

工學博士 學位論文

휴먼에러를 考慮한 크레인 作業者의 信賴性
向上에 關한 研究

A Study on Reliability for Crane Handler with Human Errors

指導教授 金 換 成

2005年 8月

韓國海洋大學校 大學院

物流시스템工學科

金 承 鎬

本 論 文 을 金承鎬의 工學博士
學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 郭圭錫



委 員 工學博士 金煥成



委 員 工學博士 南奇燦



委 員 工學博士 金相奉



委 員 工學博士 李珍雨



2005 年 6 月 22 日

韓國海洋大學校 大學院

物 流 시 스 템 工 學 科

金 承 鎬

목 차

| | |
|----------------------------|-----|
| List of Tables | iii |
| List of Figures | iv |
| Abstract | v |
| 제 1 장 서론 /1 | |
| 1.1 연구배경과 필요성 | 1 |
| 1.2 연구방법 및 절차 | 4 |
| 1.3 연구내용 | 7 |
| 제 2 장 휴먼에러의 정의 및 분류 /9 | |
| 2.1 휴먼에러의 개념 | 9 |
| 2.2 휴먼에러의 정의 | 10 |
| 2.3 휴먼에러의 분류 | 11 |
| 2.4 신뢰성 평가방법 분류 | 14 |
| 2.4.1 직무 분석적 방법 | 14 |
| 2.4.2 수학적 모형화 방법 | 15 |
| 2.4.3 주관적 추정 방법 | 16 |
| 제 3 장 휴먼모델 및 맨-머신 상호작용 /18 | |
| 3.1 서 언 | 18 |
| 3.2 휴먼모델 구성 | 20 |
| 3.3 시스템 모델 | 22 |
| 3.3.1 갠트리 크레인 시스템 모델 | 22 |
| 3.3.2 휴먼작업 모델 | 23 |
| 3.3.3 휴먼확인 모델 | 24 |

| | |
|-------------------------------|----|
| 3.4 시뮬레이션을 이용한 휴먼모델 검증 | 30 |
| 3.4.1 실험조건 | 30 |
| 3.4.2 휴먼모델의 결과 | 32 |
| 3.5 결 언 | 36 |
| | |
| 제 4 장 옹저버를 이용한 휴먼에러 검출 /37 | |
| 4.1 서 언 | 37 |
| 4.2 옹저버의 구성 | 38 |
| 4.2.1 문제정의 | 38 |
| 4.3 휴먼에러 진단을 위한 옹저버 설계 | 40 |
| 4.3.1 휴먼에러 진단 옹저버 설계 | 40 |
| 4.3.2 휴먼에러의 검출 및 진단 | 41 |
| 4.3.3 휴먼에러 진단 옹저버의 존재조건 | 44 |
| 4.3.4 시뮬레이션을 이용한 검출결과 | 46 |
| 4.4 결 언 | 51 |
| | |
| 제 5 장 휴먼에러를 고려한 신뢰성 향상설계 /52 | |
| 5.1 서 언 | 52 |
| 5.2 문제정의 | 53 |
| 5.3 휴먼에러 및 외란진단 옹저버 설계 | 54 |
| 5.4 신뢰성 향상 시스템 설계 | 58 |
| 5.5 시뮬레이션 및 결과 | 60 |
| 5.6 결 언 | 64 |
| | |
| 제 6 장 결 론 /65 | |
| 參考文獻 /67 | |

List of Tables

| | |
|--|----|
| <표 2-1> Type of Human Errors | 13 |
| <표 2-2> Comparison of Quantitative Analysis of Human Errors | 17 |
| <표 3-1> Fitness of Human Work Model by ARX Identification Method | 35 |

List of Figures

| | |
|---|----|
| <그림 2-1> Classified Human Errors | 11 |
| <그림 3-1> Human Actions According to Man-Machine System | 19 |
| <그림 3-2> Gantry Crane Dynamics | 22 |
| <그림 3-3> Representation of Human Operation for Gantry Crane System | 24 |
| <그림 3-4> A Block Diagram for Human Work Model | 25 |
| <그림 3-5> A Block Diagram for Human Operation with Input/Output Terms | 25 |
| <그림 3-6> Human Operation Task and Its Trajectory Paths | 31 |
| <그림 3-7> Response of Human Model for Rectangular Trajectory Paths | 33 |
| <그림 3-8> Response of Human Model for Circle Trajectory Path | 34 |
| <그림 3-9> Response of Human Model for Ellipse Trajectory Path | 35 |
| <그림 4-1> A Block Diagram for Human Operation with 2 Input/2 Output | 47 |
| <그림 4-2> Responses of Container Crane in Normal Case | 48 |
| <그림 4-3> Responses Container Crane with Human Faults | 49 |
| <그림 4-4> Estimated Human Faults for Trolley and Hoist | 50 |
| <그림 4-5> Error Between Normal Case and Abnormal Case | 51 |
| <그림 5-1> Configuration of System Input | 59 |
| <그림 5-2> Estimated Human Faults for Crane System | 61 |
| <그림 5-3> Responses of Container Crane Operation with Human Faults | 62 |
| <그림 5-4> Responses of Container Crane Operation with Human Faults Compensation · | 63 |
| <그림 5-5> Responses of Container Crane Operation with/without Human Faults Compensation | 63 |

A Study on Reliability for Crane Handler with Human Errors

Seoung-Ho KIM

**Department of Logistics Engineering,
Graduate School of Korea Maritime University**

Abstract

The accidents such as at Chernobyl and Bhopal have demonstrated unequivocally the importance of considering human error in higher risk systems. For any existing plant, or new one being designed, it is importance to try to assess the likelihood of such accidents and prevent them from occurring. This requires the assessment of the impact of human errors on system safety and, if warranted, the specification of ways to reduce human error impact and/or frequency. For generic approach for assessment of human error, there are three goals, namely: the human error identification is first step to reduce human error in higher risk systems. The second step can provide quantification of error which might be needed to construct a safety case. The final step will develop error data-bases to reduce human error.

Interest in modeling the behavior of a human as an active feedback control device began during World War II, when engineers and psychologists attempted to improve the performance of pilots, gunners, and bombardiers. To design satisfactory manually controlled systems many researchers began analyzing the neuro-muscular characteristics

of the human operator. Their approach was to consider the human as an inanimate servomechanism with a well-defined input and output.

Over the years, the evolution of the control-theory paradigm for the human controller or operator paralleled the development of new synthesis techniques in feedback control. Thus, "optimal control models"(OCMs) of the human operator appeared as linear quadratic Gaussian (LQG) control system design techniques were being developed. "Fuzzy controller" models and "H infinity" models of the human operator closely followed the appearance of these design techniques.

Recently, a human operator (HO) dynamics have been proposed to describe the human operation model in manual tracking tasks. The model has been derived through the application of classical and modern control theory or time-series analysis. Structural isomorphic models were the result of applying classical control theory. These models seek to account for many of subsystem characteristics of the human operator by assigning transfer functions to the different subsystems involved. These subsystems and their interconnections are postulated on the basis of physiologically isomorphic considerations.

Especially, the application of the time-series analysis to this problem was first introduced by Shinnars who developed autoregressive moving-average (ARMA) models of data collected from human operators involved in compensatory tracking experiments using band limited white noise inputs (bandwidth=1.5Hz). In this result, all operators exhibited a time delay 0.2s and the discrete transfer functions that represent their dynamics had one zero and two poles. Based on the analysis of model residuals, he concluded that the human operator is a generator of seasonal (rhythmic) characteristics during tracking of random inputs.

On the other hand, Charles 1980 and Malek 1988 developed a transfer function model from input-output data collected from a HO during both compensatory and pursuit manual tracking experiments. In their experiment, two unpredictable inputs, formed by the addition of five sinusoids, were used. The first had a low-frequency range (0.04-0.8

Hz) and the second had a high-frequency range (0.08-1.48 Hz). For the low frequency range, they were able to fit a transfer function with two poles and no zeros, while a transfer function with two poles and one zero adequately fitted the high-frequency range input-output data. Analysis of model residuals showed no sign of rhythmic characteristics that were observed earlier by Shinnars.

In this thesis, we will apply to input-output data of human operator involved in transport of container by using the time-series analysis, specifically ARX modeling. Our aim is to provide a simple model which use to quantify variations in the HO dynamical behavior in transport of container following given paths, this is a kind of manual tracking tasks. The input data of human operator are reference path, and the state of gantry crane (the position of trolley, the sway angle, and the length of cable; and also the first order and the second order of differentiating of these states). The output data of human operator are two angles in horizontal and vertical handles on the joystick which proportionate with the forces on trolley and cable, respectively.

First, we propose a human model for analysis for human work pattern or human fault, where a gantry crane simulator is used to survey the property of human operation. From the input and output of gantry crane response, we make a human operation model by using conventional ARX identification method. For identify the human model, we assume the six inputs and two outputs. By using the input/output data, we estimate the parameters of ARX of the human system model. For verify the proposed method, we compared the real data with the modeled data, where three kinds of work trajectory path are used.

Second, we deal with an observer design for detecting the human faults in container crane operation, where an observer for detecting the human faults was proposed and the existing condition for the observer was shown. 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 detect the human faults perfectly, thus the efficiency of proposed observer is shown.

Lastly, we proposed an reliable improvement procedure for control the gantry crane with human operation. In here, the control input for gantry is compensated by human errors, where the human errors are detected and isolated by previous observer design results. In simulation, we verify that the constructed reliable control procedure for gantry crane system can improve the total human-machine operation system.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경과 필요성

산업구조가 복잡해지고 설비가 대형화되고 있는 현대사회는 기계·설비의 신뢰도가 급속하게 향상되고 있으며, 맨-머신 시스템으로 작업을 하는 수행능력 또한 계속 발전해 가고 있다. 이렇게 산업 시스템이 복잡해지고 발전 속도가 빨라지는 반면 작업자의 정보처리 능력은 이를 따라가지 못해서 대형재해가 끊임 없이 발생되고 있다. 이러한 대형재해 발생의 원인을 보면 인간실수로 판명되는 경우도 증가하고 있는 실정이다.

Chernobyl 원자력 발전소의 참사(1985년, 소련), Bhopal시의 가스누출(1985년, 인도), 점보제트기의 추락(1985년, 일본), Challenger호 폭발(1986년, 미국) 사고와 같은 대형 사고의 원인이 인간실수(Human Errors)로 지적되면서 위험도가 높은 시스템 전체의 안전요소에 대한 평가와 인간실수에 대한 평가가 관심의 대상이 되고 있다.

비록, 전체시스템에서 인간실수의 결과가 바로 드러나지 않는다 하더라도 시간이 경과되면서 다른 조건이나 사상(Event)과 결합되어 시스템에 부정적 영향을 미치게 되며, 잘못된 행위나 의사결정으로 막대한 물적, 인적, 경제적 손실을 가져오는 것이다.

Christensen(1981)은 전자장비 전체고장의 50%에서 70%, 항공기 전체고장의 60%에서 70%, 미사일 시스템 전체 실수의 20%에서 53%가 인간과 관련된 것으로 밝히고 있고, Hagen(1776)은 전체 실수의 약 10%에서 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 등의 사실에서 보면 시스템에서의 고장 중에 20%에서 90%정도가 인적실수로 인하여 유발되는 것으로 추정되고 있다(Park 1989 ; Lee 1988). 거의 완벽

하다고 믿었던 시스템도 의사소통이나 정보전달 체계상 에러가 발생할 수도 있다. 따라서 인간 신뢰도를 적절하게 고려하지 않고 시스템을 설계하거나 분석하는 것은 불완전할 수밖에 없는 것이다 (Dhillon 1990).

이와 같이 시스템의 설계, 운용 등에 있어 인간실수의 평가를 필요로 하고, 인간실수의 빈도를 줄이는 방법에 대하여 관심이 고조되고 있기는 하지만 아직도 많은 부분에서 등한시되는 실정이다.

우리나라의 경우를 보면 산업재해를 직접적 원인과 간접적 원인으로 분류하고 있으며 인적과오를 직접적 원인중의 하나로 보고 산업재해의 원인을 분류하고 있다. 직접적 원인은 물리적 원인과 인적 원인으로 분류하여 인적원인을 불안정한 행위 요인으로 규명하고 있으면서 직접적 원인 중 인적실수로 인한 재해가 87.2%에 이른다(노동부; 2004). 하지만 간접적으로 재해를 유발시킨 인적실수로 인한 피해를 종합해 보면 더 많을 것으로 짐작할 수 있다.

이와 같이 직접적 원인을 초래하는 인적에러는 설비와 인간간의 상호작용으로 인한 것임을 생각한다면, 인적실수 예방에 대한 투자뿐만 아니라 열악한 작업환경을 개선시켜 나가지 않는다면 상황은 나아지기 어렵다고 할 수 있다.

인간을 능동적 피드백 장치로 보고 인간행동을 모델링하고자 하는 시도는 2차 대전 중에 비행사, 사격수, 포격수의 수행을 향상시키기 위해 공학도와 심리학자들에 의해 시작되었다. 이들은 수동으로 조작되는 고효율의 시스템을 설계하기 위하여 운전자들의 신경-근육 특성을 분석하기 시작하였다. 그 후에도 이러한 문제를 해결하기 위한 후속의 연구가 계속되었다 (Malek 1988; Shinnars 1947; Martens 1999; Yehia 1995; Carles 1980; Kim 2003).

최근에는 환경으로부터의 자극에 대한 인간행동에 자동제어의 이론을 적용하여 인간의 피드백 특성이라든가 메카니즘의 특성을 공학적으로 설명하고자 하는 경향이 일어나고 있다.

예를 들면 자동차를 운전할 때 핸들각의 변화에 의해서 횡방향의 위치를 바꾸게 되면 시야에 들어오는 부분의 입력과 자동제어에 의한 출력으로의 인과관계를 폐쇄회로로 만들고 그 회로의 속을 순환하게 되는 이런 피드백 시스템을

전기 용구, 자동제어 기구 등에서 활용하고 있다.

이렇듯 우리생활에 인간의 메커니즘을 활용한다면 편리함을 가져다줄 수 있지만, 에러가 발생할 경우 큰 피해를 가져다주는 인간의 실수에 대한 지식은 행동의 평가뿐 아니라 시스템의 주어진 기능을 얼마나 잘 수행하고 있는가를 나타내는 척도로 사용될 수도 있다.

시스템 에러가 작업자의 실수로 발생된다고 할 수 있지만, 시스템 설계상에서 실수를 유발하는 요소들은 찾아서 제거함으로써 신뢰성 있는 맨-머신 체계가 구축될 수 있을 것이다.

맨-머신 설계에서는 상호간의 연결을 여러 특성과 능력을 고려하여 인간의 기능이 그 시스템에서 어떤 역할을 할 것인가 하는 문제가 고려되어야 한다. 이를 통하여 시스템은 주어진 업무 수행의 유용성이나 능률, 작업자의 만족 그리고 안전성과 같은 기준을 충족시키면서 전체시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있기 때문이다.

