

論文

유리섬유강화 플라스틱(GFRP)의 밀링절삭
특성에 관한 연구

김 정 두*

A Study on Milling Characteristic of Glass Fiber
Reinforced Plastic

Jeong-Du Kim*

ABSTRACT

An investigation of milling with a Glass Fiber Reinforced Plastic(GFRP) materials was conducted in order to observe the relationship between fiber layer direction and surface roughness, burr occurrence and tool wear. It was found that the most important factor of above parameter was correlation of between direction of fiber layer and tool feeding directions. The result of investigation can be summerized as follow.

1) The most improved surface were obtained when tool feeding direction and fiber layer directions were identical in both case of up milling and down milling. However the most roughness surface were produced when tool feed direction in adjusted as 90° from fiber layer direction increase of up milling, while 70° in case of down milling.

2) In both operation, up milling and down milling, the most minor occurrence of burr were observed, when the angle between tool feeding and fiber layer were $0^\circ \sim 20^\circ$.

3) Tool wear also observed after cutting in varried angle between tool feeding and fiber layer. A severe tool wear was observed, when the adjusted angle between feeding direction and fiber layer direction was 90° at lower and medium feed rate operations in end milling, while 45° at higher feed rate operations.

요 약

GFRP는 열전도율이 낮으므로 절삭중 공구인선의 온도가 높아지고 피삭재 중에 유리섬유와 같은 경질물질에 따라 공구인선의 손모가 크다는 것이 지적되고 있다. 본 연구에서는 GFRP를 밀링에 의한 앤드밀 절삭실험을 행하고, 이때 얻어지는 가공면의 거칠기, 가공면의 버어현상 및 공구마멸형태를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 절삭가공면의 거칠기는 이송방향각에 따라서 거칠기의 크기가 각각 다르게 나타나고 있으며,

* 정회원, 한국과학기술대학, 생산기계공학과

표면거칠기가 가장 적게 나타나는 것은 상, 하향절삭에서 ϕ 가 0° 일 때이며, 가장 크게 나타나는 것은 상향절삭에서는 ϕ 90° , 하향절삭에서는 ϕ 70° 의 부근이다.

2) GFRP의 절삭가공에서는 이송방향각에 따라 버어의 생성과 억제현상이 나타나며, 상향 및 하향절삭 모두를 만족시키는 버어의 억제 절삭조건은 ϕ $0^\circ \sim 20^\circ$ 범위이다.

3) 이송속도방향에 따라서 공구의 마멸값은 상이하게 나타나며 저속 및 중속 이송속도 영역에서는 이송방향각이 ϕ 90° 에서, 고속이송속도 영역에서는 ϕ 45° 에서 최대의 마멸면적을 나타내고 있다.

1. 서 론

유리섬유강화 플라스틱(GFRP)은 유리섬유와 플라스틱의 복합재료로서 금속에 비하여 비탄성, 비강도, 전기전열성 및 내수성이 우수하며 또한 유리섬유와 플라스틱의 경계면이 진동흡수원의 역할을 하므로 내충격성이 우수[1, 2]하나 절삭시의 공구마멸이 크게 나타나고 있으며, 이것은 절삭조건에 따라 의존성이 존재하고 있다는 것이 알려져 있다[3~9]. 특히 GFRP는 열전도율이 낮으므로 공구인선의 온도가 높아지고 피삭재 중에 유리섬유와 같은 경질물질에 대한 공구와의 경도에 따른 공구인선의 손모가 크다는 것이 지적되고 있다. 특히 GFRP는 유리섬유의 방향에 따라 응력과 변형율의 차이가 큰 것으로 나타나고 있으며, 이것이 중요한 사항으로 평가되고 있다[10, 11]. GFRP의 절삭시 공구마멸에 관한 연구는 현재까지 다수 발표되었으나, 선삭실험에 편중된 경향이 있고, 유리섬유 방향에 대한 이송방향을 고려한 절삭실험의 연구결과는 찾아볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 GFRP를 CNC 밀링에 의한 엔드밀 절삭실험을 행하고, 공구경로를 유리섬유 방향에 대하여 ϕ $0^\circ \sim 90^\circ$ 로 변화시키고, 이때 얻어지는 가공면의 거칠기, 가공면의 burr 현상 및 공구마멸 형태를 분석함으로써 최적 절삭조건을 제시하였다.

