

〈論 文〉

자기추진 로타리 공구를 사용한 절삭에서 천이 칩의 형성

최기흥\* · 최기상\*\*

(1992년 6월 22일 접수)

Transient Chip Formation in Cutting with a Self-propelled Rotary Tool

Gi Heung Choi and Gi Sang Choi

**Key Words :** Rotary Machining(로타리 절삭), Self-propelled Rotary Tool(자기추진 로타리 공구), Triangulation(삼각화), Transient Chip Formation(천이 칩 형성)

Abstract

A theoretical model to predict the triangular chip formation in cutting with a self-propelled rotary tool is developed. The model is based on the model of transient chip formation in two dimensional orthogonal cutting. The predicted results are found to be in good agreement with the experimental observations and suggest that the transient characteristics of work material, which depend on both cutting conditions and material properties, have the significant influence on triangulation.

기 호 설 명

$A(x)$ : 임의의 위치 $x$ 에서의 칩 절단면의 면적	$t_i$ : 초기 전단각 $\phi_i$ 에 의한 칩의 두께
$C(x)$ : 임의의 위치 $x$ 에서의 칩/공구간의 접촉 길이(contact length)	$t_{ss}$ : 정상 상태에서의 전단각 $\phi_{ss}$ 에 의한 칩의 두께
$C_o$ : 공구와 칩의 접촉이 끝나는 지점에서의 칩/공구간의 접촉 길이, 즉 $C_o = C(w_1)$	$V_c$ : 칩유출 속도(chip velocity)
$d_{cr}$ : 임계거리(critical length)	$V_{cn}$ : $V_c$ 의 수직 절삭면(normal cutting plane)에서의 성분
$d_i$ : 공작물이 절삭날에 평행인 방향으로 임의의 시간동안 이동한 거리	$V_{ct}$ : 공구와 칩 사이의 상대속도(relative chip velocity)
$d_n$ : 공작물의 절삭날(cutting edge)에 수직인 방향으로 임의의 시간동안 이동한 거리	$V_t$ : 로타리 공구의 회전에 의한 절삭 지점에서의 공구의 속도(tool velocity)
$F_c$ : 절삭 속도 방향으로의 절삭력 성분	$V_w$ : 절삭 속도(cutting speed)
$F_s$ : 전단면(shear plane)에서의 전단력 성분	$w$ : 절삭폭(width of cut)
$i_F$ : 절삭 경사각(oblique angle)	$w_1$ : 절삭날을 따라서 측정된 절삭폭
$R$ : 전단 강도비( $\tau_u/\tau_s$ )	$x$ : 공구와 공작물이 처음으로 만나는 점으로부터 절삭날을 따라서 측정된 거리
$t(x)$ : 임의의 위치 $x$ 에서의 칩의 두께	$\alpha_g$ : 기하학적 공구 경사각(geometric rake angle)
$t_1$ : 절삭 깊이(depth of cut)	$\alpha_n$ : 공구 경사각(normal rake angle)
	$\beta$ : 마찰각(friction angle)
	$\beta_n$ : 수직 절삭면에서의 마찰각(normal fricti-

\*사이텍 코리아

\*\*정희원, 서울시립대학교 제어계측공학과

- on angle)
- $\Delta\phi_n$  : 전단각의 초기치  $\phi_i$ 와 정상상태에서의 전단각  $\phi_{ss}$ 와의 차이,  $\Delta\phi_n = \phi_i - \phi_{ss}$
- $\eta_c$  : 칩의 절대 유동각(absolute chip flow angle)
- $\eta_{ct}$  : 공구 경사면 위에서 수직 절삭면과  $V_{ct}$ 가 만드는 칩의 상대적인 유동각(relative chip flow angle)
- $\theta_n, \theta_v$  : 밀링 머신 스피ndl의 setting angles
- $\tau_s$  : 전단 강도(shear strength)
- $\tau_u$  : 최후 전단 강도(ultimate shear strength)
- $\phi_i$  : 초기 전단각(initial shear angle)
- $\phi_n$  : 수직 전단각(normal shear angle)
- $\phi_{ss}$  : 정상상태에서의 전단각
- ( )<sub>o</sub> : 첨자<sub>o</sub>는 2차원 직각 절삭 과정(orthogonal cutting)에서 얻어진 파라미터를 나타낸다.

## 1. 서 론

전형적인 점접촉 절삭공정에 쓰이는 공구를 설계할 때 공구의 수명을 우선적으로 고려할 경우 절삭 공구는 가공에 필요한 에너지를 최소화할 수 있어야 하고 또, 적절한 강도와 열용량을 가져야한다. 그러나, 현실적으로 발생하는 문제점은 이러한 조건들이 서로 상반되게 연관되어 있어 모두를 동시에 만족시키기가 어렵다는 점이다. 예를 들면, 공구 경사각이 크면 공작물을 소성변형시키는데 소요되는 에너지의 양은 줄어들지만 공구의 강도나 열용량의 측면에서 보면 바람직하지 않다. 또, 공구와 칩 사이의 접촉면에서의 마찰을 줄이기 위해서는 절삭속도를 증가시키면 되지만 최대로 허용될 수 있는 칩 제거율의 범위 내에서만 가능하고 절삭유를 절삭 포인트로 효과적으로 유입시키려 할 때에는 큰 절삭속도가 오히려 장애요인이 된다. 그렇다면, 수명도 길면서 만족할 만한 성능도 보장할 수 있는 절삭공구의 조건은 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 실제의 공구 경사각 (“actual” rake angle 또는 “physical” rake angle)이 작아야 하고 유효 공구 경사각(“effective” rake angle)은 가능하면 커야한다.

(2) 절삭 속도를 증가시키지 않고도 칩 유출 속

도를 증가시킬 수 있어야 한다.

(3) 큰 절삭 속도에서도 절삭유를 효과적으로 주입할 수 있어야 한다.

이러한 조건들은 절삭 가공중에 공구를 공구의 절삭날을 따라 움직여 줌으로써 만족시킬 수 있다. 이와 같은 별도의 움직임을 쉽게 얻을 수 있는 한 가지 방법으로 원형의 절삭면을 갖고 있는 로타리 공구의 개념이 도입된 바 있다.<sup>(1-4)</sup>

로타리 절삭은 Fig. 1(a)에 보인 것처럼 원주 형태의 절삭날이 그 축을 중심으로 연속적으로 회전해서 절삭 부위로 새로운 절삭날이 계속 공급되도록 하는 절삭 공정이다.<sup>(1-4)</sup> 이제, 원형의 절삭면을 갖는 공구의 특정 부위에 국한하여 보면 이와 같은 공구의 추가적인 회전 운동은 절삭에 있어서 공구의 특정 절삭면과 공작물간의 단속적인 접촉(“intermittent contact”)을 가져오며 이는 공구의 기계적인 강도를 줄이지 않고도 효과적으로 공구와 공작물간의 접촉 형태를 조정할 수 있게 된다. 일반적으로 로타리 공구의 사용은 다음과 같은 결과를 가져온다.<sup>(1,2)</sup>

(1) 큰 공구의 곡률반경(tool nose radius).

(2) 절삭 도중 혹은 절삭 후의 연속적인 공구냉각.

(3) 일정한 양의 마모가 공구의 넓은 접촉면적에 고르게 분포.

(4) 작은 절삭력 성분 때문에 공구/칩 접촉면에서의 점착(seizure)이 비교적 덜 발생하며 이에 따른 빌트업 에지의 가능성 제거.

(5) 절삭 부위로의 손쉬운 냉각유의 유입.

