

연삭가공시 연삭조건에 따른 잔류응력 분포에 관한 연구

鄭 載天*, 車 一男**, 金 敬年***

Residual Stress Distribution according to Working Conditions in Grinding Operation

Cheong Chae-Cheon*, Cha Il-Nam**, Kim Gyung-Nyun***

Abstract

This study is to investigate the magnitude, direction and distribution of residual stresses in surface ground plate according to working conditions. The specimens were made of structural carbon steel and were machined in various grinding conditions.

These were divided in two groups: heat-treated materials and non-heat-treated materials. In each working condition, let the ground specimen generate displacements using deflection-etching techniques. At the same time, these displacements were precisely measured with electronic micrometer.

Through the relation formula between the plane stress and strain, which was derived using these measured data, the values of residual stress are calculated, and the results are analyzed.

These results are as follows :

1. According to the working conditions in this experiment, it can be seen that the distribution of residual stress generally had same trend and the maximum residual stress remained in 20~30(μm) beneath the surface.
2. It is observed that compressive residual stress changes into tensile stress in 5~20(μm) beneath the surface. It is suggested that such phenomenon is originated from the friction effect in grinding process.
3. As the hardness increases by the heat treatment, residual stress increases.
4. As the fatigue strength increases by the compressive residual stress, it is desirable that the down feed and table feed reduce.
5. It can be seen that the more great the down feed and table feed increase, the more close the changing point, where the stress changed from compressive to tensile, is close to the surface. This is due to the resultant effects of the grinding temperature and resistance are larger than the effect of the friction.

* 仁荷大學校 機械工學科 教授 (정회원)

** 서울産業大 機械工學科 副教授 (종신회원) 23

*** 仁荷大學校 機械工學科 大學院 (정회원)

1. 序 論

殘留應力이란 周圍環境과 熱的인 平衡狀態에 있으면서 外部에서 作用하는 荷重이 없을 때 機械構造物이나 試片에 內在하는 監禁된 應力(locked-in stress)을 뜻하는 것으로 대부분의 機械製品에 흔히 內在하며 構造物의 信賴性을 決定하는데 중요한 役割을 하게 된다. 또한, 殘留應力은 構造物에 이로운 影響 또는 해로운 影響, 中立的인 경우 등 相互 關聯된 여러가지 要素들과 매우 복잡하게 作用하므로 殘留應力과 作用應力의 符號, 크기, 方向, 分布狀態 등에 따라서 매우 複雜한 樣相을 띤다.

一般的으로 鑄造, 銲接, 塑性加工, 切削加工 등 거의 모든 機械 加工工程이 加工物에 殘留應力을 남기게 되고, 精密切削作業인 研削加工에 의해서도 같은 結果가 나타난다.

이와같이 構造物에 중요한 影響을 미치는 殘留應力은 製造工程에 따라 精確하게 糾明되어야 함에도 불구하고 그 測定技法에 있어서 아직도 미흡한 상태이다.

그간의 研究者들이 사용한 殘留應力을 측정하는 實驗的인 方法으로는 超音波를 이용하는 超音波 檢査法, X-Ray回折法^{1, 2)}, strain gage를 사용하는 應力弛緩法으로 E. Siebel에 의해 提案된 分割法³⁾, R. Gunnert에 의해 提案된 Gunner法⁴⁾ 등이 있으며, 最近에 들어서 computer를 이용하여, 數值解析의 方法의 하나인 有限要素法도 많이 사용하고 있다.

研削加工된 金屬材料의 加工面에 存在하는 殘留應力에 대하여는 X-Ray回折法^{2, 5)} 有限要素法^{6, 7)}, 電氣化學的 方法^{8, 9)}, 등을 이용한 研究들이 發表되었다. 그러나 X-Ray回折法은 X線을 走査한 局所範圍에 그 測定이 限定되며, 表面으로부터 2mm이상 깊이에 대한 應力測定은 不可能하다.

그리고 有限要素法에서는 初期條件인 研削作業時의 研削抵抗과 研削熱의 測定에 難點이 있다. 이에 반해 電氣化學的 測定方法은 非破壞檢査法과 같이 塑性變形을 隨伴하지 않으며, 보다 넓은 範圍의 測定이 容易하다. 그러나 이 方法을 사용한 現在까지의 平面研削에 關한 研究에서는 단지 法線應力만을 測定하는데 局限되어 있다.

