

## 예인원치 케이블 권선정렬 시스템의 제어에 관한 연구

### A Study on the Control of a Cable Spooling System for Towed Array Handling Winch

조 상 훈\*  
Sang-Hoon Cho

양 승 윤\*  
Seung-Yun Yang

정 찬 희\*  
Chan-Hee Jung

박 래 석\*  
Rae-Seok Park

#### ABSTRACT

The purpose of this paper is to study on the control of a self-activated cable spooling system for towed array handling winch using a hydraulic servo driving unit and a cable position measurement mechanism. To design a controller of the cable spooling system, it is carried out the analysis of the hydraulic servo system and derived the relationship of a parameters through the control theory. Also, it is derived from the control specifications using settling rotation angle and spooling safety ratio proposed to the analysis for the behavior of the system. The cable spooling system is tested and evaluated to validate the performance of the controller.

주요기술용어 : Cable Spooling System(케이블 권선정렬 시스템), Settling Rotation Angle(정정회전각), Spooling Safety Ratio(정정안전율)

#### 1. 서 론

예인원치는 예인케이블을 수중으로 투하하여 예인하거나, 반대로 수중의 케이블을 인양하여 윈치드럼에 저장하는 역할을 한다. 이러한 예인원치의 운용성 증대와 드럼크기의 최소화를 위하여 케이블을 드럼에 가지런히 정렬하는 기능을 갖는 케이블 권선정렬 시스템이 필요하다.

특히, 케이블이 드럼상에 비정렬로 감기게 되면 적

층체적이 증가할 뿐만아니라 드럼회전으로 인해 케이블은 느슨하게 아래로 처져 함상바닥과 접촉하게 된다. 또한, 투하시 비정렬로 된 케이블은 적층간섭에 의해 순간적으로 발생하는 큰 장력을 받게 된다. 그러므로, 윈치에는 케이블의 손상을 방지하기 위하여 드럼상에 케이블을 중첩 또는 건너뛴없이 가지런히 정렬해주는 것은 매우 중요하다.

케이블 권선정렬 시스템은 드럼중동 구동형<sup>(1)</sup>과 자체구동형<sup>(2)</sup>으로 구분되며, 근래 외국에서는 초기 위치 설정 변경과 같은 보정작업이 어려운 드럼중동 구동형보다는 드럼상의 케이블 위치에 따라 좌우로 연동

\* 국방과학연구소 제2체계개발본부

하여 융통성있게 케이블을 정렬해주는 자체구동형을 사용하는 추세이다. 따라서 본 논문에서는 전기적인 구동장치에 비해 자중당 출력비가 높고 응답속도가 빠른 유압-서보 구동방식<sup>(3)</sup>으로 드럼과 케이블 권선 정렬 시스템 사이의 케이블의 상대위치를 추종하는 방법을 사용하여 자체구동형 케이블 권선정렬 시스템을 설계하였다<sup>(4)</sup>.

또한, 드럼상의 케이블 위치와 동일한 선상에 놓이도록 이송대의 위치를 이동해주는 제어기를 설계하기 위하여 유압-서보 플랜트를 분석하고 제어이론을 사용하여 제어변수들간의 관계를 파악하였으며, 시스템의 동특성 분석으로부터 고안한 '정정회전각'과 '정렬 안전율'을 이용하여 제어사양을 도출하는 방법을 제시하였다.

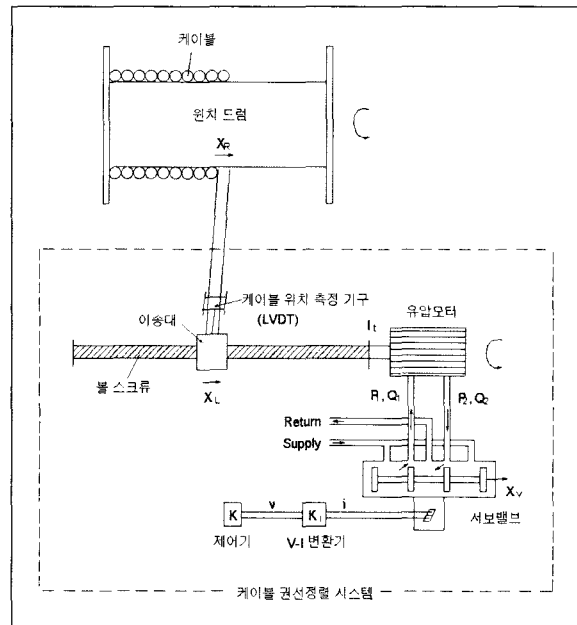
이렇게 설계된 자체구동형 케이블 권선정렬 시스템의 제어기는 전산모의실험을 통하여 그 성능을 분석하였고, 실제 실험을 통하여 우수한 성능을 입증하였다.

