

<논 문> SAE NO. 943772

内面研削의 加工能率向上에 관한 연구

A Study on the Internal Grinding to Improving the Grinding Efficiency

김 건 회,* 강 재 훈,* 안 상 욱,* 박 종 권**
G. H. Kim, J. H. Kang, S. O. An, J. K. Park

ABSTRACT

This paper describes on the establishment of an optimal internal grinding conditions for the purpose of improving the grinding efficiency against to the high-speed grinding. Through the fundamental grinding tests for the brittle and hardened material, we are concluded that high-speed internal grinding is effective to improve the grinding accuracy as well as the grinding efficiency. The obtained results are as follows :

- (1) Under the speed ratio(V_w/V_g) is constant, it is possible to increase the grinding efficiency with satisfying the constraint conditions.
- (2) Increasing the wheel velocity, surface roughness and out-of-roundness are improved.
- (3) Under the wheel depth of cut is constant and increasing the speed ratio, workpiece residual stress is decreased.

The described method, in this paper, is capable of determining the optimum internal grinding conditions taking into account some constraint conditions, and practical algorithm for optimum internal grinding conditions are presented.

주요기술용어 : Optimum Internal Grinding Condition(최적 내면연삭조건), Grinding Efficiency(가공능률), Surface Roughness(표면조도), Out-of-Roundness(진원도), High-Speed Grinding(고속연삭)

1. 서 언

최근 첨단산업분야의 주요핵심부품들은 대부분이 다양한 기능성과 높은 신뢰도가 요구되고

있다. 이러한 소재들은 거의 난삭재이나 새로운 가공공구의 개발에 힘입어 정밀가공 분야에 있어서도 생산성향상의 면에서 高速·高能率化하는 경향에 있다. 이와같은 난삭재 가공은 대부

* 한국기계연구원 자동화연구부

** 인하대학교 기계공학과

분이 연삭에 의하여 이루어지고 있으며, 이는 급속히 증대된 수송기관, 특히 자동차, 항공기 등은 더욱 고성능화 되어가고 있다. 이러한 추세에 따라 요구되는 부품의 정밀도도 더욱 까다로와지고 있으며 그 수명 역시 보다 높은 내구성이 요구되어 난삭재로 대체화하고 있다. 따라서, 이러한 난삭재의 高速·高能率化에 의한 고정도가 공이 요구되고 있다.

연삭의 고성능화를 도모하기 위해서는 스톨의 주속도를 고속화하는 것이 효율적이다. 이러한 高速·高能率加工에 관한 연구¹⁾는 1960년부터 이루어졌으나, 그당시는 스톨의 破壞強度가 최대의 난점으로되어 큰 성과는 얻지 못했다. 그러나, 최근에 와서 다이아몬드나 CBN스톨의 개발에 의해 각종 난삭재의 고성능가공이 실현되게 되었다.

내면연삭의 경우에 있어서는 다른 연삭에 비하여 스톨주축의 강성이 낮아 가공능률과 가공정도를 동시에 만족하기 힘들다. 그러나, 코어부가 금속재인 초지립 스톨이 개발되어 현저한 강도향상을 가져와 고속화로의 실현이 가능해졌다. 이러한 연구를 통한 주축시스템의 개선에 의해 150m/s-200m/s 정도의 고속연삭이 가능해졌고, 실험적 단계로는 500m/s의 초고속연삭도 이루어지고 있다.²⁾

따라서 본 연구에서는 내면연삭에 대하여 일반강재를 비롯한 난삭재 가공에 있어 加工品位를 충족시키면서 가공능률을 극대화할 수 있는 최적가공조건의 설정법을 제시한다.

2. 가공능률 향상을 도모하기 위한 이론적 해석

2.1 가공능률 향상의 도모

내면연삭의 가공능률을 단위시간당의 공작물 제거량으로 정의하는 경우, 단위 시간당의 연삭량 Z 는

$$Z = B \cdot h \cdot V_w / B \tag{1}$$

로 주어진다. 여기서, B : 공작물의 폭, h : 스톨의

절입량, V_w : 공작물 주속도이다. 공작물의 제거량을 목적함수로 한 가공능률의 극대화는 스톨의 최대허용 속도에서 최적의 절입량과 공작물 속도를 구하면 된다.

스톨 주속도를 고속화함으로써 가공능률 측면에서 기대되는 효과는 가공시에 발생하는 칩의 평균단면적으로 유도되는 식으로 설명할 수 있다. 그림 1은 칩의 평균단면적을 幾何學的으로 표현한 것이다. 즉, 단위 지립입자에 의해 발생하는 칩의 평균단면적을 a_m 이라하면,

$$a_m = V_w / V_g \cdot 1/C \cdot [h(1/d_g - 1/d_w)]^{1/2} \tag{2}$$

로 주어진다. 여기서, V_w : 공작물 주속도, V_g : 스톨 주속도, h : 절입량, C : 스톨작업면상의 단위면적당의 지립의 수, d_w : 공작물의 직경, d_g : 스톨의 직경이다.

식 (1)에서 칩의 평균단면적은 크게하는 가공조건을 설정하면 각각의 지립에 작용하는 연삭력을 증대되어 지립절인의 파괴나 탈락현상이 증대되므로 연삭특유의 원활한 지립의 自生切刃作用(Self-Generation)이 기대된다. 그러나, 너무 지나치게 되면 역으로 지립의 Falling 상태가 된다. 한편으로 칩의 평균단면적이 지나치게 작게되는 가공조건을 설정하면 지립에 작용하는 연삭력이 작아져 지립절인의 마멸적 마모가 현저해져, 심한 경우에는 눈메움>Loading) 상태를 유발하게 된다.

