

옵저버를 이용한 크레인 작업자의 에러 검출에 관한 연구

김환성* · 김승호**

*한국해양대학교 물류시스템공학과 교수, **한국산업안전공단 교수

A Study on Fault Detection for Crane Handler by Observation Techniques

Hwan-Seong. Kim* · Seoung-Ho. Kim**

*Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Korea Occupational Safety and Health Agency, Incheon 403-711, Korea

요약 : 본 연구에서는 옵저버를 이용한 크레인 작업자의 작업오류 검출에 관한 연구로서 작업오류를 검출할 수 있는 옵저버 설계 및 시뮬레이션에 의한 검증을 다루었다. 먼저, 본 연구에서는 크레인 작업자 모델에 대해 옵저버를 제안하였으며, 제안된 옵저버에 대한 이론적 증명을 통하여 작업 오류를 검출할 수 있음을 보였다. 시뮬레이션에서는 종래의 연구결과인 크레인 작업자 모델을 기초로 작업자 모델을 구현하였으며, 이때 작업 오류는 작업자의 부주의에 의한 오류로 가정하여 시뮬레이션을 행하였다. 이 결과, 본 연구에서 제안한 옵저버에 의해 작업 오류의 검출이 완벽히 이루어짐을 보였고 이에 본 연구에서 제안한 옵저버의 유효성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 휴면, 고장, 관측, 신뢰성

ABSTRACT : In this paper, we deal with an observer design for detecting the human faults in container crane operation. First we propose an observer for detecting the human faults and show the existing condition for the observer. In this case, we assume that the human faults can be considered as a careless mistake during the crane operation. In simulation, we used the previous results for human work model and design the observer for the human work model. As a simulation results with human faults, the proposed observer can be detected the human faults perfectly, thus the efficiency of proposed observer is shown.

KEY WORDS : Human, Fault, Observation, Reliable

1. 서 론

산업구조가 복잡하고 대형화된 현대사회에서는 기계의 신뢰도가 크게 요구되고 있고 기계와 인간의 공동 작업으로 병행하는 종합적 수행능력 또한 지속적으로 정밀도가 높아져 가고 있다. 이렇게 산업시스템이 복잡해지고 속도가 빨라지는 기계의 자동화에 비하여 작업자의 작업처리 능력은 이에 따라가지 못해서 대형 사고로 직결되고 있으며, 대부분의 대형사고의 발생 원인이 작업자의 부주의에 의한 실수로 판명되는 사고가 점차 증가하고 있다.

Chernobyl 원자력 발전소의 참사(1985년, 소련), Bhopal시의

가스누출(1985년, 인도), 첨보제트기의 추락(1985년, 일본), Challenger호 폭발(1986년, 미국)에서의 사고와 같은 대형 사고의 원인이 인간실수(Human Error)로 지적되면서 위험도가 높은 시스템의 안전요소에 대한 평가가 관심의 대상이 되고 있는 것이다.

또한, 항만에서도 항만의 서비스는 선사유치 및 경쟁 항만간의 중요한 요소로서 항만을 직접 운영하거나 장비를 조작하는 작업자의 신뢰도에 직접 의존되는 항목으로, 항만내의 작업자 실수에 의한 사고는 일어나지 않도록 하여야 한다.

이와 같이 기계와 인간이 공존되는 전체시스템에서 인간실수가 시간이 경과되거나 또는 다른 사상(event)과 결합되어 전체 시스템에 부정적 영향을 미치게 되며, 이로서 막대한 물적, 인적, 경제적 손실을 가져오는 것이다. 특히 인간실수로 시스템 전체의 마비가 발생되지 않는다 하여도 일적실수로 인한 경제

