

# 화물과 트롤리가 만드는 로프각이 화물의 진자운동에 미치는 영향: 적합조건과 분기조건

신장용\*, 고성희\*\*, 홍경태\*\*, 홍금식\*\*\*

\*대우조선해양(주)

\*\*부산대학교 대학원 지능기계공학과

\*\*\*부산대학교 기계공학부

## The Effect of Fleet-Angle on Sway Motions of a Cargo: Compatibility and Bifurcation Conditions

JANG-RYONG SHIN\*, SUNG-HEE GOH\*\*, KYUNG-TAE HONG\*\*, KEUM-SHIK HONG\*\*\*

\*Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Ltd.

\*\*Department of Mechanical and Intelligent Systems Engineering, Pusan National University, Busan, Korea.

\*\*\*School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea.

KEY WORDS: Fleet-Angle 로프각 Compatibility Condition 적합조건, Bifurcation Condition 분기조건

**ABSTRACT:** This paper investigates the relationship between the fleet-angle of the hoisting rope and the swaying and pitching angles of a cargo in container cranes. It is found that for a given disturbance, when the fleet-angle is large, the sway Angle becomes smaller, but the pitching angle becomes larger. Therefore, for a quick suppression of a sway motion, it is desirable to have a large fleet-angle. The compatibility and bifurcation conditions, regarding instability, are characterized

### 1. 서 론

컨테이너크레인이 화물을 선적 또는 하역할 때 이송되는 화물은 진자운동(sway motion)을 하게 된다. 화물의 진자운동은 크레인의 생산성을 저하시키고, 또한 트롤리의 흔들림을 야기시켜서 운전자의 피로를 가중시킬 뿐만 아니라, 크레인 구조의 안전성에도 좋지 않은 영향을 미친다. 최근, 크레인의 초고속화가 진행되면서 이 문제는 더욱 중요하게 부각되고 있고, 크레인의 무인화를 위해서 반드시 해결해야 할 문제로 대두되고 있다.

지난 30년간 화물의 진동을 제어하기 위한 수많은 이론과 장치들이 개발되어 왔고 그 결과 상당한 기술력의 증진을 가져왔다 (Marttinen et al., 1990; 홍금식 등, 1997a,b; 이진우 등, 1998; Rahn et al., 1999; 홍금식, 1999; 손유식과 김영복, 2000; 이종규와 이상룡, 2000; Hong et al., 2000; Singhose et al., 2000; 김영복, 2001; Fang et al., 2003; Hong et al., 2003; 이숙재와 홍금식, 2004; Kim et al., 2004; 강민우와 홍금식, 2005; 신장용 등, 2005). 이 중 일부는 실제로 크레인에 설치되었지만 실제 상업운전에서 사용되는 경우는 거의 없다 하겠다. 그 이유는 여러 가지가 있는데, 그 중 가장 중요한 것은 이러한 장치들의 효과가 아직까지 숙련된 운전자들의 작업효율 보다 크지 않다는 점과 이 장치들이 작동될 때 트롤리에 탑승한 운전자가 예측할 수 없는 운

동을 하게 되므로 상당한 불편감을 느끼게 된다는 점이다. 그러므로 운전자들이 이 장치의 사용을 거부하는 실정이다. 이런 문제를 해결하기 위해 최근 크레인 운전실을 트롤리에서 분리하는 모델이 도입되었다. VIT(Virginia International Terminal, Inc.)는 거더와 붐의 외부 축력의 한 쪽에 전용 레일을 설치하여 이 레일을 따라서 운전실이 움직이도록 트롤리에서 운전실을 분리한 모델을 개발하여 미국특허를 얻었고, 1998년 이 모델이 중국의 ZPMC에 의해 제작되어 Virginia 항만에 설치되었다.

화물인양계의 진자운동을 해석한 많은 이론들에서 계의 복잡성 때문에 흔히 인양로프는 질량이 없고 신장되지 않는 단일로프로 취급되고, 인양화물은 회전관성이 없는 점질량으로 취급되어 왔다. 이런 생각은 이 분야에서 연구개발의 바탕이 되었지만 한편 이론의 발전에 방해요소가 되었다. 실제로 로프의 리빙(reeving) 방식에 따라서 계의 거동이 상이하다는 것은 일반적인 사실이고, 로프의 리빙방식과 관련한 많은 특허들이 출원되었다. 이러한 특허들은 서로 상이한 리빙구조를 제시하고 있지만 기본 개념에 있어서는 공통성을 찾을 수 있다. 즉, 화물의 정지상태에서 트롤리와 화물이 만드는 인양로프의 로프각(fleet-angle)이 크면 인양화물의 진동을 억제하는 효과가 크다는 개념이다. 이러한 개념에 기초하여 신민생(1995)은 진자운동을 제어하는 방법을 연구하였고, 로프각을 증가시키기 위해서 두 개의 트롤리를 사용할 것을 제안하였다. 즉, 두 개의 트롤리는 서로 상대운동을 하면서 로프각을 조절할 수 있게 되며, 이러한 예들로부터 인양로프들은 단일로프로 취급되어서는 안됨을 알 수 있다.

제1저자 신장용 연락처: 경상남도 거제시 아주동 1

055-680-5536 jrshin@dsme.co.kr

한편 대부분의 크레인에는 인양화물의 진자운동을 제어하기 위한 흔들림제어장치에 추가해서 인양화물 자체의 무게중심에 대한 진동, 즉 피칭(pitching, 화물의 이동방향을 x-축, 지면과 수평을 이루며 x-축과 직각을 이루는 축을 y-축이라 할 때 y-축에 대한 회전운동), 요잉(yawing, 수직선 방향인 z-축에 대한 회전운동), 및 롤링(rolling, x-축에 대한 회전운동) 등을 제어하기 위한 린어드저스트(lean adjust) 시스템이 독립적으로 설치된다. 이는 인양화물 자체의 무게중심에 대한 진동이 진자운동과 독립적이라는 생각에서 기인한 결과이다. 이 개념과 화물 자체의 무게중심에 대한 회전관성이 진자운동에 대한 회전관성에 비해서 충분히 작다는 사실로부터 인양화물을 점질량으로 취급하는 것은 어쩌면 타당한 것 같이 보인다.

