

외란 관측기를 이용한 중앙 분산형 다두 자수기의 동기제어

Synchronous Control of Center Distributed Multi-Head Embroidery Machine Using Disturbance Observer

정승현¹, 최득성¹, 박정일^{2,✉}
Seung Hyun Jeong¹, Deuk-Sung Choi¹, and Jung Il Park^{2,✉}

¹ 영남이공대학 전자정보계열 (School of Electronics and Information Engineering, Yeung Nam College of Science & Technology)

² 영남대학교 전자공학과 (Department of Electronic Engineering, Yeung Nam University)

✉ Corresponding author: jipark@yu.ac.kr, Tel: +82-53-810-2498

Manuscript received: 2014.3.31 / Revised: 2014.7.9 / Accepted: 2014.10.14

This paper proposes the center distributed embroidery machine structure with 1,500 RPM, 52 heads for productivity and large sized embroidery goods. The synchronous velocity controller is adopted for control of the 2-axis distributed embroidery machine and the DOB(Disturbance Observer) is also adopted for minimizing disturbances caused by needle cams. For driving experiments of 2-axis center distributed driving structure, two conventional 26 heads 1,500RPM embroidery machines are used. It was shown that the center distributed driving structure with 2-axis synchronous control can be one way for implementing a large embroidery machine.

Key Words: 52 Heads Center Distributed Embroidery Machine (52 두 중앙 분산형 자수기), Disturbance Observer (외란 관측기), Synchronous Control (동기제어)

1. 서론

현재 섬유기계 중 컴퓨터 자수기는 국제적으로 1,000 rpm 이상의 고속운전, 50헤드 이상의 다두화, 자수 제품의 대면적화, 0.1mm 오차 이내의 정밀자수 등을 요구 받고 있다. 또한 운영의 편의성을 위하여 임베디드 운영체제를 탑재하고 터치스크린, 자수 데이터 전송을 위한 USB 포터, 시스템 유지보수를 위한 무선네트워크 등의 정보기술화 경향을 보여주고 있다.¹ 특히 자수기의 신흥 강국인 중국은 2009년 상해에서 열린 ITMA ASIA 전시회에서 86헤드 다두 자수기를 700 rpm의 속도로 운전

하여 화려한 대면적의 자수를 선호하는 인도바이어들에게 큰 호평을 받았다. 이러한 국제적 흐름에 호응하여 국내 여러 자수기 업체들도 자수기의 성능한계인 50두, 1,500 rpm의 최고 성능구현에 박차를 가하게 되었다.

일반적으로 자수기는 기계프레임에 복수개의 자수기 헤드 부분이 일렬로 위치하며 헤드를 관통하는 주축의 회전운동에 의하여, 상축의 헤드에 장착된 바늘대가 상하운동을 하고 하축의 훅셋은 바늘대의 실을 낚아 채어 바느질을 완성시키는데, 이 때 원단을 고정하는 수평 X·Y 위치제어에 의해 자수무늬가 완성된다. 이러한 자수기의

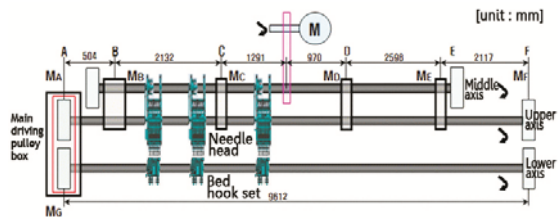


Fig. 1 Power transmission structure of conventional embroidery machine

주 동력은 주축 모터에서 중간축을 거쳐 바늘대가 장착된 상축으로 전달되고, 상축의 동력은 다시 메인구동 풀리 박스를 거쳐 혹셋이 장착된 하축으로 전달되어 자수 작업을 수행한다. 주축모터는 자수기의 한 쪽 끝단에 위치하며, 축에 장착된 많은 자수헤드에 의해서 큰 부하를 받게 되며, 대면적 자수를 위하여 헤드 수를 증가 시키면 주축의 비틀림과 함께 메인구동 풀리박스로 동력을 전달 받는 혹셋이 장착된 하축의 비틀림 현상이 동시에 발생하며 축의 끝으로 갈수록 자수품질이 떨어진다. 이러한 기존 자수기의 기본 동력 전달계 구조를 Fig. 1에 나타내었으며, 이 구조에서 1,500 rpm, 52헤드 자수기를 구현할 때에 발생하는 문제점은 다음과 같다.

