

로드셀을 이용한 밀링 가공시의 절삭력 측정시스템

강은구*, 박성준*, 이상조**, 권혁동***

Cutting Force Measuring System Using the Load Cell for a Milling Process

E.G. Kang*, S.J. Park*, S.J. Lee**, H.D. Kwon***

ABSTRACT

This paper suggests another system for a cutting force measuring tool in a milling process. Generally, tool dynamometer is taken into account for the most appropriate cutting force measuring tool in the analysis of cutting mechanism. However, high price and limited space make it difficult to be in-situ system for controllable milling process. Although an alternative method using AC current of servo-motor has been suggested, it is unsuitable for cutting force control because of small upper frequency limit and noise.

The cutting force measuring system is composed of two load cells placed between the moving table bracket and the nut flange part of ballscrew. It has many advantages such as low cost and wide range measurement than tool dynamometer because of the built-in moving table and the low cost load cell. The static and dynamic model of the measuring system using imbedded load cell is introduced. Various Experiments are carried out to validate both models. By comparing the cutting forces from a series of end milling experiments on the tool dynamometer and the system developed in this paper, the accuracy of the cutting force measuring system is verified. Upper frequency limit is measured by the experiment of dynamic characteristics.

Key Words : cutting force (절삭력), measuring system (측정시스템), milling process(밀링 가공), loadcell(로드셀), tool dynamometer(공구동력계), ballscrew(볼스크류)

1. 서론

최근 산업화의 가장 큰 변화는 다품종 소량생산 체계라 할 수 있다. 급속히 변화하는 제품의 형상과 형상의 복잡성, 더불어 제품의 고정도화를 요구한다. 이에 따라 많은 제작자들은 자동화된 CNC 공작기계에 의존하게 된다.

공작기계가 복잡한 형상 및 미세한 공차로 이루어진 제품을 생산하기 위해서는, 첫째, 공작기계의 이송계 및 주축계와 구조계의 최적화 기반이 필요하며, 둘째, 가공중의 자동화된 공구 및 공작물의 모니터링과 가공프로세서의 최적화된 제어가 필수적이라 할 수 있다. 후자의 경우에는 공작기계에 직접 또는 간접적인 많은 가공프로세서에 관련된 요

2001년 1월 2일 접수
* 연세대 대학원
** 연세대 기전공학부
*** 한국생산기술 연구원

소(acoustic emission, acceleration, temperature 등)의 측정이 요구되고 있으며, 절삭력은 가공중의 공구의 상태, 칩의 형태, 가공물의 치수오차등과 밀접한 관계를 보이기 때문에 가공시 공구 및 공작물의 모니터링과 가공프로세서의 최적화에 적합한 측정 요소중 하나이다^[1].

일반적으로 절삭력을 직접 측정하기 위하여 공구 동력계를 사용하지만, 공구 동력계는 고가이며 설치 및 가공범위의 제약, 배선문제등 실용화 측면에서의 여러 가지 한계성을 내포하고 있다^[2]. 따라서 공구 동력계의 단점을 보완한 다른 절삭력 측정 방법의 필요성이 요구 되고 있다.

이의 대안으로 공작기계의 서보 모터에 흐르는 전류를 이용한 간접 절삭력 측정 연구가 수행되었다^[2]. 이송계 및 주축계의 서보 모터에는 가공중에 발생하는 절삭저항에 반하는 에너지를 전류를 통해 공급해 주어야한다. 이러한 원리를 이용하여 홀센서(Hall sensor)를 통한 전류측정이 간접 절삭력 측정에 이용되고있다. 이러한 방법은 저가의 제작이 용이하며, 간접측정이기 때문에 반영구적이며, 부가적인 하드웨어장치가 필요 없는 반면, 단속절삭을 하는 밀링 공정에서의 측정 가능한 최대 주파수를 충족시켜주지 못한다. 또한 노이즈 문제의 해결점을 찾지 못하여 측정분해능이 작다는 단점을 내포하고 있다. 결국 공구동력계의 단점을 보완한 또 다른 절삭력 측정 방법이 요구되고 있다.