만약에 화물의 피칭운동(혹은 list motion이라고도 함)이 진자운동과 독립적이지 않다면 인양화물을 점질량으로 고려한 이론들은 오차를 포함하게 된다. 이 오차는 로프각이 클수록 증대된다. 실제로 운전자는 수작업으로 진자운동을 제어할 때, 두 가지 방법을 사용하는데, 하나는 트롤리를 움직여서 제어하는 방법이고, 또 하나는 린어드저스트시스템을 사용하는 방법이다.

본 논문에서는 로프각에 따른 피칭운동과 진자운동 사이에 만족해야 할 관계를 기술하기로 한다. 본 연구의 결과에 의하면 실제로 로프각이 존재할 때 피칭운동과 진자운동은 밀접한 관계를 가진다는 것을 알 수 있다. 즉 로프각이 크면 클수록 동일 교란력(disturbance)에 대해서 흔들림각은 작고 피칭각(pitching angle)은 증대된다. 피칭각과 흔들림각 사이에 만족해야 할 관계는 일종의 기하학적 적합조건으로 표현할 수 있는데, 이 적합조건은 흔들림각이 분기각(bifurcation angle)이라고 명명된 각보다 작을 경우에만 만족한다. 더욱이 이 흔들림각이 커져서 분기점을 초과하면 계의 판성력이 한쪽 로프에만 집중되므로 대단히 위험한 상태에 놓이게 된다.

본 논문에서 개발한 이론은 다음과 같이 응용될 수 있다. 첫째, 제어이론의 개발과 흔들림제어장치의 개발에 활용될 수 있다. 둘째, 인양화물의 진자운동으로 인한 크레인에 작용하는 설계력의 계산에 활용될 수 있다. 셋째, 유연한 로프에 의해서 화물을 인양할 때 로프의 설계력 산정에 활용될 수 있다.

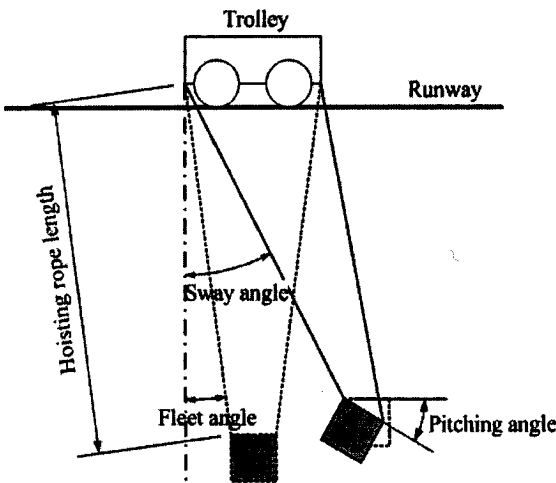


Fig. 1 Schematic of the hoisting system

## 2. 화물 인양계의 특징

Fig. 1은 화물의 인양계(hoisting system)을 보이고 있다. 일반적으로 인양계는 트롤리, 인양로프 및 인양화물로 구성된다. 트롤리는 붐과 거더에 설치된 레일을 따라서 움직인다. 트롤리가 가속 운동을 하게 되면 인양화물이 수직선을 기준으로 회전운동을 하게 되는데 이 운동을 진자운동이라 한다. 또한, 진자운동은 인양화물의 피칭각을 수반하는 것이 일반적이다. 더욱이 인양화물의 진자운동과 화물의 피칭운동은 로프각에 의해서 일정한 관계를 갖게 된다. 동일 교란력에 대해서 로프각이 클수록 흔들림각은 작고 피칭각은 커지게 된다. 다시 말하자면 동일 교란력에 대해서 흔들림폭을 작게하기 위해서는 로프각을 증가시키는 것이 좋고, 피칭운동을 제어하면 진자운동은 자동적으로 제어된다. 그러나 이러한 관계는 흔들림각이 분기각이라 명명된 어떤 값보다 작을 때에만 만족된다. 즉 진자운동폭이 분기각보다 클 때는 어느 한쪽 로프에 장력이 손실되는 결과를 가져와, 계는 대단히 위험한 상태에 놓인다. 이 관계를 도출하기 위해서 다음과 같은 가정을 도입하였다.

- 1) 로프는 신장되지도 않고 로프의 길이는 변하지 않는다.
- 2) 운동은 트롤리의 운동 평면 내에서만 발생한다.

흔들림각이 분기각을 초과하는 경우에 로프의 신장을 고려하지 않으면 진자운동을 설명할 수 없다. 그러나 분기각보다 작은 범위에서 진동이 발생할 때 인양로프의 신장은 로프의 길이에 비해서 아주 작아서 이를 무시할 수 있다. 또한 트롤리는 레일을 따라서 움직이기 때문에 레일축에 수직인 방향으로의 진동 또한 대단히 작다. 따라서 레일이 놓인 평면내의 운동만을 고려한다.

