

수평형 머시닝센터의 CAE 해석 사례



김석일

한국항공대학교

1. 서론

일반적으로 CAE(Computer Aided Engineering)는 제품 개발과 관련한 계획, 설계, 해석, 시뮬레이션, 제작, 진단, 수리 등과 같은 엔지니어의 업무들을 지원하기 위해서 컴퓨터 기반의 정보 기술을 이용하는 것이다. 현재는 거의 대부분의 산업 분야에서 컴퓨터를 사용하고 있기 때문에 다양한 형태의 CAE들이 존재하는데, 본 원고에서의 CAE는 유한 요소법(finite element method)에 기반을 둔 좁은 의미의 컴퓨터 원용 해석을 의미한다.

21세기로 접어들면서 전 산업 분야에 걸쳐서 국내외적으로 무한 경쟁 시대가 도래하였고, 그 결과로 특히 제조업체들의 경영 환경은 점점 악화되고 있다. 이러한 상황에서 제조업체들은 생존을 위한 노력의 하나로 제품의 성능이나 특성을 제품 제작 전에 예측하여 납기 단축, 원가 절감, 품질 향상 등을 도모하기 위해서 CAE의 도입을 적극 추진하고 있다.

‘기계를 만드는 기계(mother machine)’로 표현되는 공작기계는 전통적인 제조 산업은 물론 IT, BT, NT, ET 등과 같은 성장 동력 산업에서도 필수적으로 사용해야 할 자본재 산업의 핵심이다. 따라서 공작기계 산업은 그 시장 규모가 비교적 작지만, 제조업 경쟁력 강화와 산업 구조의 고도화를 구현하기 위한 전방 산업으로써 그 파급 효과가 매우 큰 것으로 평가되고 있다. 특히 공작기계 산업은 규격, 성능, 품질 등이 매우 다양하기 때문에 기술 축적에 많은 시간이 요구되는 기술 집약적 산업이라는 점에서 공작기계 개발에 소요되는 비용 절감과 기간 단축을 위해서 CAE 기술을 적극 활용하는 것이 매우 효과적이라는 인식이 널리 확산되고 있다. 본 원고는 저자가 수평형 머시닝센터(horizontal machining center)의 설계 단계에서 수행했던 CAE 해석과 관련된 논문들^{1,2)}을 토대로 재구성한 것으로서 공작기계의 CAE 해석에 대한 이해를 돕는 데 그 목적을 두었다.

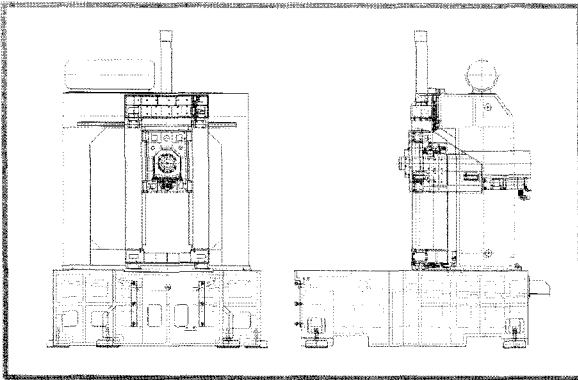


Fig. 1 High-speed horizontal machining center

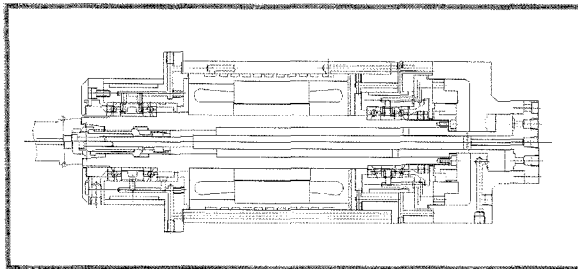


Fig. 2 High-speed spindle system with built-in motor

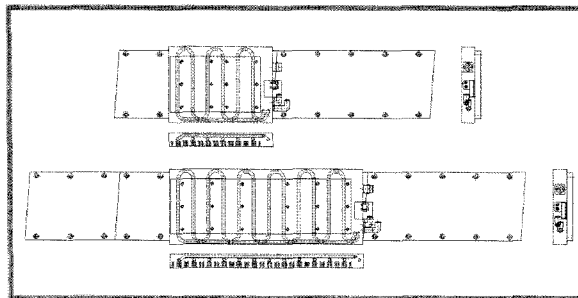


Fig. 3 Linear motors (lower/upper : X-axis/Y-axis)