## 2. 시스템 모델링

### 2.1 케이블 권선정렬 시스템 모델링

본 연구 대상인 케이블 권선정렬 시스템은 Fig.1에서 보는 바와 같이 제어기와 V-I 변환기인 전자제어부, 유압 요소인 서보밸브-유압모터-부하(볼 스크류 및 이송대)의 결합형태로 된 플랜트, 그리고 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 드럼과 이송대 간에 케이블의 상대위치오차를 측정하는 케이블 위치 측정 기구로 구성된다.

드럼의 회전으로 인하여 드럼과 이송대 간에는 케이블의 상대적인 위치오차가 발생하게 되고, 이렇게 발생한 상대 위치오차는 LVDT의 오차전압으로 나타



[Fig. 1] Configuration of the Cable Spooling System

난다. 이 오차전압을 입력으로한 제어기의 출력전압은 V-I변환기를 거쳐 전류로 변환되고, 변환된 전류는 서보밸브의 스톱 이동변위를 결정한다. 서보밸브에 공급되는 유량은 스톱의 변위에 의해 조절되며, 유압모터로 유입되어 볼 스크류를 회전시킨다. 이로 인하여 이송대가 이동하므로써 케이블의 상대위치오차를 줄여 드럼상에 케이블을 가지런히 정렬시키는 폐루프 제어방식으로 하였다.

상대 위치오차를 측정하는 LVDT의 출력전압  $V_C$ (volts)는

$$V_C = K_L (X_R - X_L) \quad (1)$$

으로 표현된다. 여기에서  $K_L$ 은 LVDT의 이득 (volts/cm)이며,  $X_R$ 과  $X_L$ 은 각각 드럼상과 케이블 권선정렬 시스템상의 케이블 위치(cm)이다. 또한, 서보밸브를 작동시키는 입력전류  $I_C$ (mA)는

$$I_C = K_i K V_C \quad (2)$$

으로 표현된다. 여기에서  $K_i$ 와  $K$ 는 각각 V-I 변환기와 제어기의 이득이다.

서보밸브의 특성식은 간소화되어진 1차 함수를 사용하였다<sup>(5)</sup>. 따라서 전달함수는

$$\frac{x_v}{I_C} = \frac{K_{SV}}{T_{SV} s + 1} \quad (3)$$

으로 표현되며,  $x_v$ ,  $K_{SV}$  및  $T_{SV}$ 는 각각 서보밸브의 스프링변위(cm), 이득(cm/mA) 및 시정수(sec)를 나타낸다.

유압 시스템의 선형해석<sup>(6)</sup>에 의해 서보밸브-유압모터-부하의 조합에 대한 전달함수를 표현하면

$$\theta_m = \frac{\frac{K_q}{D_m} x_v - \frac{K_{ce}}{D_m^2} (1 + \frac{V_t}{4\beta_c K_{ce}} s) T_L}{s (\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1)} \quad (4)$$

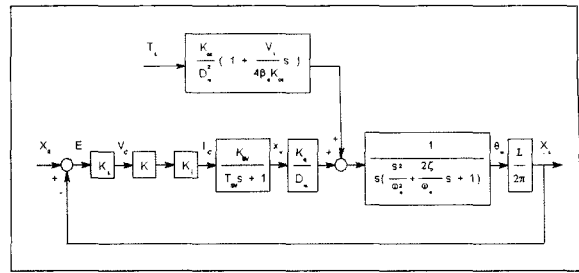
이다. 여기에서  $\omega_n$ ,  $\zeta$  및  $K_{ce}$ 는 유압모터의 비감쇠 고유주파수, 감쇠비 및 밸브-모터 전체 누설계수이며,  $T_L$ 은 케이블 권선정렬 시스템에 작용하는 부하토크이다.

또한, 볼 스크류상에 있는 이송대의 이동변위는

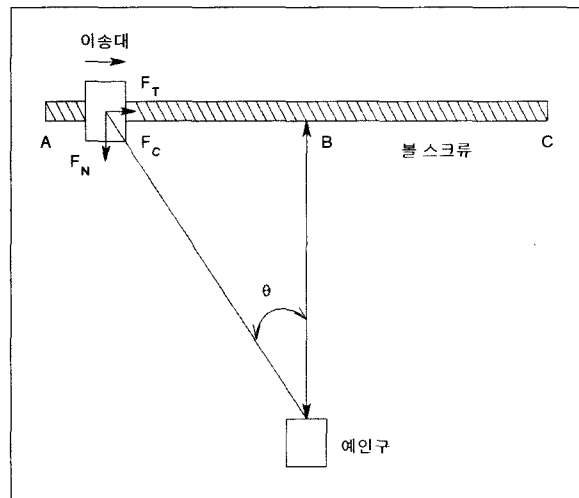
$$X_L = \frac{L}{2\pi} \theta_m \quad (5)$$

로써,  $L$ 은 볼 스크류의 리드(cm)이며,  $\theta_m$ 은 유압모터의 회전각이다.

식(1)~(5)를 종합하여 케이블 권선정렬 시스템의 블록선도를 나타내면 Fig. 2와 같다.



