

高能率·高精度를 위한 研削加工

宋 地 復

<釜山大學校 精密機械科 教授>

1. 머리 말

좋은 품질의 製品을 높은 능률로 낮은 원가로 生産하는 것이 加工의 목표이다.

연삭가공은 이 目標에 도달할 수 있는 加工技術의 하나이며 현재 機械部品의 製作에 있어서 最終工程으로 널리 活用되고 있으나 아직도 解明되어야 할 課題들(예를 들면 研削入力조건의 形式化, 연삭결과의 예측기술의 確立, 속돌의 選擇基準의 設定, 연삭가공의 고능률화 고정도화를 위한 最適技術등)이 적지 않다.

이들 문제를 解決하고 연삭가공 기술을 고도화하기 위해 研削現象을 把握하여야 한다.

이러한 觀點에서 本稿에서는 먼저 研削加工 시스템과 연삭과정의 몇 가지 현상을 考察하고 나아가 고능률 고정도화를 위한 연삭가공기술로서 연삭粒子의 切刃速度를增加하는 고속연삭법, 切刃과 工作物과의 干涉形狀을 크게 하는 重研削法, 有効속돌의 切入量과 研削量을 制御하는 정밀연삭에 관하여 記述코자 한다.

2. 연삭가공 시스템

연삭가공에 있어서 공구, 被削材, 상대운동, 干涉, 工作機械, 분위기등의 入力條件 하에 연삭粒子의 切刃作用에 의한 침의 生成과 새로운 表面이 形成된다. 이에 따라 공구의 마멸, 研削抵抗, 채터진동, 연삭온도, 研削音等이 發生하여

最終 研削出力인 研削能률, 加工精度, 加工表面特性 및 作業환경이 決定된다.

이들의 관계인 연삭가공 시스템을 圖示하면 그림 1과 같다.

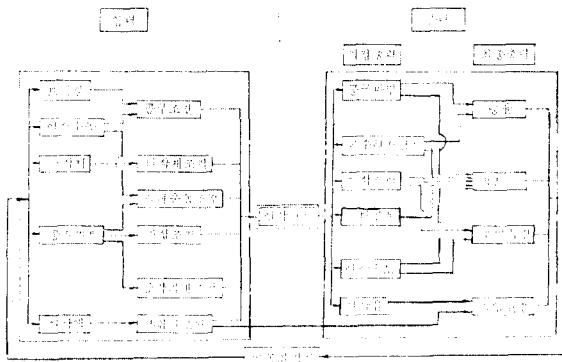


그림 1 研削加工시스템

여기 入力條件를 具體化 시키면

(1) 공구조건으로 속돌의 構成要素인 연삭입자의 재질, 形狀 및 크기, 結合劑의 종류와 量 그리고 속돌의 組織이 重要하다. 이들은 속돌의 特性인 연삭입자의 마멸, 切刃의 支持剛性, 同時에 作用하는 切刃數, 연속切刃의 간격등에 영향을 미치는 切刃의 分布, 파괴強度, 弹性係數 등을 決定하게 된다.

(2) 被削材의 조건으로는 피삭재의 기계적 物理的 성질이 중요하다.一般的으로 被削材의 特性과 研削現象과의 直接적인 관련성을 축출(工作物 1回轉當의 靜剛性의 變化와 피삭재가 갖는 初期偏心量등)하기 어렵기 때문에 入力條件 으로 피삭재조건을 무엇에 의해 表現할 수 있는

高能率·高精度를 위한 研削加工 ■

가를決定하는것이 어렵다.

(3) 相對運動은 속돌의 속도와 工作物 속도를 말하여

(4) 干涉조건으로 속돌의 設定切入量, 工作物과 속돌과의 速度比 및 半徑比가 이에 屬한다.

(5) 工作기계 조건으로 研削盤의 靜剛性, 動特性(고유진동수, 감쇠특성), 热剛性, 운동特性(위치결정精度, 軸回轉精度)등이 있고

(6) 涼潤氣 조건으로는 연삭액의 종류와 그供給量과 壓力등이 있다.