2. 역학모델에 의한 이론 해석

GFRP 절삭시의 공구마멸은 기계적인 점착마멸(adhesive wear)이고 마멸량은 접촉하중에 비례한다[4]. GFRP 중의 유리섬유는 절삭시에 수회에 걸쳐 파단되고, 경사면으로부터 생성되는 칩에 의하여

힘을 받는다. 힘을 받게 되는 부분의 길이를 공구와 유리섬유와의 접촉길이 l 이라 정의하고, 역학모델은 유리섬유를 반 무한길이의 굽힘 강성체를 갖는 보로서, 공구로부터 받는 힘을 단위길이에 대한 P 의 분포하중으로, 수지의 역학적 작용을 단위길이에 대한 k , η_1 , η_2 , 스프링과 대시포트(dashpot)로 치환시킨 것이다. Fig. 1은 유리섬유와 절삭날이 평행한 절삭상태에 대하여 나타낸 것으로써 극 저속으로부터 고속까지의 광범위한 절삭속도 영역에 대한 모델로써 해석한다. 여기에서 a 를

$$4a' \equiv \frac{k + \eta_1 v / \delta_0}{EI} \dots \dots \dots (1)$$

로 정의하고 각각의 기호는 다음과 같다.

k : 유리섬유의 단위길이에 작용하는 스프링상수 (N/m^2), η : 유리섬유 단위길이에 작용하는 대시포트의 점성계수 ($N \cdot S/m^2$), P : 시간 t 에서의 분

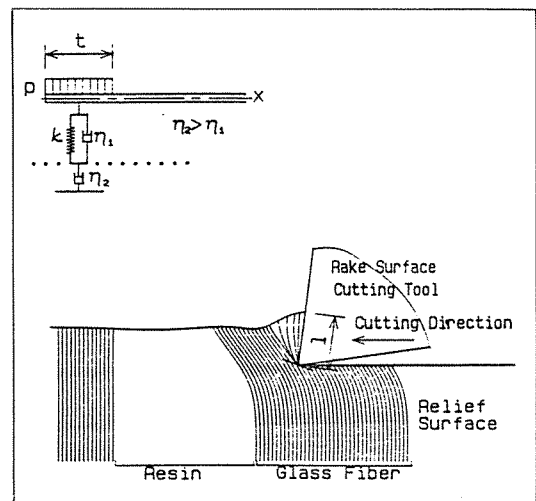


Fig. 1 Cutting Mechanism of GFRP

포하중의 강도(N/m), E: 유리섬유의 종탄성계수(N/m²), I: 유리섬유의 단면 2차 모멘트(m⁴), K: 유리섬유 1개당의 전단강도(N), δ_0 : 시간 t 동안의 유리섬유의 변위(m), v: 하중 끝에서의 유리섬유의 변위속도(m/s), t: 하중이 작용하기 시작하여 경과한 시간(s), L: 유리섬유의 전길이(m), l: 분포하중이 작용하고 있는 부분의 길이(m), 여기에서 $\eta_2 \gg \eta_1$ 과 점성계수 η_1 의 대쉬포트가 유효하게 작용하는 변위속도에 대하여서는 $\eta_2 = \infty$ 즉 강체라고 고려할 때 모델에 일치한다. 이것에 대하여 점성계수 η_2 의 대쉬포트가 유효하게 작용하는 변위속도에 대하여서는 $\eta_1 = 0$ 로 고려하여도 좋으며 모델로부터 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

$al \gg 1$ 이며, 변위속도 v가 대단히 작은 영역에서는

$$P = 4K^4 \sqrt{\frac{k + \eta_1(EI)^{1/4} 4vk^{3/4} / \sqrt{2K}}{4EI}} \quad (2)$$

$al \gg 1$ 이며, 변위속도 v가 대단히 큰 영역에서는

$$P = 2^4 \sqrt{\frac{4kK^4}{EI} + \frac{1}{2} v \eta_1^4 + \frac{1}{2} \left(v^8 \eta_1^8 + \frac{48 v^4 k \eta_1^4 K^4}{EI} \right)^{1/2}} \quad (3)$$

$al \ll 1$ 의 영역에서는

$$P = \frac{K}{l} \quad (4)$$

이며 식(2)~(4)는 다음과 같은 뜻을 의미한다. 즉 P는 변위속도에 비례하는 조건하에서는 분포하중의 폭은 영향이 없고, 역으로 분포하중의 폭에 반비례하는 조건하에서는 변위속도의 영향은 없다. 여기에서 δ_0 는 유리섬유 파단시의 분포하중단에서의 변위량이라고 할 때, 변위속도 v와 동부호를 취한다. 여기에서 변위속도 v의 0값을 제거하면 δ_0 는 다음 식과 같이 해석된다.

