

## 高速 内面 研削에 關한 研究

安 相 郁\*, 稻崎一郎\*\*

### A Study on The Internal High-Speed Grinding

Sang-Ook An\*, Ichiro Inasaki\*\*

#### ABSTRACT

Internal high speed grinding under several high grinding wheel speed condition has been performed in this study for the effects have analyzed and compared with the grinding power, grinding tangential force and accuracy of surface with the carbon tool steel(SK3). The following results have been obtained : (1) Under the workpiece speed constant condition, increasing the grinding speed, the tangential force is decreased, and on the contrary, accuracy of surface is improved. (2) Under the speed ratio ( $V_w/V_s$ ) contant condition it is possible to increase the high machining efficiency constraint to tangential grinding force constant.

**Key Words** : Internal high-speed grinding, High efficiency grinding, CBN wheel, Surface roughness

#### 記號說明

a	: 研削粒子間隔 (mm)	$r_d$	: 半徑 (mm)
$a_m$	: 研削칩의 平均 斷面積 ( $mm^2$ )	$V_f$	: 移送 速度 (mm/min)
C	: 常數	$V_s$	: 研削砂轮 周速度 (m/s)
$D_s$	: 研削 砂轮의 直徑 (mm)	$V_w$	: 工作物 周速度 (m/s)
$D_w$	: 工作物 直徑 (mm)	$Z'$	: 材料 除去率 ( $mm^3/s$ )
E	: Young 率 (Pa)	$\delta$	: 膨脹量 (mm)
$F_N$	: 研削抵抗 (N)	$\epsilon$	: 定數
g	: 最大 研削 칩 두께 ( $\mu m$ )	$\theta$	: 研削粒子의 進入角 (rad)
h	: 工作物 1回轉當 研削깊이 ( $\mu m/rev$ )	$\mu$	: Possion's ratio
l	: 接觸弧의 길이 ( $\mu m$ )	$\rho$	: 密度 ( $kg/m^3$ )
M	: Moment ( $N \cdot m$ )	$\omega$	: 角速度 (rad/s)

\* 仁荷大學校 工科大學 機械工學科 (정희원)

\*\* 慶應義塾大 理工學部 機械工學科

1. 序 論

研削加工의 高速化는 研削能率의 向上 및 加工面의 精密度를 改善하기 위한 目的으로 1960年代부터 큰 關心을 모아온 研削加工法이다(1), (2). 當時의 研削速度는 60~90m/s로서 이는 研削숫돌의 破壞強度에 큰 制約을 받아 왔다. 그러나 近年에 많이 普及되고 있는 CBN 및 다이아몬드 숫돌은 中心 코어部分이 金屬으로 製作되어 있기 때문에 숫돌의 強度가 높아 比較的 容易하게 高速回轉이 可能토록 되어 있으며 研削盤의 構造 및 主軸도 改良되어 150m/s~200m/s의 研削速度로서 一部 實用化하고 있다. 이러한 高速研削은 주로 圓筒研削의 例이며 本 研究에서는 內面研削에서 高速研削을 할 때 高速化의 效果를 確認하기 위하여 基礎實驗을 하였다. 特히 內面研削은 다른 研削法에 비해서 숫돌 主軸의 剛性이 낮고 研削效率과 加工精密度를 向上시키기 어려운 研削法이기 때문에 高速研削을 하므로서 研削效果가 期待되는 研削法이라고 생각된다.

따라서 本 研究에서는 비트리화이트 본드 CBN 숫돌을 使用하여 SK3 炭素工具鋼을 高速內面研削을 하므로서 숫돌 周速度의 高速化에 의한 效果를 研削動力과 研削抵抗 그리고 表面精密度 및 加工面 性狀등의 觀點으로부터 實驗的으로 比較 檢討하였다.