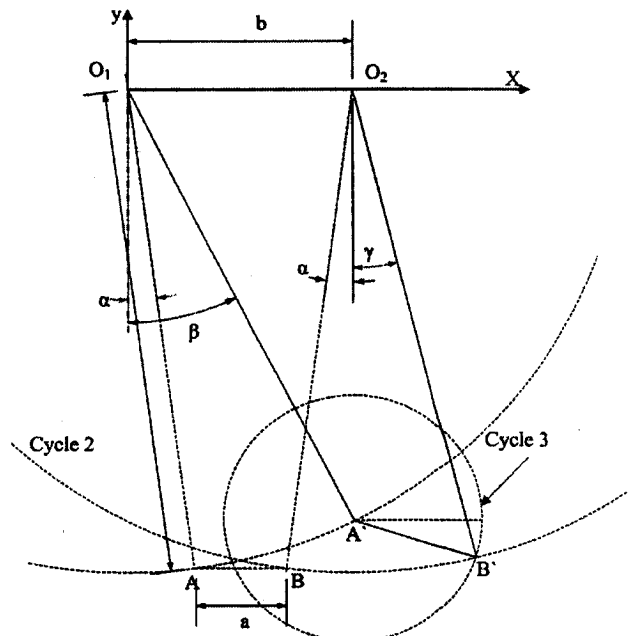


Fig. 2 Compatibility condition for the non-cross rope reeving

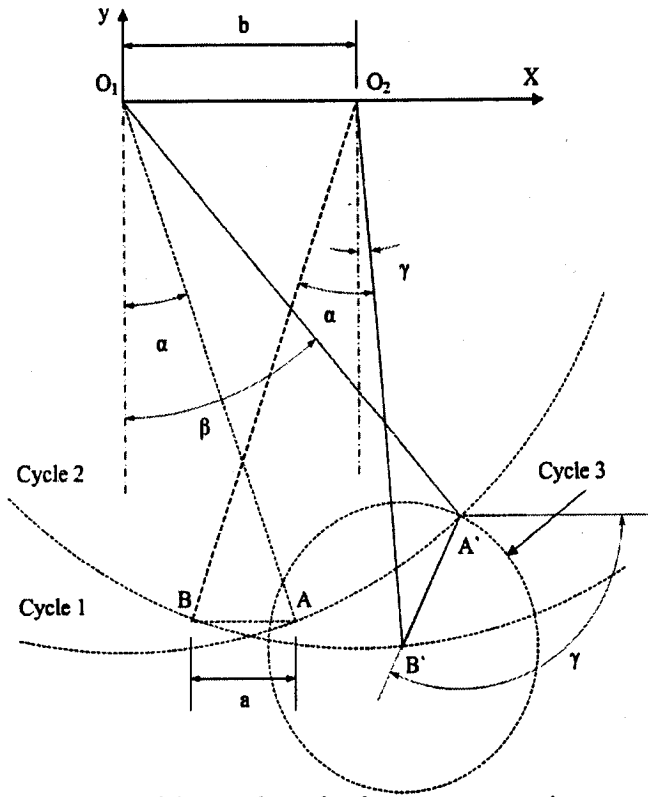


Fig. 3 Compatibility condition for the cross rope reeving

### 3. 기하학적 적합조건

Fig. 2는 인양로프가 교차하지 않는 인양계를 보여주고, Fig. 3은 인양로프가 교차하는 인양계를 보여 준다. 점  $O_1$ 과  $O_2$ 는 트롤리에 설치된 인양로프 도르래(sheave)의 중심을 나타낸다. 그리고 점 A와 B는 인양보(lifting beam)에 설치된 인양로프 도르래의 중심을 나타낸다. 평형상태에 놓여있던 인양화물 AB가 교란력을 받아서 A'B'로 이동할 때 로프의 길이는 불변이므로 점 A는 cycle 1을 따라서 움직이고 점 B는 cycle 2를 따라서 움직인다. 즉 cycle 1은 점  $O_1$ 을 중심으로 하고 반경이 선분  $O_1A$ 인 원이다. 그리고 cycle 2는 점  $O_2$ 를 중심으로 하고 반경이 선분  $O_2B$ 인 원이다. 그리고 cycle 3은 B점이 A점에 대한 피칭운동 궤적을 나타낸다.  $a$ 는 로프각,  $\beta$ 와  $\gamma$ 는 두개의 로프 흔들림각이다. 실제로 순 진흔들림각(net sway angle)은  $\beta - \alpha$  및  $\gamma + \alpha$ 이다. 그리고  $\phi$ 는 화물의 피칭각을 나타낸다. 여기서 초기 로프각은 다음과 같다. 즉, Fig. 2의 경우는 다음과 같다.

$$\sin \alpha = \frac{b-a}{2l} = \frac{\bar{b}-\bar{a}}{2} \quad (1)$$

그리고 Fig. 3과 같은 시스템에 대해서는 다음과 같다.

$$\sin \alpha = \frac{b+a}{2l} = \frac{\bar{b}+\bar{a}}{2} \quad (2)$$

여기서  $\bar{b} = b/l$ ,  $\bar{a} = a/l$ 이다. 식 (2)의 양변에 -1을 곱하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\sin(-\alpha) = \frac{-\bar{b}-\bar{a}}{2}$$

즉, 이 식은 음의  $\alpha$ 와  $\bar{b}$ 로 식 (1)을 대치한 것과 같다. 그러므로  $\bar{a}$ 는 양의 값만으로 고정시키고  $\alpha$ 와  $\bar{b}$ 는 양의 값과 음의 값을 갖도록 허용한다면 Fig. 3은 Fig. 2의 특별한 경우로 고려할 수 있다. 그러므로 동일한  $\bar{a}$ 와  $\bar{b}$ 에 대해서 Fig. 3은 Fig. 2보다 로프각을 증대시키기 위한 모델임을 알 수 있다.

