

위상최적화 기법을 이용한 터닝센터 베드 열변위 저감설계에 관한 연구 Topology Optimization for Bed Structure Design of Turning Center for Thermal Displacement Reduction

*이강재, 이상규, 김원년, 김태원

*K. J. Lee(kangjae.lee@doosan.com), S. K. Lee, W. N. Kim, T. W. Gim
두산인프라코어 (주)

Key words : Topology Optimization, Shape Optimization, Size Optimization, D.O.E.(Design of Experiments), Target Function

1. 서론

현재 공작기계 시장은 치열한 경쟁으로 인하여 높은 품질과 성능을 요구하고 있다. 이러한 요구에 의해 생산자는 정강성 및 동강성이 뛰어난과 동시에 가벼워야 하며 특히, 열적으로 안정적인 보다 나은 제품을 시장에 출시해야 한다. 또한 높은 신뢰도를 확보하기 위해 제품 문제점 등에 대한 시장의 평가와 요구를 신속하게 수용하여 이를 반영한 개선품 혹은 신제품을 경쟁사들 보다 빠르게 시장에 내놓아야 한다. 많은 공작기계 생산자들은 이러한 시장의 요구에 기민하게 대응하기 위해 CAE/CAD/PDM/DMU 등의 시스템과 다양한 최적화 도구들을 사용하고 있다. 특히, 최적 설계 기법 도입 이전의 제품 개발 프로세스는 해석을 거친 몇 개의 시작품을 만들어 시험하거나 많은 설계 변수들에 대하여 설계자가 고민하여 해석을 수행하였다. 이런 개발 프로세스는 단계별로 협의 및 평가가 이루어지고 한 단계가 마무리 되어야 다음 단계로 진행할 수 있으므로 제품 개발에 소요되는 시간이 길어지며 이에 따라 많은 비용이 소요되는 구조이다. 이에 반해 최적 설계기법 적용으로 컴퓨터 시뮬레이션에 소요되는 시간은 다소 길어졌으나 시작품의 제작 및 시험에 소요되는 시간이 획기적으로 줄어들었으며, 제품에 대한 협의 및 평가가 여러 프로세스에 걸쳐 동시에 이루어지므로 전체 제품 개발에 소요되는 시간은 오히려 단축시킬 수 있게 되었다.

위상 최적화 (Topology Optimization) 는 제품 개발 초기 단계에 새로운 디자인의 초안을 결정하려고 할 때 많이 이용된다. 이 방법은 모든 하중 조건과 경계조건, 그리고 가능한 최대의 설계 영역을 설정하여 이를 바탕으로 새로운 디자인의 목적에 맞는 초기 모델을 만드는 방법이다. 초기 모델을 만들기 위한 구속조건과 목적함수 등은 최적화 초기 프로세스 과정에서 설정되며 새로운 디자인은 구조물에 작용할 모든 하중 조건을 고려하여 무게를 최소화하거나 최적의 응력 분포를 갖도록 형상이 만들어 지며 필요에 따라 보다 세부적인 설계인자를 추출하기 위해서 형상 최적화 (Topology Optimization)와 치수 최적화 (Size Optimization)를 병행하여 최종 모델을 확정하게 된다.

본 논문에서는 HyperWorks 내의 HyperStudy 와 Optistruct 의 실험 계획법 (Design of Experiments) 과 위상 최적화 (Topology Optimization) 방법을 활용하여 터닝센터 베드의 열변위 저감 설계안 도출을 위한 적용 방안과 해석 프로세스를 기술하고 이러한 방법으로 도출된 모델의 구조 해석 결과와 실험과의 비교, 분석 결과를 소개하고자 한다.

2. 경계조건 설정을 위한 Leveling bolt 강성 최적화

일반적인 정강성 및 동강성 평가를 위한 구조해석의 경우 터닝센터 베드의 경계조건은 지지부 자유도(D.O.F.)를 일정한 강성 값을 부여하거나 완전 구속 시켜 구조해석을 진행하고 이를 평가한다. 그러나 베드 열변형 평가의 경우 하중조건이 대기온도 변화에 따른 베드 상하부의 온도구배에 의해 그 변형이 나타나기 때문에 베드를 지지하는 Leveling bolt 의 거동이 열변형에 중요한 영향을 미치게 된

다. 따라서 위상 최적화를 진행하기에 앞서 터닝센터 베드 Leveling bolt 의 거동을 정의하는 것이 선행되어야 한다. 관련 논문에서 알 수 있듯 Leveling bolt 의 거동은 일반적인 Macro Frictional Slip 현상으로 볼 수 없다. 현실적인 열변형 현상을 모사하기 위해 다양한 대기온도 변화 조건에 대한 베드 굽힘 열변형량을 실험으로 측정하고 이를 바탕으로 실험 계획법(D.O.E.)을 이용하여 Leveling bolt 의 Stiffness coefficient 를 도출하고 검증하였다.

