

고정도 이송을 위한 공기정압커플링에 관한 연구

황성철*, 전도현*, 이득우**

* 부산대 대학원 정밀기계공학

** 부산대 기계공학부

The Couplings for ball-screw on high precision positioning

Sung Chul Hwang*, Do Hyun Jeon*, Deug Woo Lee**

* Dept. of Precision Engineering, Graduate school, Pusan National Univ.

** Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.

Abstract

Recently, researches on precision machining of nano-order, especially in the field of optical components and semi-conductors have been under development very actively. A accuracy of machining and positioning in a critical issue in ultra-precision machining. This paper proposes a new positioning system which can give excellent dynamic characteristics and reduce errors in horizontal, vertical, pitching, and yawing motions.

In this paper, we suggest a connecting mechanism (the couplings) to reduce motion errors such as chatter and runout while preserving the positioning accuracy. We verified the good performance in the new connecting systems with various coupling types, which we classified into the fixed type, the spring type, the aerostatic-nozzle type, and the aerostatic-porous type according to the way of reducing the chatter and error.

keyword : positioning system, motion error, areostatic guide, coupling, positioning accuracy

1.서론

1.1 연구배경

최근, 정보통신과 반도체, 가전산업분야 등의 제품이 고품질화되면서 이러한 제품의 품질을 좌우하는 중요부품의 가공정밀도에 대한 요구가 한층 증가하고 있다. 이러한 중요부품의 대부분은 고정밀가공기에 의해 직접 가공되거나 혹은 금형에 의해 가공되기 때문에 여기에 사용되는 고정밀가공기의 요구정밀도가 매우 중요해지고 있다. 이러한 고정밀가공기의 대표적인 장치로 비구면 렌즈의 금형이나 반사경 등을 가공하는 초정밀가공기를 들 수 있다. 초정밀가공기는 회전운동용 주축과 직선운동용 이송테이블 등의 운동요소로 구성되어 있다. 이러한 요소의 운동특성이 다이아몬드 바이트와 연삭숫돌 등의 공구와 결합되어 가공특성으로 나타나므로 이러한 운동요소의 정도에 의해서 가공정도의 대부분이 결정되고 이러한 운동요소의 정밀도설계가 초정밀가공기의 성능을 결정하는 가장 중요한 부분이 되고 있다.

정압베어링은 비접촉운동과 유막의 평균화 효과에 의해서 높은 운동정밀도를 가지게 되며 앞서 기술한 초정밀가공기용 운동요소에 많이 적용되고 있다. 특히 공기정압베어링의 경우에는 높은 운동정밀도를 얻을 수 있으면서도 발열과 마찰이 없어 영구적인 수명을 가질 뿐만 아니라 기름이 사용되지 않기 때문에 최근 매우 중요시 되고 있는 환경문제에 있어서도 우수한 특성을 가진다. 물론 유정압테이블 또한 높은 강성과 우

수한 감쇠특성 등의 장점으로 인하여 많이 이용되고 있으며 커플링과 ACC (Active Controlled Capillary), 수정연마법을 이용하여 매우 우수한 운동정밀도와 위치결정정밀도를 획득하기도 하였다. [1][2]

일반적인 위치결정기구의 정밀도는 크게 위치결정정밀도와 운동정밀도로 나누어지는데 위치결정정밀도는 일반적으로 이송기구의 특성에 의해 지배되며 운동정밀도는 안내기구의 특성에 의해 지배된다.

1.2 연구 목적

공작기계용 테이블이 고정밀 구동을 하는 경우 종래까지 쓰여왔던 이송기구로는 마찰구동기구와 볼스크류를 사용하는 것이 대부분이었다. 그 이외에도 유정압스크류, 공기정압스크류 등이 이용되고 있으나 이송방향의 강성이 낮고 제작이 어려운 단점이 있어서 실제로 적용되는 예는 드물다.

