

# 다채널 광정렬 장치에서의 다자유도 회전 스테이지 동작 특성에 관한 연구

정상화<sup>+</sup>, 차경래<sup>\*</sup>, 김현욱<sup>++</sup>, 최석봉<sup>++</sup>, 김광호<sup>++</sup>, 박준호<sup>++</sup>

## A Study on the Mechanism of Rotational Stage with Multi Degree of Freedom for Multi-Channel Optical Alignment System

Sanghwa Jeong<sup>+</sup>, Kyoungrae Cha<sup>\*</sup>, Hyunuk Kim<sup>++</sup>, Sukbong Choi<sup>++</sup>, Kwangho Kim<sup>++</sup>, Junho Park<sup>++</sup>

### Abstract

In recent years, as the demands of VBNS(Very high speed Backbone Network Service) and VDSL(Very high-data rate Digital Subscriber Line) increase, the development of kernel parts of optical communication such as PLC(Planar Light Circuit), Coupler, WDM elements increase. The alignment and the attachment technology are very important to fabricate the optical elements for communication. In this paper, the mechanism of rotational stage are studied. with the three different method and the results of them are applied to the design of the system. The performance test of resolution and travel is performed.

**Key Words :** Automatic Optical Alignment System(자동 광정렬장치), Rotational Stage(회전 스테이지), Flexible Joint(탄성조인트), Linear Motion Actuator(선형운동액츄에이터), Virtual Prototype(가상시제품), Plane Light Connector(평면도파로형 분배기)

## 1. 서론

초고속 광통신에 발전함에 따라 초고속 광통신 시스템의 핵심 부품인 평면도파로형 분배기(Splitter) 및 결합기(Coupler), 파장분할다중화소자(WDM) 소자, AWG(Arrayed Wave Guide) 필터 등 각종 광통신소자 부품들의 개발이 활발히 진행중이다.<sup>1,2</sup> 광통신 시스템 및 소자부품 수요시장 확대 및 급격한 기술적 발전에 따라 관련 제조업체들은

제품의 성능향상 및 생산성 향상이라는 복합된 목표를 동시에 달성하여야만 하는 문제에 직면하였다. 특히 광통신 소자 제조과정상 신속한 작업이 어려운 소자(Devices)와 광섬유(Optical Fiber) 사이의 광학적인 정렬과 접합 공정은 부품 성능 및 생산성 향상, 그리고 비용절감을 위한 가장 핵심적인 문제로 대두되고 있다.<sup>3,4,5</sup> 이에 따라 광관련 측정장비 또는 생산장비 제조업체에서는 자동생산과 측정장비를 하나의 일관된 시스템으로 통합해 활용하려는 기술 개

\* 발표자, 조선대학교 대학원 기계공학과 (orotham@empal.com)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

+ 조선대 기계공학과

++ 조선대 대학원

발이 세계적인 추세이다.<sup>6</sup> 본 연구에서는 평면도파로형 분배기(PLC), DWDM, AWG 등의 부품을 정렬하고 패키징하는 다채널 광정렬 장치에 사용되는 회전 스테이지의 메커니즘을 세가지 다른 방법을 이용하여 연구하였다. 또한 이 결과를 토대로 다축 회전 스테이지를 제작하였고 실험을 통하여 분해능, 반복성능, 이송특성 등의 시스템성능을 평가하였다.

