

공작기계구조물의 다단계 최적화에 관한 연구

이영우(창원대 메카트로닉스공학부), 성활경(창원대 기계공학과)

A Study on Multiphase Optimization of Machine Tool Structures

Y. W. Lee(Mechatronics Eng. Dept., CNU), H. G. Seong(Mech. Eng. Dept., CNU),

ABSTRACT

In this paper, multiphase optimization of machine Tool structure is presented. The final goal is to obtain 1) light weight, 2) statically and dynamically rigid, and 3) thermally stable structure. The entire optimization process is carried out in three phases. In the first phase, multiple static optimization problem with two objective functions is treated using Pareto genetic algorithm, where two objective functions are weight of the structure and static compliance. In the second phase, maximum receptance is minimized using simple genetic algorithm. And the last phase, thermal deflection to moving heat sources is analyzed using Predictor-Corrector Method. The method is applied to a high speed line center design which takes the shape of back-column structure.

Key Words : Multiphase Optimization(다단계 최적화), Pareto Genetic Algorithm(파레토 유전자 알고리듬), Predictor-Corrector Method

1. 서론

머시닝센터 혹은 라인센터와 같은 복합 공작기계구조물의 성능에 관한 최적설계를 행할 경우, 우선 가공정도 및 가공능률을 개선하고자 한다. 이들은 공작기계의 정적인 특성(靜剛性), 동적인 특성(動剛性) 그리고 열적 특성(熱剛性)에 크게 의존하게 됨을 알 수 있다. 또한, 구조물 부재의 형상을 지배하는 구조 영역에 대한 각각의 설계특성을 포함하고 있고, 서로의 영향도가 다르기 때문에 통합된 설계 의사표를 결정한다는 것은 쉽지 않다. 즉, 결정변수 공간에서는 많은 국소적 최적점이 존재하게 되고, 따라서 기계구조물의 전역적이면서, 완전한 최적해를 구한다고 하는 것은 거의 불가능하게 된다.

이에 대응하여 다단계 최적화 방법이 제안되었고^(1,3), 1,2 단계의 정적⁽¹⁾ 및 동적 최적화 과정이 이루어졌다⁽²⁾. 여기에서는 구조물의 중량과 정적 강성 간의 경합적인 관계를 규명하면서, Pareto 유전자 알고리듬을 이용한 다목적 최적화를 통하여 정적 최적

화를 이루었고, 정적 최적 설계특성을 기본으로 결합부의 감쇠능을 설계변수로 하여 제 2단계의 동적 최적화를 이를 수 있었다. 이 과정에서는 정적 및 동적 설계 특성에 서로의 영향을 가능하다면 작게 미칠 수 있도록 설계변수들의 집단을 구성하는 것이 중요하게 된다.

본 연구에서는 정적 및 동적으로 최적화 된 공작기계구조물에 대해 제 3단계 과정으로 공작기계구조물의 열적 설계 특성을 평가하는 다단계 최적설계 과정에 대해서 설명하고, back-column이 적용되는 월형 공작기계의 설계예를 통하여 그 유용성을 예증하고자 한다. 특히 정적 및 동적 특성 대비 공작기계의 가공정도에 대한 열변형의 영향은 매우 크고, 가공정도를 나쁘게 하는 가장 큰 요인중의 하나라고 할 수 있다. 이는 공작기계 내부에 많은 열원을 가지고 있고, 열적 환경의 영향을 받을 수 있는 구조적 특성 때문이라고 할 수 있다. 그래서 공작기계 구조물의 열변형을 해석하는 일은 고정도화, 고속화 및 고능률화의 최적화를 이루는데 있어서 빼 놓을 수 없는

부분이라고 할 수 있다. 그래서 정적 및 동적으로 최적화 된 공작기계구조물에 대해 Predictor-Corrector Method를 적용하여 고속 이송열원(Moving Heat Source)에 대한 공작기계구조물의 열적 거동을 해석하는 단계적 최적설계방법을 제안한다.