본 논문에서는 절삭력 측정을 위한 방법으로 1축 이송계의 볼스크류 너트 플랜지 부위와 이송 테이블의 브래킷 사이에 로드셀을 부착시켜 절삭력을 측정하는 방법을 제시하였다. 절삭 공정중에 발생하는 절삭력은 볼스크류와 이송 테이블과의 직렬 연결 시스템으로 이루어져 있게된다. 따라서 절삭력을 측정하기 위해 이송테이블의 브래킷과 너트 플랜지 사이에 로드셀을 부착시켰다. 로드셀은 이송시스템의 동적 특성의 변화와 신호의 감도를 고려해 Kistler의 piezo force transducer 2개를 사용하였다. 로드셀에 의해 측정된 신호는 절삭중에 발생하는 절삭력 뿐만 아니라 테이블의 이송시 받는 마찰력 및 테이블 감. 가속시 받는 관성력을 포함하게 된다. 결국 절삭력만을 측정하기 위해 이러한 이송중에 발생하는 부가저항력을 정량적으로 제거함으로써 구할 수 있게된다. 이 방법의 개선점은 볼스크류에 부착된 센서 시스템의 경우 각 이송축에 대한 좌표를 자연적으로 지니고 있다는 점과, 공구

동력계의 경우 제한된 가공범위 때문에 측정 영역에 한계가 있는 반면, 본 논문에 제시한 방법의 측정 시스템의 경우는 공작기계의 전 가공영역에서 측정 가능하다. 또한 공구동력계 보다 저가로 측정 시스템 구축을 가능하게 할 수 있다.

2. 이 론

2.1 측정 시스템의 정적 모델

정적 절삭력이란 측정시스템을 이용한 절삭력 측정시, 테이블의 이동이 없는 정지 상태 즉, 테이블 이송중 발생하는 부가저항력을 배제한 상황에서의 측정 절삭력을 의미하게 된다. Fig. 2.1는 이송계의 로드셀을 중심으로 하여 나타낸 그림이다.

Fig. 2.1에서 볼 수 있듯이 실제 가공시 정적 절삭력(F_a)은 모든 부하가 로드셀에 전달되는 것이 아니며, 볼트 부위를 통해 분산되기 때문에 이중 로드셀에 전달되는 부하의 비를 알아야 될 필요가 있다. 만약 이송계 전체에 대한 로드셀의 부하 보정을 수행할 경우에는 이런 관계가 필요하지 않을 수 있지만, 본 논문에서는 로드셀만의 부하 보정을 수행한 후, 정적 절삭력을 측정하는 방법을 채택하였다. 압전소자용 로드셀은 압축 예압을 가해야만 이 예압량만큼의 인장. 압축의 측정영역을 확보할 수 있기 때문에 볼트에 의한 예압이 필요하게 되며, 예압과정중 볼트 부위에는 인장력을, 로드셀 부위에는 압축력을 받으며 예압이 진행된다. 정적 절삭력이 로드셀에 전달되는 부하비를 구하기 위하여 우선 Fig. 2.1의 예압과정을 Fig. 2.2와 같이 도식화하였으며, Fig. 2.2의 관계를 수식화 하여 정리하면 식(2.1)와 같은 관계식으로 정리할 수 있다.

$$F_a = \left(1 + \frac{K_T}{K_s}\right)(-F_s) \quad (2.1)$$

여기서, F_a : Static Cutting Force
 F_s : Measured Force 이다.

결국 이송축에 걸리는 정적 절삭력(F_a)를 구하기 위해 로드셀쪽의 강성과 볼트쪽의 강성비를 구한 후 로드셀에서 측정된 신호를 식(2.1)를 이용해 보정한다면, 정적 절삭력을 측정할 수 있게 된다.

2.2 측정 시스템의 동적 모델

절삭력 측정시스템이 갖추어야 할 조건으로는 측정값의 정확도와 변동하는 절삭력을 신속히 감지

할 수 있는 민감도를 들 수 있다. 밀링공정의 절삭력 신호가 이물림 주파수를 가지는 정현파의 형태를 가지는 신호임을 감안하면, 측정시스템의 측정상한 주파수(upper frequency limit)에 대한 고려 또한 필요하다. 측정 상한 주파수는 공구 동력계 제조업체인 KISTLER의 경우 1차 공진주파수의 절반 정도를 채택하고 있으므로 이를 이용하였다.

전체 측정 시스템의 동적 모델은 Fig. 2.3와 같이 2자유도 모델이 가능하며, 이는 이송 테이블 부분과 너트 및 지지 베어링을 포함한 볼스크류 부분을 2자유도 모델로 하였다.

