

# 工作機械 性能 向上의 理論과 實際 (Ⅱ)

## — 工作機械의 熱變形 (上) —

李長茂 · 韓圭煥

<서울대 工大·工博> <大韓重機工業(株)>

### 1. 緒 論

最近의 工作機械에서는 數値制御等에 의한 自動化가 활발히 研究, 實用化되어 우리나라에서도 이미 상당한 量의 NC 工作機械가 가동되고 있다. (1979년까지 도입대수 669臺)<sup>1)</sup> 이러한 工作機械에서는 그 生産性和 아울러 精密度가 要求되며 따라서 以前에는 問題視되지 않았던 熱變形에 대한 문제가 靜的 및 動的剛性度 問題와 함께 工作精度를 向上시키기 위한 重要한 問題로 되고 있다.

精密加工에 있어서 發生하는 工作誤差中 熱變形에 의한 誤차가 어느정도 차지하느냐 하는 것은 條件에 따라 다르겠으나 J. Peklenik<sup>2)</sup>는 40~70%를 차지한다고 報告하고 있다.

工作機械의 熱變形에 대한 實驗結果를 체계적으로 다룬것은 H. Opitz와 J. Schunk<sup>3)</sup>가 처음으로써 특히 H. Opitz<sup>3)</sup>는 工作機械全般의 熱變形의 問題를 當時의 研究成果를 解析하면서 補償의 問題로까지 확대하여 주목되었다.

그후 工作機械의 自動化에 따라 熱變形에 대한 補償의 問題는 상당히 중요하게 다루어졌고 많은 論文이 發表되었다. 그러나 이러한 論文들의 대부분은 熱變形의 實情의 파악 즉 實驗的인 研究에 지나지 않았으며, 이 論文들에서 다루고 있는 熱變形에 대한 對策도 冷却이라든가, 熱源의 제거等 상식적으로 생각할 수 있는 것으로써 熱變形의 本質에까지 언급한 것은 드물다.

그후 R. Wolfbauer<sup>4)</sup>는 熱變形에 대한 實驗結果와 計算結果를 對比시킨 최초의 論文을 發

表하였고 H. Opitz와 J. Schunk<sup>5)</sup>는 工作機械에서의 熱傳導문제를 板의 一次元 熱傳導문제로써 다루었으며 E. Salje<sup>6)</sup>는 工作機械의 各要素의 熱變形을 棒의 形狀으로 보고 熱變形을 計算하는 方法을 提案하였다. 또한 G. Spur와 H. Fisher<sup>7)</sup>는 처음으로 熱剛性이라는 말을 사용하여 熱剛性에 의한 工作機械의 熱的性質의 判定에 대해서 提案하고 있다.

최근에는 大型電子計算機가 發達함에 따라 有限要素法(Finite Element Method)으로 熱變形의 解析은 물론이고 그 制御方法에 대한 研究가 활발히 이루어지고 있다. 그 가운데 Okushima와 Kakino<sup>8)</sup>는 熱變形을 定常상태에서의 熱變形 內部熱源에 의한 熱變形, 液體의 순환에 의한 熱變形으로 나누어 여기에 有限要素法을 적용한 研究結果를 發表하고 있다.

이외에도 外氣온도의 變化에 의한 工作機械의 熱變形에 관한 實驗的인 研究도 상당히 이루어지고 있다.

### 2. 熱變形과 工作精度

工作機械의 熱變形은 그 機構가 복잡하고 正確한 溫度나 變位量의 測定이 상당히 곤란하다. 또한 加工中에 熱은 工作機械의 상당히 많은 부분에서 發生하며 그 크기는 條件에 따라 달라진다.