## 2. 회전스테이지 링크해석

본 연구에서는 일반적인 광정렬 장치에서 각도조절을 위해 사용되었던 고니어 미터와 다른 메커니즘의 회전 스테이지를 제시하였다. 각변위를 발생시키기 위해 리니어 액츄에이터와 직선 변위를 각변위로 변화시키는 탄성레버 구조를 채택하였다. 탄성 레버구조를 채택함으로써 기존의 베어링에서 발생하는 베어링 공차를 줄일 수 있었으며 백래쉬 발생의 문제를 해결할 수 있었다. 본 연구에서는 링크의 길이를 설정하고 각각의 링크를 연결하는 조인트들의 각도변화 및 액츄에이터의 구동범위 등을 구하기 위하여 그래픽에 의한 해석(Graphical Method), 기구학적 해석(Kinematic Method) 그리고 ADAMS를 이용한 해석의 3가지 해석방법을 이용하여 링크를 해석하였다. 그리고 그 데이터들을 비교하여 회전 스테이지의 링크 설계의 적합성을 검증하였다. Fig. 1은 회전스테이지의 링크구조를 나타낸 것이다.

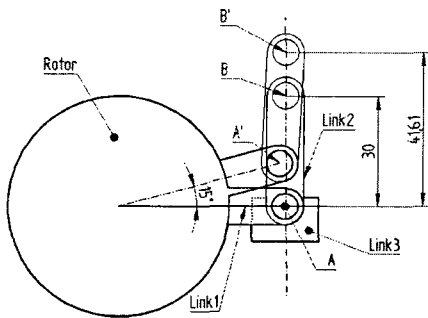


Fig. 1 Link Analysis for Rotational Stage

### 2.1 그래픽에 의한 해석

링크 2를 30 mm로 설정하였을 때의 최대작동거리는 Fig. 2에 나타내었다. 이때 로터 회전각은  $53.130^\circ$ , 링크 2와 링크 3의 각도는  $36.87^\circ$  그리고 리니어 액츄에이터의 발생 변위

는 30 mm이다. 로터가  $5^\circ$ 씩 증가할 때 리니어 액츄에이터의 변화량은 링크 2의 길이가 20 mm일 때처럼 로터의 각도가 증가함에 따라 액츄에이터의 변화량도 선형적으로 증가하다 최대작동거리 부근에서는 변화량이 감소되어 감소되었다. Fig. 3은 그래픽에 의한 해석결과를 나타낸 것으로서 로터가  $5^\circ$ 씩 증가할 때 리니어 액츄에이터의 변화량을 나타낸 것이다.

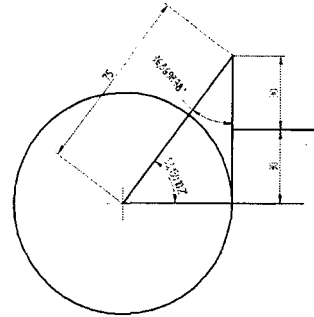


Fig. 2 Dead Center Position When the Link 2 is 30 mm

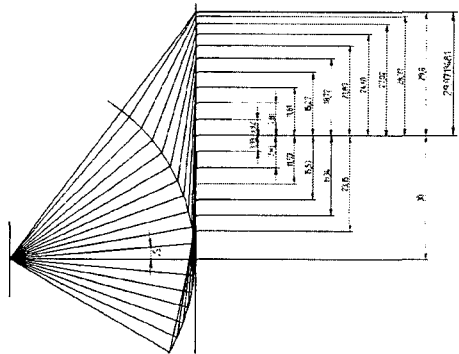


Fig. 3 Displacement of Linear Actuator according to Rotor Angle When the Link 2 is 30 mm

### 2.2 기구학적 해석

표시된 기준 좌표계의 좌표운동은 2개의 병진운동과 1개의 회전운동 성분이 필요한데 평면상의 운동이므로 좌표는  $x, y, \theta$ 이다. 기구학 해석을 위해 회전 스테이지를 모델링한 것은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 표시된 좌표계는 원점좌표계 ( $X_0, Y_0$ )와 리니어 액츄에이터를 따라 직선운동하는 링크의 좌표계 ( $X_3, Y_3$ )이다. 회전 스테이지의 기구학 방정식은 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$${}^0P = {}^0T^3P \quad (1)$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 & x \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  ${}^3P$ 는  $(X_3, Y_3)$  좌표의 위치벡터이고  ${}^0P$ 는 원점 좌표계  $(X_0, Y_0)$ 의 위치벡터이다.  ${}^0_3T$ 는  ${}^0P$ 와  ${}^3P$ 의 관계를 나타내는 변환행렬이다.  $\phi$ 는  ${}^0P$ 와  ${}^3P$ 사이의 회전각도를 나타낸다.

