

鋼의 버어니싱에 있어서 加壓荷重에 따른 表面精密度 變化研究

李龍哲\*, 陸宏修\*\*

A Study on the Surface Accuracy According to Applied Load in Burnishing of Steel

Y. C. Lee\*, K. S. Yuck\*\*

ABSTRACT

Burnishing, as a micro plastic working, is a finishing process used in conjunction with or in replacement of reaming, honing, lapping, and/or grinding. The tool which is a smooth, round steel ball slightly larger than the bore is pushed through pre-machined hole, leaving a closely controlled finish. The major application of the processes is to improve the geometric and mechanical properties of surface such as (1) dimensional accuracy, (2) surface roughness, (3) bearing ratio, (4) surface hardness, (5) wear resistance, (6) fatigue and corrosion resistance, etc. Therefore, this study carried out some experiments to illustrate the theoretical formula and to investigate surface accuracy (e.g. variation of diameter, surface roughness, bearing ratio) in accordance with the applied burnishing load.

Key Words : Burnishing(버어니싱), Surface Accuracy(표면정밀도), Burnishing Load(버어니싱하중)

1. 緒 論

버어니싱은 旋削, 드릴링, 리이밍, 보오링 등으로 加工된 工作物의 구멍內面에 硬度가 높고 구멍直徑보다 약간 큰 볼베어링用 鋼球를 工具로 사용하여 加壓通過 시킴으로써 精密度 높은 구멍 內面을 얻는 工作法<sup>(1,2)</sup>이다. 재래식 구멍다듬질 加工에는 內徑研削, 호우닝 등이 있지만 버어니싱은 이들 加工法과는 달리 단순히 表面精密度만 向上시키는 것이 아니라 表面精密度 向上과 더불어 耐摩耗性, 疲勞強度 등을 增大시키며, 또한 加工施設, 時間, 費用 등에 있어서 效率의이고 經濟的인 加工法이라는 큰 長點을 가지고 있다.

버어니싱은 油空壓실린더, 포신, 피스톤 핀 구멍 등의 內面加工, 특히 가늘고 긴 圓筒구멍의 內面加工에 많이 應用되고 있다.

본 研究에서는 旋削加工한 機械構造用炭素鋼 SM45C 試片을 버어니싱하였을 때 加壓荷重의 變化에 따른 工作物의 表面거칠기, 直徑 및 베어링率 變化를 考察하였다. 본 實驗에서는 버어니싱 工具를 일정한 크기의 鋼球를 사용하고 工作物구멍의 직경을 變化시킴으로써 工具와 工作物사이의 초기간섭량(Initial Interference)의 差로 加壓荷重의 變化를 가져오게 하였다.

\* 蓮庵工專 金型設計科(정희원)

\*\* 仁荷大學校 機械工學科(정희원)

## 2. 버어니싱 實驗

### 2.1 試片製作 및 測定

本 研究에 사용한 試片의 材質은 軸을 비롯한 일반 機械部品 등에 많이 쓰이는 SM45C를 선택하였으며, 그 機械的 性質 및 化學的 成分은 Table 1과 같다. 機械的 性質 檢사는 萬能材料試驗機에서, 化學的 成分 分析은 Spectrometer를 사용하였다.

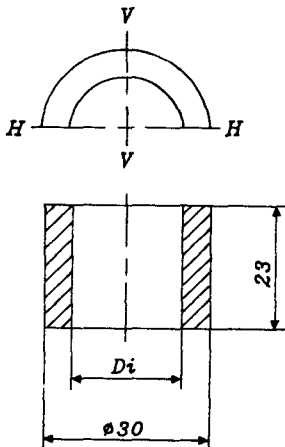
試片의 規格은 Fig. 1과 같이 外徑  $D_2$ 는 일정하게 30mm로 하고 內徑  $D_1$ 은 22.205mm에서부터 21.765mm까지 0.04mm씩 등간격으로 감소시키면서 12 종류의 試片을 基準值數로 정하였고 다시 切削移送速度  $f_c$ 를 0.05, 0.21mm/rev로 變化시켜 총 24개의 試片을 제작하였다. 여기서 切削移送速度 0.05mm/rev으로 가공한 것은 試片 A, 0.21mm/rev으로 가공한 것은 試片 B로 切削移送速度별로 분류하였다.