$$\delta_0 \doteq \frac{4K^4}{EI \eta_1^3 v^3} \quad (5)$$

식(5)를 식(1)에 대입하여 al를 구하면 다음과 같다.

$$al = l^4 \sqrt{\frac{k}{4EI} + \frac{\eta_1^4 v^4}{16K^4}} \quad (6)$$

식(4)~(6)으로부터, 분포하중의 폭 l을 적게 하면 P 값은 커지며, $al \ll 1$ 을 만족시키는 v의 값이 커지는 것을 알 수 있다. η_2 가 유효하게 작용하는 변위속도에 대하여서는 식(2)~(4)를 유도하여도 같은 해석을 얻으므로 유리섬유가 전단될 때의 분포하중 강도는 결국 식(4)로 나타난다. 모델에 있어서 $x = l$ 의 유리섬유의 축방향변위 λ 를 구하면 $\delta_x \geq l$ 은 다음과 같이 나타난다.

$$\delta_x \geq l = \frac{P}{8EIa^4} e^{-ax-l} \{ (1 - e^{-2al}) \cos a(x-l) + 2e^{-2al} \sin al \cos ax \} \quad (7)$$

그러나 이식 중 $4a^4 \equiv \eta_2(1 - e^{-(ck/\eta_2)t}) EI t$ 가 되고, 또한 t는 하중이 작용하기 시작하였을 때부터의 시간이 된다. 이것으로부터 축방향의 변위 λ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{1}{2} \int_l^\infty \left(\frac{d\delta}{dx} \right)^2 dx \\ &= \left\{ \frac{P}{8EIa^4} \right\}^2 \frac{a}{8} \{ 3 + e^{-2al} (-6 + 6 \sin 2al + 4 \sin^2 al) + e^{-4al} (3 + 4 \cos 2al \sin^2 al - 6 \sin 2al + 4 \sin^2 al \sin 2al + 4 \sin^2 al) \} \\ &= 6 \left\{ \frac{Pl}{8EI} \right\}^2 \frac{4EI t}{\eta_2} \quad (8) \end{aligned}$$

밀링절삭에서는 다수의 유리섬유가 절삭날에 대하여 평행하게 절입되며, 절삭부 단면의 관찰로부터 파단 후의 유리섬유와 수지는 일체로 되어 있다. 절삭이 진행되는 것에 따라, 파단 후의 유리섬유는 파단시의 접촉압력으로 인하여 인선을 마찰시키며 유리섬유를 지지하는 수지는 점탄성 거동을 나타내는 것으로 고려된다.

3. 실험방법

피삭재는 한국화이버의 E-glass 형식을 사용하였

Table 1. Typical properties for the GFRP

Material	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (Kg/mm ²)	Specific Strength (mm)	Specific Modulus (Kg/mm ²)	Thermal Conductivity (Btu.in/h.ft ² . °F)
E-Glass	1.89	105	55*10 ⁻⁴	4569	2.0

고, 그의 물리적 성질은 Table 1과 같다. 사용공작 기계는 Emco F1 CNC 밀링을 사용하였고, 테이블의 이동방향, 이동거리 및 이송속도 등을 CNC 프로그램에 의하여 절삭실험하였다. CNC 테이블은 X, Y 동시 2축 제어, 최소지령단위 0.01mm, 이송속도 5~480mm/min이다. 절삭공구는 2종류로 적용하였으며 표면거칠기와 버어(burr)의 실험은 ϕ 20-M 20 엔드밀홀더에 인서트하였으며, 공구마멸은 ϕ 10의 SSE 2100 초경공구를 사용하였다. 실험 중에는 동일 절삭조건에 의한 관찰을 용이하게 하기 위하여 2개의 절삭날중 한쪽 날을 약 1mm 정도 연삭하여 제거하였으며 유효날 수를 1개로 하였다. 주축의 회전수는 엔드밀 ϕ 20에 의한 표면거칠기 및 버어실험을 위하여 1000 rpm으로 하였으며, 엔드밀 ϕ 10에 의한 공구마멸 실험은 2000 rpm으로 일정하게 하였다. 이송량은 1절삭날당 f 60mm/min, 120mm/min, 240mm/min로 저속, 중속 및 고속 이송속도 범위를 선택하였다.