따라서, 로타리 공구에 의한 절삭은 전형적인 점접촉 절삭에 비해 몇가지 장점을 갖고 있는데 긴 공구 수명, 매우 매끄러운 공작물의 표면 조도, 그리고 가공 공정의 쉬운 제어등이 그것이다. 또, 이와 같은 장점으로 인하여 항공기 부품과 같은 고강도 재료의 고정밀 가공, 비원형가공등의 응용 예가 보고되고 있다. 로타리 공구는 크게 외부의 드라이브에 의해서 공구가 강제적으로 구동되는 외부구동형(driven rotary tool, DRT)과 공작물과의 상호작용에 의해 구동되는 자기추진형으로 나눌 수 있다(self-propelled rotary tool, SPRT). 특히 자기추진형의 경우 공구는 자유롭게 공구의 회전축을 중심으로 회전할 수 있게 되어 있으며 이 때의 회전력은 공구와 공작물 사이에 발생하는 마찰에 의하여 얻어지게 된다. 다시 말하면, 공구와 공작물

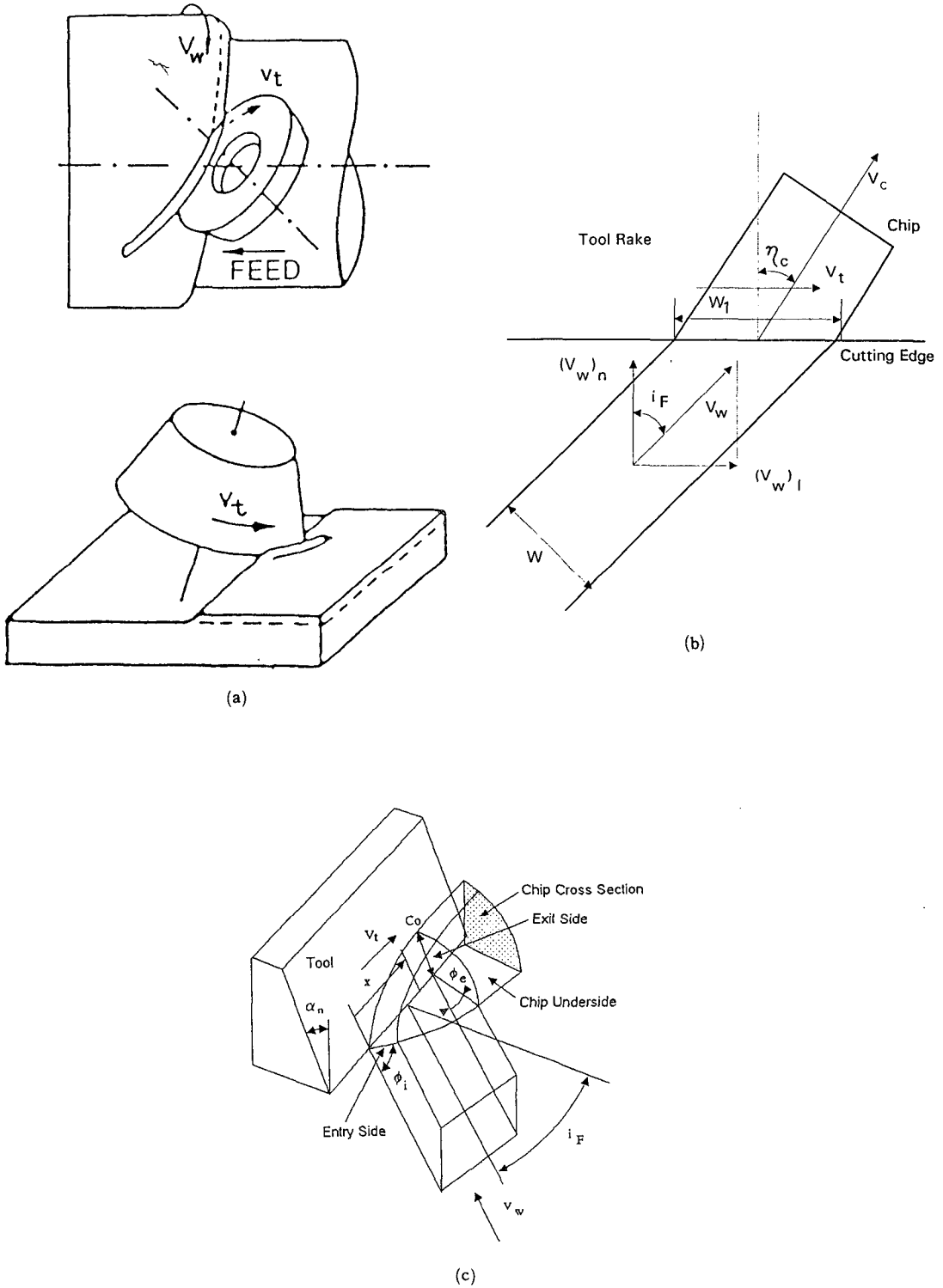


Fig. 1 Rotary machining with SPRT, (a), velocity configuration, (b), and model of triangular chip formation, (c)

간의 접촉 지점에서 공구의 원주 방향 즉, 공구 경사면에서 절삭날을 따른 방향으로의 마찰이 일어나야만 회전력을 얻을 수 있게 된다. 그러므로, 2차원 절삭( $i_F=0$ )과 같이 절삭날을 따른 방향으로의 마찰이 일어나지 않는 경우 자기추진형 로타리 절삭은 실현될 수 없으며 기하학적으로 3차원적인 절삭( $i_F>0$ )일 경우에만 가능하다.

이제, Fig. 1(b)로부터 자기추진형 로타리 절삭의 경우 공작물은 수직 절단면과 일정한 각도(절삭경사각,  $i_F$ )를 유지하며 공구에 접근함을 알 수 있는데, 여러 절삭 조건과 공작물의 물성등에 따라 칩의 삼각화(triangulation)라는 특이한 현상이 발생할 수 있다.<sup>(1,2,4)</sup> 일반적인 칩 형성 과정에서 사각형의 절단면을 갖는 미절삭 부위가 사각형의 절단면을 갖는 칩으로 형성되는 것과는 달리 삼각화에 있어서는 아직 절삭되지 않은 공작물의 사각형상의 절단면이 삼각형의 절단면 형상을 가진 칩으로 변환된다. 이러한 삼각형 형상의 칩 형성은 원래 M. C. Shaw<sup>(1)</sup>에 의하여 로타리 속도비  $V_c/V_w$ 가 아주 작은 경우의 구동형 로타리 공구(DRT)에 대하여 보고된 바 있다. 칩의 삼각화가 발생하면 열악한 표면 조도, 큰 절삭력 성분등의 문제점이 발생하므로 절삭 가공의 질을 고려할 때 삼각형상을 갖는 칩 형성은 억제되어야 한다. SPRT에 의한 칩의 삼각화는 Venuvinod<sup>(1,2)</sup>와 Choi<sup>(4)</sup> 등에 의해 연구되어 절삭 깊이, 절삭 경사각  $i_F$ , 공구의 기하학적 형상, 그리고 공작물의 물성등과 같은 파라미터들에 의해 영향받는 것으로 밝혀졌다. 또, 삼각화에 있어서 칩 형성과정은 전체 절삭 과정에 걸쳐서 정상적인 유동 형태의 칩 형성으로 안정화되지 못하고 천이적인 상태를 유지한다는 사실이 보고되었다.<sup>(1,2,4,5,6)</sup>

자기추진 로타리 공구에 의한 절삭의 경우, 공구는 기본적으로 칩과 공구 경사면과의 마찰에 의해 회전하게 된다고 앞에서 언급하였다. 이 때, 공구가 회전축을 중심으로 자유로이 회전할 수 있으므로 공구의 절삭날과 평행한 방향으로 공구/칩 사이의 상대적인 미끄러짐은 거의 없음이 실험적으로 입증된바 있다.<sup>(2,3)</sup> 이 경우 공구의 절삭날을 따른 방향으로의 절삭력 성분은 거의 없으며 칩 형성과정은 2차원적 이라고 할 수 있다. 또한, 칩의 삼각화가 발생하면 공구 경사면 위에서의 칩의 절대 유동각은 거의 90°인 것이 실험적으로 입증되어져 있다.<sup>(1,2,5)</sup> 이는 칩의 유동방향과 공구의 회전방향의

거의 일치함을 암시하는 것으로 공구 경사면에서의 칩과 공구 사이의 상대 속도 또는 상대적인 미끄러짐이 거의 없다는 것 ( $\eta_{ct} \approx 0$ )의 근거가 될 수 있다. 실제로 2차원 절삭 실험에서의 천이적인 칩 형성 과정을 살펴보면 공구와 공작물의 첫 접촉으로부터 정상 상태의 안정적인 칩이 형성되기 까지의 동안은 공구와 접촉면에서의 상대적인 미끄러짐이나 마찰 등이 거의 없다고 알려져 있다.<sup>(1,2,4,5)</sup> 이와 같은 사실은 자기추진 로타리 공구를 사용한 절삭시 칩의 삼각화가 발생하면 칩의 형성 과정은 2차원 절삭시의 천이적인 칩 형성 과정과 유사하며 위에 언급된 칩의 삼각화와 연관된 파라미터들이 칩 형성과정에서 천이적인 행동에 직접적인 영향을 미친다는 것을 의미한다.

