

PMAC 제어를 이용한 전자빔 마스터링 스테이지의 일정선속도 동기제어 Constant Linear Velocity Control of E-beam Mastering Stages using PMAC Controller

*#김경호¹, 심종엽¹, 박천홍¹, 송창규¹, 이성재²

*#G. Khim(gyungho@kimm.re.kr)¹, J. Y. Shim¹, C. H. Park¹, C. K. Song¹, S. J. Lee²

¹ 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부

² (주) 델타타우 코리아

Key words : E-beam mastering, Linear/Rotary table, PMAC controller, Constant linear velocity control, Simultaneous control

1. 서론

최근에 대용량 광디스크의 표준규격으로 등장한 Blu-ray 디스크는 한 층당 25 GB의 용량으로 고화질의 HD 영상을 2시간 이상 저장할 수 있다. 이는 기존의 DVD보다 미세한 패턴을 형성하였기 때문이며, 이를 위해 파장이 매우 짧은 전자빔을 이용하여 마스터링을 수행하고 있다¹.

전자빔을 이용한 Blu-ray 디스크 마스터링은 반도체 노광 공정과 비슷하며, 고진공 챔버내에서 정밀하게 이송하는 직선-회전테이블 위에 놓인 시편에 전자빔을 조사하여 패턴을 가공하는 것이다. 이때 시편은 일정한 선속도로 회전하는 가운데 가공이 이루어지기 때문에 회전테이블은 반경에 따라 각속도가 달라져야 하며, 직선테이블은 회전테이블의 한 회전당 패턴의 한 트랙피치만큼 이동해야 하기 때문에 회전테이블과 동기제어가 이루어져야 한다. 일반적으로 일정선속도 제어 및 동기제어를 달성하기 위해서는 DSP 보드와 특별한 제어 알고리즘을 이용하는 것이 보통이지만² 여기서는 상용제어기인 델타타우사의 PMAC 보드를 이용하여 간단하게 구현해 보고자 하였다. 본 논문에서는 PMAC 제어를 이용한 전자빔 마스터링 스테이지의 일정선속도 및 동기제어 실험결과에 대해 소개한다.

2. 직선-회전테이블의 설계 및 제작

전자빔 마스터링에서 직선-회전테이블이 얼마나 정밀하게 이송하였는가의 여부는 가공패턴의 정밀도를 결정하는 중요한 요소 중의 하나이다. Blu-ray 디스크와 같이 나선형 패턴의 경우, 직선테이블보다는 회전테이블의 정밀도가 매우 중요하기 때문에 회전테이블은 공기베어링을 이용하여 설계하였다. 진공챔버에서의 공기베어링은 차동베어링을 이용하여 충분히 고진공 환경에서 사용가능하게 설계하였으며, 실험결과 또한 10^{-4} Pa 이상의 진공도를 실현하고 있다³. 회전테이블은 슬롯리스 다이렉트 드라이브 모터를 채택하여 코깅에 의해 발생하는 회전정밀도 저하 현상과 속도변동을 최대한 제거하였다. 제어기는 델타타우사의 Turbo PMAC2 보드를, 피드백은 소니의 각도엔코더, 앰프는 Varedan사의 리니어 앰프를 이용하였다. 직선테이블은 저중심형 직선베어링을 이용하였으며, 리니어모터와 리니어스케일을 이용하여 구동하였다. 설계된 직선-회전테이블은 Fig.1과 같으며, Blu-ray 마스터링 장비에 설치된 모습은 Fig.2와 같다.

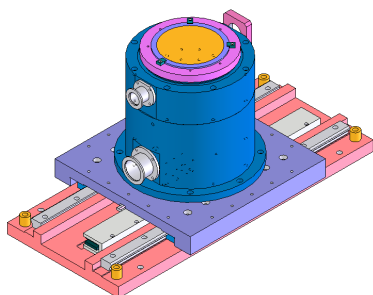


Fig. 1 Linear and Rotary tables

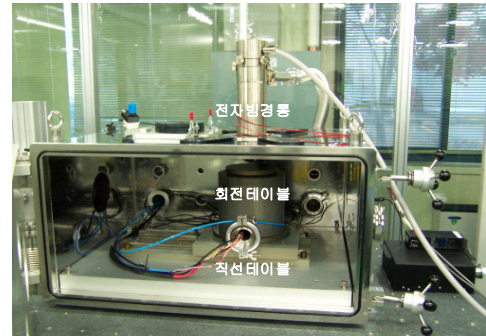


Fig. 2 Linear and Rotary tables installed in Blu-ray mastering equipment

3. PMAC 제어를 이용한 제어

전자빔을 이용한 Blu-ray 디스크의 가공은 일정선속도로 나선형으로 가공이 이루어지므로 회전테이블의 경우 반경이 증가할수록 각속도가 작아지는 가변속도로 제어가 이루어져야 한다. 또한 25 GB Blu-ray 디스크의 경우, 서로 이웃한 트랙간의 피치는 320 nm 이므로 회전테이블 1회전당 직선테이블은 320 nm를 정확히 이동해야 한다. 여기서는 상용제어기인 PMAC 보드를 이용하여 직선-회전테이블의 일정선속도 제어 및 동기제어를 구현해 보았다. 시뮬레이션을 위해 다음과 같이 실제 가공과 유사한 상황을 가정하였다.

