

研削動力에 의한 Grinding Burn 檢知를 위한 기초적 研究

이재경*, 김건희**

A Basic Study on the Monitoring of Grinding Burn by Grinding Power Signatures

J. K. Lee*, G. H. Kim**

Abstract

Grinding burn formed on the ground surface is related to the maximum temperature of workpiece surface and wheel temperature in the grinding process. The thermal characteristics of workpiece and grinding conditions on the surface temperature of the oxidation growing layer after get out of contact with the grinding wheel.

The assumption used in grinding power signatures leads to the local temperature distribution between grinding wheel and workpiece, i.e., a single curve determines temperatures anywhere within the grinding wheel at anytime. This information is useful in the study of the grinding burn penetration into the wheel and thus provides an presentation of grinding trouble monitoring for the burning. On the basis of grinding power signatures in the wheel, thermally optimum grinding conditions are defined and controlled.

To cope with grinding burn, the use of grinding power signatures is an effective monitoring systems when occurring the grinding process. In this paper, the identified parameters suggested in this study which are derived from the grinding power signatures are presented, and prediction model by grinding power utilized a linear regression algorithm is applied.

Keywords : Grinding Burn, Grinding Power Signatures, Trouble Monitoring Systems, Prediction Model by Grinding Power, Linear Regression Algorithm.

* 한국기계연구원 자동화연구부

** 전주대학교 기계공학과

1. 緒 論

연삭버닝(Grinding burning)은 加工中の 被削材와 연삭숫돌과의 접촉면에서 발생하는 加工 最高溫度에 의해서 좌우된다. 연삭가공중에 발생하는 加工溫度는 매우 짧은 시간에 순간적으로 연삭숫돌과 공작물의 干涉領域에서 발생하며, 때로는 그 발생온도가 매우 높아 피삭재에 Burning현상을 초래한다. 특히 高硬度 工作物 加工의 경우에는 약 1500℃까지 상승한다⁽¹⁾. 공작물과 연삭숫돌사이에서 발생하는 연삭온도의 분포는 공작물과 연삭숫돌의 干涉領域 내에서 切入方向으로부터 대략 1/3 지점에서 최고온도가 발생한다⁽²⁾.

이와같은 연삭열에 기인하여 가공면이 고온에서 순간적으로 酸化하여 산화막이 생기고, 막 두께에 따라서 반사광의 干涉狀態가 변하기 때문에 여러 가지로 착색되어 보이는 현상을 연삭버닝이라고 한다. 河村⁽¹⁾에 의하면 연삭버닝의 정도에의해 가공면이 變色되어, 공작물과 연삭숫돌의 接觸面의 온도가 높아짐에 따라 黃色, 黃褐色, 褐色, 紫色, 青色, 靑白色으로 變化한다. 연삭버닝의 발생은 연삭 다듬질면의 結晶組織, 硬度變化, 殘留應力 등에 영향을 미치며, 나아가서는 가공물의 耐磨耗性, 耐蝕性, 耐疲勞性 등에 악영향을 미친다.

본연구는 研削動力을 이용한 연삭버닝의 Monitoring Systems구축을 위해 연삭동력 신호의 特徵을 파악하여, 분석한 데이터를 기초로 트러블 모니터링을 위한 파라메타를 同定(Identification)하는 한편 動力豫測 모델을 제시하여 연삭가공용 트러블 모니터링을 위한 基礎的 實驗을 하였다.

2. 버닝발생시의 研削動力 信號의 特徵

연삭동력의 변화는 가공시의 공작물과 연삭숫돌과의 切削力을 반영한 것으로, 동일한 加工條件에서는 연삭숫돌의 表面狀態의 변화에 따라 그 신호가 민감하게 반응한다. 이는 연삭숫돌이 自生作用이 있다고는 하나 外的 負荷의 어느 限界以上에서는 粒子(Grit)의 切刃作用이 劣化되므로 銳利한 粒子의 創生을 위해서는 드레싱(Dressing)해야만 한다.

Fig.1은 연삭버닝이 發生할때의 研削動力 信號의 特徵으로, 연삭버닝이 일어날 때는 연삭숫돌의 Loading

현상이 顯著해져 연삭동력이 정상상태보다 급격히 증가 또는 不安定 상태가 됨을 알 수 있다. 그러므로 이와같은 연삭동력 변화의 特徵을 모니터링함으로써 연삭버닝이 발생하는 시점을 檢知할 수 있다.