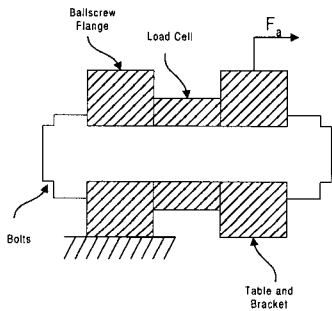


Fig. 2.1 Simplified model of the measuring system

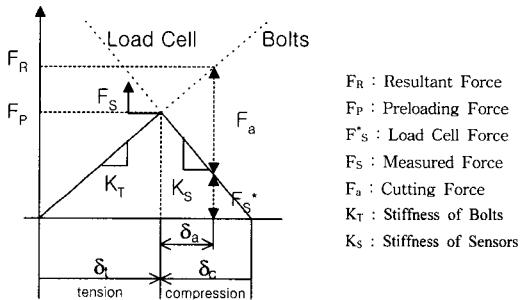


Fig. 2.2 Force-deformation relations between load cell and bolts

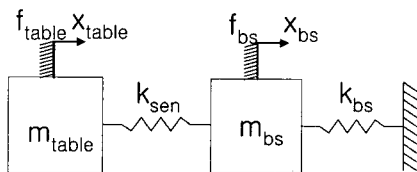


Fig. 2.3 2 D.O.F. model of the measuring system

3. 실험

3.1 정적 절삭력

실험의 구성은 Fig. 3.1과 같으며, 실험에 사용된 센서는 Table 3.1에 나타내었다. 실험방법은 외력($F_{external}$)을 가하며 스트레인 게이지형 로드셀을 통해 외력을 측정하고, 테이블에 부착된 로드셀을 이용하여 신호를 측정한다. 즉, 스트레인 게이지의 측정값은 식(2.1)의 정적절삭력(F_a)를 의미하게 되며, 정적 절삭력(F_a)을 변동시켜 보면서 그 측정값(F_s)과의 비교 실험을 실시하였다.

실험 결과는 Fig. 3.2에 나타내었으며, 여기서 실험적으로 구한 로드셀과 볼트의 강성비 K_T/K_S 는 약 0.5이다. Fig. 3.2의 아래쪽은 두 신호의 오차 그래프이며, 결과에서 보듯이 오차가 대부분 5N이하를 가지며, 상당히 정확한 값을 가짐을 알 수 있었다.

3.2 동적 절삭력

실험 방법은 대상 이송 테이블을 임팩트 해머로 축방향으로 가진하고, 부착된 로드셀에 대한 응답을 측정하였다. 임팩트 해머와 로드셀 각각의 신호는 앰프로 전달되며, 2채널 다이내믹 시그널 애널라이저(dynamic signal analyzer)로 입력된다.

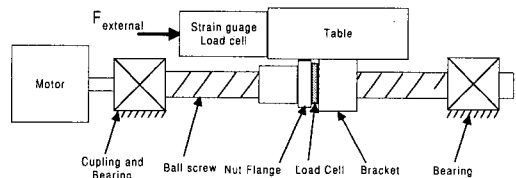


Fig. 3.1 Experimental setup of static characteristics

Table 3.1 Specifications of sensors

Strain gauge load cell	Rated Capacity	100kgf
	Rated Output	3mV/V \pm 0.5%
	Non-linearity	0.03% R.O.
	Repeatability	0.02% R.O.
Piezo load cell	Company	Bong Shin
	Range	10[kN]
	Rigidity	1.8[kN/ μ m]
	Threshold	< 0.01[N]
	Linearity	%FSO $< \pm$ 2
	Hysteresis	%FSO < 1
Company	Kistler	

다이나믹 시그널 애널라이저에서 측정된 데이터를 통해 측정 시스템의 공진주파수를 알아낼 수 있게된다. 동적 특성 실험의 전달함수는 식(3.1)과 같다. Fig. 3.4에서는 Fig. 4.1에 보이는 것과 같이 지그를 부착시킨 후의 동적 특성실험 결과이며, Fig. 3.3는 지그 비 부착시의 동적 특성 실험이다. 지그 부착은 Fig. 2.3의 k_{bs} 의 강성 보강을 의미하며, 동적 특성 실험에서의 공진주파수를 찾아내기 위해 실험 모드해석 방법중 모드원 적합을 이용하였다.