변환행렬  ${}^0_3T$ 는 식(3)으로 쓸 수 있다.

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \quad (3)$$

기하학적 해석에 의한 결과를 토대로 리니어 액츄에이터의 변위 변화에 따른 로터의 각도 및 각각의 조인트의 각도를 계산하기 위하여 MATLAB을 이용하였다. Fig. 5는 그래픽에 의한 해석과 기구학적 해석결과를 비교한 것이다.

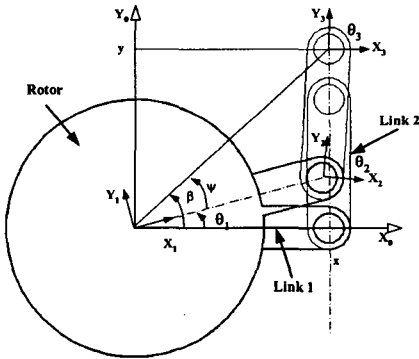


Fig. 4 Schematic Diagram for Kinematic Analysis

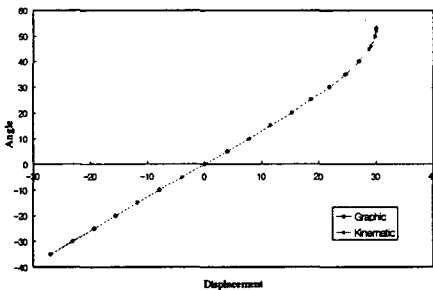


Fig. 5 Comparison between Graphical Analysis and Kinematic Analysis When the Link 2 is 30 mm

### 2.3 ADAMS를 이용한 해석

기구학에 의한 회전 스테이지의 링크해석을 검증하고자 ADAMS를 이용하여 링크해석을 수행하였다. 해석 조건은 기구학해석 조건과 동일하게 리니어 액츄에이터에 -30 mm 부터 30 mm까지 변위를 입력하였다. 해석 결과 로터의 회전각( $\theta_1$ ), 로터와 링크 2가 이루는 각도( $\theta_2$ ), 그리고 링크 2와 링크 3가 이루는 각도( $\theta_3$ )를 구할 수 있었다.

리니어 액츄에이터 직선 변위에 따른 로터의 회전각( $\theta_1$ )의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 결과에서 보는 것처럼 기구학 해석을 한 데이터와 거의 일치함을 볼 수 있다.

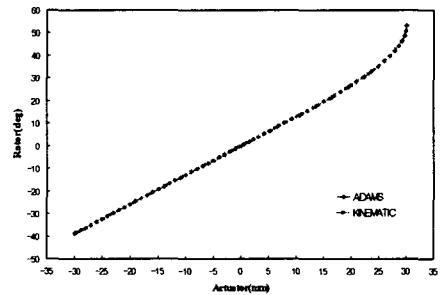


Fig. 6 Angular Displacement of Rotor for the Actuating Displacement in ADAMS Simulation

