

함상용 윈치 자체구동형 케이블 정렬 시스템 개발

조상훈*, 박래석*, 우성우*

Development of a Self-Activated Cable Spooling System for Seaborne Winch

S. H. Cho*, R. S. Park*, S. W. Woo*

ABSTRACT

In this paper, a self-activated cable spooling system for seaborne winch is developed. The system consists of a hydraulic servo driving unit and a cable position measurement mechanism. To realize the cable spooling system, it is carried out the mathematical modelling of the system and designed the proportional controller through the system analysis and the simulation. The cable spooling system is tested and evaluated to validate the performance of the controller. The test results shows a good traceability of the cable spooling system under disturbance of cable tension.

Key Words : Seaborne Winch(함상용 윈치), Self-Activated Cable Spooling System(자체구동형 케이블 정렬 시스템), Hydraulic Servo Driving Unit(유압 서보 구동 장치), Cable Position Measurement Mechanism (케이블 위치 측정 기구)

1. 서론

해양환경에 대한 자료를 수집하기 위하여 예인체를 운송하는 함상용 윈치는 Fig.1에서 보는 바와 같이 함정의 후갑판에 탑재되어 예인체의 예인심도를 유지하고 수집된 자료를 함상으로 전송해주는 예인케이블(이하「케이블」이라 함)을 필요에 따라 수중으로 투하하여 예인하거나, 반대로 수중의 케이블을 인양하여 윈치드럼에 저장하는 역할을 한다.

윈치의 구동부하는 주로 예인 및 인양시 케이블에 작용하는 항력(drag force)과 물수체의 무게에 따른 케이블

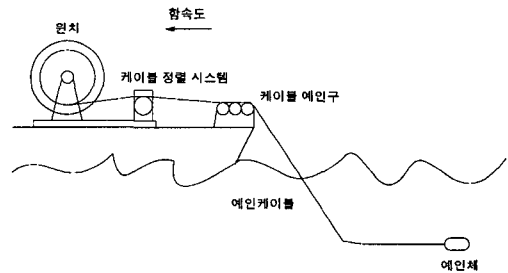


Fig.1 The Operating Diagram for Towed Body

장력에 의해 결정되며, 케이블장력은 함정의 속도, 케이블의 길이 등에 따라 항상 변하는 특성을 가진다. 이에 따

* 국방과학연구소. 2-수탐-2

라, 케이블에 작용하는 장력이 작을 경우에는 인양소요시간을 단축하기 위하여 드럼을 고속구동하게 하는 2속도 구동방식을 사용한다.

본 연구에서 사용한 원치는 Table 1에 나타난 바와 같이 고풍력 유압모터에 의해 구동되며, 최대 견인력(케이블장력)의 절반정도가 작용할 때에는 드럼을 고속구동할 수 있도록 하였다.

Table 1. Specification of Winch and Cable

구분	사양	비고
원치	구동원	유압모터구동
	최대 견인력	50 kN
	드럼 회전수	저속 : 11 rpm 고속 : 22 rpm
케이블	직경	31.4 mm
	길이	1,000 m

또한, 케이블이 권취되는 원치의 운용성을 좋게하고, 비정렬로 인한 적층체적 증가를 방지하여 드럼의 크기를 최소화하도록 하며, 특히, 투하 및 인양시 구조물과의 마찰로 인한 케이블의 손상을 방지하기 위해서는 드럼상의 케이블 위치와 상호연동하여 케이블을 드럼에 가지런히 정렬하는 기능을 갖는 케이블 정렬 시스템이 필요하다.

일반적으로 케이블 정렬 시스템은 감속기, 체인, 다이아몬드 스크류 등으로 구성된 기계적인 장치⁽¹⁾로써 드럼 구동과 직결하여 구동되는 '드럼 종동 구동형'이며, 이와 같은 케이블 정렬 시스템은 기계적으로 드럼과 이미 구속된 조건하에서 상호연동하므로 초기 위치설정 변경과 같은 보정작업을 할 경우에는 상당히 번거롭다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 근래 외국에서는 드럼구동과 무관한 '자체구동형' 케이블 정렬 시스템을 적용하는 추세⁽²⁾이다. 따라서, 본 연구에서는 전기적인 구동 장치에 비해 자중당 출력비(power to weight ratio)가 높고 응답속도가 빠른 유압-서보 구동방식^(3,4)으로 하고, 드럼과 케이블 정렬 시스템 사이의 케이블의 상대 위치오차를 추종하는 방법을 사용하여 자체구동형 케이블 정렬 시스템을 구현하였다.

