

3-D 칩 만곡의 굽힘응력에 관한 연구

윤주식*, 김우순, 김경우(원광대 대학원 기계공학과), 김동현(원광대 기계공학과)

A Study of Bending Stress for the 3-D Chip Curl

J. S. Yoon, W. S. Kim, K. W. Kim(Mech. Eng. Dept., WKU), D. H. Kim(Mech. Eng. Dept., WKU)

ABSTRACT

Once the Chip has developed a mixed mode of side-curl and up-curl, it would generally curl to strike the tool flank. The development of the bending stresses and shear in the chip would ultimately lead to chip failure. This paper attacks this problem from a mechanics-based approach, by treating the chip as a 3-D elastic curved beam, and applying appropriate constraints and forces. The expressions for bending, shear and direct stresses are developed through an energy-based criterion. The location of the maximum stresses is also identified and explained for simulated test conditions.

Key Words : chip curl(칩 만곡), side-curl(측면 만곡), up-curl(상향 만곡), bending stress(굽힘응력)

1. 서론

금속의 기계적 가공은 모든 가공과정에서 크고 중요한 부분을 차지하고 있다. 기계가공작업은 자동화 산업, 우주산업, 방위산업과 다른 공업상의 주 가공분야에서 매우 중요한 비중을 차지하고 있다.

칩 제어는 미래의 무인 자동 기계장치와 무인 제어에 기여할 것으로 생각되며, 칩 제어는 전통적으로 공업계와 학계에서 금속절삭의 중요한 부분으로 취급하고 있다. 그러나, 아직도 칩 제어는 금속의 기계가공에 있어 복잡하고 연구할 많은 부분이 남아 있는 실정이다.

현재의 미비한 칩 절단에 의한 칩 제어의 연구는 절삭공구의 교체와 기계의 가동 중지 시간에 의한 기계가공의 생산성과 비용에 부정적인 영향을 미치고 있는 실정이다. 이는 불완전한 칩의 형태가 작업자의 안전을 위협하고, 제품 표면의 품질을 악화시키며, 절삭공구나 공작기계에 위해하고 칩 처리성을 저해시키기 때문이다.

칩 제어 연구의 현재 연구동향은 칩 형상과 절단 과정의 기초에 대한 학문적인 연구를 위하여 칩 유동, 만곡과 절단 과정을 이용하여 연구를 진행하고

있다.

Nakayama⁽¹⁾는 일찍이 2차원 칩 만곡과 절단에 관한 기초 연구를 확립하였으며, 장애불형 칩브레이커의 칩 만곡 연구를 통해서 칩 브레이커에 의한 굽힘 모멘트 작용에 기인하여 절단 평면에서 칩의 만곡이 발생한다는 것을 발견했다. Cook 등⁽²⁾은 2차원 상향 만곡 칩에서 칩 만곡 메카니즘과 그에 따른 표면거칠기와 공구마모에 관해서 연구했다. Spaans⁽³⁾은 3차원 칩 만곡과 칩 절단 현상을 폭 넓게 연구했다

본 연구는 3차원 칩 만곡 모델의 구조적 발전 가능성에 대해, 그리고 칩 모델은 응력과 변형에 대해 분석되었다.

2. 나선형 칩(Spiral Chip)의 해석적 모델링

2.1 기하학적 모델링

측면만곡과 상향만곡이 조합된 모드의 칩의 실제 축을 이용하여 3차원 나선형 칩을 모델링한다. 이상화된 나선형 칩의 기하학적 모델링은 칩 만곡반경의 지속적인 변화와 고정된 중심선에서의 지속적인 중심점의 움직임을 고려하여 이를 수 있다.

- 본 연구에서 사용한 모델의 가정은 다음과 같다.
1. 칩은 완전 탄성이다.
 2. 칩 단면의 모양은 사각형이다.
 3. 칩의 자유단은 여유면에서 공구에 접한다.