2. 研削速度의 高速化에 의한 效果 및 問題點

研削速度의 高速化에 의한 效果는 研削 칩 斷面續에 의해서 쉽게 說明할 수 있다. 研削粒子에 의해서 生成되는 平均 칩 斷面續을 表面 研削의 境遇

$$a_m = (V_w / V_s) \cdot [h(1/D_s - 1/D_w)]^{1/2} \quad (1)$$

로 表記할 수 있다(3). 研削速度  $V_s$ 를 增加시키면 平均 칩 斷面續은 減少하고 研削粒子에 作用하는 研削抵抗도 減少할 것으로 豫想된다. 研削粒子에 作用하는 힘이 작아지면 숫돌粒子의 破壞 또는 脱落이 減少하며 따라서 加工面의 表面精密度가 向上될 것으로 豫想된다. 그러나 研削速度의 增加는 研削粒子의 進入角이 減少하기 때문에 研削材의 각입새(研削性)가 불량하다는 것에 有意하여야 하며, 우선 最大 研削깊이를 考慮할 必要가 있다.

이 最大 研削 깊이는 숫돌 粒子 1個가 研削材를 어느정도 研削하는가를 表示하는 Parameter로서 다음 式으로 表現된다.

$$g = 2a \cdot (V_w / V_s) \cdot [h(1/D_s + 1/D_w)]^{1/2} \dots \dots \dots (2)$$

또한 接觸弧의 길이  $l$ 가

$$l = [h / (1/D_s + 1/D_w)]^{1/2} \dots \dots \dots (3)$$

임을 利用하면 上向研削에서 進入角  $\theta$ 는 近似的으로

$$\theta \cong g / l = 2a \cdot V_w / V_s \cdot (1/D_s + 1/D_w) \quad (4)$$

가 된다. 단, 윗 式은  $V_w \ll V_s$ 이며 研削 깊이가 큰 境遇에 成立하는 近似的이다. 式 (4)로부터 알 수 있는 바와 같이 숫돌速度의 增加는  $\theta$ 를 減少시키며 이는 研削粒子의 研削材에 대한 Rubbing 現狀을 促進시키는 原因이 된다. 그러나 研削 숫돌 速度의 增加와 더불어 工作物 速度를 增加시키면서  $V_w / V_s$ 를 一定하게 維持하면 進入角  $\theta$ 는 變化하지 않는다. 이와같이 高速研削의 優越性을 有效的으로 使用하는 目的으로는 다음 두가지로 要約할 수 있다.

첫째, 高速研削은 從來 研削의 精密保存의 安定性과 숫돌의 壽命을 延長하기 위해서 使用하고 둘째, 研削加工의 高能率化를 目的으로 高速研削을 使用한다. 前者에 대해서는 앞에서 說明한 바와 같이 Rubbing 現狀을 促進하는 原因이 되기 때문에 研/削粒子의 Glazing 또는 研削過熱(Burning)이 發生되는 問題가 豫想된다. 따라서 後者の 目的을 達成시키기 위하여 高速 研削을 하는 것이 보다 現實的이라고 생각된다. 또한 高速 研削에 의한 高能率 加工의 原理는 다음과 같이 說明할 수 있다.

研削抵抗과 研削 숫돌 速度, 工作物 速度 및 研削 깊이가 사이에는 다음 式과 같은 관계가 있다(4).

$$F_N \propto (V_w / V_s)^{1-\epsilon} \cdot h^{(1-\epsilon)/2} \dots \dots (5)$$

여기서  $\epsilon$ 는 定數이다.

工作物 1回轉當의 研削깊이  $h$ 는

$$h = \pi D_w \cdot (V_f / V_w) \dots \dots \dots (6)$$

로 表示되므로 式(5)는

$$F_N \propto (V_w / V_s)^{1-\epsilon} \cdot (V_f / V_w)^{(1-\epsilon)/2} \dots \dots \dots (7)$$

와 같이 쓸수 있다.

圓筒 및 內面研削에서 單位 幅當의 除去率  $Z'$ 는

$$Z' = V_w \cdot h = \pi D_w V_f \dots \dots \dots (8)$$

가 되며 숫돌 移送速度  $V_f$ 에 比例한다.

이때 除去率을 높이기 위해서 移送速度  $V_f$ 를 증가시키면 式(7)과 같이 研削抵抗은 增大하게 된다. 그러나 동시에 式(6)의 研削깊이를 一定하게 維持하면서 工作物 速度를 증가시키면 式(7)의 第2項을 一定하게 할 수 있다. 그런데 이때 第1項이 增大되므로 숫돌速度  $V_s$ 를 증가시키므로서 研削抵抗을 一定하게 維持하면서 高能率加工이 可能하다.