[Fig. 2] Block Diagram of the Cable Spooling System



[Fig. 3] Load due to Cable Tension

## 2.2 부하의 모델링

케이블 권선정렬 시스템의 구동 부하토크<sup>(7)</sup>  $T_L$ (kgf-cm)은 식(6)과 같이 표현되며, 케이블장력 및 이송대의 중량에 의한 축하중  $F$ (kgf)과 볼 스크류의 예압하중  $F_{ao}$ (kgf)에 의해 결정된다.

$$T_L = \frac{FL}{2\pi\eta} + k \frac{F_{ao} L}{2\pi} \quad (6)$$

케이블장력에 의한 이송대의 부하는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 수평성분의 힘  $F_T$ 와 수직성분의 힘  $F_N$ 으로 구분되므로 케이블장력  $F_C$ 와 이송대의 중량  $W$ 에 의한 축하중  $F$ 는

$$F = F_T + \mu(F_N + W) \quad (7)$$

으로 표현된다. 여기에서  $F_T$ 와  $F_N$ 은 각각  $F_C \sin \theta$ ,  $F_C \cos \theta$ 이며,  $\theta$ 는 예인구와 이송대의 위치에 따른 각도이다.

케이블장력이 일정하더라도 이송대의 위치에 따라 수평성분의 힘은 변하며, 이 힘은 이송대의 이동방향과 일치한 경우와 그 방향이 서로 반대인 경우로 구분된다. 그 방향이 일치한 경우에는 이송대의 이동을 도와주며, 그 방향이 서로 반대인 경우에는 이송대의 이동을 방해하는 역할을 한다.

### 3. 케이블 권선정렬 제어기 설계

#### 3.1 제어변수들의 관계식 유도

먼저, 제어대상인 유압-서보 플랜트를 분석하기 위해 전달함수  $G_{hyd}(s)$ 를 구하면

$$G_{hyd}(s) = \frac{K_{SV} K_q}{D_m s (T_{SV} s + 1) \left( \frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1 \right)} \quad (8)$$

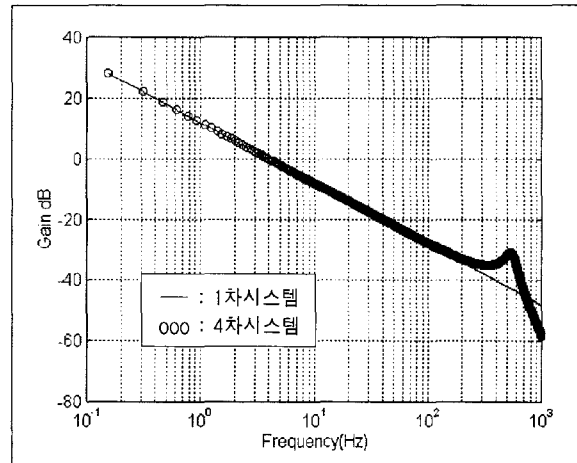
과 같이 4차 시스템으로 표현된다.

식(8)로부터 극점을 구하면

$$s_1 = 0, \quad s_2 = -\frac{1}{T_{SV}}, \quad s_{3,4} = -\zeta \omega_n \pm j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (9)$$

이다. 그런데  $s_2$ 와  $s_{3,4}$ 의 실수부는 41~667의 값을 가지므로 우세극(dominant pole)은  $s_1$ 이다.

따라서 식(8)을



[Fig. 4] Bode plot for Hydraulic Plant

$$G_{hyd}(s) = \frac{K_{SV} K_q}{D_m s} \quad (10)$$

와 같이 1차 시스템으로 감소화할 수 있다.

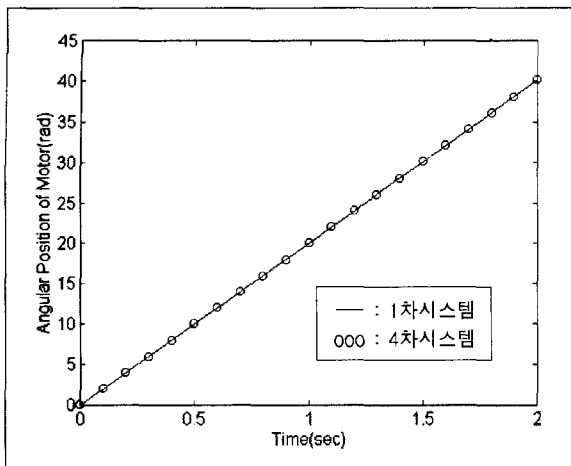
이에 대한 타당성을 검토하기 위하여 주파수 영역 해석을 수행한 결과, Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 200Hz이하의 저주파수 영역에서는 1차 시스템과 거의 일치하였다.

