

〈論 文〉

자기추진 로타리 공구를 사용한 절삭에서 천이칩 형성에 관한 연구 — 실험에 의한 증명

최기흥* · 최기상** · 김정수***

(1992년 10월 10일 접수)

A Study on Transient Chip Formation in Cutting with Self-Propelled Rotary Tools — Experimental Verification

Gi H. Choi, Gi S. Choi and Jung S. Kim

Key Words : AE : Acoustic Emission, Rotary Tool(로타리 공구), Transient Chip Formation (천이칩 형성), Triangulation of Chip(칩의 삼각화), Shear Deformation(전단 변형), Sliding Friction(미끄러짐 마찰), Sticking Friction(접착 마찰), Shear Energy(전단 에너지), Friction Energy(마찰 에너지)

Abstract

An experimental study to investigate the unconventional chip formation called triangulation of chip in cutting with a SPRT (self-propelled rotary tool) is performed using acoustic emission (AE) signal analysis. In doing that, a quantitative model of the AE RMS signal in triangulation with a SPRT is first developed. The predicted results from this model show good correlation between the AE RMS signal and the general characteristics of triangular chip formation. Then, effects of various process parameters such as cutting conditions (cutting speed, depth of cut, oblique angle and normal rake angle) and the work material properties on the chip formation in cutting with a SPRT are explored. Special attention is paid to the work material properties which are found to have significant effects on triangulation.

기 호 설 명

i_F : 공구의 경사각
 w_1 : 절삭 폭
 t_1 : 절삭 깊이
 V_w : 절삭 속도
 V_c : 칩의 유출 속도
 V_s : 주전단면의 체적
 V_t : 공구의 속도
 V_{cn} : V_c 의 수직 절삭 평면에서의 성분

V_{ct} : 공구와 칩 사이의 상대속도
 a_n : 수직 경사각
 a_e : 유효 경사각
 ϕ_n : 수직 전단각
 η_c : 공구 위의 절삭면에서 절삭날에 수직인 선
 과 V_c 사이의 절대적인 칩의 유동각
 η_{ct} : 공구 위의 절삭면에서 절삭날에 수직인 선
 과 V_{ct} 사이의 상대적인 칩의 유동각
 β_n : 수직 절삭면에서의 마찰 계수
 β_e : 유효 마찰계수
 τ_s : 전단 강도
 τ_u : 최후 전단 강도

*고등기술연구원

**정회원, 서울시립대학교 제어계측공학과

***금성산전연구소

- $\dot{\epsilon}_{ij}$: 소성 변형률
- $\dot{\gamma}_{ij}$: 전단 변형률
- R : 강도비(τ_u/τ_s)
- x : 공구가 들어오는 점으로 부터의 절삭날을 따른 거리
- X : 절삭면의 끝을 따라 측정된 절삭 길이
- $C(x)$: 거리 x 에서의 칩/공구 접촉 길이
- l : 공구의 윗면에서의 접촉 마찰 지역의 길이
- l_i : 공구 윗면에서의 미끄러짐 마찰 지역의 길이
- C_0 : 절삭날에서 공구가 나가는 점에서의 칩/공구 접촉 길이
- $A(x)$: 거리 x 에서의 절단면의 면적
- ()₀ : 첨자 0는 정규화된 파라미터를 나타낸다.

1. 서 론

로타리 절삭(rotary machining)은 Fig. 1에 보인 것 처럼 원주 형태의 절삭날이 고정된 축을 중심으로 연속적으로 회전해서 절삭 부위로 새로운 절삭날이 계속 공급되도록 하는 절삭방법이다.^(5,6,8) 이와 같은 공구의 부가적인 회전운동은 절삭에 있어서 단속적인 공구와 가공물의 접촉을 가져오며 이는 공구의 기계적인 강도에 영향을 미치지 않고도 효과적으로 공구와 가공물 사이의 접촉 형태를 조정할 수 있게 한다. 따라서, 로타리 공구에 의한 절삭은 전형적인 점접촉 절삭에 비해 몇가지 장점을 갖고 있는데 긴 공구 수명, 매우 매끄러운 가공물의 표면, 그리고 가공 공정의 손쉬운 제어 등이 그 것이다. 또, 이와같은 장점으로 인하여 정밀가공이나 항공기 부품과 같은 고강도 재료의 가공, 비원형가공(noncircular machining) 등의 응용 예가 보고된 바 있다. 로타리 공구는 크게 외부의 드라이브에 의해서 구동되는 외부구동형(driven rotary tool, DRT)과 가공물과의 상호 작용에 의해 구동되는 자기추진형으로 나눌 수 있다(self-propelled rotary tool, SPRT). 자기추진형 로타리 공구의 경우, 가공물은 수직 절단면과 일정한 각도(공구 경사각, i_F)를 유지하며 공구에 접근하게 되는데(Fig. 1), 여러 절삭조건과 가공물의 물성 등에 따라 칩의 삼각화(triangulation)라는 특이한 현상이 발생할 수 있다.^(1,2,4) 일반적인 칩형성 과정에서 사각형의 단면을 갖는 미절삭 부위가 사각형

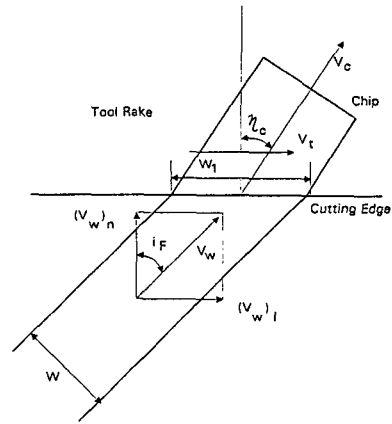


Fig. 1 Velocity configuration at the tool rake

단면의 칩으로 형성되는 것과는 달리 삼각화에 있어서는 아직 절삭되지 않은 공작물의 사각형 형상의 절단면이 삼각형의 절단면 형상을 가진 칩으로 변환된다. 칩의 삼각화가 발생하면 가공된 부품의 열악한 표면, 큰 절삭력 성분 등의 문제점이 발생하므로 절삭가공의 질을 고려할 때 삼각형상을 갖는 칩의 형성은 억제되어야 한다.