- 관성증가에 따른 정밀속도제어의 어려움
- 진동 및 소음증가에 의한 고속구동의 어려움
- 마찰 증가에 의한 에너지 소모의 증가
- 벨트로 커플된 상하축 비틀림 현상 발생
- 상축 바늘대 하축 혹셋 자수불량 현상 발생

특히 52두, 1,500 rpm의 경우 자수기 헤드의 구동부하를 동역학 해석하여, 비틀림 공식으로 계산해보면 양쪽 끝단은 1.38°의 비틀림 각도를 가지게 된다. 동력축 재질은 스틸이며 비틀림각 θ 는 다음 식(1)과 같다.

$$\theta_{\max} = \frac{ML}{GI_z} = \frac{3.13Mm \times 9.662m \times 32}{80 \times 10^9 N/M^2 \times \pi \times (0.025)^4} = 1.38^\circ \quad (1)$$

여기서, M : 토크, L : 축의 길이, G : 전단탄성계수, I_z : 극관성모멘트

일반적으로 자수 바늘의 스트로크는 35mm 이며 각도당 바늘의 이격을 구하기 위하여 식(2)를 사용한다.

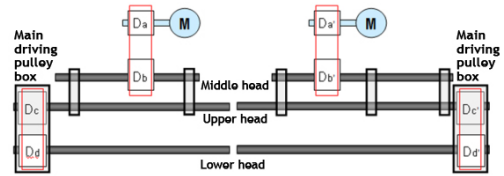


Fig. 2 Proposed transmission structure of embroidery machine

$$N_p = \frac{Stroke}{360} = \frac{35mm}{360} = 0.097mm/1^\circ \quad (2)$$

여기서, N_p : 각도당 바늘 이격을

(1)식과 (2)식을 이용하면 52 두 자수기의 비틀림에 의한 최대 이격은 0.133mm가 된다. 이는 일반적인 정밀 자수기의 땀폭 0.1mm 를 넘어서는 수치로서 심각한 자수 불량률을 가지고 올 수 있다.

이러한 어려움을 극복한 1,500 rpm, 52헤드 이상의 자수기를 구현하기 위해서, 2011년 자수기 선두 업체인 ㈜썬스타는 상축 하축을 분리하여 두 개의 모터를 동기시키는 상하축 분리 개념을 제시하였으며,¹ 본 논문에서는 기존의 중앙집중식 기계식 구조에서 탈피하여 대면적 다두 자수기를 좌우로 나누는 2축 분산구동 방식을 제안하고, 운전 시 헤드의 바늘대 캠운동에서 기인하는 부하 외란을 최소화 할 수 있는 외란관측기의 설계와 속도 동기 제어기를 제시한다.² 또한, 제안한 제어기를 실 시스템 적용과 실용성을 증명하기 위해서 상용 26 헤드 자수기 두 대의 분산 구동 실험을 실시하고, 두 자수기의 주축모터가 동시에 1,500 rpm속도에서 1° 이내의 동기 오차 성능을 구현 할 수 있음을 검증하였다.

2. 분산구동 제어

2.1 분산구동제어

최근의 자수기의 경향은 서론의 끝에서 언급한 것처럼 고속 다두화의 구현을 위해서, 분리구동 방식으로 가는 추세이며, 기어나 캠을 이용한 기계적인 제어 방식에서 벗어나 메카트로닉스 기술을 도입하고 있다.