또한 表面 精密度 및 숫돌마모에 관하여는 平均 칩 斷面積을 考慮하여야 한다. 칩의 平均 斷面積은

$$a_m \propto (V_w/V_s) \cdot (h/D_w)^{1/2} \propto (V_w/V_s) \cdot (V_f/V_w)^{1/2} \dots\dots(9)$$

로 表示되므로 研削 숫돌 速度의 增加와 더불어 동시에 工作物 速度 또는 移送速度  $V_f$ 를 증가시키므로서  $a_m$ 을 一定하게 維持할 수 있다. 이와같이 能率向上을 目的으로 하는 境遇에는 加工條件을 設定하는데 있어서 檢討할 必要가 있다. 숫돌 速度를 증가시키므로서 위와 같은 效果가 期待되는 반면 숫돌 速度의 高速化로 因한 몇가지 問題點도 있다. 우선 加工面 精度面에서 보면 遠心力에 의한 숫돌의 膨脹이 問題가 된다. 숫돌 膨脹은 研削깊이에 直接 影響을 준다. 特히 Dressing 할 때와 研削時의 숫돌 回轉數가 다른 境遇에는 注意가 必要하다. 가장 간단한 境遇로서 숫돌을 中實 圓板으로 假定하여 回轉할 때 생기는 最外周部の 膨脹量  $\delta$ 는 다음 式으로 주어진다<sup>(5)</sup>.

$$\delta = 1 - (\mu/4E) \cdot \rho \cdot \omega \cdot r_d^3 \dots\dots(10)$$

式(10)과 같이 膨脹量은 숫돌 半徑의 3乘에 比例하여 增大되므로 直徑이 큰 숫돌보다는 숫돌의 速度를 높이는 편이 膨脹을 減少시킬 수 있음을 알 수 있다.

다음에 숫돌을 高速 回轉시키므로서 周圍의 空氣 및 研削液과의 摩擦로 因한 動力損失이 생긴다. 高速回轉일수록 이러한 動力損失은 無視할 수 없을 程度로 큼을 알 수 있다. 위에서와 같은 숫돌을 中實圓板으로 假定할 때 空氣와의 摩擦에 의해서 생기는 Moment는<sup>(6)</sup>

$$M \propto \omega^{3/2} \cdot r_d^4 \dots\dots(11)$$

가 되어 역시 숫돌 크기에 대한 影響이 큼을 알 수 있다. 이상의 考察로부터 알 수 있는 바와 같이 숫돌 回轉數를 높여 周速度를 증가시키는 편이 效果的이다.

### 3. 實驗裝置 및 實驗方法

實驗에 使用한 研削盤은 高速 內面研削盤(岡本工作

機械製作所, NC內面研削盤 IGM-2M)을 主軸부와 工作物 固定部分을 高速形으로 改造한 것이다. 숫돌主軸 高周波 스피들은 70,000rpm까지 上昇 可能하며 使用한 CBN 숫돌徑이 40mm이므로 最高 周速度는 140m/s까지 研削이 可能하다. 加工物은 安全對策上 加工物 驅動軸에 볼트로 固定하였으며 研削液의 供給 노즐도 改良하여 使用하였다. Fig. 3-1은 本 實驗 시스템의 概略圖이다.