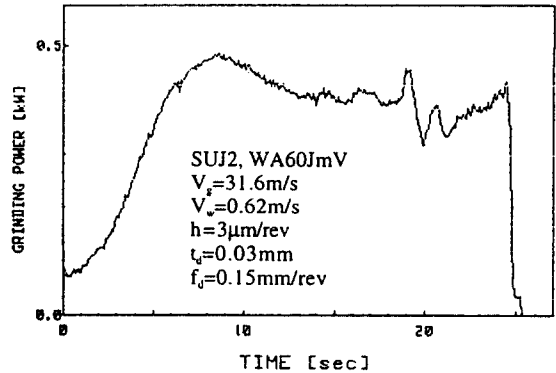


Fig. 1 Characteristic of Grinding Power Signatures Occurring Burn

3. 研削實驗 및 有效 파라메타의 同定

3.1 實驗裝置의 構成

Fig.2는 본연구를 수행하기위해 제작한 實驗裝置의 구성도이다. 연삭동력의 測定은 연삭숫돌축 電動機에 Transducer를 設置하여 그 出力을 A/D Converter

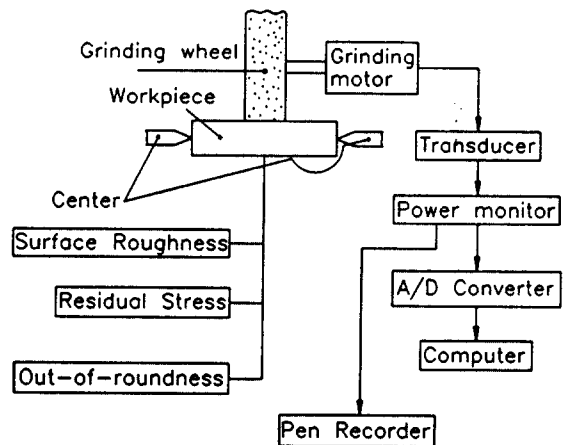


Fig. 2 Experimental Set-up

에 의해 컴퓨터에 入力·蓄積하고, 다른 한편으로는 Pen Recorder에 기록하였다. 또한, 加工品位の 평가를 위해서, 表面粗度の 측정은 Mitutoyo Surf-test 401 및 Mitutoyo 3D를, 眞圓度은 Mitutoyo Round Tester를, 硬度 및 殘留應力은 X-ray와 熱分析 장치인 StrainFlex MSF-2M/PSF-2M을 이용하였다.

3.2 유효 파라메타의 同定(Identification)

Fig.3은 연삭숫돌을 드레싱한 直後부터 동일한 가공 조건으로 연삭가공을 했을때의 연삭동력의 特性值인 標準偏差(S_d), 각 사이클의 초기동력과 말기동력과의 차 (ΔP_r), 동력의 瞬間搖動(P_{nu})을 研削時間 또는 연삭갯 수에따른 변화특성을 비교한 데이터이다. 본 결과에서와 같이 動力의 瞬間搖動(P_{nu}), 정해진 Sampling Time에서 잡은 研削動力 데이터의 性質을 나타내는 標準偏差 (S_d), 각 사이클의 初期動力(공작물을 실제적으로 연삭하기 시작하는 직후의 동력)과 末期動力(Spark-out 직전의 동력)과의 差(ΔP_r)는 어느 연삭가공 시간(본 실험에서는 연삭갯수, $N=9$ pieces 근방)에 있어서 急激한 변화가 있음을 알수 있다. 또한, Fig.4는 Fig.3의

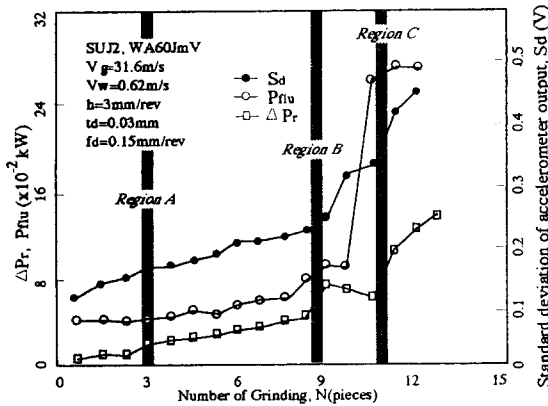


Fig. 3 Tendency to the Parameters of Grinding Power Signatures according to Number of Grinding

각 연삭갯수 $N(3, 8, 10$ pieces)에서의 研削動力 信號의 特徵을 Pen-recorder에 기록한 것이다. Fig.4와 같이 연삭버닝의 徵兆가 있는 $N=8$ pieces 부근에서 연삭

동력은 현저한 변화가 있기 시작하여 충분히 진행된 $N=10$ pieces에 있어서는 정상상태의 2~4배에 이르는 不安定 狀態가 됨을 알수 있다.