실험결과 Fig. 3.3(지그 비 설치)의 1차공진주파수는 140Hz, 2차공진주파수는 1180Hz이며, Fig. 3.4(지그 설치)의 1차공진주파수는 212Hz이며, 2차공진주파수는 1252Hz이다.

Fig. 3.3의 1차공진주파수의 결과로부터 측정 상한 주파수는 70Hz임을 알 수 있다.

Fig. 3.5과 Fig. 3.6은 위의 동적 특성 실험을 검증하기 위하여, 테이블 가진(임팩트 해머)과 테이블의 응답(가속도계)에 대한 악세러란스를 실험한 결과로서, 전달함수는 식(3.2)에 나타나있다. Fig. 3.5의 모드원 적합을 이용한 분석결과, 1차공진주파수는 156Hz, 2차공진주파수는 1228Hz이며, Fig 3.6은 1차공진주파수는 204Hz, 2차공진주파수는 1236Hz이다. 이 값은 Fig. 3.3과 Fig. 3.4와 유사한 값을 가지며, k_{bs} 의 강성 보강시 1차는 156Hz -> 204Hz, 2차는 1228Hz -> 1236Hz로 1차와 2차공진주파수의 상승을 알 수 있었다. 또한 1차공진주파수의 변화 폭이 더 큼을 알 수 있다.

$$T.F.(\omega) = \frac{F_{load\ cell}}{F_{impt\ hammer}} \quad (3.1)$$

$$T.F.(\omega) = \frac{A_{Accel.}}{F_{impt\ hammer}} \quad (3.2)$$

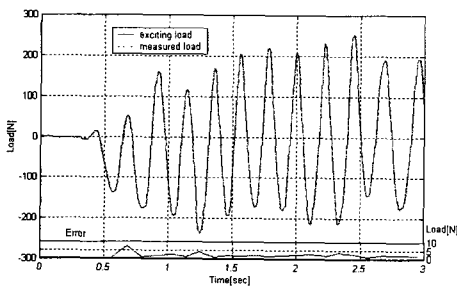


Fig. 3.2 Results of static cutting force

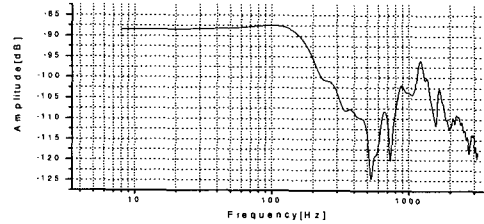


Fig. 3.3 Result of dynamic characteristics without jig

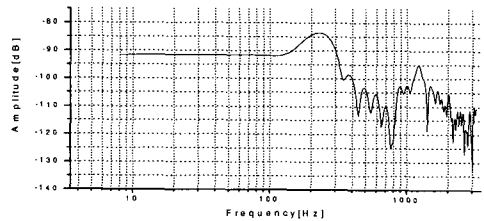


Fig. 3.4 Result of dynamic characteristics with jig

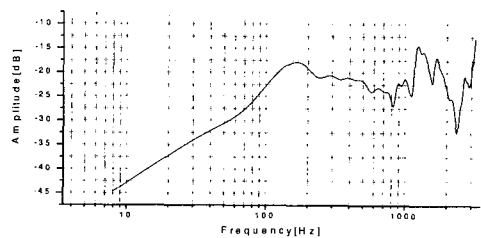


Fig. 3.5 Result of acceleration without jig

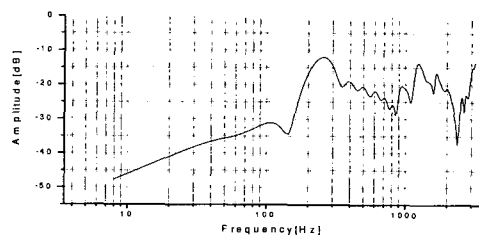
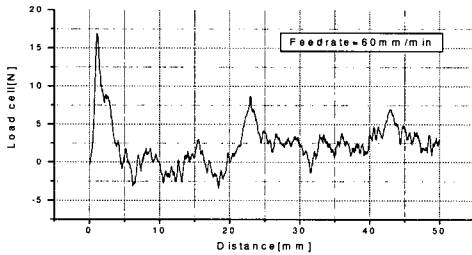