*종신회원, kimhs@hhu.ac.kr 051)410-43345

적, 물질적 손실에 대비를 하지 않을 수 없는 상태인 것이다. Christensen(1981)은 전자장비 전체고장의 50~70%, 항공기 전체고장의 60~70%, 미사일 시스템 전체 실패의 20~53%가 인간과 관련된 것으로 밝히고 있고, Hagen(1976)은 전체 실패의 약 10~15%가 인간실수에 직접적으로 기인한다고 밝히고 있다. 또한 Rouse & Rouse(1983)도 항공, 전력생산 및 공정작업에서 인적실수는 모든 주요한 사고의 60%에서 90%의 원인을 제공한다는 사실에서 보면 시스템에서 고장 중에 20%에서 90% 정도가 인적실수로 인하여 유발되는 것으로 추정되고 있다. 따라서 인간 신뢰도에 적정한 고려 없이 시스템을 설계하거나 분석하는 것은 불완전 할 수밖에 없는 것이다.

작업신뢰도를 증대하기 위해서 인간실수를 평가하는 연구는 일반적으로 접근에는 세 가지 목표가 있다. 첫 단계는 위험이 높은 시스템에서 인간실수를 찾아내는 것이고 두 번째 단계는 안전한 것으로 허용할 수 있는 실수를 정량화하여 제공할 수 있는 것이며, 세 번째 단계는 인간실수를 줄이기 위한 실수 데이터베이스를 개발하는 것이다.

이러한 인간의 실수가 발생되지 않도록 하기 위해서는 설비와 인간과의 상호작용과 과정을 추구하는 시스템의 목표와 서로가 일치하도록 조직화시켜야 가능할 것이다. 사고가 설비와 인간간의 상호작업으로 인하여 발생하는 것임을 생각한다면 인간개발에 대한 투자를 소홀히 하고 개선시켜나가지 않고 있는 상황 하에서 인간실수에 의한 재해는 당연한 것이라 할 수 있다.

위의 상황에서 종래는 장비 또는 인간 작업을 배제한 시스템에 대한 고장에 대해 진단하고 작업자가 이를 보완하는 방향으로 연구가 진행되어 왔다(Sinners 1947, Marten 1999, Yehia 1995, Charles et al 1980). 그러나 현대사회와 인간의 공존문제에서는 보다 적극적으로 인간실수를 고려하여 대응하는 방향으로 진행되고 있다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 종래의 기계 및 시스템을 대상으로 행하였던 고장 진단법을 작업자를 대상으로 행하고자 한다. 먼저 본 연구에서는 크레인 작업자를 대상으로 하며 작업자 모델을 이론적인 선형 시불변 모델로 가정하여 행하도록 한다. 작업자 모델에 대하여 휴먼에러진단 옵저버를 제안하며 본 옵저버를 이용하여 휴먼에러가 진단될 수 있음을 이론적으로 증명하도록 한다. 이때, 휴먼에러는 작업자 모델에 대해서 부가되는 외부 입력항으로 가정하며, 옵저버를 이용하여 외부 입력항을 정확히 측정함을 목적으로 한다.

시뮬레이션에서는 크레인 작업자 모델에 관한 종래 결과를 이용하여 작업오류는 작업자 부주위에 의한 사항으로 가정하여 시뮬레이션을 행한다. 시뮬레이션 결과에서는 본 논문에서 제안한 옵저버를 이용하여 작업오류가 정확히 진단됨을 보이며, 이로서 본 옵저버의 유용성을 확인한다.

2. 문제정의

작업자 모델을 다음과 같이 미지 입력을 지닌 선형 시불변 시스템으로 고려하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Dd(t) \quad (1a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (1b)$$

여기서 $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 는 상태벡터, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 는 입력벡터, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ 는 출력벡터이며 $d(t) \in \mathbb{R}^q$ 는 외란 벡터를 나타낸다. A, B, C, D 는 적당한 차원의 행렬이며, (C, A) 는 가관측이다.

위식에서 입력은 작업자가 현재의 상황으로부터 알 수 있는 각종 정보를 말하며 출력은 작업자의 판단에 의해서 시스템에 가해지는 신호를 나타낸다. 또한 외란요소는 작업환경 및 불확실한 요소로부터 변동될 수 있는 요소를 나타낸다.