2. 시스템 모델링

2.1. 케이블 정렬 시스템 모델링

본 연구 대상인 케이블 정렬 시스템은 Fig.2에서 보는 바와 같이 제어기와 V-I 변환기인 전자제어부, 유압 요소인 서보밸브-유압모터-부하(볼 스크류 및 이송대)의 결합

형태로 된 플랜트, 그리고 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 드럼상의 케이블 위치와 이송대간에 케이블의 상대위치오차를 측정하는 케이블 위치 측정 기구로 구성된다.

드럼의 회전으로 인하여 드럼과 케이블 정렬 시스템 사이에는 케이블의 상대적인 위치오차가 발생하게 되고, 이렇게 발생한 상대 위치오차는 LVDT의 오차전압으로 나타난다. 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.

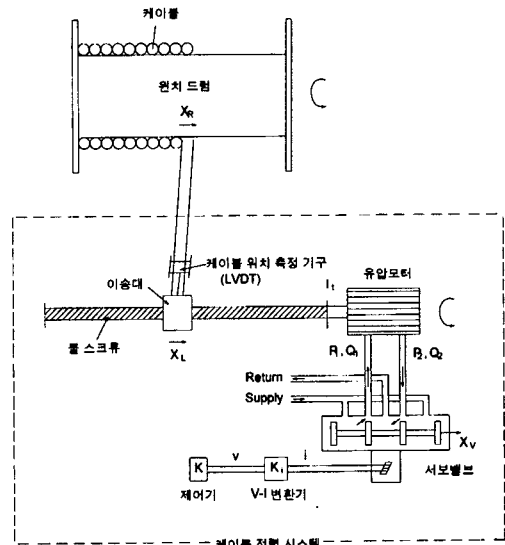


Fig. 2 Configuration of the Cable Spooling System

상대 위치오차를 측정하는 LVDT의 출력전압 V_c(volts)는

$$V_c = K_L(X_R - X_L) \tag{1}$$

으로 표현된다. 여기에서 K_L은 LVDT의 이득(volts/cm)이며, X_R과 X_L은 각각 드럼상과 케이블 정렬 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 3차로 구현된 모델이 가장 적합하다고 발표된 경우⁽⁶⁾도 있지만, 대개의 저주파수 영역에서는 1차 지연함수로 표현하여도 정확성을 기할 수 있으며, 본 연구에서도 간소화되어진 1차 함수를 사용하였다^(6,7). 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 스펙변위(cm), 이득(cm/mA) 및 시정수(sec)를 나타낸다.

유압 시스템의 선형해석⁽⁸⁾에 의해 서보밸브-유압모터-부하의 조합에 대한 전달함수를 표현하면

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

이다. 여기에서 ω_n , ζ 및 K_{ce} 는 유압모터의 비감쇠 고유주파수, 감쇠비 및 밸브-모터 전체 누설계수로서

$$\sqrt{\frac{4\beta_e D_m^2}{V_i I_i}, \frac{K_{ce}}{D_m} \sqrt{\frac{\beta_e I_i}{V_i}}} \text{ 및 } K_c + C_m \text{으로 각각 표현되며,}$$

T_L 은 케이블 정렬 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, θ_m 은 유압모터의 회전각이다.

식(1)~(5)를 종합하여 케이블 정렬 시스템의 블록선

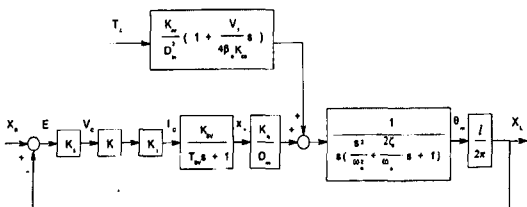


Fig. 3 Block Diagram of the Cable Spooling System

도를 나타내면 Fig.3과 같으며, 본 연구의 대상인 케이블 정렬 시스템에 대한 실제 입력데이터는 Table 2와 같다.