가공방식은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 GFRP의 유리섬유 방향에 대하여 공구의 이송방향각을 0°

~90°의 범위에 10°씩 변화시켜 각각 절삭하였다. 여기에서 $\phi=0^\circ$ 는 유리섬유의 방향에 대하여 엔드밀의 이송방향이 평행하게 절삭되는 것을 의미하며, $\phi=90^\circ$ 는 유리섬유의 방향에 대하여 이송방향이 90°로 절삭하게 되는 것을 의미한다. 공구마멸의 실험은 공작물의 크기 40×40mm에 대한 절삭깊이 2mm로 절삭된 경우를 1회 가공이라 하였으며 이것을 5회, 10회, 15회의 절삭된 결과로서 실시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 유리섬유 방향에 대한 이송방향과 다듬질면 거칠기

Fig. 3은 상향절삭에 의한 이송방향과 엔드밀 이송속도에 의한 절삭가공면의 표면 거칠기 관계를 나타내었다. 엔드밀의 이송방향각이 유리섬유의 방향에 대하여 ϕ 가 0°에서 10° 범위내에서는 표면거칠기는 변동이 없으나 ϕ 가 20° 이상의 범위에서는 급격히 증가하여 90°에서 최대의 표면거칠기 값을 나

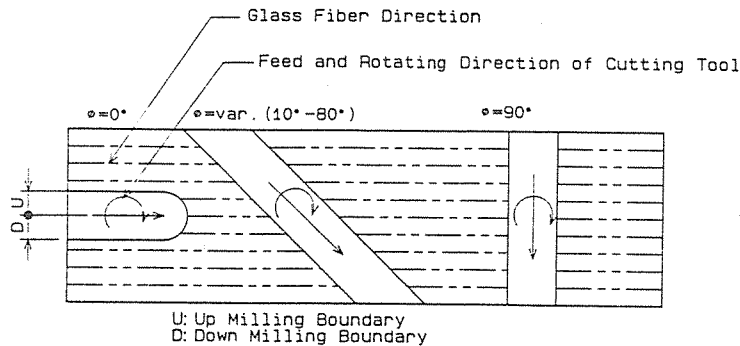


Fig. 2 Sketch of the glass fiber direction of the workpiece the feed direction of the tool and the rotating direction of the cutting tool

타내고 있다. 그러나 Fig. 4에서 설명하고 있는 바와 같이 하향절삭에서는 유리섬유 방향에 대하여 이송방향각이 $\phi 0^\circ \sim 70^\circ$ 범위에서는 표면거칠기가 증

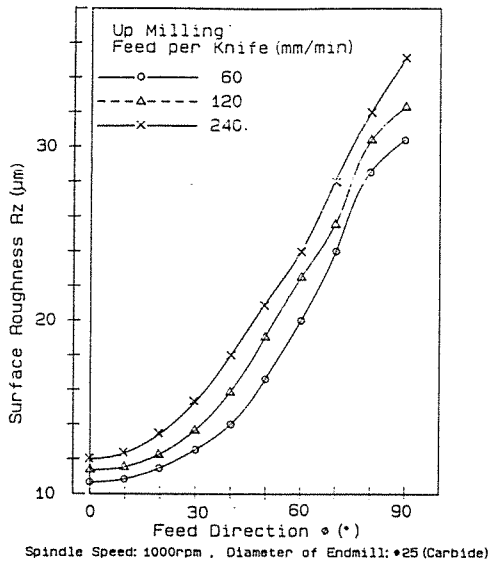


Fig. 3. Relationship between the feed direction (ϕ) and roughness (Rz) on the machined surface