일반적으로 유압-서보 플랜트는 저주파 응답을 나타내는 시스템이며<sup>(8)</sup>, 본 연구에서도 서보밸브에 최대 입력전류 8mA를 인가하였을 때 유압-서보 플랜트의 출력 시간응답특성을 살펴보았다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 본래의 4차 시스템을 1차 시스템으로 차수감소화가 시간영역 해석상으로도 타당함을 알 수 있었다.

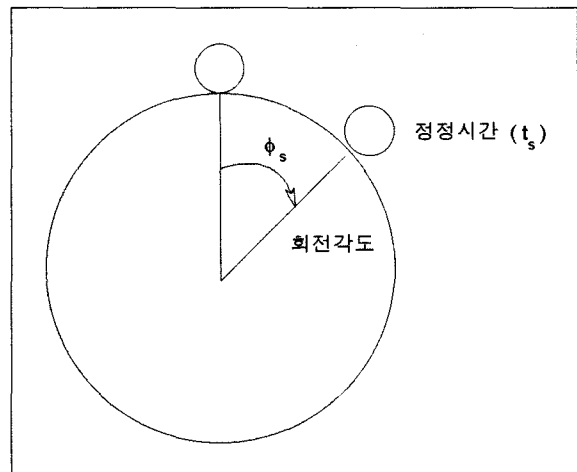
따라서, 부하의 영향을 무시한 비례제어 시스템의 개루프 전달함수  $G_{open}(s)$ 는

$$G_{open}(s) = \frac{1}{\tau s} \quad (11)$$

과 같이 1차 시스템으로 표현되며, 여기서  $\tau$ 는 시정



[Fig. 5] Output Time Response for Hydraulic Plant



[Fig. 6] Time according to Settling Rotation Angle

수로서  $\frac{2\pi D_m}{K_L K_i K_{sv} K_q L}$  이다.

식(11)과 같은 1차 시스템일 경우에 페루프 시스템의 정정시간  $t_s (\pm 2\%)$ 은 시정수  $\tau$ 의 약 4배이다. 이로부터 제어기의 이득과 정정시간 사이의 관계식은

$$K = \frac{8\pi D_m}{K_L K_i K_{sv} K_q L} \left( \frac{1}{t_s} \right) \quad (12)$$

로 표현되며, 여기서 K는 제어기의 이득이다.

시스템의 기준입력이 경사함수이고 개루프 전달함수의 형태가 1차형이므로 정상상태에서도 드럼과 케이블 권선정렬 시스템 사이의 상대위치오차는 항상 존재한다. 또한, 상대위치오차는 이송대에 작용하는 케이블 장력, 이송대의 자중과 같은 부하에 의해서도 발생하게 된다. 그러므로 Fig. 2로부터 부하의 영향을 고려한 비례제어 시스템의 오차함수를 구하고, 최종치 이론을 적용하여 제어기의 이득과 상대위치오차 사이의 관계식을 구하면

$$K = \frac{1}{K_L K_i K_{sv} K_q L D_m} \times \left( 2\pi D_m^2 \frac{X_R}{e_{ss}} - K_{ce} L \frac{T_L}{e_{ss}} \right) \quad (13)$$

이며, 여기서  $X_R$ ,  $T_L$ ,  $e_{ss}$ 는 각각 기준입력, 부하, 상대위치오차이다.

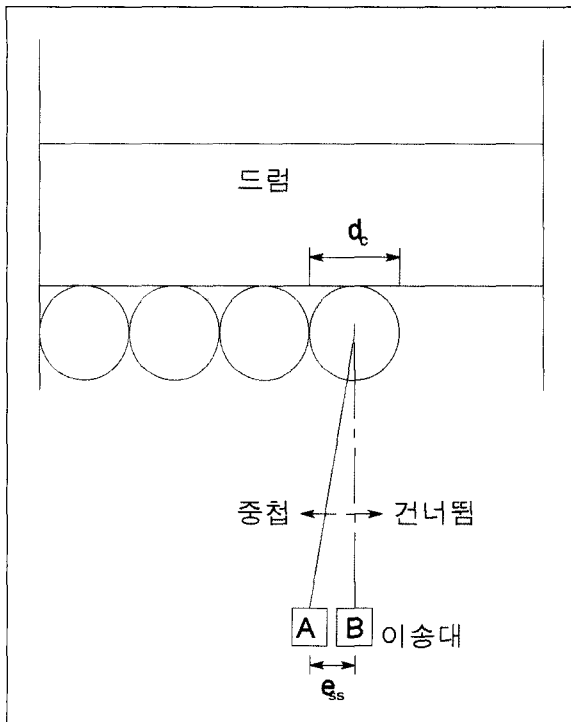
시스템의 제어사양인 정정시간과 상대위치오차의 값이 주어지면, 식(12)와 (13)으로부터 제어기의 이득을 구할 수 있다. 따라서, 제어사양을 도출하기 위하여 시스템의 동특성을 고찰하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 드럼이 회전을 시작한 후 몇도이내에 케이블 권선정렬 시스템이 정상상태에 도달해야 하는지를 결정할 수 있다. 이 때의 드럼이 회전한 각도를 정정회전각  $\phi_s$  (deg)이라 하고

$$\phi_s = \frac{t_s}{t_d} \times 360^\circ \quad (14)$$

과 같이 표현되며, 여기서  $t_d$ 는 드럼 1회전시 걸리는 시간(sec)이다.