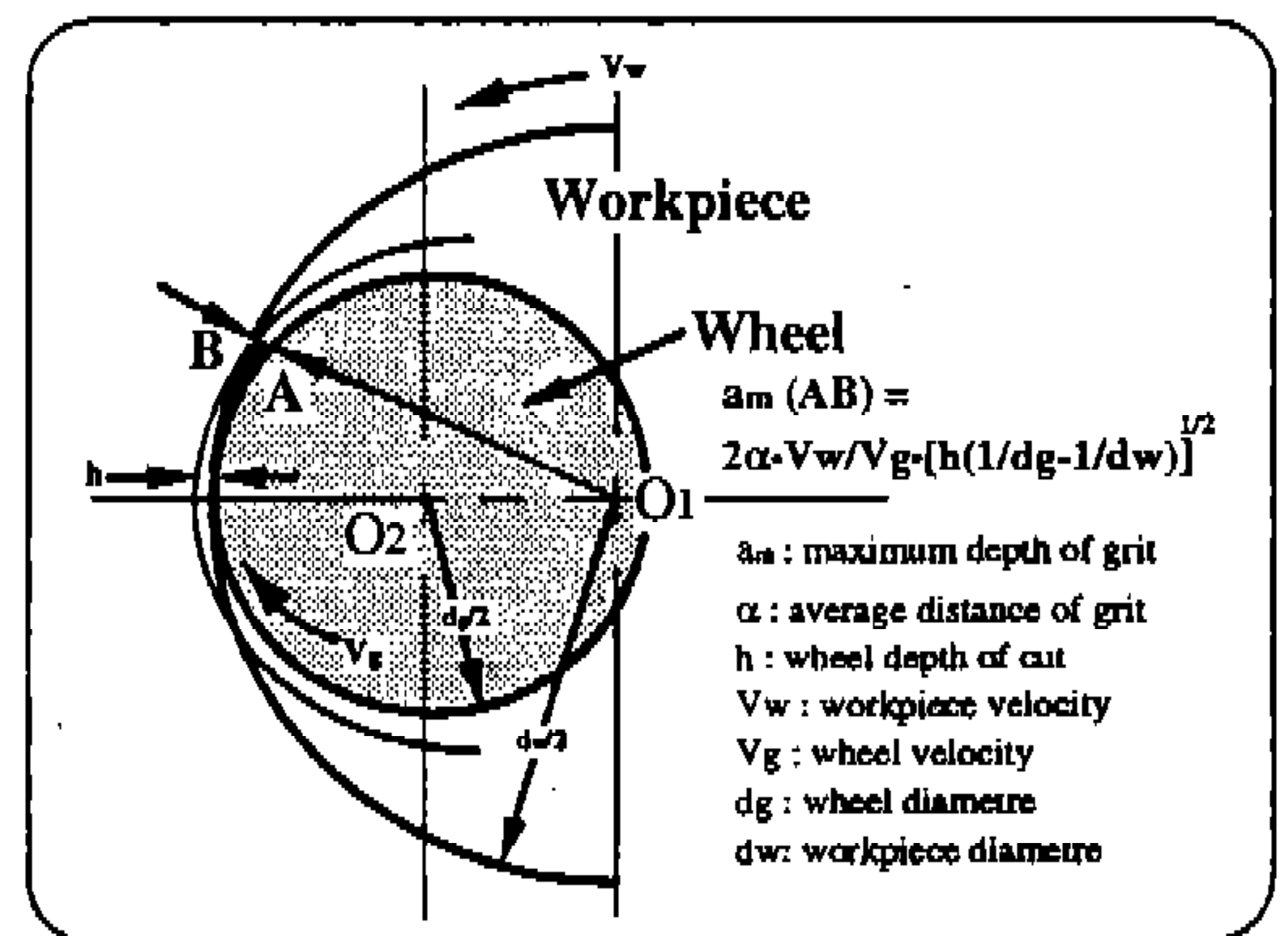


Fig.1 Diagram of average sectional area of grit for internal grinding

그러나, 슷돌주속도를 증대시키는 경우 식 (1)에서와 같이 칩의 평균단면적이 감소되어 절입량과 연삭폭이 일정한 경우, 슷돌과 가공면의 접촉면적도 일정하게 되고 연삭저항은 감소하게 되어 위의 현상을 억제할 수 있다.³⁾ 연삭저항의 감소효과는 직경이 매우작은 가공물의 원통연삭이나 슷돌직경이 작고, 강성이 낮은 내경연삭 가공시 가공정도를 향상시키고자 할때 대단히 중요한 관건이 된다. 또한, 칩의 평균단면적이 작으면 가공면의 표면조도나 진원도등의 가공품위 향상을 기대할 수 있다. 한편, 슷돌 주속도의 증가에 비례하여 가공물 주속도를 증가시키면, 즉 속도비 $V_w/V_g = \text{Constant}$ 로 되므로 식 (2)에서와 같이 칩의 평균단면적이 일정하게되어 연삭저항 역시 일정하게 유지된다. 그리고, 이때 가공물 주속도에 비례하여 공작물제거량이 증대되어 가공능률은 향상된다. 따라서, 슷돌 주속도의 고속화에 의한 가공품위의 향상과 가공능률의 증대효과가 기대된다.

그리고, 슷돌 주속도의 고속화에 따른 문제점으로, 원심력의 증대에 따른 슷돌의 팽창과 고속회전에 따른 연삭액과 공기저항의 영향력을 들 수 있다. 즉, 슷돌의 회전에 따른 最外周面의 팽창력⁴⁾은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\delta = (1-\mu)/4E \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r_g^3 \quad (3)$$

여기서, μ : 슷돌의 Poisson Ration, E : Young Modulus, ρ : 밀도, ω : 회전각속도, r_g : 슷돌반경이다. 팽창량은 슷돌반경의 3승에 비례하여 증대하므로 슷돌주속도의 상승은 슷돌의 팽창력의 증대를 초래한다. 따라서, 동일한 슷돌 주속도를 얻고자하는 경우 팽창력을 고려하여야하므로 직경을 작게하고 회전수를 고속화하는 것이 바람직하다. 다음으로, 공기의 마찰에 의해 발생하는 모멘트⁵⁾는

$$M \propto \omega^{3/2} \cdot r_g^4 \quad (4)$$

로 표현되며, 이는 슷돌 직경의 4승에 비례하므로 슷돌의 회전수를 증대시키는 것이 효과적임을 알

수 있다.

내면연삭에서 가공능률을 향상시키기 위해서는 슷돌의 주속도는 슷돌의 원심파괴, 연삭반의 사양(구동모터의 용량이나 강성등)을 고려하여 최고속도를 설정하는 것이 바람직하다. 식 (2)의 幾何學的 理論에서 동일한 슷돌의 직경으로 특정의 공작물을 가공하는 경우, 가공조건 인자의 조합만을 도출하여 ϕ 라 하면

$$\phi = V_w/V_g \cdot [h \cdot (1/d_g - 1/d_w)]^{1/2} \quad (5)$$

으로 표현된다. 여기서, ϕ 는 공작물과 슷돌의 종류에 관계없는 가공조건만이 고려된 변수항이다.

$$V_w = (V_g \cdot \phi) / [h \cdot (1/d_g - 1/d_w)]^{1/2} \quad (6)$$

로 표현되며, 식 (6)을 식 (1)에 대입하면

$$Z = h \cdot V_w = h^{1/2} \cdot (V_g \cdot \phi) / (1/d_g - 1/d_w)^{1/2} \quad (7)$$

로 주어진다. 같은 방법으로

$$Z = V_w^{-1} \cdot (V_g^2 \cdot \phi^2) / (1/d_g - 1/d_w) \quad (8)$$

로 표현된다. 즉, 식 (7)과 (8)으로부터 알수 있듯이 가공능률을 나타내는 식 (1)에서 가공폭이 일정한 경우 $Z = V_w \cdot h = \text{Constant}$ 로 주어지므로 가공능률에 미치는 영향은 슷돌의 절입량이 공작물 주속도보다 큼을 알 수 있다. 따라서, 이 두가공조건이 최적의 組合이 되도록해야 한다. 그리고, 지립의 평균절입깊이 ϕ 와 표면조도와의 관계를 회귀분석으로 구하여 상관관계를 구한것이 그림 2이다. 이 결과와 같이 본 연구에서 제시한 기하학적 이론으로 도출한 ϕ 와 표면조도와의 양의 상관관계인 상관계수 $R=0.935$ 으로 식 (1)을 가공조건인 변수항으로 된 식 (5)로 표현 가능함을 알 수 있다.

한편 표면조도를 만족하면서 가공능률을 최대화하기 위해서는 그림 3과 같이 이론적인 표면조도 等倍曲線상에서 최적의 가공조건을 설정하면 된다. 그러나, 실제로 슷돌 절입량의 어느 한