정적 평형상태에 놓여있던 화물 AB가 외적 교란에 의해서 새로운 평형상태 A'B'로 이동할 때는 로프의 길이가 불변이라는 조건을 만족시키도록 움직여야 한다. 즉, 점 A가 cycle 1을 따라서 점 A'으로 움직였다면 점 A'에서 선분 AB를 반경으로 하는 cycle 3을 작도했을 때 이 원과 cycle 2가 만나는 점이 B'이 된다. 이렇게 해서 새로운 평형위치가 결정된다. 그러므로 교란력에 의해  $\beta$ 만큼의 흔들림각 발생되었다면 화물의 무게중심을 축으로  $\phi$ 만큼의 피칭이 발생한다. 이 관계를 적합조건이라 하며, Fig. 2로부터 다음과 같다.

$$l \sin \beta + a \cos \phi = b + l \sin \gamma \quad (3)$$

$$l \cos \beta + a \sin \phi = l \cos \gamma \quad (4)$$

여기서  $l$ 은 트롤리에 설치된 도르래와 인양보에 설치된 도르래의 중심간 거리이고 인양로프의 공칭길이를 나타낸다.  $b$ 는 트롤리에 설치된 도르래의 중심간 거리이고 트롤리의 공칭 길이를 나타낸다. 이 값은 로프가 교차될 때 음의 값을 가지고 로프가 교차하지 않으면 양의 값으로 간주한다. 그리고  $a$ 는 인양보에 설치된 도르래의 중심간 거리이고 인양화물의 공칭길이를 나타낸다. 그리고 항상 양의 값으로 간주한다. 흔들림각은 반시계 방향으로 회전할 때 양으로 취급하고, 피칭각은 시계방향으로 회전할 때 양으로 취급한다. 식 (3)과 식 (4)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\phi = -\delta + \sin^{-1} \left\{ \frac{1-A^2-\bar{a}^2}{2aA} \right\} \quad (5)$$

여기서

$$A = \sqrt{1 - 2\bar{b}\sin\beta + \bar{b}^2} \quad (6)$$

$$\delta = \tan^{-1} \{ \tan \beta - \bar{b} \sec \beta \} \quad (7)$$

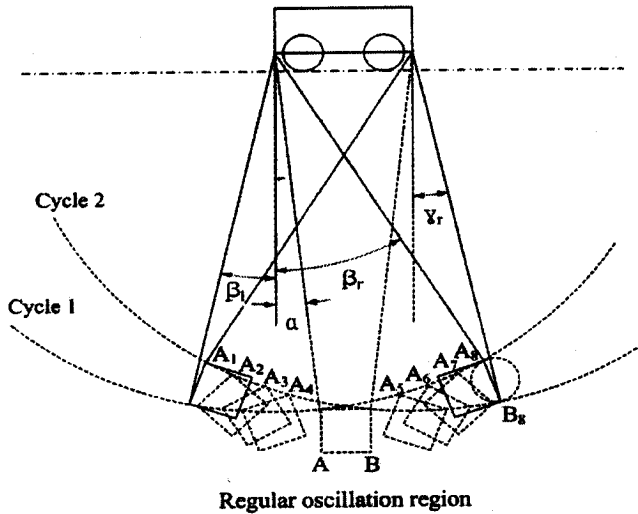


Fig. 4 Bifurcation

이는 로프자이 존재할 때 피칭각은 흔들림각에 의존한다는 것을 보이고 있다. Fig. 4는 화물이 흔들림 운동하는 모습을 순차적으로 보인 것인데, 피칭각이 분기각이라고 명명한 어떤 각을 넘어서면 (5)의 관계는 성립하지 않음을 알 수 있다. (5)의 관계가 만족되는 운동구간을 정규운동구간이라 명명한다.

Fig. 5는  $\bar{a}=0.02$ ,  $\alpha=3\text{deg}$ ,  $5\text{deg}$  및  $10\text{deg}$ 에 대한 순 흔들림각  $\beta - \alpha$ 와 피칭각  $\phi$ 의 관계를 보여준다. 각 그래프의 종단점은 주어진 조건에서 분기각을 정의한다. 순흔들림각과 피칭각이 작을 경우에 식 (3), (4)와 순흔들림각( $\beta - \alpha = \gamma + \alpha$ )으로부터 각 그래프는 직선으로 근사화 될 수 있다. 선형화된 식은 다음과 같다.

$$\phi = \frac{b-a}{a}(\beta - \alpha) \tag{8}$$

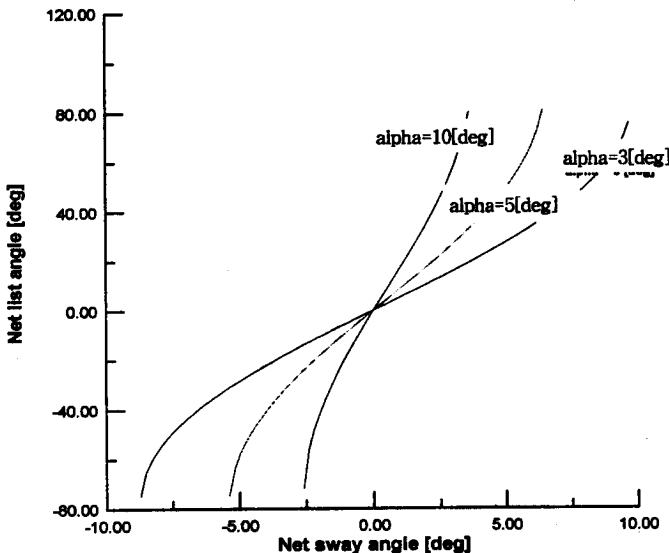


Fig. 5 List angle vs. sway angle for various fleet angles

### 4. 분기 및 분기각

Fig. 4를 보면 식 (5)의 기하학적 적합조건은 흔들림각이 어떤 값을 초과하면 만족되지 않는다는 것을 알 수 있다. 왜냐하면 이 각을 초과하면 cycle 1과 cycle 2사이의 거리는 항상 선분 AB 보다 크기 때문이다. 이 경계를 분기각이라 칭한다. 이 분기점을 넘어 진동이 계속될 때 피칭운동과 흔들림운동은 서로 독립적인 관계를 유지한다. 적합조건 (5)로부터 정규운동구간은 다음과 같이 결정된다. 즉 정현 함수치는 1을 초과할 수 없다는 조건과 흔들림각에 대한 제한조건  $-\pi/2 < \beta < \pi/2$ 을 조합하면 정규운동구간은 다음과 같다.