## 3. 회전스테이지 제작 및 성능평가

### 3.1 회전스테이지 제작

회전 스테이지의 구성은 리니어 액츄에이터와, 리니어 액츄에이터에서 발생하는 직선변위를 각변위로 변환시키는 3개의 링크 및 링크를 연결시키는 플렉서 조인트, 그리고 각변위가 발생하는 로터와 로터 베이스로 구성된다. 로터의 회전 중심축은 크로스롤을 사용하여 회전변위 이외에 타방향의 변위공차를 줄였다. 로터 링크 및 상부, 하부 2개의 링크는 플렉서 조인트를 사용하였는데 이는 리니어 액츄에이터에 예압을 부가할 뿐만 아니라 베어링의 공차와 반복운동 시미소 운동구간에서 발생하는 백래쉬를 감소하기 위한 것이다. Fig. 7은 제 1축 회전스테이지의 구성도를 나타낸 것이다. 제 1축이 Y 스테이지에 고정되며 제 1축 위에 2축 그리고 2축 위에 3축이 연결되어있는 직렬구조이다. 각각의 스테이지는 L자형 브래킷으로 연결된다. 제 3축에는 접촉 감지장치가 부착되며 그곳에 입·출력측 평면 도파로 소자가 부착된다. X, Y, Z 및  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ 의 복합적인 운동이 동시에 발생할 때 간섭효과로 인해 정렬하고자 하는 회전중심이 변화하지 않기 위해 평면 도파로 소자가 정렬되는 끝단에 위치하도록

록 설계하였다. Fig. 8은 회전스테이지를 광정렬 장치에 장착했을 때의 모습을 나타낸 것이다.

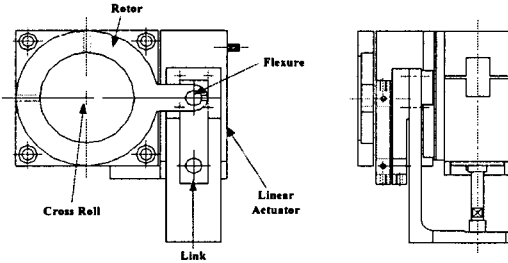


Fig. 7 Layout of 1st Axis Rotational Stage

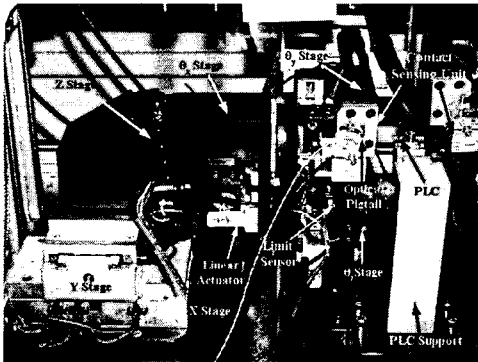


Fig. 8 Incident Channel Alignment Stage Assembly

### 3.2 성능평가

회전 스테이지의 성능평가는 회전 스테이지가 실제 광소자 정렬시 요구되는 정밀도 및 이송범위를 만족할 수 있는지를 파악하기 위해 수행되었다. 회전 스테이지의 성능 평가를 위해 분해능 및 전 이송구간에서의 추종능력 및 선형성을 측정하였다. 또한 성능 평가를 위해 구동프로그램을 작성하여 사용하였다. 분해능은 광소자 정렬시 정렬 정밀도와 직결되는 사양으로 분해능이 높을수록 높은 정렬 및 접합정밀도를 얻을 수 있으며 정렬시간도 단축시킬 수 있다. 광정렬 장치에서 요구하는 회전 스테이지 일반적인 이송능력은 약  $\pm 5^\circ$ 이다. 광도파로 소자 및 광섬유 스택을 장착할 때 장착의 편리성을 위한 공간확보를 위한 것이며 장착시 발생하는 오차 각도를 수정하기 위한 것이다.

#### 3.2.1. 구동프로그램

구동 프로그램은 Visual C++를 이용하였고 모터 컨트롤

러 및 입·출력 포트를 제어하는 내용으로 작성되었다. 프로그램내부의 명령어는 컨트롤러에서 제공되는 라이브러리 및 함수를 기준으로 작성되었다. Fig. 9는 작성된 구동 프로그램의 실행 창을 나타낸 것이다. 프로그램 구성은 리니어 액츄에이터를 구동시키는 속도 설정, 위치확인, 절대좌표 입력, 반복동작, 그리고 조그 기능이 있으며 입·출력 신호를 제어하는 기능으로 이루어진다.

