $a$ 라 하자.

$$\begin{aligned} (1) \quad & 0 \leq a \leq F_x \\ & (x-a)^2 + y^2 = 1 \\ & (x-d_b)^2 + y^2 = (1-\delta_o)^2 \\ \Rightarrow & x = \frac{1}{2}a + d_b + \frac{\delta_o(2-\delta_o)}{d_b-a} \\ \Rightarrow & \text{cutter engagement angle} = \cos^{-1}|y| \\ = & \cos^{-1} \left( \sqrt{1 - \frac{1}{4} \left( d_b - a + \frac{\delta_o(2-\delta_o)}{d_b-a} \right)^2} \right) \end{aligned} \quad (E.3)$$

$$\begin{aligned} (2) \quad & F_x \leq a \leq d_b \\ & (x-a)^2 + y^2 = 1 \Rightarrow Ax^2 - 2Bx + C = 0 \\ & y = \tan\alpha(x - ex) + ey \\ \text{where, } & A = 1 + \tan^2\alpha \\ & B = a + ex \tan^2\alpha - ey \tan\alpha \\ & C = a^2 + (ex \tan\alpha - ey)^2 - 1 \\ \Rightarrow & x = \begin{cases} \frac{B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} & \alpha \leq \frac{\pi}{2} \\ \frac{B - \sqrt{B^2 - AC}}{A} & \alpha > \frac{\pi}{2} \end{cases} \end{aligned}$$

$\Rightarrow$  cutter engagement angle =  $\cos^{-1}|y|$

$$\begin{cases} \cos^{-1} \left| \tan\alpha \left( \frac{B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} - ex \right) + ey \right| & \alpha \leq \frac{\pi}{2} \\ \cos^{-1} \left| \tan\alpha \left( \frac{B - \sqrt{B^2 - AC}}{A} - ex \right) + ey \right| & \alpha > \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

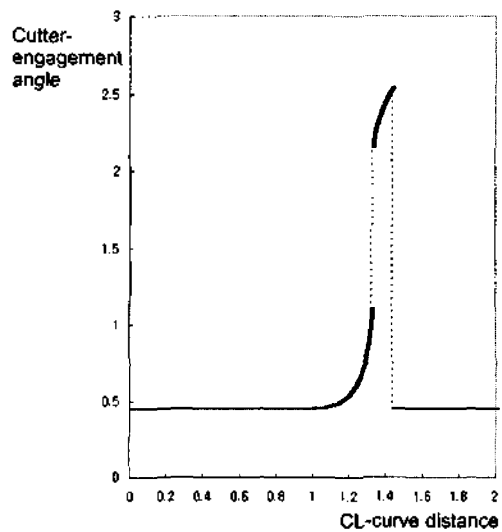


Fig. E. 1. Cutter-engagement angle in transient region ( $\alpha=2\pi/3$ ,  $\delta_o=0.1$ .)

Fig. E. 1은 오목각이  $2\pi/3$ 인 경우로 칩로드가 점 E에 닿는 순간 불연속적으로 급격히 증가함을 알 수 있다. 이에 반해 Fig. 5는 오목각이  $\pi/3$ 인 경우로 S

자 형의 칩로드 변화를 볼 수 있다.

직선-직선 구간이외의 다른 경우에도 유사하게 과도구간의 공구접촉각의 계산식을 유도할 수 있다.