본 논문에서는 작업자의 실수에 의한 작업오류는 직접적으로 바르지 못한 입력요소에 기인한다고 보며, 이러한 요소가 작업자 모델의 입력요소에 가산된다고 가정한다. 이를 위해 먼저, 작업자 모델에 가해지는 작업자 오류가 없는 순수한 입력을 $u(t)$ 라 하며, 작업자 오류를 포함한 경우의 입력을 $\bar{u}(t)$ 로 하자. 위의 내용을 포함하면 (1b)식은 다음 식으로 나타내어진다.

$$\bar{u}(t) = u(t) + d(t) \quad (2)$$

여기서 $d(t) \in \mathbb{R}^m$ 는 휴먼에러를 포함한 입력부의 고장요소를 나타내며, 입력부에 가산 형태로 주어진다.

위의 입력부 고장의 정의에 의해 시스템 (1)식은 다음과 같이 입력부에 고장요소가 포함된 모델로 주어진다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Bd(t) + Dd(t) \quad (3a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3b)$$

본 논문에서는 작업오류를 포함한 작업자 모델인 (3)식에서 휴먼에러진단 옵저버를 이용하여 작업자 오류인 $d(t)$ 를 정확히 진단 및 분리하고자 한다.

3. 휴먼에러 진단을 위한 옵저버 설계

3.1 휴먼에러진단 옵저버 설계

본 절에서는 아래와 같이 비례계인 및 적분계인을 포함한 휴먼에러진단 옵저버 구조에 대해서 다루기로 하자. 휴먼에러 진단 옵저버는 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + By(t) + Ju(t) + Haw(t) \quad (4a)$$

$$\hat{x}(t) = Cz(t) + Dy(t) \quad (4b)$$

$$\dot{\omega}(t) = \omega(t) - C\hat{x}(t) \quad (4c)$$

여기서 $\hat{x}(t) \in R^n$ 는 추정한 상태벡터를 나타내며, 출력 오차는 $\omega(t) \in R^p$ 이며 A, B, C, D, H, J 는 적당한 차원의 음저버 행렬이다.

정의1 : 작업자 모델 (1)식과 휴면에러를 포함한 작업자모델 (3)식에 대해 (4)식이 휴면에러진단 음저버가 될 필요충분조건은 다음 조건을 만족하는 것이다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \forall z(0_-), x(0_-), u(\cdot) \quad (5a)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = 0, \forall \omega(0_-) \quad (5b)$$

여기서 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ 는 관측 오차를 나타낸다.

보조정리1 : 작업자 모델 (1)식과 휴면에러를 포함한 작업자모델 (3)식에 대해 (4)식이 휴면에러진단 음저버가 될 충분조건은

$$\operatorname{Re} \lambda_i \begin{bmatrix} A & H \\ -C & 0 \end{bmatrix} < 0, i=1,\dots,n+p \quad (6)$$

이며, 다음 조건들을 만족하는 행렬 $U \in R^{n \times n}$ 가 존재하는 것이다.

$$AU + BC = UA \quad (7)$$

$$J = UB \quad (8)$$

$$CU + DC = I_n \quad (9)$$

$$UD = 0 \quad (10)$$

여기서 $\operatorname{Re} \lambda[\cdot]$ 은 고유치의 실수부를 나타낸다.

3.2 휴면에러의 검출 및 진단

본 절에서는 휴면에러진단 음저버가 작업오류를 포함한 작업자 모델에서 작업오류를 진단할 수 있음을 보이고자 한다.