$$\text{Max}(\beta_1, -\pi/2) \leq \beta \leq \text{Min}(\beta_r, \pi/2) \tag{9}$$

여기서  $\beta_1$ 과  $\beta_r$ 은 분기각을 나타내고

$$\sin \beta_1 = \left\{ \frac{1 + \bar{b}^2 - (1 + \bar{a})^2}{2\bar{b}} \right\} \tag{10}$$

$$\sin \beta_r = \left\{ \frac{1 + \bar{b}^2 - (1 - \bar{a})^2}{2\bar{b}} \right\} \tag{11}$$

Fig. 4에서 보여준 것과 같이 대칭성 때문에  $\beta_r$ 과  $\beta_1$ 은 서로 독립이 아니다. 즉  $\beta_1 = -\gamma_r$ 인 관계가 성립한다. 또한 식 (3), (4)로부터 우측 로프의 흔들림각  $\gamma$ 는 좌측 로프의 흔들림각  $\beta$ 로 표시되기 때문에 분기조건은  $\beta_r$ 만으로 표현될 수 있다.

### 5. 분기조건

Fig. 2에 보여진 시스템의 경우에  $\bar{b} = \bar{a} + 2\sin\alpha$ 로 표현된다. 해석의 편의성을 위해서  $f(z) = \sin \beta_r$ 로 치환하고  $\sin \alpha = z$ 로 치환하면 (11)식은 다음과 같다.

$$f(z) = \frac{2z^2 + 2\bar{a}z + \bar{a}}{a + 2z} \tag{12}$$

for  $-1 \leq z \leq 1, \bar{a} \geq 0$

함수  $f(z)$ 는  $\bar{a}$ 에 관계없이 점 (-1, -1)을 반드시 지나는데 이것의 물리적인 의미는 다음과 같다.  $z = -1$ 은  $\alpha = -\pi/2$ 를 의미하므로 인양로프와 인양화물이 동일 수평선상에 놓이는 경우를 나타낸다. 그리고 이 경우에 분기각은  $-\pi/2$ 이므로 초기 위치가 분기점임을 의미한다. 이 경우에 계는 어떤 교란력에 대해서도 운동을 하지 않는다. 한편 함수  $f(z)$ 는 다음 좌표점에서 극값을 가진다.

$$z_p = \frac{1}{2}(-\bar{a} + \sqrt{2\bar{a} - \bar{a}^2}) \tag{13}$$

$$z_o = \frac{1}{2}(-\bar{a} - \sqrt{2\bar{a} - \bar{a}^2}) \tag{14}$$

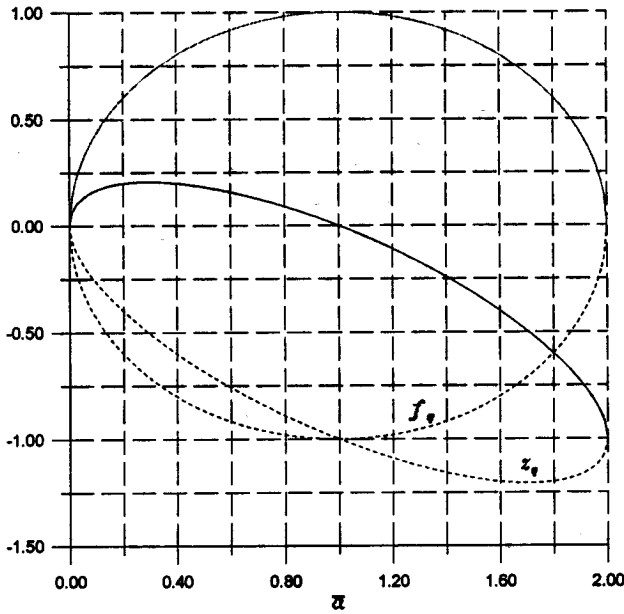


Fig. 6 Extreme value

식 (13)과 식 (14)로부터 극값은 오직  $0 \leq \bar{a} \leq 2$  범위에 대해서만 존재함을 알 수 있다. 그리고 충분히 작은 임의의 양수  $\epsilon$ 에 대해서  $z = -\bar{a}/2 + \epsilon$  일 때 식 (12)의 함수 값은 다음과 같다.

$$f = \frac{2\bar{a} - \bar{a}^2}{2\epsilon} \tag{15}$$

그러므로  $z = -\bar{a}/2$ 는 점근선이고  $0 < \bar{a} < 2$  인 범위 내에서 식 (15)의 함수값은 양의 값을 준다. 따라서  $z_b$ 는 극소점을,  $z_o$ 는 극대점을 나타낸다. 그리고 이 범위에서 항상  $-1 < z_b < 1$  이기 때문에 함수  $f$ 는 정의영역 내에서 최소한 하나의 극값을 가진다. Fig. 6은  $\bar{a}$ 에 대한  $z_b, z_o, f(z_b)$  및  $f(z_o)$ 를 보여준다. 이 그림으로부터  $1 < \bar{a} < 2$  인 범위에서 함수  $f$ 는 오직  $z_b$ 에서만 극값을 가지고  $0 < \bar{a} \leq 1$  인 범위에서는 두 개의 극값을 가진다는 것을 알 수 있다. 극값이 존재할 때 그 극값은 다음과 같다.