마찰구동기구의 경우에도 이송방향으로의 추력과 이송속도가 공작기계용으로는 충분하지 못하고, 부하가 가해지는 경우 구성요소의 접촉 운동부에서 발생하는 미소슬립현상 등이 문제점이 되어 경하중의 이송에 국한하여 적용하는 단점이 있다. 물론 이러한 마찰구동기구의 문제점을 해결하고 정압안내면에 이를 적용하고자 하는 연구도 활발하게 일어났으며 공기정압에 의한 (air lubricated) 캡스턴 드라이브(capstan drive)를 이용하여 공기정압안내면을 구동하고 이에 적응 제어를 적용하여 50nm에서부터 0.1m까지의 넓은 범위의 정밀이송을 달성, 우수한 위치결정정밀도와 제어특성을 얻어내기도 하였다. [3]

볼스크류는 상대적으로 높은 이송강성을 가지고 정도면에서도 서브미크론까지의 미소분해능이 비교적 쉽게 얻어진다. 최근의 제어기술의 발전에 따라 클로드드루프와 볼의 탄성변형을 이용하여 나노미터오더의 분해능을 얻을 수 있는 연구사례도 발표되고 있는 등 정밀 혹은 초정밀공작기계용 이송계에 응용되어 사용되고 있다. [4] 또한 메카니즘이 널리 알려져 있어서 신뢰성이 높은 장점도 있다.

일단, 볼 스크류를 이송기구로 사용하는 경

우 볼스크류를 테이블에 직접 연결하여 구동하게 되면 회전에 대한 런아웃, 조립오차 등에 의한 볼스크류와 테이블간의 상대변위가 발생한다. 이와 비슷하게 테이블의 지지강성이 볼스크류의 굽힘강성에 비해 충분히 크지 못한 경우에 이러한 상대변위는 테이블의 운동정도를 악화시키게 된다. 볼스크류용 베어링의 지지방법을 조절하면 이러한 영향을 어느 정도 감소시키는 것이 가능하지만 이 대신에 위치결정정밀도의 악화와 백래쉬 등을 유발시켜 높은 정밀도를 얻기가 곤란하다.

높은 운동정밀도를 얻기 위해서는 볼스크류 너트의 이송방향과 토크방향을 높은 강성으로 구속할 필요가 있다. 동시에 그 이외의 방향에 대한 변위가 테이블쪽에 전달되지 않도록 하기 위해 저항성 혹은 자유운동상태가 될 필요가 있다. 이러한 이유로 볼 스크류에 대한 운동오차성분 및 진동이 흡수되는 메카니즘, 즉 부상용체결기구 (이하 커플링)를 도입하게 되었다.

본 논문에서는 공기정압테이블을 대상으로 하고 탄성체에 체결된 스프링형 커플링 또는 비접촉식인 자기보상형(이하 노즐식)과 다공질보상형(이하 다공질식)의 두가지 공기정압 커플링을 제안하였으며 각각의 커플링에 대한 운동정밀도(직진과 회전), 동특성 또는 미소응답특성을 비교하여 이러한 실용성을 검증하였다. 이런 경우에 비교기준을 설정하기 위해서 일반적인 체결방식인 고정형 커플링에 대해서도 같은 실험을 하여 비교하였다.

2. 공기정압베어링과 커플링

2.1 공기정압베어링

정기정압베어링은 다른 종류의 베어링에 비해 스테이지용 베어링으로는 우수한 특성을 많이 가지고 있으며 특히 유정압에 비해 공기정압은 발열과 환경, 수명에 대해서 더 우수한 특성을 가지는 것으로 나와 있다. [5]

그 중에서도 자기보상형(Self-restrictor)은 제작이 용이한 반면에 반복오차와 배기진동이 발생할 수 있으며 표면보상형(Surface-restrictor)의 경우는 형태가 다양하고 베어링의 간극을 매우 작

게 할 수 있는 장점이 있다. 다공질보상형의 경우는 공기해머현상(Pneumatic hammer)방지를 위한 다층구조로 되어 있고 세라믹재료나 카본, 금속 등 다양한 재료를 쓸 수 있지만 소재를 구하기가 어렵고 제작이 비교적 어렵다. [6]