인간이 작용하는 과정 중에서 발생하는 에러는 시스템 에러의 중요한 요인으로 간주되고 있고 그 예측이 어려운 것으로 알려져 있다. 물리적 규칙 하에 일정하게 작용하고 변화하는 물적 설비의 신뢰성 관리에 있어서는 측정이나 일정수준을 유지하는 것이 어느 정도는 가능할 수도 있지만, 인간의 행동은 변화정도가 심하고 다양하므로 인적 신뢰성의 측정이나 에러에 대한 대비는 지극히 어려운 문제가 된다. 또한 인간이 작업하는 곳에서 교육훈련이나 숙련, 기술수준의 정도와 관계없이 휴먼에러가 발생할 수 있는 것을 고려한다면, 전반적인 시스템의 신뢰성 관리는 결국 인적 신뢰성의 관리가 관건이라고 할 수 있다.

신뢰도를 증가시키기 위한 인간실수 평가 연구는 접근하고자 하는 목표에 따라 일반적으로 다음의 세 가지 단계로 구분할 수 있다. 첫 단계는 위험이 높은 시스템에서 인간실수를 찾아내는 것이고 두 번째 단계는 이 실수 중 안전한 것으로 허용할 수 있는 실수를 정량화하여 제공할 수 있는 것이며, 세 번째 단계는 인간실수에 대응하기 위한 실수 데이터베이스를 개발하는 것이다.

이러한 인간의 실수가 발생되지 않도록 하는 시스템의 목표를 달성하기 위해

서는 설비와 인간간의 상호작용 과정을 시스템이 추구하는 목표와 서로 일치하도록 조직화시켜야 가능할 것이다. 사고가 맨-머신의 상호작용으로 인하여 발생하는 것임을 생각한다면, 인적실수 예방에 대한 투자를 소홀히 하고 개선시키려는 노력을 하지 않을 경우 인간실수에 의한 재해는 당연히 일어날 수 밖에 없다.

최근 인간 신뢰도 분석에 있어 인간실수의 관심이 고조되는 경향이 나타나고 있지만 이 문제에 대하여서는 아직도 연구가 미흡한 실정이다.

한편, 항만산업에서도 항만의 서비스는 선사유치를 비롯한 항만 간 경쟁에 중요한 요소로서 항만을 운영하거나 장비를 조작하는 작업자의 신뢰도에 직접 의존하고 있어 항만내의 작업자 실수가 대형재해를 가져올 수 있으므로 관심을 가져야 할 것이다.

본 논문은 항만서비스에 활용되는 크레인 작업의 휴면모델에 있어서 휴면에러를 진단하고 신뢰도를 평가하는 방법 및 절차를 제시하며, 인간실수로 발생하는 문제를 옹저버를 이용하여 시스템에 적용함으로써 신뢰성을 검증하고자 한다.

1.2 연구방법과 절차

인간의 실수와 관련된 신뢰성 문제는 전체 시스템에 크게 영향을 주고 있으며 맨-머신 시스템에 있어서 제품, 설비, 장치, 작업절차 및 환경 등과 인간간의 상호작용을 규명하여 적합성을 향상시키는데 초점을 두고 있다.

다만 접근방법에 있어서 인간공학이 기술적이며 공학적인 사고를 강조하는 반면, 인간행위 공학은 사물의 설계가 인간에 어떠한 영향을 미치는가에 중점을 두어 설명하는 차이점을 두고 있다.

맨-머신 시스템에 대한 설계, 분석 및 평가에 대한 접근에는 두 가지 상반된 견해로 구분되고 있는데 이론을 보면 과학기술 중심주의(Techno-Centric)의 이론과 인간 중심주의(Anthropo-Centric)의 이론으로 설명될 수 있다.

과학기술 중심적인 접근방법에 의하면 맨-머신 시스템은 보통 실제의 기술을

실현 가능한 기능상의 필요한 기준으로 분석하고 설계한다. 그리고 이러한 시스템 평가는 기술적이고 실행 가능하며 경제성을 기준으로 하여 이루어진다. 인간은 기계와 비교하여 훨씬 더 효과적으로 수행할 수 있는 부분만을 담당함으로써 기능 수행의 부담이 감소되는 것으로 간주하고 있다.

반면 인간 중심적인 접근방법에 의하면 인간은 의식적이며 의도적인 행동을 하는 까닭에 불확실한 상황 하에서 인간의 행위를 계획하고 통제할 수 있는 것으로 간주하고 있다. 이는 맨-머신이 상호작용함에 있어서 충분히 목표를 인식할 수 있기 때문에 시스템이 분석되고 설계되어야 할 필요가 있음을 시사하는 것이다. 따라서 인간과 기계간의 상호작용은 인간의 특정 능력을 활용하여 산출될 수 있는 결과나 인간이 인내할 수 있는 작업의 부하로부터 근거가 마련되고 조정되어야 할 것이다.

이러한 접근 방법들은 맨-머신 시스템을 기술적 시스템의 관점에서 고찰할 경우 작업구조와 기술적 구성 요소들 간의 관계가 완전히 설명되지 않고 있기 때문에 여전히 그 성격의 규명에는 논란의 여지가 있을 것이다. 그러나 행동 심리학이 보편화되면서 자극과 반응만 존재하는 인지적 사고를 과학적인 현상으로 판단하려는 경향이 있다.

이런 상황에서 기술적 시스템에서 보면 인간의 상호작용과 기술적 시스템으로 작업할 때 나타나는 작업부하와 효과를 설명할 수 있는 이론적 개념의 필요성이 야기되는 것이다.

이것은 인간의 행위가 이론적이고 목적을 인식한 상태에서 이루어지는 것이며, 계획 범위 내에서 스스로 통제할 수 있는 것으로 간주하기 때문에 단순히 행동 과학적인 자극-반응 모형으로 설명하기보다 심리학적 이론으로 설명할 수 있어야 한다고 할 수 있다.

맨-머신 시스템에서는 인간의 작용이 필요한 모든 활동 단계마다 인간실수에 의한 사고 가능성이 내포된다. 이러한 가능성의 분석에 필요한 특성을 보면 작업환경과 작업조건에서 인간의 수행능력 인간의 직무수행 능력에 따라 영향을 받는 기계, 설비의 특성 작업자의 특성이나 업적과 시스템과의 관계 등

으로 볼 수 있는데 좀더 구체적으로 규명되어야 할 필요가 있다.

이러한 문제의 규명을 위해서는 인간, 설비, 기능 및 직무, 환경적요인과 다른 상호관계를 고찰하면서 시스템의 인적요인에 대한 적합성을 추구해 나가야 할 것이다. 따라서 맨-머신 시스템에 있어서 인간의 적합성을 향상시켜 나가면서 인간의 에러를 줄이기 위해서는 여러 가지 접근방법이 적절히 조화되어야 한다.

주어진 설비가 특정 환경 하에서 특정한 시간동안 정상적으로 가동할 확률을 신뢰도라 한다면, 설비의 고장은 외부의 부하 없이도 발생하여 나타나는 것으로 신뢰도는 시간의 함수가 되는 것이다. 또한 외부의 부하가 존재한다고 해도 언제 도래할 것인가에 대해서는 알 수 없기 때문에 그 발생은 확률로 표현할 수 밖에 없다.

인간의 판단에 관계없이 그 행위가 기계에 전달되고 있지만 시스템에서는 기계가 인간에 대해서 신뢰의 기준을 검출하고 휴먼에러를 통하여 시스템의 결함이 나타난다. 이것은 기계를 조작할 경우 계속적으로 기계로부터의 간섭과 반작용을 받기 때문에 하나의 시스템으로 생각하는 것이다.

맨-머신 시스템에서 인간과 기계의 기능분배, 적합성, 작업환경 검토 등의 역할이 기계 자체의 결함으로 인하여 발생하는 경우는 고려하지 않고, 인간의 오판으로 인한 실수만을 고려하거나, 기계가 정상적으로 작동하고 있다고 할 때에도 인간의 오판만을 고려하는 것은 하나만이 정상적으로 작동하고 있다 해도 다른 한쪽의 에러는 나타나게 되는 것으로 치명적인 실수가 시스템 전체에 나타나게 되는 것이다.

따라서 실수를 방지하기 위해서는 휴먼에러의 모델을 검증하거나 옹저버를 이용하여 에러를 검출한 후 신뢰성 향상 방법을 제안함으로써 시스템에서의 휴먼에러는 설비의 고장이 발생할 경우에도 정상상태로 가능하게 할 수 있을 것이다.

이러한 휴먼에러로 인한 인간실수 분석을 위해 인간모델을 제안하고, 항만물류 산업의 기반이 되는 갠트리 크레인에서의 운전자의 속성을 파악함으로써 제

안된 방법을 입증할 수 있는 운전모델을 연구하여 신뢰도를 향상시키고자 한다.

1.3 연구내용

맨-머신 시스템에 있어서 시스템에 영향을 미치는 에러는 기계적인 실수에 의한 에러와 교육훈련, 경험, 기술 수준과는 관계없이 인간의 잘못으로 인하여 발생하게 되는 에러가 있다. 인간은 단독작업과 공동작업으로 하는 경우, 또는 교대작업으로 하는 경우의 성과는 기계작업과는 상당한 차이가 있다.

따라서 시스템의 신뢰도 평가에 있어서 Embrey(1976)가 지적한 것처럼 인간 실수를 적절히 고려하지 않았을 경우 인간 및 시스템의 성취에 관한 추정치가 지나치게 높은 수준으로 평가될 수 있으며 이는 불완전한 것일 수밖에 없다.

맨-머신 시스템의 설계에는 인간과 기계간의 연결을 인간의 여러 특성과 능력에 결합시켜 인간의 기능이 그 시스템에 어떻게 역할하도록 할 것인가 하는 문제가 고려되어야 한다. 그래야만 시스템은 유용성과 능률, 작업자 만족 그리고 안전성과 같은 기준을 충족시키면서 전체 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있기 때문이다.

왜냐하면 인간공학은 인간이 어떤 대상을 이용하는 절차나 사물의 설계 그리고 그들이 이용하는 환경에 대하여 인간의 능력, 한계, 특성, 습관 및 동기에 관한 적절한 정보를 체계적으로 적용해 가는 것을 대상으로 하는 학문이기 때문이다.

인간에러는 기대하고 있는 인간의 수행과는 맞지 않는 경우, 효과성이나 안전, 또는 시스템 수행을 감소시킬 수 있는 부적절하거나 바람직하지 못한 인간의 결정이나 행동으로 나타나는 경우, 규정이나 절차를 알고도 위반하는 것이 규정이나 절차를 지키는 것보다는 작업을 더 빨리 수행하는 것이 효과적이라고 생각하는 경우에 나타날 수 있다.

인간이 실수할 경우를 보면 정확도나 순서 혹은 시간의 한계 내에서 주어진 행위를 하지 못하고 그 결과로 장비나 재산의 파손 그리고 작업중단을 발생시키

지만 변화특성을 가진 인간으로서는 어떤 일을 꼭 같은 방법으로 반복하지 않고 우발적인 행동을 초래하기도 하며, 따라서 인간공학적 배려가 없다면 실수에 적절히 대응하지 못해서 실패를 발생시키기도 한다.

맨-머신 시스템은 주어진 입력으로부터 목표로 하는 결과를 얻기 위한 상호작용의 관점에서 인간과 기계의 결합체로 생각할 수 있다. 시스템 개발의 목적은 시스템과 인간 모두 만족할 수 있는 방법을 목표로 설정하여 달성될 수 있도록 설비, 환경, 개인적 변수, 업무 등이 조성되어야 한다.

본 논문에서는 시스템의 신뢰성을 향상시키기 위해서 제1장은 이론적 배경, 제2장은 휴먼에러의 정의 및 분류, 인적과오의 발생과 분류체계에 관련된 기존 이론 그리고 신뢰성 평가 방법을 고찰하였고, 제3장에서는 항만물류에서 중요시되는 갠트리 크레인의 운전자의 작업 모델을 제시하고, 갠트리 크레인에 의한 시뮬레이터가 인간 속성을 전달하고 사용하는 것을 고찰하였다.

제4장에서는 시뮬레이션을 이용한 옹저버를 설계함으로써 휴먼에러를 검출할 수 있는 처리기준, 처리방법에 어떤 특정적인 영향 패턴이 있는지를 고찰하였으며, 제5장에서는 휴먼모델 설계 시에 인적실수가 어느 정도 영향을 미칠 경우 휴먼에러의 검출로 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였고, 또한 제6장에서는 연구결과의 요약과 연구의 한계를 제시하였다.

제 2 장 휴먼에러의 정의 및 분류

2.1 휴먼에러의 개념

인간공학은 인간이 작업하는 경우에 가장 자연스럽게 일을 하는 방법으로 사람과 주변 환경과의 관계를 함께 연구하는 것을 다루는 학문으로 학자마다 주장이 다르다.

Alphonse Chapanis(1976)는 인간의 특성과 능력 및 한계에 관한 정보를 기계, 설비, 환경의 설계 작업 시에 응용해서 안전하고 쾌적하며 효율성 있게 작업하게 하는 것으로 기계와 조화 있는 관계를 만드는 것이라 하였으며, Ernest. J. McCormick(1987)는 넓게는 인간이 기계나 물건을 사용할 경우에 기술의 시스템을 말하고, 좁은 뜻으로는 작업과 환경을 정신적, 신체적 능력에 적합하게 하는 인간의 과학이라고 하였고, W. E. Woodson(1964)은 맨-머신 시스템의 작업 능률이 향상되게 각종 기계·설비를 설계하는 것으로 여기에는 정보의 표시방법이나 제어방식도 포함되어야 한다고 하였다.

인간공학의 몇 가지 관련된 용어를 살펴보면 미국을 비롯한 몇 나라에서는 Human Factor란 용어를 사용하지만 이러한 명칭 외에 Human Factors Engineering, Engineering Psychology, Applied Experimental Psychology 등을 쓰고 있고 유럽에서는 Ergonomics라는 용어를 통용하기도 한다. Ergonomics라는 말의 어원을 따르다면 작업(Ergon)의 법칙(Nomos)에 관한 연구로 해석 할 수 있다. 이 어원에서 찾아 볼 수 있듯이 인간이 지니고 있는 여러 가지 속성들을 연구하여 이에 맞는 환경을 제공하고자 하는 것이다.

ISO(International Standard Organization)¹⁾에서는 인간의 건강, 안전, 복지, 작업

1) Ergonomics produces and integrates knowledge from the human sciences to match jobs, system, products the environments to the physical and mental abilities and limitations of people. In doing so, it seeks to improve health safety, well-being and performance.

성 등의 개선을 요구하는 작업, 시스템, 제품, 환경을 인간의 신체적, 정신적 능력과 한계에 부합하도록 인간과학으로부터 지식을 창출하고 통합하는 것이라 하였고 기계를 설계·제작할 때나 작업장 환경을 조성하는데 있어 조명, 소음, 환기 등 인간이 사용하기에 편리하게 만들어야 하고 작업자가 쾌적하게 느낄 수 있도록 하여야 하는 것이 인간공학이라 하였다.

따라서 심리학, 의학이 중심이 되어 공학, 생리학, 형태학, 운동학, 사회학, 노동과학 등의 여러 학문의 협력으로 연구가 진행되고 있다. 그러므로 인간공학은 종합과학으로 하나의 영역만으로 제한되어서는 달성할 수가 없는 것이다.