이와같이 研削加工의 入力조건은 複雜多岐하기 때문에 이들 全部를 入力하여 研削出力を 예측할 수 있는 研削모델을 確立한다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 연삭가공의 고도화를實現하기 위해서 研削入力조건과 研削出力を 연결하는 研削現象을 解析 檢討할 必要가 있다.

3. 속돌의 設定切入量과 實切入量

研削加工을 수행하기 위해 속돌을 工作物에切入시킬 때 그量(속돌의 切入量)은 속돌臺의 移動量을 基準으로 할 경우가 많다. 이때 속돌臺의 移動量과 속돌의 實際 工作物에切入한 量과는 差가 있으며 또한 속돌 切入量과 研削量(工作物의 半徑減少量)과도 一致하지 않는다.

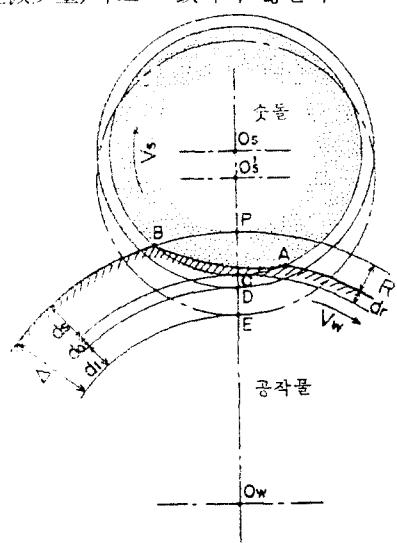


그림 2 實속돌 切入量

그림 2는 이들의 관계를 說明하기 위한 概念圖이다.

여기 設定切入量 $\Delta(PE)$ 만큼 속돌臺를切入하여 研削하려 할 때 研削現象에 付隨되는 연삭 저항에 의해 속돌軸과 工作物 支持系가 變位, 그彈性的 變位量 $d_1(DE)$ 만큼 속돌 切入量은 속돌臺 切入量 Δ 보다 작은 切入量(PD)로 研削이進行된다. 이에 따라 속돌은 마멸되고 그量 d_0 는 完全히 없어지므로 결국 研削을 개시하여 얼마만한 시간이 경과하면 속돌의 切入量은 PC 가 된다. 이와같이 속돌의 切入量은 속돌臺 切入量 Δ 로부터 속돌軸과 工作物 支持系의 弹性 變位量 d_1 과 속돌마멸량 d_0 만큼의 差로 주어지지만 속돌 및 工作物의 局部的 弹性變形 때문에 切削殘量 d_r 가 存在하게되어 결국 研削量은 즉 工作物 半徑方向의 감소량 R 은 속돌의 切入量과 다른 值을 갖게 된다.

4. 플런지 研削過程

플런지(plunge)研削에 있어서 속돌은 一定속도로切入되지만 上述한 바와 같이 속돌軸과 工作物 支持部의 變位量과 切削殘量은 연삭계에吸收되고 속돌마멸량은 연삭계로 부터 消去되기

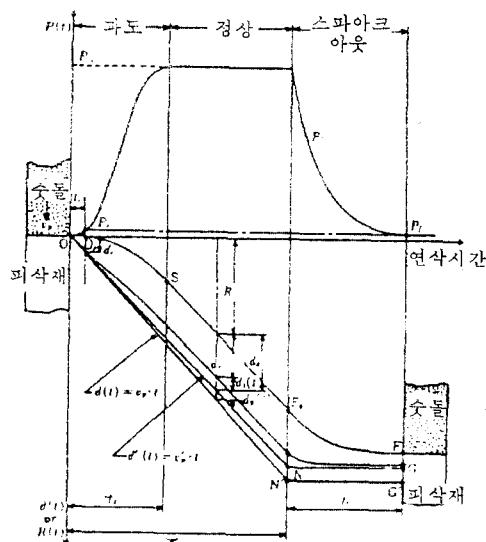


그림 3 플런지研削過程

解說

때문에 工作物의 半徑 감소量은 그림 3에서와 같이 軟刀臺의 移動量과는 다르게 된다.