本 研究에서는 平面研削加工된 試驗片(SM45C)의 加工表面으로부터 電解研磨를 實施하여 微少層을 除去하면, 殘留應力의 分布에 따라 平面變形을 일으키게 되므로, 이를 電子마이크로미터로 精密測定하여, 이 變位量을 試片의 微少層 除去에 따른 變形과 應力과의 關係式에 適用시켜 2方向의 殘留應力들의 狀態를 알아봄으로써 加工變質層에 生成된 殘留應力의 分布와 크기 및 方向을 算定하였다.

2. 關係理論

2-1. 任意的 層 除去時 連續層에서의 殘留應力

平面研削作業에서 工作物은 높은 溫度와 強大한 塑性變形을 받게 되므로, 그 内部에 殘留應力이 發生하게 된다. 이 殘留應力分布의 測定을 위하여 사용한 試片은 한 면이 研削加工된 平板으로, 研削加工에 의하여 加工表面 근처에 殘留應力이 생긴다고 假定하였고, 여기서 X方向은 研削方向, Y方向은 研削方向에 대하여 垂直한 方向을 나타내며 다음과 같은 假說을 設定하였다.

- (1) 殘留應力의 狀態는 各 層에서 일정하다.
- (2) 殘留應力은 應力의 主軸안에서 논한다.
- (3) 假定된 殘留應力들중 Z方向 應力인 σ_z 는 無視한다.

대단히 微少한 量을 試片의 研削加工된 面으로부터 除去할 때 平板의 自由段은 殘留應力 分布의 變化에 의하여 變形이 일어난다.

Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 t_i 와 t_{i+1} 사이에 存在하는 層을 i 라 할 때 層 i 의 除去時 連續層에서 殘留應力의 分布는 引張力 F 와 moment M 의 解除에 의한 것으로 생각할 수 있다.

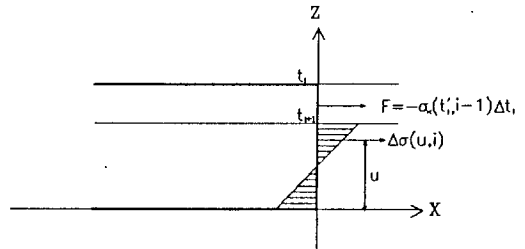


Fig. 1 Stress distribution for removing arbitrary layer

여기서 $\sigma(u, i)$ 는 層除去후에 u 의 위치에서 殘留應力(이하 “應力”)이고 특히 $\sigma(u, 0)$ 는 測定되어야 할 u 의 위치에서의 初期應力이라 하자. 層除去後 任意의 거리 u 에서 나타나는 應力 $\Delta\sigma(u, i)$ 는 다음과 같이 引張力 F 와 moment M 으로 표시되는 基礎的인 平衡方程式으로 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$\Delta\sigma(u, i) = \frac{F}{A} + \frac{My}{I} \quad (1)$$

y : 圖心으로 부터의 거리

A : 單位 斷面積

I : 斷面 2次 moment

X방향에 대한 引張力 F 와 moment M 은 다음과 같이 표시된다.

$$F = -\sigma_x(t'_i, i-1) \Delta t_i \quad (2)$$

$$M = -\sigma_x(t'_i, i-1) \Delta t_i (t_i/2) \quad (3)$$

그러므로 식(2), (3)을 代入하여 정리하면 X방향에 대한 應力은 아래와 같고

$$\Delta\sigma_x(u, i) = -\frac{6(2t'_i - t_{i+1}) \sigma_x(t'_i, i-1)}{(t_{i+1})^3} \left[-\frac{t_{i+1}(3t'_i - 2t_{i+1})}{3(2t'_i - t_{i+1})} \right] \Delta t_i \quad (4)$$

Y方向에 대한 應力은 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_y(u, i) = -\frac{6(2t'_i - t_{i+1}) \sigma_y(t'_i, i-1)}{(t_{i+1})^3} \left[u - \frac{t_{i+1}(3t'_i - 2t_{i+1})}{3(2t'_i - t_{i+1})} \right] \Delta t_i$$