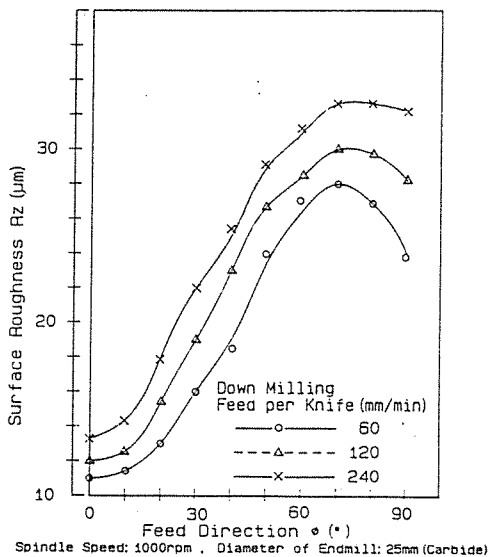


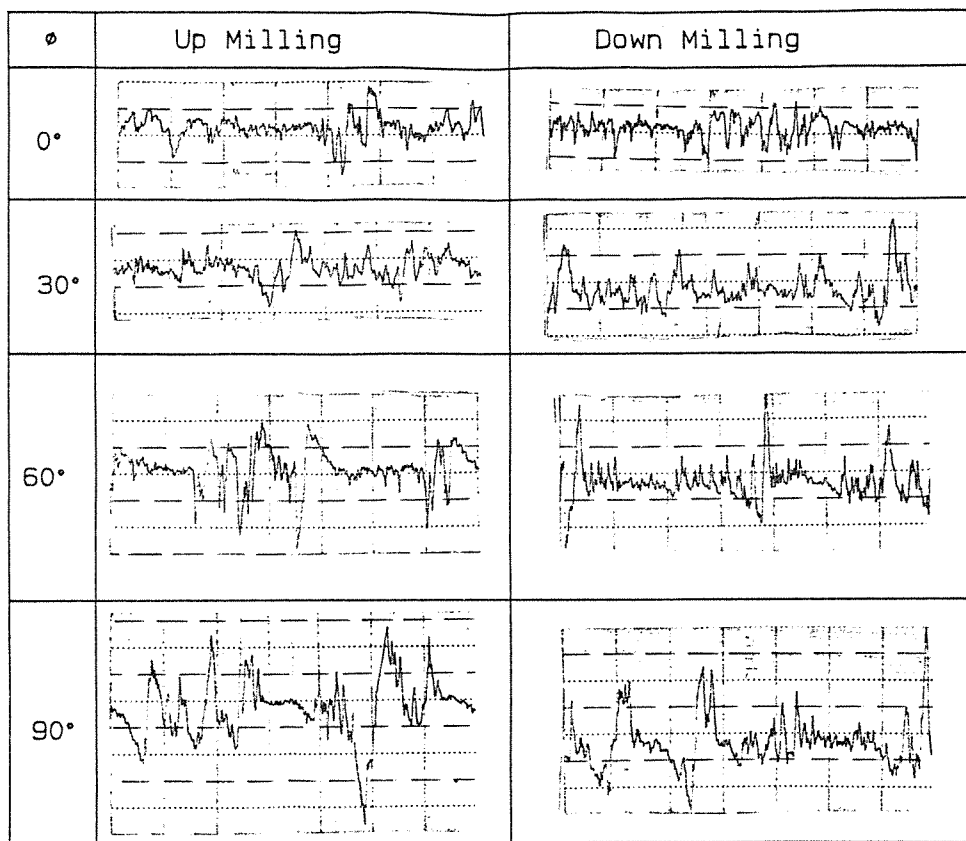
Fig. 4. Relationship between the feed direction (ϕ) and roughness (Rz) on the machined surface

가하고 있으나 $\phi 70^\circ \sim 80^\circ$ 범위에서 표면거칠기는 최대 값을, $\phi 80^\circ \sim 90^\circ$ 범위에서 감소경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 이송속도를 변화시킨다 하여도 이송방향각에 대한 경향은 동일한 추세를 형성하고 있으며, 다만 이송속도의 증가에 대한 표면거칠기의 크기가 증대되고 있다. Fig. 5는 상하향절삭의 표면거칠기 일례를 설명한 것으로서, 유리섬유 방향에 대하여 이송방향각이 커질 수록 표면거칠기가 증대되고 있는 원인은 Fig. 6에서 나타내는 바와 같이 엔드밀의 이송방향은 0° 이나 실제로 유리섬유를 절삭할 때의 입력각을 90° 를 이루게 하고, 반면에 ϕ 가 90° 를 이루는 이송방향은 유리섬유를 절삭할 때의 입력각은 0° 를 이루게 되므로, 단일방향성을 갖는 GFRP의 인장강도에서 설명하고 있는 바와 같이 섬유방향이 0° 에서 최대를, 90° 에서 최소 값을 갖는 결과와 일치하고 있다고 보겠다[11].