熱源으로는 그림 1에 표시한 바와같이 工作機械에 고유한 內部熱源과 고유하지 않은 外部熱源으로 나누어지며 內部熱源은 電動機, 베어링, 齒車, 案内面等의 驅動에 의해서 發生하는 損失

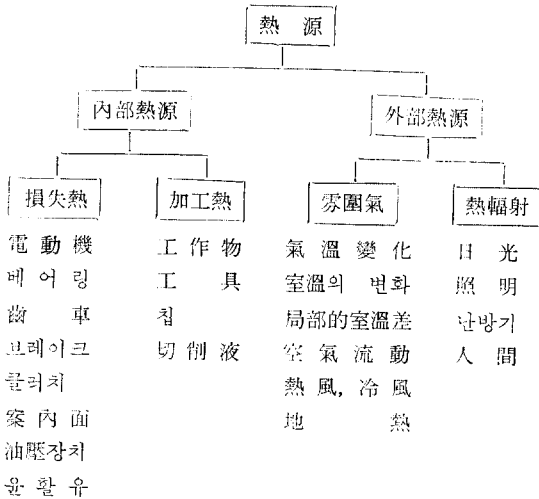


그림 1. 공작기계의 열원

熱과 工具, 칩(chip)等 切削點에서 發生하는 加工熱로 나눌 수 있다.

外部 熱源으로서는 분위기 온도의 變化와 太陽, 照明等의 熱輻射에 의한 것이 있다.

이러한 熱原이 原因으로써 工作精度가 저하하는 經過는 그림 2와 같다. 즉 發生한 熱은 工作機械本體에 傳達 또는 傳導에 의해서 部分的인 溫度上昇을 가져오고 대부분의 경우 不均一한 溫度分布를 이루게 된다. 이 溫度上昇에 의해 工作機械의 構成要素는 熱膨창하여 그 形狀이나 구조에 따라 복잡한 變形을 일으킨다.

이러한 工作機械 各要素의 熱變形中에서 工作精度에 영향을 미치는 成分을 抽出하여 綜合的으로 생각하여야 한다. 즉, 個個의 構成要素의 熱變形이 아무리 커도 綜合된 熱變形에 의한 工具와 工作物의 相對的인 위치관계가 變化하지 않으면 熱變形에 起因한 工作精度의 저하는 생기지 않을 것이다. 또한 工作物의 精度變化는 工作機械의 自體熱變形뿐만이 아니고 工具의 加熱에 의한 變形, 工作物의 加熱에 의한 變形에 의해서도 일어난다.

위에 언급한 各熱源에 있어서의 發熱量이나 분위기 온도 등은 作業內容과 時間의 經過에 따라 變化하며 또한 工作機械나 工作物의 熱源에 따라서 溫度上昇에 過渡현상이 일어나 熱變形은

本質的으로 시간과 함께 變化하는 非定常 現象이다.

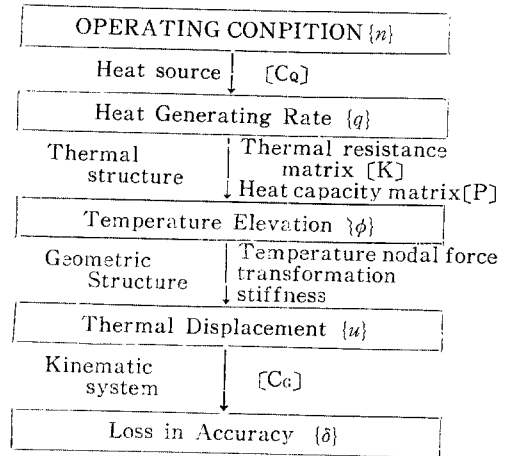


그림 2. 열변형 기구

### 3. 熱變形的 實態

熱變形에 의한 工作精度의 低下가 문제로 되지 않는 工作機械는 없다. 단지 熱變形이 工作精度에 미치는 영향이 다른 因子 즉 靜剛性, 動剛性, 工具마모 等의 영향에 比較해서 적은 경우 熱變形을 문제시할 필요는 없다. 그러나 工作機械의 대부분은 그렇지 않다. 예로 들면 선반에서는 工作精度에 미치는 熱變形의 영향은 적다고 생각할 수 있으나 工作物이 긴 경우나 copy 作業, 數值制御 장치등을 갖는 선반에 의한 반복 작업의 경우는 熱變形이 커다란 문제로 된다. 특히 最終加工機械인 研削機에 있어서는 熱變形의 문제는 상당히 중요하다.