Fig. 2는 본 논문에서 제안한 분산 제어구동 방식으로 Fig. 1처럼 구동 모터를 하나만을 사용한 기존의 자수기 동력계와는 달리 주축을 두 축으로 분리하여 동기제어를 실시하는 구조를 나타낸다.

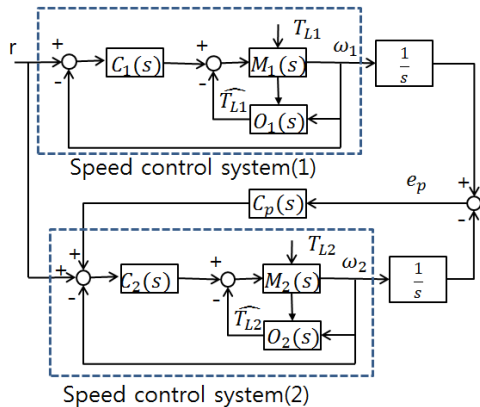


Fig. 3 Block diagram of proposed synchronous control system for center distributed embroidery machine

Fig. 3은 제안된 주축 2축 분산 구동 방식의 자수기를 제어하기 위한 기본 제어기 구성도로써 영으로 수렴하고자 속도제어계만으로는 오차 e_p 를 0으로 만들 수 없으므로 독립된 1,2 축의 속도 제어계에 위치동기 제어기 $C_p(s)$ 를 갖는 피드백 루프를 추가하여 각 축의 속도를 조절하여 e_p 를 0으로 수렴시킨다. 이러한 동기제어 구조는 이미 철강의 압연공정 등에 널리 사용되고 있는 구조이다.^{2,4}

본 논문의 분산 구동에 사용한 (주)썬스타의 26헤드 자수기 축의 길이는 5.853m이며, 주축은 3kW급 AC서보모터를 사용한다. 최대 1,500 rpm의 자수속도로 안정적으로 운전되며, 뿔폭은 0.1~12.7mm 까지 변경되어 질 수 있다. 이 자수기의 최대 비틀림 각도는 (1)식을 사용하여 계산하면 0.63°가 된다. 또 (2)식을 이용하여 최대 이격을 계산하면 0.0611mm가 된다. 이는 분리된 두 자수기를 1° 이내로 동기 시키면 오차 뿔폭이 0.1mm이내로 되어 각각의 두 자수기에서 동시에 양품의 자수물을 생산할 수 있는 조건이 된다.

본 논문에서는 두 자수기 주축을 Fig. 3구조의 속도와 동기 위치제어기를 이용하여, 1,500 rpm으로 분산구동 시키고, 두 축간의 동기 위치 오차를 1° 이내로 유지함으로써 기존자수기의 자수품질에 전혀 영향을 미치지 않고 자수면적 및 생산량을 두 배로 증가시킬 수 있는 52헤드 1,500 rpm의 고속, 대면적 자수기를 구현한다.

2.2 분산구동 제어기의 설계

두 자수기의 주축 서보모터를 분산구동하기 위한 제어기의 목표는 두 축에 동시에 전달되어지는

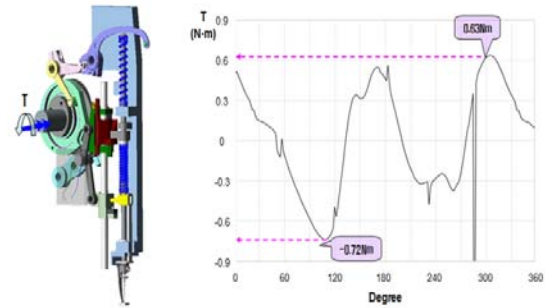


Fig. 4 SIMULATION of load disturbance caused by head CAM

속도지령과 각 모터간의 실제 속도간의 오차를 최소화하는 동시에, 절대적인 동기 위치오차 또한 최소화하는 것이다. 이러한 제어기의 구현에 있어서 어려운 요소는 자수기 헤드의 구조에서 기인하는 부하외란이다. 다투 자수기는 여러 개의 헤드에 장착된 바늘대를 하나의 주축모터로 구동시키는 구조로서, 1뿔의 바늘 운동 시 헤드에 장착된 캠에 의해서 직선운동이 이루어지고 캠의 정점에서 강한 부하외란이 유입되어진다!