2.2 휴먼에러의 정의

휴먼에러는 허용범위를 벗어난 일련의 불안정한 행동으로 D. Meister(1965)는 인간실수에 대해 시스템으로부터 요구된 작업수행도의 결과에서 시스템의 성능, 안전 또는 효율을 저하시키거나 감소시킬 잠재력을 갖고 있는 부적절하거나 원치 않는 인간의 결정 또는 행동으로 어떤 허용범위를 벗어난 일련의 인간동작 중의 하나를 휴먼에러라 하였다.

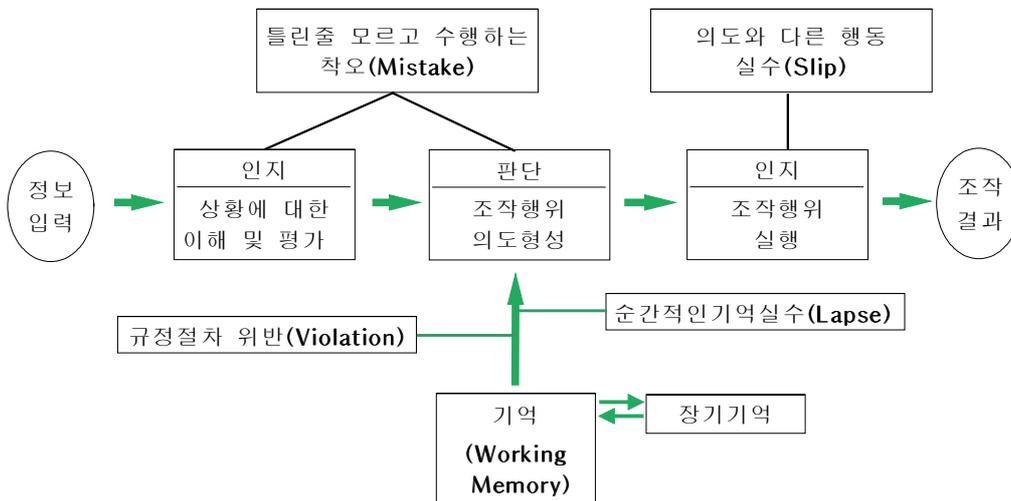
운전자(Operator)의 에러 원인을 2가지의 범주로 나눌 수 있다. 하나는 운전자 개인의 특이요인(Idiosyncratic Factor)에 의한 것으로 능력이나 훈련의 부족, 동기의 부족 등이 이에 속하고 이는 작업자가 주어진 직무의 수행에 필요한 기능을 갖추어 해결해야 하는 것이며, 다른 하나는 상황요인(Situational Factor)으로 장치나 기기의 필요한 기술 자료의 부적절 등 시스템 부적합(System Inadequacy)에 의하는 것이며, 시스템 개발에 참가한 기술자의 책임을 논하게 되는 것이다. 이러한 구분은 작업자 개인에게 책임을 전가하는 것보다 오히려 시스템 개발의 중요성과 책임성을 중요시하고 있다고 보아야 한다.

A. D. Swain(1983)은 인적실수를 허용되는 한계를 넘어서 나타난 일련의 인간행동으로, 인간이 원인이 되는 HCE(Human Caused Error)와 작업상황이 원인이 되는 SCE(Situation Caused Error)로 구분하고 있다.

2.3 휴먼에러의 분류

휴먼에러는 인간에러 또는 인적에러라는 용어로 사용되기도 하고, 휴먼에러에 대해서는 에러의 정의가 복잡하기 때문에 여러 나라의 경우를 보더라도 에러의 의미를 나타내는 언어가 매우 많다. 잘못, 실수, 과실, 착오 또는 에러, 오류, 가벼운 실수(Slips), 위반(Violation) 등이 있는데 각각의 의미는 똑같다고 볼 수는 없으나 사용하는 데 있어 정해진 규칙은 없는 것 같다.

작업 중 에러로 인한 사고나 재해가 근절되지 않고 있는데 Reason(1983)은 휴먼에러를 4가지로 구분하고 있다. Slips는 일상적인 에러로 자신의 의도와는 다르게 반응하여 나타나는 것이며 Mistake는 지식이 부족하거나 부정확한 지식 때문에 의도자체가 잘못되게 나타나는 에러이고 Faults로 불리기도 한다. Lapse는 순간적인 기억 실수로 인하여 나타나는 에러이고, Violation은 규정이나 절차를 알고도 그대로 하지 않고 위반하여 나타나는 에러를 일으키는 것이다. <그림 2-1>



<그림 2-1> Classified Human Errors

또한 A. D. Swain(1983)은 필요한 직무, 기능 또는 어떤 단계를 수행하지 않은 경우의 Omission Error, 직무를 수행하는 과정에서 순서를 잘못 지켜 일어난 Commission Error, 직무를 수행하는 과정에서 순서를 잘못 지켜 일어난 Sequential Error, 소정의 시간 내에 직무를 수행하지 못한 경우로서 너무 늦거나 너무 빠른 경우의 Time Error, 하지 않아도 될 직무를 불필요하게 수행하여 일어난 에러를 말하는 Extraneous Error로 분류하였다.

Alphonse Chapanis(1987)는 심리학 입장에서 신호 에러, 작업 공간 에러, 지시 에러, 시간 에러, 예측 에러, 연속응답 에러로 분류하였고 L. W. Rook(1962)은 제품의 설계단계에서 사용단계에 이르는 사이의 여러 가지 과정에서 인간공학적 설계에서의 에러, 제작 에러, 검사 에러, 설치 에러, 보수의 에러, 조작 에러, 취급 에러로 분류하였다.

D. Meister(1964)는 인간공학적 설계가 되지 않는 에러의 원인을 시스템 개발의 단계별로 구분하였다. <표 2-1>

<표 2-1> Type of Human Errors

| 시스템의 개발 | 에러의 형태 | 에러의 원인 |
|---------|--------------------------------|---|
| 설 계 | · 설계 에러 | · 인간공학적 설계 미비 · 필요조건의 불만족 · 부적절한 기능 분배 |
| 제 조 | · 제작 에러 · 점검 에러 | · 부정확한 지시 · 부정확한 메모 · 부적당한 환경 · 부적당한 도구 · 부적당한 훈련과 기술 · 작업장의 배치 불량 · 인간공학적 설계 미비 |
| 검 사 | · 보전의 에러 · 설치 에러 · 조작 에러 | · 부적당한 정비, 보관상태 미흡 · 인간공학적 설계 미비 · 부적당, 불완전한 기술자료 · 작업장의 배치 불량 |
| 조 작 | · 보전의 에러 · 설치 에러 · 조작 에러 | · 부적당한 정비, 보관상태 미흡 · 인간공학적 설계 미비 · 부적당, 불완전한 기술자료 · 작업장의 배치 불량 · 과부하 조건 · 일의 복잡성 · 부적당한 사람의 선택 · 부적당한 환경 |

2.4 신뢰성 평가방법 분류

인간 신뢰도 분석(HRA, Human Reliability Analysis)은 대규모 맨-머신 체계에 대한 전체 위험평가의 중요 부분으로 개발되었다. 이들의 방법을 살펴보면 다음과 같다.

1950년부터 관심을 갖고 시작한 HRA에 관한 최초의 연구 중의 하나로 미국의 Sandia National Lab(SNL)에서 핵무기 체계에 대해 수행되었는데 이 연구에서는 고전적인 신뢰도 분석방법이 채택되었다.

1964년 THERP(Technique for Human Error Rate Prediction)가 일반적인 HRA방법으로 오랫동안 인식되었다. 인지오류(Cognitive Error) 또는 진단오류(Diagnosis Error)를 취급할 수 없다는 것으로 이러한 문제를 해결하기 위한 시간척도를 이용하고자 Swain & Guttman(1983)에 의해 'HRA 핸드북'이 완성되었다 (Fujita 1994).

1970년 말부터 HRA방법들이 제시되었고 TMI(Three Mile Island)사고가 발생한 1979년에 연구 활동이 시작되었다. 신뢰성 평가 방법으로는 인간 체계에서의 HRA방법인 인적오류를 정량화하기 위한 방법으로 3가지로 설명하였다. 직무 분석적 방법(Task-Analytic Method), 수학적 모형화 방법(Mathematical Model Method), 주관적 추정방법(Subjective Estimation)으로 분류할 수 있다 (Park 1987; Cacciabue 1988).

2.4.1 직무 분석적 방법

특정한 작업을 수행하는 일은 여러 번 반복될 수가 있고 다른 형태로도 나타난다. 이러한 작업에는 여러 오류가 발생된다. 이 방법은 스위치를 작동하거나, 밸브를 닫거나, 계기를 읽는 것과 같은 기본행위 요소로부터 더 복잡한 직무들의 오류발생 확률을 정량화하기 위하여 과거의 자료들로부터 각 요소에 포함된 실패 확률을 결합하는 방법이다. 이 기법들을 “분해(Decomposition)” 접근 방법

이라 한다 (Cacciabue 1988).

맨-머신 체계에서 기본적으로 고려되는 각 요소들의 실패 확률로부터 분석하여 작업의 성공과 실패를 표시하는 것으로 대표적인 방법이 Swain & Guttman(1983)에 의해 제안된 THERP이며 작업자가 분석하고자 하는 직무의 실패를 유발할 수 있는 가능성을 정량화하는 방법이다.

인간 신뢰도 분석에 있어서 가장 많이 사용되어진 기법으로 연속적인 이산적 (Discrete)행위에 의해 수행되는 직무에만 적용될 수 있고 각 행위를 단지 성공 실패의 의사결정 분자로 모형화 한다는 단점이 있다.

Siegel, et al(1962)은 시스템 어디에서 과도 혹은 과소한 부하를 주는가를 나타내고 작업자가 요구하는 모든 직무를 규정된 시간 내에 완수할 확률을 결정할 수 있는 컴퓨터 모의실험방법을 개발하였다.

Hal, et al(1982)은 위급한 작업의 순서에 초점을 맞추어 조작자 행동나무 (Operator Action Tree; OAT)를 이용하여 사건의 위급경로에서 운전자의 역할을 분석하였고 여러 단계에서 조작자의 선택에 따라 성공 혹은 실패로 가는 경로의 분자를 나타내었다.

2.4.2 수학적 모형화 방법

Regulinski(1969)는 시간 연속적 직무에서 인간이 수행할 경우 신뢰도를 정량화할 수 있는 모형을 제시하였는데 이 모형을 전통적인 신뢰도 모형과 비슷한 형태를 갖고 있었다.

Cacciabue(1988)는 수학적 모형화 방법을 인적오류의 발생에 대해 일정한 확률 분포를 가정함으로써 시간기간 동안 인적오류가 발생할 정량화 방법을 시간의 함수로 가정하여 고전적인 신뢰도 기법과 같은 개념으로 적용하는 방법이다. 이산작업에서 학습을 포함한 인간 신뢰도를 변하지 않는 Bernoulli과정으로 묘사하는 수학적 모형을 제시하였고 시간 연속적 작업에 있어 학습 등에 의해 실패율이 변하는 경우 인간 신뢰도를 정량화 할 수 있는 비 균질(Non-homogeneous)

포아송 모형을 제시하였다.

Hannaman, et al(1984)는 상황이 아닌 중에서도 작업자에게 허용된 시간에 종속되어 있다는 가정 하에 작업자가 허용된 시간 내에 필요한 행위를 수행할 확률을 정량화 할 수 있는 인간 인지 신뢰도(Human Cognitive Reliability : HCR) 모형을 개발하였다.

2.4.3 주관적 추정방법

어떤 작업에서의 인간 신뢰도를 정량화하기 위해서는 작업에서의 인적 실수를 알아야한다 (Park 1987). 이들 인적실수 확률을 추정하기 위한 가장 좋은 방법은 과거의 경험적 자료를 이용하는 것이지만 실제적으로 실수 확률을 추정하기 위해 이용할 자료가 거의 없어서 이러한 경우에는 보통 전문가의 주관적 확률 추정치를 사용한다(Comer, et al. 1983 ; Park 1987).

타당성이 있는 HEP(Human Error Performance)를 얻는 문제는 인간 신뢰도 문제에서 본질적으로 가장 중요하지만 현재의 기술 상태 하에서는 어려움이 있다.

Comer, et al (1983)는 쌍 비교(Paired Comparisons), 절대 평가법(Absolute Estimation), 순위법(Ranking), 등급법(Rating)의 추정 방법의 네 가지에 대하여 주관적 확률 추정 방법에 대한 평가와 실제적 적용 방법을 제시하였다.

쌍 비교법은 각 사건의 쌍에 대해 어느 사건의 발생 가능성이 높은지 판정하는 주관적 자료를 구하고 각 쌍의 사건에 대한 발생 가능성을 상대적으로 비교한다는 장점을 갖고 있지만 발생 가능성의 크기가 얼마인지는 알 수 없고 동일한 발생 가능성은 허용하지 않는다는 단점을 갖고 있다.

절대 평가법은 각 사건의 발생 확률을 하나의 수치로 직접 추정 할 수 있다는 장점이 있지만 판단자료의 신뢰성에는 의문을 갖게 한다. 순위법 및 등급법은 확률을 추정하고자 하는 각 사건들의 순위와 등급에 의한 주관적 판단자료를 이용하는 방법으로 쉽게 사용할 수 있다는 장점을 갖고 있지만 순서 및 등급이 확률로 변환되는 과정에 있어서 이론이 부족하다는 단점을 갖고 있다.

작업상황에서의 인적실수가 몇 개의 수행도 형성인자(Performance Shaping Factor; PSF)의 결합에 영향을 받을 수 있다는 가정 하에 작업자의 성공 가능성을 추정할 수 있는 SLIM(Success Likelihood Index Method)기법을 제시하였다. 이 방법은 Apostolakis(1988)에 의하면 가중치와 평점처리가 내부적으로 일관성이 없지만 인적실수를 추정 할 수 있는 구조화된 접근방법을 제공하고 있고 주관적 판단에 있어서 인간의 절대 판단에 의존하고 추정된 인적실수 확률이 1을 넘을 수 있다는 단점을 갖고 있다. 인적실수에 정량화 기법 중 많이 활용되는 기법을 비교하면 <표 2-2>와 같다.

<표 2-2> Comparison of Quantitative Analysis of Human Errors (Sayers. 1988)

| 분석기법 평가척도 | 절대평가 | 쌍비교법 | SLIM | HCR | THERP |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| maturity | high | moderate | moderate /high | low | high |
| validity | moderate /high | moderate | moderate | low | moderate |
| accuracy | moderate | moderate | moderate | low | moderate |
| acceptability | moderate | moderate /high | moderate /high | low /moderate | high |
| usefulness | moderate /high | low /moderate | high | low /moderate | low /moderate |
| effective use of resources | moderate | low /moderate | low /moderate | moderate | low /moderate |

모든 기준에 대해 다른 방법들 보다 항상 우수한 방법은 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 분석 대상 및 분석 목적 등에 따라 적당한 방법을 사용하여 한다.