微小두께가 腐蝕 除去될 때 應力에 起因한 變形 $\Delta\epsilon_x(0, i)$ 와 $\Delta\epsilon_y(0, i)$ 는 層除去에 의한 塑性變形이 일어나지 않는다고 假定하면, Hooke의 法則에 의하여 應力과의 關係로 表示할 수 있으며, 이 關係식을 이용하면 $i-1$ 層까지의 腐蝕 除去後 i 層에서의 應力을 구할 수 있다. ($u=0$ 에서)

$$\sigma_x(t'_i, i-1) = \frac{E}{1-\nu^2} \left[\Delta\epsilon_x(0, i) + \nu\Delta\epsilon_y(0, i) \right] \frac{(t_{i+1})^2}{2(3t'_i - 2t_{i+1}) \Delta t_i} \quad (5)$$

$$\sigma_y(t'_i, i-1) = \frac{E}{1-\nu^2} \left[\Delta\epsilon_y(0, i) + \nu\Delta\epsilon_x(0, i) \right]$$

$$\frac{(t_{i+1})^2}{2(3t'_i - 2t_{i+1}) \Delta t_i}$$

2-2 表面으로부터 各層에서의 殘留應力

Δt 의 有限두께로 $i-1$ 層까지 除去할 때, (2)式에 의하여 i 層에서 計算되는 殘留應力값은 그 以前 層까지의 除去 結果가 包含된 것이다.

그러므로 i 層에서 바로 前層인 $i-1$ 層의 除去에 의하여 나타나는 殘留應力은 以前 層까지의 除去 結果를 제외시켜야 하므로, 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x(t'_i, 0) &= \sigma_x(t'_i, i-1) - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta\sigma_x(t'_i, j) \\ \sigma_y(t'_i, 0) &= \sigma_y(t'_i, i-1) - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta\sigma_y(t'_i, j) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

식 (1), (2), (3)에 의하여 實驗에 基礎하여 各層들의 X, Y방향에 대하여 殘留應力の 一般式을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x(t'_i, 0) &= \frac{E}{1-\nu^2} \left[\Delta\epsilon_x(0, 1) + \nu\Delta\epsilon_y(0, i) \right] \left[-\frac{(t_{i+1})^2}{2(3t'_i - 2t_{i+1}) \Delta t_i} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{E}{1-\nu^2} \right. \\ &\quad \left. \left[\Delta\epsilon_x(0, j) + \nu\Delta\epsilon_y(0, j) \right] \left[\frac{3t_j(2t'_j - t_{j+1})}{t_{j+1}(3t'_j - 2t_{j+1})} - 1 \right] \right] \\ \sigma_y(t'_i, 0) &= \frac{E}{1-\nu^2} \left[\Delta\epsilon_y(0, i) + \nu\Delta\epsilon_x(0, i) \right] \left[-\frac{(t_{i+1})^2}{2(3t'_i - 2t_{i+1}) \Delta t_i} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{E}{1-\nu^2} \right. \\ &\quad \left. \left[\Delta\epsilon_y(0, j) + \nu\Delta\epsilon_x(0, j) \right] \left[\frac{3t_j(2t'_j - t_{j+1})}{t_{j+1}(3t'_j - 2t_{j+1})} - 1 \right] \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

E : 從彈性 係數

ν : Poisson's ratio

變位增加量 $\Delta\epsilon_x$ 와 $\Delta\epsilon_y$ 는 測定에 根據한 값이며 (7)式을 이용하여 各層에서의 X, Y방향의 殘留應力을 計算해 낼 수 있다.

3. 實驗方法

研削加工에 의하여 發生한 平板試片의 殘留應力 分布를 分析하기 위하여 460×250×150(mm)의

tank 와 電流 0~2(A)의 D.C. power supply를 製作 使用하였으며, table size 450×250(mm)인 平面研削機를 使用하여 實驗하였다. 試驗片의 材質은 機械構造用 炭素鋼(SM45C)을 選定하였으며, face milling machine에서 10×10×100(mm)로 加工한 후 quenching 및 quenching후 tempering 그리고 熱處理하지 않은 試驗片으로 만들었다. 各 試驗片의 製作中에 存在할 수 있는 殘留應力을 極小化하기 위하여 cross feed 0.9mm, table feed 6m/min.로 固定하고, 研削깊이를 3 μ m씩 20회 반복하여 研削하였다. 試驗片의 熱處理條件은 quenching에서는 Siliconit Muffle Furnace(200×350×150mm)에서 840°C까지 加熱하여 60분간 維持후 水冷하였으며 tempering은 575°C에서 30분간 維持후 空冷시켰다.