자기추진 로타리 공구에 의한 절삭의 경우, 공구는 기본적으로 칩과 공구 위의 절삭면과의 마찰에 의해 회전하게 되며 이때, 공구가 회전축을 중심으로 자유로이 회전할 수 있으므로 공구의 절삭날과 평행한 방향으로 절삭공구의 절삭면과 칩의 상대적인 미끄러짐이 거의 없음이 실험적으로 입증되었다.^(5,6,8) 이 경우 공구의 절삭날을 따른 방향으로의 절삭력 성분은 거의 없으며 칩의 형성과정은 2차원적이라고 할 수 있다. 또한, 칩의 삼각화가 발생하면 공구 절삭면에서의 칩의 유동각도 η_c 는 거의 90°인 것이 실험적으로 입증되어 있다.^(5,6) 이는 칩의 유동방향과 공구의 회전방향이 일치함을 암시하는 것으로 수직 절단면에서의 칩과 공구 절삭면과의 상대속도 또는 상대적인 미끄러짐이 거의 없다는 것이 그 근거가 될 수 있다. 실제로 2차원 직각 절삭실험(2 dimensional orthogonal cutting)에서의 천이적인 칩 형성과정을 살펴보면 공구와 가공물의 첫 접촉("first entry of the tool into the workpiece")으로부터 정상상태의 안정적인 칩("steady state chip flow")이 형성되기 까지의 동안은 공구와 접촉면에서의 상대적인 미끄러짐이나 마찰 등이 거의 없다고 알려져 있다.^(5,6) 또한, SPRT에 의한 절삭

시 칩의 삼각화가 발생하면 칩형성 과정은 전 절삭 과정에 걸쳐서 정상적인 유동 형태(flow type)의 칩형성으로 안정화되지 못하고 천이적인(transient) 상태를 유지한다는 사실이 보고된 바 있다. 이와 같은 사실은 칩의 삼각화가 발생하면 칩의 형성과정은 2차원 직각절삭시의 천이적인 칩의 형성 과정과 유사하며 절삭공정에 연관된 다양한 변수들이 칩형성 과정에서 천이적 행동에 직접적인 영향을 미친다는 것을 의미한다. 실제로, SPRT에 의한 칩의 삼각화는 Venuvinod^(5,6)와 최기홍 등⁽⁸⁾의 연구에서 절삭 깊이, 경사각(oblique angle) i_r , 공구의 기하학적 형상, 그리고 공작물의 물성 등과 같은 변수들에 의해 영향받는 것으로 밝혀졌다.

위에서도 언급한 바와 같이 지금까지 칩의 삼각화를 일으키는 절삭조건이나 공작물의 물성에 관한 연구 보고는 있으나 이의 발생 메커니즘을 역학적으로 규명하려는 시도는 전무하였다. 따라서, 최기홍 등⁽⁸⁾은 2차원 직각 절삭에서의 공구가 공작물로 들어가는 과정에서의 칩형성의 천이적 행동을 실험적으로 연구하였고 이 결과를 이용하여 자기추진 로타리 공구절삭에서의 칩의 삼각화 과정을 규명하는 이론적인 모델을 제안한 바 있다. 본 연구에서는 참고문헌(8)에 제시된 이론적인 모델의 타당성을 공작물의 절삭시 발생하는 AE(acoustic emission) 신호를 활용한 실험 결과로 입증하려는 것이 주목적이다.

2. AE 신호의 해석

AE(acoustic emission)는 고체의 내부에서 갑작스런 응력장의 국부적 변화에 의해 발생하는 낮은 출력과 높은 주파수 성분의 응력파로 정의된다. 이러한 종류의 응력파는 물질을 통하여 전파되어 천이적인(transient) 표면의 진동을 일으킨다. 이 때의 진동은 고체의 표면에 설치된 센서(대개는 piezoelectric 형의 transducer)에 의해 감지되어 전기적인 신호로 바뀌게 되는데 이것이 AE신호이다. AE는 기계적 실험에서 변형 또는 파괴의 미세한 메커니즘을 규명하는 도구로서 널리 이용되어 왔고 기계적 구조물의 결함을 감지해 내고 위치를 알아내기 위한 비파괴 검사의 한 방법으로서도 응용 범위를 넓혀가고 있다. 절삭 가공에 관하여는 Iwata와 Moriwaki⁽⁹⁾가 처음으로 금속절삭에서 점접촉 공구의 마모를 나타내는 척도로서 AE의 사용

가능성을 제안한 이래 절삭 가공의 해석이나 실시간 센서로서의 가능성에 대하여 많은 연구가 진행되어 온 바 있다.^(1,2,3)

AE를 절삭가공의 해석에 응용하는 경우, 공작물 내에서의 발생하는 미세한 소성변형 메커니즘에 대한 이해를 증진시키기 위해서는 측정된 AE 신호의 완벽한 해석이 필수라 할 수 있다. 그러나, AE를 절삭공정에 응용하는데 있어서의 가장 큰 문제점은 신호 자체가 불규칙한 성분을 많이 포함하고 있기 때문에 이를 수학적으로 해석하기가 매우 곤란하며 수학적인 모델의 설정도 대단히 어렵다는 점이다.^(1,2) 따라서, 대부분의 경우에 있어서 AE신호의 해석은 평균 에너지 레벨을 해석함으로써 이루어진다. 이는 AE신호에 의하여 나타나는 에너지 레벨은 곧 AE 원인이 되는 메커니즘에 의한 에너지 생성율과 직접적인 관련이 있다는 데 근거하고 있다. 한 예로, Kannatey-Ashibu와 Dornfeld는 AE신호와 절삭조건, 공작물의 재질 등을 관련지어주는 모델을 제안한 바 있다.⁽⁴⁾ 이 모델은 AE의 주요한 생성원인으로

(1) 주전단면에서의 전단변형

(2) 공구 경사면(tool rake face)에서의 칩과 공구의 마찰에 의한 2차적인 영향

(3) 공구 여유면(tool flank face)에서의 공구와 공작물간의 마찰에 의한 영향

(4) 기타 칩의 절단(breakage) 등에 의해 공구와 공작물에 가해지는 충격 등을 들고 있다. 그러나, 나중의 두가지 원인은 날카로운 공구를 사용하거나 연속적인 칩이 형성되도록 절삭조건 등을 변화시킴으로써 최소화 시킬 수 있으며 결국 처음의 두 가지 원인으로 한정시킬 수 있다. AE신호의 에너지 레벨을 측정하는 방법중 가장 간단한 것은 RMS 전압을 측정하는 것이 되는데 수치적으로는

$$AE_{RMS}^2 = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(T) dt \quad (1)$$

와 같이 나타낸다. 만일, 시간 간격 Δt 동안 발생하는 에너지의 양을 ΔE 로 나타내면 이는 AE신호의 에너지와 비례한다고 가정하고

$$\Delta E \propto AE_{RMS}^2 \Delta T \quad (2)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 우선 2차원 직각 절삭과 3차원 점접촉 절삭에 대한 AE 모델에 관하여 언급한 다음 이를 토대로 SPRT에 의한 절삭시 칩의 삼각화에 의한 AE 신호의 모델을

제안하기로 한다.