2. 수평형 머시닝센터의 구조 및 제원

머시닝센터를 중심으로 한 공작기계의 고속화는 고속 절삭을 통한 생산성 및 가공 정밀도의 향상, 경합금 및 난삭재의 고능률 가공, 그리고 절삭과 연삭의 복합화 등을 구현하기 위해서 추구하고 있다. 특히 고능률 절삭을 구현하기 위해서는 주축계의 고속화만이 아니라 이송계의 고속화도 요구된다. 최근 국내외 공작기계 업체들은 이러한 고속화

요구에 대응하기 위한 노력의 일환으로 내장형 모터 구동 방식의 주축계, 그리고 리니어 모터(linear motor) 구동 방식의 이송계를 머시닝센터에 적극 채용하고 있다.

Fig. 1은 내장형 모터 구동 방식의 주축계와 리니어 모터 구동 방식의 이송계를 기반으로 설계한 화천기공(주)의 수평형 머시닝센터의 구조를 보여주고 있는데, 공작물로의 공구 접근성을 개선하기 위해서 X축, Y축 및 Z축 이송을 모두 문형 컬럼(gantry-type column) 상에서 구현하고 있다. Fig. 2에서 볼 수 있는 주축계는 주축 직경과 회전수가 $\varnothing 45$ mm와 50,000 rpm이고, 주축이 각각 2개의 앵귤러 콘택트 세라믹 볼 베어링(angular contact ceramic ball bearing)들로 구성된 전반부 베어링과 후반부 베어링에 의해서 지지되며, 전반부 베어링과 후반부 베어링 사이에 위치한 정격 출력 13 kW의 내장형 모터에 의해서 구동되는 형태이다. 또한 전반부 베어링과 후반부 베어링은 오일-에어 윤활 방법(oil-air lubrication method)에 의해서 윤활하였고, 냉각 자켓(cooling jacket)들을 전반부 베어링과 후반부 베어링의 외륜 부분과 내장형 모터의 고정자 부분에 설치하여 주축계의 온도 상승을 억제하였다.

X축과 Y축 이송계는 이송 속도와 가속도가 120 m/min와 1.2 G이며, 이송 운동의 안정성 향상을 도모하기 위해서 1쌍의 리니어 모터와 LM 가이드(linear motion guide)를 좌측과 우측에 위치시키는 양측 구동 방식을 채용하였다. Fig. 3에 제시한 X축과 Y축 리니어 모터는 정격 출력이 9.6 kW와 4.8 kW, 최대 속도가 모두 240 m/min이며, 리니어 모터의 이동자 내부에는 리니어 모터의 온도 상승을 억제하기 위한 냉각 파이프가 설치되어 있다. 그리고 주축대의 퀴(quill) 운동을 담당하는 Z축 이송계는 이송 속도와 가속도가 40 m/min와 0.6 G이며, 정격 출력 4.5 kW의 서보 모터(servo motor), 볼 스크류(ball screw) 및 LM 가이드에 의한 구동 방식을 채용하였다.