식(14)를 식(12)에 대입하여 제어기의 이득과 정정



[Fig. 7] Cable Spooling State according to Carriage Position

회전각 사이의 관계식을 구하면

$$K = \frac{8\pi D_m}{K_L K_i K_{SV} K_q L} \left( \frac{360^\circ}{t_d \times \phi_s} \right) \quad (15)$$

Fig. 7에서 보는 바와 같이 이송대의 위치가 점B에 가까이 있을수록 상대위치오차가 적어져 케이블은 더욱 더 가지런히 정렬되며, 이송대의 위치가 점A의 왼쪽방향으로 벗어나 상대위치오차가 케이블의 반경보다 커지면 케이블은 중첩하기 시작한다. 따라서, 케이블이 드럼상에 가지런히 정렬되는 척도를 정렬안전율  $E_s$  (%)라고 하며

$$E_s = \left( 1 - \frac{2|e_{ss}|}{d_c} \right) \times 100 \quad (16)$$

와 같이 표현되며, 여기서  $d_c$ 는 케이블의 직경이다. 식(13)과 (16)으로부터 제어기의 이득과 정렬안전율 사이의 관계식을 구하면

$$K = \frac{200}{K_L K_i K_{SV} K_q L D_m d_c} \times \left[ 2\pi D_m^2 \left( \frac{X_R}{100 - E_s} \right) - K_{ce} L \left( \frac{T_L}{100 - E_s} \right) \right] \quad (17)$$

이다.

### 3.2 정정회전각과 정렬안전율을 이용한 제어사양 도출

근래적을 통하여 비례제어 시스템에 적용할 수 있는 제어기의 이득을 구하면

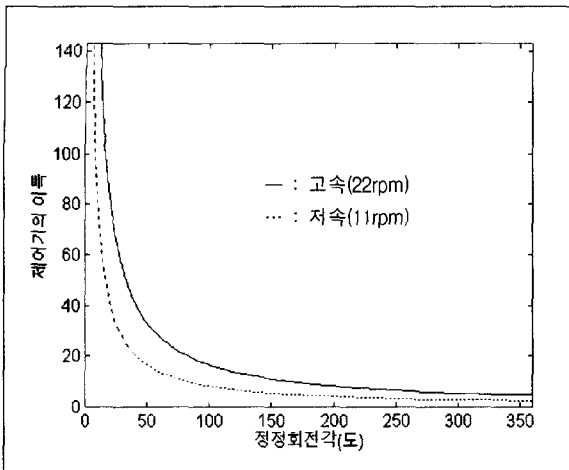
$$0 < K \leq 285 \quad (18)$$

이다. 그러나, 한계치( $K_C=285$ )에 가까운 제어기의 이득을 적용하면 시스템은 심한 진동이 발생하여 시스템의 요구성능에 부적절한 동작을 하게 된다. 그러므로 지글러-니콜스 조정 방법 (Ziegler-Nichols Turning)으로부터 제어기의 이득은

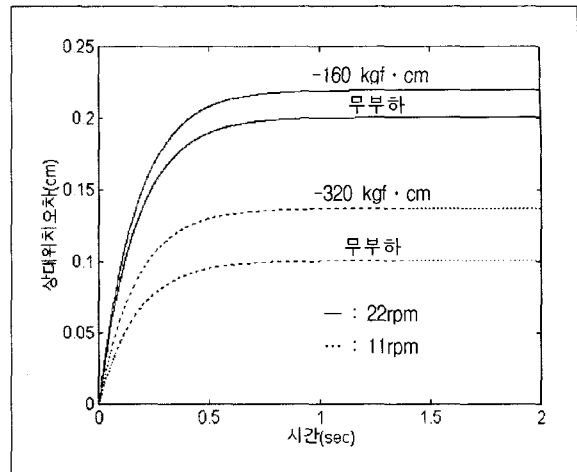
$$0 < K \leq 142.5 \quad (19)$$

이다.