먼저 다음 변수를 정의하자.

$$\zeta(t) = z(t) - Ux(t) \quad (11)$$

(3)식과 (4)식으로부터 (11)식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \zeta(t) &= A\zeta(t) + (AU + BC - UA)x(t) \\ &\quad + UD\alpha(t) + (J - UB)\omega(t) + \hat{H}\omega(t) + UB\alpha(t) \end{aligned}$$

또한, (4)식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\hat{x}(t) = C\zeta(t) + (CU + DC)x(t) \quad (12a)$$

$$\omega(t) = Cx(t) - \hat{x}(t) \quad (12b)$$

위의 보조정리1에 의해 다음과 같이 나타내어진다.

$$\zeta(t) = A\zeta(t) + \hat{H}(t) + UB\alpha(t) \quad (13)$$

$$\hat{x}(t) = C\zeta(t) + x(t) \quad (14)$$

$$\omega(t) = -CC\zeta(t) \quad (15)$$

$\xi(t)$ 을 다음과 같이 정의하자.

$$\xi(t) = \alpha(t) - \omega(t) \quad (16)$$

일반적으로 작업자의 오류가 순간적으로 발생되는 것을 고려하면, 작업오류가 $\alpha(t) = 0$ 이 됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 상황을 고려하면 위식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\xi}(t) = -\omega(t) = CC\zeta(t) \quad (17)$$

여기서 $\hat{H} = UB$ 로 선택하면, 위식은

$$\dot{\zeta}(t) = A\zeta(t) + \hat{H}(t)$$

$$\dot{\xi}(t) = CC\zeta(t)$$

혹은

$$\begin{bmatrix} \dot{\zeta}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \hat{H} \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

으로 변환된다. 위식으로부터 보조정리1을 이용하면 $\zeta(t), \xi(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ 으로 됨을 알 수 있다. 그러므로 작업오류 $\alpha(t)$ 는 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\hat{\alpha}(t) = \alpha(t) \quad (19)$$

그러므로 작업오류 및 미지의 외부외란을 포함한 작업자모델로부터 작업오류가 진단되며, 그 오류의 크기도 완벽하게 분리진단이 가능함을 알 수 있다.

이상으로부터 다음의 정리를 얻을 수 있다.

정리1 : 미지의 외부 외란 및 작업오류를 지닌 작업자모델 (3)식에 대해서 휴면에러진단 음저버 (4)식이 존재할 충

분조건은

$$\operatorname{Re} \lambda_i \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{H} \\ -\bar{C}\bar{C} & 0 \end{bmatrix} < 0, \quad i=1, \dots, n+p \quad (20)$$

이며, 다음 조건들을 만족하는 행렬 $U \in R^{n \times n}$ 가 존재하는 것이다.

$$\bar{A}U + \bar{B}C = UA \quad (21)$$

$$\bar{J} = \bar{H} = UB \quad (22)$$

$$\bar{C}U + \bar{D}C = I_n \quad (23)$$

$$UD = 0 \quad (24)$$

여기서, 작업오류는 (19)식과 같이 추정된다.

다음절에서는 정리1을 만족하는 휴먼에러진단 옵저버의 존재조건에 대해서 다루도록 한다.

3.3 휴먼에러진단 옵저버의 존재조건

휴먼에러진단 옵저버의 각 이득을 설계하기 위해 간단하게 $\bar{C} = I_n$ 로 하자. 그러면 (23)식은

$$U = I_n - \bar{D}C \quad (25)$$

으로 되며, (25)식을 이용하면 (21)식을 다음과 같이 나타내어진다.

$$\bar{A} = UA - KC \quad (26)$$

$$\bar{B} = \bar{A}\bar{D} + K \quad (27)$$

여기서

$$K = \bar{B} - \bar{A}\bar{D}$$

또한 (25)식을 이용하면 (24)식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\bar{D}\bar{C} = D \quad (28)$$

(28)식을 만족하는 행렬 \bar{D} 가 존재하기 위해서는 다음 rank 조건이 만족되어야 한다.

$$\operatorname{rank} \bar{D} = \operatorname{rank} D = m \quad (29)$$

위의 조건은 $p \geq m$ 으로 되어 출력수가 입력수보다 많

아야 함을 알 수 있다.

(28)식의 일반해는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\bar{D} = D(CD)^+ + G(I_p - CD(CD)^+)$$

여기서, G 는 임의의 행렬이다.