앞에서 언급한 바와 같이 工作機械의 熱變形은 時間과 함께 變化하는 非定常現象이므로 각 부분에서의 熱變位도 상당히 복잡한 모양을 갖는다. 그림 3은 KOHEMA-360(대한중기製) 선반의 無負荷 연속운전(최고 회전수 1500rpm)時의 主軸前後 및 後部の 온도上昇에 대한 것이다. 선반의 主軸臺(Headstock)에는 主軸 및 그 驅動機構를 내장하고 있기 때문에 이들의 運轉을 위하여 많은 潤滑油가 공급된다. 따라서 主軸의

□ 解 說

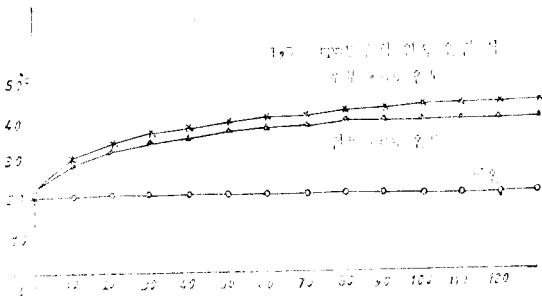


그림 3. 선반에서의 主軸베어링의 溫度上昇 (KOHEMA-860, 대한중기 Co.)

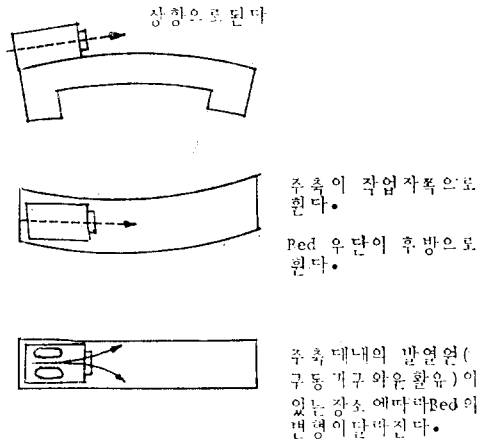


그림 5. 선반 Bed의 열변형

모양을 보여 주고 있다.

한편 Okushima와 Kakino<sup>10)</sup>는 主軸臺에 있어서 熱에 의한 主軸變位量의 實驗을 통하여 熱的 對稱性이 중요하다는 것을 보여주고 있으며 H. Schuler<sup>11)</sup>는 直徑 30φ, 길이 60mm의 鋼材를 精密선삭한 경우의 製品의 圓통도 오차를 測定하여 工具가 초기마모를 지난 단계에서는 圓통도 오차의 대부분이 工具마모보다는 오히려 工具나 被削材의 熱變形에 의한다는 것을 보여주고 있다.

工作物과 工具와의 相對位置중에서 垂直方向 相對變位는 內部熱源의 온도가 변하면 時間의 經過와 함께 복잡하게 변한다는 것은 앞서서도 언급한 바가 같다. 이것을 밀링機에서 살펴보면 회전수가 적은 領域에서는 모우터의 發熱이 主軸頭를 포함한 기타의 發熱보다도 크게 되어 작

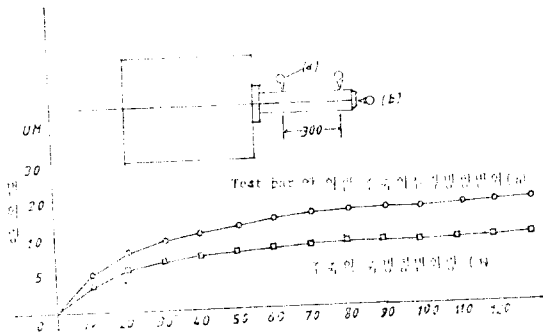
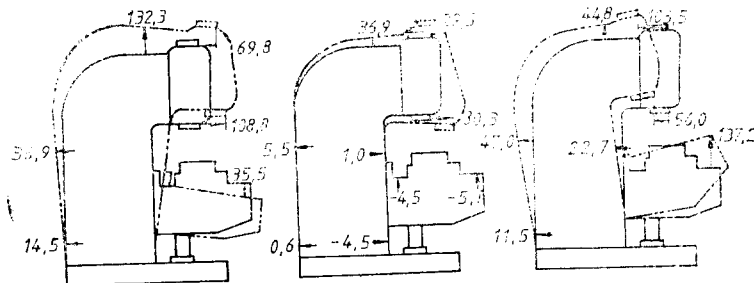


그림 4. 선반主軸臺의 熱變形 (KOHEMA-860, 대한중기 Co)

回轉과 더불어 기름의 溫度가 상승하고 이것이 熱變形의 原因이 된다.