그림에서 點 O 는 軟刀들이 工作物과 接觸을 개시하는 點이며 點 O_0 는 工作物 半徑이 감소하기 始作하는 점(치수生成이 개시되는 점)이다. 折線 ONG' 는 軟刀臺 切入量을, ONG 는 有効 軟刀臺 切入量($=$ 軟刀臺 切入量 - 軟刀의 마멸量 d_0)을, 치수 生成曲線 O_0SF_0F 는 工作物 半徑 감소량을 각각 나타낸 것이다.

그림 4는 하나의 플런지 研削사이를 中 치수 生成 속도(工作物 半徑減少速度) \dot{R} 와 研削系의

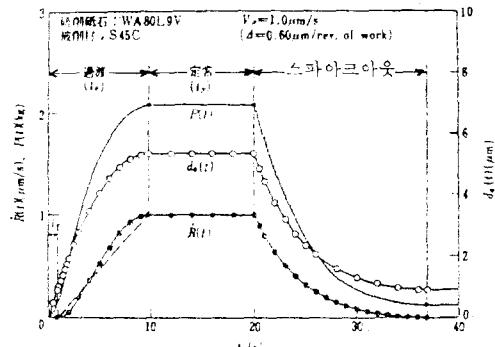


그림 4 치수生成속도·背分力切削殘量의變化

彈性的 變位量 d_e 그리고 研削背分力 P 의 연삭 시간 t 에 대한 變化 과정을 表示한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 하나의 플런지 연삭 사이를 中에는 過渡, 定常 그리고 스파아크아웃(spark out)인 서로 다른 3部分의 연삭상태가 존재 한다. 지금 軟刀과 工作物과의 접촉 初期에 있어서 軟刀의 切入量은 작아 切刃은 工作物과 弹性的 接触만을 하므로 工作物 半徑은 감소하지 않는다. 그러나 軟刀臺는 一定한 速度로進行하기 때문에 累積效果에 의해 軟刀의 切入量은 增加하여 工作物 表面에는 塑性變形에 의한 흉(溝)이 生成하게 된다. 이 領域에서는 切削作用이 존재하지 않으나 파일(pile) 위 部分의 破壞에 따른 2次的 칩 生成 現象에 의해 工作物 半徑은 매우 작은 速度로 감소한다. 軟刀의 切入量을 더욱 增加하면 個個切刃의 切削作用에 의해 칩이 生成되어 치수 生成 속도는 急激히 增加하지만 그 初期段階에 있어서는 有効 플런지

속도보다 작기 때문에 軟刀의 切入量은 增加해간다. 그러나 시간이 경과함에 따라 치수 生成 속도가 有効 플런지 속도와 같게 되어 定常상태가 되면서 치수 生成速度가 一定하게 된다. 軟刀臺의 切入을 停止하면 研削系 弹性復元에 의해 研削이 진행되고 스파아크 아웃 상태가 된다. 이 때 工作物 半徑은 감소하지만 그 속도는 徐徐히 감소하여 零이 되었을 때 스파아크 아웃 研削이 完了된다.

5. 橫方向 研削過程

橫方向 研削은 軟刀과 工作物과의 사이에 軟刀의 幅方向으로 상대운동이 주어지기 때문에 軟刀의 研削作用이 複雜하게 變化하고 있다.