버어니싱에서는 精確한 值數와 均일한 表面거칠기를 가진 試片이 요구되며, 특히 眞直度, 眞圓度가 중요하므로 強力高速精密旋盤(HL460, 화천기계주)에서 試片을 加工하였다. 이때 切削條件은 機械構造用鋼 加工時 발생하는 構成刃先의 妨지를 위해서 切削速度  $V=120\text{m/min}$ 로 하였으며 切削깊이는 0.5mm로 하였다.

本 研究에 필요한 데이터를 구하기 위하여 工作物의 內·外徑, 表面거칠기, 베어링率 등의 測定을 실시하였으며, 測定의 精確성과 測定位置의 중복을 피하기 위하여 Fig. 1에 표시한 試片의 H-H방향에서는 內·外徑을, V-V방향에서는 表面거칠기를 測定하였다. 內·外徑 測定時 길이방향으로 중앙부위 그리고 중앙에서 위로 5mm되는 부위와 아래로 5mm되는 부위 세 위치에서 內徑과 外徑을 測定하여 그 平均값을 취하였다. 內·外徑測定은 共히 最小 측정단위가 1 $\mu\text{m}$ 인 실린더 게이지와 外徑 마이크로미터를 각각 사용하였다.

Table 1 Mechanical Properties & Chemical Composition of Specimen

Mechanical Properties	Yielding Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Hardness H <sub>R</sub> B	Poisson's Ratio	Elongation
		39.4	75.5	86.8	0.29
Chemical Composition (W <sub>i</sub> %)	C	Si	Mn	P	S
	0.47	0.31	0.65	0.013	0.028



\* $D_i=21.792 \sim 22.207\text{mm}$

Fig. 1 Dimensions of Specimen for Burnishing

表面거칠기도 直徑測定 때와 마찬가지로 上, 中, 下 세 위치에서 測定하여 그 平均값을 취하였으며, 表面거칠기 測定은  $R_{max}$ ,  $R_z$ ,  $R_a$  및 베어링率 測定이 가능한 觸針式 測定機를 사용하였다.

### 2.2 實驗裝置 및 實驗

버어니싱 工具는 큰 壓力을 받으면서 工作物의 內面을 加壓通過하여 加工하게 되므로 精確한 眞圓도와 높은 硬度, 內摩滅性 그리고 우수한 表面거칠기를 가져야 한다. 따라서 本 研究에 사용된 버어니싱 工具는 손쉽게 구할 수 있고 精密度와 性能이 우수한 볼베어링용 鋼球로 直徑  $D=22.225\text{mm}$ , 硬度 974 Hv인 精密級을 사용하였다.

일반적인 버어니싱은 보통 프레스에서 적절한 부속장치를 이용하여 工作物에 鋼球를 加壓通過시키나 本 研

究에서는 加壓荷重을 測定하여야 하므로 萬能材料試驗機에서 Fig. 2와 같은 形狀의 부속장치를 제작사용하여 버어니싱을 실시하였으며, Fig. 3에는 버어니싱 時 各 實驗裝置의 블럭선도를 나타내었다. 加壓荷重 測定은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 加壓棒위에 설치된 Load Cell을 통하여 工作物에 가해지는 加壓荷重을 감지하도록 하였으며, 이 Load Cell에서 감지된 값은 Control Box의 기록자에 이동거리와 加壓荷重을 그리게 하였다. 이 그래프는 加壓荷重에 따른 各 種 實驗值를 測定하는 위치결정의 기준으로 이용되었다.

加壓速度는 Kazuo Taniguchi의 實驗<sup>(3)</sup>에서 구한 速度 15~20mm/min의 最快速度인 20mm/min으로 일정하게 하였으며, 윤활유는 사용하지 않았다.