2. 다단계 최적화

본 연구에서 제안하는 방법의 설계과정에 있어서는 정역학적, 동역학적 및 열강성 해석의 다단계적 평가에 의한 최적화 과정을 수행한다. 초기의 설계 모델로부터 최적화 모델까지 도달하는 과정에서는, 각 모델에서의 특성 평가와 최적화 특성을 가지는 최적설계로의 실현을 일관되게 하기 위하여, 기계구조물 전체를 몇 개의 설계변수영역으로 분할하고, 각 단계에서의 설계 특성을 비교 평가하는 것으로 진행한다. 특히 제 3의 최적화 단계에서는 구조물의 최적화에 따른 열원의 거동을 분석하는데, 제 1,2 단계에서 구체화된 목적함수를 한 단계 더 높이 실현하면서 구조물의 열변형 최소화의 제 3의 목적을 평가할 수 있는 과정이다.

각 부재에 대해 완성된 해석용 모델은 Fig. 1과 같고, 총 7 종류의 단면 특성이 정역학적 최적화 과정에서 제 1 설계변수 그룹으로 적용된다.

2.1 정강성(靜剛性) 평가 및 최적화

1 단계 최적화 과정에서는 경합관계에 있는 구조물의 중량과 정 커플라이언스 $f_s (= D/F)$ 를 동시에 최소화시키는 과정으로 다목적 최적화 문제가 된다.

본 연구에서는 이 문제를 Pareto 유전자 알고리듬을 이용하여 해결했고, Pareto Set 중에서 최소 중량과 최소 정커플라이언스를 가장 잘 만족하는 설계변수를 얻을 수 있었다. 이는 최소 중량과 최대 정강성을 만족하는 설계변수를 나타내는 것으로 최적화된 정커플라이언스를 다음과 같이 구할 수 있었다.

$$\text{Static Compliance} = 0.6346 \times 10^{-7} (\text{m/N})$$

2.2 동강성(動剛性) 평가 및 최적화

1 단계의 최적화가 끝나면, 2 단계의 동적 최적화가 수행되는데, 이 과정은 “동강성의 최대화”라는 단일목적 최적화 문제로 주어지기 때문에 최적화 알고리듬의 적용이 용이하고 또한, 해가 국소적인 최적치에 수렴할 가능성도 작아지게 된다. 2 단계의 최적화를 통해서 동커플라이언스의 최소화를 이루는데 이는 동강성의 최대화 목적을 이루는 것이다.

단순 유전자 알고리듬(Simple GA)의 기본 동작자(Operator)를 이용하여 주어지는 영역에서 설계변수

를 변화시키면서 최적의 조건을 탐색하게 되고, 다음과 같은 가진(加振)점 자신의 동커플라이언스(리센턴스)를 얻을 수 있었다.