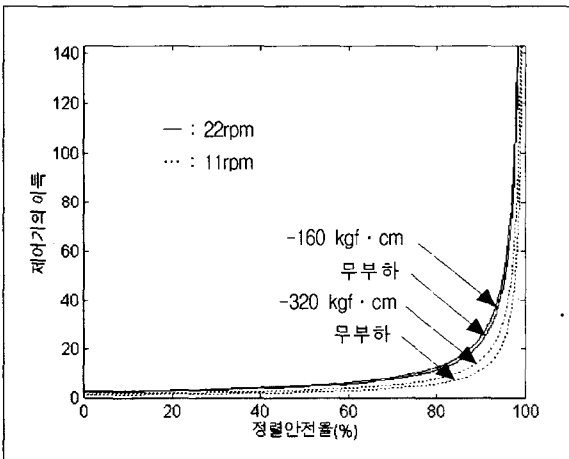
식(19)를 식(15),(17)에 대입하여 제어기의 이득에 따른 정정회전각과 정렬안전율을 각각 Fig. 8과 9에 나타내어 제어기의 이득을 결정을 할 수 있다. 본 시스템의 설계목표치를 정정회전각  $90^\circ$  (정정시간: 고속구동시 0.683초, 저속구동시 1.366초), 정렬안전율80% (상대위치오차: 0.314cm)이내로 설정한다면, 비례제어



[Fig. 8] Relation between Settling Angle and Control Gain



[Fig. 10] System Response at K=18



[Fig. 9] Relation between Spooling Safety Ratio and Control Gain

시스템에 적용할 수 있는 제어기의 최소 이득값은 18이다.

위에서 정한 제어기의 이득에 대한 응답특성을 관찰하기 위해 시뮬레이션을 수행한 결과, Fig. 10에서 보는 바와 같이 상대위치오차는 0.683초이후에 일정한 값으로 수렴하며 고속구동(22rpm)시 최대부하인 경우에 최대 0.22cm이므로 설계사양에 만족함을 알 수 있

었다.

상대위치오차를 줄여 제어성능을 향상시키기 위한 비례-적분제어기 설계목표치는 정정회전각 90° 이내에 정렬안전율 100%(상대위치오차: 0)로 설정하였다.

Fig. 2의 블록선도에 있는 제어기의 이득을 K 대신에  $K_P + K_I/s$ 를 대입하고 전체 개루프 전달함수를 구하면

$$G_{open}(s) = \frac{26497073.83 K_P (s + \alpha)}{s^2 (s^2 + 82.711s + 124660.563)(s + 666.67)} \quad (20)$$

이며, 여기서  $\alpha$ 는 비례-적분제어기의 이득비로써  $K_I/K_P$ 이다. 식(20)에서 보는 바와 같이 비례제어 시스템에 비해  $s=0$ 에 위치한 극점이 추가되어 상대위치오차는 0이 되나,  $s=-\alpha$ 에 위치한 영점이 추가되어 비례제어 시스템보다는 다소 불안정하다.

식(20)으로부터 페루프의 특성식을 구하고 루우드-홀비쯔(Routh-Hurwitz) 판별법을 사용하여 시스템에

적용할 비례-적분제어의 이득비를 구하면

$$0 < \alpha < 749.381 \quad (21)$$

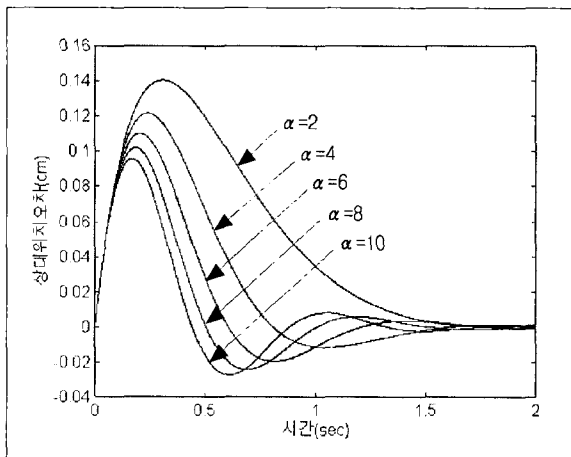
이다. 또한, 비례-적분제어 시스템 설계시 영점은 원점 부근에 있어야 하고, 가장 중요 극점과는 멀리 떨어진 위치에 있어야 한다<sup>9)</sup>. 따라서, 시스템의 가장 중요 극점이  $s = -41.356 \pm 350.64i$  이므로 비례-적분제어의 이득비는

$$\alpha \ll 41.356 \quad (22)$$

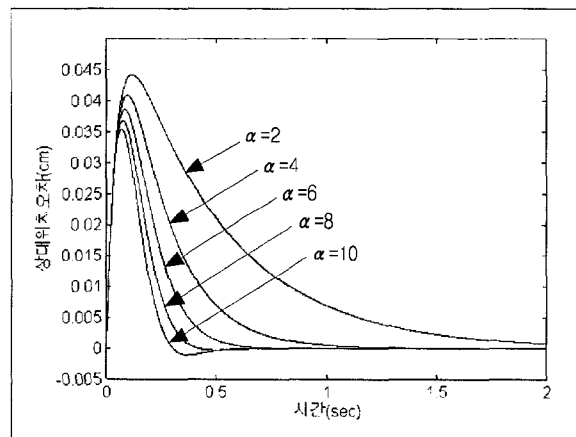
을 만족하여야 한다.