3. 2차원 절삭에서의 AE

Kannatey-Ashibu와 Dornfeld에 의하여 2차원 절삭공정에 관하여 제안된 AE 모델은 기본적으로 AE신호와 에너지 레벨은 유동 응력이나 변형되어지는 공작물의 부피, 그리고 소성 변형률과 같은 공작물의 물성에 의해 좌우된다는 가정에서 출발한다. 그리고, 절삭 공정중 소성변형을 위하여 가해지는 에너지의 양은 곧 AE발생의 원인이 된다고 가정한다. 즉, 절삭 가공에서의 일률은

$$\dot{W} = \int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dv \quad (3)$$

와 같이 나타나므로 이것이 소성변형에 의해 발생되는 AE신호의 에너지 레벨과 비례한다고 할 수 있다. 이제, 위에서 언급한 절삭가공중 4가지의 AE발생 원인중에서 처음의 두가지 원인만 고려하면 2차원 직각 절삭(orthogonal cutting)에서 발생하는 AE신호의 에너지 레벨은

$$AE_{RMS}^2 \propto \tau_s W_l V_w \left(\frac{\cos \alpha_n}{\sin \phi_n \cos(\phi_n - \alpha_n)} T_1 + \frac{1}{3} (1 + 2l) \frac{\sin \phi_n}{\cos(\phi_n - \alpha_n)} \right) \quad (4)$$

와 같이 쓸 수 있다.⁽¹⁾ 이때, τ_s , w_l , l , l_1 은 각각 공작물의 평균 전단 강도, 절삭 폭, 공구 경사면에서의 접촉지점(contact zone)에서의 접촉 마찰(sticking friction)과 미끄러짐 마찰(sliding friction) 영역의 길이이다. 따라서, AE신호의 에너지 레벨은 공작물의 유동 응력이나 전단변형을 경험하게 되는 공작물의 부피등의 함수로 나타낼 수 있게 된다.

4. 3차원 점접촉 절삭에서의 AE

3차원 점접촉 절삭의 경우에는 공구의 기하학적인 형상과 이로인한 칩형성과정의 변화 등으로 AE신호가 변형되며 복잡도가 더해지게 된다. 예를 들면, 공구의 날 끝이 곡면의 형상을 갖기 때문에 실제적인 절삭 작용이 주절삭날(main cutting edge)과 부절삭날(frontal cutting edge)에서 동시에 이루어지고 공구의 끝날이 공작물의 이송방향에 대하여 경사각, i_F 만큼 기울어져 있으므로 칩의 유동방

향이 더 이상 공구 끝날에 직각인 방향에 존재하지 않으며 칩의 절대유동각 만큼의 일정한 각도를 유지한다. 보통, 2차원 직각절삭에서는 최소에너지 원리에 근거하여 전단각도를 구할 수 있으나 3차원 절삭의 경우에는 칩의 유동각도가 또 하나의 변수가 되기 때문에 조건이 하나 더 필요하게 된다. 이제, 앞에서와 같이 절삭 에너지와 AE신호의 에너지 레벨간에 비례관계를 가정하면 3차원 점접촉 절삭에서의 AE RMS 레벨은

$$AE_{RMS}^2 \propto U = U_s + U_f = \frac{\cos \alpha_e \cdot s V_w A}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} + \frac{\sin \beta_e \cos \alpha_e \tau_s V_w Q}{\cos(\phi_e + \beta_e - \alpha_e) \cos(\phi_e - \alpha_e)} \quad (5)$$

와 같이 주어진다. 이때 A는 전단 평면의 면적이며 Q는 공구 속도 방향의 평면에 투영된 절삭면의 면적이고, A와 Q 모두 칩의 유동각 η_c , 유효전단각 ϕ_e , 유효 경사각 α_e , 그리고 공구 형상 등의 복잡한 함수 형태로 나타내진다. Usui 등은 이들을 유도하였는데 관심있는 독자는 참고문헌(9)를 참조하기 바란다. 이제, 절삭 실험으로부터 다음과 같은 절삭 형상이 구해지면

$$\phi_e = g(\alpha_e), \quad \beta_e = h(\alpha_e) \quad (6)$$

식(5)에서 총 절삭 에너지 또는 AE RMS 레벨을 계산해 낼 수 있다.

5. SPRT를 사용한 로타리 절삭에서의 AE

SPRT를 사용한 로타리 절삭에서 일반적인 칩(conventional chip)이 형성될 경우 칩형성과정은 2차원적이라고 할 수 있고 AE신호의 주된 발생원은 위에서 언급한 바와 같다. 그러나, 삼각형상을 갖는 칩이 형성될 경우에는 칩과 공구사이의 마찰이나 상대적인 미끄러짐이 거의 무시될 수 있으므로 위에서 언급된 AE신호의 발생원인중 주전단면에서의 소성변형이 가장 중요한 의미를 갖게 된다.^(5,6) 아울러 Fig. 2에 도시된 바와 같이 칩과 공구의 접촉이 끝나는 면에서(exit side) 칩의 파손(shear fracture)이 일어나게 되므로 이것도 주요한 AE신호의 발생원이 된다. 이때, 칩형성과 연관된 모든 파라미터들이 절삭날(cutting edge)을 따라서만 변하게 되며 2차원의 슬립라인 이론(slip line field

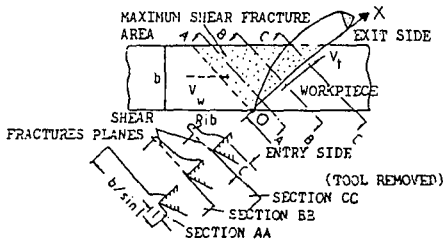


Fig. 2 Variation of chip geometry along the cutting edge for triangular chip formation⁽⁵⁾

theory)을 적용시킬 수 있다. Venuvinod^(5,6) 등에 의하면 칩과 공구의 초기 마찰면(entry side)으로부터 공구 절삭면을 따라 임의의 거리 x 만큼 떨어진 지점에서의 전단 각도(shear angle)와 접촉 면적(tool-chip contact length)간의 관계식을 체적 보존의 원리를 적용하여 유도할 수 있으며⁽²⁾:

$$\frac{T_1 x \cos i_F}{\sin i_F} = \frac{C(x)^2}{2} (1 + \phi(x)) \quad (7)$$

$$C(x) = t_1 \cos \alpha_n (\cos \alpha_n - \cos(\phi_n(x) + \alpha_n)) \sin(\phi_n(x) + \alpha_n)^{-1} \quad (8)$$

와 같이 주어진다. 이 때, $\phi_n(x)$ 는 절삭면을 따라 변하므로 절삭날을 따른 전체 절삭폭(cutting width)에 대하여 평균값을 취하면 주전단면에서의 소성변형에 의한 AE 신호의 에너지 레벨은 V_0 가 주전단면의 체적일 때

$$AE_{RMS}^2 \propto \frac{1}{X} \int_0^X \frac{\cos \alpha_n}{\sin \phi_n(x) \cos(\phi_n(x) - \alpha_n)} dx \quad (9)$$