3. 수평형 머시닝센터의 구조 해석

수평형 머시닝센터의 구조 해석 모델에서는 베드, 컬럼, Y축 베이스, 주축대, 주축 등과 같은 구조물들은 쉘 요소

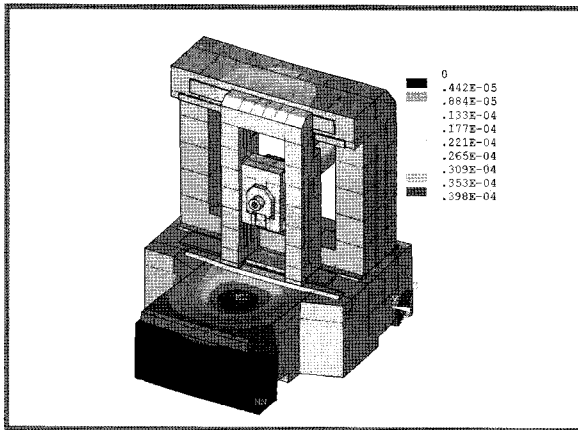


Fig. 4 Structural deformation of the machining center

(shell element)와 솔리드 요소(solid element)를 이용해서 표현하고, 리니어 모터, 볼 스크류, LM 가이드, 베어링 등과 같은 운동 요소들의 강성 및 감쇠계수는 매트릭스 요소(matrix element)를 이용해서 표현하였다. X축과 Y축 리니어 모터의 축 방향 강성은 800 MN/m, Z축 볼 스크류의 축 방향 강성은 781 MN/m이고, LM가이드의 법선 방향과 횡 방향 강성은 X축 LM가이드의 경우 1,155 MN/m와 1,126 MN/m, Y축 LM가이드의 경우 1,231 MN/m와 1,126 MN/m, Z축 LM가이드의 경우 1,333 MN/m와 1,154 MN/m이며, 베어링의 반경 방향 강성과 감쇠계수는 전반부 베어링의 경우 117 MN/m와 0.90 kN·s/m, 후반부 베어링의 경우 101 MN/m과 0.78 kN·s/m이다. 또한 수평형 머시닝센터의 구조 재료에는 주축, LM 가이드, Y

축 베이스 등의 재료인 강재, 그리고 베드, 컬럼 등의 재료인 주철 외에도 내장형 모터, 리니어 모터 및 세라믹 볼 베어링의 재료 등이 있으며, 구조 해석의 경계 조건으로는 베드와 지면이 만나는 볼트 고정점들의 자유도를 모두 구속시키는 방법을 사용하였다.

Fig. 4는 자중에 의한 수평형 머시닝센터의 구조 변형을 보여주고 있다. 자중에 의한 수평형 머시닝센터의 최대 변위는 39.8 μm 로 베드의 상면 중앙에서 발생하는 것으로 나타났는데, 그 원인은 베드의 상면 자체가 리브(rib)나 격벽(bulkhead)이 설치되지 않은 판 구조 형태를 이루고 있어서 상대적으로 구조 강성이 취약하다는 데 있다. 또한 자중에 의한 주축 선단점의 변위는 28.6 μm 이며, 그 변위의 대부분은 Y축 이송계에서의 축 방향 변위에 기인한 것으로 나타났다. 특히 주축 선단점의 X축과 Z축 변위가 1.2 μm 와 1.3 μm 에 불과하다는 것으로부터 수평형 머시닝센터의 좌우 균형과 전후 균형이 우수하게 설계되었음을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 모드 해석(modal analysis)을 통해서 얻은 수평형 머시닝센터의 진동 모드(vibration mode)들을 보여주고 있다. 45.1 Hz에서 발생하는 1차 진동 모드는 컬럼이 좌우 방향으로 굽힘 진동하는 형태이고, 47.1 Hz에서 발생하는 2차 진동 모드는 컬럼이 전후 방향으로 굽힘 진동하는 형태이다. 그리고 89.4 Hz에서 발생하는 3차 진동 모드와 97.8 Hz에서 발생하는 4차 진동 모드는 주축계 전체가 요우(yaw) 방향으로 진동하는 형태이다. 특히 이러한 결과들로부터 수평형 머시닝센터의 동적 안정성을 향상시키기

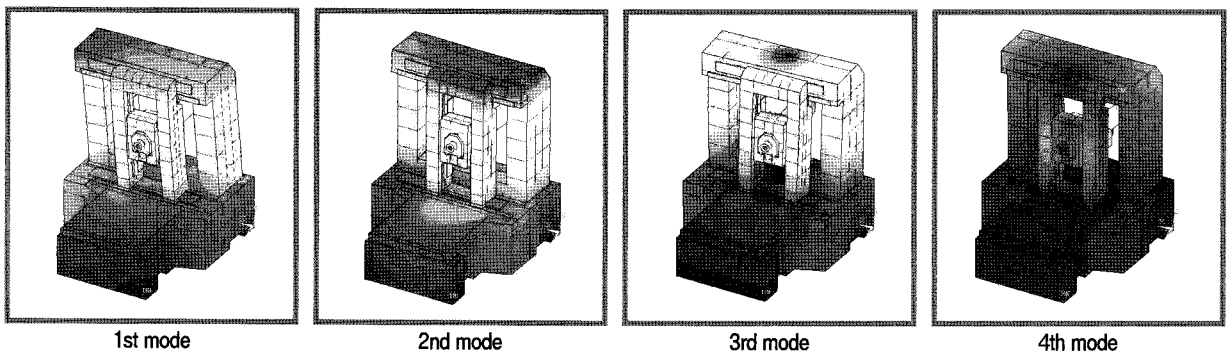


Fig. 5 Vibration modes of the machining center

위해서는 컬럼에 대한 강성 보강과 함께, 주축계의 무게 중심을 Y축 이송계의 이송 중심축에 보다 근접시킬 수 있는 설계 변경이 필요함을 알 수 있다.

