공작기계 동특성 예측을 위한 이송계 시뮬레이터 개발

Development of Feed Drive Simulator for Prediction of Dynamic Characteristics of Machine Tools

*#이창호 [1], 하재용 [2], 김태형 [3]

*#C. H. Lee(changho.dean.lee@doosan.com)[1], J. Y. Ha[2], T. H. Kim[3]

[1,2,3] 두산인프라코어㈜ 공기자동화 BG

Key words : Feed drive, Simulator, Servo motor, Friction, Servo control

1. 서론

공작기계는 주축, 이송계 그리고 이를 지지해 주는 구조물로 크게 나눌 수 있으며, 주축과 구조물의 경우 대부분의 공작기계 제조업체들은 설계 단계에서 유한요소 해석을 통해 정, 동강성을 예측하고 장비의 요구 성능에 적합하도록 최적 설계 작업을 수행하고 있다. 하지만, 이송계의 경우 서보 모터, 모터 드라이브, 기계 구동부, 이송체인 구조물, 피드백 센서의 복잡한 메커니즘으로 구성되어 있어 설계자가 쉽게 설계 단계에서 성능 예측을 통한 설계 검증에 많은 어려움이 있어 왔다. 이러한 문제로 인해 설계 단계에서 개발 제품의 성능을 예측하지 못하여 시제품 제작 후에 성능평가를 통해서만 검증이 가능하였다. 사전 설계 검증이 미흡한 상태에서 제품개발이 이루어졌을 경우 이송계 성능에 치명적인 설계 오류가 발생할 수 있으며, 이를 개선하기 위해서 제작된 시제품의 설계 변경은 제한적일 수 밖에 없어 왔다. 또한, 이송계의 복잡한 메커니즘 때문에 성능 저하의 원인을 파악하는데 상당한 시간이 소요되는 경우가 빈번히 발생되어 왔으며, 임시 방편적인 성능 보완은 차후 동일한 문제 발생 시에 반복적인 시행 착오를 일으킬 수 있는 소지가 있었다. 당사에서는 이러한 문제점의 해결과 고속 고정밀 이송계 설계 기술을 확보하기 위해 기계부와 제어부를 함께 고려한 메카트로닉스(mechatronics) 관점의 설계 접근의 필요성이 제기되어 왔다.

본 논문에서는 성능 예측을 통해 설계 단계에서의 오류를 줄이고 양산 장비에서 발생되는 원인 파악이 어려웠던 다수의 문제들을 해결하기 위해 개발된, 이송계 성능 예측 프로그램의 개발 내용과 이를 제품개발 및 양산 품질을 개선시키는데 활용한 사례를 제시하였다.

2. 공작기계 이송계의 모델링

2.1 서보 시스템 모델링

공작기계의 서보시스템은 크게 모터 드라이브와 서보 모터로 구성된다. 대부분의 공작기계가 AC 서보모터를 채용하고 있으며, 한 제조회사에서 모터와 드라이브를 함께 제공하므로 공작기계 제조회사에서는 모터 드라이브의 자세한 기술적인 정보를 제공받기가 거의 불가능하다. 따라서, 서보 모터와 모터 드라이브는 아래 그림 1 과 같이 서보모터 등가 모델식으로 구성하였으며, 전류루프는 저역통과 필터(low pass filter)로 단순화 모델링하여 구성하였다.

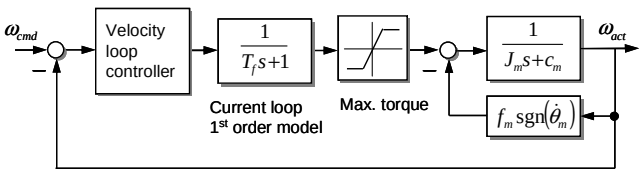


Fig. 1 Block diagram of servo motor and motor drive

단순화시킨 블록 선도의 유용성을 검증하기 위해 이송계를 조립하지 않은 상태에서 모터와 드라이브만의 동특성을 실험과 시뮬레이션으로 비교한 결과, 그림 2 와 같다. 실험은 모터에 200rpm 의 정현파 지령을 한 후, 모터 토크와 속도를 비교한 것으로 실제 거동을 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있었다.