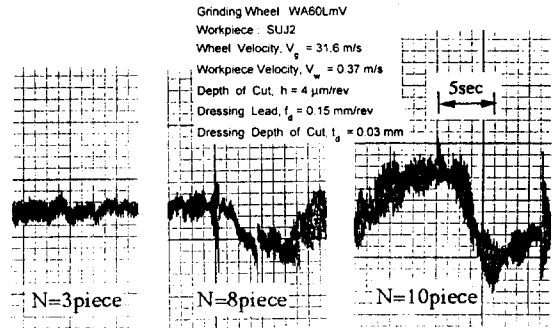


Fig. 4 Grinding Power Signatures for the Number of Grinding

Fig.5는 Fig.3에서 나타난 동력의 突發現象이 어느 限界의 시간까지 持續되었을 때 연삭버닝의 原因이 되는 가를 실험에 의해 분석한 결과이다. 즉, 동력의 搖動 P_{nu} (Fluctuation of Power Signatures)이 클수록, 또한 동력의 搖動的 持續時間 T_s 이 길수록 연삭버닝에 미치는 영향정도가 큼을 알 수 있다. 예로, P_{nu} 가 400W이고 T_s 가 200sec인 경우에는 공작물 표면이 褐色인 연삭버닝이 되었으며, 同一한 연삭버닝이라도 P_{nu} 보다는 T_s 이 연삭버닝에 많은 影響을 미침을 알 수 있다. 즉, 이는 Fig.5의 결과와 같이 P_{nu} 는 200W이상일 때 연삭버닝을 초래하는 원인이 됨을 알수 있고, 또한 P_{nu} 가 동일한 200W의 경우라도 持續時間 T_s 에 의해 연삭버닝의 정도가 다름을 알수 있다. 예로 P_{nu} 가 동일한 200W라 할지라도 持續時間 T_s 가 120sec일 때는 엷은 황색계통의 연삭버닝이 되었으나 250sec일때는 紫色系統으로 발전됨을 알수있다.

한편 研削動力의 突發時間(搖動量이 지속되는 시간)과 크기가 연삭버닝에 미치는 影響을 比較·分析할 필요가 있다. 이는 예로 Fig.6의 [A]領域에서와 같이 瞬間的으로 매우 짧은 시간에 나타나는 경우에 있어서도 연삭버닝으로 간주할 수 있는지의 문제가 提起된다. 이는 가공중에 일시적으로 突發的인 加工狀態의 변화에 의해 (研削液 공급불량 포함) 연삭버닝이 발생하였다 하여도

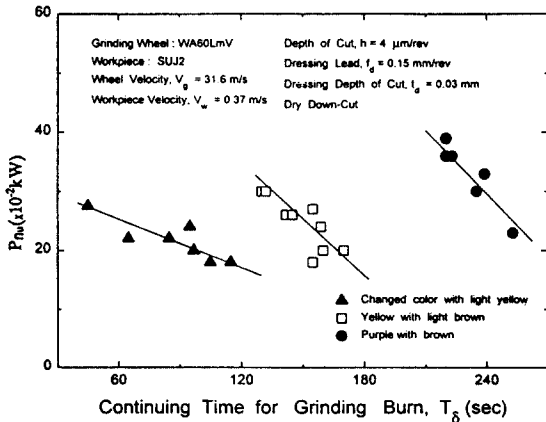


Fig. 5 Comparison between the Fluctuating and Continuing Time of Grinding Power Signatures

연삭공정이 끝나는 지점(한 사이클의 終了지점)이 아니라면 研削工程에 의해 제거될 것이기 때문이다. 따라서 이와같은 일시적이며 매우 짧은 시간에 間歇的으로 발생하는 경우에 있어서는 트리블로 간주하지 않고 加工工程을 지속하는 것이 加工能率面에서도 바람직하다. 그렇다면 突發 研削動力의 持續時間(T_{δ})이 어느정도이면 연삭

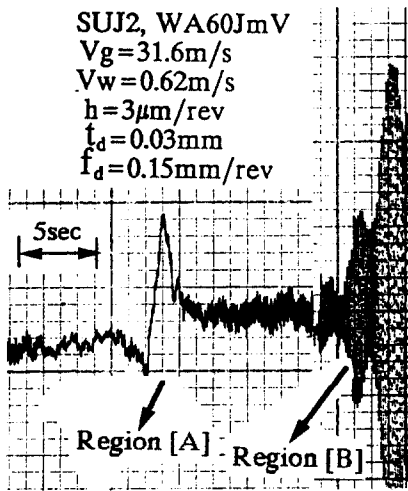


Fig. 6 Criterion to the Continuing Time of Grinding Power Signatures Adopted the Burning Parameters

버닝으로 認識해야하는가는 Fig.6(B)의 領域과같이 적어도 3.2secs 이상일때이다. 이결과는 實驗結果를 토대로 확인하였다.