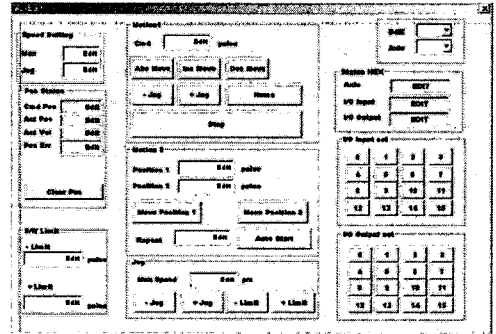


Fig. 9 Operation Program for Rotational Stage

#### 3.2.2. 분해능

회전 스테이지의 분해능을 평가하기 위하여 스테이지 중심축에서 40 mm 떨어진 곳에 40 nm의 분해능을 갖는 갭센서를 이용하여 변위를 측정한 뒤 이를 환산하여 각도를 계산하였다. 각도 환산식은 식(4)과 같다.

$$RA = \tan^{-1}(A/40) \quad (4)$$

여기서  $RA$ 는 로터 각도[°]이고,  $A$ 는 갭센서에서 검출된 변위량[mm] 값이다.

분해능을 평가하기 위한 입력 조건으로 계단함수(Stair Function) 및 삼각파 함수(Triangle Wave Function) 두 가지의 함수를 이용하였다. 계단함수는 회전 스테이지가 응답할 수 있는 최소 입력신호를 찾기 위한 것이고 삼각파는 회전 스테이지의 반복응답성을 평가하기 위한 것이다. 계단함수의 경우 컨트롤러에서 5 pulse와 10 pulse의 계단함수를 입력하였고 삼각파의 경우는  $\pm 10$ ,  $\pm 15$ ,  $\pm 20$ ,  $\pm 30$  pulse의 진폭을 갖는 함수를 프로그램에서 10회 반복 설정하여 입력하였다. Fig. 10 회전 스테이지의 분해능을 나타낸 것으로 5 펄스를 입력하였을 때의 반응을 나타낸 것이다. Fig. 11은 10펄스의 계단입력에 대한 응답 그래프를 나타낸 것이다. Fig. 12는 위의 분해능 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 보는 것처럼 제 3축과 제 4축을 제외하고는 각각의 축은 거의 일치하는 결과를 보이고 있다