와 같이 주어진다. 식(8)에서 $\phi_n(x)$ 는 식(7)과 식(8)을 연립하여 풀면 구할 수 있다. 이제, 칩의 파손에 의한 영향을 고려하기 위하여 다음과 같은 AE신호와 파손 과정간의 실험적인 관계를 이용한다.

$$AE_{RMS} \propto f(t_1, V_w, i_F, \alpha_n) \quad (10)$$

여기서, 함수 f 는 공작물의 물성(material property)에 영향을 받는다. 예를 들면, Moriwaki⁽¹⁰⁾와 Diei⁽¹¹⁾는 절삭 공정중 공구의 파손에 의하여 발생하는 AE신호 진폭의 제곱은 파손된 부분의 면적과 해당 절삭력 성분의 크기에 각각 비례한다고 보고하였다. 특히 Moriwaki는 동적파손실험(dynamic fracture test)의 결과로부터 AE 신호의 진폭은 접촉속도(loading speed)에 무관하다는 것을 입증하였다. 로타리 절삭에서 칩의 삼각화에 의한 파손

은 대략 연속적으로 발생하므로 식(10)과 같은 관계가 적용된다고 보아도 무방하다. 그리고, 절삭공정에 있어서 절삭력 성분이 절삭 깊이에 비례한다는 사실은 많은 실험 결과를 통하여 알려진 사실이므로 i_F, V_w, α_n 등이 일정하게 유지될 때 식(10)은

$$f(t_1, V_w, i_F, \alpha) = f(t_1) \propto t_1 \quad (11)$$

와 같이 쓰일 수 있으며 이를 식(9)와 합치면

$$AE_{RMS}^2 = \frac{C_1}{X} \int_0^X \frac{\cos \alpha_n}{\sin \phi_n(x) \cos(\phi_n(x) - \alpha_n)} dx + C_2 t_1^2 + C_3 \quad (12)$$

이 된다. 여기서 $C_i (i=1, 2, 3)$ 는 비례상수이다.

6. 실험

Fig. 3에 도시된 것과 같은 실험장치를 이용하여 저속 절삭실험이 행하여 졌다. 실험에 사용된 로타리 공구는 M2 재질의 고속도강으로 만들어 졌으며 $H_{RC} 65$ 의 강도를 갖고 공구 직경은 40 mm로 Bridgeport 밀링머신에 접속되어 사용되었다. 이 때 공구는 자유로이 축을 따라 회전하기도 하고 고정된 상태로 사용될 수 있도록 조정되었는데 전자는 SSRT의 경우이며 후자는 대략적으로 3차원 절삭(oblique cutting)이라고 볼 수 있다. 이 때의 공구 경사각도는 Fig. 3에 보여지는 식에 의하여 계산되었다. 또, 경사각이 0°일 때는 2차원 직각절삭의 경우가 된다. 공작물은 밀링머신의 테이블 위에 바이스를 사용하여 고정되었다. 실험에 사용된 AE

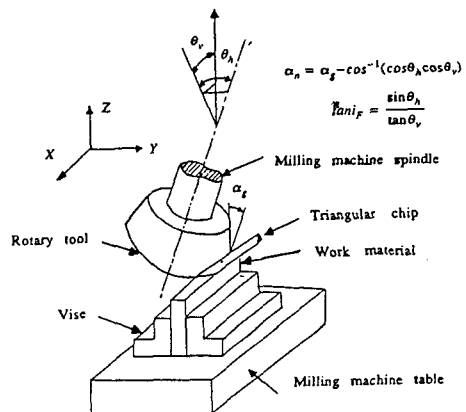


Fig. 3 Low speed self-propelled rotary cutting experiment setup

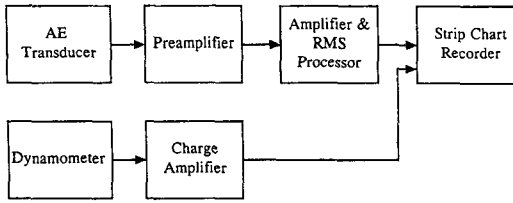


Fig. 4 Data acquisition setup

센서는 Dunegan/Endevco model D9201A로서 공구 고정대 위에 설치되어 사용되었으며 센서 신호는 AET model 404 RMS/TMS pre-processor를 통과한 뒤 strip chart recorder에 기록되었다. 또한, 절삭 에너지의 계산을 위한 절삭력 성분도 Kistler Dynamometer를 사용하여 측정하였다. 이들 데이터의 수집 및 신호처리 과정이 Fig. 4에 도시되어 있다. 일반적인 칩이 생성되었을 경우 직각 전단각도는 마이크로미터(micrometer)를 사용하여 칩의 두께를 측정함으로써 얻어졌다.

7. 실험결과 및 토의

본 연구에서 사용된 공작물은 Table 1에 요약된 바와 같이 서로 다른 절삭폭 w_1 을 갖는다. 본 연구에서는 AE신호의 전압 레벨의 수치 그 자체보다는 이들이 각종 절삭 조건과 공작물의 물성에 따라 변화하는 경향이 관심사이므로 측정된 AE 신호의 전압은 해당 절삭조건이 수치적으로 최소(algebraically minimum)일 때 얻어진 값을 사용하여 정규화(normalization)되었고 첨자 “o”를 사용하여

표시되었다. 예를 들면, 절삭속도에 대한 AE RMS 신호의 변화는 절삭 속도가 최소일 때 얻어지는 AE RMS 값을 각각의 공작물에 대하여 얻은 다음 이들을 사용하여 정규화 되었다. 실험중 주변 잡음의 영향은 실제 AE 신호에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작았으며 따라서 더 이상 고려되지 않는다. 본 연구에서 행해진 저속 절삭 실험에서는 칩의 segmentation, 파손, 찢어짐 등은 발생하지 않았으나 경우에 따라 칩의 표면에 crack이 발생하였으며 이의 영향으로 상당한 양의 AE 에너지가 발생하였다. 이에 대하여는 다시 자세히 설명하기로 한다.