이를 PC(Personal Computer)상에서 認識시키기 위한 개념이 Fig.7이다. 시작점(Starting Point)은 100msecs의 Sampling Time에서 n번째 데이터를 기준으로하여 n-4, n-3, n-2, n-1, n번째(Internal In-1)인 5개의 데이터 값을 산술평균하여 얻은 값과 n, n+1, n+2, n+3, n+4번째(Internal In) 데이터의 산술평균 값의 1次導函數의 기울기 $f'(x)$, 즉 $dy/dx = dy/dt \cdot dt/dx$ 인 時刻 t를 媒介變數로 한 기울기 값을 비교하여 기울기 $f'(x) > 0.3$ 이면 n번째 시간이 가공의 시작점이 되며, 만약 기울기 $f'(x) \leq 0.3$ 이면 종료점(Ending Point)으로 인식하도록 하였다. 여기서 약간의 시간지연은 무시할 수 있다.

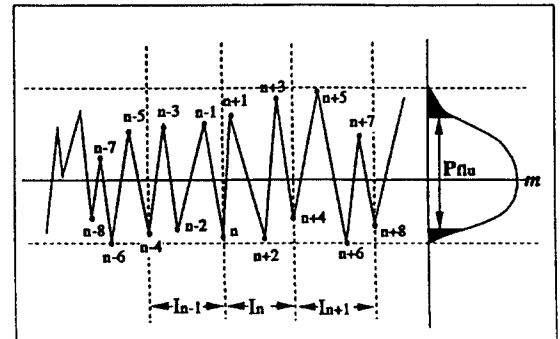


Fig. 7 Detail Description for the Definition of Parameter, P_{fl}

動的動力의 瞬間變化 P_{fl} 는 정착시간 이후에 있어서 각 100개의 데이터에 대하여 95%의 信賴區間을 고려한 正規分布 곡선의 폭 중에서 최대값으로 하였다. 이것은 100개의 데이터 중에 Noise 등으로 인한 갑작스런 동력변화가 발생하여 전체 데이터의 歪曲을 일으키는 것을 보완할 수 있다. ΔPr 는 정착시간에서의 동력값과 P_{fl} 이 정의되는 100개의 데이터의 算術平均값의 차이이다.

Fig.8의 (A), (B)는 연삭숫돌 절입깊이에 따른 P_{fl} 와 ΔPr 의 관계를 낸다. 이결과와 같이 두 파라메타 P_{fl} 와 ΔPr 는 연삭숫돌의 종류와는 관계없이 절입깊이

에 비례하는 傾向을 나타내고 있다. 즉 연삭가공 조건중 절입깊이가 연삭버닝에 미치는 影響이 크다는 것을 나타내고 있다. 이러한 결과는 G.H. Kim(3), K.Takazawa(4)의 연구결과와도 잘 일치되고 있다.

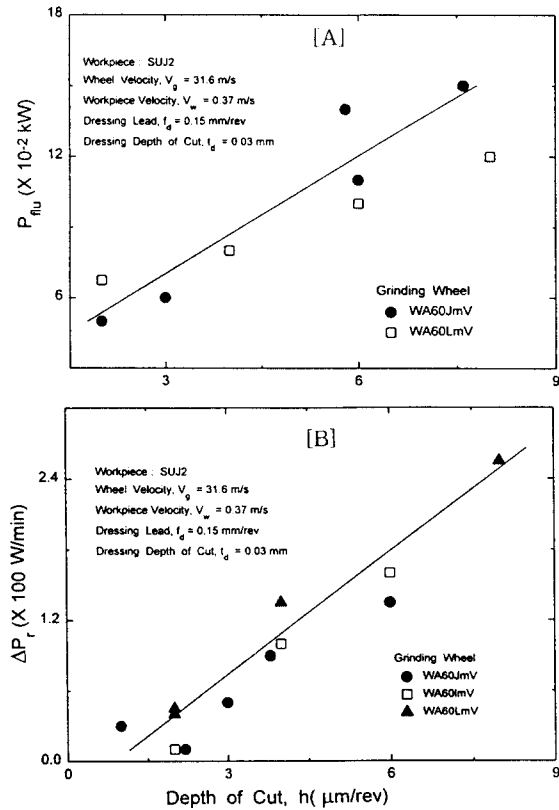


Fig. 8 Relationship between the Wheel Depth of Cut and the Identification Parameters

4. 研削動力의 예측모델

연삭결과의 예측에 관한 연구는 累積研削量を 時間變數로 해서 直線回歸分析을 利用한 井上⁽⁵⁾ 등의 연구와 相當研削깊이, 즉 숫돌 주속도에 대한 工作物 除去量を 기본으로한 J. Peter⁽⁶⁾의 實驗式이 제안되었다. 그러나, 井上の 實驗式의 단점은 研削條件에 대한 汎用性이 적는데 있다. 즉, 숫돌 주속도를 變換한 경우 그에 상응

하는 實驗係數가 없으면 研削結果에 대한 예측이 어렵다. 또한 J. Peter의 實驗式은 實驗式에 時間項을 고려하지 않아 時系列 研削結果의 예측이 어려운 점이 있어 實時間 制御가 곤란한 점이다.