2.2.1 외란관측기를 사용한 속도제어기 설계

자수기의 주축 서보모터 속도 제어기는 과도응답과 안정화 시간을 최소화하기 위하여 식 (3)의 PI 제어기를 사용한다.

$$C_{1,2}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

여기서, T_i : 적분시간, K_p : 비례게인, K_i : 적분게인

두 대의 자수기를 분산구동 시, 속도 및 동기 위치제어기는 부하외란에 강하게 영향을 받기 때문에 식 (3)과 같은 PI 선형제어기만으로 충분한 성능을 구현하기 어렵다.

Fig. 4는 자수기 헤드구조와 1,500rpm 운전 시 헤드에서 발생하는 부하외란을 분석한 것으로서, 1회전마다 캠의 운동에 의해 모터움직임을 방해하는 강인한 부하외란이 유입되어짐을 알 수 있다. 이 때 26헤드의 전체 부하는 최대부하 0.72Nm에 헤드수를 곱하여 18.72Nm가 된다. 이러한 부하외란을 효과적으로 보상하기 위해서 저주파통과필터 Q(s)를 갖는 외란 관측기를 도입한다.

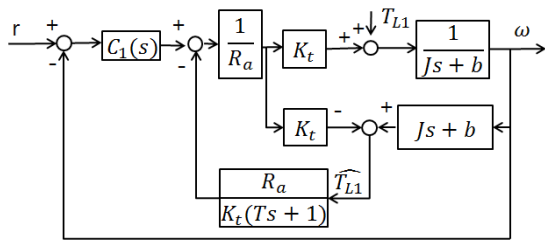


Fig. 5 Speed control with a disturbance observer

Fig. 5는 외란관측기를 갖는 속도제어기 블록도이다. 서보모터는 제어입력 r 을 받아서 속도 ω 를 출력한다. 이 때 바늘대의 캠에서 유입되어지는 부하외란 T_L 을 관측하기 위해서 외란 관측기를 사용한다. 이는 서보모터의 역모델 $Js + b$ 을 이용하여 토크를 추정 한 후, 토크지령과의 차를 이용하여 부하외란 관측값 \hat{T}_L 을 계산하고, 이 값을 저주파 통과필터 $1/(Ts + 1)$ 에 통과시킨 후, 실시간으로 모터의 토크를 보상시킴으로써 모터에 유입되어지는 캠의 부하외란을 최소화 시키는 역할을 한다. 이미 이러한 외란 관측기를 이용하여 제어의 정밀제어 성능을 높이는 많은 적용들이 사용되고 있다.⁵⁻⁷

2.2.2 축 동기제어기의 설계

두 자수기의 동기제어 구조는 Fig. 3의 구조를 가지며 두 자수기의 속도 제어에 동특성 차는 동기 위치오차를 발생시킨다. 두 축간의 정확한 동기를 위해서는 초기부터 전 운전 영역에 걸쳐 $\omega_1 = \omega_2$ 일 것이 요구된다. 위치오차 $e_p(s)$ 는 두 모터간의 속도오차의 적분으로 나타난다. 이러한 위치오차의 최소화를 위한 동기 제어기 $C_p(s)$ 는 각 축의 속도를 직접적으로 보상해주는 단순 PI제어기로 설계하며 그 게인값은 짧은 시간에 정밀한 위치동기가 되도록 시행착오로 결정한다.