공기정압 스톱퍼 베어링의 설계는 급기계수와 무차원 부하용량과 무차원 강성, 무차원 유량의 실험적 상관관계에 의존하게 되는데 특히 자기보상형(self-restrictor)의 경우에는 다음의 식들에 의해 각각의 설계변수들이 결정된다. [7]

$$\Gamma = \frac{6\mu n d^2 \sqrt{gRT_0}}{p_s h^2} \quad (\text{식 } 1.)$$

$$W = A \bar{W} \quad (\text{식 } 2.)$$

$$k_s = \frac{1}{h} \pi A (p_s - p_a) \bar{k}_s \quad (\text{식 } 3.)$$

여기서, Γ 는 급기계수, μ 는 점성계수, n 은 급기미세공의 개수, d 는 급기미세공의 직경, g 는 중력가속도, R 은 기체상수, T_0 는 기체온도, p_s 는 급기압, p_a 는 대기압, h 는 베어링클리어런스, A 는 베어링의 면적, \bar{W} 는 무차원부하용량, \bar{k}_s 는 무차원베어링강성이다.

다공질 보상형의 경우에는 다음의 식 4, .5, 6에 의해 설계변수가 결정되게 된다.

$$Y_s = \frac{24\mu c_0 s v R_0^2 p_s}{h^3 \gamma_a p_a \sqrt{RT_0}} \sqrt{2g \frac{K}{K-1}} \quad (\text{식 } 4.)$$

$$W = p_a A \bar{W} \quad (\text{식 } 5.)$$

$$z = h^3 Y_s \quad (\text{식 } 6.)$$

여기서, Y_s 는 급기계수, c_0 는 다공질표면 오리피스 유량계수, s 는 오리피스 단면적, v 는 단위면적당 오리피스의 개수, \bar{W} 는 무차원부하능력, T_0 는 급기온도, g 는 중력가속도, k 는 기체 단열계수이다. [8]

2.2 공기정압커플링

본 실험에 적용하기 위한 커플링은 직결식, 스프링식, 공기정압(self-restrictor 이하 노즐식), 공기정압 (porous-restrictor 이하 다공질식)의 네 가지가 적용되었으며, Fig. 1에 나타내었다.

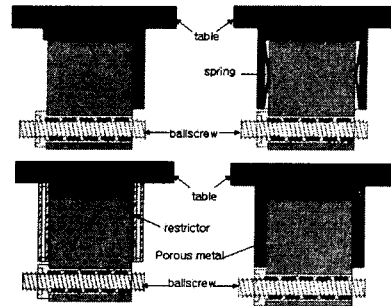


Fig. 1 Couplings
(fixed, spring, nozzle, porous type)

3. 실험 장치 및 실험조건

각각 4가지 종류의 커플링을 채용한 경우에 대해서 6자유도 중 이송방향과 롤링을 제외한 수직방향, 수평방향, 피칭, 요잉 4자유도 대한 운동오차 및 1 μ m의 스텝이송반응성을 측정하였다.

상용공작기계인 A사의 머시닝센터의 경우, 이송속도를 다른 실험조건과 동일하도록 하였다.

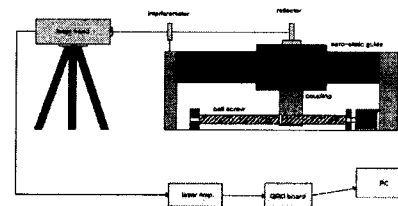


Fig. 2 Experimental set-up for measuring motion error and position error

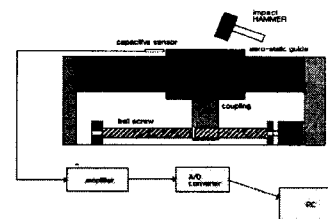


Fig. 3 Experimental set-up for measuring dynamic characteristics

각 커플링을 채용한 볼스크류에 대해서 이송속도 314mm/min으로 측정하였다. 이것은 실험에 사용된 실험에 사용된 스텝모터로 낼 수 있는 최대속도이다.