Fig. 5는 식(12)에 의하여 이론적으로 계산된 AE_{RMS} 와 실험적으로 얻어진 결과치를 비교하고 있다. 이 때 식(12)에서 쓰여지는 상수 $C_i(i=1, 2, 3)$ 는 각각의 절삭 깊이에 대하여 얻어진 실험치를 식(12)에 일치시킴으로써(curve fitting) 얻어졌다. 즉, 식(7)과 (8)로부터 $\phi_n(x)$ 를 계산하면 식(12)의 첫번째 항의 적분 값을 계산할 수 있으며, 두번째 항의 t_1 은 절삭조건으로 주어지므로 실험에서 얻어지는 AE_{rms} 값과 식(12)를 $C_i(i=1, 2, 3)$ 에 대하여 연립하여 풀면 이들의 값을 구할 수 있다. Fig. 5가 보여주는 결과는 식(11)에서 함수 f 가 절삭깊이 t_1 의 선형적인 함수라는 가정을 뒷받침 해주고 있으며 AE 신호의 해석을 통한 삼각화 과정의 규명이 타당함을 의미하기도 한다.

7.1 절삭속도

Fig. 6(a)는 정규화된 AE RMS값과 절삭 속도와 의 관계를 SPRT에 의하여 일반적인 칩이 생성되

Table 1 Cutting conditions as shown in Fig. 7. Depth of cut=0.076 mm. CD, cold drawn ; AN, Annealed ; R, rectangular chip ; PT, partially triangular chip ; T, triangular chip ; l, cutting length

	A	B	C	D	E	F	G
Work Material	A12014-T6	A16070-T6	A12024-T4	Cu, CD	A16061-T6	Al1100	Cu, AN
S_y , MPa	239	203	187	158	159	59	39
S_u , MPa	290	234	283	197	207	62	128
R	1.21	1.15	1.51	1.25	1.30	1.05	3.28
w_1 , mm	6.35	6.35	3.175	3.175	6.35	3.175	3.175
l , mm	45.7	45.7	45.7	45.7	45.7	45.7	45.7
$\alpha_n = -10$	R	R	T	PT	T	T	T
$\alpha_n = 0$	R	R	PT	PT	PT	PT	T
$\alpha_n = 10$	R	R	R	PT	R	T	R

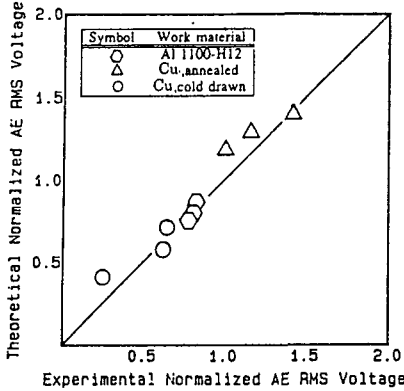


Fig. 5 Comparison of the theoretical normalized AE RMS voltage calculated from Eq.(12) with the experimental values. Cutting conditions are as shown in Figure 7. Depth of cut, 0.05-0.1 mm

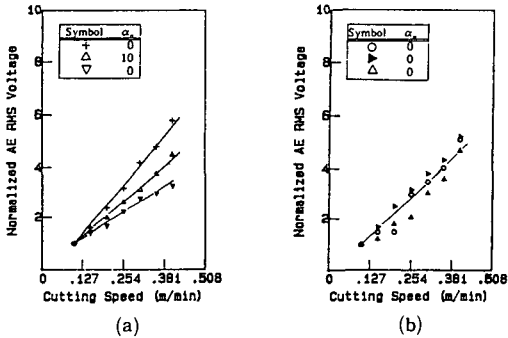


Fig. 6 $(AE_{RMS})_o$ vs. cutting speed when a conventional chip is produced, (a), and a triangular chip is produced, (b), with SPRT. Symbols and cutting conditions are as shown in Figure 7. Depth of cut=0.075 mm

있을 경우에 대하여 보여준다. 선형적으로 증가하는 경향은 Kannatey-Asibu⁽¹⁾와 Teti⁽²⁾에 의해 보고된 결과와 일치한다. 이 경우 AE RMS 레벨이 증가하는 정도 즉, 기울기는 공작물에 따라 현저히 차이가 남을 보여주고 있다. 일반적으로, 절삭 속도에 대한 AE 신호의 높은 감도는 주전단면에서의 전단변형률(strain rate)과 공구의 절삭면(rake face)에서의 공구와 칩의 상대속도 등에 영향을 받는다. 즉, 절삭 속도의 변화는 이들의 변화를 유발하며 이들의 영향은 상호 연관되어 작용하게 된다. 그러나, Fig. 6(b)에서도 나타나듯이 칩의 삼각화가 발생하면 여러 공작물의 절삭으로부터 얻어지는 모든 데이터가 단 하나의 직선주위에 나타난다는

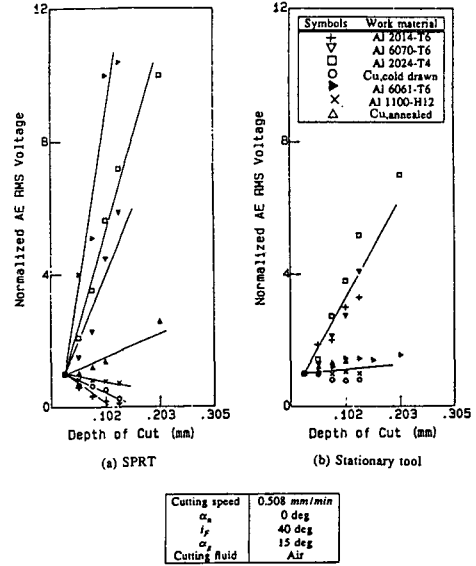


Fig. 7 $(AE_{RMS})_o$ vs. depth of cut.

점이 흥미롭다. 이와 같이 칩의 삼각화에 의한 AE 신호가 공작물에 무관한 것은 곧 삼각화가 발생하면 칩의 형상은 공작물과 무관하다는 사실을 입증하여 주고 있다. 왜냐하면, 칩의 삼각화에 있어서 공구와 칩사이의 마찰은 거의 무시되므로 주전단면에서의 전단 변형만이 주된 AE 신호의 원인이 되게 된다. 이제 Venuvinod⁽⁵⁾의 실험 결과에 의하면 칩의 삼각화가 발생하면 공구와 칩의 접촉 길이는 공작물에 관계없이 일정하므로 본 연구로부터 얻어지는 실험결과와 일치한다고 볼 수 있다. 또한, 이는 최기홍 등⁽⁸⁾에 의해 제안된 모델에서 예견된 바 이기도 하다.