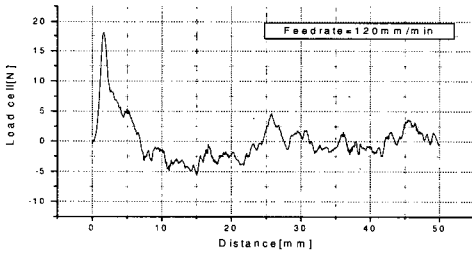
Fig. 3.6 Result of acceleration with jig

3.3 테이블 이동시의 동적부하

Fig. 3.7 (a),(b) 는 속도에 따른 테이블 이송시 로드셀을 이용하여 측정된 동적부하 결과이다. 테이블의 속도 프로파일은 사다리꼴이며, 감 가속시의 부하를 제외한다면 보통의 가공 이송 속도 구간에서의 마찰력은 10N내에서 일정하게 유지하며, 속도의 증가에 따라 감소하는 경향은 보이나, 일반적인 절삭력의 크기에 비교 해볼 때 큰 변화는 없다.



(a) Feedrate = 60mm/min



(b) Feedrate = 120mm/min

Fig. 3.7 Experimental result of dynamic load with respect to feedrate

3.4 가공시 절삭력 측정

상용 공구동력계와 로드셀과의 실제 가공시 절삭력의 비교 실험을 실시하였다. 실험방법은 Fig. 3.8에서 보는바와 같이 1축 이송테이블위에 상용 공구동력계를 고정시킨 후 동일중공업의 TNV40A 공작기계 위에 1축이송테이블을 고정시켜 가공실험을 하였다. 공구동력계와 로드셀은 직렬상태에서 각각 절삭력의 측정을 수행한다.

가공시 로드셀과 공구 동력계와의 절삭력 비교 실험시 가공조건은 Table 3.2에 나타나있으며, 실험 결과는 Fig. 3.9과 Fig. 3.10에 나타나있다. Fig. 3.9(a),(b)는 양의 최대값 부근에서 공구날이 빠져나가며, 이때는 테이블에 가하는 절삭력이 없어지고, 테이블은 가해졌었던 절삭력 때문에 이송 반대 방

향(음의방향)으로 과도한 움직임을 보인다. 이러한 움직임이 로드셀에 절삭력의 신호로 나타나게 되며, 이 결과 공구동력계와의 오차가 크게 나타난다. 또한 Fig. 3.9(c)의 경우는 슬롯 가공이며, 양의 최대값 부근에서 공구날이 동시에 들어가고, 빠져나가면서 테이블의 과도한 움직임이 발생한 결과이다. 결국 Fig. 3.9는 테이블의 과도한 움직임의 현상을 배제한다면, 가공중의 절삭력은 10N이내의 가공 오차를 보인다.

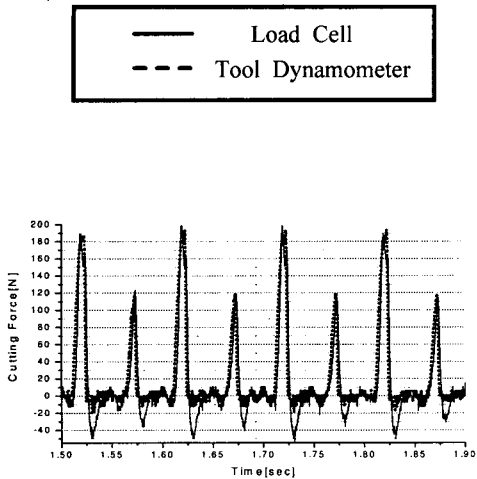
Fig. 3.10(a),(d)에서는 Fig. 3.9(a),(c)보다 테이블에 가해진 절삭력이 크기 때문에 상당히 더 심해진 테이블의 움직임을 보인 결과이다. 결국 Fig. 3.10에서 또한 테이블의 과도한 움직임의 현상을 배제할 경우, 가공중의 절삭력은 15N이내의 가공오차를 보인다. 테이블의 이러한 과도한 움직임은 1축이송계가 가공에 적합하지 못한 구조를 갖추고 있기 때문이며, 상용 공작기계에 적용시는 이러한 현상이 없을것으로 기대된다.