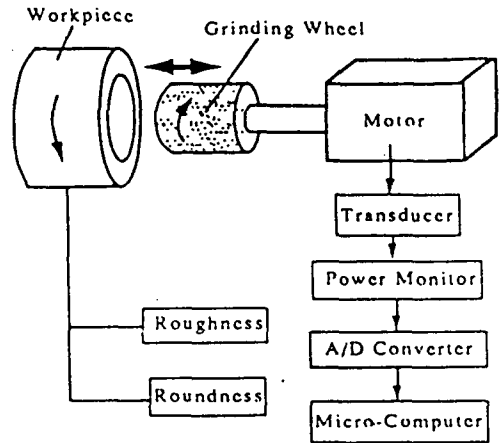


Fig. 3-1 Experimental set-up

Table 3-1. Experimental conditions

Wheel	CBN Wheel(B170J125V) Diameter : 40mm, Width : 5mm
Workpicce	SK3, Inner Diameter : 8mm, Width : 10mm
Grinding Conditions	Wheel Speed : 30, 45, 60, 75, 90m/s Workpicce Speed : 0.52, 0.78, 1.04, 1.30, 1.56m/s Depth of Cut : 0.5, 0.75 $\mu$ m/rev Speed Ratio ( $V_w/V_s$ ) : $1.73 \times 10^{-2}$ Oscillation : 50strokes/min Spark-out Time : 0, 1.5sec
Dressing	Stick Dresser (C220G8V : 50 $\times$ 25 $\times$ 25mm)
Lubricnat	SA-02 (NORITAKE)

숫돌의 Truing은 特別히 製作된 다이아몬드 Truing 工具를 使用하였고 Dressing은 四角 棒狀 Dresser를

使用하였다. 研削中の 消費動力은 숫돌主軸 Motor部에서 檢出(Valemite 720-002/305)하였으며 加工面の 評價는 表面 거칠기의 測定(Mitsutoyo surfstest 401)과 眞圓度 및 圓筒度を 測定(Mitsutoyo round test RA-600)하였다. 加工物은 工具鋼 SK3(HrC 63)이며 研削條件은 Table 3-1과 같다.

4. 實驗結果 및 考察

4-1 研削抵抗

本 實驗에서는 研削面の 形狀精度를 向上시키기 위해서 테이블을 往復運動 시키면서 研削깊이를 주는 Oscillation 研削을 하였다. 또 高速研削의 效果를 確認하기 위하여 숫돌 周速度만을 增加시켰을 때와 速度比를 一定하게 維持하기 위하여 工作物 速度도 同時에 增加시켜 研削했을 때 研削抵抗과 加工面의 形狀精度를 實驗 檢討하였다. Fig. 4-1은 숫돌 周速度만을 90m/s까지 增加시켰을 때의 接線方向 研削抵抗이다. 接線 研削 抵抗은 研削動力과 숫돌 周速度로부터 算出한 값으로서 Fig. 4-1에서 보는 바와 같이 研削抵抗은 各 研削깊이에 관계없이 숫돌 周速度의 增加와 더불어 減少하므로서 式(1)과 같이 豫測한 대로 高速 研削의 效果가 確認되었다. 또한 Fig. 4-2는 同時에 工作物 速度도 增加시켜 速度比  $V_w/V_s = 1.73 \times 10^{-2}$ 으로 一定하게 維持했을 境遇의 結果이다. 역시 豫測한대로 研削抵抗은 거의 一定한 값을 나타내고 있다. 이때의 材料 除去率도 Fig. 4-3과 같이 加工物 周速度가 一定할 때에는 거의 變化가 없지만 加工物 速度가 增加하여 速度比가 一定할 때에는 材料 除去率이 增加하므로서 高能率 加工이 可能함을 보여주고 있다. Fig. 4-4는 工作物 速度를 1.04m/s, 研削깊이 h를 0.75  $\mu\text{m}/\text{rev}$ 로 研削했을 때에 各 研削速度에 대한 研削動力值를 測定한 結果로서 그림에서 보는 바와 같이 高速 回轉시켰을 때 無負荷時의 動力損失이 있음을 확인됐다. 이는 숫돌이 高速 回轉하면서 往復運動할 때에 숫돌 側面에 걸리는 空氣抵抗의 影響이라고 생각되며 이러한 空氣抵抗은 式(11)에서 說明한 바와 같이 숫돌徑이 클수록 甚하기 때문에 같은 周速度를 얻는 境遇에는 숫돌의 周速度를 높이고 直徑이 작은 숫돌을 使用하는 편이 有利하며 高速內面研削을 할 때에는 이러한 숫돌의 空氣抵抗에 대한 檢討가 必要하다고 생각된다.