이송길이는 100mm~140mm로 비교적 짧은

구간인데 실제 볼스크류의 최대 스트로크는 250mm이지만 각 커플링의 형상과 공기정압 패드의 크기 등에 의해 제한을 받아 풀 스트로크에 대해 측정하지는 못하였다.

또한 동특성을 측정하기 위해 임팩트해머를 이용하였다. 여기서는 이 실험에서의 이송속도인 314 mm/mm에서 동적인 영향이 없이 커플링의 구조적, 원리적 특성에 의해 이송정밀도가 측정되었는가와 함께 제작된 커플링의 최대이송속도를 확인하여 실제에 적용하는 것이 가능한가하는 점을 파악하고자 각 커플링의 동특성을 측정하였다. 여기에는 용량형 겐센서(ADE 3910-2)가 사용되었으며 시간에 따른 동특성(Time Domain Characteristics)을 측정한 후 FFT분석을 통해 주파수 영역에 대한 동특성(Frequency Domain Characteristics)을 구해내었다. 여기에서는 일차고유진동수 이외의 고유진동수는 표시하지 않았다.

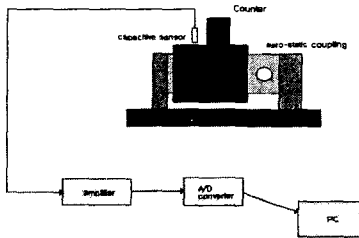


Fig. 4 Experimental set-up for measuring stiffness of couplings

위 Fig.4는 각 커플링의 강성을 측정하기 위한 장치를 나타내고 있다. 직결식의 경우는 실험하지 않았다.

4. 실험 결과

각각의 커플링에 대해 운동정밀도를 측정해 본 결과 직결식의 경우는 수직방향 및 수평방향에 대해서 약 $6\mu\text{m}$ 이상의 운동 오차를 보이고 있었지만 스프링 타입의 커플링의 경우는 수직방향의 경우 $3.5\mu\text{m}$ 정도로 비교적 좋은 결과를 보이고 있으나 수평방향의 경우는 $13\mu\text{m}$ 정도의 결과를 보이고 있다. 공기정압커플링은 수직방향과 수평방향 모두에서 운동 오차가 적은 경향을 보여주고 있다. 운동정밀도에 대한 실험결과를 Fig. 5.와 6.에 표시하였다.

A사의 머시닝센터는 수직, 수평방향의 운동

정밀도에 비해서 피칭 및 요잉 운동정밀도는 매우 우수한 것으로 나타나고 있다.

직결식의 경우는 볼스크류자체의 런아웃, 모터 진동 등이 그대로 전달되어 공기정압안내면 자체의 우수한 운동정밀도를 해치고 있음을 알 수 있다. 스프링식 커플링의 경우, 볼스크류와 안내면사이의 얼라인먼트가 상당한 영향을 미치게 되며 오차발생의 요인이 많이 존재한다고 보여진다.

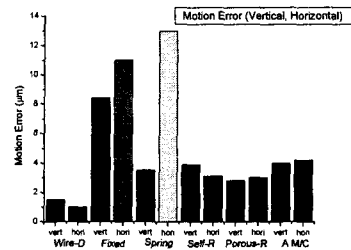


Fig. 5 Horizontal and vertical motion errors

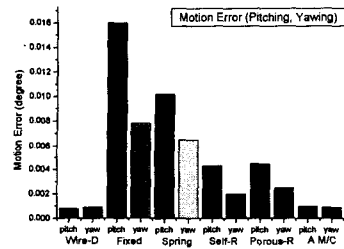
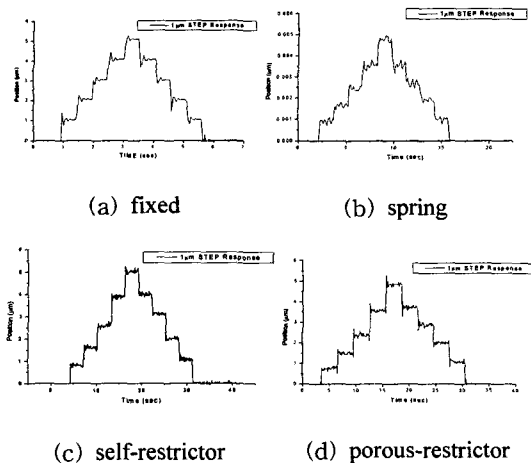
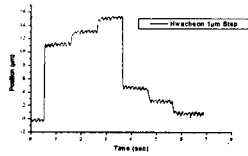