본 시스템의 설계목표치에 합당한 비례제어의 이득  $K_p$ 와 비례-적분제어의 이득비  $\alpha$ 를 결정하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 먼저 부하의 영향을 무시하고 드럼구동이 고속(22rpm)인 경우에 대해 시스템의 응답특성을 고찰하였다. Fig. 11~13에서 보는 바와 같이  $K_p$ 가 18인 경우에는 설계목표치를 만족하는  $\alpha$ 는 존재하지 않으며,  $K_p$ 가 70인 경우부터

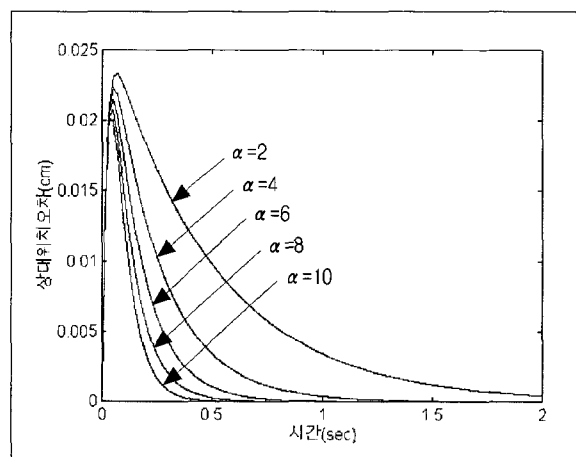
설계목표치를 만족하는  $\alpha$ 가 존재하기 시작하였다. 그리고 일반적으로  $\alpha$ 가 크면 상대위치오차는 적어지나, 어느정도 한계치에 벗어나면 상대위치오차는 오히려 값을 가지게 된다. 이는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 이송대의 위치가 드럼상의 케이블 위치보다 앞에 있으므로 케이블은 건너뛰게 된다. 또한,  $K_p$ 가 140에 가까워지면 이송대가 약간씩 진동하므로 시스템이 불안정하게 될 수 있다. 따라서, 본 시스템에 적용할  $K_p$ 와  $\alpha$ 는 각각 70, 6으로 정하였다.



[Fig. 11] System Response at K=18 according to  $\alpha$

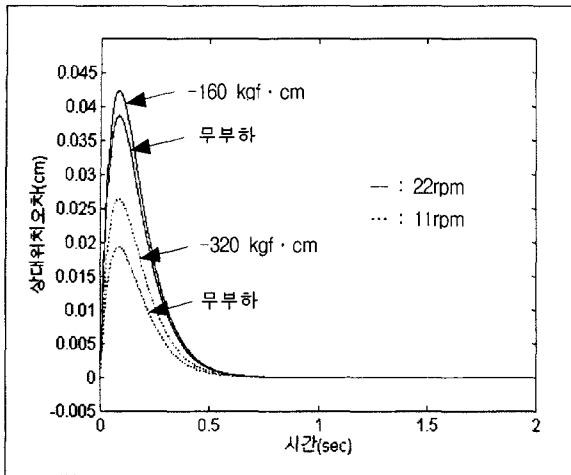


[Fig. 12] System Response at K=70 according to  $\alpha$



[Fig. 13] System Response at K=142 according to  $\alpha$





[Fig. 14] System Response at  $K=70, \alpha=6$

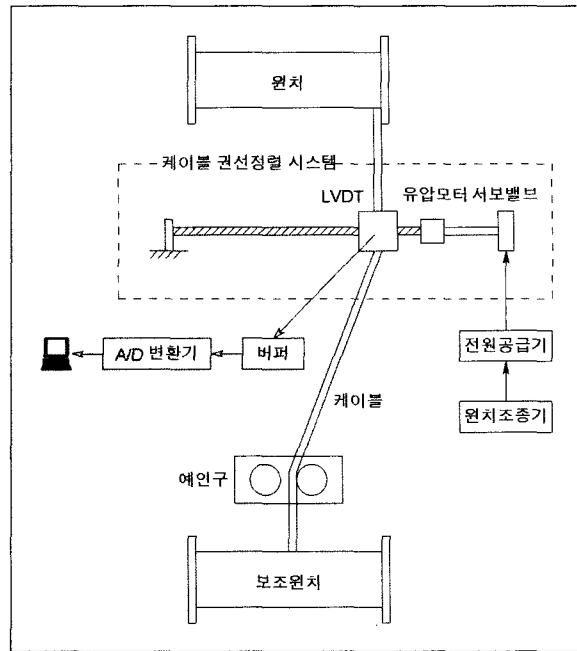
위에서 정한 값이 부하의 영향을 고려한 경우에도 응답특성을 고찰하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 14는 드럼구동 모드별 최대부하가 작용하는 경우에 대한 응답결과를 나타낸 것이며, 상대위치오차는 드럼속도 및 부하에 따라 초기에는 다소 차이가 있지만 0.6초이후에는 거의 0으로 수렴하므로 시스템의 설계목표치에 만족됨을 알 수 있다.