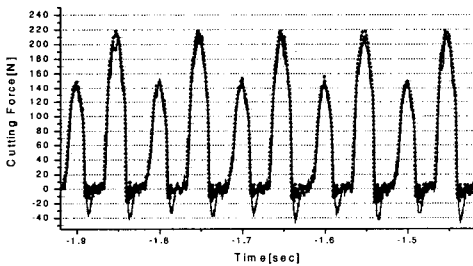
Fig. 3.8 Experimental setup for comparison of cutting force between load cell and tool dynamometer in machining process

Table 3.2 Conditions of cut, tool and workpiece

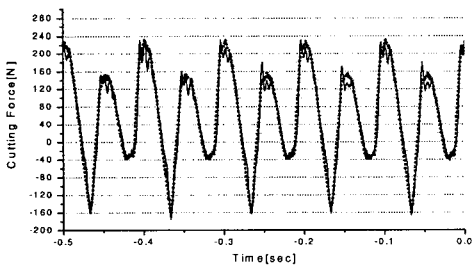
	Axial Depth	Radial Depth
Fig. 3.9(a)	1mm	2mm
Fig. 3.9(b)		8mm
Fig. 3.9(c)		16mm
Fig. 3.10(a)	2mm	2mm
Fig. 3.10(b)		6mm
Fig. 3.10(c)		8mm
Fig. 3.10(d)		16mm
Spindle	600rpm	
Feed Rate	90mm/min	
Tool	# of Cutter Flutes	2
	Cutter Diameter	16
	Coating Type	TiN
Workpiece	SM45C	



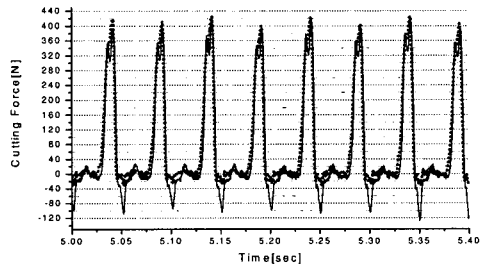
(a) Cutting condition : $A_d=1\text{mm}$, $R_d=2\text{mm}$



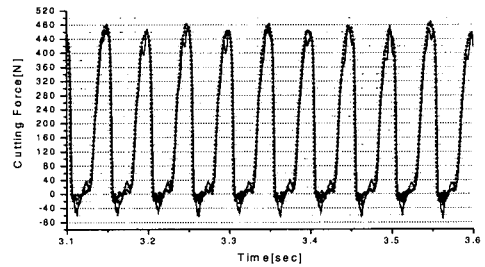
(b) Cutting condition : $A_d=1\text{mm}$, $R_d=8\text{mm}$



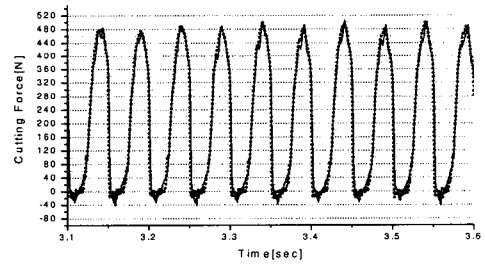
(c) Cutting condition : $A_d=1\text{mm}$, $R_d=16\text{mm}$



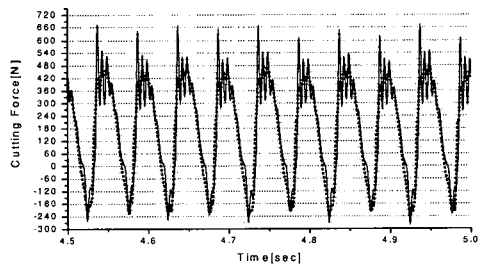
(a) Cutting condition : $A_d=2\text{mm}$, $R_d=2\text{mm}$



(b) Cutting condition : $A_d=2\text{mm}$, $R_d=6\text{mm}$



(c) Cutting condition : $A_d=2\text{mm}$, $R_d=8\text{mm}$



(d) Cutting condition : $A_d=2\text{mm}$, $R_d=16\text{mm}$

Fig. 3.9 Experimental result for comparison of cutting force between load cell and tool dynamometer in machining process for $A_d=1\text{mm}$

Fig.3.10 Experimental result for comparison of cutting force between load cell and tool dynamometer in machining process for $A_d=2\text{mm}$

4. 동적 특성 모의 실험

4.1 실험 구성

모의 실험은 로드셀이 이송계의 동적 특성에 미치는 영향과 측정 상한 주파수의 변화 가능성을 논하기 위하여 실시하였다. 실험장치 구성은 Fig. 4.1에 나타나있다. 2.2절에서 언급한 Fig. 2.3의 2자유도 모델에 대한 동적 모의 실험을 하기 위해, 먼저 모델의 강성을 구할 필요가 있다. 강성측정은 이송 테이블 부분과 너트 및 지지 베어링을 포함한 볼스크류 부분을 모델화했기 때문에, 테이블과 볼스크류 너트부위에 대하여, 외부 부하 입력시의 변형량을 다이얼 게이지를 통해서 측정하였다. 외부에서 가하는 부하는 공구동력계를 통해서 측정하였다.