위의 식을 이용하면 (25)식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$U = (I_n - GC)I_n - D(CD)^+C$$

위의 수식으로부터, 행렬 $(I_n - GC)$ 이 정칙으로 하는 행렬 G 가 존재함을 알 수 있다. 따라서 행렬 U 의 rank가 $n-m$ 으로 됨을 알 수 있다.

위에서 $\operatorname{rank} D = m$ 이므로, 행렬 D 의 의사역행렬이 존재한다. 즉,

$$D^+D = I_m$$

위의 $\operatorname{rank} U = m-n$ 의 조건으로부터 $\operatorname{Ker} U \cap \operatorname{Ker} D^+ = 0$ 이 만족한다. 즉,

$$\operatorname{rank} \begin{bmatrix} U \\ D^+ \end{bmatrix} = n$$

다음의 관계를 알 수 있다.

$$\begin{aligned} & \operatorname{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D \\ C & 0 \end{bmatrix} \\ &= m + \operatorname{rank} \begin{bmatrix} sI_n - UA \\ C \end{bmatrix} \end{aligned}$$

따라서 $\forall s \in C$ 에 대해서 다음 식을 만족하므로 시스템 $(A, D, C, 0)$ 의 불변영점이 안정해야 한다는 것을 알 수 있다.

$$\operatorname{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D \\ C & 0 \end{bmatrix} = n+m \quad (30)$$

이상의 내용을 정리하면, 다음의 절리를 얻을 수 있다.

정리 2 : 미지의 외부 외란 및 작업오류를 지닌 작업자 모델 (3)식에 대해서 휴먼에러진단 옵저버 (4)식이 존재할 충분조건은 다음 조건을 만족하는 것이다.

$$(i) \operatorname{rank} \bar{D} = \operatorname{rank} D = m$$

$$(ii) \operatorname{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D \\ C & 0 \end{bmatrix} = n+m, \quad \forall s \in C$$

4. 시뮬레이션 및 결과

본 연구에서는 종래의 연구(Kim et al, 2004)에서 구해진 크레인 작업자 모델을 이용하도록 한다. 크레인 작업 모델은 6개의 입력과 2개의 출력으로서 구성되며 Fig. 1과 같이 나타내어진다.

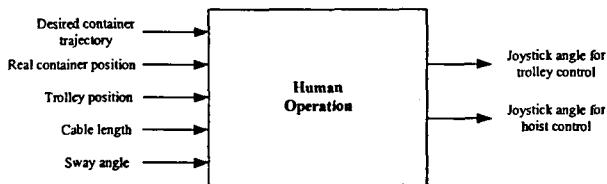


Fig. 1 A block diagram for human operation with input/output terms

본 연구에서는 종래의 연구에서와 같이 입력을 6개로 하고 출력을 2개로 하는 경우에는 정리2의 첫 번째 Rank 조건이 만족되지 않으므로 휴면에러진단 옵저버 계인이 존재하지 않으므로 설계할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 입력을 트롤리의 x 축 위치와 컨테이너 흔들림각으로 제한하여 2입력 2출력 작업자 모델로 가정하여 시뮬레이션을 행하였다.

먼저, 정상적인 상태에서의 시뮬레이션 결과는 Fig. 2와 같다.