本研究에서는 加工 Parameter를 變數로 해서 線形回歸式을 응용한 實驗 데이터를 利用한 實驗式을 適用하였다. 從屬變數를 Y로 하고, 獨立變數 x_i ($i=1, \dots, k$)인 k개의 變을 考慮하여, 그 影響을 고려한 1次式으로 표현하면

$$Y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + u \quad (1)$$

로 된다. 식(1)에서, u는 偶然的인 原因에 의한 變動部分을 나타내는 確率變數이다. 研削加工에 使用할 때, u의 期待値는 일반적으로 $u=0$ 로 간주할 수 있다. 따라서 式(1)은 다음과 같이 된다.

$$Y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (2)$$

여기서, n組의 實驗 데이터 ($Y_1, x_{11}, x_{21}, \dots, x_{k1}$), ($Y_2, x_{12}, x_{22}, \dots, x_{k2}$), ..., ($Y_n, x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{kn}$)이 얻어졌다고 하면 다음과 같은 선형모델이 된다.

$$E(Y_i) = \alpha + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki}, i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

여기서, $\alpha, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 는 實驗係數이며, x_i ($i=1, 2, \dots, n$)의 相互間에 獨立, 分散이 모두 σ^2 과 같다고 하면, 다음과 같은 聯立方程式으로 유도된다.

$$\begin{aligned} & \sum (x_{1i} - x'_1)^2 \beta'_1 + \sum (x_{1i} - x'_1)(x_{2i} - x'_2) \beta'_2 + \dots + \sum (x_{1i} - x'_1)(x_{ki} - x'_k) \beta'_k = \sum (x_{1i} - x'_1)(Y_i - Y') \end{aligned}$$

.....

$$\begin{aligned} & \sum (x_{ki} - x'_k)(x_{1i} - x'_1) \beta'_1 + \sum (x_{ki} - x'_k)(x_{2i} - x'_2) \beta'_2 + \dots + \sum (x_{ki} - x'_k)^2 \beta'_k = \sum (x_{ki} - x'_k)(Y_i - Y') \end{aligned} \quad (4)$$

윗식(4)에서, x'_i 는 平均値, β'_i 는 豫測値를 나타낸다. 本研究에서는 從屬變數(Dependent Variable)로 研削動力 Pr를 설정하고, 獨立變數(Independent

Variable)로는 研削加工條件인 연삭숫돌의 周速度 V_g , 工作物周速度 V_w , 절입깊이 h 와 드레싱 조건으로는 드레싱 절입깊이 t_d , 드레싱 移送速度 f_d 및 研削時間 T 로 하였다.

위에 제시한 변수에 의한 回歸式은 다음과 같이 표현된다.

$$P_f = \epsilon \cdot T^{\beta_1} \cdot V_g^{\beta_2} \cdot V_w^{\beta_3} \cdot h^{\beta_4} \cdot t_d^{\beta_5} \cdot f_d^{\beta_6} \quad (5)$$

係數 $\beta_i(i=1, \dots, 6)$ 와 定數 α 로 구성된 回歸式(5)을 線形化하기위해 兩邊에 自然對數를 취하면 아래(6)식과 같이 표현된다.

$$\ln P_f = \alpha \ln \epsilon + \beta_1 \ln T + \beta_2 \ln V_g + \beta_3 \ln V_w + \beta_4 \ln h - \beta_5 \ln t_d + \beta_6 \ln f_d \quad (6)$$

5. 實驗結果 및 考察

研削動力 信號를 기초로 본연구에서 選定한 變數의 有效性를 검증하기위해 工作物의 加工品位에 미치는 影響 및 線形回歸式으로 모델링한 動力豫測모델의 有效性에 대하여 비교하였다. 加工品位에 미치는 影響을 평가하기위해 表面粗度, 加工硬度, 殘留應力, 工作物種類에 대한 연삭버닝의 影響에 대하여 檢討하였다.

5.1 工作物 加工品位에 대한 影響

Fig.9는 연삭버닝이 公작物 表面조도에 미치는 影響에 대한 結果이다. 즉, Fig.3에서 提示한 파라메타인 P_{nu} , ΔP_r , S_d 가 연삭버닝의 檢知(Detecting)에 有效變수인가의 檢證을 위해 研削時間에따른 動力信號의 特征과 公작物 表面조도를 각 Point별로 對應·比較한 結果이다. 상부의 그림(A)는 研削加工 개수, $N=3$ pieces, (B)는 8pieces, (C)는 11pieces일때의 工作物 表面粗도에 대한 結果이며, 연삭갯수 9pieces부근에서 公작物 表面에 Yellow Type의 연삭버닝 현상이 나타났다. 따라서 위에 제시한 파라메타인 P_{nu} , ΔP_r , S_d 는 연삭버닝의 檢知(Detecting)에 有效한 파라메타임을 알 수 있다.