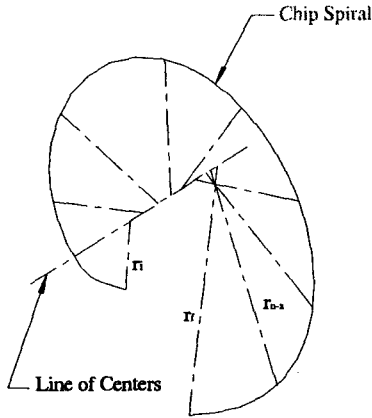


Fig.1 Schematic Diagram of the Chip Spiral Showing Moving Center and a Varying Curl Radius

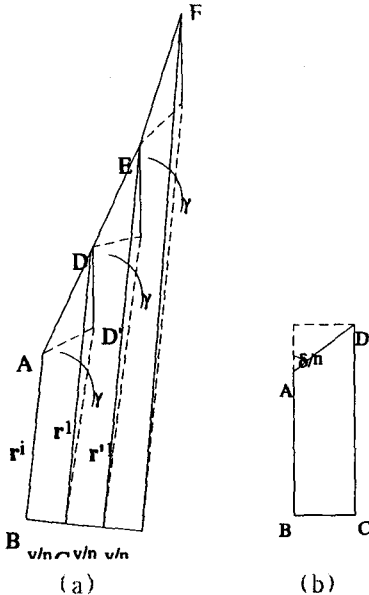


Fig.2 Modeling the Geometry of the Chip Spiral
(a) Linearization of the Curve
(b) Projected Surface

Fig. 2(a)는 나선형 칩의 세그먼트를 반경 r_0, r_1, r_2 로 나타낸 것이다. 첫 번째 세그먼트에서 점 A, B, C는 하나의 면을 이루고 점 D는 면의 밖에 있다. 점 D는 A, B, C가 포함되어 있는 면에서 점 E'으로 투영시켰다. Fig. 2(b)는 세그먼트 ABCD'

의 투영을 보여준다. 나선형에서의 비틀림은 나선형의 한번의 완전한 회전에 따라서 일정하다고 가정하고, 세그먼트에서의 비틀림은 $\frac{\delta}{n}$ 에 의해 주어진다.

Figure. 2에서 점 A와 D'의 수직거리는 다음과 같다.

$$P = \frac{y}{n} \cot\left(\frac{\delta}{n}\right)$$

나선형 칩의 축에 대한 최종반경 r_f 는

$$r_f = \frac{r_i(1 - \cos \gamma) + (y/n) \cot(\delta/n) [1 - \cos^{n-1} \gamma]}{\cos^n \gamma (1 - \cos \gamma)}$$

그러므로, δ 는

$$\delta = n \tan^{-1} \left[\left(\frac{y}{n} \right) \frac{[1 - \cos^{n-1} \gamma]}{[r_f \cos^n \gamma - r_i](1 - \cos \gamma)} \right]$$

세그먼트의 번호 k는 임의의 각 θ 와 2π 에 의해 분할된 n에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k = \frac{n\theta}{2\pi}$$

각 θ 에 대응하는 r_θ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_\theta = r_k = \frac{r_i}{\cos^k \gamma} + \left[\frac{r_f \cos^n \gamma - r_i}{1 - \cos^{n-1} \gamma} \right] \left[\frac{1 - \cos^{k-1} \gamma}{\cos^k \gamma} \right]$$

선택된 단면까지의 전체 칩 만곡 ξ 는

$$\xi_\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_k}{r_\theta} \right) \text{이다.}$$

2.2 작용력의 모델링

Fig. 3은 전형적인 3차원 칩을 기하학적인 공간도를 나타낸 것이다.

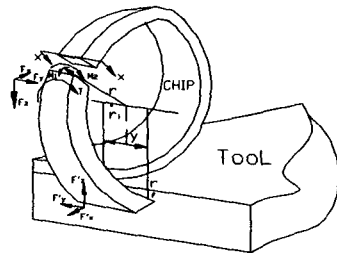


Fig.3 3-D Chip Showing Development of Reaction Forces and Moments at any Arbitrary Section

Fig. 4는 나선형 칩의 임의의 단면에서 작용력과 모멘트에 대해서 자유물체도를 나타낸 것이다.