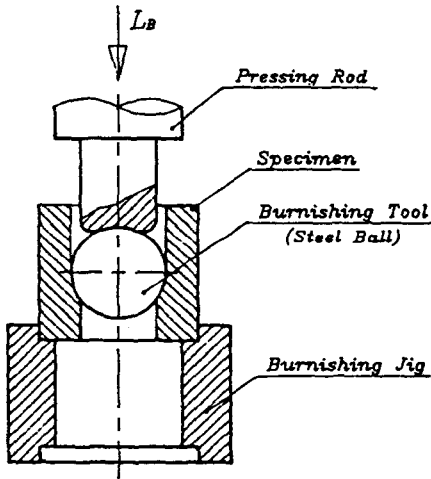


Fig. 2 Burnishing Base

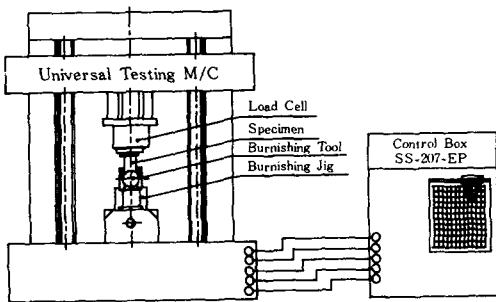


Fig. 3 Schematic Block Diagram for Burnishing

### 3. 버어니싱에 있어서 이론값과 실험값의 비교

버어니싱 가공시 가해지는 加壓荷重  $L_B$ 의 理論的 해석은 Fig. 4에서 球狀의 버어니싱 공구가 원통내면을 壓入通過하는 경우의 最大압력이 작용하는 最大變形부분만을 한정하고 展延性 鋼材의 降伏과 破壤에 관한 O. Mohr의 最大剪斷應力說에서 유도한 理論式<sup>(4,5)</sup>을 이용하였다.

$$L_B = \frac{2\pi R_t^2 \tau_y \ln m}{3(m^2 - 1)} \left[ 3m'^2 (1 - \cos\theta_1 + \mu \sin\theta_1) + (1 - \cos^2\theta_1) - \mu (3\sin\theta_1 - \sin^3\theta_1) + 2\nu \{ \sin^3\theta_1 + \mu (1 - \cos^3\theta_1) \} \right] \quad (1)$$

여기서 각 기호와 본 실험에 적용된 값들은 다음과 같다.

$D_1$ : 가공전 내경 (21.765~22.205mm)

$m$ :  $D_2/D_1$

$D_2$ : 가공전 외경 (30mm)

$m'$ :  $D_2/D_1$

$R_t$ : 버어니싱 공구반경 ( $D_t/2 = 11.1125$ mm)

$\theta_1$ :  $\cos^{-1}(D_1/D_t)$

$E$ : 탄성계수 ( $2.1 \times 10^4$ kgf/mm<sup>2</sup>)

$\nu$ : 포와손 비 (0.29)

$\tau_y$ : 전단항복응력 (19.72 kgf/mm<sup>2</sup>)

$\mu$ : 마찰계수 (0.45)

버어니싱前狀態에서의 各 試片에 대한 內徑 ( $D_1$ ), 外徑 ( $D_2$ ), 초기간섭량 ( $D_t - D_1$ ), 表面거칠기 ( $R_z$ ), 베어링率 ( $t_p$  50%) 등의 측정값과 버어니싱후의 內徑 ( $D_1'$ ), 外徑 ( $D_2'$ ), 加壓荷重 (B.F.)을 비롯한 各 實驗값, 그리고 식 (1)에 본 실험에 적용된 各 값들을 대입하여 계산한 理論값을 Appendix 1에 나타내었다.