Fig. 6 Pitching and yawing errors





(e) A MC

Fig.7 1 μ m step response

각 커플링에 대해 위치정밀도를 측정하기 위해 1 μ m 스텝이송의 경우에 대한 미소응답을 레이저 간섭계로 측정하였다. 측정된 결과를 살펴보면 직결식의 경우 목표지점에 도달하는 과정에서 오버슈트가 많이 발생함을 알 수 있다. 이것은 스텝모터의 가감특성이 나쁘다 전체시스템의 질량관성이 볼스크류에 작용하였기 때문으로 보여진다. 스프링 타입의 커플링의 경우는 강성이 부족한 이유로 오버슈트가 더 크게 발생하고 있다. 그러나 공기정압커플링의 경우는 비교적 강성이 높음에다 감쇠효과에 의해 오버슈트가 줄어들 뿐 아니라 미소진동이 줄어드는 경향을 보이고 있다. 전체적으로는 1 μ m스텝이송까지 비교적 잘 도달하고 있음을 알 수 있었다.

그러나 A사의 머시닝센터의 경우는 1 μ m 스텝이송이 제대로 되지 않고 있음을 볼 수 있는데 운동정밀도에 비해 위치결정정밀도가 나쁘다는 것을 알 수 있었다. 이는 베드자체의 질량이 매우 커서 관성력에 의한 영향으로 볼 수 있는데 거기에서 오픈루프제어를 하기 때문으로 볼 수 있다. 일반적으로 LM베어링이 채용된 이송계의 경우에는 LM이나 모터자체의 문제보다는 부속유닛의 조합특성이 더 많은 영향을 미치는 경우가 많으므로 이 경우에도 거기에서 더욱 큰 원인이 있을 수 있으며 장기간의 사용으로 인해 최초상태의 기계정밀도보다도 나빠진 것도 원인으로 들 수 있겠다.

각각의 커플링에 대해서 강성과 동특성을 측정하였다. 측정된 강성과 동특성을 비교해보면 계의 질량이 변화하고 강성이 달라짐에 따라서 일차고유진동수가 달라지고 있음을 알 수 있었다. 또한 이 실험에서의 이송속도 314mm/min에서는 동적 영향이 나타나지 않았음을 알 수 있었다.

직결식에 비해 공기정압커플링이, 그보다 스프링식 커플링의 일차고유진동수가 빠르게 나타나고 있는데 이것은 아래 (식) 7.에서 보는 바와 같이 비접촉임으로 인한 시스템의 질량 감소는 있겠지만 강성이 무한대인 직결식과 비교해서 정압커플링의 강성이 상대적으로 많이 낮기 때문이며 스프링식의 경우는 강성이 더 낮고 접촉식이므로 그 경향이 더 심하다고 생각된다.

이송속도는 1회전이 1주기와 일치한다고 가정하면 아래의 (식) 8.과 같이 구해진다. 고속의 이송속도 이전에서 1차 고유진동수가 나타나고 있지만 이 실험에서의 이송속도가 동적 영향을 받을 수 있는 것이 아니라는 점을 알 수 있었다.

$$W_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{식} 7.)$$

$$V_{max}(\text{mm/min}) = f_n \times 60(\text{sec/min}) \times 2(\text{mm/rev}) \quad (\text{식} 8.)$$

Table 1. Stiffness and dynamic characteristics of couplings

커플링 타입	커플링 강성 (kg/ μ m)		일차 고유진동수 Hz	이송 속도 mm/min
	수직 방향	수평 방향		
직결식	∞		51.8	6216
스프링타입	0.34	0.34	6.71	805.2
노즐타입	3.43	3.55	24.2	2904
다공질타입	3.45	3.58	23.1	2772