#### 4. 실험 및 결과고찰

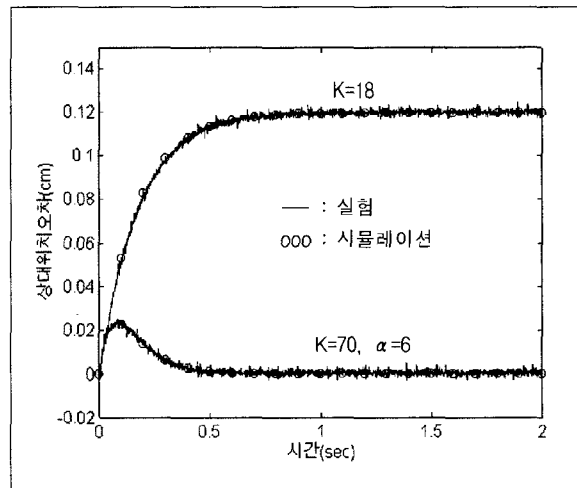
설계된 케이블 권선정렬 제어 시스템의 응답특성을 고찰하기 위하여 실험장치를 Fig. 15와 같이 구성하여 실험을 실시하였다.

Fig. 16과 17은 케이블장력이 25kN인 상태에서 이송대의 이동방향을 최대로 방해하는 경우(Fig. 3의 점 C), 저속구동과 고속구동에 대한 응답특성을 각각 나타낸 것이다.

상대위치오차를 줄이기 위해 비례-적분제어 시스템을 설계하여 응답특성을 고찰한 결과, 상대위치오차는

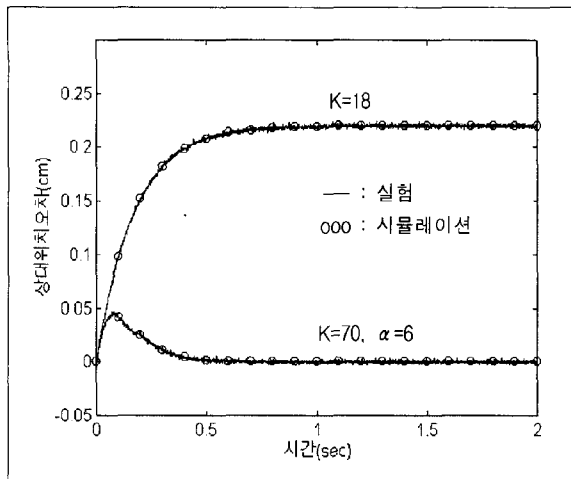


[Fig. 15] Experimental Setup



[Fig. 16] Test Results at Low Speed (11rpm)

드럼속도 및 부하에 따라 초기에는 다소 차이가 있지만 0.6초이후에는 거의 0으로 수렴하므로 시스템의 설계목표치에 만족되었으며, 상대위치오차의 축소측면에서 양호한 성능을 나타내었다.



[Fig. 17] Test Results at High Speed(22rpm)

### 5. 결론

유압-서보 구동장치와 상대위치 추종방법을 이용한 자체구동형 케이블 권선정렬 시스템의 제어기 설계를 위하여 먼저 유압-서보 플랜트를 분석하여 4차 시스템에서 1차 시스템으로 간소화하였으며, 제어이론을 사용하여 비례제어 시스템의 제어변수들간의 관계를 분석하였다. 또한, 시스템의 동특성 분석으로부터 고안한 정정회전각과 정렬안전을 이용하여 비례제어 시스템을 설계하는 방법을 제시하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통해 이에 대한 타당성을 입증하였다.

설계된 케이블 권선정렬 시스템은 드럼상에 케이블의 중첩이나 건너뺀없이 가지런한 정렬상태를 나타내었으며, 케이블 장력에 의한 부하에서도 우수한 추종 성능을 나타내었다.

### 참 고 문 헌

1. Allied Power Products Inc, "Manual for The Winch & Hoist Specialists(Model 540 Winch)," Allied Power Products Inc, 1992.
2. Thomson Sintra, "Technical Manual for WHE (Winch and Handling Equipment)," Thomson Sintra, 1993.
3. Esposito, A., "Fluid Power with Applications," 3rd, Prentice-Hall, 1994.
4. 조상훈, 박래석, 우성우, "함상용 원치 자체구동형 케이블 정렬 시스템 개발," 한국정밀공학회, 1997
5. Thayer, W.J., "Transfer Functions for Moog Servovalves," Moog Technical Bulletin 103, Servocontrols, Inc., 1965.
6. Merritt, H.E., "Hydraulic Control System," John Wiley and Sons, Inc, pp132~173, 1967.
7. THK, Inc, "Technical Spec. for BNF Type Lead Screw," THK, Inc(일본), 1990
8. Kochenburger, R.J., "A Frequency Response Method for Analyzing and Synthesizing Contactor Servomechanism," AIEE Trans., pp270~283, 1950.
9. Willems, J.C. and Mitter, S.K., "Controllability, Observability, Pole Allocation, and State Reconstruction," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-16, pp.582~595, Dec.1971.