$$f_b = f(z_b) = \sqrt{2\bar{a} - \bar{a}^2} \tag{16}$$

$$f_o = f(z_o) = -f_b \tag{17}$$

여기서  $f_b$ 는 주어진 영역에서  $0 \leq f_b \leq 1$  사이에 존재하고  $\bar{a} = 1$ 에서 최대값을 가진다.  $f_b$ 가 극소값이기 때문에  $f = 1$ 을 만족하는 두 횡좌표점 사이에서  $f$ 값은 항상  $0 \leq f \leq 1$  사이에 존재한다. 또  $f_o$ 가 극대점이기 때문에  $f = -1$ 을 만족하는 두 횡좌표점 사이에서  $f$ 값은 항상  $-1 \leq f \leq 0$  사이에 존재한다. 즉  $f = 1$ 을 만족하는 두 좌표점은 각각  $0$ 과  $(1 - \bar{a})/2$  이고  $f = -1$ 을 만족하는 두 좌표점은 각각  $-1$ 과  $-\bar{a}$ 이다. 이를 요약하면 다음과 같다.

(i)  $\bar{a} = 0$  일 때

도식적인 고찰을 위해서 Fig. 7에 이 경우를 보였다. 이 그림을 보면 cycle 1과 cycle 2의 교차점은 초기 위치뿐이다. 즉 초기 위치가 분기위치임을 의미한다. 만약 로프가 신장되지 않는 강체로 되어 있다면 어떤 교란력에 대해서도 진자운동은 이 경우에 발생할 수 없다. 그러나 로프가 유연하기 때문에 진자운동은 발생할 수 있고 진자운동이 발생하는 순간에 분기점을 초과하기 때문에 한쪽 로프에만 장력이 집중되는 상태가 발생한다. 화물의 걸보기 증량을  $W$ 라고 할 때 정적 평형상태에서 각 로프에 걸리는 장력은  $W/(2 \cos \alpha)$  인데, 교란력을 받는 순간에 분기에 의해서 한쪽 로프에 장력이 소실되기 때문에 다른쪽 로프의 장력은 순간적으로  $W/\cos \alpha$ 를 초과하게 된다. 따라서 분기가 발생하는 경우에 로프의 안전도는 2배 이상 감소하게 된다.