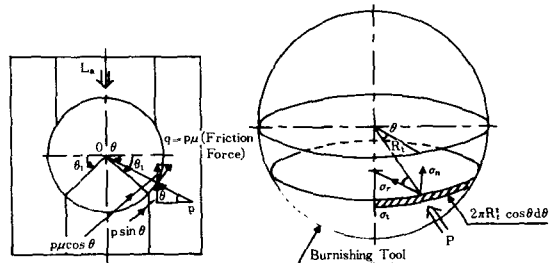


Fig. 4 Components of Force under Burnishing

#### 4. 버어니싱 實驗結果 및 考察

##### 4. 초기간섭량에 따른 加壓荷重의 理論값과 實驗값의 變化 比較

초기간섭량은 工作物과 버어니싱 工具사이에서 일어나는 간섭, 즉  $D_1 - D_2$ 을 의미하며 이것은 버어니싱의 가장 기초적인 因子로서 加壓荷重, 工作物의 直徑變化 등에 큰 영향을 미친다. 버어니싱에서 加壓荷重에 절대적인 영향을 미치는 것은 이 초기간섭량이며 이값의 크기에 따라서 加壓荷重도 變化하게 된다. 이 초기간섭량과 加壓荷重과의 變化關係를 考察하기 위하여 式 (1)에서 구한 理論값과 실제 實驗에서 얻은 實驗값을 Fig. 5, 6에 각 試片별로 표기하였다. Fig. 5, 6에서  $\Delta$ 형의 實線으로 표기된 것은 理論값이며  $\circ$ 기호로 표기된 것은 實驗에 의해서 얻어진 값으로 두 종류의 試片이 거의 같은 경향을 보여주고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 實驗값이 理論값보다 다소 크게 나타나고 있는데 이것은 工作物과 工具사이의 초기간섭량에 따라 발생하는 加壓荷重의 變化和 前加工 時 생성된 表面거칠기의 不均一性으로 인하여 摩擦係數  $\mu$ 를 정확하게 算定할 수 없기 때문인 것으로 생각되나, 전체적인 경향은 理論値와 實驗値가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

加壓荷重이 작을 경우에는 버어니싱의 加工效果를 기대할 수 없으므로 실제 적용할 수 있는 加壓荷重 120kgf 이상에서 초기간섭량에 따른 加壓荷重의 理論값과 實驗값의 偏差를 百分率로 나타내면 A試片의 경

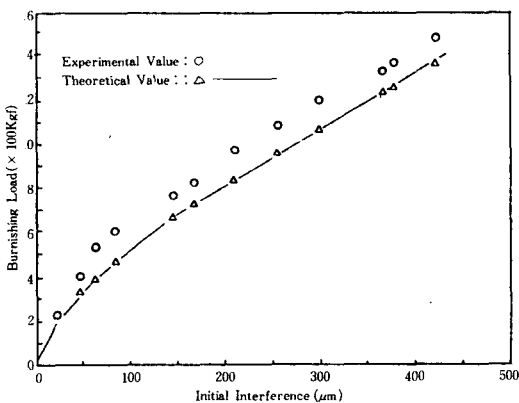


Fig. 5 Burnishing Load vs. Initial Interference (Specimen A)

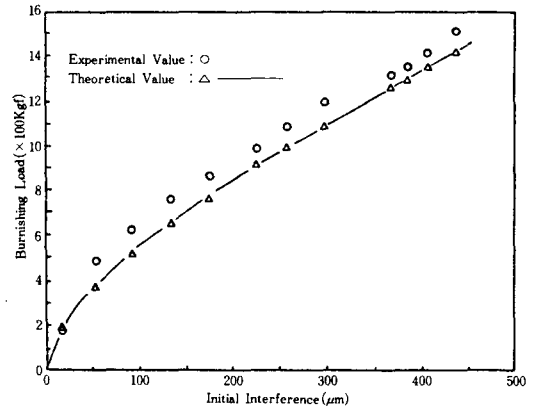


Fig. 6 Burnishing Load vs. Initial Interference (Specimen B)

우 -9.4~7.6%, B試片은 -6.60~4.28%로 이는 만족스러운 結果로 생각되어진다.

##### 4.2 加壓荷重에 따른 直徑 變化

버어니싱할 때에 초기간섭량의 크기에 의해서 加壓荷重이 變化하지만 加壓荷重에 따른 內·外徑의 變化狀態를 考察하기 위해서 이들의 關係를 Fig. 7, 8에 나타내었다. Fig. 7, 8에서 알 수 있듯이 加壓荷重이 증가함에 따라 內·外徑의 變化는 초기에 주어진 초기간섭량의 변화와 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 이것은 본 연구에서 사용한 얇은 두께의 試片의 경우 加壓荷重으로 인한 彈塑性 影響이 內徑에서부터 外徑까지 골고루 미치게 된 結果이며, 결국 이 加壓荷重은 초기간섭량에 의해서 결정되므로 초기간섭량과 內·外徑의 變化는 서로 밀접한 關係가 있게 된다.

버어니싱 후 內徑의 최종加工值數는 前加工조건에 관계없이 초기간섭량만 어떤 범위내로 加工이 되면 일정한 公差범위로 쉽게 加工이 이루어짐을 실증해 주고 있다. 즉, 버어니싱 前狀態의 內徑이 A試片의 경우 21.807~21.862mm이고 B試片은 21.792~21.843mm이었던 것이 버어니싱후의 最終치수가 22.199~22.202, 22.200~22.205mm로 각각 變化하였다. 버어니싱 前狀態에서의 두 試片의 가공치수 범위가 55 $\mu$ m, 51 $\mu$ m인 것이 버어니싱 후의 加工치수범위는 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m이하로 각각 줄어들었음을 보여주고 있다.