제 3 장 휴면모델 및 인간-기계 상호작용

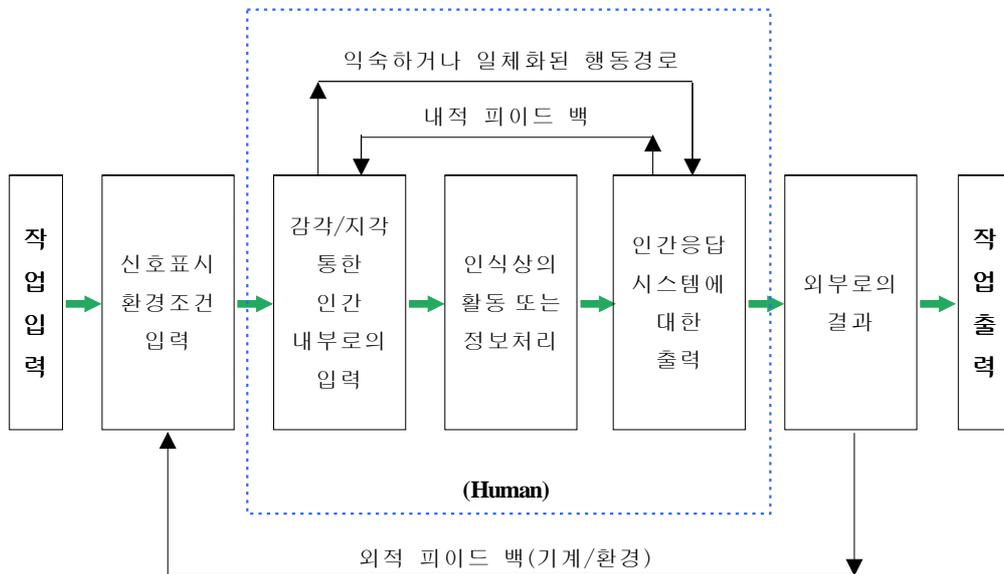
3.1 서 언

현대 산업사회에서 수행되는 작업의 많은 부분이 자동화에 의해 이루어지고 있음에도 불구하고 인간에 의해 야기되는 문제들은 여전히 발생하고 있는 실정임을 앞장에서 설명하였다. 이것은 인간이 시스템을 설계, 생산, 운영하는 단계에서 중요한 역할을 수행하기 때문이며 이러한 인간의 역할은 시스템에 따라 달라질 것이다.

이와 같은 시스템은 특정한 목표를 달성할 수 있도록 방향이 설정되어야 하고 작업자에 의해 조작되는 기계는 계획된 양에 얼마나 도달 하는가 하는 것이 평가 기준이 될 것이다.

맨-머신 시스템 설계는 시스템에 대한 효과를 제고하기 위하여 인간의 기여가 최대화 될 수 있도록 하거나 시스템에 영향을 미칠 수 있는 역할을 감소시킬 수 있도록 하는 기본 개념 하에서 이루어져야 할 것이다.

인간이 기계와 상호작용을 함에 있어서 충분히 목표를 인식할 수 있다는 점에 비추어 시스템이 분석되고 설계되어야 할 것인데 <그림 3-1>과 같이 맨-머신 시스템에 있어서 인간의 작용을 기본적인 흐름으로 활용하여 산출될 수 있는 결과와 인간이 인내할 수 있는 작업의 부하로부터 근거가 마련되어야 하고 조정되어야 할 것이다.



<그림 3-1> Human Actions According to Man-Machine System

이러한 근거가 마련되어도 작업 수행 중에 실수를 할 수 있는 가능성이 있기 때문에 전반적인 성취도에도 영향을 미치게 되는 것이다. 이는 전체 시스템의 성취도를 평가하는데 있어서 인적 요인이 고려되어야 할 중요한 요소 중의 하나라는 것을 의미한다.

본 장에서는 항만서비스분야에서의 인간 모델을 적용하고자 하였다. 항만서비스 분야에서의 활용이 많은 갠트리 크레인의 선적, 출하에서 인간이 장비를 직접 조작하는 것이 중요한 인적요인이며, 따라서 갠트리 크레인의 선적, 출하에서의 인간의 작업 형태와 실수를 분석하여 휴먼작업 모델을 제시하고자 한다. 휴먼작업 모델을 통하여 갠트리 크레인 운전자의 조이스틱 조작 각도, 트롤리 위치, 컨테이너 위치, 케이블 경사각, 케이블 길이 등 운전과 관련된 자료와 원하는 컨테이너 제어 궤적에 관한 자료를 얻고자 한다.

ARX(Auto Regressive eXogenous)모델링의 시계접근법을 컨테이너의 수송에서 이루어지고 있는 운전자의 입·출력에 적용하였다. 즉, 운전자의 동적행위에서 변

수를 모델에 제공하는 것이다. 운전자의 입력 자료는 갠트리 크레인의 상태로 운전자의 출력 데이터는 각각 트롤리와 케이블에 힘을 가진 수평, 수직 핸들에 두 가지 각도이다. 본 장에서는 작업형태, 인간 실수의 분석을 위한 휴먼 모델을 제안하였으며, 갠트리 크레인의 시뮬레이터를 운전의 속성을 전달하기 위하여 이용하였다.

갠트리 크레인의 반응에 따른 입·출력으로 ARX 확인 방법을 사용함으로써 운전 모델을 만들었다. 휴먼모델을 확인하기 위해 8개의 입력/출력 자료를 사용함으로써 모델의 척도를 평가하였다. 제안된 방법을 입증하기 위해 모델화된 데이터와 세 가지 작업케도가 미리 정해진 데이터와 실제 데이터를 비교하였다.

3.2 휴먼모델 구성

Chernobyl과 Bhopal에서의 사고는 위험이 높은 시스템에서 인간 실수의 중요성을 명쾌하게 입증하였다. 과거에 설계되었거나 새롭게 설계된 공장에서 일어나는 사고를 평가하여 유사한 사고가 발생하는 것을 방지하려고 하는 것은 중요하다. 이것은 시스템안전에서 인간 실수의 영향에 대한 평가를 통하여 가능하게 된다.

여러 해 동안 운전자를 위한 제어 이론의 발달과 병행하여 피드백 제어의 새로운 종합적 기법이 개발되어왔다. LQG(Linear Quadratic Gaussian) 제어 시스템 기법으로 나타난 운전자의 OCMs(Optimal Control Models)가 개발되었고 “Fuzzy Controller” 모델과 “H Infinity”모델이 뒤이어 나타났다 (Bryson 1975; Franklin 1998; Levine 1996; Zhou 1998; Antsaklis 1998; Skogestad 1996).

최근에 Malek과 Marmarelis(1998)는 수동추적 작업에서 운전자의 동특성(Dynamics)을 정량적으로 나타내는 방법을 제안하였다. 이 모델은 고전 및 현대의 제어 이론과 시계열 분석을 적용한 것이며, 운전자의 하위 시스템 특성을 시스템에 포함된 서로 다른 하위 시스템의 전이함수(Transfer Function)를 적용하여 설명하고 있다.

특히, 이 문제에 대한 시계열적 분석은 Shinners에 의하여 처음 소개되었는데 Shinners는 대역을 제한한 백색잡음을 사용하여 보정 추적 실험에 참여한 운전자들로부터 얻은 자료의 ARMA(Autoregressive Moving-Average)모형을 개발하였다(대역폭 = 1.5HZ). 그 결과로 0.2초 정도의 시간 지연을 보이며 0과 2개의 극을 갖는 불연속 전이 함수로 나타난다는 것을 밝혔다. 이 모형의 나머지 부분에 대한 분석에 기초하여 Shinner는 운전자는 무작위 입력을 추적하는 동안 주기적 특성을 발생시킨다고 결론지었다.

예를 들면 Charles(1980)과 Malek(1988)은 보정 및 도달 수동추적 실험동안 운전자로부터 수집된 입·출력 자료로부터 전이함수 모형을 개발하였다. 이들의 실험에서 5가지 사인곡선을 더하여 만든 예측 할 수 없는 두 가지 입력을 사용하였다.

첫째는 저주파 영역(0.04 ~ 0.08HZ)이었고 둘째는 고주파 영역(0.8 ~ 1.48HZ)이었다. 저주파 영역에서는 0없이 2개의 극을 가진 전이함수를, 고주파 영역에서는 2개의 극과 한 개의 0을 가진 전이함수를 찾아내었다. 나머지에 대한 분석에서는 Shinners에 의해 관찰되었던 주기적인 특성이 있다는 징후를 찾을 수 없었다.

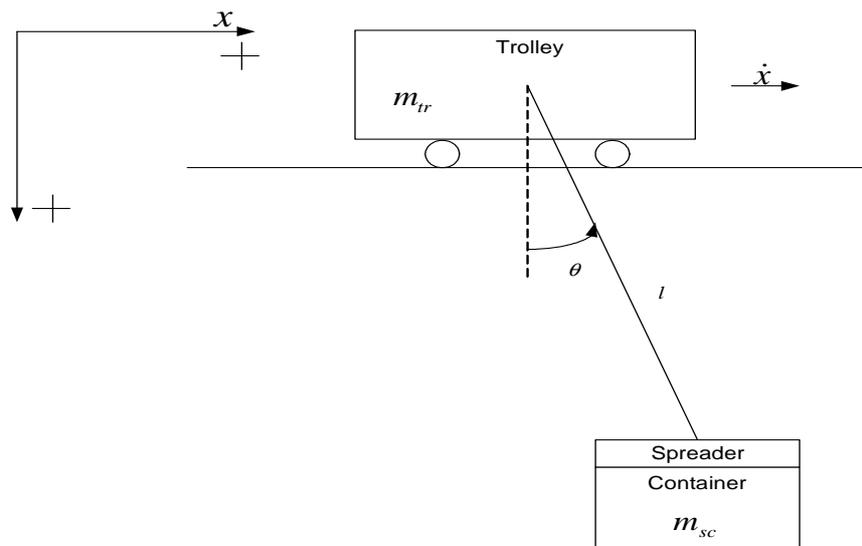
일반적으로 시계열 접근법을 이용한 운전자 역동 모델링에 있어 중요한 단계는 0과 극의 수와 같은 모델 차수를 확인하는 것이다. 시스템 특성에 일반적으로 사용되고 있는 몇몇의 모형의 차수를 정하는 기준은 보상 실험동안에 작업자의 입·출력 자료로부터 얻은 변수를 가진 자동회기 모형의 평가차수에 비하여 열등한 것으로 평가되고 있다(Efe 1999; Glass 1988; Ljung 1999; Sinha 1983).

본 장의 모형에서 운전자는 피드백 제어 체제로서 시각적이고 자기 자극을 한 위치에러의 평가를 획득하였다.

3.3 시스템 모델

3.3.1 갠트리 크레인 시스템 모델

갠트리 크레인 시스템은 트롤리 시스템과 호이스트 시스템의 두 가지 시스템으로 구분된다. 이 두 시스템은 트롤리 모터 토크와 호이스트 모터 토크를 조정하여 컨테이너를 수평과 수직으로 움직일 수 있게 된다. 일반적인 갠트리 크레인 시스템 모델을 <그림 3-2>에서 나타내었다



<그림 3-2> Gantry Crane Dynamics

트롤리 질량을 m_{tr} , 스프레더와 컨테이너 질량을 m_{sc} 로 트로이 위치, 케이블 길이 및 경사각을 각각 x, l, θ 로 표시하였다.

갠트리 크레인에서 상태변수는 (x, l, θ) 로 하였고, Lagrange 방정식에 의해 다

음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{x} = & \frac{m_{sc}}{2m_{tr}} \dot{x} \sin(2\Theta)(\dot{\Theta}-1) + \frac{F_{hoist} - c_x \dot{x}}{m_{tr}} \\ & + \frac{c_\Theta \dot{\Theta} \cos(\Theta) / l - (F_{hoist} - c_l \dot{l} - m_{sc} g \cos(\Theta)) \sin(\Theta)}{m_{tr}} \end{aligned} \quad (3.1a)$$

$$\ddot{l} = l \ddot{\Theta}^2 + g \cos(\Theta) - \ddot{x} \sin(\Theta) + \frac{(F_{hoist} - c_l \dot{l} - m_{sc} g \cos(\Theta))}{m_{tr}} \quad (3.1b)$$

$$\ddot{\Theta} = \frac{\dot{x} \sin(\Theta) - g \sin(\Theta) - \ddot{x} \cos(\Theta) - 2 \dot{l} \dot{\Theta} - \dot{x} \dot{\Theta} \sin(\Theta)}{l} - \frac{c_\Theta \dot{\Theta}}{m_{sc} l^2} \quad (3.1c)$$

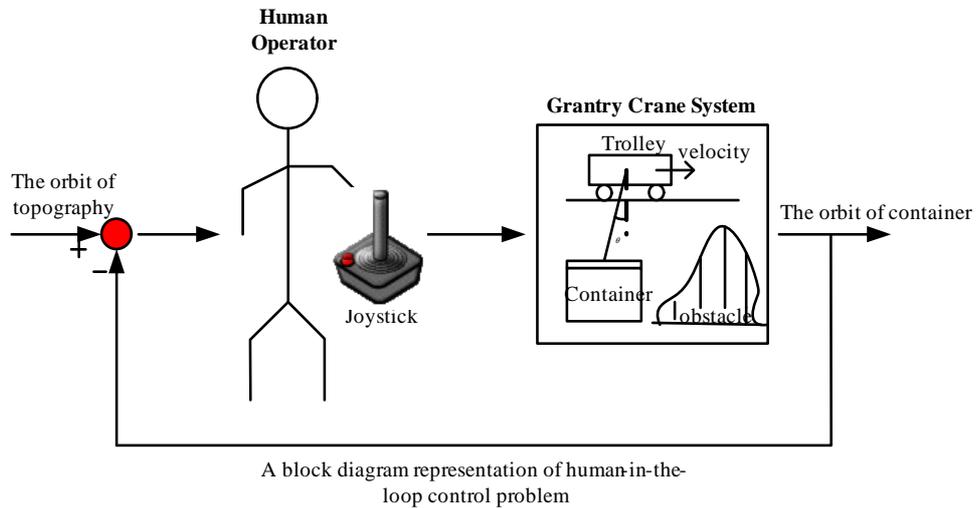
트롤리와 호이스트 조작을 위한 조이스틱 각을 $\alpha_x(\delta), \alpha_l(\delta)$ 이라하면 트롤리와 호이스트에 걸리는 힘은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} F_{hoist}(\delta) \\ F_{tr}(\delta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_x & 0 \\ 0 & P_l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_x(\delta) \\ \alpha_l(\delta) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

여기서 $F_{hoist}(\delta)$ 와 $F_{tr}(\delta)$ 는 각각 트롤리의 힘과 호이스트의 힘을 나타낸다.

3.3.2 휴면작업 모델

휴면작업 모델을 얻기 위해, 먼저 갠트리 크레인 시스템의 인간작동 모델을 구성하여야 한다. <그림 3-3>에서 보여 지는 작업모델에서 운전자는 시작 위치에서 목적지까지 컨테이너를 주어진 장애물을 피해 움직여야 한다.