4. 수평형 머시닝센터의 열 해석

주축계의 열원은 베어링과 내장형 모터로 나누어진다. 구름 베어링의 온도 상승은 베어링 내부의 마찰 동력 손실과 비례하며, 베어링의 마찰 동력 손실은 베어링의 마찰 모멘트에 의해서 결정된다. 주축 베어링으로 사용한 앵귤러 콘택트 세라믹 볼 베어링의 마찰 모멘트는 베어링 형식이나 베어링 하중에 의존하는 하중항, 그리고 주축 회전수, 윤활 방법 및 윤활유 점도에 의존하는 속도항으로 나누어지며, 베어링의 열 발생률은 마찰 모멘트와 주축 회전수의 곱에 비례한다. 그리고 내장형 모터의 전체 발열량은 모터의 소비 동력을 통해서 추정할 수 있으며, 기계 구조 전체로의 열 전달 특성을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 모터의 발열량을 회전자와 고정자의 발열량으로 구분하는 것이 필요하다.

수평형 머시닝센터의 열 해석은 모두 주축 회전수가 50,000 rpm, X축과 Y축 이송 속도가 120 m/min, 그리고 Z축 이송 속도가 40 m/min인 경우에 대해서 수행하였으며, 그 경우의 열 발생률은 주축계의 전반부 베어링과 후

반부 베어링이 320 W와 241 W, 내장형 모터의 회전자와 고정자가 630 W와 158 W, X축과 Y축 리니어 모터가 1,063 W와 784 W, X축과 Y축 LM 가이드가 17 W와 2 W, Z축 서보 모터의 회전자와 고정자가 37 W와 9 W, 볼스크류 너트와 지지 베어링이 73 W와 25 W, 그리고 Z축 LM 가이드가 1 W 정도로 예측되었다. 또한 내장형 모터, 전반부 베어링 및 후반부 베어링의 외곽에 설치한 냉각 자켓들에 의해서 주축계로부터 최대 2,300 W의 발열량을 흡수할 수 있도록 급유 온도가 제어되었다. 수평형 머시닝센터의 열 해석을 위해서 내장형 모터, 리니어 모터, 서보 모터, 베어링, 볼스크류, LM 가이드 등과 관련된 열 발생률과 함께, 주축계의 냉각 자켓과 리니어 모터의 냉각 파이프는 물론 대기 접촉면에서의 대류 열 전달에 의한 냉각 효과를 고려하였다. 특히 대기 온도는 일정하고, 냉각 자켓과 냉각 파이프로의 급유 온도는 대기 온도와 같다고 가정하였다.

Figs. 6과 7은 수평형 머시닝센터의 온도 분포, 그리고 주축계와 Z축 이송계의 온도 분포를 보여주고 있다. 내장형 모터의 회전자와 고정자의 온도 상승은 각각 21.5 °C와 5.6 °C로 예측되었는데, 고정자의 온도 상승이 회전자의 26 %에 불과하다는 점으로부터 고정자 외곽에 설치한 냉각 자켓이 고정자의 온도 상승을 효과적으로 억제함을 알 수 있다. 또한 리니어 모터의 열 발생률이 비교적 큰 데도 불구하고 온도 상승이 낮게 나타났는데, 그것은 이동자 내