Table 2. Implimentation Data for the Cable Spooling System

구분	부호	입력데이터
LVDT 이득	K_L	1 volts/cm
V-I변환기 이득	K_i	0.8 mA/volts
서보밸브의 이득	K_{SV}	3.81×10^{-3} cm/mA
서보밸브의 시정수	T_{SV}	1.5×10^{-3} sec
서보밸브의 유량이득	K_q	8420.89 cm ³ /sec/cm
서보밸브의 유량대 압력계수	K_c	0.0689 cm ³ /sec/bar
유압모터의 체적변위	D_m	12.8 cm ³ /rad
유압모터의 전체 누설계수	C_m	0.6416 cm ³ /sec/bar
유압모터의 전체 체적	V_i	290.05 cm ³
작동유의 체적 탄성계수	β_e	8441.38 bar
전체 관성 모멘트	I_i	0.153 kgf-cm-sec ²
이송대의 중량	W	100 kgf
볼 스크류의 습동면 마찰계수	μ	0.01
볼 스크류의 리드	l	10 mm
볼 스크류의 효율	η	0.9 (90%)
예압너트의 내부 마찰계수	k	0.3
볼 스크류의 예압하중	F_{ao}	230 kgf

2.2. 부하의 모델링

케이블 정렬 시스템의 구동 부하토크⁽⁹⁾ T_L (kgf-cm)은 식(6)과 같이 표현되며, 케이블장력 및 이송대의 중량에 의한 부하하중과 볼 스크류의 예압하중에 의해 결정된다. 따라서

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

이다. 여기에서 F 는 케이블장력과 이송대의 중량에 의한 축하중(kgf)이며, F_{ao} 는 볼 스크류의 예압하중(kgf)이다.

케이블장력에 의한 이송대의 부하는 Fig.4에서 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, θ 는 케이블 예인구와 이송대의 위치에 따른 각도이다.

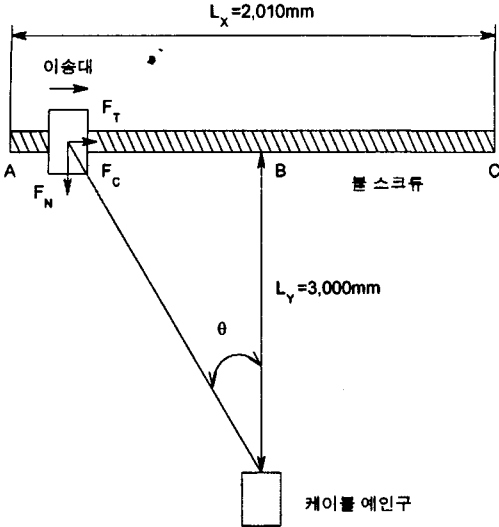


Fig. 4 Load due to Cable Tension

케이블장력이 일정하더라도 이송대의 위치에 따라 수평 성분의 힘은 변하며, 이 힘은 이송대의 이동방향과 일치 한 경우와 그 방향이 서로 반대인 경우로 구분된다. 그 방 향이 일치한 경우에는 이송대의 이동을 도와주며, 그 방 향이 서로 반대인 경우는 이송대의 이동을 방해하는 역할 을 한다. 이 두가지 경우로 분류하여 식(6)의 구동 부하 토오르크 T_L (kgf-cm)을 다시 나타내면 아래와 같다.

◆ 이송대의 이동방향과 일치하는 경우

$$T_L = 18.1F_C \sin\theta - 0.181 F_C \cos\theta - 11.159 \quad (8)$$

여기서, F_C 는 케이블장력 (kN) 이다.

◆ 이송대의 이동방향과 반대인 경우

$$T_L = -18.1F_C \sin\theta - 0.181F_C \cos\theta - 11.159 \quad (9)$$

3. 제어기 설계

본 연구의 대상인 케이블 정렬 시스템을 구현하기 위해 서 시스템을 분석하고 제어기를 설계하고자 한다. 본 시 스템에 작용하는 케이블장력은 운용상황에 따라 항상 변 하는 특성을 가지며, 케이블장력이 일정하더라도 이송대 의 위치에 따라 시스템에 작용하는 부하는 상이하다. 따 라서 이득조정으로 응답성을 좋게 할 수 있고 구현하기가

용이한 비례제어기를 적용하였다. 정정시간(settling time)은 고속구동(22rpm)시 드럼이 회전하기 시작하여 90°에 도달한 시간인 0.683초 이내, 드럼상과 이송대간 케이블의 상대위치오차(정상상태오차)는 케이블 직경의 10%이내로써 설계목표치를 설정하였다.