$$e_p(s) = \frac{1}{s}(\omega_1 - \omega_2), \quad C_p(s) = K_{pp} \quad (4)$$

여기서, $e_p(s)$: 동기오차, K_{pp} : 비례게인

2.3 모의실험

2.3.1 외란관측기를 사용한 속도제어기

본 모의실험은 실제 파라미터에 가까운 값을 사용하며 실제 실험에서 일어날 수 있는 경향을 사전에 파악하기 위하여 수행한다. Fig. 6은 MATLAB SIMULINK⁸를 이용해서 외란 보상 효과

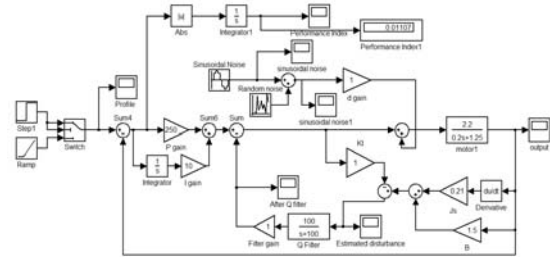


Fig. 6 Velocity control simulation with a disturbance observer

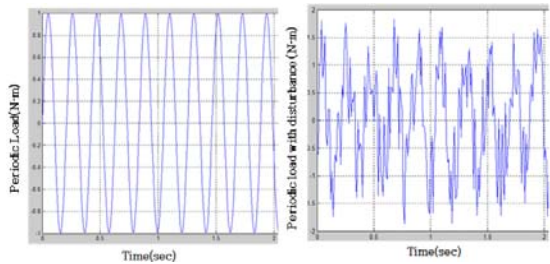


Fig. 7 Periodic load with disturbance

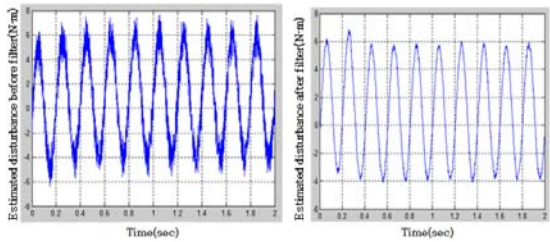


Fig. 8 Estimated disturbance using a disturbance observer

를 살펴보기 위한 속도제어기의 블록도이다. 파라미터값들은 실제 실험에서 측정된 값들을 이용하였다. 서보모터의 역모델을 이용하여 인가되어지는 주기적 부하외란을 관측하고 이를 실시간으로 보상하는 외란관측기와 속도제어를 위한 PI 제어기의 구조를 가지고 있다.

Fig. 7은 캠에 의해서 유입되는 외란을 모사한 것으로서, 오른쪽 신호는 왼쪽 5Hz의 사인함수와 [-1,1]의 난수 발생함수의 출력을 합한 것이다. 5Hz 외란은 300rpm으로 운전했을 때에 유입되어지는 외란이다. 또 난수 잡음은 측정 잡음을 의미한다.

Fig. 8은 외란관측기에 의해 관측된 부하외란의 필터 전·후단 파형으로서 난수잡음이 제거된 5Hz의 주기적 부하외란을 관측할 수 있다. 이렇게 관

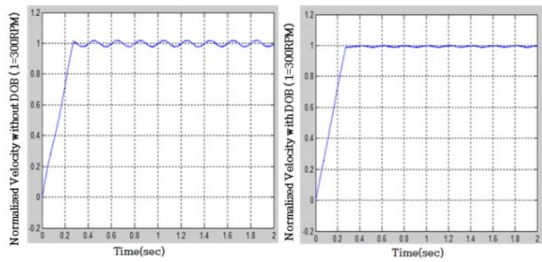


Fig. 9 Control results without/ with a disturbance observer

Table 1 Performance comparison with/without a DOB

Disturbance frequency	Without DOB	With DOB	Enhancement rate
5 Hz	0.023	0.011	53%
10 Hz	0.023	0.014	40%
15 Hz	0.023	0.016	31%
20 Hz	0.023	0.018	22%

측된 주기적 부하외란을 속도제어기의 출력에 실시간으로 피드백하여 모터토크를 보상하고 부하외란의 영향을 최소화 시킨다.