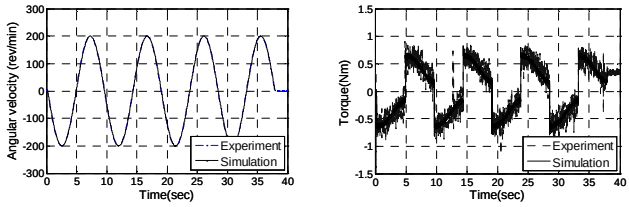


Fig. 2 Comparison of motor angular velocity and motor torque

2.2 이송계 기구부 모델링

그림 3 은 이송계 기구부의 모델에 대한 개략도를 나타내며, 이송계의 기구부 모델은 직선 이송계와 회전 이송계의 2 가지 경우를 모델링 하였으며, 이는 직선과 회전 이송계의 동기 제어 시 동적 거동 파악을 하기 위함이다. 직선 이송계의 모델링에서는 모터, 감속기, 커플링, 지지베어링, 볼스크류, 가이드웨이 강성이 고려되었으며, 특히 이송계의 무게 중심 변화에 따른 거동 파악도 가능토록 일반화하여 구성하였다. 회전 이송계의 경우, 구동 방식이 다양하여 일반화된 모델링이 어려운 점이 있어 당사에서 개발한 기어 구동 방식 회전테이블의 기구부 모델링을 구성하였다.

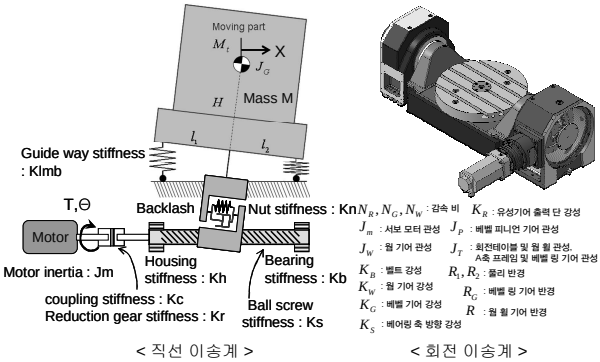


Fig. 3 Linear and rotary feed mechanism model

개발된 시뮬레이터에 적용될 마찰 모델의 경우, 이송속도에 따라 정지마찰과 운동마찰로 구분하여 모델링 하였으며, 운동마찰은 고체와 유체의 혼합 윤활 상태인 저속 영역에서는 속도가 증가함에 따라 마찰력이 연속적으로 감소하며, 혼합 윤활 상태를 벗어나 점성 윤활 상태인 고속 영역에서는 속도에 비례적으로 마찰력이 증가하는 Stribeck curve 식(1)로 모델링 하였다. 그림 4 는 실험으로 측정한 마찰력을 Stribeck curve 식으로 curve fitting 한 그래프이다.

$$F_f(v) = F_s + (F_s - F_c)e^{\left(-\left|\frac{v}{v_s}\right|^{\delta}\right)} + c_v v \qquad (1)$$

F_s : 정지 마찰력 F_c : 쿨롱 마찰력
v_s : stribeck 속도 c_v : 점성 계수
δ : stribeck 커브 지수

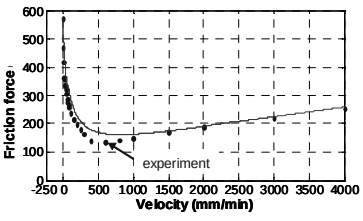


Fig. 4 Identification of friction model using Stribeck curve

2.3 이송계 성능 예측 프로그램

이송계 서보 모델링과 기구부 모델링의 결합을 통해 설계단계에서 이송계 동특성을 예측할 수 있는 일반화된 이송계 성능 예측 프로그램을 개발하였다. 표 1 과 그림 5 는 이송계 성능 예측 프로그램의 입력 변수들과 이를 통해 시뮬레이션 되는 성능항목들에 대한 전체 구성과 프로그램의 화면 구성을 보여 주고 있다.

• 이송계 성능 예측
- 이송계 기구부 및 제어부의 입력 파라메터를 통해 기구부 강성 및 주파수 응답 특성, 단위계단 응답, 원호보간 정밀도 등의 시뮬레이션으로 목표성능의 만족여부 검증이 가능함.

• 직선 이송계	• 회전 이송계	• 서보 제어부
- 이송계 운동체 무게	- 회전테이블 무게	- 서보모터 관성
- 무게중심과 구동중심과의 거리	- 회전 구동부 관성	- 서보모터 최대토크
	- 기어부 감속비	- 토크 상수
- 가이드 폭	- 기어 치 강성	- 모터 마찰력
- 볼스크류 직경, 길이, 리드, 너트 예압	- 기어 축 강성	- 위치루프게인
	- 베어링 지지 강성	- 속도루프게인
- 지지베어링 강성	- 벨트 강성	
- 하우징 강성	- 구동부 마찰	
- 커플링 강성	- 백래쉬	
- 감속기 강성, 감속비		
- 구동부 마찰		
- 백래쉬		