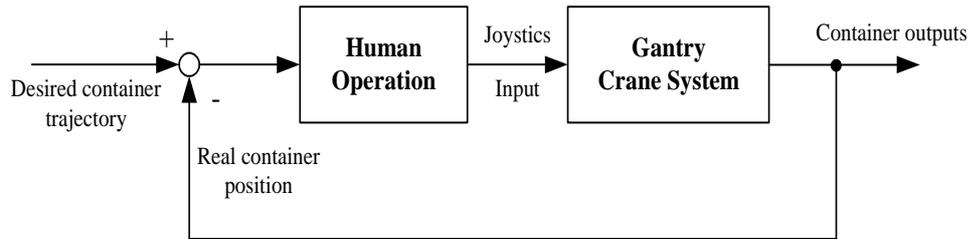
<그림 3-3> Representation of Human Operation for Gantry Crane System

<그림 3-3>에서 운전자는 트롤리위치와 호이스트 케이블 길이를 제어하기 위하여 조이스틱 각을 조종한다. 이때 운전자는 컨테이너 움직임과 케이블 경사각을 보게 되는데, 이것들은 시각적인 신호이다. 운전자는 컨테이너의 목적지 위치와 실제 위치 사이의 에러를 인지하고 운전자는 그 에러를 보정하는 방식으로 조종을 결정한다. 수평, 수직의 신호는 그 변화량에 비례한 힘으로 각각 트롤리와 케이블에 전달된다.

3.3.3 휴먼확인 모델

갠트리 크레인 작동(운전)을 이용하여 우리는 조이스틱 각도와 트롤리 위치, 컨테이너 위치, 케이블 경사각, 케이블 길이 등 갠트리 크레인 운전과 관련된 자료 및 원하는 컨테이너 운송 궤적에 관한 자료를 얻을 수 있다. <그림 3-4>은 인

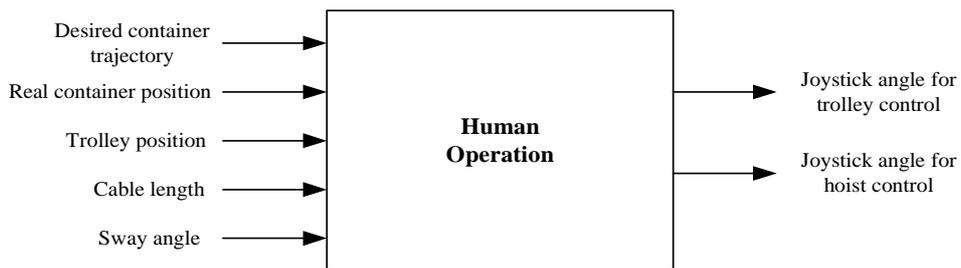
간작업 모델을 블록선도로 표시한 것이다.



<그림 3-4> A Block Diagram for Human Work Model

갠트리 크레인 시스템을 위한 인간작업 모델을 정하기 위해, 위의 데이터로부터 입력과 출력 요소들을 나누어야 한다. 여기에서 원하는 컨테이너 궤도가 최적제어 방식이나 다른 방법으로 주어진다고 가정한다.

운전에서 입력 변수는 원하는 컨테이너 궤도, 실제 컨테이너 위치, 트롤리 위치, 케이블 경사각, 컨테이너 케이블 길이로 하였고 트롤리와 호이스트 제어를 위한 조이스틱 각도를 출력 항목으로 하였다. 이러한 입력과 출력 항목으로부터 위의 <그림 3-4>를 <그림 3-5>와 같이 나타낼 수 있다.



<그림 3-5> A Block Diagram for Human Operation with Input/Output Terms

<그림 3-5>에서와 같은 휴먼 모델로 얻은 입력과 출력 데이터를 이용하여 ARX 방법을 이용한 휴먼조종 모델을 얻을 수 있다. 방법을 간단히 표시하면 다음과 같다.

ARX 모델은 다변수의 경우 선형 차분 방정식을 이용하여 다음식과 같이 쓸 수 있다.

$$y(t) + A_1 y(t-1) + \dots + A_n y(t-n) = B_0 u(t) + B_1 u(t-1) + \dots + B_m u(t-m) + d(t) \quad (3.3)$$

여기서 입력 $u(t)$ 는 k -차원 벡터이고, 출력 $y(t)$ 는 p -차원 벡터이다. $d(t)$ 는 외부교란으로서 시스템에 들어가는 백색잡음을 나타낸다. A_i, B_i 는 각각 $p \times p$, $p \times k$ 차원 행렬이다.

$A(q), B(q)$ 를 다항식으로 정의하면 다음과 같다.

$$A(q) = I + A_1 q^{-1} + \dots + A_n q^{-n} \quad (3.4)$$

$$B(q) = B_0 + B_1 q^{-1} + \dots + B_m q^{-m} \quad (3.5)$$

여기서 q^{-1} 은 지연을 나타낸다. 위의 다항식을 이용하여 (3.3)식을 다시 쓰면 아래와 같다.

$$y(t) = A^{-1}(q) B(q) u(t) + A^{-1}(q) d(t) \quad (3.6)$$

편의상 파라미터 벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$\Theta = [A_1 A_2 \dots A_n B_0 B_1 \dots B_m]^T \quad (3.7)$$

여기서 $\Theta [(p \times n) + k(m+1)] \times p$ 차원의 행렬이다.

그러면 (3.6)식은 쉽게 아래와 같은 행렬형태로 변환할 수 있다.

$$y^T(t) = \Phi^T(t)\Theta + e^T(t) \quad (3.8)$$

여기서

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} -y(t-1) \\ \vdots \\ -y(t-n) \\ a(t) \\ \vdots \\ a(t-m) \end{bmatrix}$$

에러의 모델을 더욱 더 간결하게 만들기 위하여 새로운 행렬을 아래와 같이 정의한다.

$$K(N) = [y(n+1) \cdots y(N)]^T \quad (3.9)$$

$$\Psi(N) = \begin{bmatrix} \Phi^T(n+1) \\ \vdots \\ \Phi^T(N) \end{bmatrix} = [\Phi(n+1) \cdots \Phi(N)]^T \quad (3.10)$$

$$E(N, \Theta) = [a(n+1) \cdots a(N)]^T \quad (3.11)$$

$$K(N) = \Psi(N)\Theta + E(N, \Theta) \quad (3.12)$$

파라미터 벡터의 통상적인 최소 자승 평가치인 $\hat{\Theta}$ 는 (3.7)식으로 주어져 있

다.

$$\widehat{\Theta} = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T Y \quad (3.13)$$

이 휴먼 조작 시스템에서는 6가지의 입력 신호와 2가지 출력 신호가 있다. 입력 신호는 컨테이너의 주어진 경로의 기준 위치, 컨테이너의 조절 위치, 트롤리의 위치, 케이블길이, 케이블 경사각이다

이러한 것은, $u_i(t), i=1, \dots, 6$ 로 나타나는 것이다. 출력 신호는 갠트리 크레인의 트롤리와 호이스트를 제어하기 위한 조이스틱의 수직각과 수평각이다. 이것은 $a_i(t), i=1, 2$ 로 표시한다. 입·출력 신호에서 입력벡터를 $u(t)$, 출력벡터를 $y(t)$ 로 나타내면 다음과 같다.

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ \vdots \\ u_6(t) \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

휴먼조작 모델링을 위한 ARX모델을 정의하기 위해, 운전자는 빈도가 적은 지역에서 조작한다고 가정하고 다음과 같은 모델에 제안하였다.

$$y(t) + Ay(t-1) + By(t-2) = Cx(t) + Dx(t-1) + Ex(t-2) + e(t) \quad (3.15)$$

여기서 A 와 B 는 2×2 행렬이고 C, D, E 는 2×6 의 행렬이다. 따라서 $2 \times 2 \times 2 + 2 \times 6 \times 3$ 의 변수를 평가하는 것이 필요하다. 간단하게 하기 위해서 여기서 모든 변수가 시간에 따라 변하지 않는 것으로 가정하면 (3.7)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Theta = [A \ B \ C \ D \ E]^T \quad (3.16)$$

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} -\mathcal{Y}(t-1) \\ -\mathcal{Y}(t-2) \\ \mathcal{U}(t) \\ \mathcal{U}(t-1) \\ \mathcal{U}(t-2) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\mathcal{Y}^T(t) = \Phi^T(t)\Theta + e^T(t) \quad (3.18)$$

갠트리 크레인 시뮬레이터를 이용하여 측정 한 데이터를 가지고, 다음과 같이 입·출력 데이터를 구성한다.

$$\left\{ \begin{bmatrix} u_1(1) \\ \vdots \\ u_6(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(2) \\ \vdots \\ u_6(2) \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} u_1(\mathcal{M}) \\ \vdots \\ u_6(\mathcal{M}) \end{bmatrix} \right\} \quad (3.19)$$

$$\left\{ \begin{bmatrix} a_1(1) \\ \vdots \\ a_6(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(2) \\ \vdots \\ a_6(2) \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} a_1(\mathcal{M}) \\ \vdots \\ a_6(\mathcal{M}) \end{bmatrix} \right\} \quad (3.20)$$

이때 관련된 행렬은 아래와 같다.

$$\mathcal{H}(\mathcal{M}) = \begin{bmatrix} a_1(3) & a_2(3) \\ \vdots & \vdots \\ a_1(\mathcal{M}) & a_2(\mathcal{M}) \end{bmatrix}^T = [a(3) \dots a(\mathcal{M})]^T \quad (3.21)$$

$$\Psi(\mathcal{M}) = \begin{bmatrix} \Phi^T(3) \\ \vdots \\ \Phi^T(\mathcal{M}) \end{bmatrix}^T = [\Phi(3) \dots \Phi(\mathcal{M})]^T \quad (3.22)$$

$$\mathcal{A}(\mathcal{N}, \Theta) = [\mathcal{A}(3) \cdots \mathcal{A}(\mathcal{M})]^T \quad (3.23)$$

$$\mathcal{K}(\mathcal{M}) = \Psi(\mathcal{M})\Theta + \mathcal{A}(\mathcal{N}, \Theta) \quad (3.24)$$

파라미터 변수의 최소자승 평가 값인 $\hat{\Theta}$ 는 다음과 같다 (G. F. Franklin 1988).

$$\hat{\Theta}_{LS} = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T \mathcal{Y} \quad (3.25)$$

모델의 적합성을 평가할 때 기대되는 모델의 적합성을 표현하는 일반적인 표현은 모델구조에 대하여 독립적이어야 한다. 여기서는 모델과 실제 시스템의 적합성을 다음과 같이 측정하였다.

$$fit = 100 \left[1 - \frac{y - \hat{y}}{y - y} \right] \quad (3.26)$$

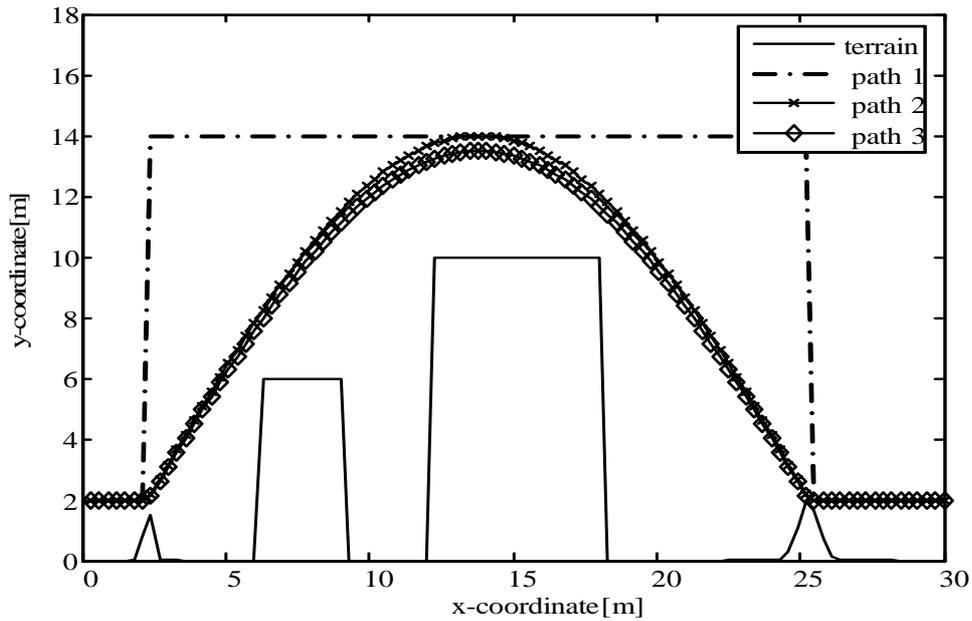
3.4 시뮬레이션을 이용한 휴먼모델 검증

3.4.1 실험조건

갠트리 크레인 시뮬레이터 실험에서 크레인운전자가 2-D 그래픽을 사용하면 조이스틱을 이용하여, 직사각형 경로, 원형 경로, 타원형 경로의 세 가지 종류의 궤적을 가정하였다. 직사각형 경로에서 조작자는 호이스트 모터를 제어하여 수직으로 컨테이너를 들어 올리고, 트롤리 모터를 제어하여 수평으로 기준점으로 이동하고 최종 목적지에 수직으로 내려놓는다. 이 경로에서 컨테이너는 호

이스트와 트롤리를 독립적으로 구동하여 이동한다.

원형 및 타원 경로에서는 호이스트와 트롤리를 동시에 작동하면서 컨테이너를 이동시킨다. <그림 3-6>에서 조작 궤적을 나타낸다.



<그림 3-6> Human Operation Task and Its Trajectory Paths

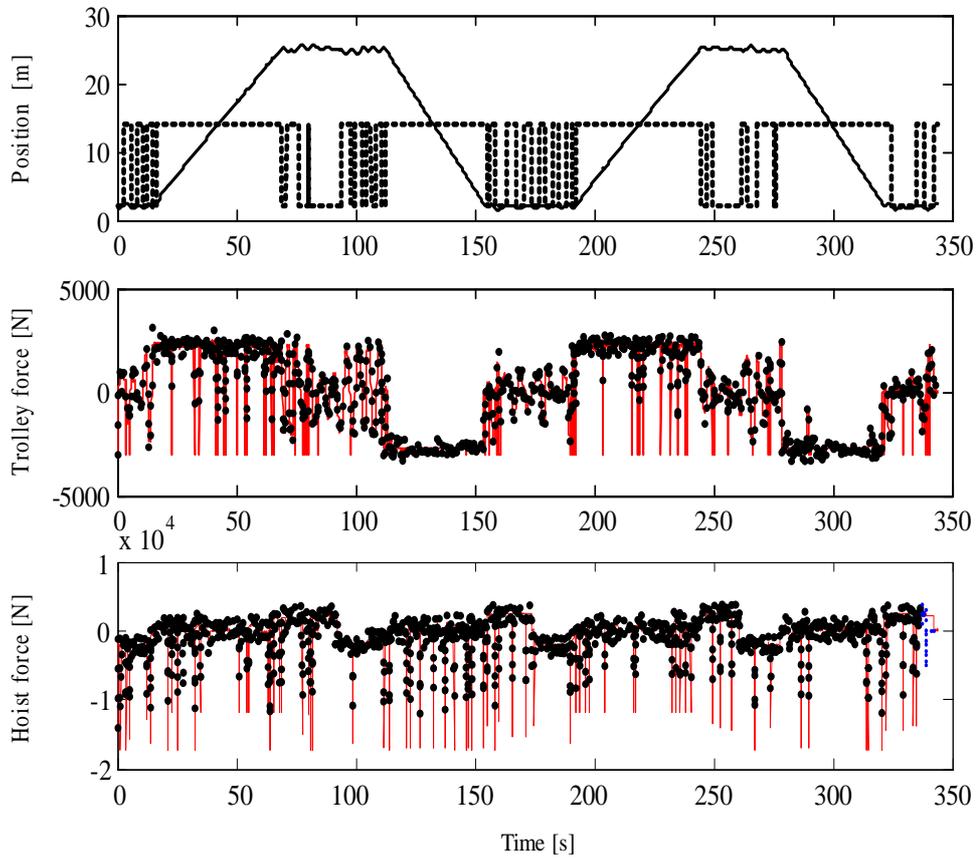
갠트리 크레인의 시뮬레이터에서 트로이의 무게는 $m_{tr}=1,000[Kg]$ 이고 컨테이너와 스프레더 무게는 $m_{sc}=1,000[Kg]$ 으로 가정하였다. 트롤리, 호이스트, 케이블의 경사의 댐핑계수는 각각 $c_x=1,000[N \cdot s/m]$, $c_\theta=0.2m_{sc}l^2[Kg \cdot m^2/s]$ 로 주어졌다. 작업 가능한 케이블의 길이는 $4[m] - 8[m]$ 로 제한하였고 갠트리 크레인의 높이는 $20[m]$, 트롤리로 움직일 수 있는 한계는 $30[m]$ 로 하였다. 계산과 시뮬레이션에서 샘플링 시간은 $80[ms]$ 로 하였다.