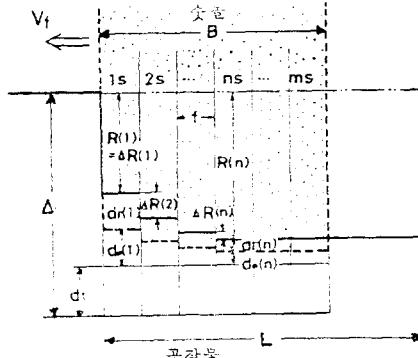


그림 5 橫方向 研削의 機構

그림 5는 研削거리 L 에 있어서 軟刀과 工作物과의 干涉상태를 表示한 것이다. 工作物이 1回轉할 사이에 軟刀는 橫方向量 $f = V_f \tau$ (τ : 工作物 1回轉에 要하는 시간) 만큼 軸方向으로 移動하여 工作物은 幅 f 인 螺旋階段狀으로 研削된다. 따라서 軟刀作業面을 f 로 하여 n 단계(ns)로 等分($n=B/f$)하면 그 첫 단계는 제 1 단계(1s)의 切削殘量을 연삭케 된다. 이렇게 하여 最終의으로 제 n 단계(ns)에서 研削이 行해지므로써 연삭加工面이 形成된다. 이 때 같은 단계에 屬하는 軟刀作業面에서는 位置가 다르더라도 같은 研削現象이 생기지만 단계가 다르면 切削殘量도 달라져 연삭현상이 다르게 된다.

高能率·高精度을 위한 研削加工

지금 솟돌臺의 切入量 Δ 로 橫方向研削을 행하면 각 단계에 作用하는 研削背分力 p_i 의 합으로 주어지는 總研削背分力 p 가 發生하기 때문에 솟돌軸과 工作物 支持系의 彈性 變位量 d_1 이 솟돌의 全幅에 一定하게 생긴다. 먼저 솟돌의 마멸량이 매우 작은 初期단계에 있어서는 제 1 단계(1s)의 솟돌切入量은 $(\Delta - d_1)$ 이지만 솟돌 및 工作物의 局部的 彈性變形에 의한 切削殘量 $(d_r)_1$ 이 존재하고 이것이 제 2 단계(2s)에서의 솟돌切入量이 된다. 연삭이 어느程度 進行되면 솟돌에는 마멸이 發生 제 i 번째의 단계에서 솟돌의切入量은 第 $(i-1)$ 번째의 切削殘量 $(d_r)_{i-1}$ 과 솟돌의 마멸량 $(d_o)_{i-1}$ 과의 합에서 제 i 번째의 솟돌마멸량 $(d_o)_i$ 를 빼 값이 된다.

이와같이 숫돌의 切入量은 各 단계에서 달라
지므로 연삭현상도 단계가 다르면 달라진다.

그림 6은 각 단계에서의 연삭량 R_i 가 연삭進行에 따라 어떻게 變化하고 있는가를 表示한 예이다. 제 1 단계 (1s)에서는 研削力이 集中하기

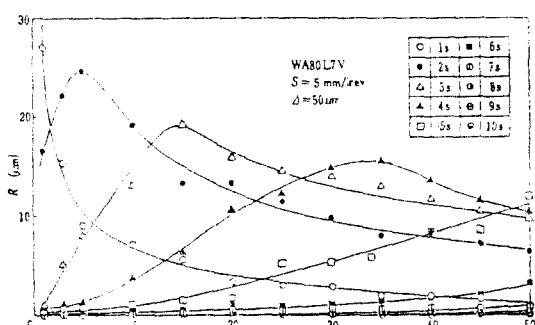


그림 6 研削 진행과 더불어 치수生成量의 變化

때문에 솛돌의 마열이 커져 研削할 수 있는 比가 상대적으로 감소하기 때문에 제 2 단계(2s)에서 연삭량이 增加하나 연삭이 進行됨에 따라 제 2 단계(2s)에서도 마열이 커져 研削量은 감소한다. 또한 이에따라 제 3 단계(3s)에서 研削量이 增加하게 된다. 따라서 研削加工은 시간이 경과하면 솛돌의 마열이 前端部에서 後端部로 옮겨 족간다. 이와같이 진행되는 橫方向 研削을 有効하게 행하기 위해서 橫方向 量을 適切히 選定하지 않으면 안된다. 즉 橫方向 量을 너무 크게 하