Fig. 9는 외란관측기를 사용한 속도출력 결과를 나타낸다. 외란관측기를 사용하면 부하외란을 효과적으로 제거함을 볼 수 있다. 자수기의 속도에 따라서 캠의 외란 주파수가 달라지기 때문에 몇 가지의 주파수에 대해서 오차의 제곱을 누적인 성능평가지수를 계산하여 Table 1에 나타내었다.

2.3.2 동기 제어기 모의실험

Fig. 10은 두 축의 동기 제어를 구현하기 위한 모의실험 블록도로서 두 축의 속도오차를 적분하여 위치오차로 만든 후 비례게인 K_{pp} 을 곱하여 각 모터의 속도 제어기에 실시간으로 피드백을 함으로써 동기 위치오차를 최소화하는 구조이다. 또한 Fig. 11은 계단함수의 속도지령 입력에 대한 오차로서 오차가 0으로 수렴함을 보여준다.

2.4 분산 구동 시스템 실험

Fig. 12는 자수기를 300 rpm으로 운전 시 초기 1.2초간의 정규화된 속도출력으로서 속도가 63.2%를 도달하는 0.2초의 기계적 시정수 지점을 기준으로 서보모터의 모델 $G_m(s)$ 를 구한다.⁶

$$G_m(s) = \frac{K_t}{Js + B}, \quad \omega(t) = \frac{K_t}{B}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (5)$$

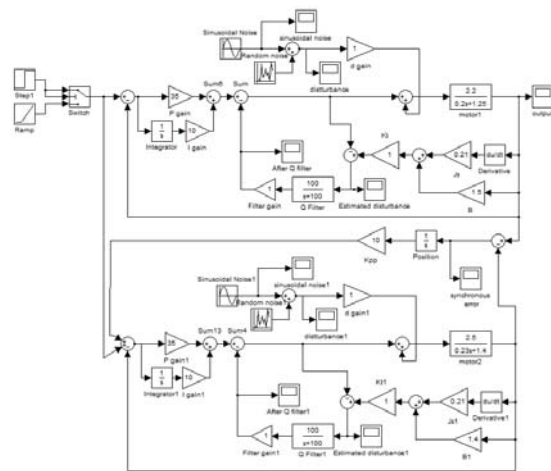


Fig. 10 2-axis synchronous position control simulation

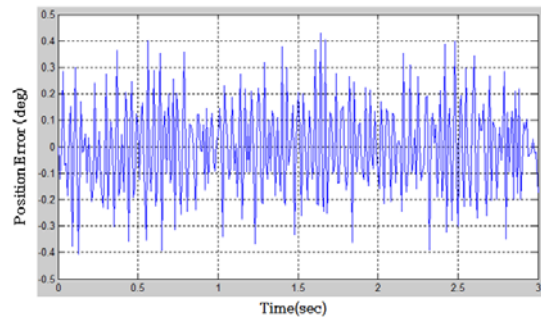


Fig. 11 Synchronous position error for step input

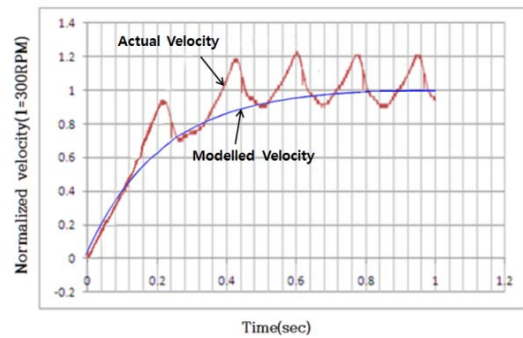


Fig. 12 Measurement of mechanical time constant at 300 rpm operation

여기서, K_t : 토크정수 [Nm/A], J : 관성모먼트 [Kgm²], B : 점성마찰계수[Nm/rad/s]