Fig. 4.1에서 지그의 설치 목적은, 볼스크류의 구조상 외부 부하를 입력시 회전을 하며, 이때 발생하는 축 방향의 변위를 차단하기 위한 수단과 3.2절에서 언급했던 Fig. 2.3의 k_{bs} 의 강성의 변화에 따른 동적 특성의 변화를 알아보기 위한 수단으로 사용되었다.

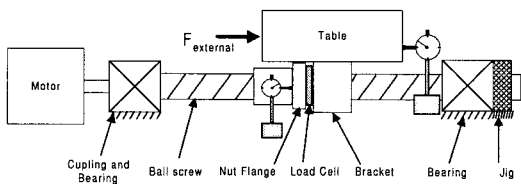


Fig. 4.1 Experimental setup for stiffness test

4.2 강성 측정 결과

Fig. 4.2(a),(b)는 테이블과 너트 플랜지 부위에서의 측정된 변형량을 가한 부하에 대하여 나타낸 결과 그래프이다. 각각의 그래프에서 보여지는 기울기를 2자유도 모델에 적용하여, 계산된 강성은 $k_{bs}=3.308 \times 10^7$, $k_{sen}=2.132 \times 10^8$ 이며, 또한 측정된 테이블과 이송계 부위의 질량은 각각 $m_{table} = 8\text{kg}$, $m_{bs} = 7\text{kg}$ 이다.

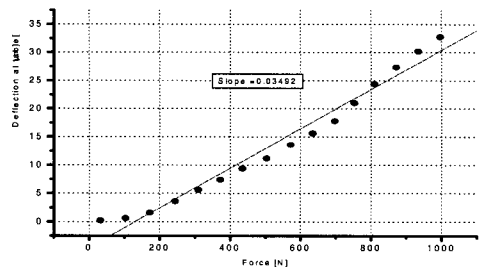
4.3 Compliance 모의실험 결과

측정된 질량과 강성을 이용한 compliance 모의 실험을 하였으며, 그에 대한 결과가 Fig. 4.3에 나타나있다. 이 결과 1차공진주파수는 232Hz이며, 2차

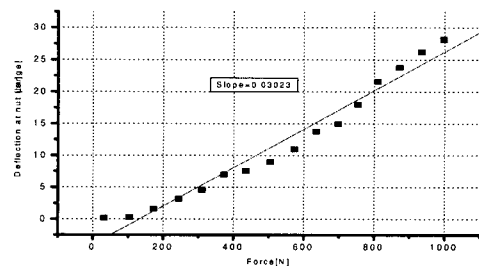
공진주파수는 1230Hz를 구할 수 있었다. 이 결과는 3.2절의 지그 설치시의 동특성 실험과 비교시 유사한 값을 보임을 알 수 있다.

Fig. 4.4는 k_{bs} 와 k_{sen} 의 값을 변화시키면서, 그에 따른 1차, 2차의 공진주파수의 변화를 살펴보았다. Fig. 4.4(a)의 $k_{bs}=3.308 \times 10^7$ 값 근처에서 볼때, 3.2절의 악세러란스 실험결과 k_{bs} 의 강성보강시 1, 2차공진주파수가 상승하며, 2차보다 1차의 변화폭이 큰 결과와 일치함을 보인다. 또한 Fig. 4.4(b)의 $k_{sen}=2.132 \times 10^8$ 값 근처에서는 1차 공진주파수는 일정하나, 2차 공진주파수는 크게 변화하는 것을 볼 수 있다.

결론적으로 로드셀 부착은 k_{sen} 의 강성을 로드셀 부착전 보다 감소시켰으나, 1차공진주파수의 변화 영역에 까지는 감소시키지 않았기 때문에 이송계의 동적 특성에 큰 영향을 끼치지 않았다. 그리고 k_{bs} 의 변화시 1차공진주파수의 큰 변화를 얻을 수 있었다. k_{bs} 는 볼스크류와 베어링 부위를 나타내며, 측정 상한 주파수의 변화를 이룰 수 있는 중요한 변수로서 활용될 수 있다.