$$\text{Dynamic Compliance} = 0.4377 \times 10^{-7} (\text{m/N})$$

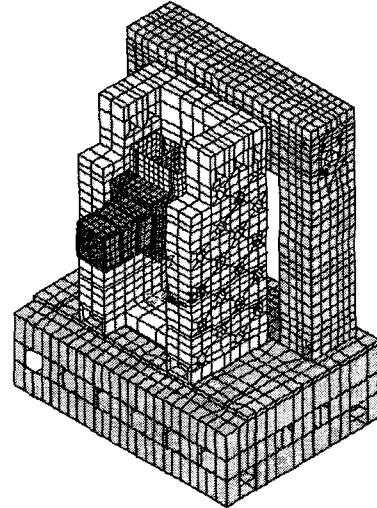


Fig. 1 Analysis Model of Back Column & Quill Type High-Speed Line Center

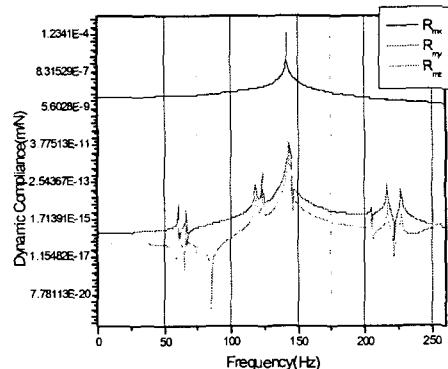


Fig. 2 Dynamic Compliance before Second Phase Optimization

2.3 열강성(熱剛性) 평가 및 최적화

1, 2 단계의 최적화가 끝나면, 제 3 단계의 열강성 평가에서는 1, 2 단계의 최적 특성을 기본으로 해서 열적 경계조건을 확보하고 열강성을 평가한다. 본 연구에서는 연속적인 3 단계 과정으로 이동열원에 대한 열적 특성을 평가하기 위하여 Predictor - Corrector Method를 적용하고, 축 이동간의 온도특성을 해석하게 되는데, 1, 2의 최적화 단계에서 고려되지 않은 부가적인 설계상, 기능상의 요구가 가미될

수 있고, 토플로지 변화로 인한 구조의 영향 평가에 위하여 제 1,2 단계의 최적화 과정을 다시 수행할 것인가가 결정된다.

여기서, 열강성(熱剛性)은 열적인 환경과의 열전달에 의해 기계구조물의 온도변화가 일어나고, 그 결과로서 발생되는 열변형의 정도로 정의된다. 특히 공작기계구조물의 열변형 거동은 온도상승에 의한 단순 신장과 온도차에 의한 기울기로서 나타나는데, 이에 대한 가장 큰 원인으로서 주축 모터와 주축 베어링 등의 내부열원에 의한 것과, 주위의 온도변화 등 외부 열원에 의한 것을 들 수 있다.

3. 유한요소법을 이용한 온도분포 및 열변형 예측

공작기계의 열변형을 구함에 있어서, 가장 먼저 행하여야 할 것은 공작기계 구조물 각 요소의 온도분포를 상세하게 구하는 것이다. 또한 구성요소들을 결합하고 있는 결합부의 열적 성질에 대해서도 명확한 정의가 이루어지지 않으면, 공작기계 구조물 전체의 온도분포 및 열변형을 예측한다는 것은 불가능하게 될 것이다. 그래서 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 공작기계 구조물의 온도분포 및 열변형을 규명하고자 한다.

3.1 공작기계의 유한요소모델 및 경계조건

정적 및 동적으로 최적화 된 모델에 대한 열강성을 평가하기 위해서, 고속 이송부인 베이스와 칼럼 사이의 결합부에는 그리스(Grease) 윤활마찰 조건을 적용하고, 칼럼과 크래들 및 크래들과 휠 사이의 결합부에, 접촉 면압 및 접촉면간의 거리, 점성유(粘性油)의 유무 등 복잡한 열적 경계조건이 고려되어야 하지만, 본 연구에서는 스픈들로부터의 전열에 의한 등가온도 조건 및 룰러의 구름 선접촉에 의한 마찰발열량을 계산하여 이송간의 구속조건으로 적용했다.⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 그리고 주위와의 열전달율은 Nishiwaki 및 Okushima의 조건⁽⁶⁾⁽⁷⁾을 참조하여 부재의 외부 자연대류 경계조건으로 Quill, Cradle 내면 및 Column, Bed 등의 부재에 $1.2\sim12 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 의 값을 적용하였다.