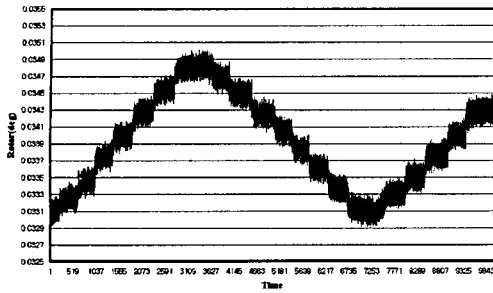


Fig. 10 Response of Rotational Stage to the 5 Pulse-Step Stair Input

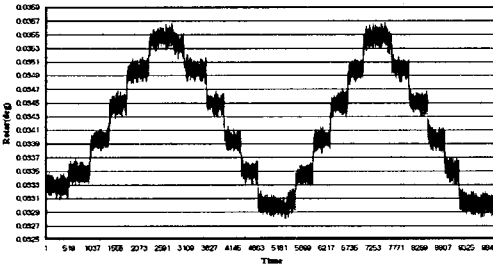


Fig. 11 Response of Rotational Stage to the 10 Pulse-Step Stair Input

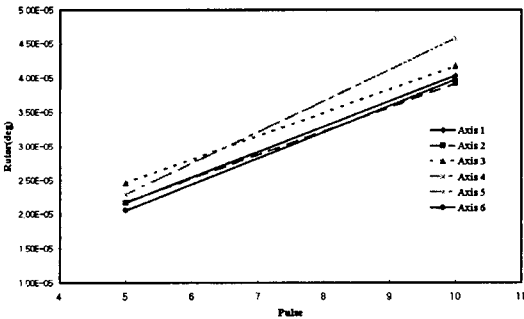


Fig. 12 Comparison of Each Axis Resolution

$\pm 10$  pulse 크기를 갖는 삼각파를 입력했을 때의 회전 스테이지의 응답은 삼각파의 형태로 출력되고 있다. 삼각파의 최대값과 최소값의 차이는 약  $4.755E-5$ 이다. Fig. 13은 삼각파 입력에 대한 회전스테이지 응답을 나타낸 것이다.  $\pm 20$  pulse 크기를 갖는 삼각파를 입력했을 때의 응답에 대한 그래프는 Fig. 14에 나타내었다. 그 때 삼각파의 최대값과 최소값의 차이는 약  $9.396E-5$ 이다.

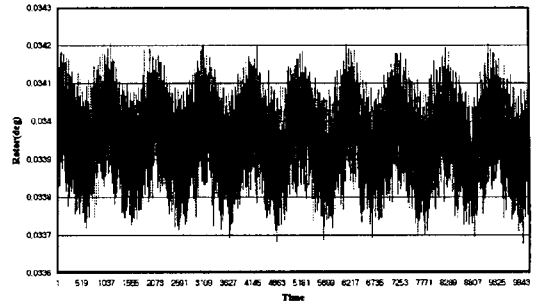


Fig. 13 Response to the  $\pm 10$  Pulse Triangle Function

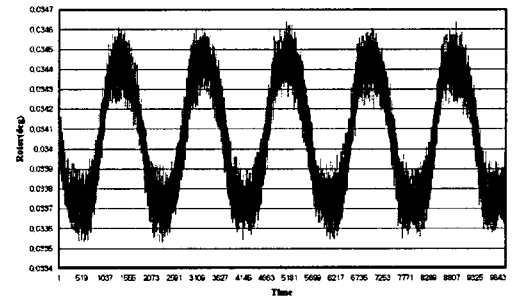


Fig. 14 Response of Rotational Stage to the  $\pm 20$  Pulse Triangle Function

### 3.2.3. 이송성능

Fig. 15은  $\pm 25,000$ 펄스의 삼각파 응답을 입력하였을 때의 응답성능을 나타낸 그래프이다. 스 변화에 따른 회전 스테이지의 각도 변화를 Fig. 16에 그래프로 나타내었다. 결과에서 보는 것처럼 6개의 스테이지 모두 선형적인 그래프 형태로 나타났다.

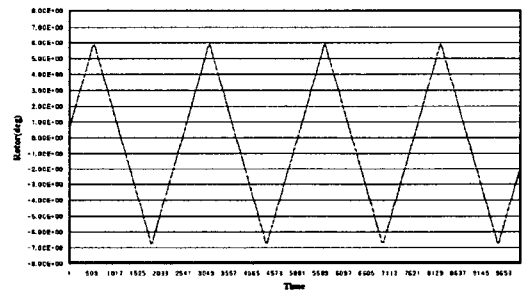


Fig. 15 Response of Rotational Stage to the  $\pm 25000$  Pulse Triangle Function

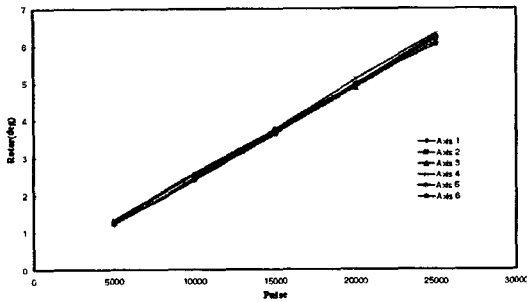


Fig. 16 Rotor Angle for the Input Pulse

Fig. 17은 6개의 축의 응답성능을 그래프로 나타낸 것으로 해석결과와 비교한 것이다. 해석결과와 일치함을 볼 수 있었다.