7.2 절삭 깊이

절삭 깊이를 변화시켰을 경우에 얻어지는 실험 결과들이 Fig. 7에 도시되어 있다. 일반적으로, 3차원 점점축 절삭(single point cutting)의 경우 AE 신호의 에너지 레벨은 절삭 깊이의 변화에 민감하지만 주파수 성분은 비교적 덜 민감한 것으로 알려져 있다.⁽²⁾ 일반적인 2차원 절삭이나 3차원 절삭의 경우에는 절삭 깊이의 변화가 절삭 형상(cutting geometry)의 변화에 별 영향을 끼치지 못하기 때문에 AE 신호의 감도는 전적으로 주 또는 부전단면에서의 변형 면적의 증가에 기인하게 되고 공작물에 무관하게 된다. 그러나, 공작물에 따라서

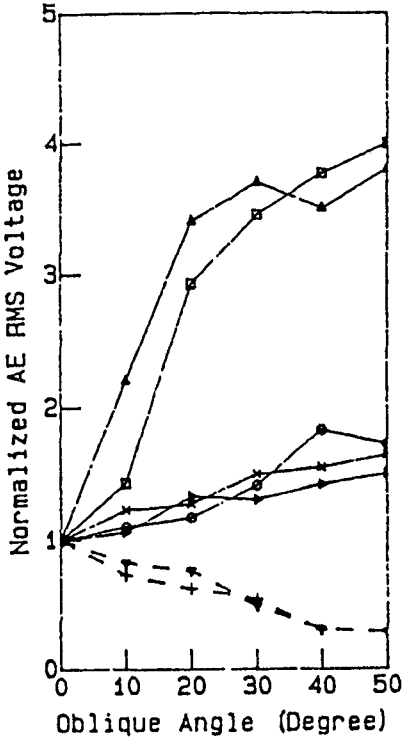


Fig. 8 Effect of i_F on $(AE_{RMS})_o$ for various work materials. Symbols and cutting conditions are as shown in Figure 7. Depth of cut=0.075 mm

는 Fig. 8에 나타나듯이 절삭 깊이의 변화에 대해서 대단히 낮은 감도를 보였다. 이들 공작물이 SPRT에 의해 절삭될 경우 삼각형의 칩을 생성시키는 것이 관측되었다. 일부 공작물은 절삭 깊이가 증가함에 따라 AE 신호의 레벨이 오히려 감소하는 경향을 보여 주었는데 이들은 모든 경우에 있어서 일반적인 칩을 형성하였다.

7.3 공구 경사각, i_F

Fig. 8은 공구의 수직경사각 α_n 가 0° 일때 SPRT에 의한 절삭시 AE_{RMS}^2 의 공구 경사각에 대한 변화를 보여주고 있다. 일반적인 칩이 형성되었을 경우에는 점선으로 표시되어 있고 삼각형상의 칩이 형성되었을 때는 직선으로 표시되어 있다. 칩의 삼각화가 이루어지면 AE RMS 레벨은 공구 경사각이 증가함에 따라 함께 증가하나 충분히 큰 공구 경사각(예를 들면, $i_F=40^\circ$ 전후)에 대하여는 포화되는 경향을 실험에 사용된 모든 공작물에 대하여 똑같이 보여준다. 이는 다시 한번 칩의 삼각화가 발생

하면 $i_F \geq 40^\circ$ 인 경우 칩의 기하학적 형상이 공작물이나 공구 경사각과 무관하다는 사실을 나타낸다. 또한, 칩의 삼각화에 있어서 칩과 공구의 절삭면(rake face)사이의 접촉길이가 경사각과 무관하다는 의미도 된다. 그러나, 일반적인 칩이 생성되는 경우 AE RMS 레벨은 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 이 경우에는 공구 절삭날(cutting edge)을 따른 공구와 칩의 상대적인 유동이 없으므로 칩형성과정이 2차원적이고 경사각의 증가는 즉 $(V_w)_n = V_w \cos i_F$ 로부터 절삭속도의 감소를 의미한다. 따라서, AE 신호의 절삭 속도에 대한 감도가 영향을 미치게 되는 것으로 판단된다. 그러나, SPRT를 사용하는 모든 경우에 있어서 AE RMS 레벨로부터 절삭조건과 가공 프로세스간의 상호연관 관계를 규정짓기는 어렵다고 보여진다.

절삭력 성분의 측정으로부터 계산된 절삭에너지의 변화는 Fig. 9에 SPRT 절삭에 대하여 보여지고 있다. AE 신호의 레벨과 마찬가지로 공작물에

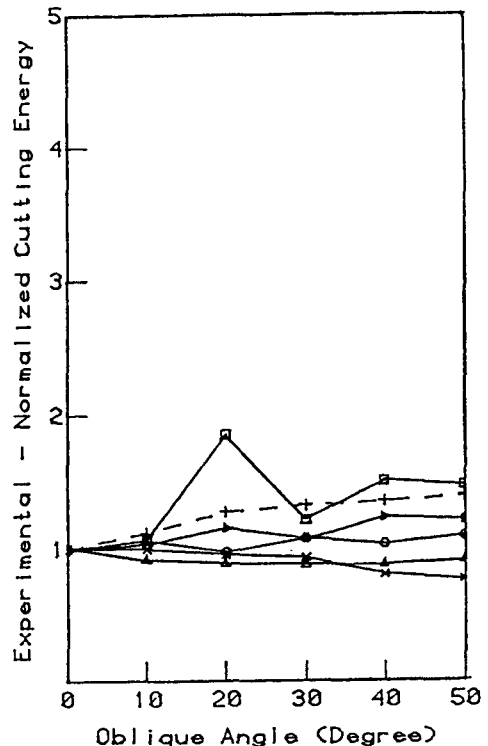


Fig. 9 Variation of the total cutting energy U calculated from the measurements of cutting force F_c^z with i_F . Symbols and cutting conditions are as shown in Figure 7. Depth of cut=0.076 mm

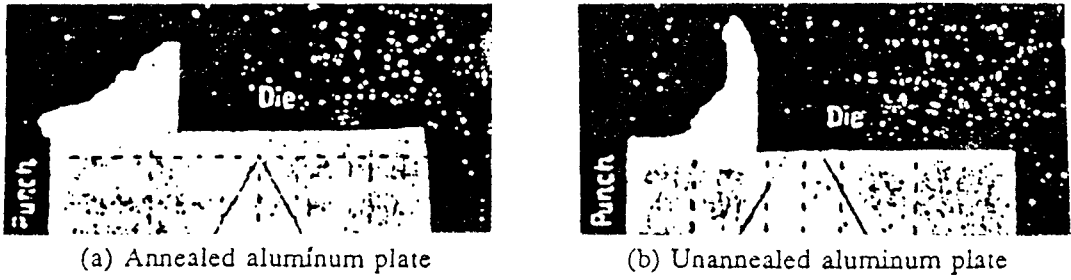


Fig. 10 Influence of temper condition on the shaving deformation process, $\alpha_n=0^{(12)}$