3.4.2 휴먼모델의 결과

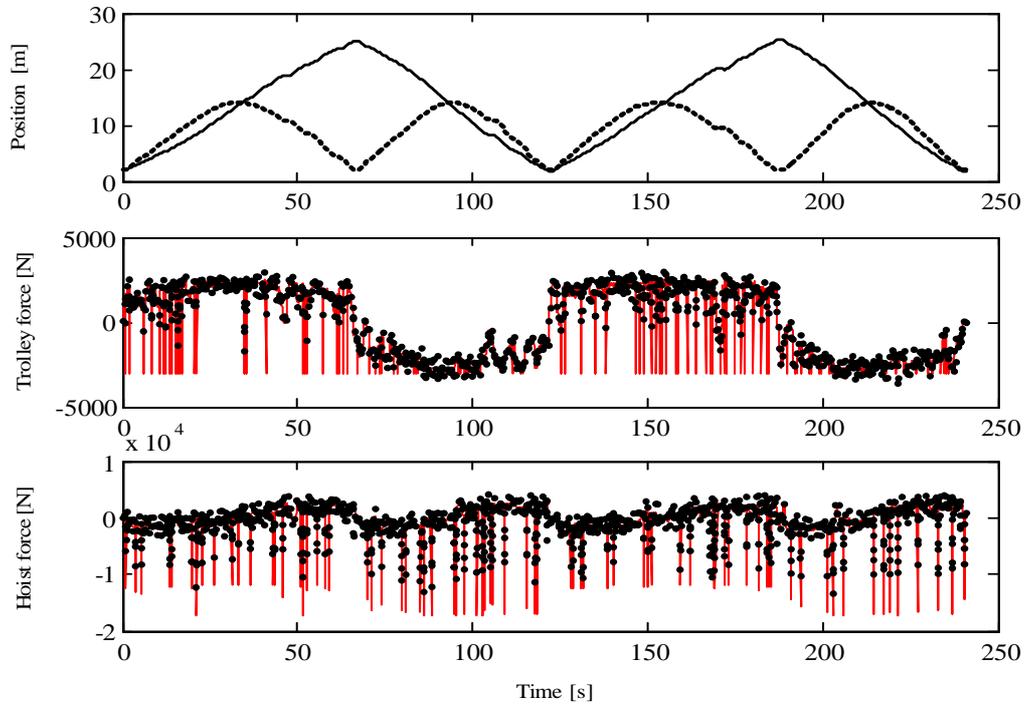
이 시뮬레이션에서 한사람에 대하여 세 가지 경로를 만들고, 80 [ms] 샘플 시간을 이용한 인간조작 데이터를 얻었으며 이를 <그림 3-7> ~ <그림 3-9>에 나타내었다. 이 결과는 각각 직사각형, 원형, 타원형의 궤적경로를 이용한 인식된 인간-기계 모델 반응을 보여준다.

<그림 3-7> ~ <그림 3-9>에서 <그림 3-7>, <그림 3-8>, <그림 3-9>에 나타난 맨 위의 그림은 컨테이너 수직, 수평위치를 보여 주고 있다. 여기서 실선은 수평 위치를, 점선은 수직 위치를 나타낸다. 두 번째 그림은 제어된 트롤리 모터 힘을 보여주고 여기서 실선은 실제의 조작 데이터를 의미하며, 점선은 같은 제어 입력을 가지고 각각 동일 산출을 한 정형화된 휴먼모델을 보여준다.

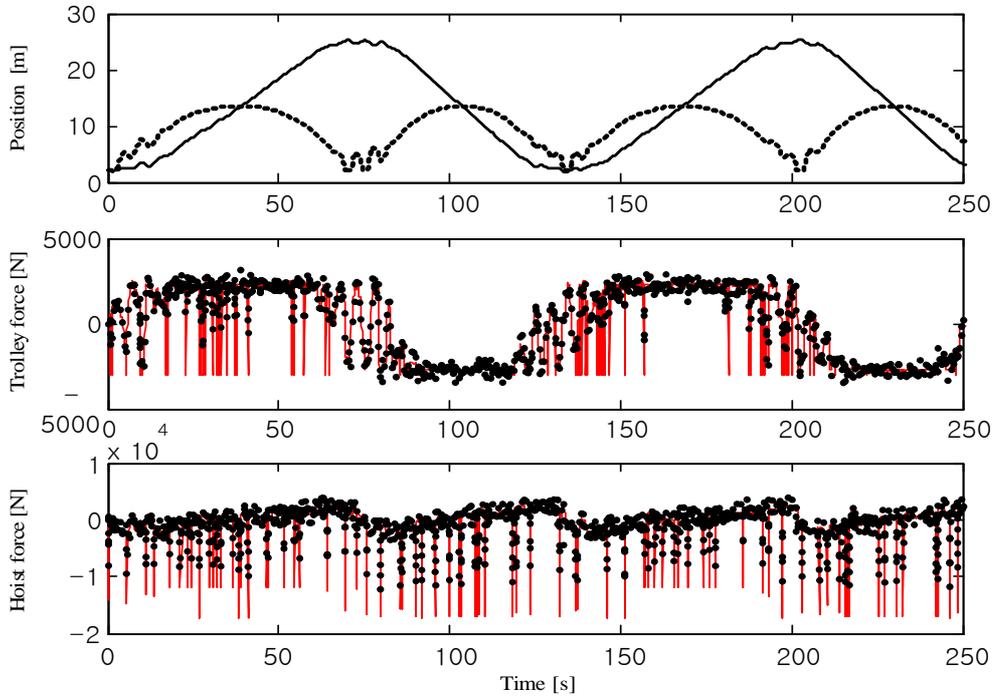
<그림 3-7>, <그림 3-8>, <그림 3-9>에 나타난 맨 아래 그림은 조작된 호이스트 힘을 나타내는데 여기서 실선과 점선은 두 번째 그림에서의 입·출력 모델과 같다.



<그림 3-7> Response of Human Model for Rectangular Trajectory Path



<그림 3-8> Response of Human Model for Circle Trajectory Path



<그림 3-9> Response of Human Model for Ellipse Trajectory Path

<표 3-1> Fitness of Human Work Model by ARX Identification Method

| 구 분 | Case1 | | Case2 | |
|------------------|---------|--------|---------|--------|
| | Trolley | Hoist | Trolley | Hoist |
| Rectangular Path | 77.81% | 46.69% | 78.82% | 45.04% |
| Circle Path | 72.91% | 47.24% | 77.81% | 46.69% |
| Ellipse Path | 75.78% | 47.74% | 73.45% | 43.70% |

<표 3-1>은 세 가지 궤적에 대한 인간 작업 모델에 대한 적합성을 나타내었다. 주어진 궤적과 입력 자료에 대한 트롤리 및 호이스트 제어 힘의 평균 적합도는 각각 76.10%와 46.18%로 나타났다.

3.5 결 언

본 장은 갠트리 크레인의 반응에 따른 입력과 출력을 통하여 ARX방법을 사용한 갠트리 크레인 작업 모델을 제안하였다. 작업 모델을 얻기 위해서 크레인 운전자가 2-D그래픽 움직임을 사용하면서 조이스틱을 이용하여 갠트리 크레인을 조작하는 시뮬레이터를 사용하였다. 얻어진 작업 모델을 사용함으로써 본 장에서는 세 가지 작업 궤적과 그것의 효율성을 입증하였다.

향후 3-D 그래픽 움직임으로 비선형 동역학 항목을 포함한 갠트리 크레인 모델을 개발하여야 하고 또한 여기서 제안된 작업 모델을 사용하는 인간실수의 알고리즘을 설계하여야 할 것이다.

제 4 장 옵저버를 이용한 휴먼에러 검출

4.1 서 언

과학과 기술의 발달에 따라 점점 더 성능이 우수한 기계들이 만들어 지고 있지만 맨-머신 체계에서 인간은 가장 신뢰성 없는 요소로 남아 있을 것이다. 그 이유는 자동화의 발달에도 불구하고 인간에 의하여 유발된 문제들은 감소하지 않고 오히려 더욱 치명적인 사고를 불러일으킨다는 사실로부터 설명될 수 있는 것이다.

맨-머신 시스템은 하나의 의사결정 시스템으로서 요건 및 기능을 갖추어야 한다. 시스템으로서의 맨-머신을 형성함으로써 의사결정에 대한 본질적 접근을 모색하여야 할 것이다.

일반적으로 작업에 있어서의 인간은 작업환경에 대한 적응성이 뛰어나고 상황에 대한 직관적 판단이 신속하며 과거의 축적된 경험을 유기적으로 활용할 수 있다. 의사결정에 있어서는 추상적 사고와 통찰력, 창의력, 구상력 등을 발휘하여 비구조적, 정성적 성격을 가진 의사결정에 접근이 가능한 것이다.

하지만 기계 시스템은 인간이 미리 작성한 프로그램에 의해 작동되는 폐쇄 시스템이기 때문에 문제에 대한 신축성이나 적응성은 미흡하다. 그러나 인간처럼 심리적 요인에는 영향을 받지 않기 때문에 항상 객관적이며 정확, 정밀하고 반복적인 업무에도 피로를 느끼지 않고 계속 작업이 가능한 것이다.

인간실수의 문제를 고려하는데 있어서 가장 기본적이고 중요한 것은 인간의 오류를 어떻게 정의하느냐 하는 것이다. 즉, 어떤 사건을 인간실수만의 문제로 정의되어서는 안 되고 시스템과 연관을 지어서 객관적으로 정의 하여야 할 것이다.

인간의 의도 및 행위가 옳을 수 있지만 시스템의 결과의 관점에서 평가해 보면 부적절할 수도 있기 때문이다. 이러한 행위를 크레인 작업자의 옵저버를

이용하여 작업오류를 진단할 수 있음을 보이고자 한다.

이것은 작업오류 및 미지의 외부외란을 포함한 오류를 진단 할 수 있으며 옹저버의 유효성을 확인하기 위해서 시물레이션에서는 크레인 작업자가 작업 부주의로 인한 실제 값과 추정치 값을 비교하고자 한다.

4.2 옹저버의 구성

본 장에서는 종래의 기계 및 시스템을 대상으로 행하였던 고장 진단법을 작업자를 대상으로 행하고자 한다. 먼저 크레인 작업자를 대상으로 하여, 작업자 모델을 이론적인 선형 시 불변 모델로 가정하여 행하도록 한다. 작업자 모델에 대하여 휴먼에러 진단 옹저버를 제안하며 본 옹저버를 이용하여 휴먼에러가 진단될 수 있음을 이론적으로 증명하도록 한다. 이때, 휴먼에러는 작업자 모델에 대해서 부가되는 외부 입력 항으로 가정하며, 옹저버를 이용하여 외부 입력 항을 정확히 측정함을 목적으로 하였다.

시물레이션에서는 크레인 작업자 모델에 관한 종래 결과를 이용하며 작업오류는 작업자 부주의에 의한 사항으로 가정하여 시물레이션을 행한다. 시물레이션 결과에서는 제안한 옹저버를 이용하여 작업오류가 정확히 진단됨을 보이며, 이로서 옹저버의 유용성을 확인하였다.

4.2.1 문제정의

작업자 모델을 다음과 같이 미지입력을 지닌 선형 시 불변시스템으로 고려한다면

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Dd(t) \quad (4.1a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (4.1b)$$

여기서 $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 는 상태벡터, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 는 입력벡터, $y(t) \in \mathbb{R}^l$ 는 출력벡터이며 $d(t) \in \mathbb{R}^r$ 는 외란 벡터를 나타낸다. A, B, C, D 는 다 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 나타내었다.

본 장에서는 작업자의 실수에 의한 작업오류는 직접적으로 바르지 못한 입력 요소에 기인한다고 보며, 이러한 요소가 작업자 모델의 입력 요소에 가산된다고 가정한다. 이를 위해 먼저, 작업자 모델에 가해지는 작업자 오류가 없는 순수한 입력을 $u(t)$ 이라 하며, 작업자 오류를 포함한 경우의 입력을 $\bar{u}(t)$ 로 하였을 때 위의 내용을 포함하면 (4.1b)식은 다음 식으로 나타내어진다.

$$\bar{u}(t) = u(t) + d(t) \quad (4.2)$$

여기서 $d(t) \in \mathbb{R}^m$ 는 휴먼에러를 포함한 입력부의 고장요소를 나타내며, 입력부에 가산 형태로 주어진다. 위의 입력부 고장의 정의에 의해 시스템 (4.1)식은 다음과 같이 입력부에 고장요소가 포함된 모델로 주어진다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\bar{u}(t) + B_d d(t) + D\dot{d}(t) \quad (4.3a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (4.3b)$$

작업오류를 포함한 작업자 모델인 (4.3)식에서 휴먼에러 진단 옵저버를 이용

하여 작업자 오류인 $x(t)$ 을 정확히 진단 및 분리하고자 한다.