식(5)에서 시정수 $\tau = J/B = 0.2[s]$ 이고, 주축 3kW급 AC 서보모터의 토크정수 K_t 는 모터사양

Table 2 Gains of the proposed controller

Item	Value
K_p : Proportional gain	30
K_i : Integral gain	10
K_{pp} : Synchronous proportional gain	10
T : Q(s) filter time constant [sec]	0.01

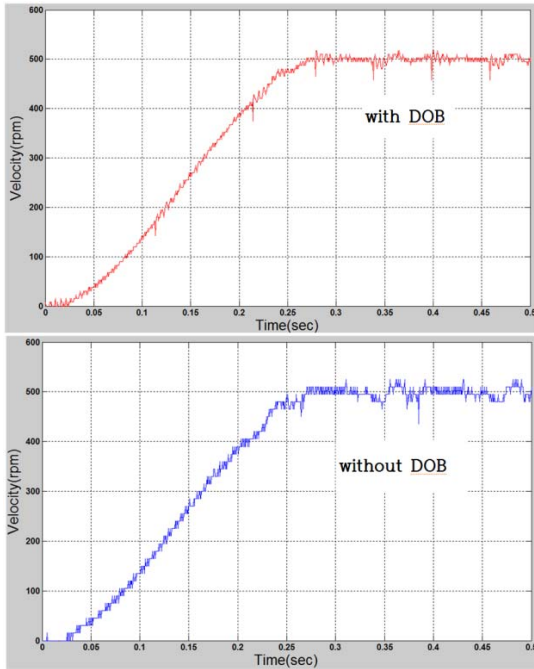


Fig. 13 Velocity control result with and without a disturbance observer

에 의해 2.23[Nm/A]이다.

Table 2는 본 실험에 사용된 실제의 제어기 이득값들을 나타낸 것으로 시행착오적으로 구한 값들입니다. 처음에 주축과 부축의 PI 제어 이득을 먼저 선정하고, 동기제어 이득을 선정했습니다. 외란관측기 필터의 시정수는 최고속도에서의 캠의 외란 주파수를 고려하여 0.01초로 하였으며, 이는 저역통과 필터의 대역폭 주파수가 약 16Hz 정도임을 의미합니다.

Fig. 13은 자속기를 500 rpm 으로 운전한 출력으로서 외란관측기의 적용 전·후 값을 비교한 것으로서 정상상태에서의 최대치 속도오차가 76rpm에서 42rpm으로 45% 개선되었다. 또한 Fig. 14-16은 각각 500, 1,000, 1,500 rpm의 운전 시 두 자속기의 주축 모터 사이의 동기 위치오차를 나타내었다.