Table 1.에서 보는 바와 같이 강성이 일차고유진동수와 밀접한 관련이 있다는 것을 알 수 있으며 앞선 운동정밀도 측정실험 및 위치결정정밀도 측정실험의 결과와 비교해보더라도 강성이 커플링에 있어 매우 큰 인자임을 알 수 있다. 즉, 강성이 약간 더 높은 다공질식 커플링이 노즐식 커플링에 비해서 미소하나마 성능이 우수한 것이며 다만 일차고유진동수가 노즐식 커플링의 경우가 더 낮은 것은 다공질식 커플링이 황동으로 된 메탈을 소재로 하고 있어 알루미늄으로 제작된 노즐식보다 더 질량이 크기 때문으로 생각된다.

본 실험의 결과를 통해서 보면 초고속, 초정밀 이송시스템을 얻기 위해서는 질량을 더욱 줄이는 대신 높은 강성을 가질 수 있도록 커플링을 설계하는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있었

다.

5. 결론

본 연구에서는 볼스크류와 공기정압안내면으로 이루어진 이송시스템의 이송정밀도를 향상시키기 위해서 스프링식, 공기정압식 커플링의 채용을 제안하였다. 그리고 직결식 및 와이어구동, 스프링식을 공기정압식 커플링과 비교하기 위해서 강성, 동특성 및 운동정밀도, 위치결정정밀도를 측정하였다. 각 커플링의 특성을 비교분석하고 기존의 기계식 및 유정압식 커플링보다도 훨씬 단순한 구조이면서 제작이 쉬운 커플링을 제안하였다.

1) 공기정압커플링은 강성에 비례하여 우수한 운동정밀도를 나타내고 있으며 위치결정정밀도가 비교적 우수한 특성을 보이고 있어 실제 초정밀 가공기 및 측정기에 적용이 가능함을 알 수 있었다.

2) 제작된 공기정압커플링의 강성으로 공기정압안내면의 운동정밀도와 위치결정정밀도를 확보하였다.

3) 다공질식 커플링은 같은 면적을 갖는 노즐식 커플링보다도 더 높은 강성을 가지고 있어 우수한 성능을 보여주고 있다.

4) 공기정압자체의 강성부족으로 인해 공기정압커플링의 일차고유진동수가 직결식의 약 50%임을 알 수 있었다.

5) 직결식 커플링을 채용하는 경우는 볼스크류의 형상오차 및 미세진동, 모터의 진동, 조립오차 등으로 인해 공기정압안내면의 운동정밀도를 악화시키게 된다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 朴天弘
“油淨壓テーブルの高精度化に関する研究”
2000.8 神戸大學.
2. 社本英二, 朴天弘, 森脇俊道 : 정압테이블의 운동오차해석과 고정도화 (제 1보),
일본정밀공학회지 Vol.66. No. 12. 2000
3. C.L.Chao, J.Neu : Model reference adaptive

control of air-lubricated capstan drive for precision positioning 1997.9.3 Journal of International Society for Precision Engineering and Nanotechnology. 24 (2000)285-290

4. 大塚二郎, 飯田昇瀬, 川 佳洋, 秋野良平, 梁田生 : ねじ駆動による超精密位置決め(第 3報) - ナノメータ精度位置決めと整定時間の短縮, 日本精密工學會誌, 59-10 (1993)p1655

5. 水本洋, 藪谷誠, 清水龍人, 上芳啓 “超精密工作機械用 位置決め装置の分解能に関する比較研究, 日本精密工學會誌, 62-3 (1996)p458

6. Mohamed Fourka, Marc Bonis : Comparison between externally pressurized gas thrust bearing with different orificer and porous feeding systems. 1997.5. Journal of tribology

7. 十合晋一, “氣體軸受-設計から製作まで” 1984. 公立出版株式會社 p60-69.

8. J.W.Lund 등 MTI group "Design of Gas Bearing" (1967)