4.3 휴먼에러 진단을 위한 옵저버 설계

4.3.1 휴먼에러 진단 옵저버 설계

본 장에서는 아래와 같이 비례계인 및 적분계인을 포함한 휴먼에러 진단 옵저버 구조에 대해서 다루기로 한다. 휴먼에러 진단 옵저버는 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = \hat{A}\hat{x}(t) + \hat{B}y(t) + \hat{J}u(t) + \hat{H}\omega(t) \quad (4.4a)$$

$$\hat{x}(t) = \hat{C}\hat{x}(t) + \hat{D}y(t) \quad (4.4b)$$

$$\omega(t) = y(t) - \hat{C}\hat{x}(t) \quad (4.4c)$$

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

정의 1 : 작업자 모델 (4.1)식과 휴먼에러를 포함한 작업자 모델 (4.3)식에 대해 (4.4)식이 휴먼에러 진단 옵저버가 될 필요충분조건은 다음 조건을 만족하는 것이다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \forall x(0^-), u(0^-), u(\cdot) \quad (4.5a)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = 0, \quad \forall \omega(0_-) \quad (4.5b)$$

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

보조정리 1 : 작업자 모델 (4.1)식과 휴먼에러를 포함한 작업자 모델 (4.3)식에 대해 (4.4)식이 휴먼에러 진단 옵저버가 될 충분조건은

$$\operatorname{Re} \lambda \left[\begin{array}{c|c} \widehat{A} & \widehat{H} \\ \hline -\widehat{CC} & 0 \end{array} \right] < 0, \quad i=1, \dots, n+p \quad (4.6)$$

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

$$\widehat{AU} + \widehat{BC} = UA \quad (4.7)$$

$$\widehat{J} = UB \quad (4.8)$$

$$\widehat{CU} + \widehat{DC} = I_n \quad (4.9)$$

$$UD = 0 \quad (4.10)$$

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

4.3.2 휴먼에러의 검출 및 진단

휴먼에러 진단 옵저버가 작업오류를 포함한 작업자 모델에서 작업오류를 진

단할 수 있음을 보이려고 하므로 먼저 다음 변수를 정의하였을 때

$$\zeta(t) = z(t) - Ux(t) \quad (4.11)$$

(4.3)식과 (4.4)식으로부터 (4.11)식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}(t) = & \widehat{A}z(t) + (\widehat{AU} + \widehat{BC} - UA)x(t) \\ & + UDa(t) + (\widehat{J} - UB)x(t) + \widehat{F}d(t) + UBx(t) \end{aligned}$$

또한, (4.4)식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\widehat{x}(t) = \widehat{C}z(t) + (\widehat{CU} + \widehat{DC})x(t) \quad (4.12a)$$

$$\dot{\omega}(t) = Ax(t) - \widehat{x}(t) \quad (4.12b)$$

위의 보조정리 1에 의해 다음과 같이 나타내어진다.

$$\dot{\zeta}(t) = \widehat{A}z(t) + \widehat{H}d(t) + UBx(t) \quad (4.13)$$

$$\widehat{x}(t) = \widehat{C}z(t) + x(t) \quad (4.14)$$

$$\dot{\omega}(t) = -C\widehat{C}z(t) \quad (4.15)$$

따라서 $\zeta(t)$ 을 다음과 같이 정의할 경우

$$\xi(t) = d(t) - \omega(t) \quad (4.16)$$

일반적으로 작업자의 오류가 순간적으로 발생하는 것을 고려하면, 작업오류가 $\dot{d}(t) = 0$ 이 됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 상황에서 위 식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\xi}(t) = -\dot{\omega}(t) = \widehat{C}\widehat{\mathcal{C}}(t) \quad (4.17)$$

여기서 $\widehat{H} = UB$ 로 선택하면, 위 식은

$$\dot{\xi}(t) = \widehat{A}(t)\xi(t) + \widehat{H}(t)d(t)$$

$$\dot{\xi}(t) = \widehat{C}\widehat{\mathcal{C}}(t)$$

혹은

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widehat{A} & \widehat{H} \\ -\widehat{C}\widehat{\mathcal{C}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

으로 변환된다. 또한 (4.18)식으로부터 보조정리 1을 이용하면 $\xi(t), \omega(t) \rightarrow 0$ ($t \rightarrow \infty$)으로 됨을 알 수 있다. 그러므로 작업오류 $d(t)$ 는 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\widehat{d}(t) = \omega(t) \quad (4.19)$$

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

이상으로부터 다음의 정리를 얻을 수 있다.

4.3.3 휴먼에러 진단 옵저버의 존재조건

휴먼에러 진단 옵저버의 각 이득을 설계하기 위해 간단하게 $\widehat{C}=I_n$ 로 한다면 (4.9)식은

$$U=I_n-\widehat{D}C \quad (4.20)$$

으로 되며, (4.20)식을 이용할 때(4.10)식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\widehat{A}=UA-KC \quad (4.21)$$

$$\widehat{B}=\widehat{A}\widehat{D}+K \quad (4.22)$$

여기서

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

또한 (4.22)식을 이용하면 (4.10)식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\widehat{D}CD=D \quad (4.23)$$

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

$$\text{rank } CD = \text{rank } D = m \quad (4.24)$$

위의 조건은 $p \geq m$ 으로 되어 출력수가 입력수보다 많아야 함을 알 수 있다. (4.23)식의 일반해는 다음과 같이 나타내어진다.

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

여기서, G 는 임의의 행렬이다.

위의 식을 이용하면 (4.20)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 rank $D = m$ 이므로, 행렬 D 의 의사역 행렬이 존재한다. 즉,

$$D^+ D = I_m$$

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

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

다음의 관계를 알 수 있다.

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

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

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + m \quad (4.25)$$

이상의 내용을 정리하면, 다음의 결과를 얻을 수 있다.

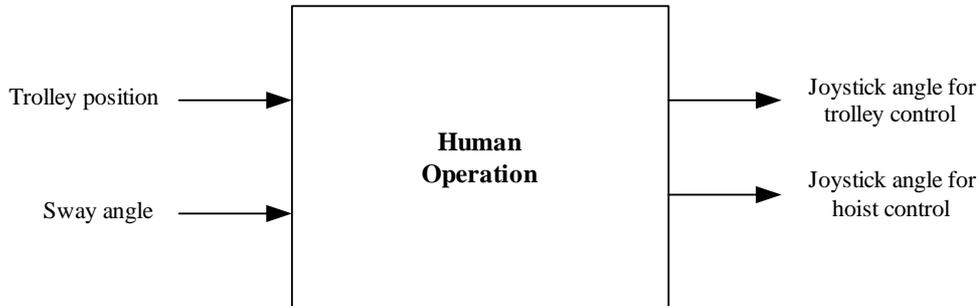
정리 1 : 미지의 외부외란 및 작업오류를 지닌 작업자 모델 (4.3)식에 대해서 휴먼에러 진단 옵저버 (4.4)식이 존재할 충분조건은 다음 조건을 만족하는 것이다.

$$(i) \text{rank } \mathcal{D} = \text{rank } D = m$$

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

4.3.4 시뮬레이션을 이용한 검출결과

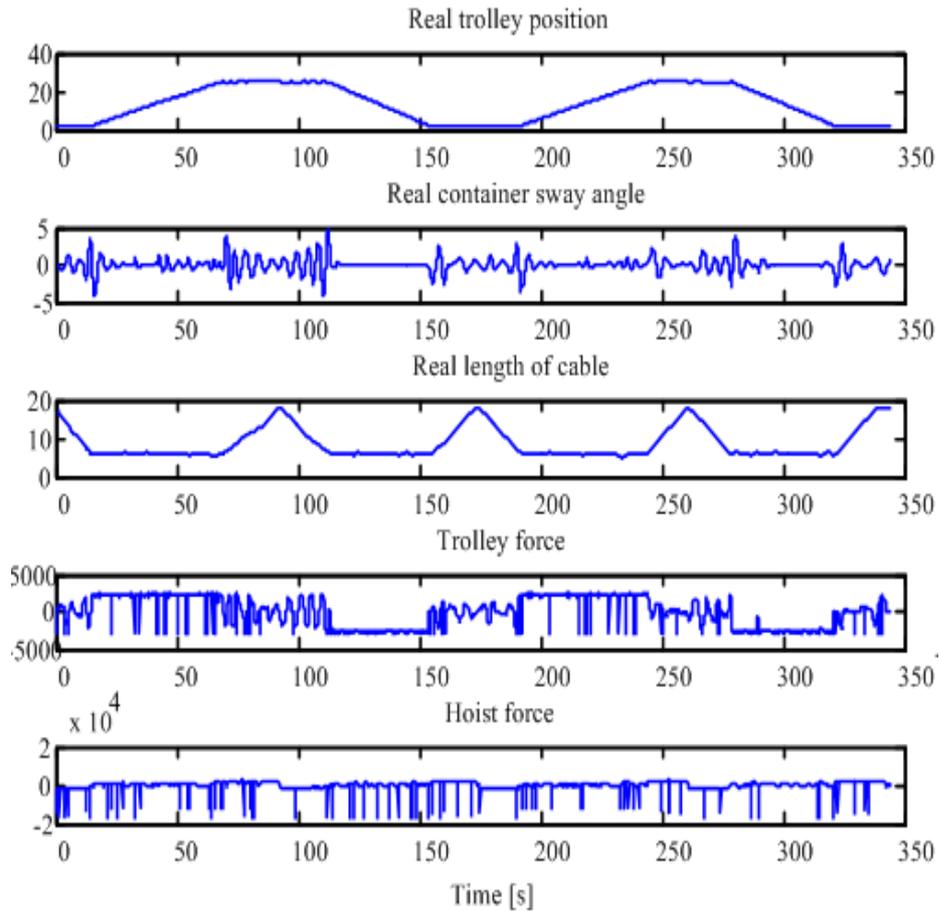
본 연구에서는 종래의 연구(Kim et al, 2004)에서 구해진 크레인 작업자 모델을 이용하도록 한다. 크레인 작업 모델은 6개의 입력과 2개의 출력으로서 구성되며 <그림 3-5>와 같이 나타내어졌다.



<그림 4-1> A Block Diagram for Human Operation with 2 Input/2 Output

종래의 연구에서와 같이 입력을 6개로 하고 출력을 2개로 하는 경우에는 정리 1의 첫 번째 Rank 조건이 만족되지 않으므로 휴먼에러 진단 옵저버 개인이 존재하지 않으므로 설계할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 입력을 트롤리의 x축 위치와 컨테이너 흔들림 각으로 제한하여 <그림 4-1>과 같이 2입력 2출력 작업자 모델로 가정하여 시뮬레이션을 행하였다.

먼저, 정상적인 상태에서의 시뮬레이션 결과는 <그림 4-2>와 같다.

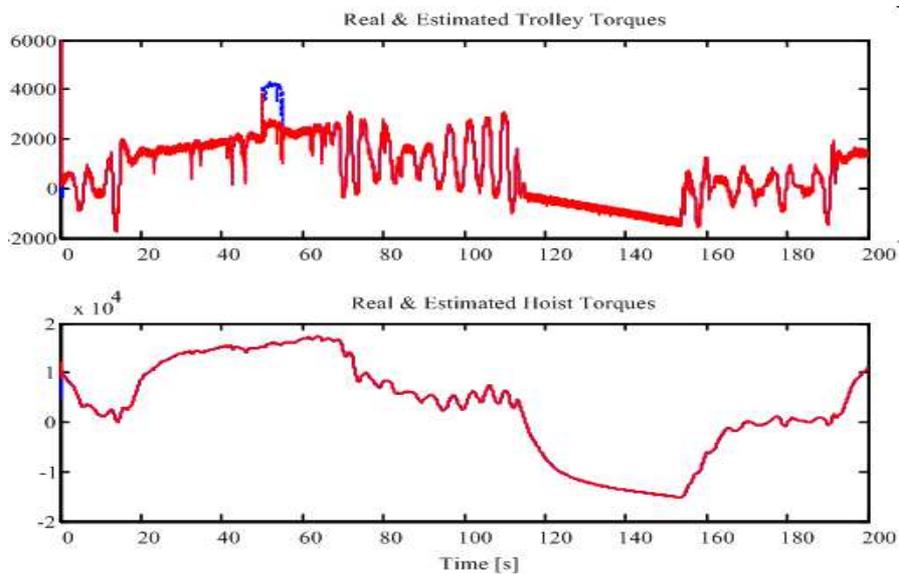


<그림 4-2> Responses of Container Crane in Normal Case

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

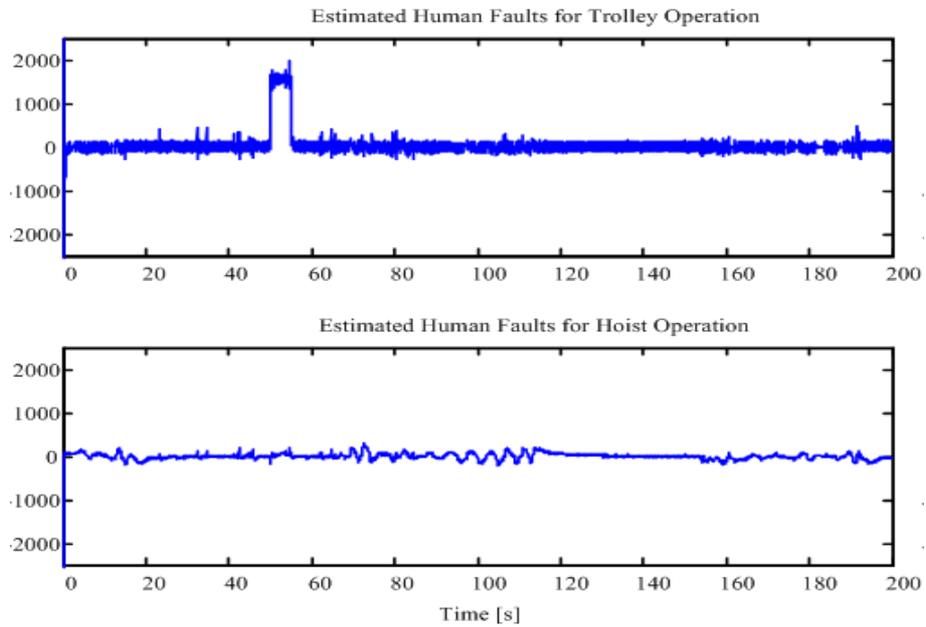
휴먼에러 진단 옵저버의 유효성을 확인하기 위해 본 시뮬레이션에서는 크레인 작업자가 작업 부주의로 인하여 트롤리 조작 핸들을 50초에서 55초 사이에 과도하게 운전하였다고 가정한다. 이 경우 시뮬레이션 결과는 <그림 4-3> ~ <그림 4-6>과 같이 나타내어진다. <그림 4-3>에서는 작업자 운전실수가 있는 경우의 실제값과 추정값의 트롤리 및 호이스트의 입력 토크를 나타내고 있다. <그림

4-3>의 위쪽 그림은 트롤리에 대한 입력 토크를 나타내며, <그림 4-3>의 아래쪽 그림은 호이스트에 대한 입력 토크를 나타낸다. 아래쪽 그림에서는 실제값과 추정값이 정확히 일치하고 있으나, 위쪽 그림에서는 50-55초사이의 실제값과 추정치값이 서로 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.



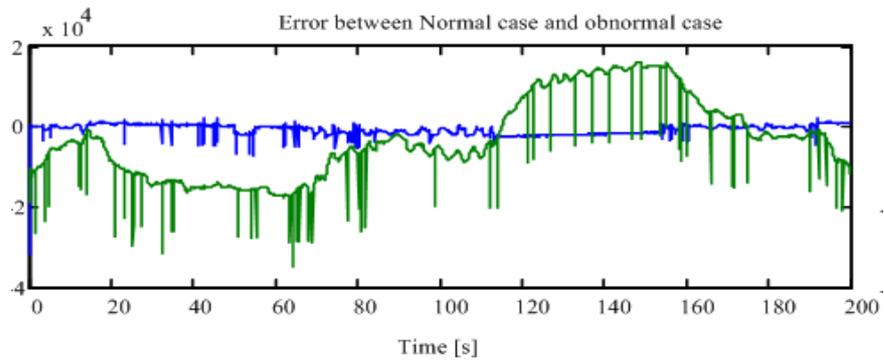
< 그림 4-3> Responses of Container Crane with Human Faults

<그림 4-3>에서는 실제 출력값과 추정된 출력값과의 오차값을 이용하여 작업자 오차를 옮겨버로서 추정하고 있다. 여기서 위쪽그림은 트롤리에 대한 작업자 오차를 나타내며, 아래쪽 그림은 호이스트에 대한 작업자 오차를 나타낸다. <그림 4-4>의 위쪽 그림에서 알 수 있듯이 트롤리 조작에 대한 작업자 오류를 확연하게 알 수 있다.