研削條件은 숫들의 回轉速度를 2650rpm으로 固定하고, 精密度 0.001mm의 dial gage를 利用하여 down feed 5, 10, 15, 20(μ m) 그리고 table feed 8, 16, 20(m/min.)으로 變化시키면서 cross feed를 0.9 mm/pass로 固定하여 濕式研削으로 실험하였다. 研削加工된 試驗片의 殘留應力 糾明을 위하여 加工되지 않은 면은 腐蝕防止 페인트를 칠한 다음 電解液속에 固定시킨 후 電流를 供給하면 加工面이 조금씩 腐蝕 除去되면서 内部 殘留應力의 平衡이 깨지게 되고, 이에 따라 平板試片은 平面變形을 일으킨다. 이를 殘留應力이 存在하지 않는 層, 즉 變形이 發生하지 않는 層까지 電解研磨를 시켜 그때까지의 變形量을 전자 마이크로미터에 의해 測定하였다. 이 data를 利用하여 computer計算에 의해 研削加工에 의하여 試片에 發生된 殘留應力의 分布값들을 表面으로부터의 깊이에 따라 算定하였다.

4. 實驗結果 및 考察

4-1 殘留應力層 두께에 따른 殘留應力의 分布

Fig. 2는 熱處理를 하지 않은 試片의 殘留應力分布를 나타낸 것으로 最大殘留應力은 表面으로부터 약 30 μ m 範圍내에 位置하고 있으며, 研削方向에 垂直인 應力 σ_y 보다 研削方向 應力인 σ_x 가 더 큰을 알 수 있다. 이는 加工中 研削方向으로 더 많은 發熱과 塑性變形이 發生되기 때문이라 생각된다. quenching한

試片의 殘留應力分布에 대한 傾向을 Fig. 3에 도시하였다. 이 경우의 應力分布 傾向도 Fig. 2와 대체적으로 비슷하며, 最大殘留應力은 X方向으로 表面으로부터 20 μ m 範圍에 位置하고 있다.

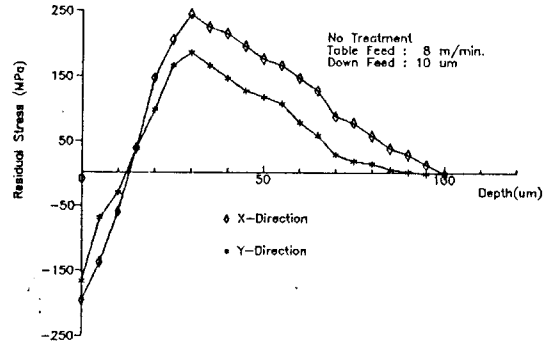


Fig. 2 Residual stress distribution beneath the surface

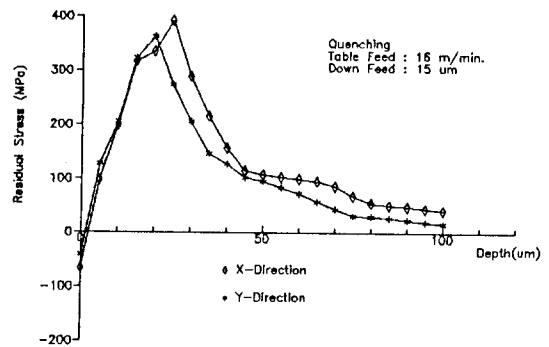


Fig. 3 Residual stress distribution beneath the surface

모든 경우에 있어서 表面에서는 모두 壓縮應力으로 存在하며, 깊이가 增加할수록 引張應力으로 됨을 알 수 있었다. 研削加工에서 殘留應力 分布가 복잡한 形態를 취하는 것은 주로 (1)熱의 作用, (2)切削作用, (3)摩擦作用의 3가지 要因에 의한 現象으로 說明할 수 있다. 이 現象은 研削作業時 研削溫度와 研削抵抗에 의한 殘留應力은 引張應力으로만 存在하지만 摩擦作用에 의한 應力은 壓縮應力으로 作用하게 된다. 특히 表面層 부분에서는 摩擦에 의한 影響이 크기 때문에 壓縮殘留應力으로 나타나게 되며, 점차 表面 밑 部分으로 갈수록 研削溫度나 抵抗에 의한 影響이 摩擦에 의한 影響보다 크기 때문에 引張殘

留應力이 存在하게 된다.