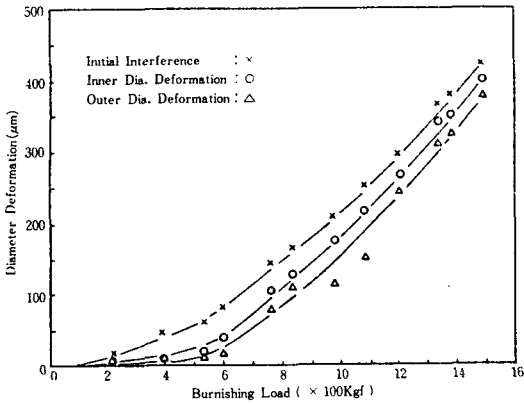


Fig. 7 Diameter Deformation according to Burnishing Load (Specimen A)

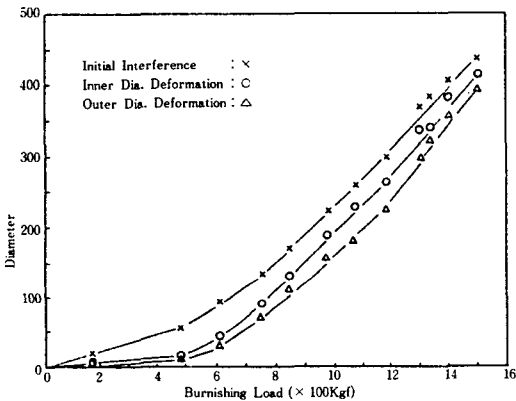


Fig. 8 Diameter Deformation according to Burnishing Load (Specimen B)

#### 4.3 加壓荷重에 따른 表面거칠기 變化

Fig. 9, 10에 前加工 조건이 다른 각 試片별로 加壓荷重에 따른 凸點평균 거칠기 ( $R_z$ ) 變化를 나타내었으며, 精確한 값은 Appendix 1에 각각 표기하였다. Fig. 9, 10에서 보면 เบอร์니싱 前狀態에서의 表面거칠기는 切削移送速度에 따라 큰 차이를 보이고 있으나, 같은 切削條件下에서의 表面거칠기는 거의 비슷하게 나타나고 있다.

Fig. 9는 切削移送速度  $f_c=0.05\text{mm/rev}$ 으로 旋削한 試片 A로, 凸點 平均거칠기가 9.03~10.40  $R_z$ 의 เบอร์니싱 前狀態에서 加壓荷重이 증가 할수록 表面거칠기는 점점 향상되어 1370kgf의 荷重에서 3.80  $R_z$ 로 最良의 狀態를 보여주고 있다. Fig. 10은 切削移送速度

$f_c=0.21\text{mm/rev}$ 으로 加工한 試片 B로 15.50~17.13  $R_z$ 에서 加壓荷重의 증가에 따라 서서히 향상되어 1330kgf에서 4.17  $R_z$ 로 最良의 狀態를 나타내고 있다.

또 위의 結果를 前加工 時 切削移送速度의 대소에 關係없이 전체적인 경향을 考察해 보면 เบอร์니싱 前의 表面거칠기가 다소 큰 차이를 보이고 있지만 최종단계에서는 內徑의 變化에서와 마찬가지로 거의 일정한 범위의 表面거칠기로 향상되고 있음을 알 수 있다.

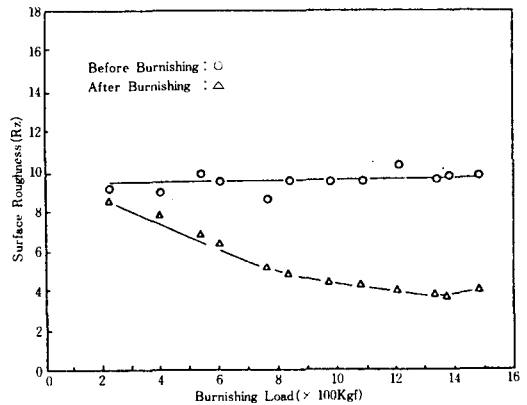


Fig. 9 Variation of Surface Roughness( $R_z$ ) according to Burnishing Load (Specimen A)