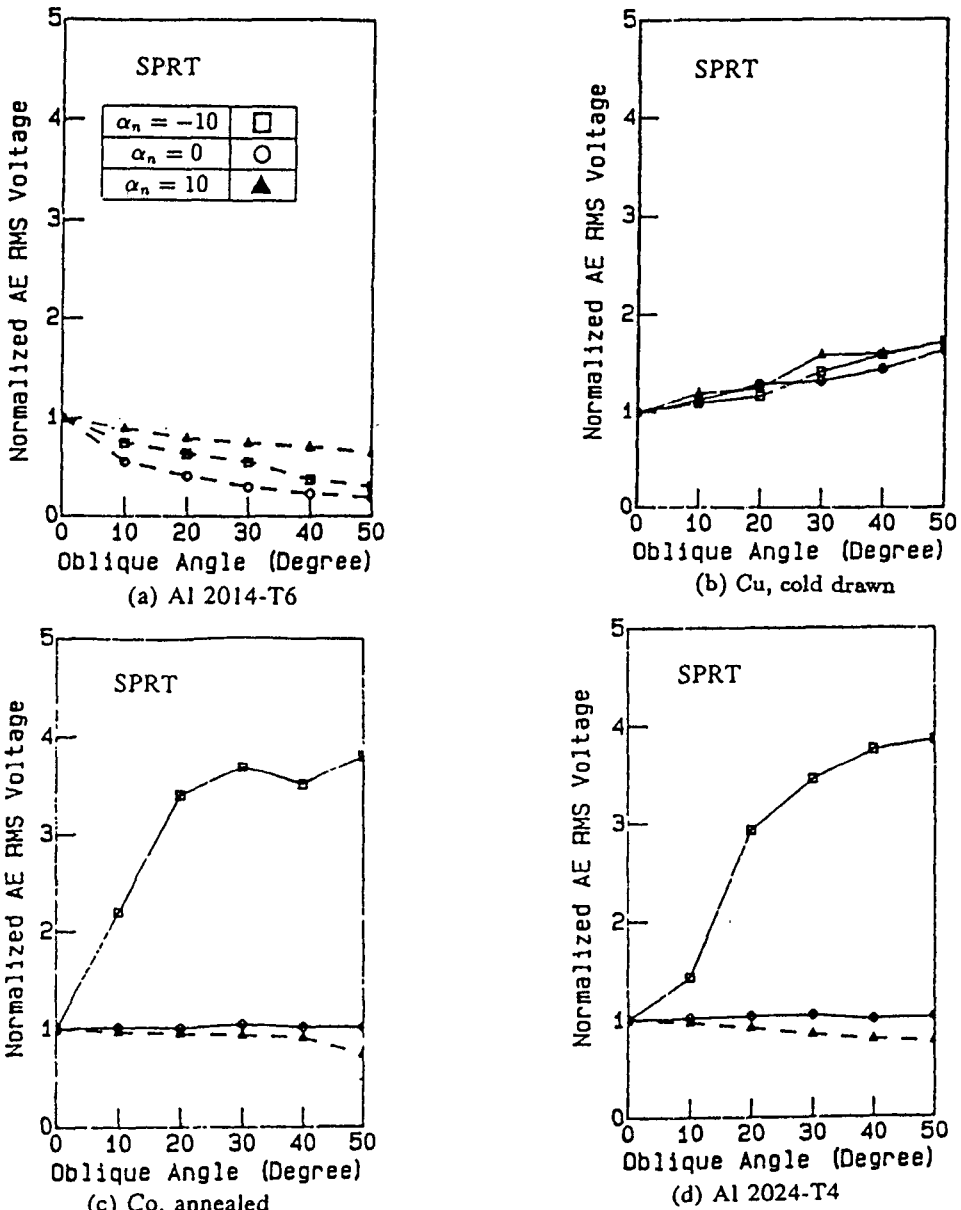


Fig. 11 Effects of α_n on $(AE_{RMS})_o$. Cutting conditions are as shown in Figure 7. Depth of cut=0.075 mm

대한 변화는 보이지 않고 모든 경사각에 대하여도 대략 일정한 값을 나타낸다. 그러나, 최기홍 등⁽⁸⁾에 의해 보고된 바와 같이 절삭력 성분이 칩의 삼각화 과정중에 일반적인 칩 형성시 보다 반드시 커지지만 오히려 작게 나타나는 경우도 있다. 즉, 절삭력 성분과 칩의 삼각화와의 상관관계 (correlation)는 극히 제한된 범위 내에서만 성립한다고 볼 수 있다.

7.4 공작물의 물성 및 수직 경사각, α_n

본 연구에서 얻어진 한가지 흥미로운 사실은 특정 공작물에 대하여 AE 신호의 공구 경사각에 대한 변화는 SPRT나 일반적인 3차원 절삭 모두에 대하여 거의 유사하다는 사실이다. 이는 AE 신호의 변화는 사용되어지는 공구보다는 공작물 자체에 더 영향을 받는다는 사실을 나타내고 있다. 그렇다면, SPRT에 의한 칩의 삼각화도 공작물의 물성에 좌우될 것이다. Fig. 10은 Masuda⁽¹²⁾ 등의 실험결과로서 템퍼링 조건(temper condition)과 셰이빙 공정(shaving process)에서 칩의 형성과정의 연관 관계를 설명해 주고 있다. 아닐링(annealing)된 알루미늄 판의 경우에는 칩이 천이과정을 유지하면서 삼각 형상을 갖게 되지만 아닐링 되지 않은 알루미늄판의 경우에는 유동형태의 정상적인 일반 칩이 형성된다. 템퍼링(tempering) 작업의 직접적인 결과는 공작물의 항복 응력이 낮아지고 변형경화특성(strain hardening characteristic)이 바뀐다는 것이다. 따라서, 좀 더 연성의 재질일 가진(ductile) 공작물이 경성의 공작물보다 삼각형상의 칩을 생성할 가능성이 높다.

다음에는 Fig. 11에 수직 경사각을 변화시켰을 때의 결과를 도시하였다. A12024-T6는 모든 경사각에 대하여 삼각화 현상을 나타내지 않았고 따라서 경사각에 대하여 감소하는 경향을 보인다. Cu (cold drawn)는 AE 신호의 변화가 거의 없는데 실험에서는 모든 공구 경사각에 대하여 부분적인 또는 완전한 삼각형상의 칩이 형성 되었다. 이 공작물의 강도의 비는 1에 가깝고 이 경우에는 공구 경사각의 영향이 미미하다고 볼 수 있다. 그러나, Cu(annealed)의 경우에는 강도비가 3.28이고 수직 경사각이 -10° 에서 10° 까지 변할 때 각각 삼각칩과 일반적인 칩을 생성시킨다. 이와 같은 결과로부터 공작물의 변형도 경화에 의한 영향은 수직 경사각에 의한 영향과 상호연관되어 있다고 결론지을