Fig. 4에서

$$x = -r_\theta \sin \theta$$

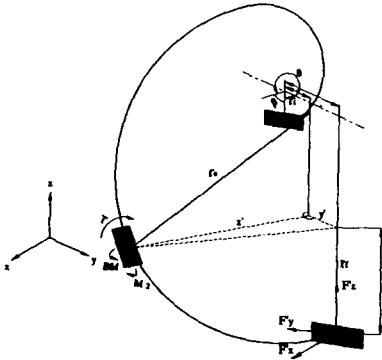


Fig.4 Reaction Forces and Moments at any Section of the Chip Spiral

$$y = y(1 - k/n)$$

$$z = r_f - r_0 \cos \theta$$

칩 in-plane에서 총 굽힘 모멘트는 다음과 같다.

$$F'_x(r_0 \cos \theta - r_f) - F'_z(r_0 \sin \theta)$$

칩 out-of-plane에서 총 굽힘 모멘트는 다음과 같다.

$$F'_x \cdot y(k/n - 1) - F'_y(r_0 \sin \theta)$$

총 토오크는 다음과 같다.

$$F'_z \cdot y(1 - k/n) - F'_y(r_f - r_0 \cos \theta)$$

2.3 비틀림

토오크는 칩에서의 전단응력을 발생한다. 전단응력은 에너지로 구할 수 있다.

사각형 단면을 갖는 바의 비틀림에 대해 바의 외측면은 수축에 의한 영향이 없고 물체력은 고려하지 않는다. 또한 비틀림의 단위 각 α 은 미리 정해져 있다고 가정한다.

바의 전체 포텐셜에너지는 다음과 같다.

$$\pi_s = \frac{L G \alpha^2}{2} \int_A \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial y} + x \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} - y \right)^2 \right] = \frac{L T \alpha}{2}$$

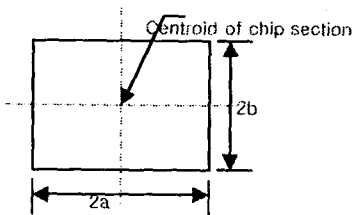


Fig.5 A Schematic Diagram Showing Chip Cross Section

전단응력은

$$(\tau_{yz})_P = \frac{G \alpha}{2} (1 + A_1 + \overline{A_2} x^2 + 3 \overline{A_3} y^2) x$$

$$(\tau_{zx})_P = \frac{G \alpha}{2} (-1 + A_1 + \overline{A_2} x^2 + 3 \overline{A_3} y^2) y$$

비틀림 상수 $J = T/G\alpha$ 이므로

$$(\tau_{yz})_P = \frac{T}{2J} (1 + A_1 + \overline{A_2} x^2 + 3 \overline{A_3} y^2) x$$

$$(\tau_{zx})_P = \frac{T}{2J} (-1 + A_1 + \overline{A_2} x^2 + 3 \overline{A_3} y^2) y \text{ 이다.}$$

컴플리멘터리 포텐셜 에너지는 다음과 같다.

$$\pi_c = \frac{L}{2G} \int_A \left[\left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 - 4G\alpha \psi \right] = \frac{-L T \alpha}{2}$$

마지막으로 전단응력은 다음과 같다.

$$(\tau_{yz})_c = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = x(B_1 + 2\overline{B_2} x^2 - \overline{B_3} a^2 + \overline{B_4} y^2)(b^2 - y^2)$$

$$(\tau_{zx})_c = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) = y(B_1 + \overline{B_2} x^2 + 2\overline{B_4} y^2 - \overline{B_3} b^2)(x^2 - a^2)$$

2.4 칩의 실제 평면에서 반경 결정

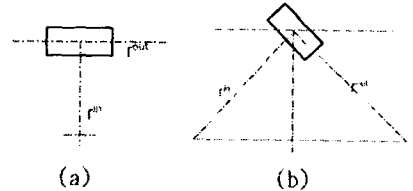


Fig.6 Measurement of in-plane and out-of-plane curl radii (a)initial and final (b)any other arbitrary position

Fig. 6에서

$$r_{i\theta} = \frac{r_0}{\cos \epsilon}, \quad r_{f\theta} = \frac{r_0}{\sin \epsilon}$$