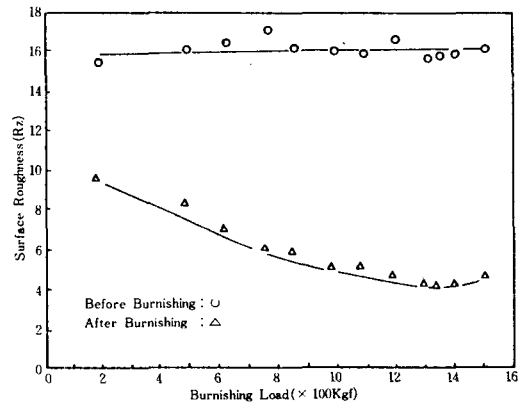


Fig. 10 Variation of Surface Roughness( $R_z$ ) according to Burnishing Load (Specimen B)

#### 4.4 加壓荷重에 따른 베어링率 變化

เบอร์니싱으로 인한 工作物의 베어링率 變化狀態를 考察하기 위하여 대표적으로 鋼의 깊이 50%에 해당하

는 부분인 中心線에 대한 베어링률을 각 試片별로 測定하였으며, 그 精確한 값들은 appendix 1에 표기하였다.

일반적으로 버어니싱 效果를 기대할 수 있는 加壓荷重 1200kgf이상에서 베어링률을 考察해 보면, 버어니싱 前狀態에서의 베어링률은 切削移送速度가 클수록 떨어지는 結果를 나타내고 있지만, 버어니싱後의 베어링률도 직경변화 및 표면거칠기와 마찬가지로 前加工條件에 관계없이 일정한 범위 이상으로 향상되는 경향을 나타내고 있다. 즉 버어니싱 전의 베어링률이 A 시편은 52.8~55%, B 시편은 42.9~45.7%이었던 것이 가공 후는 90.7~91.8%와 90.8~91.7%로 각각 향상되었다.

### 5. 結 論

本 研究에서는 버어니싱 가공 시 加壓荷重에 따른 가공효과를 실험적으로 규명하고, 또 초기간섭량에 근거한 이론식과의 관계를 검토한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 버어니싱 가공에 있어서 내경의 前加工이 일정한 범위 이내로 가공이 이루어지면 最終加工치수는 5  $\mu\text{m}$  이내 공차의 精密加工이 가능하다. 즉 버어니싱 前狀態의 內徑이 A試片의 경우 21.807~21.862mm이고 B試片은 21.792~21.843mm 이었던 것이 버어니싱 후의 최종치수가 22.199~22.202, 22.200~22.205mm로 각각 변화하였다.

- 2) 가장 양호한 表面거칠기는 工具直徑이 22.225mm 일 때 加壓荷重이 1350kgf 前後에서 얻어졌다. 즉 시편 A 의 경우 加壓荷重 1370kgf에서 9.81  $R_z$ 로부터 3.80  $R_z$ 로, 시편 B의 경우 1330kgf에서 15.78  $R_z$ 로부터 4.17  $R_z$ 로 각각 향상되었다.
- 3) 베어링률( $t_p$  50%) 變化는 버어니싱 후 表面거칠기가 가장 양호하게 되었을 때, 100% 이상의 向上을 가져왔다. A 시편의 경우 53.1%로부터 91.7%로, B 시편의 경우 45.7%로부터 91.7%로 향상되었다.

### 參考文獻

1. 崔求淵 外 5人, 精密工作法, 大光書林, pp.133~138, 1980.
2. James G.Bralla, Handbook of Production Design for Manufacturing, McGraw-Hill Book Co., pp.181~187, 1986.
3. Kazuo Taniguchi, "Basic Study of Burnishing", Seimitsu Kikai XVI, pp.7~8, 1952.
4. K.S.Yuck, B.H.Lee, "A Thory of Burnishing Mechanics", Journal of KSME, Vol.14, No.4, pp.335~344, 1974.
5. 陸宏修, "버어니싱에 의한 구멍內面の 精密加工에 관한 研究", 大韓機械學會誌, 第14卷, 第4號, pp.305~313, 1974.