면 切削殘量을 完全히 除去할수 없어(수돌의 切入量과 研削量과의 差가 크게 된다) 치수精度와 研削面거칠기가 나빠지며 逆으로 그 量이 적으면 수돌의 後端部에 金屬除去 作用이 없어지고 다만 工作物 表面을 스쳐가는 部分이 存在하기 때 문에 수돌의 幅에 따른 橫方向 量의 設定이 橫方向 研削의 良否를 정하는 중요한 要素가 된다.

6. 高速度 研削

고속도研削法은 연삭精度加工面의特性等加工品質을 向上시키는데 有効한 方法으로, 또 는研削能率을 增大하는 方法으로 그 위에加工品質과研削能率과의 양쪽을 同時に改善하는 方法으로 利用되고 있다.一般的으로研削속도는 솜돌의 속도 V_s 와 工作物속도 V_w 에 의해 決定되지만 $V_s \gg V_w$ 이기 때문에研削속도는 주로 V_s 에 의해支配되므로 고속연삭은 V_s 를 增大하는 方法으로理解할 수 있다.

그런데導入한 고속연삭法이 加工品質을 向上시킬 것인지, 研削能률을 增大시킬 것인지 또는 양쪽을 同時に改善할 것인지는 V_s 를 增大하였을 때 이에 對應하는 V_w 를 어떻게 選定하느냐 즉 工作物과 속도와의 속도비 $K_V = V_w/V_s$ 의 값에 의해 정해진다. 이것은 침의 두께, 길이 切刃의 切入角들의 침 形狀을 決定하는 式이 속도

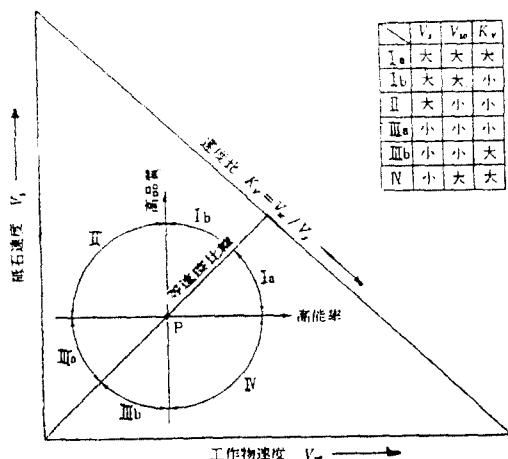


그림 7 고능률, 고품질을 위한 研削 속도 조건
設定範圍

■ 解 說

비 K_v 의 함수로 表示되기 때문이다. 또한 加工品質은 칩의 形狀을 작게 할수록 良好해지고 研削能률은 工作物속도 V_w 와 속돌切入量 Δ 그리고 研削幅 B 의 積으로 주어지기 때문에 V_w 를 크게 할수록 높게된다.

그림 7은 고능률 고품질 연삭을 행할 경우 속돌의 속도 V_s , 工作物속도 V_w , 그리고 속도비 K_v 를 어떤 범위로 설정할 것인지를 속돌의切入量이 一定한 경우에 따라 表示한 것이다.

지금 點 P 에서 주어지는 연삭속도(V_s, V_w)와 속도비 K_v 를 變化시킬 경우 속돌과 工作物의 속도 增減에 따른 속도조건의 變化범위는 $I_a, I_b, II, III_a, III_b, IV$ 의 6개로 分割된다. 먼저 제 1상한은 V_s 와 V_w 가 같이 增加하는 범위로 等速度比線에 의해 2개의 범위로 나눠진다. I_a 에서는 K_v 는 增加하고 I_b 에서는 K_v 가 減少한다. 제 Ⅱ상한에서는 V_s 는 增加하지만 V_w 가 감소한다(그 結果 K_v 가 감소 한다) 제 3상한은 V_s 와 V_w 가 함께 감소하는 범위이다. 等速度比線에 따라 2개의 범위로 分割되고 III_a 에 있어서 K_v 는 감소 III_b 에서는 K_v 가 增加한다. 제 4상한에서는 V_s 는 감소 V_w 는 增加하는 結果로 K_v 는 커진다. 이러한 경우 고속연삭에 있어서는 속돌의 속도 V_s 를 增加하여야 하기 때문에 제 1과 제 2상한이 아니면 안된다.