한편, Fig.10은 Fig.2에서 연삭버닝이 발생이후에도 계속 연삭을 했을때인, 즉 연삭갯수 $N=12$ pieces에서

의 연삭동력의 變化를 나타내고 있다. 이때는 연삭버닝과 동시에 체터진동이 並進하였다. 이는 연삭숫돌의 表面狀態가 Loading상태에서 公작物과의 接觸면의 加工

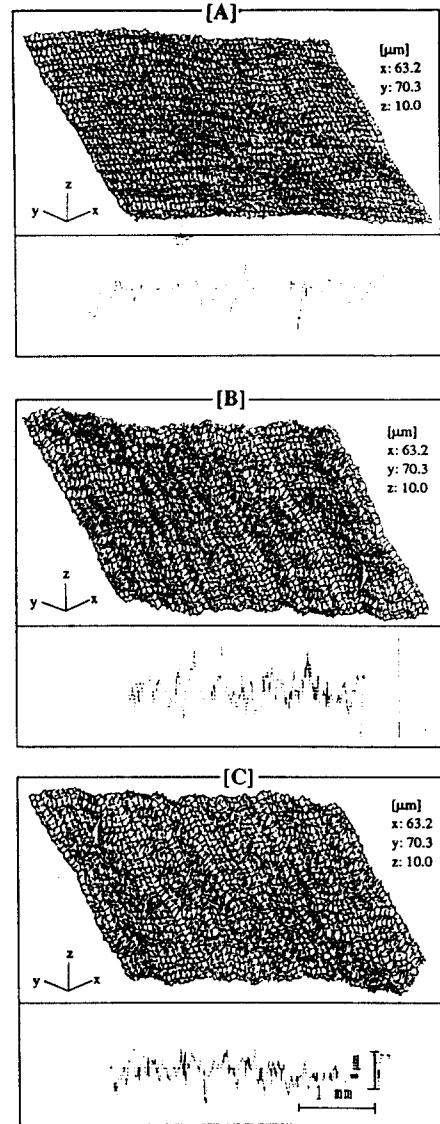


Fig. 9 The Influence of Grinding Burn for the Workpiece Surface Roughness

성이劣化되어 摩擦力的 증대에 따라 어느한계 負荷에 도달하면 가공이 진행되는 現象의 반복에 의해 나타나는 것으로 보여진다.

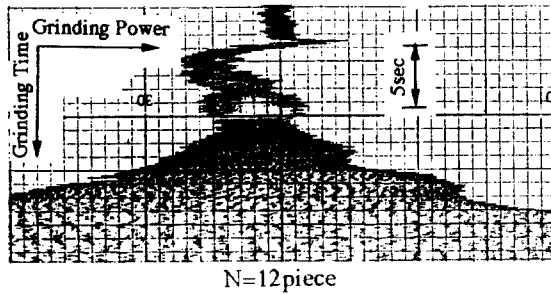


Fig. 10 Characteristic of Grinding Power Signatures After the Grinding Burn

또한, Fig.11은 연삭버닝이 공작물 경도에 미치는 影響을 실험을 통해서 얻은 결과이다. 동일한 가공조건에서도 연삭버닝의 정도에 따라 工作物の Hv硬度에 미치는 影響이 매우 큼을 알 수 있다. 즉, 연삭버닝이 발생하지 않았을때는 공작물 표면으로부터 400 μ m까지 硬度(Hardness)의 변화가 있다. 이는 기계가공에 있어서 純粹荷重에 의한 影響이고, 공작물의 着色이 Light Yellow \rightarrow Yellow with Light Brown \rightarrow Purple with Brown으로 발전할수록 공작물에 미치는 影響의 정도는

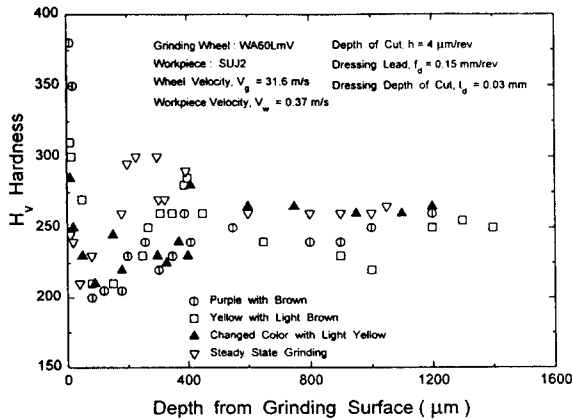


Fig. 11 The Influence of Grinding Burn for the Workpiece Hardness

많음을 알 수 있다. 밝은 褐色이나 暗青色인 경우에는 공작물 표면으로부터 1200 μ m까지도 影響을 미친다.