Appendix 1 Theoretical & Experimental Burnishing Data

Speci. No.	Inner Dia. (mm)		D <sub>1</sub> ' - D <sub>1</sub> ( $\mu\text{m}$ )	B. L. (kgf)		D <sub>1</sub> ' - D <sub>1</sub> ( $\mu\text{m}$ )	outer Dia. (mm)		D <sub>2</sub> ' - D <sub>2</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Surface Roughness ( $\mu\text{m} R_z$ )		tp(50%)	
	D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> '		The.	Exp.		D <sub>2</sub>	D <sub>2</sub> '		B. B	A. B.	B. B.	A. B.
A-1	22.204	22.209	21	206	220	5	29.876	29.878	2	9.10	8.53	56.7	75.0
A-2	22.179	22.189	46	328	397	10	29.954	29.963	9	9.03	7.88	57.3	85.3
A-3	22.164	22.182	61	387	530	18	29.896	29.905	9	9.91	6.90	47.3	83.3
A-4	22.143	22.182	82	467	600	39	29.963	29.980	17	9.60	6.35	56.7	80.7
A-5	22.082	22.184	143	665	760	102	29.973	30.049	76	8.63	5.20	37.3	88.0
A-6	22.061	22.189	164	728	830	128	30.005	30.112	107	9.55	4.78	51.3	87.0
A-7	22.019	22.191	206	841	970	172	29.921	30.033	113	9.60	4.45	51.7	87.0
A-8	21.974	22.191	251	960	1080	217	29.923	30.072	149	9.58	4.32	48.3	83.3
A-9	21.931	22.196	294	1072	1200	265	29.962	30.203	242	10.40	4.00	55.0	90.7

Speci. No.	Inner Dia. (mm)		$D_1$ ( $\mu\text{m}$ )	B. L. (kgf)		$D_1' - D_1$ ( $\mu\text{m}$ )	outer Dia. (mm)		$D_2' - D_2$ ( $\mu\text{m}$ )	Surface Roughness ( $\mu\text{m } R_z$ )		tp (50%)	
	$D_1$	$D_1'$		The.	Exp.		$D_2$	$D_2'$		B. B	A. B.	B. B.	A. B.
A-10	21.862	22.199	363	1236	1330	337	29.913	30.222	309	9.76	3.85	54.7	91.3
A-11	21.853	22.201	372	1253	1370	348	29.865	30.188	323	9.81	3.80	53.1	91.7
A-12	21.807	22.202	418	1371	1475	395	30.001	30.376	375	9.90	4.13	52.8	91.8
B- 1	22.207	22.221	18	191	175	4	29.987	29.992	5	15.50	9.60	33.3	58.3
B- 2	22.171	22.188	54	364	480	17	30.042	30.053	11	16.20	8.30	57.3	80.7
B- 3	22.134	22.177	91	500	610	43	30.019	30.051	32	16.41	7.00	41.3	62.0
B- 4	22.092	22.181	133	634	750	89	29.976	30.046	70	17.13	6.10	29.0	76.0
B- 5	22.053	22.184	172	751	845	131	30.019	30.131	112	16.20	5.90	53.3	83.7
B- 6	22.001	22.191	224	893	975	190	20.079	30.138	159	16.00	5.08	31.7	82.7
B- 7	21.969	22.195	256	978	1070	226	29.984	30.166	182	15.90	5.10	41.3	81.7
B- 8	21.930	22.201	295	1075	1180	262	29.963	30.188	225	16.60	4.75	43.0	85.7
B- 9	21.859	22.195	366	1237	1290	336	29.847	30.145	298	15.62	4.30	37.0	81.7
B-10	21.843	22.200	382	1265	1330	357	29.952	30.272	320	15.78	4.17	45.7	91.7
B-11	21.823	22.202	402	1325	1390	379	29.892	30.248	356	15.93	4.33	45.5	91.5
B-12	21.792	22.205	433	1402	1495	413	29.967	30.358	391	16.25	4.22	42.9	90.8

B. B. : Before Burnishing, A. B. : After Burnishing, B. L. : Burnishing Load,

The. : Theoretical Value, Exp. : Experimental Value

$D_1, D_1'$  : Inner Diameter of Specimen Before and After Burnishing, respectively

$D_2, D_2'$  : Outer Diameter of Specimen Before and After Burnishing, respectively