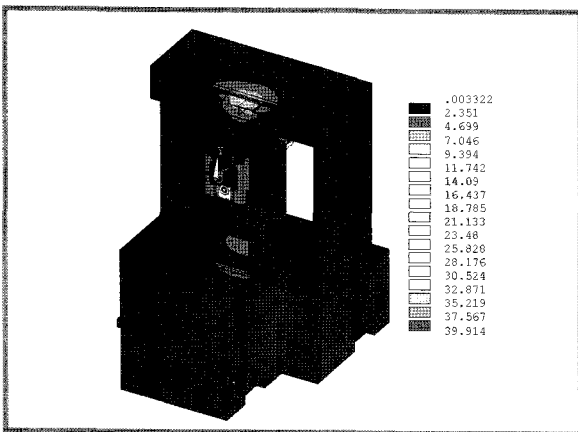


Fig. 6 Temperature rise of the machining center

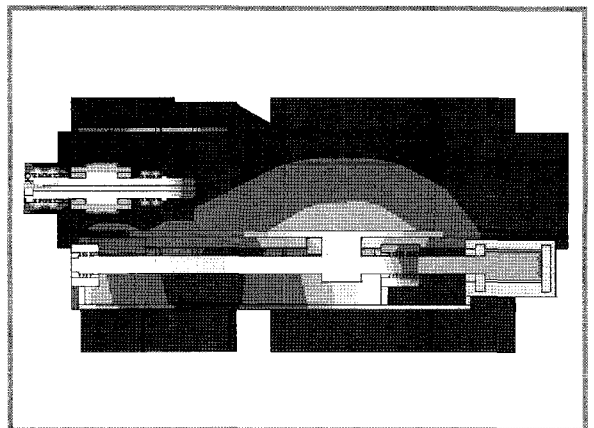


Fig. 7 Temperature rise of the spindle system and Z-axis feed system

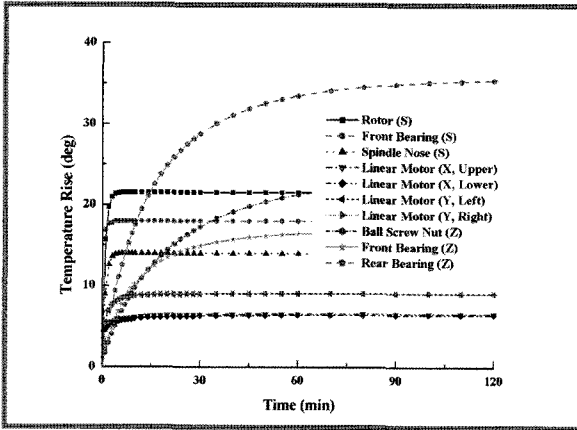


Fig. 8 Transient temperature rise of the machining center

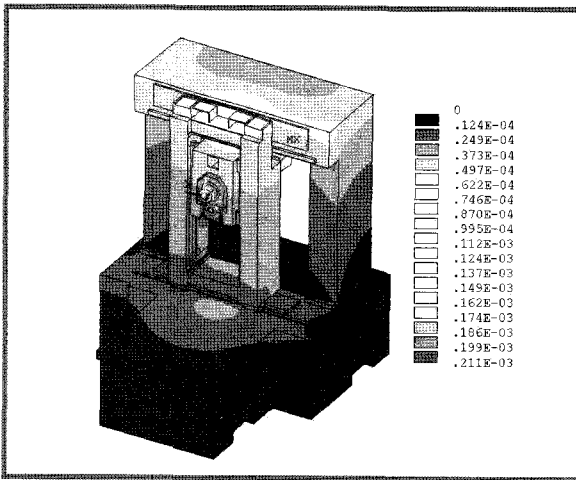


Fig. 9 Thermal deformation of the machining center

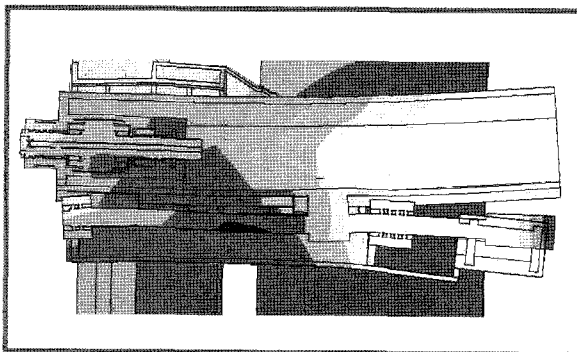


Fig. 10 Thermal deformation of the spindle system and Z-axis feed system

부의 냉각 파이프에 의한 열 방출이 효과적이라는 점을 의미한다. Z축 이송계는 주축계, X축 이송계 및 Y축 이송계와 달리 별도의 냉각 장치가 없고, 서보 모터, 볼 스크류의 너트 및 지지 베어링 등과 같은 열원들이 집중되어 있으며, 구조적으로도 열 방출이 어려운 관계로 특히 서보 모터의 회전자와 볼 스크류의 후반부 지지 베어링에서의 온도 상승이 각각 36.6 °C와 35.8 °C로 높게 나타났다.