가공구간 : 29.36 mm ~ 30 mm
 가공 선속도 : 500 mm/s
 가공방향 : 안쪽($r_1=29.36$ mm)에서 바깥쪽($r_2=30$ mm)으로
 트랙피치 (회전테이블 1회전당 직선테이블 이동량) : 320 nm
 회전테이블의 각속도 : 162.62 rpm @ $r_1=29.36$ mm, 159.15 rpm @ $r_2=30$ mm

25 GB 용 Blu-ray 디스크는 트랙피치가 320 nm로 매우 작기 때문에 시뮬레이션 구간은 반경 29.36에서 30 mm까지로 640 μ m만 선택하였으며, 전자빔 가공속도는 현재 일반적인 가공속도 수준인 500 mm/s로 설정하였다. 500 mm/s의 일정 선속도를 유지하기 위해서는 반경 $r_1=29.36$ mm에서의 각속도는 $\omega_1=162.62$ rpm, $r_2=30$ mm에서는 $\omega_2=159.15$ rpm의 각속도로 제어해야 되며, 이와 같이 반경이 증가함에 따라 각속도를 줄여야만 한다(Fig.3).

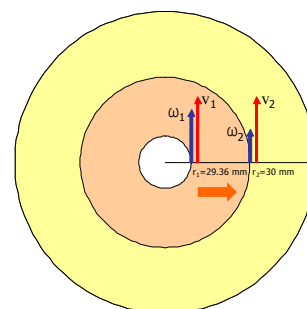


Fig. 3 Blu-ray disc machining

가변속도 구현을 위해서 PMAC 제어기에서 제공되는 SPLINE2 명령을 이용하였다. SPLINE2 명령은 일정 시간 동안에 서로 이웃한 거리를 속도가 불연속한 점이 없도록 cubic 운동하게 하는 것으로, 본 논문에서는 반경방향으로의 한 스텝을 트랙피치로 구분하고, 한 스텝당 1 회전하는데 걸리는 시간을 계산하여 이전 단계와 다음 단계에서의 속도가 연속으로 이어질 수 있도록 하였다. 물론 한 스텝을 트랙피치보다 더 세부화하여 보다 정밀한 이송이 가능하게 할 수도 있다.

Fig.4 는 회전테이블의 가변속도 제어결과를 고분해능 엔코더(38,707,200 cnts/rev)를 이용하여 측정한 결과로써, 반경 29.36 mm 에서 처음 출발시 162.62 rpm 에서 시작하여 반경 30 mm 에 도착할 때의 각속도가 159.15 rpm 으로 점차 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이 때 640 μm 를 이동하는데 걸리는 총 시간은 대략 750 초 정도로, 실제 디스크 가공영역을 40 mm 라 할 때 대략 13 시간 정도 걸리는 것을 예상할 수 있다. 트랙피치가 320 nm 로 매우 작기 때문에 속도변화가 시간이나 반경에 선형적인 것처럼 보이지만 이는 이송구간이 매우 작기 때문에 나타난 현상으로, 트랙피치를 10 μm 로 가정하여 실험한 Fig.5 의 결과를 보면 그렇지 않은 것을 알 수 있다.

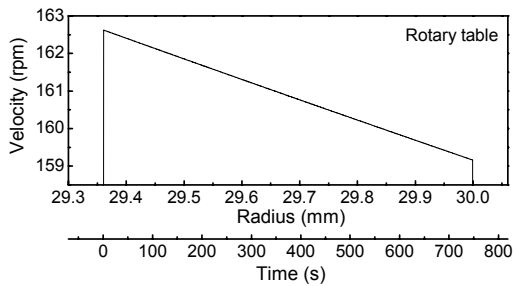


Fig. 4 Angular velocity variation of rotary table

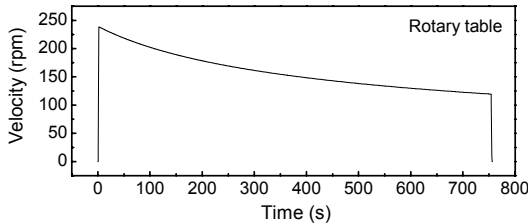


Fig. 5 Angular velocity variation of rotary table (track pitch 10 μm)