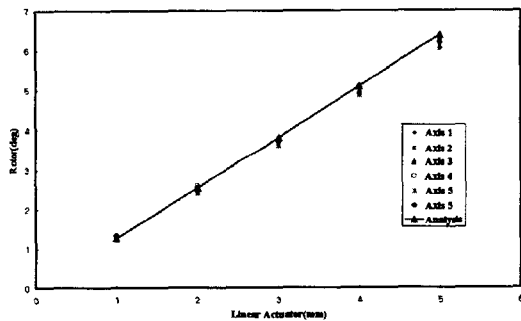


Fig. 17 Variance between Link Analysis and Measurement

#### 4. 결론

본 논문에서는 다채널 광정렬 장치를 구성하는 회전 스테이지의 메커니즘에 대해 연구하였고 이를 구동하기 위한 독립 컨트롤러 유닛을 제작하였다.

회전 스테이지의 구동 메커니즘에 대해 연구하기 위하여 링크해석을 수행하였다. 링크해석은 그래픽에 의한 해석, 기구학적 해석, ADAMS에 의한 해석 세가지 방법으로 해석하고 그 해석 결과를 비교하여 링크 설계의 정확성을 검증하였다. 또한 가상실험을 통해 검증된 설계 데이터를 바탕으로 입, 출력축 회전 스테이지 2조를 제작하고 성능 평가를 수행하였다. 회전 스테이지의 성능 평가를 위해 분해능 및 전 이송구간에서의 추종능력 및 선형성을 측정하였다. 회전 스테이지 6개의 각축의 분해능을 측정값들을 축별로 정리한 결과 2.463719E-5°이하임을 확인하였다. 미소 각변위 영역에서

삼각파 함수에 대한 회전 스테이지의 응답에 대한 결과는  $\pm 10$  pulse,  $\pm 20$  pulse, 그리고  $\pm 30$  pulse의 삼각파 입력에 대해 6축 모두 우수한 추종 성능을 보였다. 회전 스테이지의 이송 추종 성능을 평가하기 위하여 포텐서미터로 회전각을 측정하였다. 회전 스테이지로 입력된 함수는  $\pm 5000$ 에서  $\pm 25000$  pulse의 진폭을 갖는 삼각파로  $\pm 5000$  pulse 단위로 증가시켰다. 측정결과 6개의 스테이지 모두 삼각파에 대한 추종능력이 우수함을 알 수 있었다. 또한 펄스 변화에 따른 각도변화관계도 6개의 스테이지 모두 선형적인 결과를 나타내었고 링크해석 결과와 실제 측정 결과를 비교할 때도 링크해석과 큰 차이가 없음을 확인하였다.

#### 참고 문헌

1. Goldenberg, A. A., and Bezerghi, A., 1985, "A Preview Approach to Force Control of Robot Manipulators," Mechanism and Machine Theory, Vol. 20, No. 5, pp. 449~464.
2. 김정두, 광통신 소자 기술 현황, 2000, KISTI S&T Information Analysis.
3. H. Jang, K. Shin, H. Kim, K. Lee, K. Park, and Y. Chung, 1997, "A Cold-Start WDM System Using a Synchronized Etalon Filter", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 9, NO. 3, pp. 383-385.
4. K. Liu, B. Wilson, and J. Wei, 2000, "A Scheduling Application for WDM Networks", IEEE JOURNAL VOL. 18, NO. 10, pp. 425-437.
5. Y. Chung, L. Clark, and C. Fan, 1995, "Standardization of Optical Frequencies for WDM Networking Applications", Proc. SPIE, vol. 2378, pp. 230-235.
6. 심보성, 김재국, 장원석, 2002, "UV 레이저를 이용한 직접 묘화기술 개발" 제 1회 고기능 초미세 마이크로부품 기술개발 Workshop, pp. 1-5.