4-2. 研削깊이가 殘留應力分布에 미치는 影響

Fig. 4, 5는 熱處理를 하지 않은 試片을 table feed 를 8m/min. 으로 固定하고 研削깊이를 變化시킨 경우의 殘留應力分布을 X, Y方向에 대하여 나타낸 것이다.

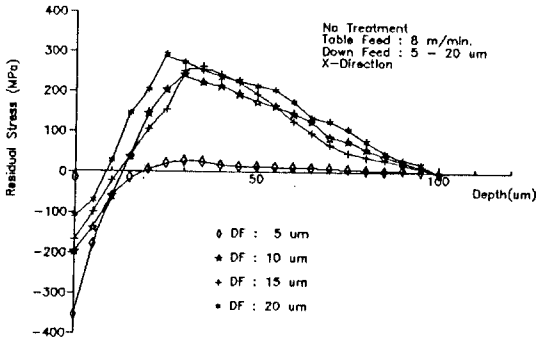


Fig. 4 Influences of down feed on residual stress distribution

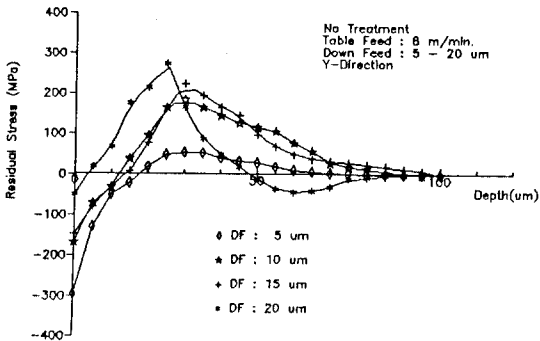


Fig. 5 Influences of down feed on residual stress distribution

이 그림에서 보면 研削깊이의 增加에 따라 壓縮殘留應力은 減少하며, 引張 殘留應力의 分布値는 增加함을 알 수 있었다. 이는 發熱量과 切削抵抗의 增加에 따른 것이다. 또한, 이것의 影響으로 壓縮에서 引張으로 殘留應力의 符號가 바뀌는 遷移點이 表面層 가까이로 나타남을 알 수 있었다.

4-3. 테이블 移送이 殘留應力分布에 미치는 影響

Fig. 6, 7은 研削깊이 5μm으로 固定하고 table fee

를 變化시켰을 때의 殘留應力 分布를 圖示한 것이다. 이 圖表에서 보면 테이블 移送의 增加에 따라 壓縮殘留應力은 減少하며, 引張 殘留應力의 分布値들은 增加함을 볼 수 있으며, 테이블 移送이 적을 때에는 最大殘留應力이 表面層에서 研削抵抗이나 研削溫度에 의한 影響보다는 숫돌의 壓縮으로 發生함을 알 수 있고, 이 경우 殘留應力의 分布値들은 引張應力보다는 壓縮應力에서 더 큰 값을 갖게 됨을 알 수 있다.

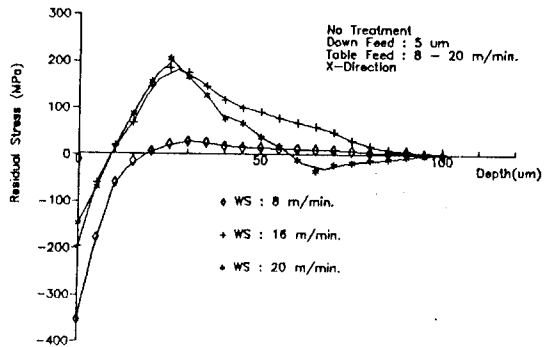


Fig. 6 Influences of table feed on residual stress distribution

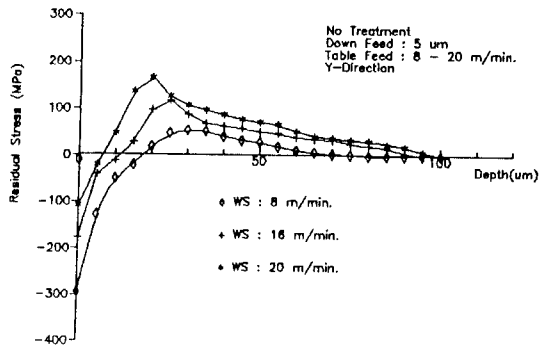


Fig. 7 Influences of table feed on residual stress distribution

Fig. 6과 Fig. 7을 비교하여 보면 같은 傾向을 보이는데, 이는 table feed의 增加에 따른 發熱量의 增加로 研削버어닝 效果에 의한 것으로 생각된다.