Fig.6 는 회전테이블에 동기되어 구동된 직선테이블의 속도변화를 보여주고 있다. 직선테이블은 이송속도가 0.867 에서 0.849 μm/s 정도로 이송거리에 따라 속도가 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 그 크기가 매우 작고 리니어엔코더(5 μm/cnt)로 측정하였기 때문에 노이즈에 의한 영향이 상대적으로 크게 나타나고 있으나 전체적인 경향은 명령치를 잘 추종하고 있는 것을 볼 수 있다. 직선테이블의 속도변동을 엔코더 신호가 아닌 노이즈에 둔감한 센서를 이용해서 측정하면 보다 깨끗한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

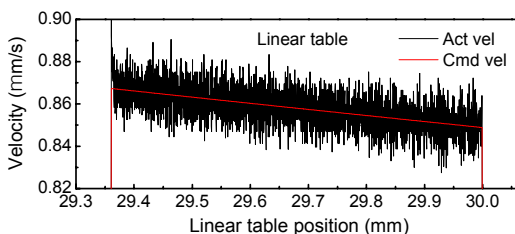


Fig. 6 Velocity variation of linear table

Fig.7 은 회전테이블과 직선테이블의 동기제어가 얼마나 정확하게 구현되고 있는지를 평가한 결과로써, 회전테이블 1 회전당 직선테이블이 정확히 320 nm 씩 구동하는 것을 확인할 수 있다. 이때 동기오차는 가속과 감속시에는 100 nm 이상의 오차를 보이고 있으나 속도가 안정된 구간에서는 ±10 nm 정도로 유지되고 있다.

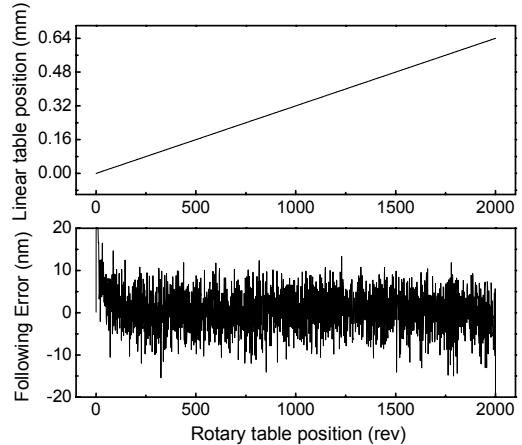


Fig. 7 Results of simultaneous control

회전과 직선테이블이 위와 같은 가변속도로 구동될 때 과연 회전테이블 위에 놓인 시편의 가공선속도가 처음 명령한 500 mm/s 가 되는지를 확인하기 위해 회전테이블의 각속도에 그 지점에서의 반경을 곱해 선속도($v=r \times \omega$)를 계산하였다. Fig.8 은 Fig.4 와 Fig.6 을 이용해 계산한 선속도로써 항상 일정한 선속도를 유지하는 것을 볼 수 있다. 구현된 선속도는 500.008 ± 0.012 mm/s 정도로 $5 \times 10^{-3} \%$ 의 상당히 양호한 속도변동성을 보이고 있다.

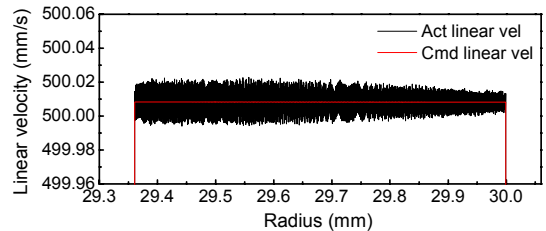


Fig. 8 Variation of linear velocity

4. 결론

Blu-ray 디스크 마스터링 장비에서, 시편은 일정한 선속도로 구동하는 가운데 가공이 이루어지기 때문에 회전테이블은 반경에 따라 각속도가 변화해야 하며, 직선테이블은 디스크의 트랙피치를 맞춰주기 위하여 회전테이블에 대해 동기제어가 이루어져야 한다. 본 논문에서는 전자빔 마스터링용 직선-회전테이블을 설계/제작하고, PMAC 제어기를 이용하여 일정선속도 제어 및 동기제어를 구현하여 ±10 nm 의 동기오차 및 $5 \times 10^{-3} \%$ 의 속도변동성을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Kojima, Y., et al., "High Density Mastering Using Electron Beam," Jpn. J. Appl. Phys, Vol.37, pp.2137-2143, 1998.
2. WADA, Y., "Electron Beam Lithography with Rotation Stage," J. JSPE, Vol.70, No.3, pp.318-321, 2004 (in Japanese)
3. 김경호, 송창규, 박천홍, "전자빔 마스터링을 위한 공기 베어링 응용 고진공 회전테이블의 설계 및 진공특성 평가," J. KSPE, Vol.25, No.12, pp.132-138, 2008