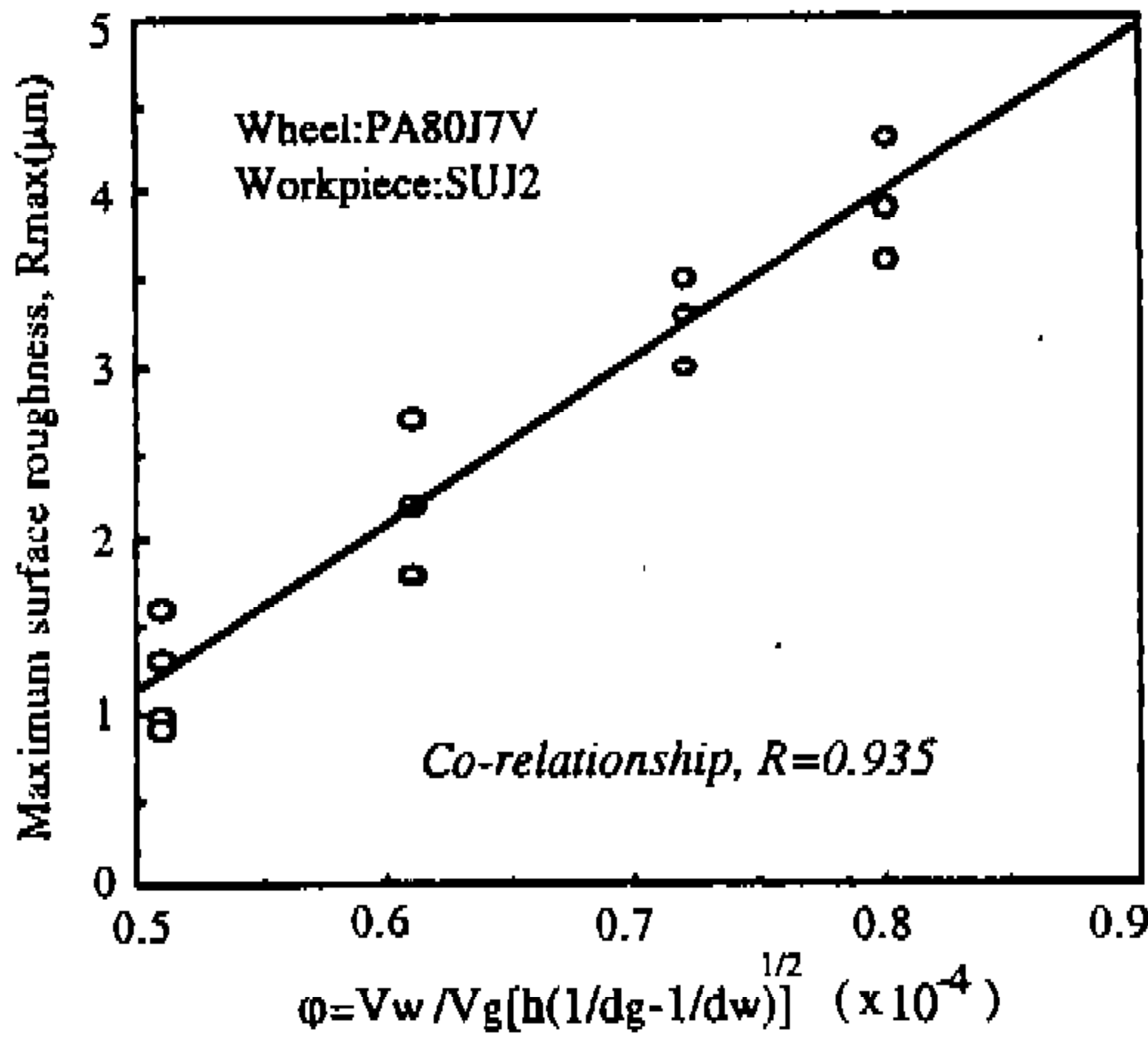


Fig.2 Co-relationship between the average sectional area of grit and the maximum surface roughness

계에서는 요구하는 표면조도를 초과하는 한계가 존재함을 알 수 있다. 따라서, 가공능률을 극대화하는 최적가공조건을 설정도 이러한 구속조건을 고려해야 한다.

2.2 회귀분석의 도입

가공조건이 가공정도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 회귀분석에 의한 실험적 고찰을 하였다. 가공조건이 표면조도에 미치는 영향은 선형 대수일 때 가장 상관계수가 크며 다음과 같다.

$$\ln R_{max} = \alpha + \beta \ln h + \gamma \ln V_w \quad [r=0.980] \quad (9)$$

또한 공작물 1회전당의 절입량 h 가 진원도 R_d 에 영향을 미치며, 회귀분석의 결과, 다음과 같은 식으로 표현될 때 상관계수가 가장 높은 값을 얻는다.

$$R_d = \alpha' + \beta' d \quad [r=0.934] \quad (10)$$

여기서, 식 (10)과 (11)의 α, α' 는 회귀식의 정수이며, β, β' 는 계수를 의미한다. 따라서, 식 (10)에서 공작물의 내경을 d_w , 공작물의 회전수를 n_w 라 하면

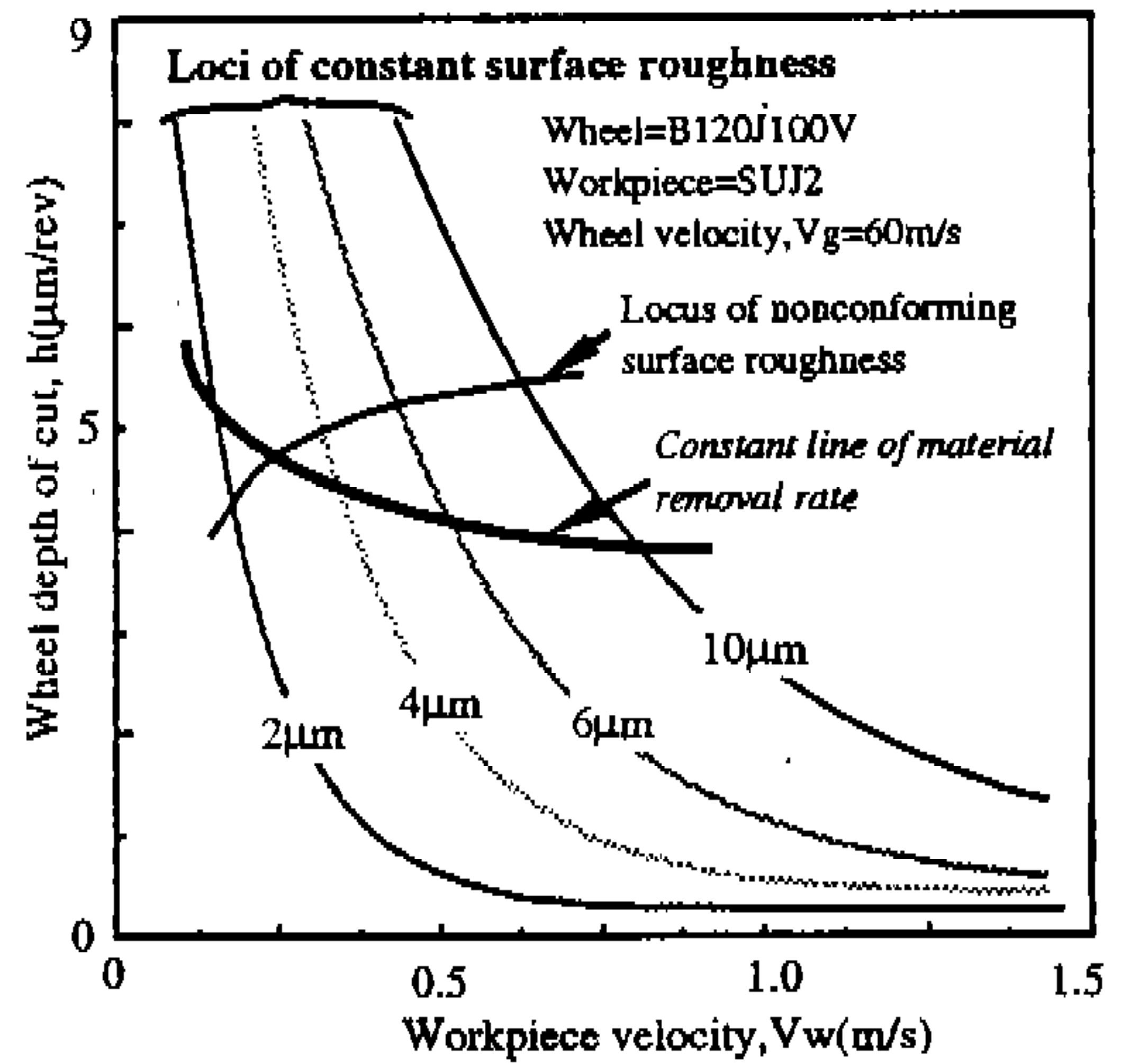


Fig.3 Loci of constant surface roughness

$$d = h/n_w = h \cdot \pi \cdot d_w/V_w \quad (11)$$

으로 표현된다. 여기서 식 (11)을 식 (10)에 대입하면

$$R_d = \alpha' + \beta' h \cdot \pi \cdot d_w/V_w \quad (12)$$

가 된다. 따라서 R_{max} 와 R_d 가 주어지고 식 (9)와 식 (12)을 V_w 에 대하여 풀면

$$V_w = e^{-\alpha/\gamma} \cdot R_{max}^{1/\gamma} \cdot h^{-\beta/\gamma} \quad (13)$$

$$V_w = \{\pi\beta' \cdot d_w / (R_d - \alpha')\} \cdot h \quad (14)$$

이 된다. 따라서 h 와 V_w 의 관계가 주어진다. 위와 같은 식에 실험에서 얻어진 값을 대입하여 작성한 것이 그림 10이다.