이상에서 얻은 결과를 CNC 절삭의 프로그램에 응용한다고 할 때 절삭면을 안정시키고, 다름질 면만을 가공목표로 할 경우, CNC 가공 프로그램에 절삭방향과 이송량을 지령시키면, 유리섬유의 방향에 대한 이송방향각과 이송속도 값에 따라 절삭면 거칠기와의 관계에 대하여 가공데이터가 필요하게 된다. 여기에서 가공면 거칠기를 한정시키고 이송방향각과 이송속도 값을 Fig. 3과 Fig. 4로부터 정리하면 Fig. 7이 얻어진다. 여기에서 상향절삭에 절삭면의 거칠기를 $20\mu\text{m}$ 이하로 얻기 위하여서는 이송속도 60mm/min 에서는 이송방향각을 $\phi 60^\circ$ 범위까지, 120mm/min 에서는 ϕ 를 50° 범위까지, 240mm/min 범위에서는 ϕ 를 45° 범위까지 설정이 가능케 된다.

4.2. 이송방향과 burr 현상

Fig. 8은 GFRP의 가공 후에 나타난 burr 현상으로 이를 구분하면 burr 현상이 없는 A형, 약간의 burr 현상이 있는 B형, 대량의 burr 현상이 나타나는 C형 등이 있다. Fig. 9는 burr의 생성현상을 유리섬유 방향에 대한 이송방향의 절삭가공 상태로 관찰하여 얻은 결과로서 ϕ 의 값을 0° 에서 10° 간격으로 90° 까지 검토한 것이다.



Feed: 120mm/min

Fig. 5 Surface roughness on the up and down milling

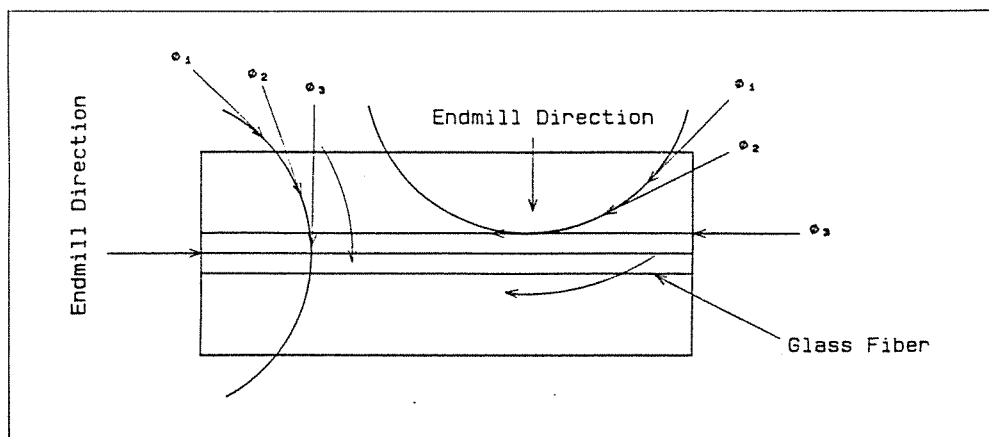


Fig. 6 Entrance angle of endmill

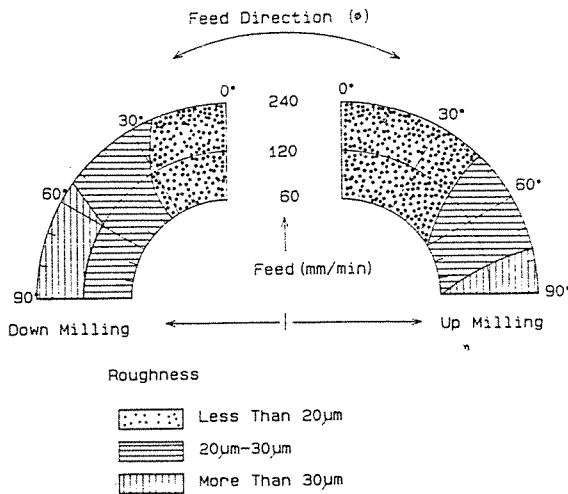


Fig. 7 Comprehensive relationship among the surface roughness (R_z) of the Machined surface the feed direction (ϕ) and the feed (mm/min)

상향절삭에서는 ϕ 가 0°에서 20° 범위가 burr 가 없는 A 형의 가공면을 나타내고 있으며, ϕ 가 30°와 40° 범위에서는 B 형의 burr 현상을 나타내고 있는 반면, ϕ 가 50°에서 90° 범위에서는 C 형과 같은 극심한 burr 현상을 나타내고 있다. 그러나 하향절삭에 의하면 ϕ 가 0°에서 30° 범위에서는 burr 가 없는 A 형의 가공면을 나타내고 있으며, ϕ 가 40°에서 90° 범위에서는 B 형의 burr 현상이 나타나므로서 상향절삭의 경우보다 양호한 burr 현상면을 보이고 있으며, burr 부분이 GFRP 크랙의 발생원으로 작용할 가능성이 있다고 볼 때 유리섬유 방향에 대한 이송방향각 및 상하향 절삭조건이 가공조건 of 중요한 요소라고 보겠다.