2차원 절삭이나 밀링에서의 칩형성에 있어서 천이적인 면은 최근 많은 연구자들에 의해 집중적으로 연구된 바 있다. 이중 Chandrasekaran<sup>(7,8)</sup>은 이러한 천이적 절삭 공정의 특징을 초기의 공구 경사면과 여유면(flank face)을 따라 지역적인 피이크 응력(stress peak)의 존재, 그리고 절삭력과 공구/칩 접촉 길이의 지수적인 증가로 설명하였다. 이러한 피이크 응력은 공구/칩 접촉 길이의 천이적 형성과 큰 연관이 있으며 절삭 속도보다는 절삭 깊이, 공구의 형상등과 깊은 관련이 있는 것으로 보인다.

로타리 절삭은 1950년대에 M. C. Shaw에 의해 이론적으로 연구된 이래 1960년대와 1970년대에 걸쳐서 소련과 일본등을 중심으로 기초이론과 정밀가공에의 응용에 관하여 활발히 연구되었다. 미국에서의 로타리 절삭에 관한 연구는 주로 항공산업이나 국방산업등에서 쓰이는 고강도 재료의 절삭과 연관된 것이 많고 로타리 공구의 개념을 이용한 밀링 공구도 개발되어 시판되고 있다. 그러나, 위에서 언급한대로 로타리 공구가 갖고 있는 여러가지 장점에도 불구하고 실제 현장에서 널리 사용되지 못하고 있는 것도 현실이다. 그 이유중의 하나는 로타리 절삭 가공과정의 이해에 필수적인 이론적 해석이 부족하기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 2차원 절삭중 공구가 공작물로 들어가는 과정에서의 칩형성의 천이적 행동을 실험적으로 연구하고 이 결과를 이용하여 자기추진 로타리 공구를 사용한 절삭중 발생한 칩의 삼각화 과정을 규명하는 이론적인 모델을 제안하고 이의 타당성을 실험결과로 입증하려 한다.

2.2 차원 적삭에서의 천이 칩 형성

공작물의 변형 경화(strain hardening) 특성으로부터 2차원 절삭에서의 전단각을 예측하는 이론적 모델이 Wright<sup>(9)</sup>에 의해 제안된 바 있다. 이 연구에서는 절삭 초기에 공작물의 압축에 의해 심하게 변형 경화되며 전단 변형은 처음에  $\phi_i=45^\circ+\alpha_n/2$ 로 기울어진 면에서  $\tau_u$ 의 응력으로 일어난다고 가정한다. 그리고, 이 변형은 보다 부드러운 공작물에서도 같은 에너지 입력에 의해 그러나  $\tau_s$ 의 응력으로 첫번째 밴드 앞에 생길 수 있다고 제안하였다. 그러면, 공구 경사면에서의 마찰에 의한 상호작용을 고려하지 않고 최소 에너지 법칙을 적용함으로써 정상 상태하에서의 절삭중 수직 전단각  $\phi_n$ 은 전단 강도비  $R$ 이 최후 전단 강도  $\tau_u$ 의 전단 강도  $\tau_s$ 에 대한 비일 때 다음과 같이 예측된다.

$$\phi_n = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left( 2R \sin(45^\circ + \alpha_n/2) \cos(45^\circ - \alpha_n/2) - \sin \alpha_n \right) + \alpha_n/2 \quad (1)$$

위의 식에서 공작물의 물리적 특성과 절삭조건(예를 들면, 공구의 형상)의 전단과정에 대한 영향은 각각  $R$ 과  $\alpha_n$ 에 반영되어 있다고 볼 수 있다. 또 한가지 언급하여야 할 사실은 위의 이론적 모델을 유도하는 과정에서 전단 에너지만 고려되고 칩과 공구 사이의 마찰에 의한 영향은 무시되었기 때문에 정상상태에서의 칩 형성과정을 설명하기에는 다소 무리가 따른다는 점이다. 그러나, 칩의 천이적인 형성과정은 칩과 공구 사이의 마찰이 미쳐 발생하기 전이며 SPRT에 의한 삼각화의 경우에도 공구 경사면에서의 마찰이 거의 무시할만하므로 Wright의 모델은 본 연구에 특히 적합하다고 할 수 있다.

천이적 칩 형성의 가장 전형적인 특징은 절삭 초기에 최대 전단 응력과 전단 변형이 생긴다는 점이다.<sup>(7)</sup> 이러한 응력과 변형도는 일반적으로 정상상태에서 발생하는 것보다 크며 공구가 공작물로 들어감에 따른 응력과 변형도의 점진적인 증가도 실험적으로 관찰되어 진다. 그러므로 Wright가 제안한 이론대로 천이적 절삭 과정에서 공작물이 변형도의 점진적 증가에 따라 심하게 변형 경화되고 결과적으로 전단 응력은  $45^\circ + \alpha_n/2$ 만큼 경사된 평면에서 그 최대값에 도달하게 된다고 가정할 수 있다. 그리고 칩 형성과정은 전단각을 회전시켜서  $\tau_s$ 를 전단 강도로 가지는 경화되지 않은 부드러운 공작

물에서 정상상태로 안정화된다.

이제, Wright에 의하여 제안된 이론을 다음과 같은 두 단계의 과정을 거쳐 본 연구에 적용한다.

2.1  $(\beta_n)_o$ 의 측정

우선, 2차원 절삭에서 Merchant의 전단 모델을 가정하면 마찰각  $(\beta_n)_o$ 은 절삭력 성분을 측정하고 다음 식을 적용함으로써 계산할 수 있다.

$$\tan((\beta_n)_o - \alpha_n) = \frac{(F_t)_o}{(F_c)_o} \quad (2)$$

그러면, 천이 절삭 과정 중에는 절삭력의 지수적 증가가 관찰되므로  $\beta_{ss}$ 가  $(\beta_n)_o$ 의 정상 상태값,  $t$ 가 시간,  $T_o$ 가 공작물의 물성인 시간 상수(time constant)라 할 때  $(\beta_n)_o$ 의 시간에 대한 비슷한 천이 경향을 가정할 수 있으며 이는 다음과 같이 표시된다.<sup>(5)</sup>

$$(\beta_n)_o = \beta_{ss} (1 - \exp(-t/T_o)) \quad (3)$$

여기서,  $T_o$ 는 절삭 조건(절삭 속도, 절삭 깊이)과 절삭 형상(공구 경사각)에는 관련이 있으나 공구가 공작물로 들어가는 모드에는 관계없는 것으로 보고되었으며,<sup>(6)</sup>  $(F_t)_o$ 와  $(F_c)_o$ 를 일정한 시간 동안 측정함으로써 구할 수 있다.