3. 실험적 고찰 및 검토

3.1 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 연삭반은 고속 연삭반인 岡本 NC 내면연삭반으로 주축부와 공작물 주축대를 고속형으로 개조하여 사용하였다. 슷들의 주축

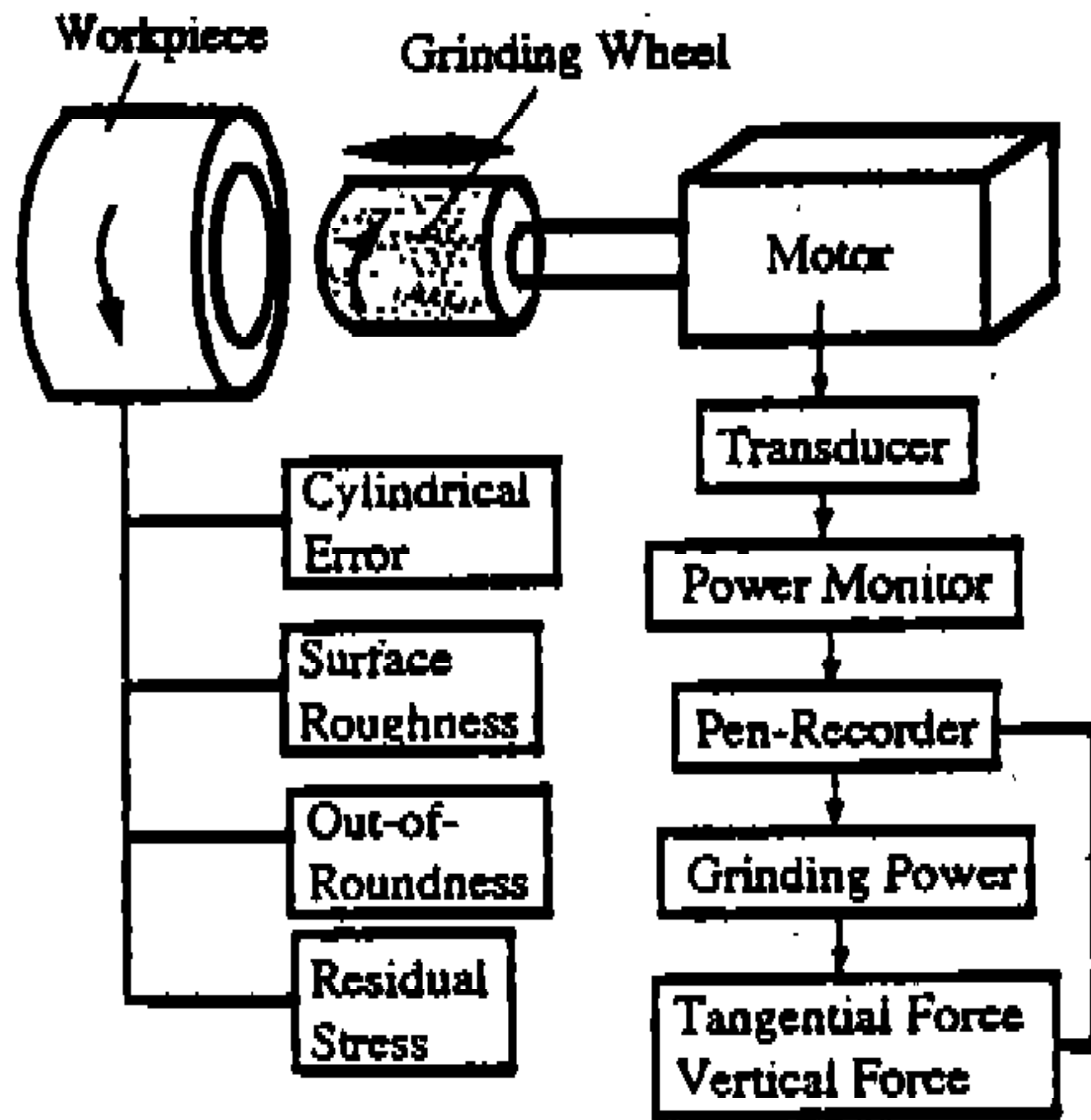


Fig.4 Experimental set-up

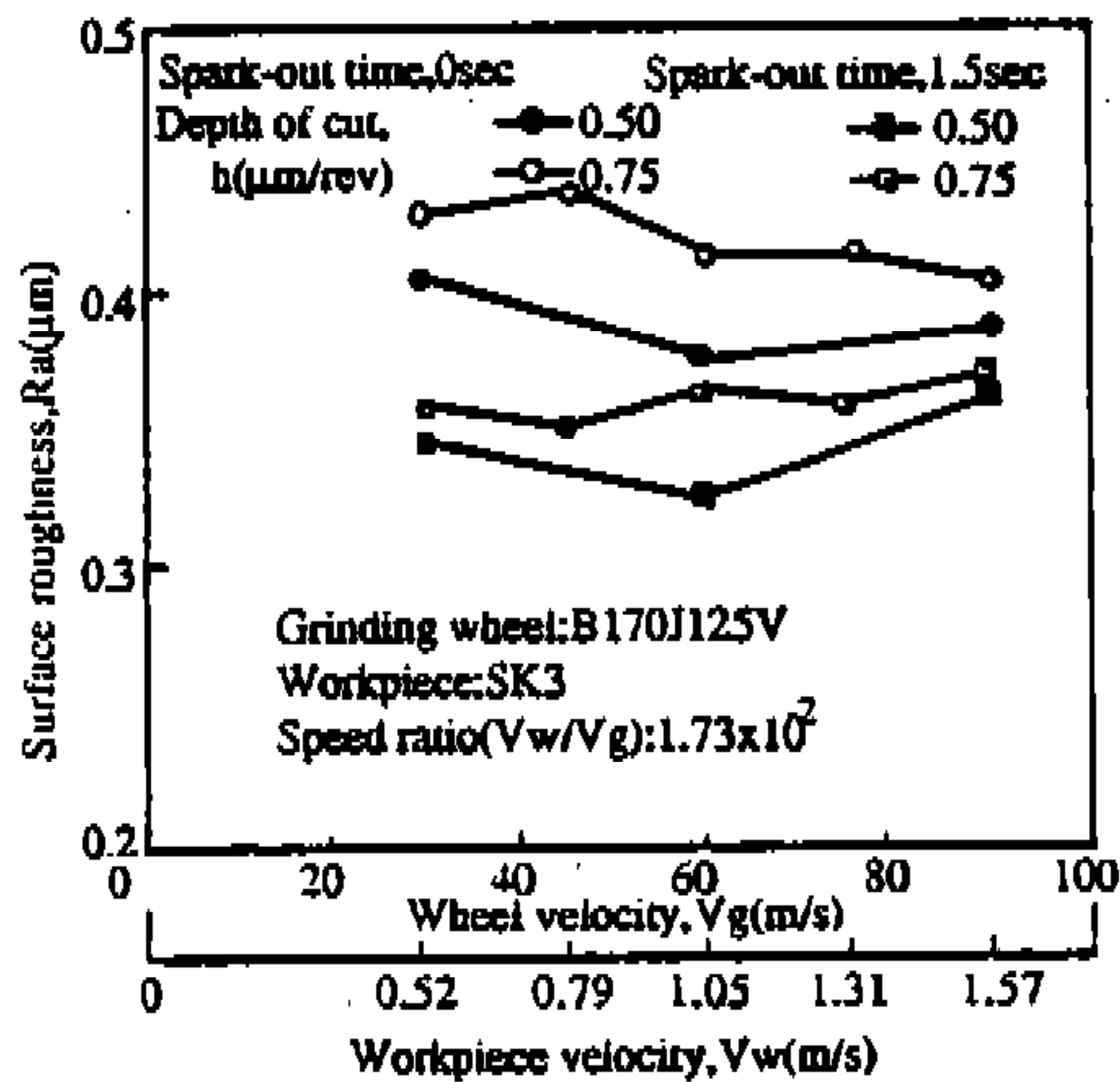


Fig.5 Relationship between grinding conditions and surface roughness (V_w/V_g : constant)