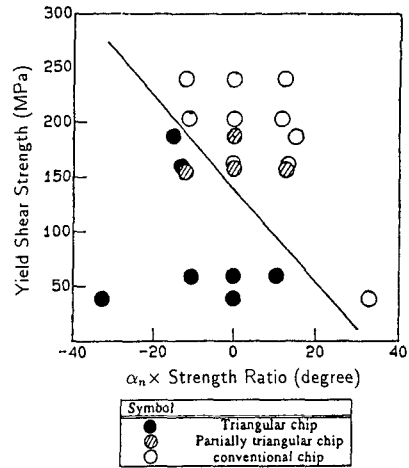


Fig. 12 Effects of work material properties and normal rake angle on triangulation. Cutting conditions are as shown in Figure 7. Depth of cut = 0.076 mm

수 있고 Fig. 12에 그 관계가 도시되어 있다. 예상할 수 있는 바와 같이 그림 왼쪽 아래부분에 해당되는 조건을 만족하는 경우 삼각칩이 생성된다. 이때, 한가지 주목해야 할 점은 참고문헌(8)에서도 언급된 바와 같이 annealed copper나 Al1100은 대단히 연성이 큰 공작물로서 사각형 절단면을 갖는 일반적인 칩 형성은 천이적인 과정에 머물러 있을 수 있다는 점이다. 즉, 천이적인 칩의 형성 과정이 공작물과 공구의 접촉으로 발생하는 초기 불안정한 상태에서부터 정상 상태의 칩 형성이 이루어지기까지를 일컫는다면 정상적인 칩이 형성되는 경우에는 천이 과정이 짧으며 삼각화의 경우는 칩 형성 과정이 미처 초기의 불안정한 상태를 벗어나기도 전에 또는 정상 상태로의 천이 과정 도중에 칩과 공구의 접촉이 끝나므로 칩의 단면이 마치 일반적인 칩과 유사하거나 부분적으로 삼각 형상을 갖게 된다. (Fig. 2 참조) Table 1에는 이와 같은 점을 설명하기 위하여 본 연구에서 쓰인 각종 공작물의 물성과 칩의 종류를 요약하여 놓았다.

마지막으로 A12024-T4에 대하여는 수직 경사각이 -10° 일때 AE RMS 레벨이 경사각에 대하여 급격히 증가하는데 이것은 칩에 형성되는 균열(crack)의 영향이다. 이와 같은 균열을 절삭중 불연속적으로 발생하였으며 균열의 발생은 칩의 절대 유동각도의 변화를 유발하는 것이 관찰되었다.

Fig. 12와 연관지어 보면 이와 같은 균열의 발생은 삼각칩 형성과정에서 일반적인 칩의 형성 과정으로 옮겨가는 경계적인 조건하에서 발생한다고 볼 수 있다.

8. 결 론

본 연구에서 행해진 저속 절삭 실험중 AE 신호를 관찰함으로써 얻어진 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 내리 수 있다.

(1) SPRT에 의한 절삭의 경우, 절삭조건과 공작물의 물성에 따라 완전한 삼각칩, 부분적인 삼각칩, 그리고 일반적인 칩이 생성될 수 있다.

(2) SPRT를 사용한 절삭시 절삭 깊이의 영향은 공작물에 따라 상당한 차이를 보여주는데 3차원 절삭시에는 크게 두 그룹으로 나뉜다.

(3) 삼각칩이 발생할 경우, 칩의 형상은 공작물의 종류와 거의 무관하였다. 이는 다른 여러 실험 결과와도 일치한다.

(4) 공구 경사각도의 변화에 대하여 AE RMS 레벨은 두가지의 상반된 경향을 나타낸다. 즉, 삼각화가 발생하면 증가하고 일반적인 칩이 생성되면 감소한다. 증가하는 경우라도 경사각이 충분히 크면 포화되는데 삼각칩의 형상이 경사각과 무관하다는 실험적인 사실과도 잘 일치한다.

(5) 공작물의 변형도 경화 특성은 공구 경사각과 상호 작용하여 칩의 삼각화에 영향을 미친다.

(6) 수직 경사각의 AE신호에 대한 영향은 일반적인 칩 형성과정 보다는 삼각칩의 형성과정중에 더 뚜렷이 나타난다.

(7) 연성의 공작물로부터 일반적인 칩이 생성되는 경우에도 수직 경사각의 크기에 따라 칩 형성 과정이 천이적인 상태에 머무를 수 있다.

(8) 공작물의 연성과 절삭조건 등에 따라 crack이 칩이 표면에 형성될 수 있다. 이 때는, 높은 에너지 레벨의 AE 신호가 발생된다.

참고문헌

(1) Kannetay-Ashibu Jr., Elijah. and Dornfeld, D., 1981, "Quantitative Relationship for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting," J.

Engr. for Ind., ASME, Vol. 103, pp. 330~340.
 (2) Teti, R. and Dornfeld, D., 1989, "Modeling and Experimental Analysis of Acoustic Emission from Metal Cutting," J. Engr. for Ind., ASME, Vol. 111, pp. 229~237.
 (3) Iwata, K. and Moriwaki, T., 1977, "An Application of Acoustic Emission to In-Process Sensing of Tool Wear," Annals of CIRP, Vol. 26, No. 1, pp. 21~26.
 (4) Ono, K., 1979, "Acoustic Emission Arising from Plastic Deformation and Fracture," K. Ono, Ed., UCLA, pp. 168~207.
 (5) Venuvinod, P.K. and Reddy, P. N., 1981, "Some Studies on Cutting with Self-Propelled Rotary Tools," ASME Paper No. 81-WA/Prod-16.
 (6) Venuvinod, P.K., 1970, "Analysis of Rotary Cutting Tool," Ph. D. Thesis, University of Manchester, Manchester.
 (7) Choi, Gi Heung, 1988, "Detection of Cutting Tool Wear Using the Concept of Cross Entropy," Research Report, Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley.
 (8) 최기홍, 최기상, 1993, "자기추진 로타리 공구를 사용한 절삭에서 천이 칩의 형성에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제17권, 제 5호, pp. 1041~1053.
 (9) Usui, E., Hirota, A. and Masuko, M., 1978, "Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process," J. Engr. for Ind. ASME, Vol. 100, pp. 223~228.
 (10) Moriwaki, T., 1980, "Detection of Cutting Tool Fracture by Acoustic Emission Measurement," Annals of CIRP, Vol. 29, pp. 35~40.
 (11) Diei, E., 1985, "Investigation of Milling Process using Acoustic Emission Signal Analysis," Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley.
 (12) Masuda, M., Jimma, J. and Yamamuchi, S., 1966, "Research on Shaving Mechanism of Sheet Metals with Punch and Die," Bulletin of JSME, Vol. 9, pp. 224~232.