그림 4는 主軸에 테스트 바를 넣어 垂直方向의 움직임을 測定한 것이며 아울러 主軸의 길이 방향의 變位量을 보여 준다.

또한 그림 5에는 선반 베드(Bed)의 변형 상태를 나타낸 것으로 發熱源의 場所에 따라 異相한



(a) 칼럼內部 가열의 경우 (b) 主軸頭 內部가 열의 경우 (c) knee body 內部 가열의 경우

그림 6. 수직밀링의 열변형(knee type) (단위 μm)

업자 쪽으로 기울어지기 때문에 垂直方向의 變位는 負의 상태로 되고 回轉數가 높은 領域에서는 主軸頭 등의 發熱이 모우터의 發熱보다도 크게 되어 컬럼(column) 自體의 變位가 커져서 “十”의 變位로 된다. Yoshida<sup>12)</sup>氏는 수직밀링 機에 있어서 컬럼, 主軸頭, 니이(Knee) 內部를 靜的 加熱하여 그 實驗결과를 그림 6과 같이 보고 있다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 熱源이 存在하는 위치에 따라 熱變形의 경향은 상당히 다르다. 이것은 熱源의 條件 즉 加工條件을 알면 당연히 熱變形의 모양을 알 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 보통의 범용工作機械에서는 作業條件이 상당히 광범위하기 때문에 그 發熱에 의한 熱變形은 상당히 복잡한 모양을 갖게 된다.

이와같이 工作物과 工具와의 상태 위치 관계는 1 대의 기계에서조차 주어진 조건에 따라서 달라지며 機械가 달라지면 그 경향도 당연히 변하게 된다. 결국 熱變形대책은 각 機種에 대해서 또한 각 機械에 대해서 별도로 생각하는 편이 바람직 하다고 하겠다.

### 참 고 문 헌

- 1) 변문현: “국내 도입 NC공작기계의 운용실태와 그의 효율적인 사용방안 연구” 대한기계학회지, 1980. 6
  - 2) J. Peklenik; “Untersuchung der Genauigkeitsfragen in der Automatisierten Fertigung” (1967)
  - 3) H. Opitz & J. Schunck; “Untersuchung des Einflusses von Wärmedehnungen bei Werkzeugmaschinen auf die Fertigungsstabilität” (1965)
  - 4) H. Opitz; “Untersuchung thermisch bedingter Verformungen an Werkzeugmaschinen”(1966)
  - 5) R. Wolfbauer; “Über den Einfluß der Wärme auf die Arbeitsgenauigkeit von Feinbearbeitungsmaschinen” (1962)
  - 6) H. Opitz & J. Schunck; “Untersuchungen über den Einfluß thermisch bedingten Verformungen auf die Arbeitsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen” (1966)
  - 7) E. Salje; “Wärmedeformationen und Steifigkeit bei Werkzeugmaschinen” (1967)
  - 8) G. Spur & H. Fisher; “Thermal behavior of machine tools” (1969)
  - 9) 奥島啓式 & 垣野義昭: “工作機械의 熱變形에 關する 研究” 第1報~第4報 (1971~1972, 精機學會秋季大會學術講演會)
  - 10) 奥島啓式 & 垣野義昭 “工作機械의 熱變形” (1973)
  - 11) H. Schuler: Industrie-Anzeiger, 80-5 (1958)
  - 12) 吉田嘉太郎: “立てフライス盤의 熱變形에 關する 研究” 機械技術研究所 報告 第82號 (1975)
- (5 페이지에서 계속)
- 19) A Comparison of Capital Investment Requirements for Alternative Domestic Energy Supplies.  
(Arlington, Va: The American Gas Association [AGA], May 18, 1979)
  - 20) Monthly Labor Review, October 1978. p.70
  - Handbook of Labor Statistics 1977, Bureau of Labor Statistics Bulletin 1955 (Washington D.C.: U.S. Government Printing Office 1978)
  - 21) National Energy Plan (Washington, D.C. U. S. Government Printing Office, April 29, 1977)