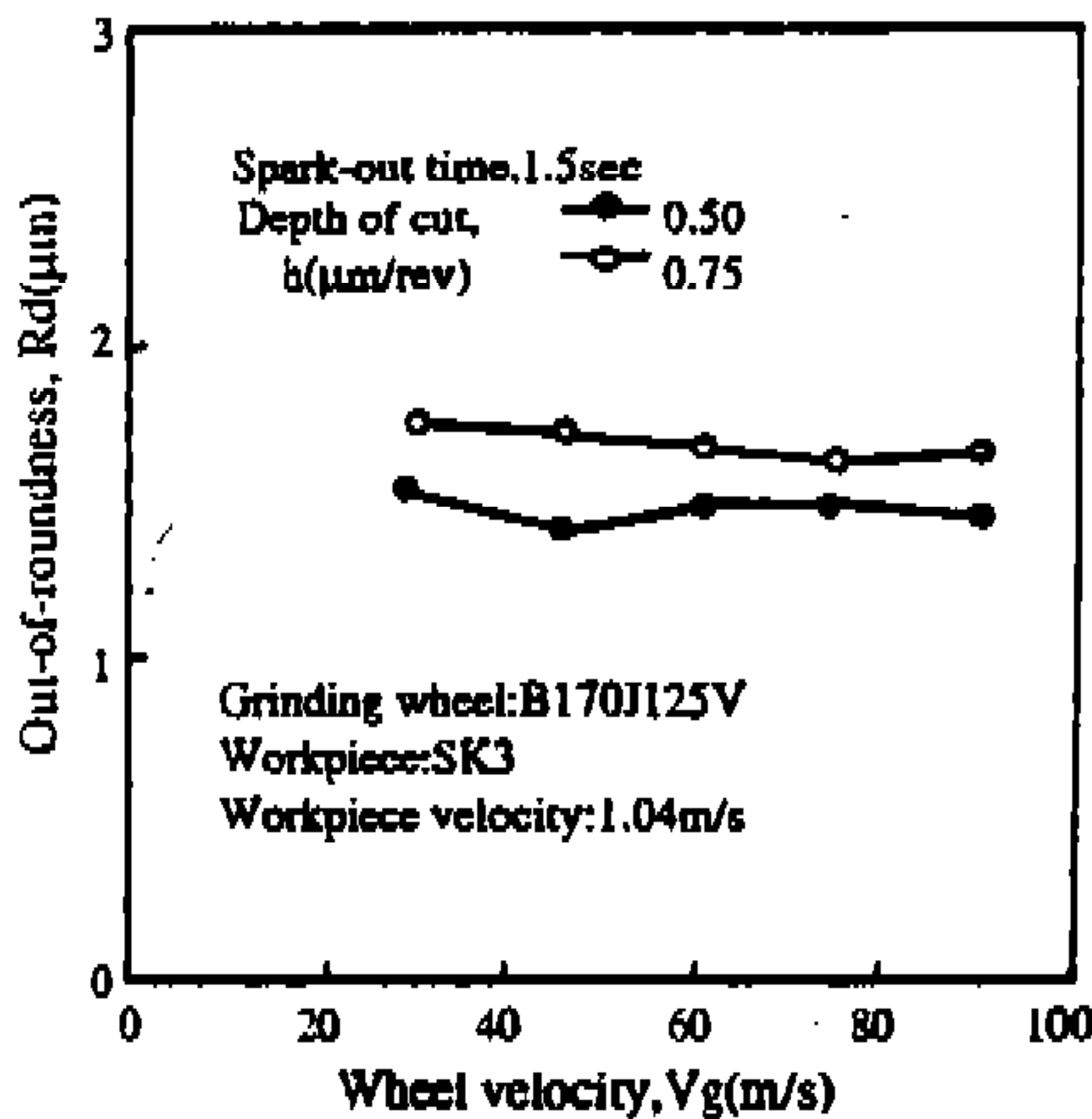


Fig.6 Relationship between wheel velocity and out-of-roundness (V_w : constant)

도는 70,000rpm까지 가능하며 CBN 슷들의 경우에는 슷들의 주속도를 140m/s까지 높일 수 있도록 보완한 연삭반을 이용하였다.

본 실험장치의 구성은 그림 4와 같다. 즉, 표면거칠기의 측정에는 Mitsutoyo SurfTest 401, 진원도의 측정에는 Mitsutoyo Round Test RA-600을 이용하였다. 그리고 공작물의 잔류응력에는 X-Ray법에 의한 Rikagu의 Strain Flex MSF-2M/PSF-2M을 이용하였다.

3.2 실험적 분석 및 고찰

연삭스틀들의 주속도에 따른 표면조도의 영향에 관한 결과를 그림 5에 표시하였다. 이 그림과 같이 속도비 (V_w/V_g)가 일정한 조건하에서는 표면조도의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 이는 슷들 주속도를 고속화하여도(상대적으로 공작물 주속도도 상승이 됨) 양호한 표면조도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 6은 슷들의 주속도가 진원도에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 이 결과도 슷들의 주속도 증가에 대한 진원도의 상태는 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서, 난삭재 가공에 있어서도 되도록이면 슷들의 주속도를 고속화함으로써 가공능률의 향상뿐만 아니라 가공품위의 향상도 기대할 수 있음을 의미한다. 이러한 결과는 앞서 제시한 이론적 고찰과 잘 부합됨을 알 수 있다.

또한, 고속회전에 따른 공기저항의 영향은 본 실험에서 타나난 결과, 실제의 가공에 미치는 영향은 없는 것으로 나타나 고속회전에 따른 공기저항의 영향은 무시할 수 있다.³⁾

그리고, 그림 7은 고속 내면연삭의 가공조건이 공작물의 잔류응력에 미치는 영향에 관한 데이터로, 그림에서와 같이 슷들의 절입량이 클수록 잔류응력은 다소 증가하지만 현저한 차이는 없다. 또한 잔류응력은 슷들의 절입량에 관계없이 공작물의 가공표면으로부터 깊이 100μm까지 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나, 이는 공작물의 종류(열처리 및 경도)에 따라 잔류응력의 영향은 다소 차이가 있다. 내면연삭의 경우 가공조건이 잔류응력 분포에 미치는 영향이 거의 없는 것은 가공중에 미치는 加工負荷가 고속회

전에 따른 회전력에 의해 상쇄되어지는 효과 때문인 것으로 추측된다.

그림 8과 9는 알루미나계 스톨을 이용하여 스톨주속도 $V_g=26\text{m/s}$ 에서 가공한 경우, 표면조도와 진원도에 미치는 영향에 관한 데이터이다. 그림에서와 같이 가공조건에 따른 표면조도와 진원도에 미치는 가공조건들의 영향을 관찰한 결과 스톨절입량에만 관계가 있고 공작물의 주속도에는 거의 영향을 받지않는 것으로 나타났다. 따라서, 가공능률을 향상시키고자 하는 경우에는 스톨의 절입량과 공작물 주속도를 가능한한 크게 하는 것이 바람직하지만, 스톨의 절입량에 의한 표면조도나 진원도에 미치는 영향이 크기때문에 그림 3에 제시한 것과같은 한계영역을고려하여, 조건설정을 하여야 한다.

4. 가공능률을 극대화하는 가공조건의 설정

본 연구는 내면연삭을 대상으로 하여 가공능률을 극대화하는 가공조건의 설정방법과 그에 대한 이론적·실험적 고찰을 하였다. 앞에서도 설명한 바와같이 가공능률을 극대화하기 위해서는 가능한한 스톨의 주속도를 고속화할 필요가 있다. 그림 10은 공작물의 표면조도와 진원도를 고려하여 고능률적 최적가공조건을 설정하기 위한 개념을 도식화한 것이다. 즉, 가공물의 표면조도와 진원도를 만족시키면서 가공능률을 극대화하는 최적 가공조건의 설정이 바람직하다.

예로써, 요구하는 표면조도와 진원도가 각각 $2\mu\text{m}$ 으로 주워졌을 때, 설정가능한 가공조건은 사선으로 빗금친 영역이 된다. 그러나, 그림 3에서와 같이 실제적으로 스톨의 절입량에 의하여 표면조도와 진원도는 임의의 한계 영역을 갖게 된다. 따라서, 가공조건의 설정에 있어서도 이를 충분히 검토하여야 한다. 따라서, 설정가능한 영역 중에서도 가공능률을 극대화하는 조건은 그림 11에 나타난 것과 같이 표면조도 한계곡선인 □ ABCDE내의 P점($V_w=0.32\text{m/s}$, $h=4.9\mu\text{m/rev}$)이 가공능률을 극대화하는 최적가공조건이 된다.