Table 1 Input design parameters of Feed drive simulator

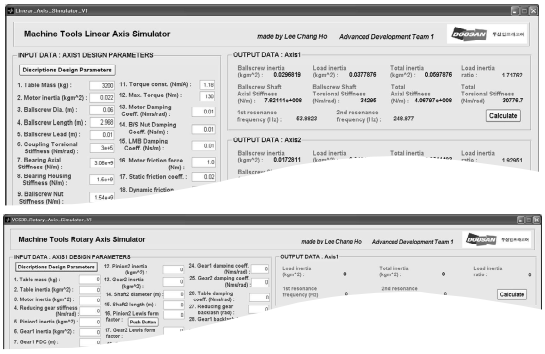
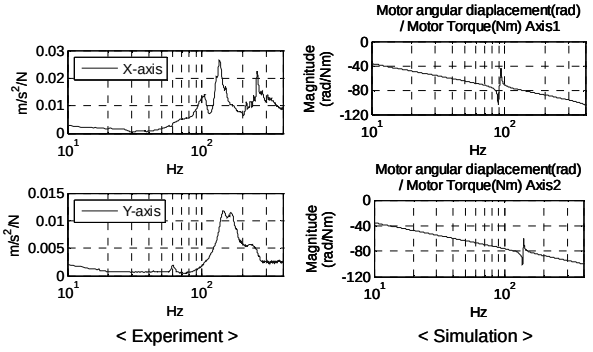


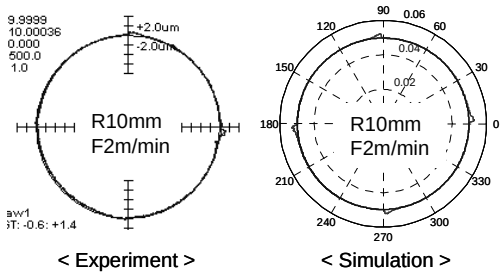
Fig. 5 Composition of Feed drive simulator

3. 시뮬레이션 검증 및 개선 사례

본 개발된 프로그램의 검증을 위해 당사 수직형 머시닝센터를 대상으로 실험 비교한 결과, 그림 6 에서 보이는 바와 같이 이송계의 고유진동수 및 원호보간 정밀도 특성에서 시뮬레이션 결과가 실 장비의 거동을 잘 반영함을 확인할 수 있었다. 각 축 이송계 고유진동수의 경우 실측치와 약 10%정도의 오차를 나타냈으며, 원호보간 정밀도 오차의 경우 상한돌기 2μm 이내로 실측치와 유사한 거동을 나타내었다.



(a) Comparison of frequency response



(b) Comparison of circular trajectory

Fig. 6 Experiment and simulation results of frequency response and circular trajectory

개발된 프로그램을 이용하여 당사 수직형 머시닝센터의 축 반전 시 상한돌기 및 진동을 저감시키기 위한 취약부 규명에 활용하였으며, 이송 축 계 강성 보강을 통해 lost motion 을 줄여 상한 돌기와 잔류 진동을 초기 대비 50% 이상 저감시키는 성능개선을 가져왔다.

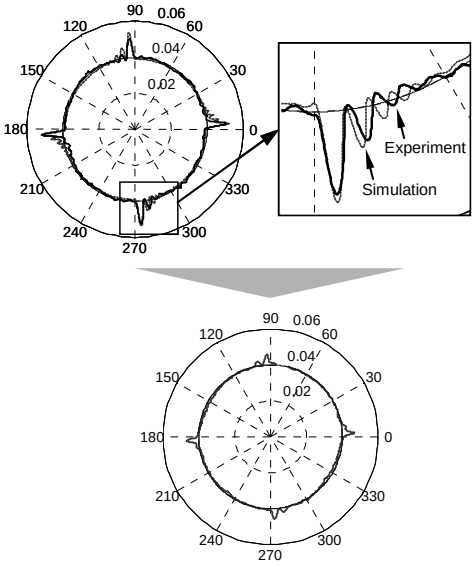


Fig. 7 Improvement result of circular trajectory

4. 결론

일반화된 공작기계 이송계 시뮬레이터 개발을 통해 설계자들이 용이하게 설계단계에서 이송계 동적 거동을 예측 가능 하도록 하였으며, 이를 통해 시제품 제작 이후 발견될 수 있는 설계 오류를 사전에 차단하여 양산 단계까지의 제품개발 기간을 단축 시킬 수 있게 되었다. 또한 필드에서 발생되는 다양한 이송계 품질 문제의 근원적인 원인 규명에 활용이 가능토록 하였다.

참고문헌

1. Ryuta SATO, Masaomi Tsutsumi, “Modeling and controller tuning techniques for feed drive systems”, 2005 ASME, Proceedings of IMECE2005, 669-679.
2. Ramon Maj, Giacomo Bianchi., "Mechatronics analysis of machine tools," 9th SAMTECH Users Conference 2005.
3. Gunter Pritschow, Jochen Bretscneider, “Control of high dynamic servo axesfor milling machines”, University of Stuttgart, Institute for control technology.
4. 정영훈, 민병권, 조동우, "공작기계 이송계의 동적 시뮬레이션 모델 개발," 한국정밀공학회 2004 년도 춘계학술대회, 488-491.