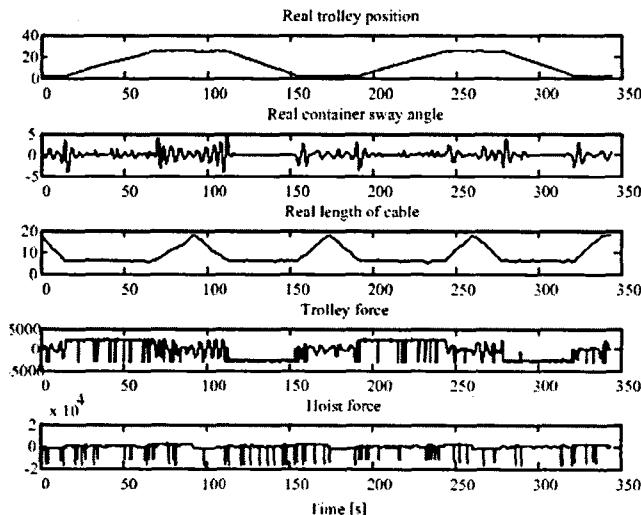


Fig. 2 Reponses of Container Crane in normal Case

위의 결과는 트롤리 및 호이스트 조이스틱을 조작하여 2 cycle 작업수행을 나타내며, 이에 대한 트롤리 및 호이스트 등의 변화값을 보여주고 있다.

휴면에러진단 옵저버의 유효성을 확인하기 위해 본 시뮬레이션에서는 크레인 작업자가 작업부주의로 인하여 트롤리 조작핸들을 50초에서 55초 사이에 과도하게 운전하였다고 가정한다. 이 경우 시뮬레이션 결과는 Fig. 3 - Fig. 6과 같이 나타

내어진다. Fig. 3에서는 작업자 운전실수가 있는 경우의 실제값과 추정값의 트롤리 및 호이스트의 입력 토오크를 나타내고 있다. 위쪽그림은 트롤리에 대한 입력 토오크를 나타내며, 아래쪽 그림은 호이스트에 대한 입력 토오크를 나타낸다. 아래쪽 그림에서는 실제값과 추정값이 정확히 일치하고 있으나, 위쪽 그림에서는 50-55초사이의 실제값과 추정치 값이 서로 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

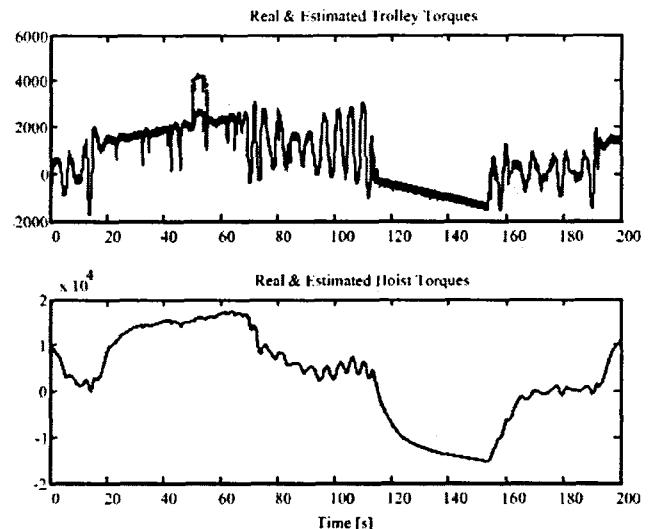


Fig. 3 Reponses of Container Crane with Human Faults

Fig. 4에서는 실제 출력값과 추정된 출력값과의 오차값을 이용하여 작업자 오차를 옵저버로서 추정하고 있다. 여기서 위쪽 그림은 트롤리에 대한 작업자 오차를 나타내며, 아래쪽 그림은 호이스트에 대한 작업자 오차를 나타낸다. Fig. 4의 위쪽그림에서 알 수 있듯이 트롤리 조작에 대한 작업자 오류를 확연하게 알 수 있다.