한편 V_s 를 一定하게하고 V_w 를 增加 시키면 研削能률은 V_w 에 比例하여 增加하지만 V_s 의 增加는 속도비 K_v 의 增加때문에 칩形狀은 크게되어 加工品質의劣化를 가져온다. 逆으로 V_w 를 一定하게하고 V_s 를 增加 시키면 研削能率은 거의 變하지 않지만 速度比 K_v 의 감소로 칩形狀이 작아져 결국 V_s 의 增加는 고품질화를 초래한다.

따라서 고능률 고품질을 保證하기 위한 고속 연삭에 있어서 속도조건을 제 1상한 内에 設定하지 않으면 안된다. 特히 제 1상한 中의 等速度比線에 따라 속돌의 속도와 工作物속도를 增加 시킬 경우에는 工作物속도의 增加에 따라 고능률을 얻을 수 있고 속돌의 속도增加에 따라 칩의 形狀이 一定하게 保持되므로 加工品質을劣化시키

지 않고 연삭能률을 一定하게 할 수 있다. 따라서 加工品質을 一定하게하고 研削能률을 增大하기 위한 고속연삭법으로 等速度비선을 利用하여야 한다.

7. 重研削加工

연삭能률은 속돌의切入量 Δ 와 工作物속도 V_w , 그리고 연삭폭 B 와의 積에 의해 決定되므로 Δ 를 增加하는, 즉 重研削化에 따라 研削能率을 增大시킬 수 있다.

여기 平均침의 두께 t_m , 最大침의 두께 t_{max} , 침의 길이 L_c , 속돌의切入量 Δ , 속도비 K_v , 연속切入간격 δ 라 할 때 이들 사이의 관계는

$$t_m = t_{max} \cdot L_c / 2 = K_v \cdot \Delta \cdot \delta$$

와 같으며 속돌의 속도 V_s 가 一定할 때

$$t_m \propto V_s \cdot \Delta \cdot \delta$$

가 된다. 따라서 속돌의切入量 Δ 는 增加하고 工作物속도 V_w 는 감소하여도 결국 $\Delta \cdot V_w$ 가 增加하면 연삭能률은 增大하나 칩의 形狀은 大形化되어 연삭能률과 加工품질을 동시에 높인다는 것은 어려운 일이므로 Δ 의 증가에 따라 고능률을 얻는 重研削加工에 있어서 加工品質을 向上하기 위해서는 特別한 考慮가 있어야 한다.

그 하나의 方法이 最近 實用化되고 있는 속돌의切入量 Δ 의 增加에 따른 칩形狀의 大形化를 工作物속도 V_w 의 감소에 의해 억제하는 方法이다.

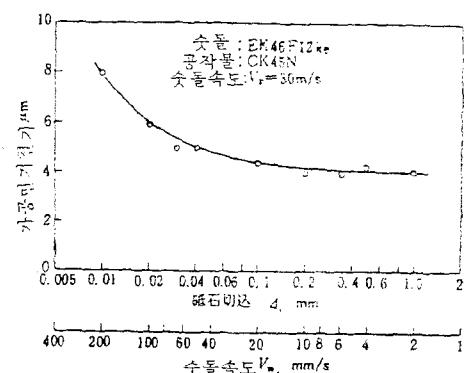


그림 8 重研削에 있어서 加工面의 거칠기

高能率·高精度를 위한 研削加工 ■

그림 8은 속돌속도 V_s 를一定하게하고 속돌切入量 A 를增加하였을때 $V_w \cdot A$ 가一定(연삭능률이一定)하게 工作物속도 V_w 를變化 시키면서 연삭면의 거칠기를 测定한 예이다.