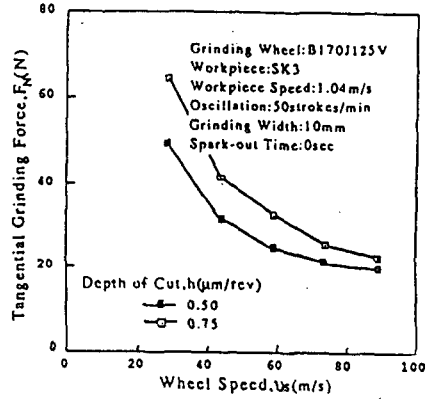


Fig. 4-1 Relationship between wheel speed and tangential grinding force ( $V_w$ : constant)

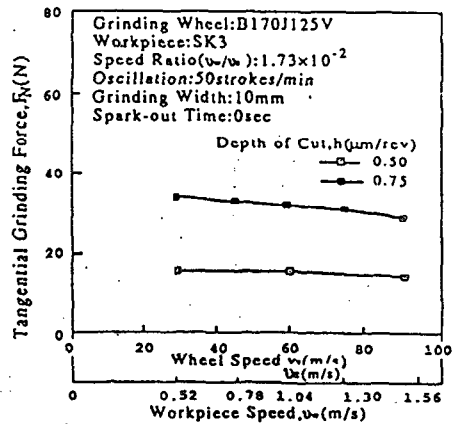


Fig. 4-2 Relationship between wheel speed and tangential grinding force ( $V_w/V_s$ : constant)

4-2 表面粗度, 圓筒誤差 및 眞圓度

研削숫돌의 周速度가 表面거칠기에 미치는 影響을 Fig. 4-5 및 Fig. 4-6에 표시하였다. Fig. 4-5는 工作物 速度가 一定할 때, Fig. 4-6은 速度比가 一定할 때에 대한 表面거칠기로서 Spark-out 研削을 했을 때에도 高速研削의 效果가 크을 알 수 있다. 즉 表面거칠기만을 向上시키기 위해서는 숫돌 周速度만을 增加시키는 것이 效果의이며, 表面거칠기를 一定하게 維持하면서 加工能率을 向上시키기 위해서는 加工物 速度도 同時에 增加시켜 速度比를 一定하게 維持하는 것이 效果의 임을 알 수 있다.

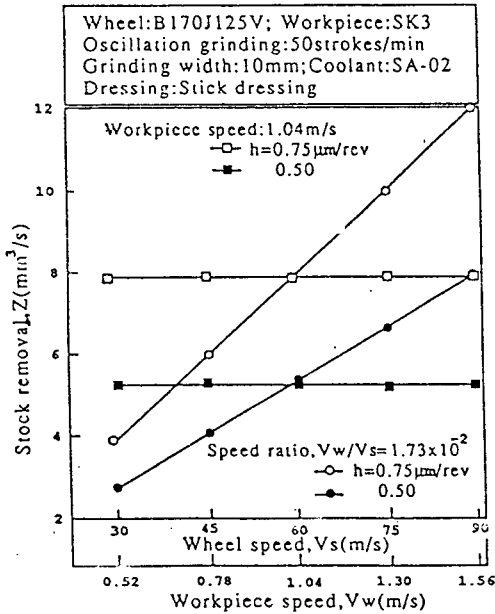


Fig. 4-3 Relationship between grinding wheel speed and stock removal

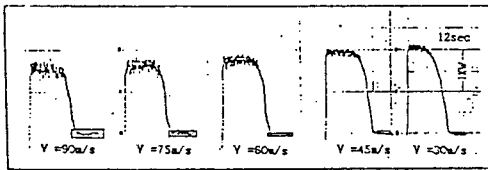


Fig. 4-4 Effect of air resistance ( $V = 1.04\text{m/s}$ ,  $h = 0.74\mu\text{m/rev}$ )