3.1. 시스템 분석

Fig.3의 블록선도에서 부하의 영향을 무시한 케이블 정렬 시스템의 전체 개루프 전달함수 $G_{open}(s)$ 를 구하면

$$G_{open}(s) = \frac{26497073.83K}{s(s^2 + 82.711s + 124660.563)(s + 666.67)} \quad (10)$$

이다. 식(10)으로부터 근궤적^(10,11)을 형성하여 시스템에 적용할 수 있는 제어기의 이득범위를 구하면 $0 \leq K \leq 285$ 이다.

그리고 시스템의 동특성을 분석하여 보면, Fig.2에서 보는 바와 같이 드럼이 회전할 때마다 케이블은 그 직경 만큼 이동하게 되므로 임의의 시간 t 동안 드럼상의 캐이 블 이동위치 X_R (cm)은

$$X_R = \frac{N_d \times d_c}{60} t \quad (11)$$

으로 표현된다. 여기에서 N_d 는 드럼의 회전수(rpm) 이 며, d_c 는 케이블의 직경(cm)이다. 이 위치는 케이블 정렬 시스템의 이송대에 있는 케이블 위치와는 상대적인 위 치오차가 된다.

따라서, 본 시스템은 개루프 전달함수의 형태가 1차형 이고 기준입력이 시간에 따라 변화하는 경사(ramp)입력 이므로 드럼상과 이송대간 케이블의 상대위치오차가 항 상 존재하며^(12,13), 제어기의 이득이 클수록 상대위치오차 는 적어진다. 그러나, 한계값($K_C=285$)에 가까운 제어기 의 이득을 적용한 케이블 정렬 시스템은 심한 진동이 발 생하므로, 시스템의 요구성능에 부적절한 동작을 하게 된 다.

3.2. 시뮬레이션을 통한 제어기의 이득 결정

시스템의 설계목표치에 합당한 제어기의 이득을 결정하 기 위하여 시뮬레이션을 수행하고자 한다. 먼저, 부하의 영향을 무시하고 드럼구동이 고속인 경우에 대하여 제어 기의 이득변화에 따른 시스템의 응답특성을 검토한 결과,

Fig.5로 부터 본 시스템에 적용할 제어기의 이득을 18로 정하였다.

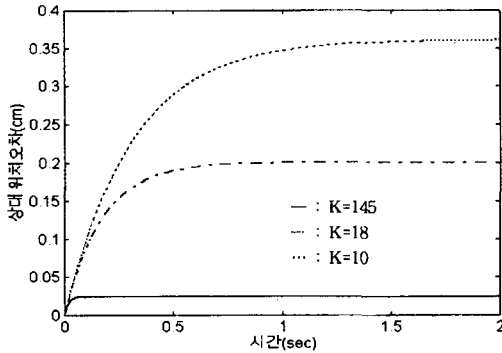


Fig. 5 System Response at 22rpm according to Gain

위에서 정한 제어기의 이득이 부하의 영향을 고려할 경우에도 설계목표치에 만족하는지를 검토하고자 한다. 시뮬레이션에 사용한 데이터는 Table 3에 나타난 바와 같이 드럼구동을 저속일 때와 고속일 때로 구분하였으며, 각 경우에 대한 케이블장력은 50 kN 및 25 kN으로 하였다. Fig.6과 7은 저속,고속시 각각에 대하여 이송대의 이동을 최대로 도와주는 경우(Fig.4의 점A, 저속: 267.720kgf-cm, 고속: 128.280 kgf-cm)와 최대로 방해하는 경우(Fig.4의 점C, 저속: -307.20kgf-cm, 고

Table 3. Simulation Data

드럼구동	기준 입력합수	부하 입력합수	비 고
저 속	0.576t	$T_L = 905 \sin \theta - 9.05 \cos \theta - 11.159$ $T_L = -905 \sin \theta - 9.05 \cos \theta - 11.159$	케이블 장력: 50 kN
고 속	1.152t	$T_L = 452.5 \sin \theta - 4.525 \cos \theta - 11.159$ $T_L = -452.5 \sin \theta - 4.525 \cos \theta - 11.159$	케이블 장력: 25 kN