그림에서 알 수 있듯이 $V_w \cdot A = \text{一定}$ 즉 연삭능률을一定하게 하였을때 A 를 크게 할수록 加工面의 거칠기는 改善되고 있다. 이것은 平均침의 두께 t_m 은 $V_w \cdot A \cdot \delta$ 에 比例하므로 $V_w \cdot A$ 를一定하게 A 를增加시키면 V_w 가 감소하게 되어 加工面 거칠기의改善은 연속切刃간격 δ 의 감소에 起因되는 것으로 여겨진다.

다시 말하면 속돌切入量 A 를 增大시키면 속돌表面에서 깊은 위치에 있는 연삭粒子가 研削에 관여하게되어 同時に 作用하는 切刃數가 增加, 연속切刃의 간격 δ 가 짧아진다. 그結果 연삭능률을一定하게($V_w \cdot A = \text{一定}$)하고 있는데도 침의 形狀이 작아져 加工品質이 向上하게 된다.

속돌의切入量을 향상 시킬수 있는 또 하나의 方法은 속돌作業面形狀을 修正하는 方法이다.

橫方向研削에서는 속돌과 工作物과의 사이에 속돌幅 方向으로 상대운동이 주어지기 때문에 속돌作業面의 形狀과 속돌幅 方向의 각 위치에 있어서切入깊이와는 密接한 관계가 있다.

그림 9는 속돌作業面形狀과 속돌各部分의切入깊이와의 幾何學的 관계를 表示한 것이다.

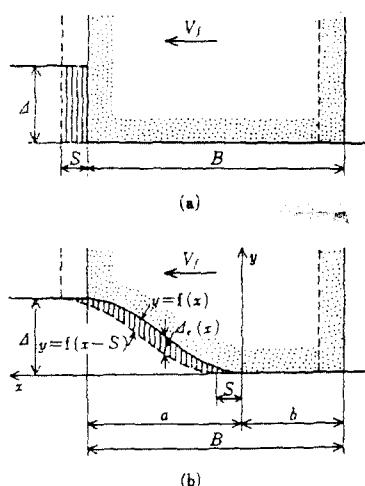


그림 9 作業面 修正속돌에 의한 橫方向 研削

그림(a)는 平坦한 속돌을 利用한 橫方向研削의 경우이다.

속돌作業面中 工作物 1回轉當의 橫方向量 f 에相當하는 前端부가 金屬除去作用의 대부분을 담당하기 때문에 이 部分에는 過大한 負荷를 받아 커다란 속돌마멸과 연삭버어닝(burning)이 일어나기 쉽다.

이것에 대해 그림(b)는 속돌作業面의一部를任意의 形狀 $y=f(x)$ 로 修正한 속돌에 의한 橫方向研削의 경우를 나타낸 것이다. 속돌作業面를 이와같이 修正하면 속돌幅 方向의各 위치에 있어서 實効切入깊이 $A_e(x)$ 는 속돌切入깊이 A 보다 작지만 金屬除去作用을 할 수 있는 部分을 넓힐 수 있기 때문에 커다란 속돌마멸과 연삭버어닝은 일어나지 않고 속돌作業面 全體를 有効하게 使用한 고능률 고정도의 橫方向研削이 가능해진다.

上述한 概念을 具體化하는 제 1 단계로 그림 10에 表示한 것과 같이 傾斜속돌에 의한 橫方向研削를 생각할 수 있다. 속돌形狀을 이와같이 修正하였을때 경사부의 實効切入깊이 $A_e = f \cdot \tan \theta$ 가 된다.