Fig. 8은 수평형 머시닝센터의 온도 상승에 대한 스텝 응답(step response)을 보여주고 있다. 그리고 열적 시정수(thermal time constant)는 주축계의 측정점들인 내장형 모터의 회전자가 52 sec, 전반부 베어링이 41 sec, 주축 선단부가 59 sec, X축 이송계의 측정점들인 상단과 하단 리니어 모터가 각각 83 sec와 85 sec, Y축 이송계의 측정점들인 좌측과 우측 리니어 모터가 모두 71 sec, 그리고 Z축 이송계의 측정점들인 볼 스크류의 너트가 1,271 sec, 전반부와 후반부 지지 베어링이 각각 669 sec와 960 sec로 나타났다. 따라서 온도 상승에 대한 응답성은 주축계, Y축 이송계, X축 이송계, Z축 이송계 순으로 빠르며, 특히 수평형 머시닝센터의 열 특성을 개선하기 위해서는 무엇보다도 Z축 이송계의 구조를 열 방출이 용이한 형태로 설계 변경하는 것이 필요함을 알 수 있다.

Figs. 9와 10은 수평형 머시닝센터의 열 변형, 그리고 주축계와 Z축 이송계의 열 변형을 보여주고 있다. 최대 열 변위는 열원들이 집중되어 온도 상승이 높은 Z축 이송계의 서보 모터 후반부에서 나타났으며, 그 값은 211 μm인 것으로 예측되었다. 서보 모터의 후반부는 Fig. 10에서 알 수 있듯이 볼 스크류의 너트 전방부를 기점으로 하여 후방(-Z축 방향)으로 이동하는 형태이다. 그리고 주축 선단부의 열 변위는 X축 방향이 -3.6 μm, Y축 방향이 37.4 μm, 그리고 Z축 방향이 24.4 μm 인 것으로 나타났다. 총 변위가 44.8 μm라는 사실로부터 주축 선단부의 열 변위는 대부분 상방 성분(+Y축 방향)이 지배적이고, 거기에 전방 성분(+Z축 방향)이 가미된 형태임을 알 수 있다. 또한 X축 방향으로의 주축 선단부의 열 변위가 매우 작다는 점으로부터 수평형 머시닝센터는 좌우 방향의 열적 평형이 우수하게 설계되었음을 확인할 수 있다.

5. 결론

제품의 제조 공정에서 불량률이 누적되면 최종 공정에서의 불량률이 크게 증가하기 때문에 초기 설계 단계에서 문제점을 예측해서 해결하는 것이 매우 중요하다. 지금과 같은 다품종 소량 생산 체제 하의 무한 경쟁 시대에서 기업들이 생존하기 위해서는 납기 단축, 원가 절감, 품질 향상 등을 지속적으로 추구해야 한다는 점에서 이러한 관점은 그 의미가 더욱 커지고 있다. 200년 이상의 역사를 가진 공작기계는 그 동안 주로 경험에 의존해서 설계와 제작이 이루어져 왔던 것이 사실이다. 그러나 최근에는 대외 경쟁력 강화를 위해서 납기 단축, 원가 절감, 품질 개선 등에 대한 필요성이 강하게 대두되었고, 그 결과로 공작기계의 설계 단계에서 CAE 해석을 수행하는 사례들이 증가하고 있다. 따라서 본 원고에서는 공작기계의 CAE 해석에 대한 이해를 돕기 위해서 수평형 머시닝센터를 대상으로 저자가 수행했던 구조 해석과 열 해석 사례를 소개하는 데 초점을 두었다. 아울러서 유의미한 공작기계의 CAE 해석 결과를 얻기 위

해서는 무엇보다도 해석 대상인 공작기계에 대한 많은 이해가 필요하다는 점, 그 다음으로 물리적인 관점에서 타당성을 갖는 해석 모델의 구축과 해석 조건의 설정, 그리고 해석 결과에 대한 체계적인 분석이 필요하다는 점을 지적하고자 한다.

참 고 문 헌

1. Kim, S. I. and Cho J. W., 2004, "Structural Characteristics Analysis of a High-Speed Horizontal Machining Center with Built-in Motor and Linear Motors", Proc. of the KSMTE Autumn Conference, pp. 326~333.
2. Kim, S. I. and Cho J. W., 2004, "Thermal Characteristics Analysis of a High-Speed Horizontal Machining Center with Built-in Motor and Linear Motors", Trans. of the KSMTE, Vol. 13, No. 5, pp. 30~37.