(a) Deflection at table



(b) Deflection at nut flange

Fig. 4.2 Result for stiffness test of 2 D.O.F. Model

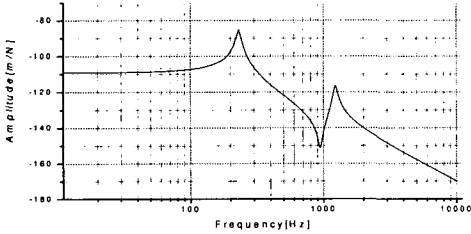
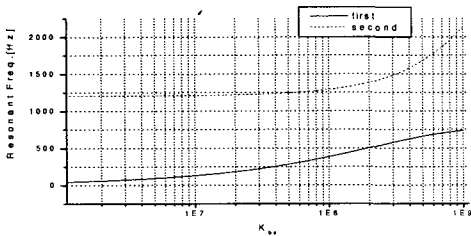
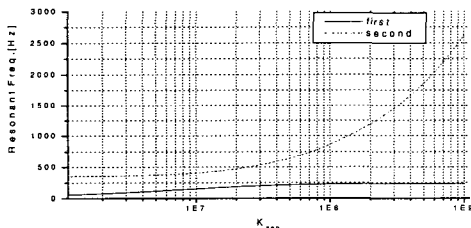


Fig. 4.3 Result of compliance for 2 D.O.F. Model



(a) Variation of k_{bs}



(b) Variation of k_{sen}

Fig. 4.4 1st and 2nd resonant frequency variations with respect to k_{bs} and k_{sen}

5. 결론

절삭력 측정시스템으로 사용되어져 왔던 공구 동력계와 서보모터 전류의 단점을 개선시키기 위한 방법으로, 이송테이블에 로드셀을 부착하였으며, 이송 테이블에서 이루어지는 가공시의 절삭력을 로드셀을 통해 측정하는 시스템 구축의 목적으로 연구가 진행되었다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 공구동력계의 단점이었던, 높은 가격, 가공 측정 영역, 배선문제와 절삭유의 문제는 이송 테

이블 부위에 공구동력계에 비해 저가인 로드셀을 부착시킴으로서 개선할 수 있었다. 그러나 측정 정밀도는 공구동력계와 비교시 5%정도의 오차를 가졌다.

둘째, 전류의 단점이었던 절삭력 측정 상한 주파수는 전류에 비해 상당한 효과를 보았으나, 일반 머시닝 센터에서의 모든 가공 조건을 확보하지는 못했다. 따라서 측정 상한 주파수의 변경이 필요하며, 이를 위해 측정시스템의 2자유도 모델을 제안했다. 특히 볼스크류 부위의 강성 변화시 측정 상한 주파수의 큰 상승 효과를 기대할 수 있다.

셋째, 실험시 발생했던 1축이송계의 절삭직후와 슬롯가공시의 과도한 테이블의 움직임은, 로드셀이 1축 이송계에 동적인 영향을 크게 미치지 않는 결과로 유추해 볼 때, 이는 1축 이송계가 절삭 가공에 충분한 구조를 갖추고 있지 않다고 판단할 수 있다.

본 논문에서 제안한 측정 시스템의 가장 두드러진 개선점은 공작기계 전 가공 영역에서, 공구동력계와 비교시 5% 오차내에서 측정이 가능한 것이다. 이를 이용한 공작기계의 가공공정중의 최적화와 공구상태의 감시, 되먹임 제어, 절삭 시스템의 설계에 많은 활용가치가 있을 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 선도기술 개발사업 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

1. G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, W. Kong, and R. Teti, "Tool condition monitoring-The Status of Research and Industrial Application," C.I.R.P., pp. 541-567, 1995.
2. 김종원, 김태용, "견실한 적응 제어기를 이용한 절삭력 제어," 한국정밀공학회지, Vol. 12, pp. 55-66, 1995.
3. J.S. Chen, I.C. Dwang, "A ballscrew drive mechanism with piezo-electric nut for preload and motion control," International Journal of Machine Tools & Manufacture, pp. 513-526, 2000.