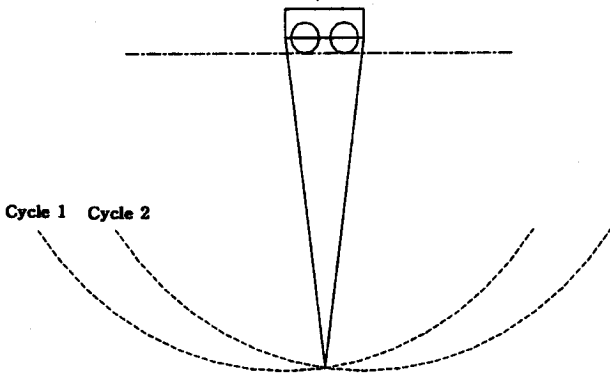


Fig. 7 Hoisting system in the case of  $\bar{a} = 0$

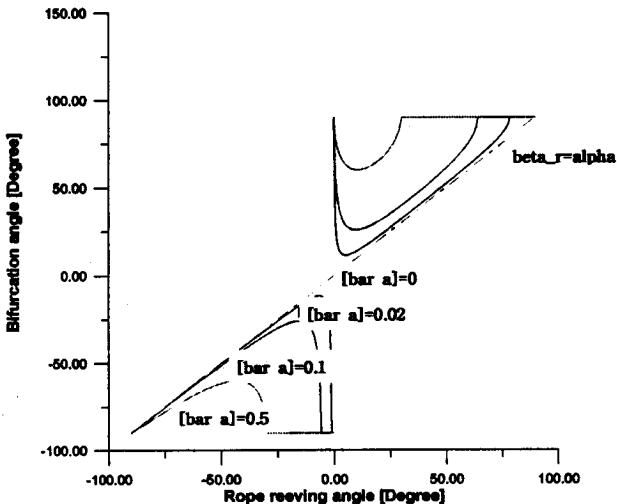


Fig. 8 Bifurcation angle for  $0 < \bar{a} < 1$

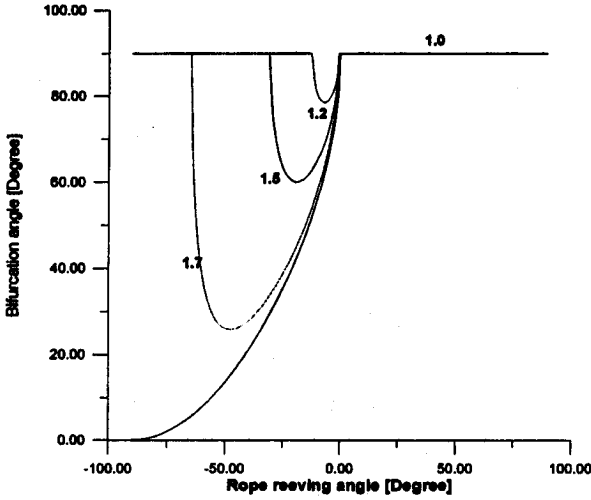


Fig. 9 Bifurcation angle for  $1 < \bar{a} < 2$

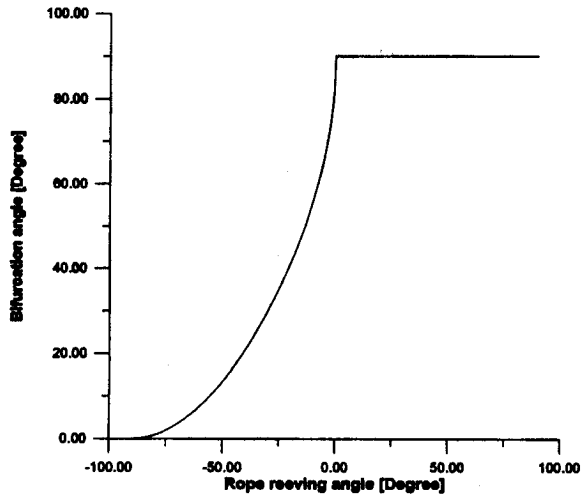


Fig. 10 Bifurcation angle for  $\bar{a} = 2$

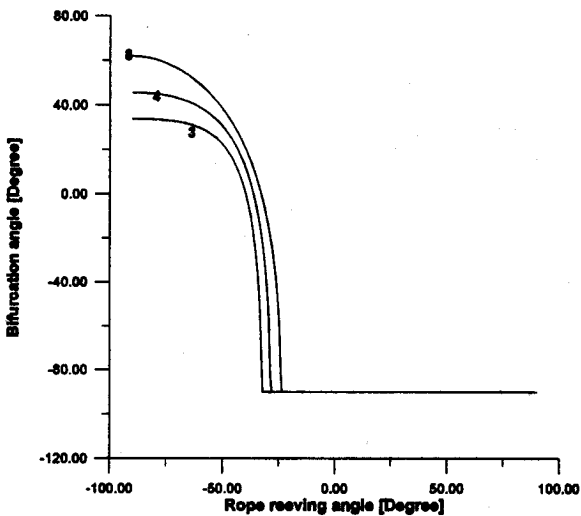


Fig. 11 Bifurcation angle for  $\bar{a} > 2$

(ii)  $0 < \bar{a} < 1$  일 때

로프각이  $0 < \sin \alpha < (1 - \bar{a})/2$  또는  $-1 < \sin \alpha < -\bar{a}$  범위에 존재할 때만 분기가 발생한다. Fig. 8은  $\bar{a}$ 가 0.0, 0.02, 0.1 및 0.5에 대한 분기각을 보여준다. 그래프에서 직선  $\beta_r = \alpha$ 는  $\bar{a}=0.0$  인 경우를 보여주는데, 이는 초기위치가 분기위치임을 나타낸다. 여기서 각 곡선들은  $\alpha = -\bar{a}/2$ 와  $\beta_r = \alpha$ 를 점근선으로 한다.

(iii)  $\bar{a} = 1$  일 때

Fig. 8로도 예측할 수 있지만 이 경우  $\pm\pi/2$ 에서만 분기가 발생한다. 즉 주어진 정의영역 내에서 분기가 발생하지 않는다.

(iv)  $1 < \bar{a} < 2$  일 때

로프각이  $(1 - \bar{a})/2 < \sin \alpha < 0$  범위에 존재할 때만 분기가 발생한다. Fig. 9는 이 경우를 보여준다.  $\beta_r = \pi/2$  직선은  $\bar{a} = 1$ 에 대한 것이고 곡선 위의 치수는  $\bar{a}$  값을 의미한다.

(v)  $\bar{a} = 2$  일 때

이 경우에 식 (12)의 함수는 일차함수로 표시되는데  $f(z) = z + 1$ 이다. 그러므로  $z > 0$ 보다 큰 영역 즉  $\alpha \geq 0$ 인 경우에는 분기가 발생하지 않음을 의미한다. 로프각이  $-1 \leq \sin \alpha < 0$  범위에 있을 때만  $0 \leq \beta \leq \pi/2$  범위에서 분기가 발생함을 알 수 있다. Fig. 10은 이것을 도식적으로 보여준다.

(vi)  $\bar{a} > 2$  일 때

이 경우에 식 (15)의 함수값은 음의 값을 준다. 또한 극값을 가지지 않기 때문에 함수  $f$ 는 이 경우 주어진 정의영역  $-1 < \sin \alpha < 1$ 에서 단조증가함수임을 의미한다. 그러므로 로프각이  $-\pi/2 < \alpha < 0$ 인 범위에 있을 때만 분기가 발생한다. Fig. 11은 이것을 보여준다.

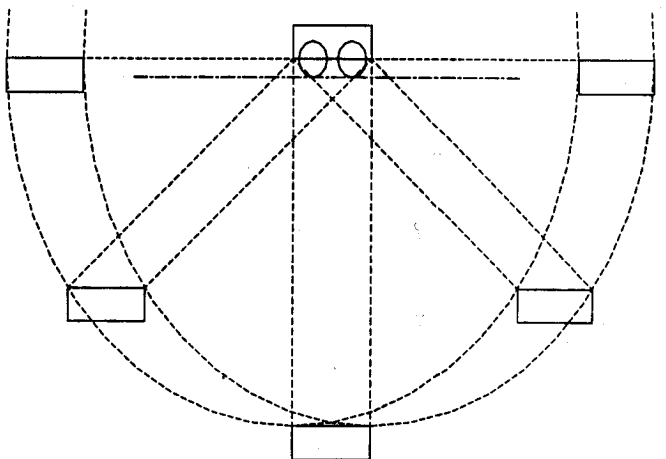


Fig. 12 In case of  $\alpha = 0$ , the bifurcation and the list motion do not appear.