그리고 Fig.12와 Fig.13은 工作物の 殘留應力 및 工作物 種類에 따른 연삭버닝의 影響을 분석한 결과이다. Fig.12의 결과와 같이, 연삭버닝은 연삭조건중에서도 절입깊이(Wheel Depth of Cut)에 의해 가장 큰 影響을 받는다. 즉, 절입깊이가 클수록 공작물에 미치는 熱的損傷은 比例的으로 增加하며, 절입깊이가 17 μ m/rev 일때는 공작물 표면으로부터의 250 μ m까지 熱的損傷에 대한 影響이 있다. 이는 G.H. Kim⁽⁸⁾의 연구에서와 같이 연삭버닝에 미치는 研削加工條件의 定量的 評價에서도 연삭숫돌의 절입깊이가 다른가공조건에 비해서 상대적으로 크다는 결과와도 一致되고 있음을 알 수 있다

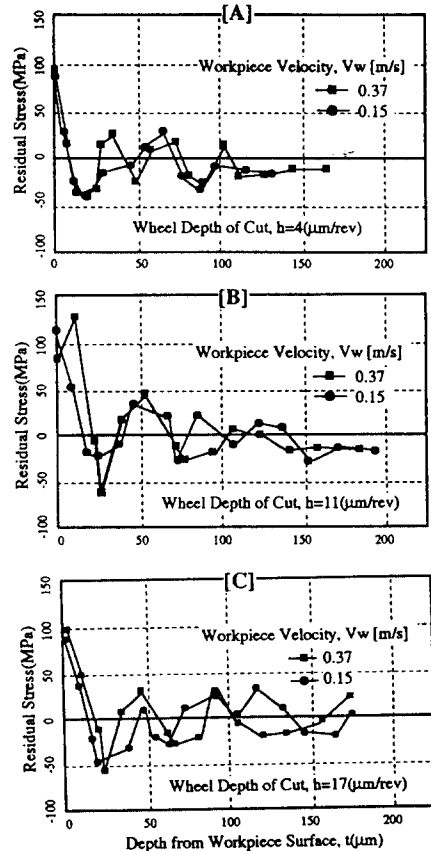


Fig. 12 The Influence of Grinding Burn for the Workpiece Residual Stress

한편, Fig.13과 같이 연삭버닝은 工件物 種類에 따라 그 影響程度가 다를 수 있다. 즉, 研削加工時의 연삭숫돌과 工件物간의 干涉領域의 最高溫度 θ_m 이 동일하여도 工件物의 硬度가 큰 SUJ2에 비하여 비교적 硬度가 낮은 S25C가 影響이 크다.

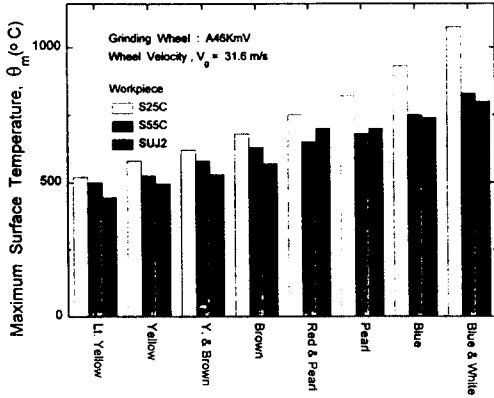


Fig. 13 The Influence of Grinding Burn According to Workpiece Kind

5.2 研削動力 예측모델

Fig.14는 研削動力에 대하여 적용한 것으로, 연삭숫돌이 WA60LmV, 工件物이 SUJ2를 숫돌주속도 $V_g=31.6\text{m/s}$, 工件物 주속도 $V_w=0.37\text{m/s}$, 절입깊이 $h=6\mu\text{m/rev}$, 드레싱 깊이 $t_d=0.03\text{mm}$, 드레싱 이송속도 $f_d=0.15\text{mm/rev}$ 인 경우로 다음과 같은 係數 β_i

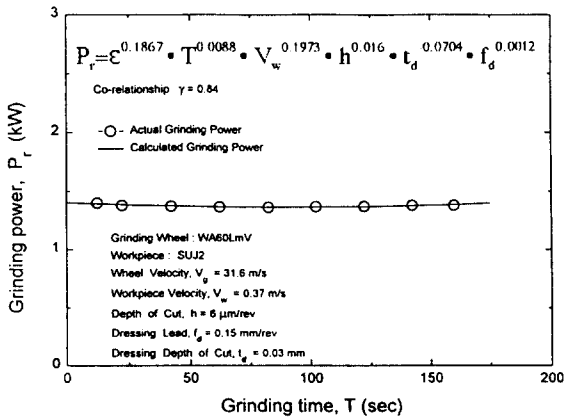


Fig. 14 Prediction of Grinding Power Represented the Linear Regression Model

와 定數 a 가 되는 실험식을 얻었으며, 이때의 相關係數 $\gamma=0.84$ 를 얻었다.