3.2 고속이송 열원에 대한 온도분포 해석 및 열변형 해석

본 연구에서 적용된 공작기계는 $60 \text{ m}/\text{min}$ 의 초고속이송 기계구조물이다. 고중량의 고속이송에 상응하는 모터의 적용은 그만큼 큰 열원의 부담을 안게 된다. 또한 고속이송 중의 열원에 기인하는 열변형은 고정밀 가공에 치명적인 영향을 미치게 할 수 있다. 그래서 이러한 열원에 대한 구조물의 열강성을 평가하기 위하여, 크래들 및 휠이 고정된 상태에서 칼럼이 베이스 레일 위를 이동하는 조건을 가정하여, 이송열원에 대한 온도분포 및 열변형을 계산했다. 여기서 내부열원 및 이송간에 발생하는 마찰열

원은 일정한 조건으로 적용하였다. 고속이송 모델의 출발지점은 Fig. 1과 같은 위치이고, 지면에서 좌측 끝 지점, 그리고 우측 끝 지점으로 이송하는 중의 열전달 특성을 평가한다.

열 경계조건을 적용하여 출발 상태의 온도분포를 구하고, 또한 그것을 이용하여 Predicted Temperature를 다음 단계의 초기조건으로 정의하는 Predictor - Corrector Method 알고리듬을 이용해서, 이송 중의 온도분포를 구하였다. 또한 실내 가공상태를 가정하고, 대기온도는 $18\sim21^\circ\text{C}$ 로 설정, 그리고 스픈들의 외부벽 및 휠과의 접촉 부분에서의 온도 조건을 정의하여 Fig. 3은 시작점, Fig. 4는 좌측 끝 지점, Fig. 5는 우측 끝 지점에서 이송간의 온도분포를 얻었다. 그럼에서 볼 수 있듯이 열원의 이동에 따른 온도분포의 변화를 명확하게 판단할 수 있다. Fig. 5의 열변형 정도를 보면 열의 영향이 얼마나 작용하는지 예측할 수 있게 된다.