2.1 Leveling bolt 강성 최적화를 위한 문제 정의

Fig. 1 에서와 같이 실험에 의해 Guide way 굽힘 열변형량을 측정하고 최대변위점에서 실험과 해석 오차의 최소화를 Object function 으로 정의하고 오차를 최소화하는 Leveling bolt 의 Stiffness coefficient (K_x, K_y, K_z) 값을 Design Variables 로 하여 최적화 문제를 정의하였다.

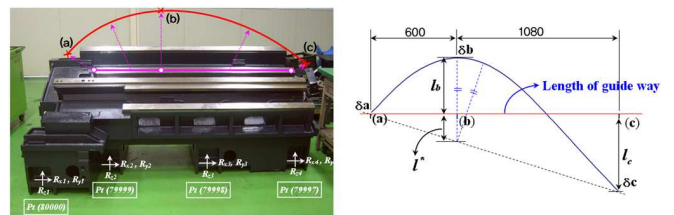


Fig. 1 Definition of Problem for Optimization on Leveling Bolt

2.2 최적화된 Leveling bolt 의 Stiffness coefficient

Fig. 2 의 오차 수렴성에서 보이는 바와 같이, 1 차 대기온도 변화 조건에 의한 최대 변위점의 실험값과 열변위 구조해석 결과와의 오차가 최소화된 영역에서 Leveling bolt stiffness coefficient 를 획득하였다.

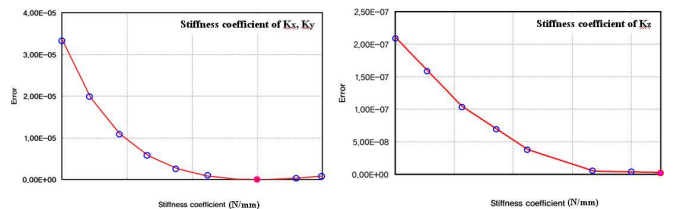


Fig. 2 Result of Optimization on Leveling Bolt

2.3 실험과의 비교를 통한 Stiffness coefficient 검증

앞 절에서 획득된 Leveling bolt stiffness coefficient 값의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 3 에서와 같이 1 차 확보된 Leveling bolt 의 Stiffness coefficient 를 구조 해석에 적용하여 또 다른 대기온도 변화 조건에 대한 구조해석을 수행하였다. 이러한 해석을 통한 굽힘 변형량을 동일 온도 변화 조건에서 측정된 실험값과 비교함으로써 구해진 Leveling bolt stiffness coefficient 값을 검증하였다. 서로 다른 두 대기온도 변화 조건에서의 해석과 실험의 편차가 각각 1%, 2%로서 stiffness coefficient 의 타당성을 확인하였다.

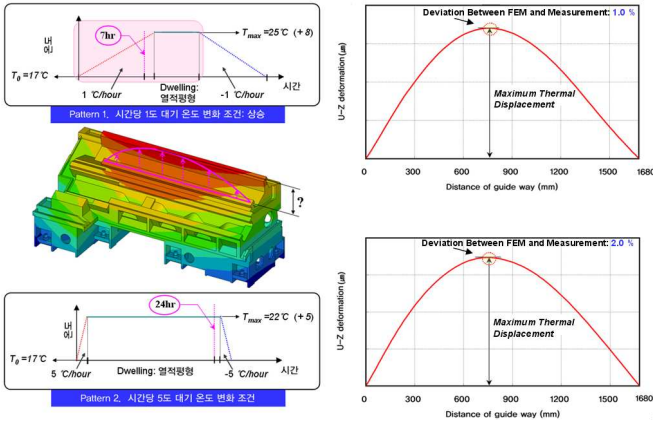


Fig. 3 Verification on Leveling Bolt Stiffness Coefficient

3. 베드 열변위 저감설계를 위한 위상 최적화

일반적인 외부하중에 대한 위상 최적화와는 달리 외기온도 변화에 대한 터닝센터 베드의 열변위 저감 설계를 위한 위상 최적화의 경우 베드 내부 형상에 따라 열전달이 달라져 하중이 가변하중으로 작용하고 Design space 에 대한 물성과 온도 조건이 주어져야만 한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하면서 해석 Case 를 줄이기 위해 열변위 실험에서 측정된 베드 표면의 온도를 보관 (Interpolation) 하여 베드와 Design space 의 온도 조건을 가정하고 열변형 저감에 효과가 있는 경우에 대해 열유동 해석을 다시 수행하여 정확한 온도분포를 얻고자 하였다. 또한, 보다 실질적인 평가를 위해 베드 축 기준 공작물 반경 방향에 대한 공작물과 공구의 상대 변위를 Object function 으로 정의하고 열하중과 최대 절삭력을 모두 고려하는 위상 최적화 모델을 구성하고 열변위 저감 개선안을 도출하였다.