2.2  $(\phi_n)_o$ 의 계산

다음 단계는 실험적으로 관측된  $(\beta_n)_o$ 으로부터  $(\phi_n)_o$ 의 천이적 변화를 구하는 것이다. Merchant의 절삭력 원(cutting force circle)에 따르면  $(F_s)_o$ 와  $(F_c)_o$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{(F_s)_o}{(F_c)_o} &= \cos(\phi_n)_o = \frac{(F_t)_o}{(F_c)_o} \sin(\phi_n)_o \\ &= \cos(\phi_n)_o - \tan((\beta_n)_o - \alpha_n) \sin(\phi_n)_o \end{aligned} \quad (4)$$

만약 Wright<sup>(9)</sup>가 제안한 것과 같이  $(\phi_n)_o$ 가 회전하는 동안 전단 작용에 의한 일률이 상수로 고정된다고 가정하면, 총 절삭 일률  $((F_c)_o V_w)$ 은 이 구간 동안 역시 대략 상수로 유지된다고 볼 수 있다. 따라서,  $\tau_s$ 가 상수일 때

$$(F_s)_o = \frac{\tau_s t w}{\sin(\phi_n)_o} \quad (5)$$

이므로 식(4)는  $q = \tau_s t w / (F_c)_o = const$ 라고 정의할 때 다음과 같이 쓰일 수 있다.

$$\begin{aligned} \sin(\phi_n)_o (\cos(\phi_n)_o - \tan((\beta_n)_o - \alpha_n) \sin(\phi_n)_o) \\ = q = const \end{aligned} \quad (6)$$

그러므로, 2차원 절삭 실험에서 얻어진  $(\beta_n)_0$ 의 천이 응답(transient response)이 SPRT를 사용한 절삭중 칩의 삼각화 과정에서 공구가 공작물로 들어가는 위치에서의 최초의 불안정점으로 부터 나가는 위치에 이르기 까지의 전단각의 회전을 계산하는데 사용할 수 있다면(주:  $(\beta_n)_0$ 가 천이적으로 변화하는 특징은 가공물의 물성에 의해 좌우된다),  $(\phi_n)_0$ 의 천이 응답은 식(6)으로 부터 예측될 수 있다.

### 3. 자기 추진 로타리 공구(SPRT)에 의한 삼각형 칩의 형성

자기추진 로타리 공구를 사용한 절삭에서 삼각화가 발생하면 공구/칩의 접촉면에서의 절삭날을 따른 방향으로의 상대적인 미끄러짐은 거의 무시할만 하며 만약, 칩의 삼각화가 일어나지 않는다면 상대적인 미끄러짐은 공구 경사면 위에서 절삭날에 수직 방향으로 일어나기 때문에 칩 형성은 대략 2차원이 된다. 또한, 공구의 속도는

$$V_i = V_w \sin i_F \quad (7)$$

가 된다. 삼각화에 있어서 칩의 절대 유동각  $\eta_c$ 는 칩 유출 속도가 공구의 속도 방향이라는 조건이 반영되어서  $90^\circ$ 에 가깝다. 이러한 조건 하에서는 Fig. 1(c)에 보인 것처럼 공작물이 전단 변형 영역으로 들어오는 점 으로부터 나가는 점 까지 공구와 접촉하는 동안 공작물은 단지 전단 변형만을 경험하게 된다. 만약 칩 형성 과정이 공작물의 특정 부위가 공구와의 첫 접촉 이후 계속 접촉을 유지하고 있는 도중에 정상 상태로 안정화된다면 칩 형상은 처음 접촉점에서 완전한 정상 상태로 안정화가 이루어진 위치에 이르기 까지는 연속적으로 변화하는 과정에 있을 것이다. 즉, SPRT를 사용해서  $i_F$ 의 절삭 경사각으로 절삭되는 공작물은 공구와 접촉하는 동안 천이 칩 형성 과정에 머물면 완전한 삼각형 칩(fully triangular chip)이 형성된다고 볼 수 있다. 왜냐하면, 천이 과정중에는 칩 절단면의 형상이 연속적으로 변화하기 때문이다. (즉,  $\phi_i < \phi_e$ ,  $\phi_e < \phi_{ss}$ ) 만일 칩이 공구와 접촉하는 동안 천이과정을 거쳐 정상적인 상태로 옮겨가면 칩의 형상은 부분적으로 삼각형이거나 (partially triangular chip,  $\phi_i < \phi_e$ ,  $\phi_e = \phi_{ss}$ ) 경우에 따라서는 거의 사각형 단면을 갖는 일반적인 칩(conventional chip,  $\phi_i \approx \phi_e$ ,  $\phi_e = \phi_{ss}$ ) 이 생성될 것이다. (Fig. 3(a)~3(c))

참조)

따라서, 삼각화에서 공작물이 전단 과정을 거치는 동안  $\Delta\phi_n$ 이 얼마만큼 탈성되는지 또는 공작물의 물성과 절삭 조건등은  $\Delta\phi_n$ 에 어떤 영향을 미치는지 등이 관심사가 된다. 이제, Fig. 2에서 주어진 시간 동안 공작물이 절삭날에 수직인 방향과 평

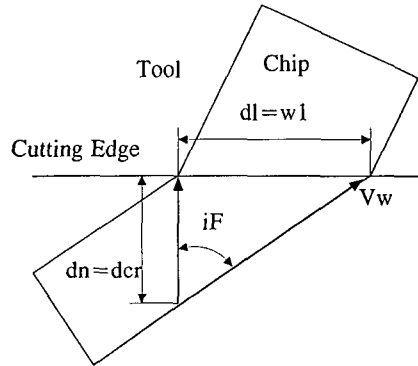


Fig. 2 Designation of distances in cutting with SPRT

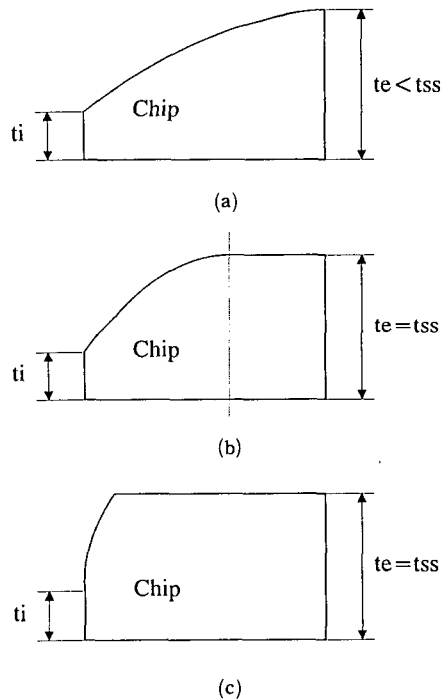


Fig. 3 Three types of chip produced with SPRT, fully triangular chip, (a), partially triangular chip, (b), and rectangular chip, (c)

행한 방향으로 이동한 거리의 비는

$$\frac{d_n}{d_t} = \frac{(V_w)_n}{(V_w)_t} = \frac{V_w \cos i_F}{V_w \sin i_F} = \frac{1}{\tan i_F} \quad (8)$$

가 되고 절삭날을 따른 절삭폭은

$$w_1 = \frac{w}{\cos i_F} \quad (9)$$

이므로 공작물이 절삭날을 따라서 절삭폭 만큼 이동해 갈 때 공작물이 절삭 속도 방향(즉, 절삭면에 수직인 방향)으로 이동한 거리는 식(8)과 식(9)로부터

$$d_{cr} = d_n \text{ (at } d_t = w_1) = \frac{w_1}{\tan i_F} = \frac{w}{\sin i_F} \quad (10)$$

가 되고 이는 임계 거리  $d_{cr}$ 로 정의된다. 그렇다면, 로타리 절삭에서의 칩의 삼각화 문제는 곧 공작물이 절삭날에 수직인 방향으로 임계 거리 만큼 움직일 동안 칩 형성 과정이 칩이 상태로 남아 있을지의 여부와 직결된다. 즉, 임계 거리가 갖는 물리적인 의미는 자기추진 로타리 공구를 사용한 절삭에서 공작물이 공구와의 첫 접촉 이후 절삭날에 수직인 방향으로 임계 거리 만큼 움직일 동안에 칩형성 과정이 정상 상태로 안정화 되느냐의 여부에 따라 칩의 형상이 삼각형인가 일반적인 칩인가가 결정되게 된다는 것이다. 이와 같은 임계 거리의 개념을 실제적으로 적용하기 위하여는 2차원 절삭 실험 데이터가 필요하다. 즉, 공작물과 공구, 그리고 절삭 깊이가 자기추진 로타리 절삭에서와 같고 절삭 속도만  $(V_w)_n = V_w \cos i_F$ 인 2차원 절삭에서 절삭력 성분의 칩이 응답을 측정하면 이로부터 칩형성의 안정화까지 소요된 시간 또는 절삭 속도 방향으로 공작물이 움직인 거리를 결정할 수 있으며 이를  $d_{cr}$ 과 비교함으로써 칩 형상을 예측할 수 있게 된다.