2.5 In-plane 굽힘

In-plane 굽힘 응력은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_\theta = \frac{M}{AR} \left(1 + \frac{1}{Z} \frac{y}{R+y} \right)$$

Figure.5와 같은 단면에서 극관성모멘트는

$$Z = -1 \frac{R}{2c} \log_e \left(\frac{R+c}{R-c} \right)$$

$$c = \pm b, \quad M = M_1 \text{ 이다.}$$

내면에서의 굽힘응력은 다음과 같다.

$$(\sigma_{bx})_- = -\sigma_{bx} \cos \xi_\theta \cos \theta$$

$$(\sigma_{by})_- = \sigma_{by} \cos \xi_\theta \sin \theta$$

$$(\sigma_{bz})_- = \sigma_{bz} \sin \xi_\theta \cos \theta$$

외면에서의 굽힘응력은 다음과 같다.

$$(\sigma_{bxz})_+ = -\sigma_{bz+} \cos \xi_\theta \cos \theta$$

$$(\sigma_{bxz})_+ = \sigma_{bz+} \cos \xi_\theta \sin \theta$$

$$(\sigma_{bxz})_+ = \sigma_{bz+} \sin \xi_\theta \cos \xi_\theta$$

2.6 Out-of-plane 굽힘

$\xi = \pm b$, $M = M_2$ 일 때,

나면에서의 굽힘응력은 다음과 같다.

$$(\sigma_{bxz})_- = -\sigma_{bz-} \cos \xi_\theta \cos \theta$$

$$(\sigma_{bxz})_- = \sigma_{bz-} \cos \xi_\theta \sin \theta$$

$$(\sigma_{bxz})_- = \sigma_{bz-} \sin \xi_\theta \cos \xi_\theta$$

S 면에서의 굽힘응력은 다음과 같다.

$$(\sigma_{bxz})_+ = -\sigma_{bz+} \cos \xi_\theta \cos \theta$$

$$(\sigma_{bxz})_+ = \sigma_{bz+} \cos \xi_\theta \sin \theta$$

$$(\sigma_{bxz})_+ = \sigma_{bz+} \sin \xi_\theta \cos \xi_\theta$$

3. 시뮬레이션 및 결과

선삭실험을 통하여 얻은 실험데이터와 칩의 치수들은 다음과 같다.

$$F_x = 80N, F_y = 64N, F_z = 96N$$

$$r_i = 5mm, r_f = 13mm, y = 3.6mm$$

$$2a = 3.4mm, 2b = 1.0mm$$

실험데이터를 초기값으로 입력하여 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Figure.7은 나선각에 따른 in-plane의 굽힘모멘트를 나타낸 것이다. 최대 굽힘모멘트의 나선각 140°는 Zhang⁽⁴⁾의 연구에서 칩의 자유단이 회전하는 관작물을 빼냈을 때 2-D 굽힘의 경우와 유사한 결과를 보인다. Figure.8은 나선각에 따른 out-of-plane의 굽힘모멘트를 나타낸 것이다.

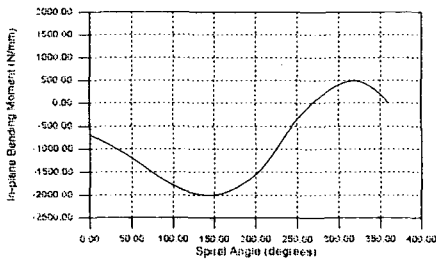


Fig.7 Variation of in-plane Bending Moment Along the Chip Spiral

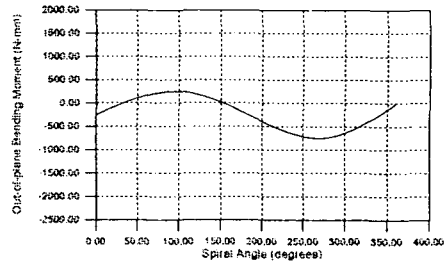


Fig.8 Variation of Out-of-plane Bending Moment Along the Chip Spiral

Figure.9와 10은 칩의 내·외면에 대한 in-plane의 굽힘 응력을 나타낸 것이다. 응력의 절대값이 비슷함을 알 수 있다. 내면에 대해서 기호(+)는 인장 응력을 나타내며, 외면에 대해서 기호(-)는 압축 응력을 나타낸다.