또한 그림 12는 스톨의 주속도에 따른 가공시

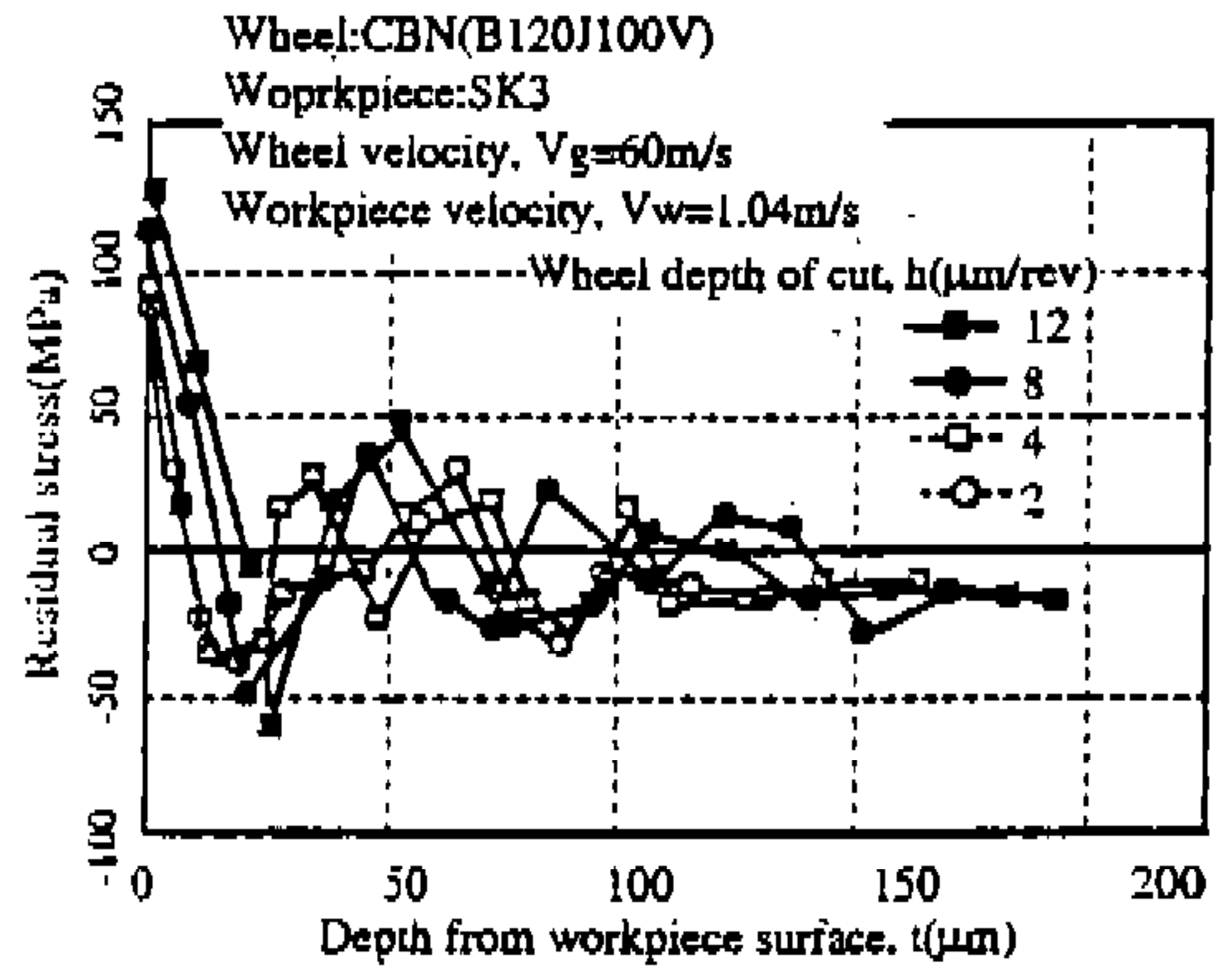


Fig.7 Relationship between depth of cut and residual stress

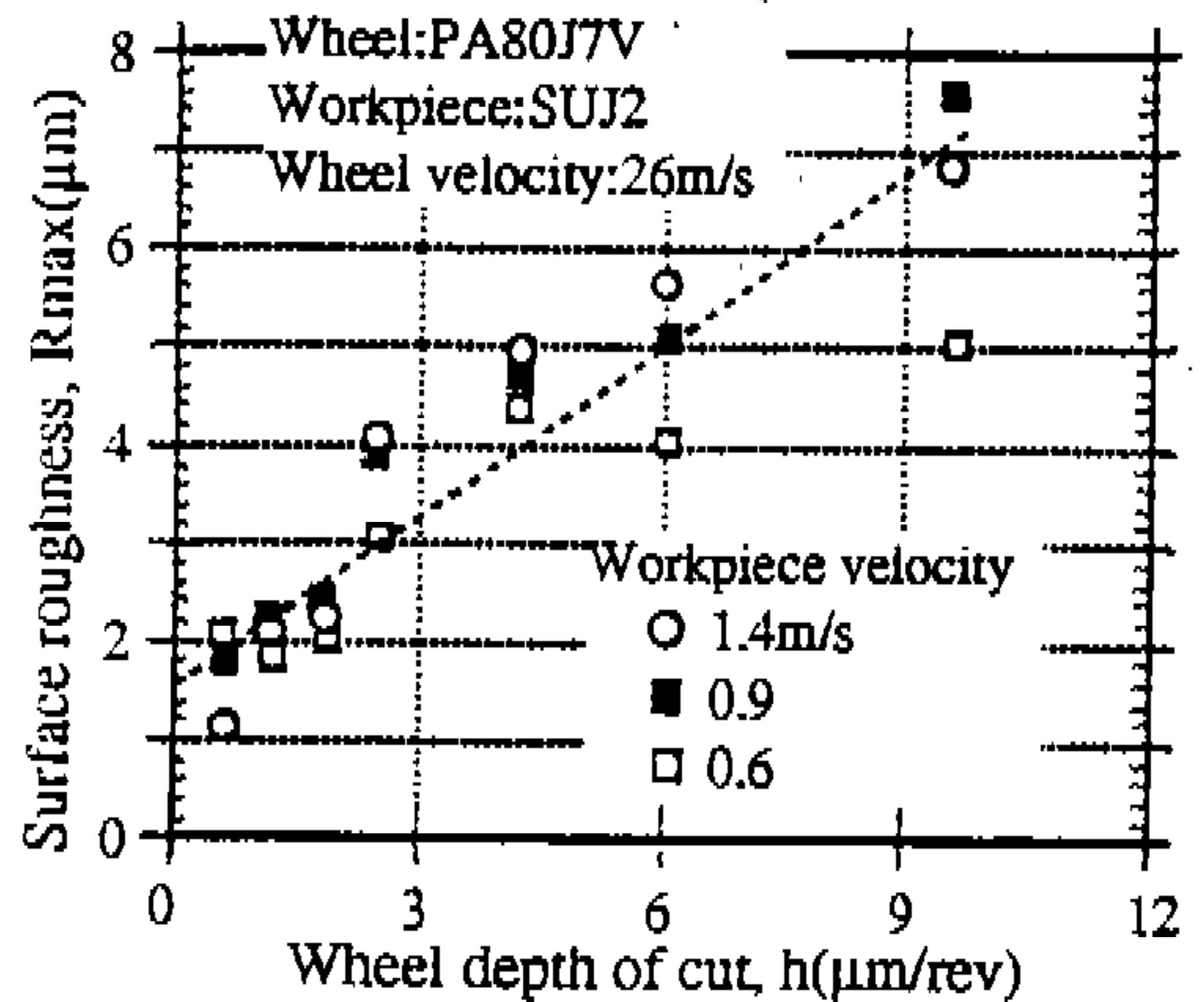


Fig.8 Relationship between the surface roughness and the grinding conditions

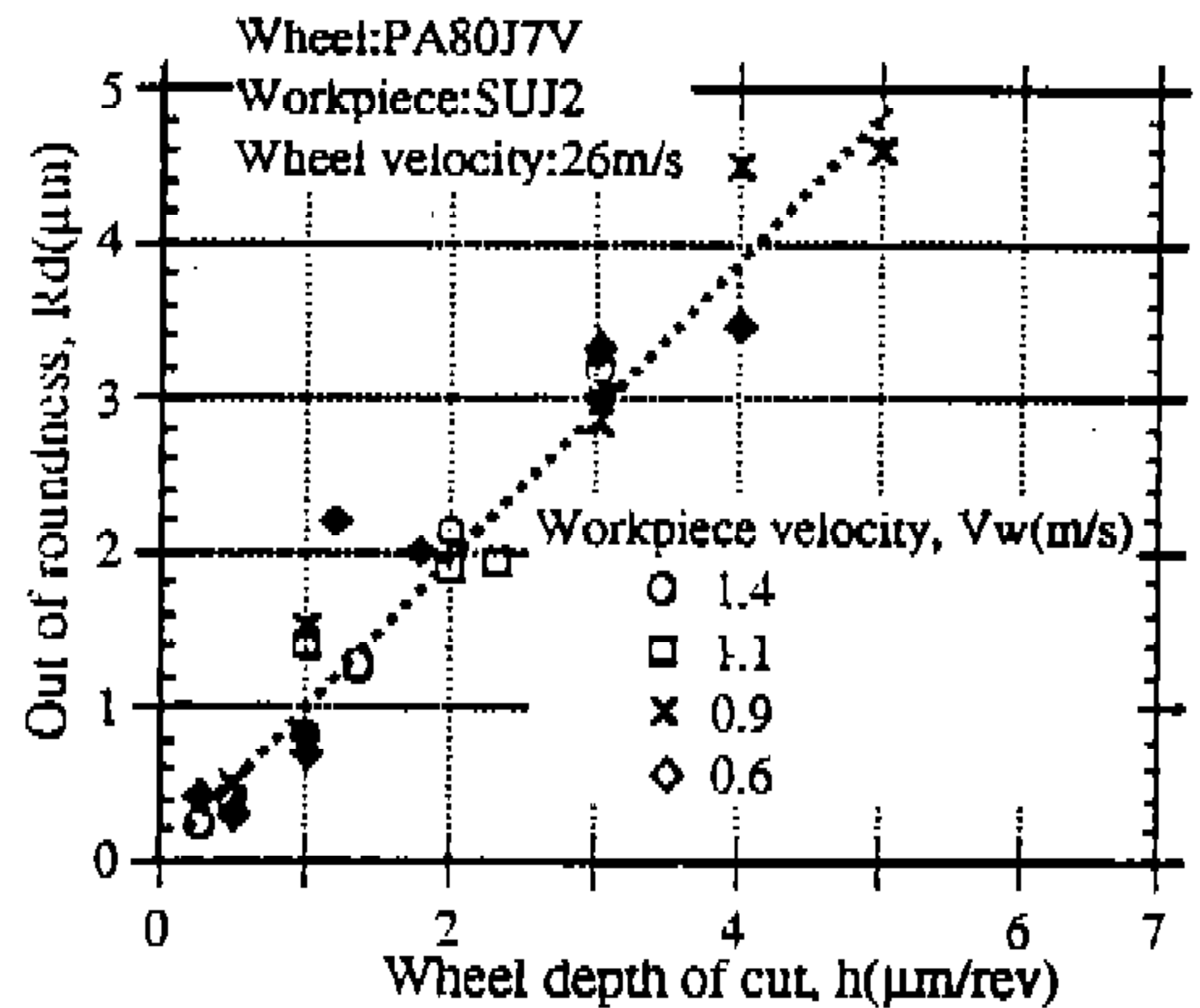


Fig.9 Relationship between the out-of-roundness and the grinding conditions

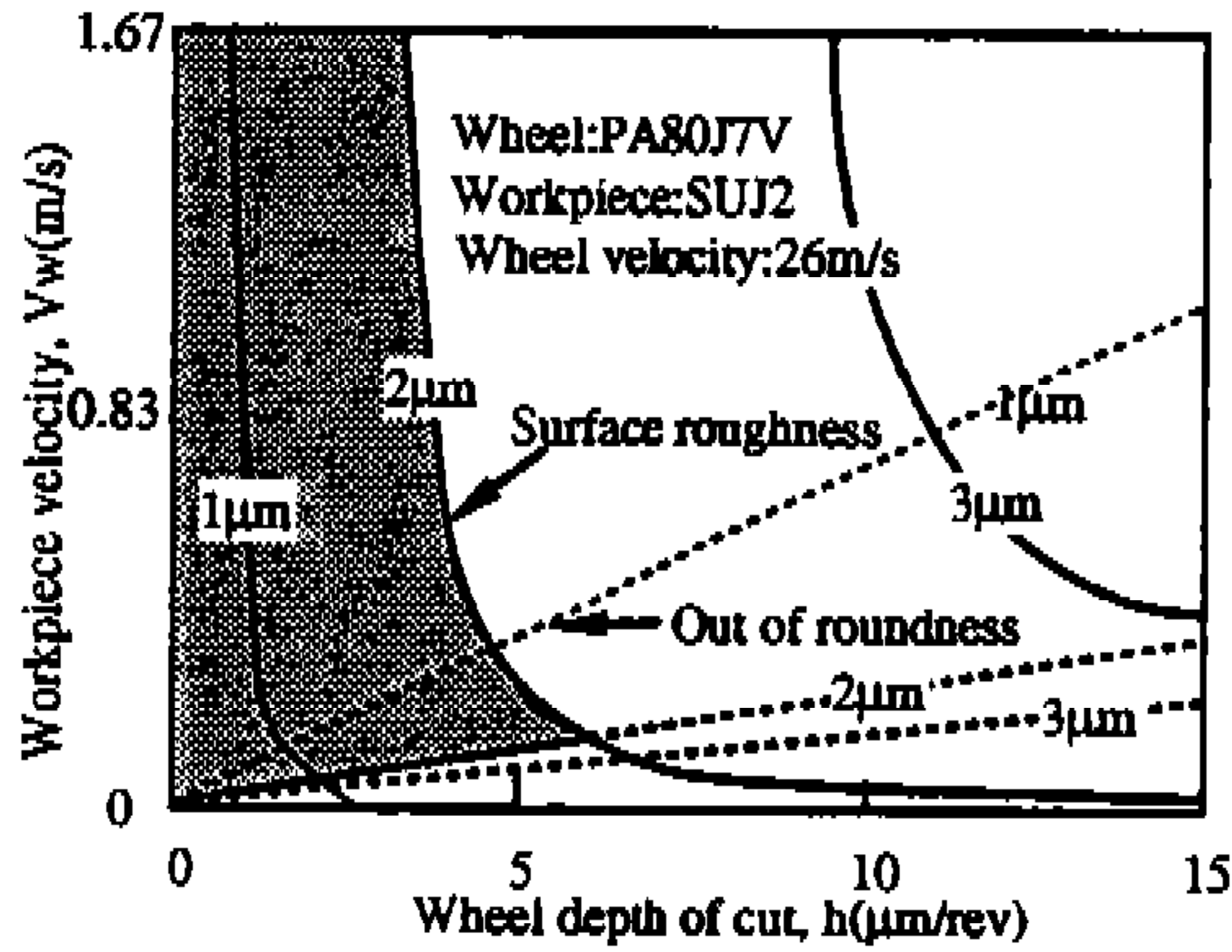


Fig.10 Optimal establishment method for the grinding conditions

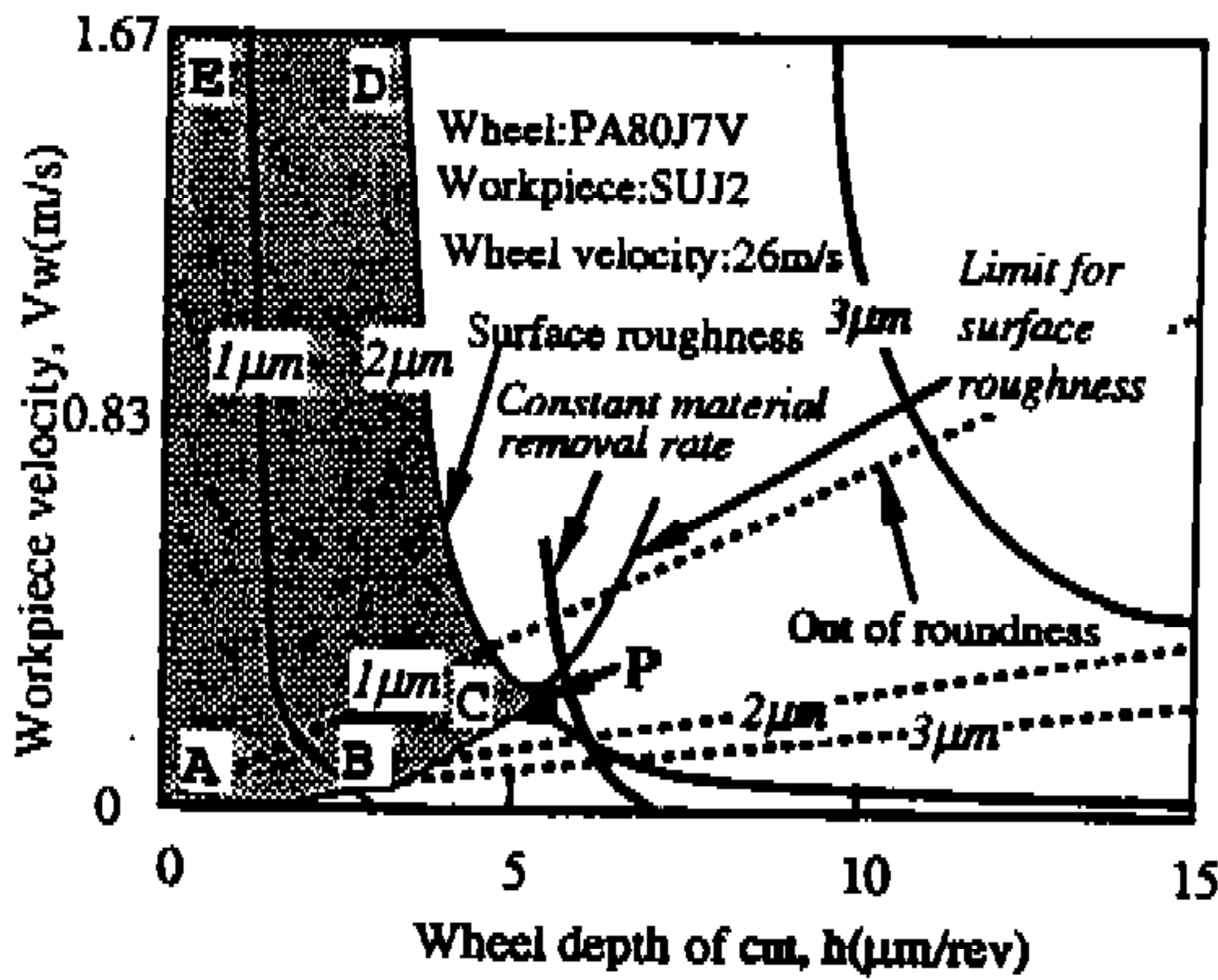


Fig.11 Optimal establishment method for the grinding conditions considering the limit of surface roughness