#### 4. 삼각화에 있어서의 칩 형상의 계산

삼각화에 있어서 전단각이 공구와 공작물 사이의 첫 접촉이 일어날 때의 값  $\phi_1$ 에서 공구와 공작물 사이에 더 이상 접촉이 일어나지 않을 때의 값  $\phi_e$ 로 변한다고 가정하면  $\phi_n$ 의 칩이적 행동은 식(6)을  $(\phi_n)_0$ 에 관해서 풀고  $\phi_n$ 을  $(\phi_n)_0$ 으로 대치함으로써 예측할 수 있다. 일단 2차원 절삭 실험에서  $(\phi_n)_0$ 의 변화가  $V_w$ ,  $t_1$ ,  $\alpha_n$ 과  $w$ 의 함수로서 알려지면 이에 상응하는 SPRT에 의한 삼각화에서 절삭

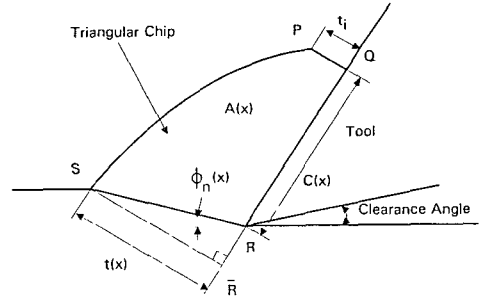


Fig. 4 Chip geometry in triangulation

날을 따른  $\phi_n$ 의 변화도 역시 들어오는 점으로 부터의 거리  $x$ 의 함수로 알수 있다.  $x$ 에서의 칩의 두께는  $\phi_n(x)$ 의 함수로서 다음과 같이 주어진다.

$$t(x) = t_1 \frac{\cos \alpha_n + \sin \alpha_n \tan \phi_n(x)}{\tan \phi_n(x)} \quad (11)$$

그러면 접촉 길이,  $C(x)$ 는 임의의 점  $x$ 에서 칩의 유동률(flow rate,  $V_c A(x)$ )이 이 단면으로 흘러들어 오는 공작물의 체적률과 같다는 체적 일정의 법칙을 고려함으로써 구할 수 있다. Fig. 4에서  $A(x)$ 는 PQRS로 둘러 쌓인 면적으로 다음과 같이 주어진다.

$$A(x) = A_1 - A_2 = \int_0^{C(x)+RR} t(s) ds - \frac{t_2(x) t_1 \sin(\phi_n(x) - \alpha_n)}{\sin \phi_n(x)} \quad (12)$$

여기서,  $A_1$ 과  $A_2$ 는 각각  $PQ\bar{R}S$ 와  $SR\bar{R}$ 로 둘러 쌓인 면적이며  $V_c = V_w \sin i_F$ 이므로

$$V_w \sin i_F A(x) = V_w t_1 w \quad (13)$$

이고 이를 바꾸어 쓰면

$$A(x) = \frac{wt_1}{\sin i_F} \quad (14)$$

이다. 따라서, 식(12)와 식(14)를 연립하여 수치적으로 풀면  $C(x)$ 가 절삭 파라미터에 따라 어떻게 변화하는지를 알 수 있다.

#### 5. 실험에 의한 증명

참고 문헌(1, 2, 4)에서 제안된 것과 같은 장비를 사용한 실험이 행하여 졌다. 이는 Fig. 5(a)에 나타나 있는 바와 같이 우선 Bridgeport 밀링 머신의 스피들 축에 로타리 공구를 부착한 다음 공구 잠금

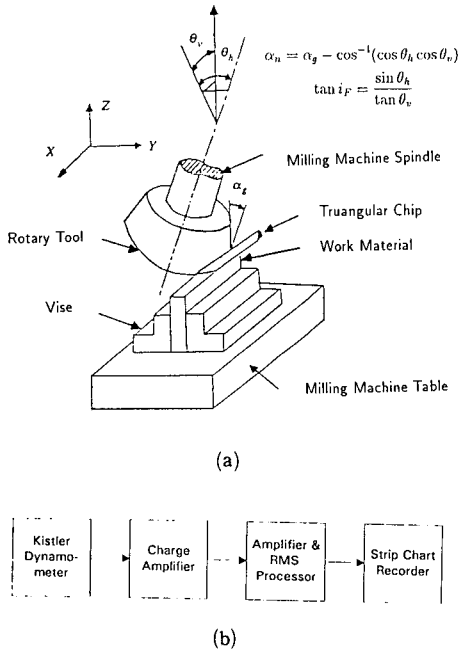


Fig. 5 Experimental setup, (a), and data acquisition setup, (b)

장치를 풀어 로타리 공구가 자유롭게 회전할 수 있도록 하여 SPRT의 효과가 나도록 하였다. 즉, 밀링머신의 스핀들 축을  $\theta_h, \theta_v$ 의 각도 만큼 기울임으로써 마치 경사각  $i_F$ 를 갖는 3차원 절삭의 효과가 나도록 하였으며 이 때의  $i_F$ 는

$$\tan i_F = \frac{\sin \theta_h}{\tan \theta_v} \tag{15}$$

와 같이 주어진다.<sup>(1)</sup> 또한, 절삭이 일어나는 부위에서의 공구 경사각  $\alpha_n$ 은 공구의 기하학적 형상에 의한 경사각  $\alpha_g$ 와  $\theta_h, \theta_v$  등으로 부터

$$\alpha_n = \alpha_g - \cos^{-1}(\cos \theta_h \cos \theta_v) \tag{16}$$

와 같이 계산된다.<sup>(1)</sup>

위의 식(15)와 식(16)으로 부터 주어진 공구의 기하학적 형상( $\alpha_g$ )에 대하여 스핀들의 두 각도  $\theta_h, \theta_v$ 를 적절히 조절함으로써 경사각  $i_F$ 와 수직 경사각  $\alpha_n$ 을 변화시킬 수 있다. 예를 들면, 식(15)에서  $\theta_h$ 를 0°로 놓고 스핀들의 공구 잠금 장치를 잠그면  $i_F=0^\circ$ 이고 공구의 반경이 절삭의 넓이보다 10배 이상 크기 때문에 (40 mm공구 반경과 3.175 mm 절삭넓이) 절삭 과정은 이상적인 2차원 직각 절삭에 가깝다고 가정할 수 있다. 반면에,  $\theta_h, \theta_v$  모두 0°가

아니면 절삭 공정은 3차원이 되고 공구 잠금 장치를 풀면 SPRT가 된다.

공작물은 바이스를 사용하여 밀링 머신 테이블 위에 Kistler Dynamometer를 고정시킨 다음 그 위에 공작물을 부착할 수 있도록 특별히 고안된 공작물 고정대를 사용하여 고정되었다. 로타리 공구로는 M2 그레이드의 RC65경도를 갖는 고속도강(HSS)을 이용하여 직경 40 mm의 크기로 제작되어 사용되었다. 수직 전단 각도(normal shear angle)는 일반적인 칩이 생성될 경우마다 마이크로 메타를 사용하여 칩의 두께를 측정함으로써 계산되었다. Dynamometer로부터의 절삭력 신호는 차지 앰프를 사용하여 증폭된 다음 strip chart recorder에 기록되었다. 측정된 절삭력 데이터는 식(2)와(3)에 주어진 마찰각과 시간 상수  $T_0$ 를 계산하는데 사용되었다. 전체 데이터 취득 장비는 Fig. 5(b)에 도시되어 있다.