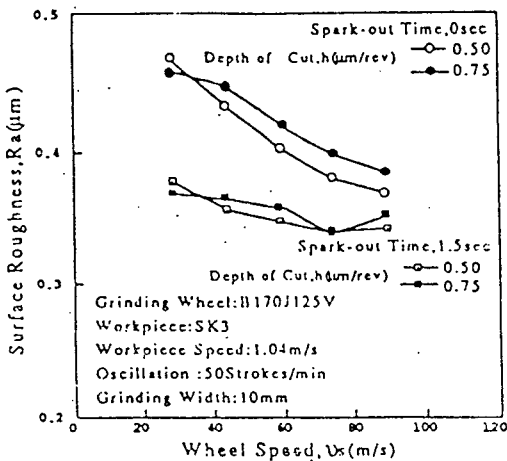


Fig. 4-5 Relationship between wheel speed and surface roughness ( $V_s$  constant)

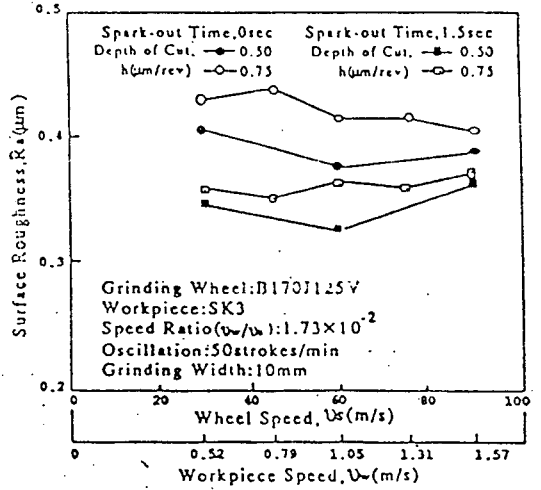


Fig. 4-6 Relationship between wheel speed and surface roughness ( $V_s/V_w$  constant)

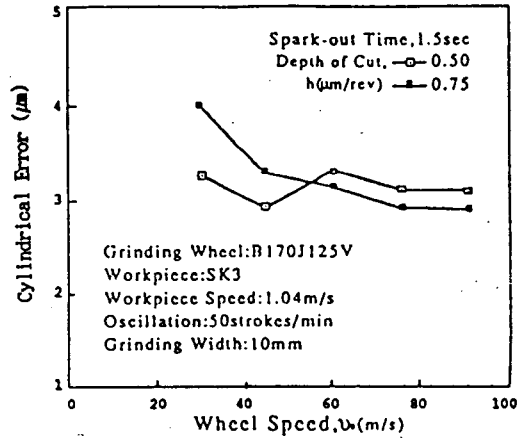


Fig. 4-7 Relationship between wheel speed and cylindrical error ( $V_w$  constant)

Fig. 4-7 및 Fig. 4-8은 圓筒誤差를 測定한 結果이다. Fig. 4-7에서 보는 바와 같이 加工物 速度가 一定할 때에는 研削抵抗의 減少效果로 因해서 圓筒誤差가 減少되고 있음이 研削깊이 0.75  $\mu\text{m/rev}$ 에서 確認되었다. 한편 速度比가 一定할 때에는 圓筒誤差가 거의 一定함을 볼 수 있다. 여기서 생기는 圓筒誤差는 어느 경우에도 슯돌 進入側의 加工物 內徑이 커지는 現狀이라고 생각된다.

Fig. 4-9 및 Fig. 4-10은 眞圓度を 測定한 結果이다. 眞圓度は 主로 研削中의 振動에 의해서 不良하게 된다고 생각된다. 特히 顯著한 振動이 發生하지 않으면 砂轮 周速度의 高速化에 의한 效果가 나타난다고 생각된다. 測定結果도 그러한 豫測을 뒷받침 해주고 있으며 加工物 速度가 一定할 때와 速度比가 一定할 때 모두 眞圓度は 거의 變化하지 않고 있음을 볼 수 있다.