3.1 위상 최적화를 위한 문제 정의

베드만의 열변형 특성 분석을 위해 Fig. 4 에서와 같이 주축계와 이송계 위치에서의 열변형량에 대한 평균 변형량을 공구와 공작물 끝점에 부여함으로써 베드 축 기준 공작물 반경방향으로의 공구와 공작물의 상대 변위를 Object function 으로 정의하였으며, 현재 베드 무게를 줄이면서 열하중에 의한 상대 변위가 최소화 되는 위상 최적화 모델을 정의하였다. 경계조건은 2 절에서 구한 Stiffness coefficient 값을 사용하였으며 하중조건은 최대 절삭력과 Interpolation 된 온도분포를 사용하였다.

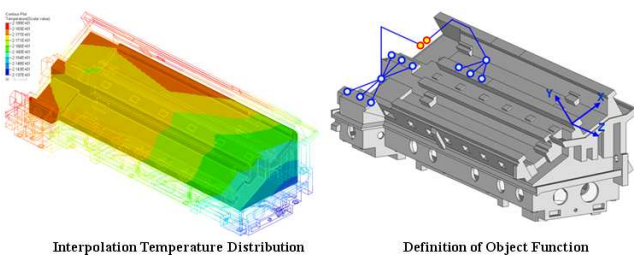


Fig. 4 Definition of Problem for Topology Optimization

3.2 위상 최적화를 통한 제안된 설계 개선안

위상 최적화를 통해 얻어진 1, 2 차 설계 개선 모델에서 주물 제조 공정과 베드 열적 대칭 구조를 고려하여 3 차 위상 최적화를 수행하였으며 Fig. 5 와 같이 제안된 3 차 개선 모델에 대한 경량화 방안도 함께 고려하였다.

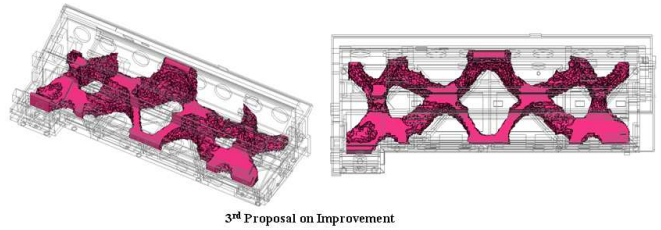


Fig. 5 Proposal on Improvement Model

3.3 구조 해석을 위한 3D 모델과 해석 결과

주물 제조 공정과 열적 대칭 구조를 고려한 3 차 개선 모델에 대해 3D CAD 모델을 만들고 이를 기본 모델로 하여 최대 절삭력과 열하중 조건에서의 구조해석을 진행하였다. Fig. 6 과 같이 최대 절삭력 조건에 대한 정강성을 약 28.0% 향상시켰으며 동일 절삭력 조건 하에서 대기온도 변화에 대한 공작물과 공구 끝점에서의 열변위량을 약 5.8% 저감할 수 있었다.

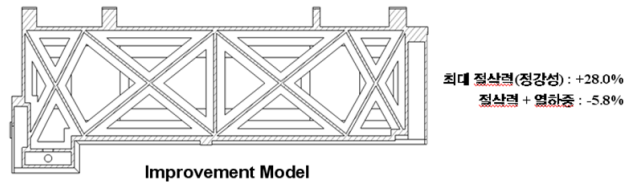


Fig. 6 Result of Structural Analysis on Improvement Model

4. 결론

터닝센터 열변위 저감 설계안 도출을 위한 위상 최적화를 위해 베드 Leveling bolt 강성을 최적화 하여 경계조건을 명확히 정의하고 이를 토대로 현재 개발중인 터닝센터 베드의 구조 최적화를 수행하였다. 최대 절삭력과 열하중 조건을 모두 고려한 개선안 모델은 정강성을 기존 대비 약 28.0% 향상시켰으며 공구와 공작물 끝점에서의 열변위량은 약 5.8% 저감하였다.

참고문헌

1. R. L. Biegel, W. Wang, H. H. scholz, G. N. Boitnott, N. Yoshioka, Micromechanics of rock friction I, J. Geophys. Res. 97 (B6) (1992) 8951-8978.
2. T. Fujimoto, J. Kagami, T. Kagaguchi, T. Hatazawa, Tangential micro-displacement and stiffness in contact, Proc. Int. Tribol. Conf., Yokohama I (1995) 109-114.
3. T. Fujimoto, J. Kagami, T. Kagaguchi, T. Hatazawa, N. Yoshioka, micro-displacement characteristics tangential force between surfaces in contact (Part 1), Tribologist 42 (5) (1997) 395-402.
4. Meske, R; Mulfinger, F; Armuth, O; Topology and Shape optimization of Components and Systems with Contact boundary condition, NAFEMS Seminar "Modellieren von Baugruppen und Verbindungen f r FE-Berechnungen"/24-25 April 2002, Wiesbaden
5. Bakhtiary, Allinger, Friedrich, Mulfinger, Sauter, M ller, Puchinger (1996) 'A new approach for sizing, shape and Topology Optimization', SAE international congress and Exposition, 26-29 Februar 1996, Detroit/Michigan (USA)