여기서 한가지 언급하여야 할 사항은 이와 같은 저속 절삭 실험에 대한 타당성이다. 즉, 본 연구에서는 0.3 m/sec의 낮은 절삭 속도(밀링 머신 테이블의 이송 속도)를 사용하였는데 이는 우선 공구와 공작물의 최초 접촉으로부터 정상 상태의 칩형성이 이루어지기까지 매우 짧은 시간동안의 천이적 변화를 관측하는 것이 주목적이기 때문이다. 또 한가지 이유는 고속 절삭 실험시 순간적인 천이과정을 동기화(synchronization)에 의해 포착하기란 실험적으로 대단히 어렵기 때문에 생산 현장에서의 실제 절삭 공정과 부합되느냐 하는 문제를 제외하면 저속 실험에 의한 천이 과정의 해석이 주류라고 보여지기 때문이다. 본 연구에서의 절삭 조건하에서는 칩 형성이 정상 상태로 안정되기까지는 대략 0.5초에서 수 초 정도가 소요되는 것이 관찰되었다.

### 6. 결과에 대한 토론

Fig. 6은 최초의 불안정에 의한 전단각( $\phi_i=45^\circ + \alpha_n/2$ )과 식(1)로부터 계산된 정상상태에서의 전단각의 예측치  $\phi_{ss}$ 와의 차이 즉,  $\Delta\phi_n$ 을 강도비  $R$ 과  $\alpha_n$ 의 함수로서 보여준다. 본 연구에서 얻어진 실험 결과에 의하면 식(1)은 연성의 공작물에 대하여 특히 유효한 것으로 보인다. 예를 들면, 폴림 처리된 구리(Cu)나 Al1100과 같은 연성의 공작물을  $\alpha_n=10^\circ$ 하에서 가공하였을 경우 측정된  $\phi_{ss}$ 의 값은 대략 10°미만 이었다. 계산 결과에 의하면  $R$



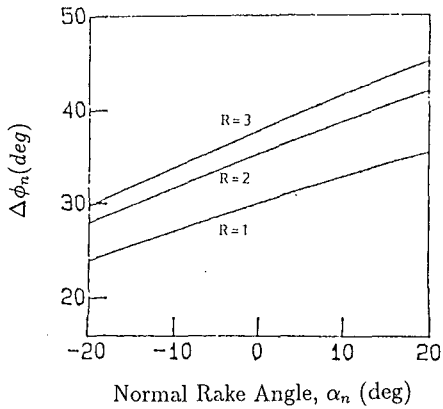
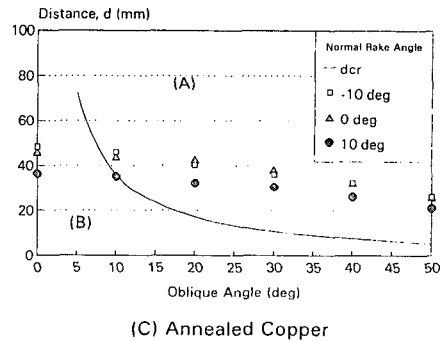
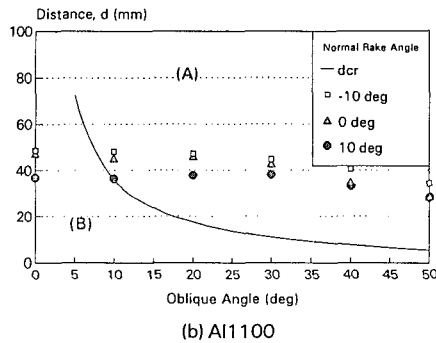
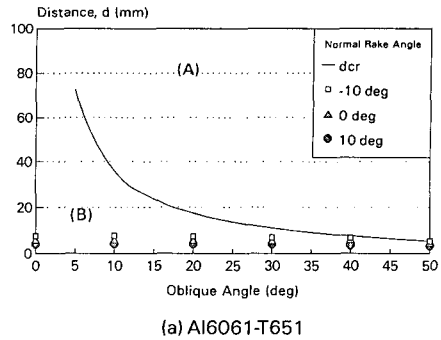


Fig. 6 Variation of  $\Delta\phi_n$  with  $\alpha_n$ , as predicted from Equation (1), for different values of R

이 3이고  $\alpha_n$ 이 10°인 경우  $\Delta\phi_n$ 의 값은 40°전후가 됨을 나타내고 있다. 따라서, 최초의 전단각 45°와  $\phi_{ss}$ 의 실험치와의 차이  $\Delta\phi_n=35^\circ$ 는 예측치에 근접함을 알 수 있다.

Fig. 7(a)~7(c)는  $V_w=0.3$  m/sec과 절삭 깊이=0.1 mm에 대하여  $\alpha_n$ ,  $i_F$  그리고 공작물의 물성의 SPRT에 의한 천이 절삭 시간에의 영향을 다시 말하면 공작물에 의해서 절삭 속도 방향으로 정상상태의 절삭 단계에 도달할 때 까지의 공작물이 움직이는 거리에 대한 영향을 보여 주고 있다. 또한  $i_F$ 에 따른 임계 거리,  $d_{cr}$ 의 변화가 이 그림에 나타나 있다. 여기서 임계선 위의 부분은 전적인 삼각화 영역이며 왼쪽 아래의 코너 부분은 부분적인 삼각화나 일반적인 칩형성 영역을 나타낸다.  $i_F$ 가 증가함에 따라 거리  $d_n$ 가 명백히 감소함을 알 수 있다. 이것은  $(V_w)_n$ 이  $i_F$ 가 증가함에 따라 감소하고 직각 절삭에서 칩 형성의 천이 기간은 절삭 속도가 감소함에 따라 감소한다는 사실에 기인한다. 그러나, 본 연구에서 사용된 공작물의 경우 절삭 경사각의 변화가 삼각화 발생 여부에 큰 영향은 주지 못하였으며 Al6061-T651에 대하여는 모든  $i_F$ 대하여 일반적인 칩이, 그리고 풀림처리된 구리 나 Al1100등에 대하여는 삼각칩이 생성될 것임을 알 수 있다. 반면에 천이 직각 절삭 과정에서의  $d_n$ 은 공구 경사각이 감소함에 따라 증가하는데 실험적 관찰 결과와도 잘 일치한다.<sup>(5)</sup> 이는 공구 경사각이 작아짐에 따라 칩의 삼각화가 일어날 확률이 높아진다는 것을 의미한다. 공작물의 물성, 특히 변형경화 특성은 또 천이 절삭 시간의 길이에 심대한



(A) Region of triangular chip formation  
(B) Region of partially triangular or rectangular chip

Fig. 7 Variation of  $d_n$ (and  $d_{cr}$ ) with  $i_F$  for  $\alpha_n=-10, 0, 10^\circ$ . Cutting conditions are  $V_w=0.3$  mm/sec width of cut=6.35 mm, and depth of cut=0.1 mm

영향을 미친다. 즉 연성이 클수록 천이 절삭 시간이 길어진다. 이는 연성이 강한 공작물은 전단각의 회전이 시작되는 충분한 응력과 변형도의 축적에 많은 시간을 요하며 따라서 적당한 칩의 형상을 형성해서 정상 상태의 절삭으로 안정화되는데 걸리는 시간이 길다는 것을 의미한다. Fig. 7(a)는  $\alpha_n=$

$-10^\circ$ 와  $i_F=0^\circ$ 에 대해서 Al6061-T6은 공작물이 절삭 영역을 떠나기 전에 안정화되나  $\alpha_n = -10^\circ$ 이고  $i_F$ 가  $40^\circ$ 보다 크면 천이 상태에 머무르게 된다는 것을 보이며 이는 실험 결과와도 일치한다.<sup>(4)</sup> 이는 주로 작은  $i_F$ 값에 대한 낮은  $(V_w)_i$ 으로는 공작물이 절삭 영역에서 칩 형성이 안정화되기 까지 충분한 시간동안 머무른다는 이유 때문이다. 그러나 풀림처리된 구리나 Al 1100에 대해서는 공구가 들어가는 동안에 칩 형성과정의 시간 응답이 대단히 느려서 모든  $\alpha_n$ 과  $i_F$ 에 대해서 천이 모드가 주가 된다.