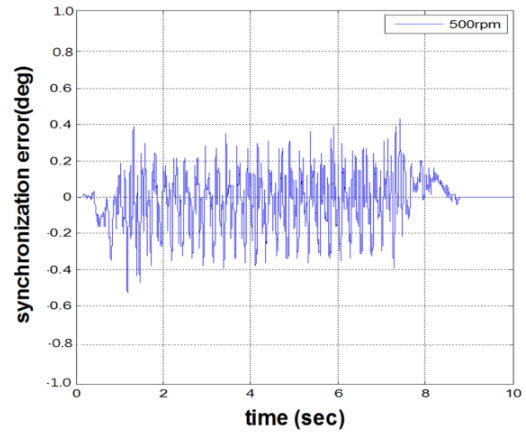


Fig. 14 Synchronous position error at 500 rpm

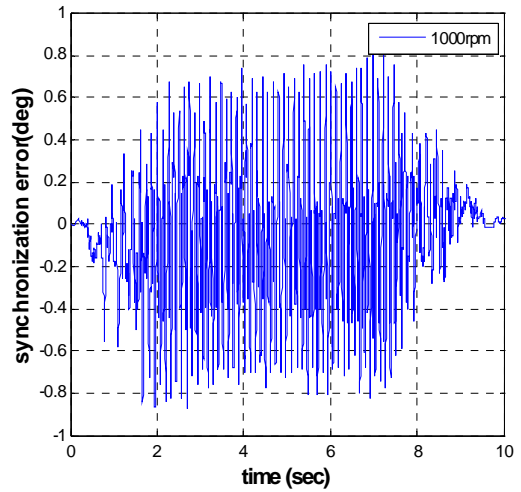


Fig. 15 Synchronous position error at 1,000 rpm

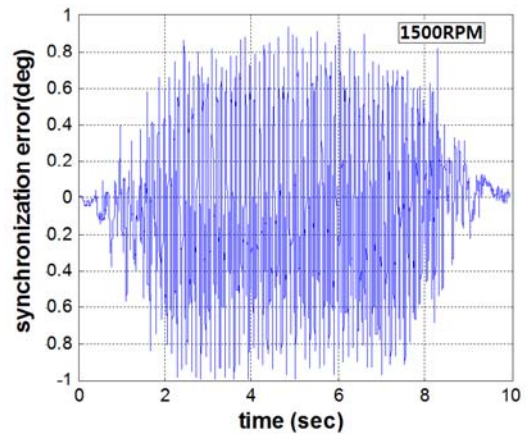


Fig. 16 Synchronous position error at 1,500 rpm



Fig. 17 Each embroidery results by 2 machines synchronous control

모두 1° 이내로 수렴하였으며, 1° 는 0.097mm의 땀폭 오차를 의미한다.

Fig. 17은 두 대의 자수기를 0.1mm~5mm 땀폭에서 300 ~ 1500 rpm으로 동기제어를 한 두자수기의 각각의 자수 결과물로서 두 자수물 모두 기존자수기 단독 운전 품질에 전혀 영향을 주지 않았다.

3. 결론

본 논문에서는 1,500 rpm, 52헤드 고속 대면적 자수기의 제어시스템 구현을 위하여 기존의 중앙 집중식 구조에서 탈피한 좌우분리형 자수기 구조를 제안하고 이를 제어하기 위해서 2축 동기제어를 도입하였다. 또한 자수기 헤드 바늘대의 캠 운동에 의해서 발생하는 부하외란을 최소화하기 위한 외란관측기를 적용하였다. 모의실험과 26두 1,500 rpm 자수기의 자수품질에 전혀 영향을 미치지 않고 자수면적 및 생산량을 두 배로 증가시킬 수 있는 52헤드 1500 rpm의 고속, 대면적 자수기를 구현하였다.

REFERENCES

1. KOTMI, "Development Report on the Next Generation Hybrid Synchronizing Embroidery and Sewing System (P062324)," KOTMI, 2013.
2. Han, M. S. and Jeong, S. H., "The Synchronous Motion Controller for the Multi-Head Embroidery Machine with Main Axis Separation Structure," KOR Patent, No. 10-2011-0105925, 2011.
3. Yoo, S. K. and Jeong, S. K., "Precise Position Synchronous Control of Two-Axis System Using Two-Degree-of-Freedom PI controller in BLDC motor," J. Korean Soc. Power System Eng., Vol. 5, No. 3, pp. 104-113, 2011.

4. Yang, J. H. and Byun, J. H., "Synchronized Control of 2 Driving Axis in Large Scale Gantry Robot Systems," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 14, No. 3, pp. 98-106, 1997.
5. Kim, B. K. and Chung, W. K., "Performance Tuning of Robust Motion Controllers for High-Accuracy Positioning Systems," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 7, No. 4, pp. 500-514, 2002.
6. Jeong, S. H. and Park, J. I., "High-Accuracy Motion Control of Linear Synchronous Motor Using Reinforcement Learning," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 12, pp. 1379-1387, 2011.
7. Kim, B. K. and Chung, W. K., "Advanced Disturbance Observer Design for Mechanical Positioning Systems," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 50, No. 6, pp. 1207-1216, 2003.
8. The MathWorks, Inc., "SIMULINK-Dynamic System Simulation for MATLAB," 2010.