A_e 는 그림에서와 같이 零에서부터 $f \cdot \tan \theta$ 까지 直線으로 增加하고 경사부에서 一定한 値을 取한 後 平行部가 始作되는 곳에서 다시 零까지 直線으로 감소한다. 이 경우 實効切入깊이 A_e 는 속돌切入量의 영향을 받지 않고 橫方向量 f 와 경사각 θ 에 의해 定해진다.

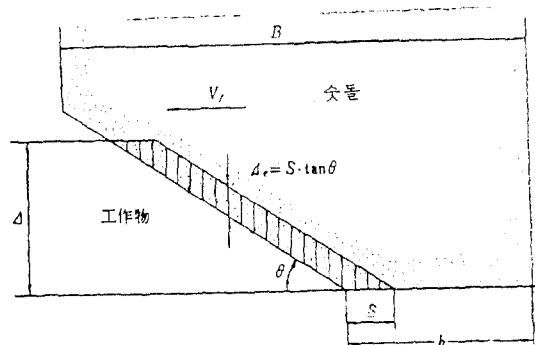


그림 10 傾斜속돌에 의한 橫方向 研削

■ 解 說

여기 平行部 b 는 表面거칠기를 改善하기 위해
必要한 部分으로 $b=4f$ 정도가 좋다.

8. 솟돌 切入速度制御 研削加工

플런지研削에서는 一般的으로 플런지速度가
一定하게 주어진다. 이러한 경우 솟돌臺 切入量
과 工作物 除去量이 다르기 때문에 切削殘量이
存在하고 그것이 研削 初期段階에서 累積되어
設定속도보다 솟돌切入量이 큰 결착현
상이 일어나 연삭精度 加工面의 거칠기 表面特性
등의 加工品質에 영향을 끼치게 된다.

따라서 加工品質을 所定의 값으로 하기 위해
研削初期段階에서 累積된 切削殘量을 解放시켜
야 한다.

方法으로 연삭사이클이 끝날때 마다 능률이
낮은 스파아크 아웃研削을 행하게 된다. 한편
累積된 切削殘量을 작게하기 위해(소정의 加工
品質을 얻기위해) 플런지속도를 작게 설정할
必要가 있다.

이 경우에도 연삭능률의低下를 피할 수 없다.
이와같이 플런지研削에 있어서 능률과 品質은
相反된 特性을 갖고 있지만 플런지 속도를 연삭
시간에 대해 연속적으로 制御함에 따라 能率과
品質을 동시에 向上시킬 수 있다.

끝으로 속도제어 연삭법은 近來에 이르러 適
應制御技法을 利用 상당한 水準에까지 와 있으

며 또한 實用化되고 있으나 그 技法이 複雜多岐
하여 이 部分만을 다음 機會에 詳述할가 한다.

참 고 문 헌

- (1) 日本機械學會・精機學會・中國四國支部 第
30回 講習會 教材, 82-7-16
- (2) 田中, 津和, 河村; 研削加工の諸條件が研削
砥石の性能に及ぼす影響について, 精機 30-
12, 1964
- (3) 岡村, 中島; 砥粒切刃による切削現象の研究
(第1報～8報), 精機, 32-4, 89, 1966～1970
- (4) 山本, 中村; 微小切削における切削開始の條
件について, 精機, 34-5, 1968
- (5) 勇田; 切削初期現象に關する基礎的研究, 精
機, 35-5, 1969
- (6) 岡村, 中島; 過渡的切削現象の解析を基にし
た研究理論, 精機(제123호)
- (7) 岡村, 中島; 研削におけるかつぎ現象につい
て, 高精度, Vol. 4, No. 2
- (8) 中島, 中川; ブランジ研削における砥石の接
触状態に關する研究(제1, 2호), 精機, 45-4
- (9) A. Galip Ulsoy, Koren, Y., and Fred Ra-
smussen; "Principal Developments in the
Adaptive Control of Machine Tool" ASME
Journal of Dyn. sys., Meas. and control, June
1983