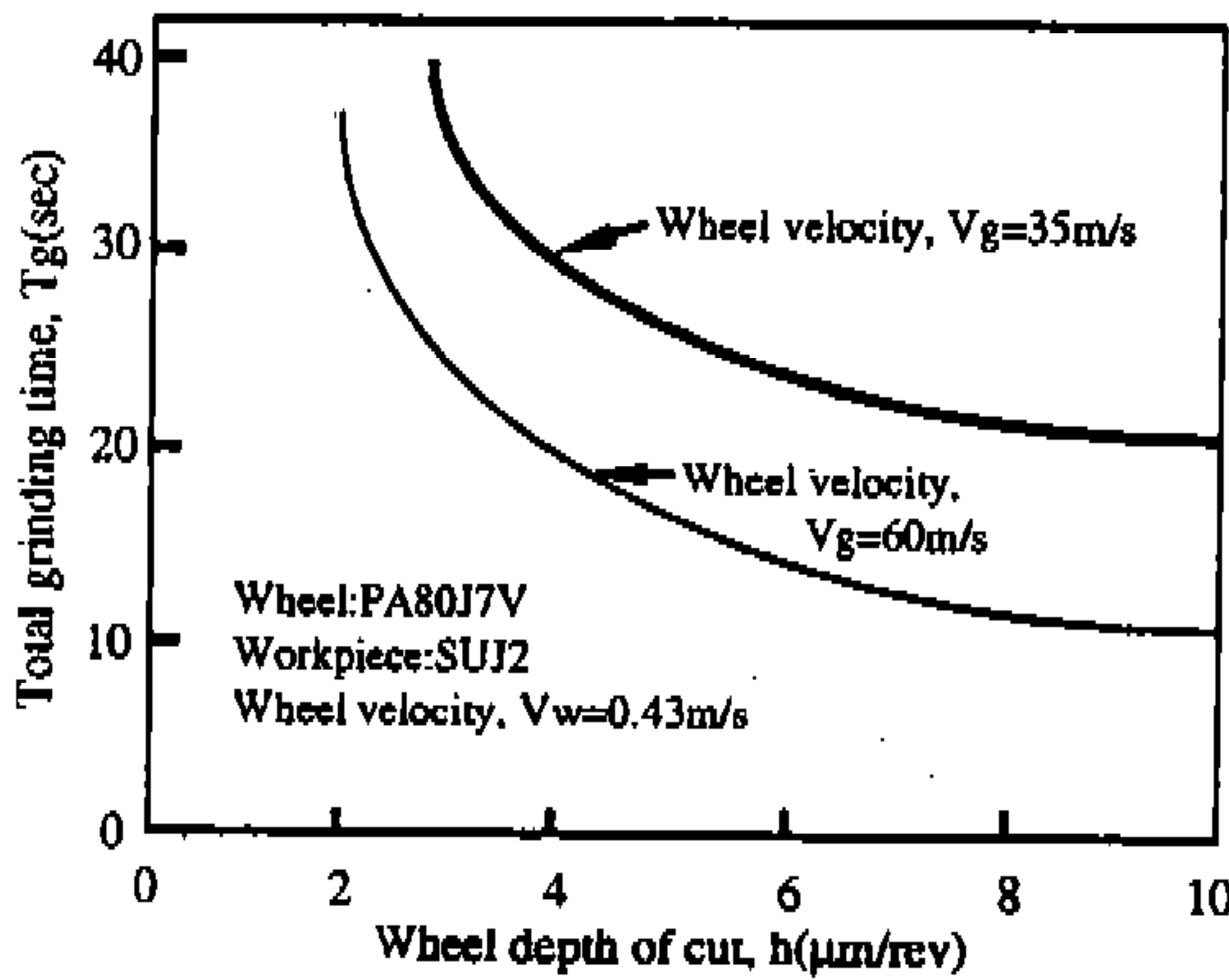


Fig.12 Relationship between the grinding time and the wheel velocity

간을 비교한 것이다. 그림에서와 같이 슷들의 주속도가 고속화할수록 가공시간을 단축시킬수 있으며, 특히 절입량이 큰 영역에서 그 효과가 현저함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 내면연삭의 가공능률을 극대화 하기 위한 조건설정 및 그에 대한 방법을 제시 하였다.

- 1) 가공능률의 향상을 도모하기 위해서는 가능한한 슷돌 회전수를 고속화하는 것이 바람직하므로 연삭반의 최대 허용회전속도에서 가공하는 것이 효과적이다.
- 2) 최적 가공조건은 슷들의 절입량과 공작물 주속도의 설정문제가 된다. 최적가공조건의 설정은 본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용함으로써, 표면조도와 진원도를 충족하면서 가공능률을 극대화하는 조건설정이 가능하다.
- 3) 슷들의 고속화는 가공시간의 상당한 단축이 가능하여 생산성 향상을 도모할 수 있다.

참 고 문 헌

1. H.Opitz, W.Ernst and K.F.Meyer, "Grinding at High Speed", Proceeding of the 6th Int'l MTDR Conf., p.581, 1965
2. W.Konig, F.Ferlemann, "A New Dimension for High Speed Grinding", Industrial Diamond Review, Vol.51, No.546, p.237, 1991.
3. G.H.Kim, et al, "A Study on the Effect of Internal High-speed Grinding", 1st Int'l ABTEC Conf., Seoul, p.92, Nov., 1993.
4. Raynold J.Roark and Warren C.Young, Formulus for Stress and Strain, 5th Edition, McGRAW-HILL, 1975.
5. D.Q.Kern, Process Heat Transfer, McGRAW-HILL, 1990.