$$P_r = \epsilon^{0.1867} \cdot T^{0.0088} \cdot V_w^{0.1973} \cdot h^{0.016} \cdot t_d^{-0.0704} \cdot f_d^{0.0012} \quad (7)$$

실험데이터로부터 얻어진 回歸式(7)을 線形化하기 위해 兩邊에 自然對數를 취하면 아래식 (8)과 같이 표현된다.

$$\ln P_r = 0.1867 \ln \epsilon + 0.0088 \ln T + 0.1973 \ln V_w + 0.016 \ln h - 0.0704 \ln t_d + 0.0012 \ln f_d \quad (8)$$

윗식(8)에서와 같이 연삭동력의 예측모델은 研削加工時間函數에 대하여 유효함을 알 수 있다. 즉, 이는 研削加工의 Inprocess Monitoring이 可能함을 나타낸다.

그러나, 연삭가공에 關係하는 파라메타 중에서 獨立變數를 工件物 周速度 V_w , 절입깊이 h 및 드레싱 깊이 t_d , 드레싱시의 移送速度 f_d 만을 변수로 했을 때 가장 모델의 信賴性이 있었다. 이는 연삭가공에서 숫돌 주속도는 최대회전수를 이용하는 것이 가공능률 면에서도 유효하므로 연삭숫돌 주속도는 독립변수로 취급할 필요가 없다⁽⁷⁾. 그러나, 본 회귀모델은 연삭숫돌을 고정변수로 해야하므로 연삭숫돌 종류에 대해서는 Data File을 이용해야 하는 단점이 있다.

6. 結 論

본연구는 研削動力을 이용한 연삭버닝의 모니터링을 위해 연삭동력 신호의 特徵을 파악하여, 분석한 데이터를 토대로 연삭가공용 트러블 모니터링에 이용하기 위한 파라메타를 同定 및 動力豫測 모델을 제시하여 연삭가공용 트러블 모니터링을 위한 기초적 실험을 하였다. 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 연삭가공 중에 발생하는 연삭버닝을 연삭동력의 변화를 檢知하여 효과적으로 감시할 수 있음이 試驗結果에서 밝혀졌다.
- (2) 實驗으로부터 同定(Identification)한 3개의 파라메타 P_{ru} , S_d , ΔP_r 은 研削加工용 트러블 모니터링을 위한 유효한 파라메타이며, 동정한 파

라메타의 特性値에서의 工作物の 加工品位에 대한 比較結果는 잘 일치 되었다.

- (3) 線形回歸 모델로 제시한 研削動力 예측모델,

$$\ln P_r = \alpha \ln \varepsilon + \beta_1 \ln T + \beta_2 \ln V_w + \beta_3 \ln h - \beta_4 \ln t_d + \beta_5 \ln f_d$$

의 有效性은 實驗結果와 잘 일치되었다.

參 考 文 獻

- (1) S. Kawamura, Y. Iwao, S. Nishiguchi: "Studies on the Fundamental Grinding Burn(2nd Report)," JSPE, Vol.45, No.1, 1986, p.83
- (2) N.R. Desrulsseaux, R.D. Zerkle: "Temperature in Semi-Infinite and Cylindrical Bodies Subjected to Moving Heat Sources and Surface Cooling," ASME, August, 1970, p.456
- (3) G.H. Kim, J.K. Lee: "Knowledge Acquisition and Design for the Grinding Trouble Knowledge-base," KSPE, Vol.12, No.1, 1995, p.47
- (4) K. Takazawa: "The Flowing into the Work of the Heat Generated by Grinding," JSPE, Vol.30, No.12, 1971, p.914
- (5) H. Inoue et al: "Development of a Grinding Process Simulation Program," Technical Report of Mechanical Engineering Laboratory(Japan), 1988, No.111
- (6) J. Peters et al: "The Proper Selection of Grinding Condition in Cylindrical Plunge Grinding," Proc. Int'l Machine Tool Res. Conf. 16th, 1976, p.243
- (7) Gunhoi Kim, Ichiro Inasaki: "Establishment of Optimum Grinding Conditions Utilizing the Fuzzy Regression Model," JSME, Vol.59, No.566, 1993, p.280
- (8) 김 건희 외 3인: "內面研削의 加工能率向上에 관한 연구," 한국자동차공학회 논문집, 제2권, 제6호, 1994, p.87