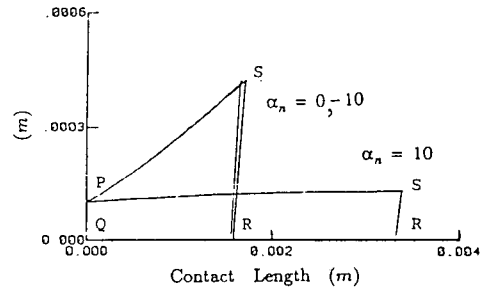
Fig. 8(a)에서 8(c)까지는 주어진 공작물에 대해서 삼각화 발생시  $\alpha_n$ 에 따른 칩 형상(단면)의 예측된 변화를 보여주고 있다.  $\alpha_n$ 이 감소함에 따라 포화가 일어남을 볼 수 있고 기하학적 형상은 특히 공작물(풀림 처리된 구리 혹은 Al1100)에 무관함을 알 수 있다. 그 이유는 다음과 같이 추론할 수 있다.

(1) 구리나 Al1100에 대해서 실험적으로 관찰된  $(\phi_n)_0$ 는 거의 같은 크기였으며 행해진 실험에 대해서 거의  $\alpha_n$ 에 무관하였다.

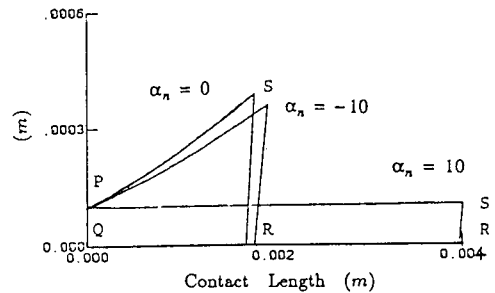
(2) 두 공작물에 대한 시간 상수  $T_0$ 는 거의 같은 크기였다. 그렇다면 두 공작물의 천이 행동은 거의 비슷한 경향을 보여야 한다.

더욱이 이 예측은 공작물의 물성에 관련된 공작물의 천이 특성이 삼각화 과정 뿐 아니라 삼각화의 형상에도 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다. 그러나, 삼각화에서 공작물은 대개 대단히 연성이 크고 절삭의 형상이나 시간에 관련된 특징들은 공작물의 종류에 따라 크게 변하지 않아서 천이 칩 형성 과정은 비슷하고 예측된 형상은 물리적 상황을 잘 설명한다는 점에 유념하여야 한다.

$\alpha_n=10^\circ$ 에 대하여 예측된 칩형상은 전형적인 사각형이라는 것이 흥미롭다. 이러한 예측은 충분히 연성이 강한 공작물의 경우  $\alpha_n$ 에 따라 사각형과 삼각형의 칩이 다 형성될 수 있다는 실험적 관찰의 결과와도 일치한다.<sup>(4)</sup> Fig. 6에 의하면  $R$ 과  $\alpha_n$ 이 증가함에 따라  $\Delta\phi_n$ 도 증가하는 것으로 Wright에 의해 제안된 모델은 예측하고 있다. 즉, 강도비  $R$  또는 공구 경사각  $\alpha_n$ 이 클수록 천이적인 칩 형성 과정 중 나타나는 칩 형상의 변화가 더 뚜렷할 것임을 예측하고 있다. 그러나 실험 결과에 의하면 큰 값의  $R$ 과 작은  $\alpha_n$ 에서 삼각화가 현저하게 일어난다는 것이 관측된다. 즉, 강도의 비가 큰 공작물



(a) Annealed Copper



(b) Al1100

Fig. 8 Variation of the predicted chip geometry in triangulation with  $\alpha_n$  for annealed copper, (a) and Al 1100, (b). The prediction was made applying the orthogonal cutting data to the model developed in this paper

또는 연성이 큰 공작물의 경우  $\alpha_n$ 이 크면 오히려 본 연구에서 제안된 모델이 예측하는 바와 같이 일반적인 형상을 갖는 칩이 형성되는 경우가 있다. 즉, 만일 전단강도의 비  $R$ 이 1에 가깝고 칩의 삼각화가 발생하면 공구 경사각에 의한 삼각화의 영향은 미미하다고 볼 수 있으며 이와는 반대로, 풀림처리된 구리나 알루미늄 합금등과 같이 전단강도의 비가 크면 공구 경사각의 영향이 커져서 그 값에 따라 보통 칩 부터 삼각형상의 칩까지도 생성될 수 있음이 여러 가공물에 대하여 실험적으로 입증되었다.<sup>(1,2)</sup> 다시 말하면, 식(1)과 (3)에서도 예측될 수 있는 바와 같이 변형 경화 특성( $R$ )과 공구의 경사각은 서로 연관되어서 칩의 삼각화에 영향을 미친다고 볼 수 있으며 본 논문에서 제안된 이론적인 모델에 이러한 점들이 적절히 반영되었다고 볼 수 있다. 그러나, 이 모델이 제시하는 보다

중요한 결과는 이 두 경우에 있어서 칩 형성은 모두 천이적이라는 점이다. 예를 들면,  $\alpha_n = 10^\circ$ 인 경우에 대하여 예측된 사각 형상은 정상 상태에서의 칩 형성에 의한 것이라기 보다는 공작물의 연성과  $\alpha_n$ 이 큰 경우 천이 과정이 길기 때문에 전단각의 회전이 뚜렷이 나타나기도 전에 공작물과 공구의 접촉이 끝나기 때문이다. 참고로 공작물의 특정 위

치가 공구와 접촉하는 시간은 절삭 속도  $V_w$ 와 절삭폭  $w_1$ , 그리고 절삭 경사각  $i_F$ 에 의해 결정된다.

Fig. 9와 10은 각각 풀림 처리된 구리와 Al1100에 대해서 절삭 경사각  $i_F$ 에 따른 예측된 칩 형상의 변화를 보이고 있다. 그림에 의하면 완전한 삼각화가 일어나면 칩형상은  $i_F$ 에 관계가 없고 작은  $i_F$ 에 대한 접촉 길이의 증가는 공작물 체적의 보존

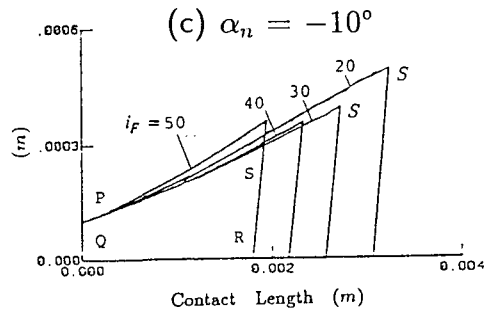
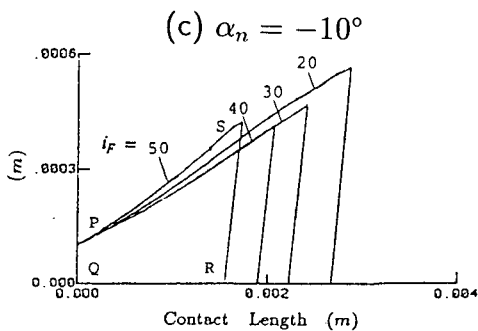
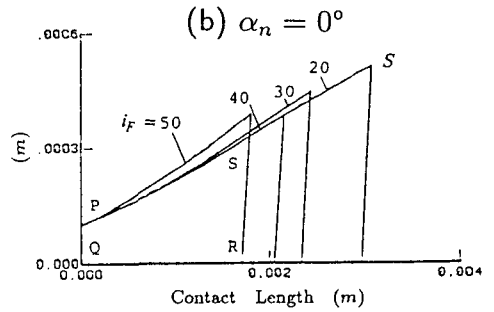
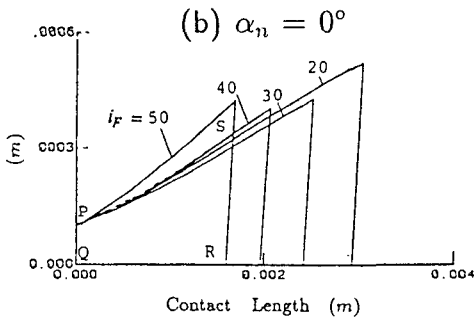
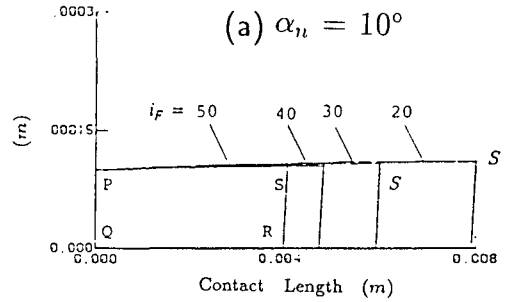
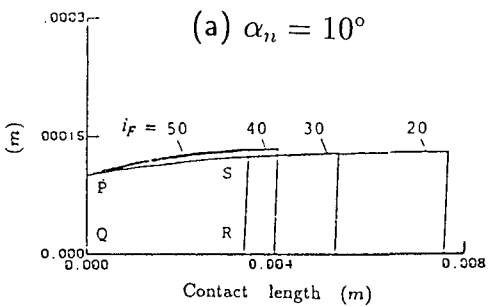
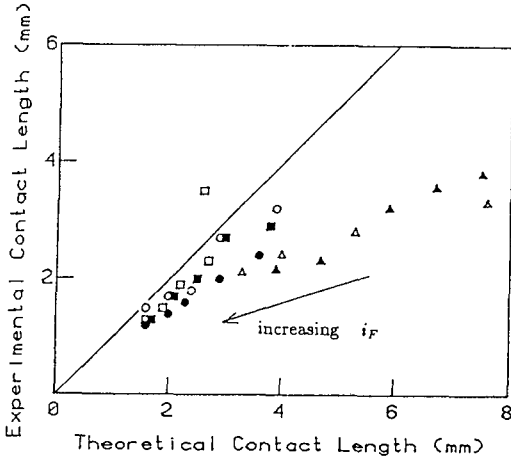