이와같은 研削버어닝 現象도 表面 근처의 殘留應力分布에 支配적으로 作用한다. 이러한 경향은 Fig. 6, 7의 比較에서 보는 바와 같이 테이블 移送의 增加에 따라서 摩擦에 의한 影響보다는 溫度와 切削抵抗에

의한 影響이 增加하므로 遷移點이 表面層으로 가까워지며, 最大殘留應力을 갖는 깊이도 얕아짐을 알 수 있다.

5. 結 論

平面研削된 機械 構造用 炭素鋼(SM45C)의 研削에 의하여 生成된 X, Y方向의 殘留應力分布를 分析하기 위하여 研削깊이, 테이블 移送, 熱處理의 條件에 따라 作業條件을 變化시키면서 實驗하였고, 이를 電氣化學的 加工方法인 electrolytic etching 技法을 利用하여 殘留應力分布를 算定하고 分析한 結果는 다음과 같다.

1. 本 實驗에서 選定한 作業條件에 따른 殘留應力의 分布는 비슷한 傾向을 나타내며, 最大殘留應力은 表面으로부터 20~30 μ m에 存在한다.

2. 加工表面으로부터의 殘留應力分布는 全般的으로 壓縮應力에서 引張應力으로 바뀌게 되는데, 이는 研削加工中 發生하는 摩擦作用에 의한 것이다.

3. 熱處理의 條件은 材料의 組織變化에 의한 硬度變化의 原因이 되며, 硬度의 增加에 따라 殘留應力의 分布值들도 增加하는 傾向을 보이고 있다.

4. 壓縮殘留應力은 疲勞強度를 向上시켜주므로, 壓縮殘留應力을 얻기 위하여는 研削깊이를 적게하고, table feed를 느리게 하여야 한다.

5. 研削깊이와 table feed가 클수록 壓縮應力에서 引張應力으로 바뀌는 遷移點이 表面層에 가까워짐을 볼 수 있다. 이는 研削溫度와 抵抗의 合成效果가 摩擦效果보다 더 크기 때문이다.

참고문헌

1. Charles, S., Barret, "Internal Stress", Metal and Alloys, vol. 5, pp. 131~154,

1934.

2. 三好良夫, "X線による表面 殘留應力の解析", JSME, Vol. 55, No. 8, pp. 1355~1359, 1989.
3. Siebel, E., "Slice Cut from Rolled Tubing and Slice Bores Out to Determine Residual Tangential Stresses", Inst. Eisenforsch, Vol. 11, pp. 279~285, 1929.
4. Hoger, O., T., Residual Stresses, Handbook of Experimental Stresses Analysis, John Wiley and Sons, 1950.
5. 若林三記夫, 中山守, "研削加工層의 殘留應力에 關する 研究", 精密機械, 50卷, 9號, pp. 137~143, 1984.
6. 江田弘, 貴地浩三, "有限要素法による 研削加工層의 殘留應力의 シミュレーション解析", 精密機械, 45卷, 11號, pp. 67~72, 1979.
7. Hiroshi Eda, Kozo Kishi, "Simulation Analysis of Residual Stress Ground Surface Layer by Use of FEM", 精密機械, 47卷, 3號, pp. 50~55, 1981.
8. Frisch, J., Cole, R., R., "Surface Effects and Residual Stresses in Electrolytically Ground Steel", Journal of Engineering for Industry, Nov., pp. 483~489, 1962.
9. Loxham, J., Purcell, J., "Measurement and Control of the Residual Stress Produced by Grinding Operations", Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 182, pp. 205~210, 1968.
10. Laracine, M., Bignon, C., Boivin, M., "Residual Stresses Measurements in Plates by Electrochemical Machining of Fine Layers", CIRP, Vol. 35, pp. 409~412, 1986.