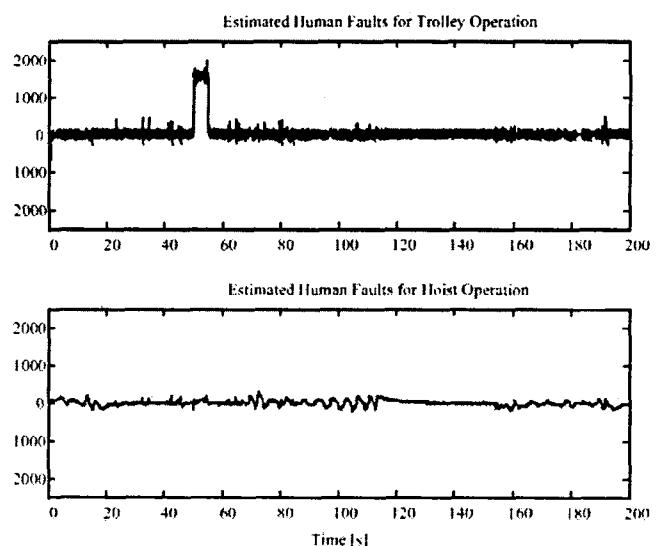


Fig. 4 Estimated Human Faults for Trolley and Hoist

Fig. 6에서는 정상적인 경우와 작업자 오류가 발생한 경우에 대한 오차를 보이고 있다. 여기에서도 트롤리 부분에 대해서 50초 - 55초 부근에서 힘몰되는 현상을 보이고 있으며, 이 현상이 작업자 오류에 의한 것임을 알 수 있다.

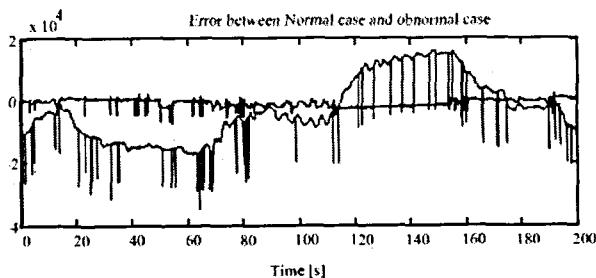


Fig. 6 Error Between Normal case and Abnormal case

따라서, 위의 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안된 휴면에러진단 읍저버의 유효성이 확인되고 있으며, 본 읍저버를 이용하면 작업자의 오류의 크기 및 정확한 진단이 가능함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 휴면에러진단 읍저버를 이용하여 작업자의 작업오류를 진단하는 방법에 대해서 제안하였다. 휴면에러진단 읍저버의 설계조건 및 존재조건 등을 보였으며, 구체적인 예로서 크레인 작업자의 작업모델을 대상으로 하여 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션 결과에서도 알 수 있듯이 작업자의 작업오류를 정확히 진단 및 분리됨을 보였으며, 이로서 본 연구에서 제안된 읍저버의 실제 유효성이 확인되었다.

추후 연구방향으로서는 작업자의 오류를 입력항으로서 가정하였으나, 이를 출력항으로 포함시키는 것이 실질적이므로 이에 대한 연구를 행하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Christensen, J. M. Howard, B. S. Stevens (1981): Human Detection and Diagnosis of System Failures, New York Plenum Press, pp. 111~112
- [2] E. Hagen. (1776) : Reliability Analysis, Nuclear Safety, No. 17, pp. 315
- [3] Rouse William B. and Rouse Sandra H. (1983) : Analysis and Classification of Human Error, IEEE Transactions on system Man, and cybernetics, Vol. SMC-13, No 43
- [4] Shinners S. M. (1947): Modeling of human operator performance utilizing time series analysis, IEEE Trans. Syst. Man Cybem., Vol. SMC-4, no. 5, pp. 446-458.
- [5] Martens D. (1999): Neural networks as a tool for the assessment of human pilot behaviour in wind shear, Aerospace Science and Technology, No. 1, pp. 39-48.
- [6] Yehia M. E. (1995): Human Operator Behaviour Modeling Using Nonlinear Identification Techniques, IEEE, pp. 211-216.
- [7] Charles F. O., Agarwal G. C., Neill W. D. O, and Gottlieb G. L. (1980): Application of time-series modeling to human operator dynamics, IEEE Trans. Syst. Man Cybem., Vol. SMC-10, no. 12, pp 849-860.
- [8] Hwan-Seong Kim, Ngoc Hoang Son Tran, and Seoung-Ho Kim, (2004): Design of Human Works Model for Gantry Crane System, Asia Navigation Conference 2004, pp. 102-112