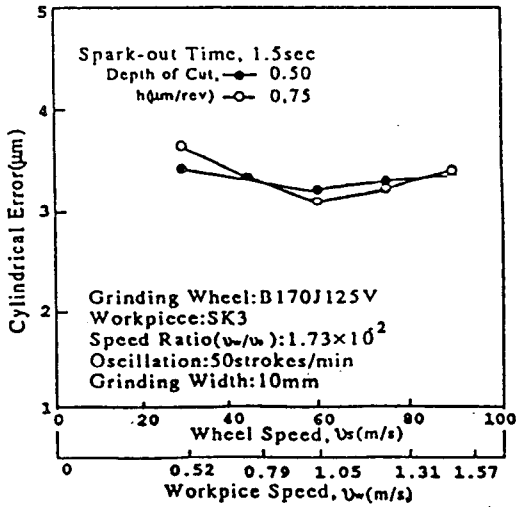


Fig. 4-8 Relationship between wheel speed and cylindrical error ( $V_w/V_s$  constant)

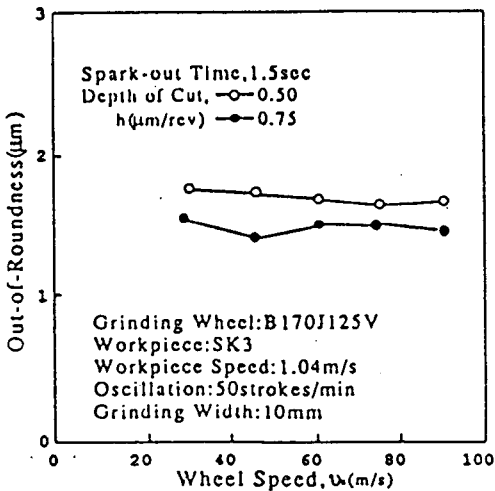


Fig. 4-9 Relationship between wheel speed and out-of-roundness ( $V_w$  constant)

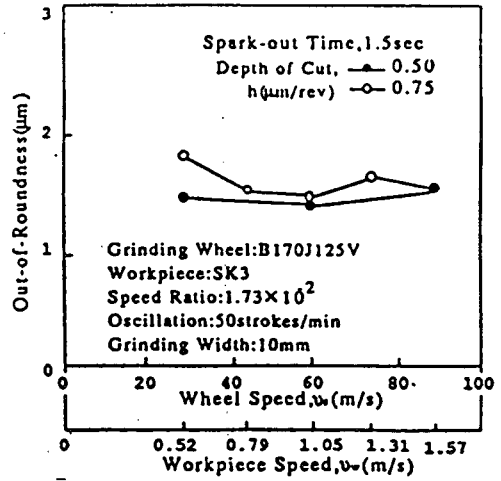


Fig. 4-10 Relationship between wheel speed and out-of-roundness ( $V_w/V_s$  constant)

### 5. 결 론

高速 内面研削에 있어서 研削砂轮의 周速度를 高速化할 때에 高速研削의 效果를 實驗 檢討한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 工作物 速度가 一定할 때 研削速度를 高速化하므로써 研削깊이에 關係없이 接線 研削抵抗을 減少시킬 수 있다.
2. 速度比가 一定할 때 高速研削을 하므로써 接線 研削抵抗을 一定히 維持하면서 材料의 除去率이 增加하며 高能率 加工이 可能하다.
3. 工作物 速度가 一定할 때 研削速度를 增加시키면 表面거칠기는 向上되나, 表面거칠기를 一定하게 維持하면서 高能率 加工을 하기 위해서는 速度比를 一定하게 維持하는 것이 效果의이다.
4. 高速研削을 하므로써 圓筒度의 誤差는 減少하였으나 眞圓度は 큰 變化가 없음을 確認하였다.

### 후 기

本 研究는 教育部의 1991年度 特性學科 教授 海外 研修課題로 1991年 10월부터 1992年 9월까지 1年間 研究한 論文으로서 教育部에 感謝드립니다.

참고문헌

1. H. Opitz, W. Ernst and K. F. Meyer, "Grinding at High Cutting Speed", Proceeding of The 6th International M·T·D·R Conference(1965) PP.581~595
2. H. Opitz, "New development in High-Speed Grinding", SME, Technical Paper, MR-70-181 (1970)
3. 小野浩二, "研削仕上", 慎書店(1959) PP.7~11
4. G. Werner, "Influence of Work Material on Grinding Force", Annals of The CIRP, 27-1 (1978) PP.243
5. テンヘルトック(水野譯), "應用材料力學", 養賢堂(1971) PP.58
6. 伊藤, 本田, "流體力學", 丸善(1981) PP.99