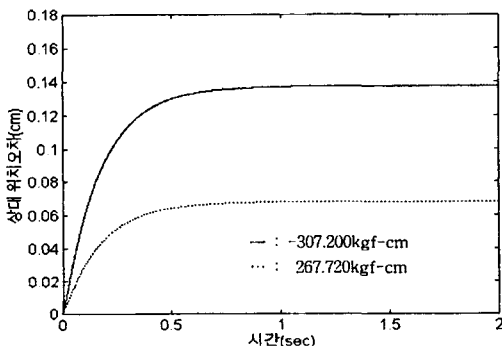


Fig. 6 Error Response of System (0.576t)

속: -159.180kgf-cm)의 응답결과를 비교하여 나타낸 것이며, 이를 Table 4에 정리하였다.

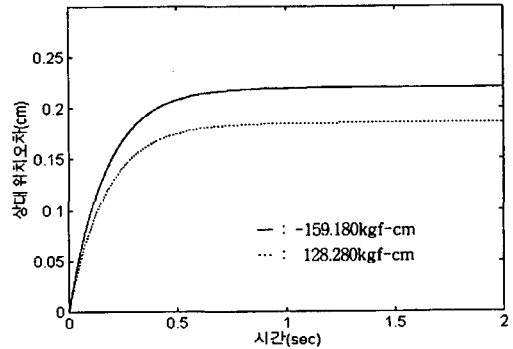


Fig. 7 Error Response of System (1.152t)

Table 4. Simulation Results

케이블이동속도 (cm/sec)	부하토크 (kgf-cm)	상대 위치오차 (cm)	케이블직경에 대한 오차율 (%)
0.576	-307.200	0.137	4.36
	267.720	0.068	2.17
1.152	-159.180	0.220	7.00
	128.280	0.185	5.89

Fig.6과 7로부터 케이블의 상대위치오차는 기준입력인 케이블 이동속도와 부하에 관계없이 0.683초이후에는 일정한 값으로 수렴하고 있으므로 시스템의 정정시간은 만족됨을 알 수 있다. 상대 위치오차는 Table 4에 나타난 바와 같이 케이블 이동속도와 부하토크에 따라 다르게 나타나지만, 케이블 직경에 대한 오차율이 7.0%내에 있으므로 시스템의 설계목표치에 만족됨을 알 수 있다.

4. 실험 및 성능평가

본 연구의 대상인 케이블 정렬 시스템의 실현화를 위한 실험장치는 Fig.8과 같이 구성하였으며, 변위센서인 LVDT의 데이터를 획득하기 위하여 A/D 변환기, 인터페이스 회로(버퍼), 퍼스널 컴퓨터 등을 이용하였다.

Fig.9와 10은 케이블장력이 25kN인 상태에서 이송대의 이동방향을 최대로 방해하는 경우(Fig.4의 점C), 저속구동과 고속구동에 대한 응답특성을 각각 나타낸 것이며, 실험과 시뮬레이션의 응답결과는 거의 일치함을 알 수 있다. Fig.11은 시제작한 케이블 정렬 시스템에서 케이블의 정렬상태를 보인 것이며, 성능평가 결과 Fig.9 및 10과 같이 케이블장력에 의한 부하에도 추종성이 좋은

시스템임을 확인하였다.

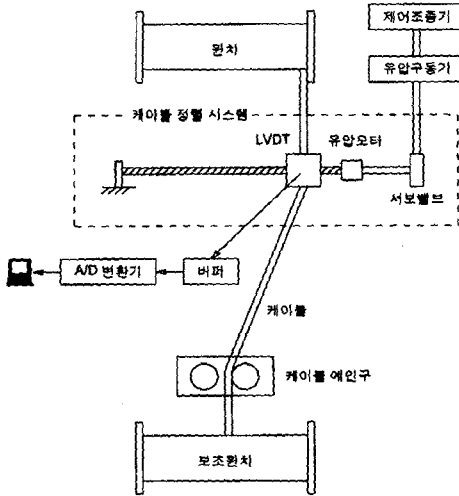


Fig. 8 Experimental Setup

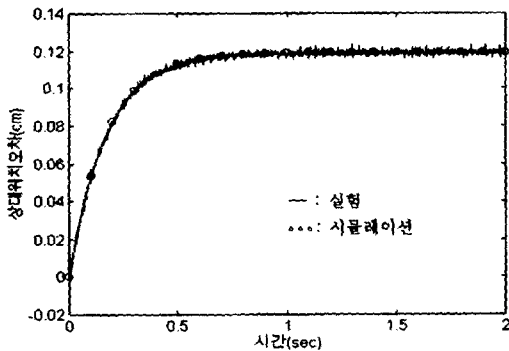


Fig. 9 Test Results at Low Speed(11rpm)