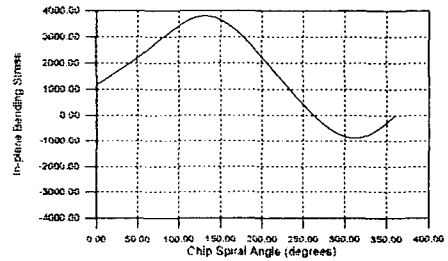


Fig.9 Variation of in-plane Bending Stress σ_{bz-} (Inside Surface) with Spiral Angle

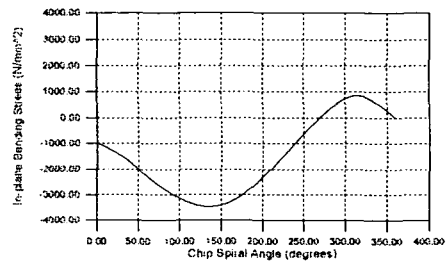


Fig.10 Variation of in-plane Bending Stress σ_{bz+} (Inside Surface) with Spiral Angle

Figure.11과 12는 칩의 내·외면에 대한 out-of-plane의 굽힘 응력을 나타낸 것이다. 응력의 기호는 in-plane의 경우에 대해서 반대이다.

전단응력, in-plane과 out-of-plane 응력들에 따른 칩절단 기준을 세울 수 있다. 재료의 특성에

따른 이러한 변수들의 영향을 충분히 고려한다면 칩 절단 모드에 대한 기준을 제시할 수 있을 것이다.

본 연구에서 얻은 결과와 실험과 유한요소해석을 통한 결과를 충분히 고찰한다면 일반적인 칩 절단 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

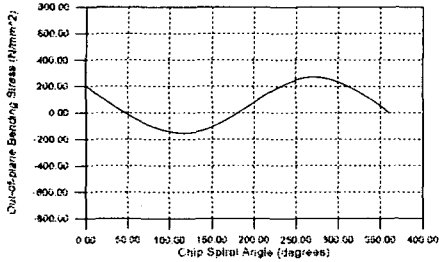


Fig.11 Variation of Out-of-plane Bending Stress σ_{bz} with Spiral Angle

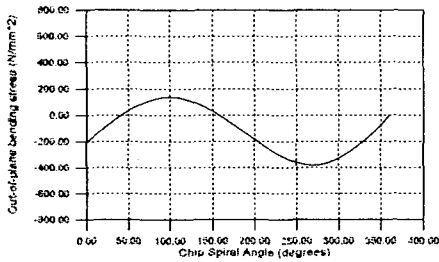


Fig.12 Variation of Out-of-plane Bending Stress σ_{bz} with Spiral Angle

4. 결론

본 연구를 통해서 완전 탄성체인 반곡된 3-D 칩에서의 응력분포를 역학적인 방법을 이용하여 개발했다. 해석결과로부터, 칩 절단은 굽힘, 전단과 직접적인 응력 등의 복합 작용으로 인해서 발생한다는 것을 알 수 있었다. 최대응력의 위치를 포함한 응력 변화의 양상을 실험데이터를 시뮬레이션하여 구할 수 있었다. 향후의 연구과제로서 역학적인 방법으로 얻은 결과를 유한요소법과 실험적인 방법을 이용하여 검증할 필요가 있다.

참고문헌

1. Nakayama K., " A Study on the Chip Breaker," Bull. Jap. Soc. Prec. Eng., Vol. 39, No. 17, pp. 142, 1962.

2. Cook N. H., Jhaveri P., and Nayak N., "The Mechanism of Chip Curl and Its Importance in Metal Cutting," Trans. ASME, pp. 374, 1963.
 3. Spaans, "The Fundamental of Three-dimensional Chip-curl, Chip Breaking and Chip Control," Doctoral Thesis, TH Delft, 1971.
 4. Zhang J., "Simulation and Experimental Validation of Chip Curl Development, Chip Deformation and Chip Breaking in 2-D Metal Machining," M.S. Thesis, University of Kentucky, 1994.