Fig. 9 Variation of predicted chip geometry with  $i_F$  for annealed copper. Cutting conditions are same as in Fig. 7

Fig. 10 Variation of predicted chip geometry with  $i_F$  for Al 1100. Cutting conditions are same as in Fig. 7



	$\alpha_n = 10$	$\alpha_n = 0$	$\alpha_n = -10$
Annealed copper	○	△	□
Al1100	●	▲	■

Fig. 11 Comparison of theoretical chip contact length with experimental values in triangulation for annealed copper and Al 1100. The arrow represents the increasing  $i_F$  direction. Cutting conditions are same as in Fig. 7

때문으로 생각할 수 있다. 즉, 작은  $i_F$ 에 대해서는  $(V_w)_l$ 도 작기 때문에 접촉 길이가 길어지게 된다. 풀림 처리된 구리나 Al1100에 대해서  $\alpha_n=10^\circ$ 일 때 사각형 칩이 생성되는 전술한 바와 같다.

마지막으로, Fig. 11에는 풀림 처리된 구리나 Al1100에 대해서 삼각 칩 형성 과정 동안 식(12)와 (14)에 의해 예측된 이론적 칩 접촉 길이가 실험 결과와 비교되고 있다. 행해진 모든 절삭 조건에 대해서 서로 잘 일치됨을 볼 수 있다. 그러나 큰  $\alpha_n$ 과 작은  $i_F$ 에서  $(V_w)_l$ 은 0에 가까기 때문에 이 경우에 칩 형성은 전형적인 2차원 칩 형성과 비슷하고 일정 기간동안의 천이과정을 거쳐 정상상태에서 칩을 형성하게 되므로 본 연구에서 개발된 모델은 이 경우 절삭 과정을 잘 설명할 수 없다. 따라서, Fig. 11의 우측 상단에서 보여지는 실험치와 예측치의 불일치는 당연한 결과로 볼 수 있다.

### 7. 결 론

본 연구에서는 자기추진 로타리 공구를 이용한 절삭에서 발생하는 삼각형 칩 형성의 이론적 모델

이 개발되었다. 구체적으로는, 자기 추진형 로타리 절삭의 경우 일반적인 칩 형성 과정은 3차원적이지만 삼각화 발생시에는 2차원 절삭에서의 천이 칩 형성 과정과 유사하다는 점이 먼저 규명되어졌으며 임계 거리를 정의하였다. 또한, 주어진 절삭 조건 하에서의 임계 거리와 2차원 천이 실험 데이터를 비교함으로써 칩의 삼각화 발생 여부를 판정할 수 있음이 제시되었고 이를 토대로 칩 형성의 기하학적 조건등을 고려하여 삼각칩 형상을 예측하였다. 이제, 본 연구에서 얻어진 결과들로 부터 다음과 같은 결론들을 도출할 수 있다.

(1) 이론이나 실험 데이터가 예시하는 것과 같이 절삭 조건이나 공작물의 재질에 따라서 세 가지 다른 형태의 칩, 즉, 전적인 삼각형, 부분적인 삼각형, 그리고 일반적인 사각형의 칩이 SPRT를 사용한 절삭에서 생성될 수 있다.

(2) SPRT를 사용한 절삭에서 주어진 절삭 조건 하에서 삼각화는 만약 칩의 삼각화가 일어난다면 2차원 절삭에서의 공작물의 천이 특성과 깊게 연관되어 있다. 즉, 천이 기간 동안 느린 시간 응답을 보이는 연성 공작물은 취성을 가진 공작물에 비해서 삼각칩을 형성할 가능성이 높다.

(3) 절삭 조건이 삼각화에 끼치는 영향은 절삭 조건의 공작물의 천이적 행동에 대한 영향 때문이다.

(4) 본 연구에서 행해진 실험에 사용된 공작물에 대하여 삼각칩의 형상은  $i_F$ 에 무관하다. 이는  $i_F$ 가 천이 절삭 과정에 거의 영향을 미치지 않기 때문이다.

(5) 삼각화에 대한  $\alpha_n$ 의 효과는 공작물의 물성(특히 강도비,  $R$ )에 깊이 연관되어 있고, 연성이 큰 즉,  $R$ 이 큰 공작물에 대하여 뚜렷이 나타난다. 예를 들면, 구리나 Al1100에서 작은  $\alpha_n$ 에 대해서 삼각형 칩이 형성될 수 있는 반면, 큰  $\alpha_n$ 에 대해서는 사각형 칩이 생길 수 있다. 그러나 이 경우에 칩 형성은 전체 절삭 과정에 걸쳐서 천이 과정에 머문다는 점에서 일반적인 사각형상의 칩 형성과는 다르다. 취성을 가진 공작물(즉,  $R$ 이 1에 가까운 공작물)에 대해서는  $\alpha_n$ 이 절삭 공정의 천이 특성에 큰 영향을 끼치지 않는다.

### 참고문헌

(1) Venuvinod, P. K. and Reddy, P. N., 1981,

- "Some Studies on Cutting with Self-Propelled Rotary Tool," ASME Paper No. 81-WA/Prod-16.
- (2) Venuvinod, P. K., 1970, "Analysis of Rotary Cutting Process," Ph. D. Thesis, University Manchester.
- (3) Choi, Gi H. and Dornfeld, D., 1990, "Analytical Prediction of Rotary Cutting Process," Proc. of the 18th NAMRC, Penn State University.
- (4) Choi, Gi H. and Dornfeld, D., "A Study on Cutting with Self-Propelled Rotary Tool, Part 1 : Experiments Using Acoustic Emission," To be Published.
- (5) Okushima, K. and Hitomi, K., 1963, "Transitional Phenomenon in Metal cutting," Int. J. Prod. Res., No. 2., pp. 234.
- (6) Choi, Gi H., 1990, "A Study on Rotary Machining," Ph. D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, April, 1990.
- (7) Chandrasegaran, H. and Nagarajan, R., 1977, "Transient Strain and Chip Formation during Tool Entry," Proc. Int. Conf. on Prod. Eng., New Delhi, Vol. 45.
- (8) Chandrasegaran, H. and Nagarajan, R., 1980, "On Certain Aspects of Transient Stress in Cutting Tools," ASME J. Eng. Ind., Vol. 102, p. 133.
- (9) Wright, P. K., 1982, "Prediction of Shear Plane Angle from Strain Hardening Characteristics of Work Material," ASME J. Eng. Ind. Vol. 104.