4. 3. 이송방향과 공구마멸과의 관계

유리섬유 방향에 대한 이송방향 ϕ 에 대하여 0°,

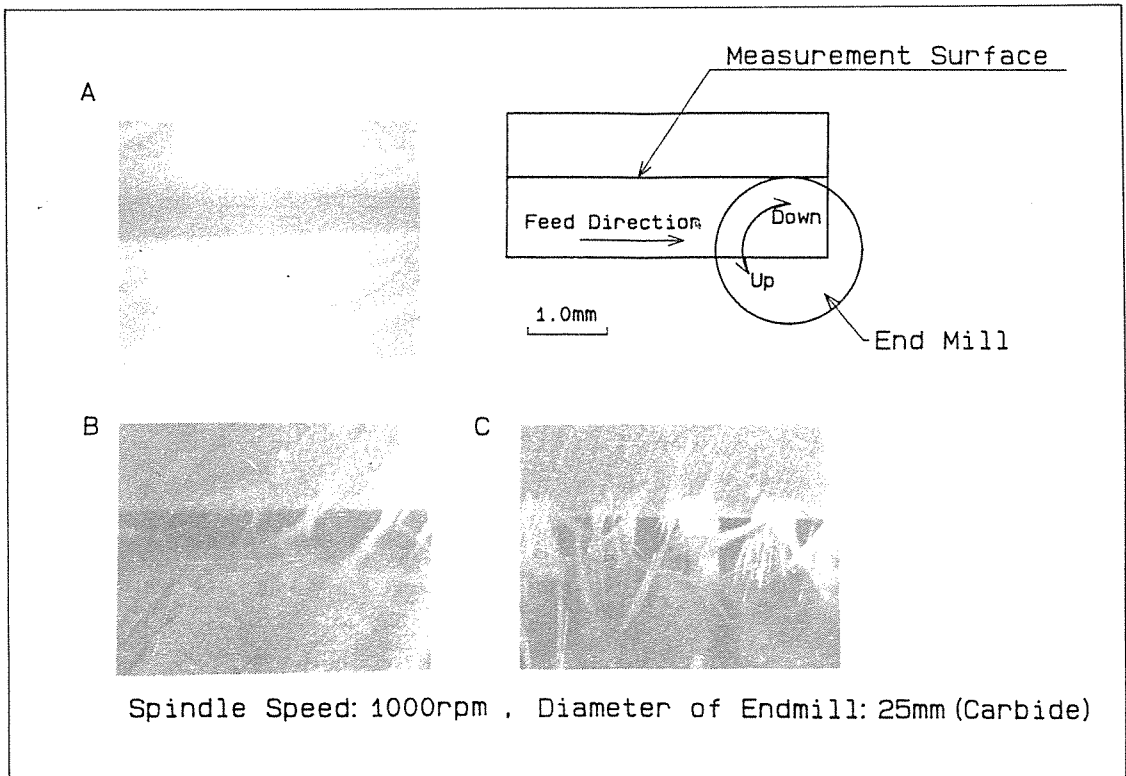


Fig. 8 Burr phenomenon of cutting surface

타난다. 여기에서 a, b, c 및 d를 정량적으로 표시하면 Δ OHK의 현미경에 의한 측정값으로 실제의 마멸면적(Wa)을 알 수 있다. Fig. 12는 인선의 마멸면적과 절삭방향과의 관계를 나타낸 것으로, 공구의 마멸면적(Wa)은 이송속도의 증가에 따라서 증가하나 이송방향각이 0°에서 45° 사이에서는 급격한 마멸면적의 증가를 보이고 있으나, ϕ 가 45°에서 90° 사이의 마멸면적 값은 둔화되는 현상을 나타내고 있다.