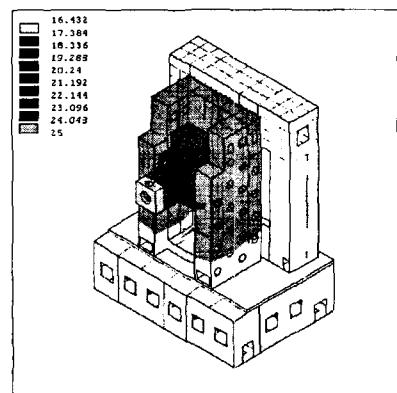


Fig. 3 Initial Temperature Distribution

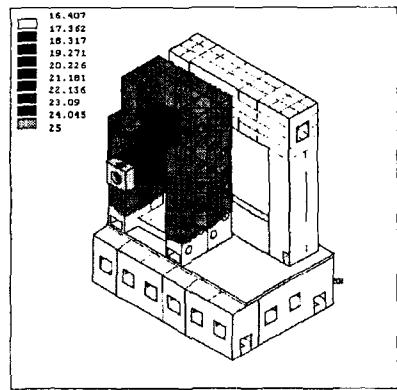


Fig. 4 Temperature Distribution at Left End

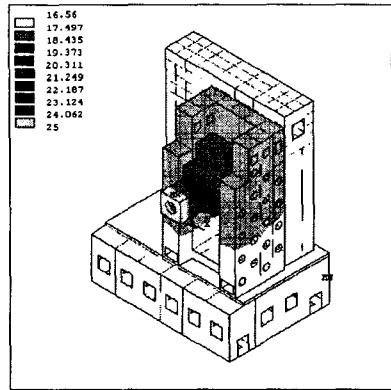


Fig. 5 Temperature Distribution at Right End

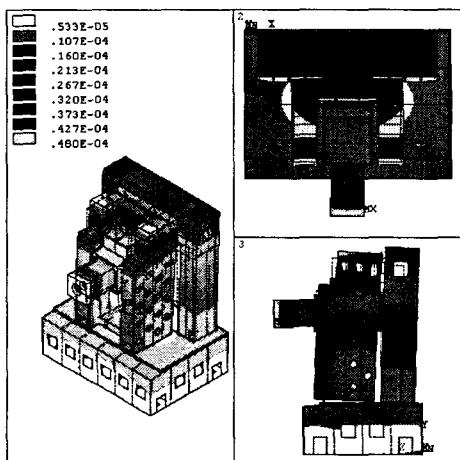


Fig. 6 Thermal Strain Distribution at Initial State

4. 결 론

본 연구에서는 기계구조물의 최적설계를 얻기 위하여 정특성, 동특성 및 열특성을 단계별로 구해서 최적화하는 다단계 최적설계법을 제안하고 공작기계 구조물에 적용하여 방법론의 유용성을 증명했다.

먼저 정적 최적화 특성을 구함에 있어서, 파레토 GA를 적용하여 국소 최적화를 피하면서 정컴플라이언스 및 중량을 동시에 최적화 할 수 있었다. 그리고, 제 1단계의 정특성에 따른 제 2단계의 동특성 해석을 통하여 결합부의 감쇠계수를 새로운 설계변수군으로 정의하고, 전 주파수 영역에서 동컴풀라이언스의 최대치 $R_{m,max}$ 를 최소화했다. 동컴풀라이언스

의 값은 Fig. 2에서와 같이 5차 모드 x 축 방향의 힘에 대해서 상대적으로 높은 값을 가지고 있고, 최적화 과정 중 동컴풀라이언스 $R_{m,max}$ 값이 현저하게 개선되고 있음을 알 수 있다.

정적 및 동적 최적화 과정을 거친 모델의 열강성

평가에서는 고속이송 조건 및 내부 열원에 대한 열전달 구조를 파악하기 위하여, 이송 스트로크 중의 연속적인 온도해석을 행하는데 이때 매순간 요소를 새롭게 구성함으로서, 이송량에 대하여 결합부를 통한 열적 경계조건을 원활하게 적용시킬 수 있었고, 그에 따른 이송간의 온도 분포를 쉽게 파악 할 수 있었다.

또한 이동열원에 대한 온도분포 및 열변형 거동은 x 축 방향으로는 서로 대칭인 구조를 확인 할 수 있었지만, z 축 방향인 전후 방향에서는 비대칭인 구조로 되어 있음을 알 수 있었다. 이는 전후에서 서로 다른 열용량을 가진 부재들이 구성되어 있고, 스판들 내부 열원의 이동에 기인되는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 이영우, 성활경, "휠형 공작기계구조물의 다단계 최적화(1)", 한국정밀공학회논문집, 제 18권, 제 11호, pp.155-160, 2001
2. 이영우, 성활경, "공작기계구조물의 동강성 해석 및 동적 최적화에 관한 연구", 한국정밀공학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp.63-66, 2001
3. 이영우, "유전자 알고리듬을 이용한 공작기계구조물의 다단계 및 다목적 최적화에 관한 연구", 창원대학교 박사학위논문, 2001
4. D.E. Goldberg, "Genetic Algorithm in Search Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., pp.1-88, 1989.
5. M. Yoshimura, Y. Takeuchi, K. Hitomi, "工作機械構造物の多層最適設計", 日本機械學會論文集(C編), 50卷, 459号, pp.2210-2218, 1984
6. T. Sata, et al., 1972, "Analysis of thermal deformation of machine tool by the Finite Element Method", Annals of the CIRP, Vol. 21, No. 1, pp. 123
7. K. Okushima, Y. Kakino, and T. Kikuchi, 1972, "Study on the Thermal Deformations of Machine Tools(2nd Report)", 精密機械, Vol. 38, No. 7, pp. 565- 571
8. 吉田嘉太郎, "Measurements of Thermal Resistance of Metal Contacts"
9. Eschmann, Hasbargen, Weigand, "Ball and Roller Bearings", John Wiley and Sons, pp.201-214
10. Tedric A. Harris, 1966, "Rolling Bearing Analysis", John Wiley & Sons, pp. 446-451