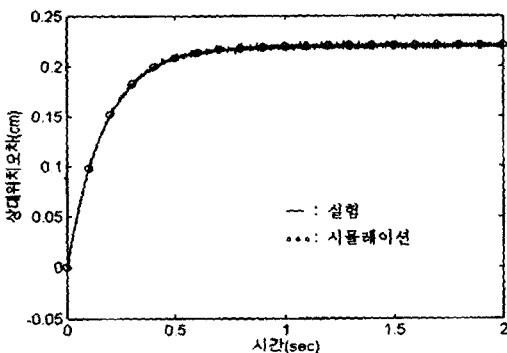


Fig. 10 Test Results at High Speed(22rpm)

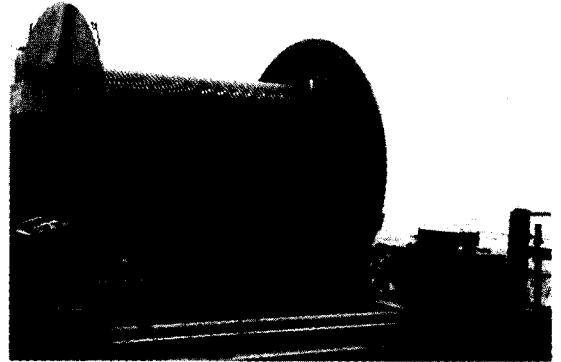


Fig. 11 Self-Activated Cable Spooling System with Seaborne Winch

5. 결 론

유압-서보 구동장치와 상대위치 추종방법을 이용한 자체구동형 케이블 정렬 시스템을 개발하기 위해서 시스템에 대한 모델링을 수행하였으며, 비례제어기를 설계하여 시스템의 응답특성을 분석하였을 때 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시스템의 정정시간은 케이블 이동속도와 부하에 관계없이 설계사양인 0.683초에 만족하였다. 상대 위치오차도 케이블 이동속도와 부하에 따라 다르게 나타나지만, 이송대의 이동을 방해하는 최대부하가 작용하는 경우에도 케이블 직경의 7.0% 이므로 설계목표치를 만족하였다.

(2) 시뮬레이션과 실험을 통한 응답특성 결과는 비교적 잘 일치하였으며, 원치운용시 케이블 정렬 상태를 보았을 때 케이블장력에 의한 부하에도 추종성이 좋은 시스템임을 입증하였다.

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. James, H.M., Nichols, N.B., and Phillips.

- R.S., "Theory of Servomechanisms," Radiation Lab. Series, Vol.25, McGraw-Hill, New York, 1947.
5. de Pennington, A., Mannetje, J.J., and Bell, R., "The Modelling of Electro-hydraulic Control Valves and Its Influence on the Design of Electro-hydraulic Drives," JMES, Vol.16, No.3, pp.196-204, 1974.
 6. Thayer, W.J., "Transfer Functions for Moog Servovalves," Moog Technical Bulletin 103, Servocontrols, Inc., 1965.
 7. Kim, M.S., "Transient Response Optimization of Electro-hydraulic Servo Mechanism Using Time-Optimal Controller," S.N.U., 1982.
 8. Merritt, H.E., "Hydraulic Control System," John Wiley and Sons, Inc, pp132-173, 1967.
 9. THK, Inc. "Technical Spec. for BNF Type Lead Screw," THK, Inc(일본), 1990.
 10. Kuo, B.C., "Automatic Control System," 6th, Prentice-Hall Inc, pp398-451, 1991.
 11. Ogata, K., "Modern Control Engineering," Prentice-Hall Inc, pp314-370, 1982.
 12. Dorf, R.C., Bishop, R.H., "Modern Control Systems," 7th, Addison-Wesley Publishing Company, pp169-198, 1995.
 13. Franklin, G.F., Powell, J.D., and Emami-Naeini, A., "Feedback Control of Dynamic Systems," 2th, Addison-Wesley Publishing Company, pp125-136, 1991.