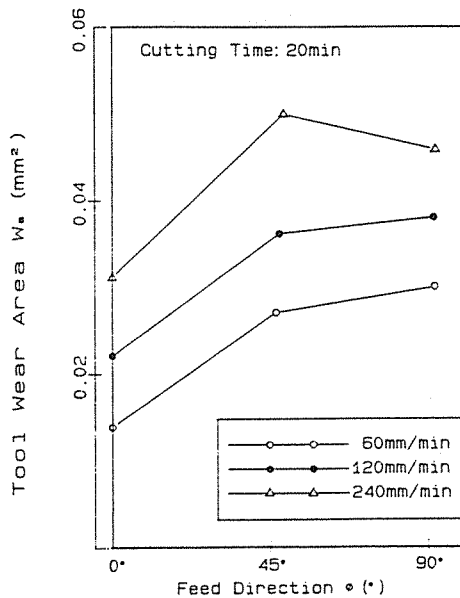


Fig. 12 Relation of tool wear area and feed Direction

공구의 마멸량은 이송방향 ϕ 가 0°일 때 가장 적은 공구마멸량을 나타내고 있으며, 저속이송 및 중속이송속도 범위인 60mm/min와 120mm/min에서는 ϕ 가 90° 방향일 때 공구마멸 면적이 가장 큰 것으로 나타나고 있다. 그러나 고속이송속도 영역인 240mm/min에서는 유리섬유 방향에 대한 이송속도 방향이 ϕ 45° 범위에서 가장 큰 공구마멸 면적을 나타내고 있다. 이것은 절삭저항의 연구결과[9]와 일치하는 경향을 나타내고 있다.

5. 결 론

유리섬유 강화 플라스틱(GFRP)의 밀링절삭은

절삭가공면의 정도를 향상시키기 위한 목적으로 유리섬유 방향에 대한 이송방향을 고려한 절삭방식이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 유리섬유 방향에 대하여 이송속도 방향을 0°에서부터 10°씩 회전시켜 90°까지 절삭하여 가공면의 표면거칠기, 버어 현상 및 공구의 마멸현상을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 절삭가공면의 거칠기는 이송방향각에 따라서 거칠기의 크기가 각각 다르게 나타나고 있으며, 표면거칠기가 가장 적게 나타나는 것은 상, 하향절삭에서 ϕ 가 0°일 때이며, 가장 크게 나타나는 것은 상향절삭에서는 ϕ 100°, 하향절삭에서는 ϕ 70°의 부근이다.

2) GFRP의 절삭가공에서는 이송방향각에 따라 버어의 생성과 억제현상이 나타나며, 상향 및 하향절삭 모두를 만족시키는 버어의 억제 절삭조건은 ϕ 0°~20° 범위이다.

3) 이송속도 방향에 따라서 공구의 마멸 값은 상이하게 나타나며, 저속 및 중속이송 속도 영역에서는 이송방향각이 ϕ 90°에서, 고속이송속도 영역에서는 ϕ 45°에서 최대의 마멸면적을 나타내고 있다.

후 기

본 연구는 (주)한국화이버 복합재료 연구소의 협조에 의하여 이루어진 것으로, 연구소장과 관계자 여러분께 감사드리는 바이다.

참고문헌

1. N.N. 대한기계학회지, 제 28권 제 5호, 1988, pp.504.
2. J. Wiendle und W. Reimann, Anwendung und Bearbeitung faserverstärkter Werkstoffe, Werkstatt und Betrieb, Vol 120, No. 3, 1987, pp.189-197.
3. 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 錦美誠, GFRP 切削における工具の摩耗機構, 精密機械, 50卷 11號, 1984, pp.1747-1752.
4. 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 里中忍, GFRP 切削時の工具摩耗特性, 精密機械, 44卷 11號, 1978, pp.

1334-1340.

5. 井上久弘, 井戸守, 強化プラスチックの切削加工に関する研究, 精密機械, 39 卷 3 號, 1973. pp. 280-286.
6. 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 鈴木康夫, 里中忍, GFRP 切削時の工具摩耗の機構, 精密機械, 41 卷 5 號, 1975, pp. 473-476.
7. 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 里中忍, 難波江周一郎, GFRP 切削時の工具摩耗特性に及ぼす工具材種の影響, 精密機械, 47 卷 6 號, 1981, pp.652-656.
8. 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 藤原順介, GFRP の切削加工における工具摩耗, 日本複合材料學會誌, 10 卷 1 號, 1984, pp.29-35
9. H.K. Tönshoff und V. Hohensee, Bearbeitung faserverstärkter Kunststoffe durch Umrißfräsen, ZwF, Vol 81 Nr. 2, 1986, pp. 106-111.
10. T.J. Reinhart, Engineered Materials Handbook, Volume 1, Composites ASM International, 1987, pp.45-48.
11. 堂山昌男, 山本良一, 新素材の開発と應用 II, 東京大學出版會, 1980, pp.369-382.