(vii)  $\alpha = 0.0$  일 때

함수  $f(z)$ 는  $\bar{a}$ 에 관계없이 항상 좌표점  $(0, 1)$ 을 지난다. 이것의 의미는 다음과 같다. 즉 로프각이 없을 때는  $\bar{a}$ 에 관계없이 분기는 분기가  $\pi/2$ 에서 발생함을 의미한다. 궁극적으로 분기는 발생하지 않음을 의미한다. 이를 Fig. 12에 보이는데 모든 위치에서 피칭각은 항상 0이 된다. 이러한 이유 때문에 전자식 엔티스웨이를 장착하는 경우에 많이 사용된다. 이와 같은 경우에 트롤리의 크기를 작게 할 수 있기 때문에 크레인의 크기 및 중량을 감소시킬 수 있게 된다. 그러나 작은 교란력에 대해서 쉽게 진자운동이 발생하는 단점을 가지고 있다. 또 진자운동을 제어하는 유일한 방법은 트롤리를 진동시키는 것밖에 없기 때문에 트롤리에 타고 있는 운전자는 상당한 불편함을 느끼게 된다.

## 6. 결 론

이상에서 로프각이 흔들림각 및 피칭각에 미치는 영향을 고려해 보았다. 동일한 교란력에 대해서 로프각이 클수록 흔들림각은 작아지고 상대적으로 피칭각이 증가함을 알았다. 그리고 서론에서 언급했듯이 적합조건은 피칭각과 흔들림각 사이의 관계이고, 이 적합조건은 분기조건에 따라 변하는 분기가 보다 작은 경우에만 만족한다. 그러므로 동일 교란력에 대해서 진자운동을 빨리 제어하기 위해서는 로프각을 가능한 중대시키면 된다는 것을 알 수 있고 이 경우에 화물의 피칭운동을 제어하면 진자운동은 자동적으로 제어됨을 알 수 있다. 그러나 로프각을 증가시킬 경우에 보다 작은 흔들림각에서 분기가 발생하기 때문에 로프의 안전도가 그만큼 감소된다. 실제로 로프가 신장되기 때문에 분기는 본 논문에서 제시한 각보다 조금 큰 각에서 발생할 것이다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업 (과제번호: M1-0302-00-0039-03-J00-00-023-10)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 강민우, 홍금식 (2005). "시간최적제어를 이용한 지브크레인의 흔들림제어", 한국해양공학회지, 제19권, 제1호, pp 87-94.
- 김영복(2001). "Gain-Scheduling 기법을 이용한 크레인의 흔들림 제어에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제18권, 제7호, pp 53-64.
- 손유식, 김영복 (2000). "컨테이너 크레인의 흔들림 방지장치 개발에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제14권, 제4호, pp 35-42.
- 신민생 (1995). 다변수 제어계 설계법을 이용한 컨테이너 크레인의 운전자동화에 관한 연구, 부산수산대학교 대학원 공학박사학위논문.
- 신장용, 박영현, 고성희, 홍금식 (2005). "로프각이 화물의 진자운동에 미치는 영향: 설계력의 계산", 한국해양공학회지, 제19권, 제1호, pp 77-86.
- 이숙재, 홍금식 (2004). "초대형 선박용 차세대 컨테이너 크레인의 설계기준", 한국해양공학회지, 제18권, 제6호, pp 101-107.
- 이종규, 이상룡 (2000). "비선형 천정크레인시스템의 위치제어 알고리즘 개발", 한국정밀공학회지, 제17권, 제4호, pp 142-147.
- 이진우, 여태경, 안휘웅, 김상봉 (1998). "2자유도 서보제어기를 이용한 크레인의 Anti-Sway 제어", 한국해양공학회지, 제12권, 제4호, pp 17-23.
- 홍금식, 손성철, 이만형 (1997a). "컨테이너크레인의 흔들림제어 (Part I): 모델링, 제어전략, 기준선도를 이용한 오차피드백제어", 제어.자동화.시스템공학논문지, 제3권, 제1호, pp 23-31.
- 홍금식, 손성철, 이만형 (1997b). "컨테이너크레인의 흔들림제어 (Part II): 트롤리 주행속도 조절을 통한 진자운동의 제어", 제어.자동화.시스템공학논문지, 제3권, 제2호, pp 132-138.
- 홍금식 (1999). "컨테이너 기중기의 제어: 수정된 시간최적주행과 비선형 잔류흔들림 제어", 제어.자동화.시스템공학논문지, 제5권, 제5호, pp 630-639.
- Carbon, L. (1976). "Automation of Grab Cranes", *Simens Review*, Vol XLIII, No 2, pp 80-85.
- Fang, Y., Dixon, W.E., Dawson, D.M. and Zergeroglu, E. (2003). "Nonlinear Coupling Control Laws for an Underactuated Overhead Crane System", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol 8, No 3, pp 418-423.
- Hong, K.S., Park, B.J. and Lee, M.H. (2000). "Two-Stage Control for Container Cranes", *JSME International Journal Series C*, Vol 43, No 2, pp 273-282.
- Hong, K.T., Huh, C.D. and Hong, K.S. (2003). "Command Shaping Control for Limiting the Transient Sway Angle of Crane Systems", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol 1, No 1, pp 43-53.
- Kim, Y.S., Hong, K.S. and Sul, S.K. (2004). "Anti-Sway Control of Container Cranes: Inclinometer, Observer, and State Feedback", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol 2, No 4, pp 435-449.
- Marttinen, A., Virkkunen, J. and Salmine, R.T. (1990). "Control Study with a Pilot Crane", *IEEE Trans. on Education*, Vol 33, No 3, pp 298-305.
- Rahn, C.D., Zhang, F., Joshi, S. and Dawson, D.M. (1999). "Asymptotically Stabilizing Angle Feedback for a Flexible Cable Gantry Crane", *ASME Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol 121, No 3, pp 563-566.
- Singhose, W., Porter, L., Kenison, M. and Kriikku, E. (2000). "Effects of Hoisting on the Input Shaping Control of Gantry Cranes", *Control Engineering Practice*, Vol 8, No 10, pp 1159-1165.

2004년 10월 14일 원고 접수

2005년 3월 15일 최종 수정본 채택