<그림 4-4> Estimated Human Faults for Trolley and Hoist

<그림 4-5>에서는 정상적인 경우와 작업자 오류가 발생한 경우에 대한 오차를 보이고 있다. 여기에서도 트롤리 부분에 대해서 50 - 55초 부근에서 함몰되는 현상을 보이고 있으며, 이 현상이 작업자 오류에 의한 것임을 알 수 있다.



<그림 4-5> Error Between Normal Case and Abnormal Case

따라서, 위의 결과에서 알 수 있듯이 제안된 휴먼에러 진단 옵저버의 유효성이 확인되고 있으며, 본 옵저버를 이용하면 작업자의 오류의 크기 및 정확한 진단이 가능함을 알 수 있다.

4.4 결 언

본 장에서는 휴먼에러 진단 옵저버를 이용하여 작업자의 작업오류를 진단하는 방법에 대해서 제안하였다. 휴먼에러 진단 옵저버의 설계 조건 및 존재 조건 등을 보였으며, 구체적인 예로서 크레인 작업자의 작업 모델을 대상으로 하여 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션 결과에서도 알 수 있듯이 작업자의 작업오류를 정확히 진단 및 분리됨을 보였으며, 이로서 본 장에서 제안된 옵저버의 실제 유효성이 확인되었다.

제 5 장 휴먼에러를 고려한 신뢰성 향상 설계

5.1 서 언

인간 행위의 다양성이나 심리적, 생리적인 요인에 의해서 표출되는 변화의 특성으로 인하여 맨-머신 시스템에서는 인간이 작용하는 과정에서 발생하는 실수가 시스템 실패의 중요한 요인으로 간주되고 예측이 대단히 어려운 것으로 논의되고 있다.

따라서 물리적 규칙이 엄정하게 작용하고 변화하는 물적 설비의 신뢰성 관리에 있어서는 측정이나 일정 수준에 의한 대비가 가능한 것으로 보이지만 인간의 행위는 변화의 정도가 심하고 다양하여 예측이 힘들기 때문에 인적 신뢰성의 측정이나 대비는 어려울 것이다.

인간이 작업하는 곳에서는 학습여부, 숙련도, 기술수준의 정도와 관계없이 인간의 실수가 발생 할 수 있는 것으로 보기 때문에 시스템 신뢰성 관리의 관건은 인적 신뢰성 관리에 있다고 할 수 있다.

시스템에서 일어나는 문제의 많은 부분이 인적요인에 의해 발생되므로 인적 오류 방지를 위하여 확률론적 안전성 평가를 실시하고 있는 것이 인적 신뢰도 분석이다.

본 장에서는 시뮬레이션을 이용한 휴먼에러를 검출하여 갠트리 크레인의 작업형태, 인간실수의 분석을 통하여 운전자의 속성을 전달하기 위한 실제와 사용되어진 데이터를 비교 분석하였고, 종래 작업자의 부주의에 의한 사항을 옹저버를 이용하여 정확히 진단하였다. 또한 작업자의 오류를 추정하여 이에 대한 보상을 행하는 방법으로 신뢰성을 향상 시킬 수 있는 휴먼에러의 요소와 외란요소를 동시에 추정하는 옹저버 설계를 보여서 신뢰성을 높이는 방법을 제시하고자

한다.

특히, 시스템 성능을 최적화하는 신뢰성 보상 시스템의 안정성은 휴먼에러에 크게 의존하여야 하므로 갠트리 크레인의 경우 강건 서보계 설계법에 의해 설계하였다.

시뮬레이션의 결과를 휴먼에러와 외란요소를 고려하여 알아 보고자하며, 이는 휴먼에러 및 외란을 보상한 신뢰성 기법을 맨-머신 시스템이 정상적으로 작업할 경우 신뢰성을 지닐 수 있는 보상 기법임을 확인하고 차후에 연구되어야 할 새로운 시스템의 개발에 대하여서 제시하고자 한다.

5.2 문제정의

본 장에서는 앞 장에서 행한 연구 정의에 의해서 휴먼에러를 포함한 작업자 모델을 다음과 같이 미지입력을 지닌 선형 시 불변 시스템으로 가정하고자 한다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1u(t) + B_2d(t) + Dd(t) \quad (5.1a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (5.1b)$$

여기서 $x(t) \in R^n$ 는 상태벡터, $u(t) \in R^m$ 는 입력벡터, $y(t) \in R^r$ 는 출력벡터, $d(t) \in R^m$ 는 휴먼에러 요소를 나타내며 $d(t) \in R^r$ 는 외란벡터를 나타낸다. A, B, C, D 는 적당한 차원의 행렬이며, (C, A) 는 가관측이다.

즉, 위 (5.1)식은 작업자의 휴먼에러 요소 및 외부의 환경 변화로부터 외란으로 작용되는 요소를 모두 고려한 부분이 된다.

앞 장에서는 (5.1)식과 같이 주어진 작업자 모델에 관하여 미지입력의 휴먼에러 요소를 추정하는 휴먼에러 진단 옵저버를 설계하였고 이를 이용하여 휴먼에러가 진단 및 분리됨을 보였다. 따라서 외란요소에 적합한 형태로 휴먼에러 진

단 오퍼버가 구성이 가능한 경우(즉, $UD=0$), 앞 장의 결과를 이용하여 작업자 오류를 추정하여 이에 대해 보상을 행하는 방법으로 신뢰성을 향상 시킬 수 있다.

그러나 작업자 모델에서 외란으로 작용하는 부분이 어떻게 변화될 수 있을지에 따라 휴먼에러 진단 오퍼버 설계에 영향을 미치므로, 이러한 경우를 동시에 만족시킬 수 있는 오퍼버 설계는 극히 제한될 수밖에 없다. 따라서 본 장에서는 작업자 모델에 가해지는 휴먼에러 요소 및 외란요소를 동시에 추정하는 오퍼버 설계를 보이며, 추정된 요소를 이용하여 시스템의 신뢰성을 높이는 방법에 대하여 연구를 행하고자 한다.

5.3 휴먼에러 및 외란진단 오퍼버 설계

본 장에서는 (5.1)식에 대하여 휴먼에러 요소와 외부외란 요소가 모두 미지에 해당되므로, 이를 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Fv(t) \quad (5.2a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (5.2b)$$

여기서,

$$F_i = [B_i \ D_i]$$

$$v_i = \begin{bmatrix} a_i \\ d_i \end{bmatrix}$$

주의 1 : 시스템 (5.2)식에 대해 휴먼에러 진단 오퍼버를 설계하는 경우,

$\text{rank}(F) \leq \text{rank}(C)$ 이 성립하도록 출력수를 정해야 하며, $B=D$ 인 경우는 $F=D$ 및 $x(d) = \alpha(d) + \beta(d)$ 형태로 나타낼 수 있다.

즉 위 (5.2)식에서 휴먼에러 $\alpha(d)$ 와 외란요소 $\beta(d)$ 가 포함된 미지입력 $x(d)$ 을 추정할 수 있다면, 추정치를 이용하여 입력 보상을 행하여 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

먼저 휴먼에러 및 외란진단 옵저버의 특성을 보이기 위해 (5.2)식에서 $x(d)=0$ 인 경우를 고려하자. 선형 시 불변 서브 시스템 (5.2)식(단, $x(d)=0$)에 대하여 휴먼에러 및 외란진단 옵저버는 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\dot{\hat{x}}(d) = \hat{A}\hat{x}(d) + \hat{B}y(d) + \hat{J}u(d) + \hat{H}w(d) \quad (5.3a)$$

$$\hat{x}(d) = \hat{C}\hat{x}(d) + \hat{D}y(d) \quad (5.3b)$$

$$\hat{w}(d) = y(d) - \hat{C}\hat{x}(d) \quad (5.3c)$$

여기서 $\hat{x}(d) \in \mathbb{R}^n$ 는 추정된 상태벡터를 나타내며, 출력오차는 $w(d) \in \mathbb{R}^p$ 이며 $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}, \hat{H}, \hat{J}$ 는 적당한 차원의 옵저버 행렬이다.

보조정리 1: 휴먼에러 및 외란요소가 포함된 작업자 모델 (5.2)식에 대해 (5.3)식이 휴먼에러 및 외란진단 옵저버가 될 충분조건은

$$\text{Re } \lambda_i \left[\begin{array}{c|c} \hat{A} & \hat{H} \\ \hline -\hat{C} & 0 \end{array} \right] < 0, \quad i=1, \dots, n+p \quad (5.4)$$

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

$$\widehat{AU} + \widehat{BC} = UA \quad (5.5)$$

$$\widehat{J} = UB \quad (5.6)$$

$$\widehat{CU} + \widehat{DC} = I_n \quad (5.7)$$

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

증명 : (Kim, 1996)의 정리 4.2의 증명을 참고.

(5.2)식에 대해 휴먼에러 및 외란진단 옵저버의 특징 중의 하나인 미지 입력 값 추정에 관하여 다루기 위해 $\alpha(\lambda) \neq 0$ 인 미지입력을 고려하자.

간단히 $\widehat{C} = I_n$ 로 두고, 추정오차 벡터 $\xi(\lambda)$ 을 다음과 같이 가정하면,

$$\xi(\lambda) = \alpha(\lambda) - U\hat{\alpha}(\lambda) \quad (5.8)$$

(5.8)식을 양변 미분하여, (5.2)식 및 (5.3) ~ (5.7)식을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(\lambda) &= \dot{\alpha}(\lambda) - U\dot{\hat{\alpha}}(\lambda) \\ &= \widehat{A}\xi(\lambda) + \widehat{H}\omega(\lambda) - UF\alpha(\lambda) \end{aligned} \quad (5.9)$$

변수 $\xi(\lambda)$ 를 가정하고, \widehat{H} 를 (5.11)식과 같이 설계하면,

$$\xi(\lambda) = \omega(\lambda) - \alpha(\lambda) \quad (5.10)$$

$$\widehat{H} = UF \quad (5.11)$$

(5.9)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi(\lambda) = \widehat{A}\xi(\lambda) + \widehat{B}\zeta(\lambda) \quad (5.12)$$

또한, (5.3b)식, (5.3c)식은 (5.7)식을 이용하여 정리하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\widehat{x}(\lambda) = \xi(\lambda) + x(\lambda) \quad (5.13)$$

$$\dot{\omega}(\lambda) = -C\xi(\lambda) \quad (5.14)$$

(5.13)식을 양변 미분하고 $x(\lambda)$ 을 미소구간에서의 스텝신호로 가정하면, (5.14)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\omega}(\lambda) = -C\xi(\lambda) = \zeta(\lambda) \quad (5.15)$$

따라서 (5.12)식과 (5.15)식을 이용하여 확대계를 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}(\lambda) \\ \zeta(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widehat{A} & \widehat{H} \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(\lambda) \\ \zeta(\lambda) \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

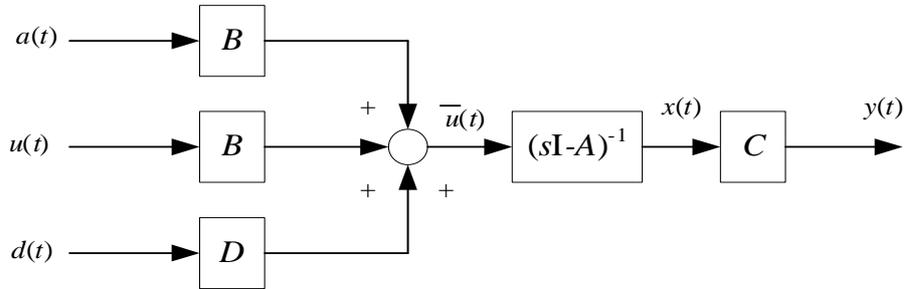
보조정리 1에 의해 (5.4)식이 만족되므로 (5.16)식에서 $\lambda \rightarrow \infty$ 일때 $\xi(\lambda), \zeta(\lambda) \rightarrow 0$ 으로 수렴함을 알 수 있다. 그러므로 (5.10)식에 의해서 휴먼에러 및 외란요소를 포함한 미지입력 요소 $x(\lambda)$ 는 출력 추정 오차의 적분치에 의해 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{w}(d) = \begin{bmatrix} \hat{a}(d) \\ \hat{a}(d) \end{bmatrix} = \omega(d) \quad (5.17)$$

5.4 신뢰성 향상 시스템 설계

일반적으로 외부에서 인가되는 요소를 입력 외란으로 간주하여, 이러한 외란에 대해서 하중 함수를 설계하고, 이를 이용하여 H_∞ 이론(Zhou et. al., 1996) 등을 이용하여 제어기를 설계하거나, 기타 강건 제어기법을 이용하여 시스템의 성능을 최적화하는 제어를 행하고 있다. 그러나 이와 같은 제어법은 자동화를 전제로 한 시스템에 대해서 시스템의 성능만을 고려할 뿐, 맨-머신 시스템에 대해서는 고려하지 않고 있으며 특히 작업자의 오류 또는 외란의 크기 등에 대해서는 전혀 고려하고 있지 않고 있다.

따라서 본 장에서는 (5.1)식 혹은 (5.2)식으로 주어진 휴먼에러 요소를 포함한 작업자 모델에 대해서 외부 입력 $a(d)$ 및 휴먼에러 요소 $e(d)$ 가 인가되는 경우, 맨-머신 시스템에서의 작업자의 입력 조종 값(출력)을 보상하는 신뢰성 제어기 설계법에 대해서 다루기로 한다.



<그림 5-1> Configuration of System Input

먼저, 맨-머신 시스템의 작업자 모델에 가해지는 입력은 <그림 5-1>과 같은 형태로 주어진다.

$$\bar{u}(t) = Bu(t) + Bd(t) + Dd(t) \quad (5.18)$$

$$= Bu_c(t) \quad (5.19)$$

여기서 종래의 맨-머신 시스템에서의 작업자 모델의 입력은 단순히 $u(t)$ 만으로서 (5.18)식의 우변 첫째항만을 고려하였으나, 신뢰성을 고려한 맨-머신 시스템에서는 휴먼에러 및 외부외란을 고려하여 제어입력을 (5.19)식의 $u_c(t)$ 와 같이 나타낸다.

또한, (5.1)식 및 <그림 5-1>에서 시스템에 인가되는 $d(t)$ 및 $\dot{d}(t)$ 는 작업자 모델의 상태 미분 값에 직접 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Bd(t) + D\dot{d}(t) \\ &= Ax(t) + Bu(t) + \Delta\dot{x}(t) \end{aligned} \quad (5.20)$$

다시 말하면, $\dot{x}(t) \rightarrow (\dot{x}(t) - \Delta\dot{x}(t))$ 로 바뀌며 이로 인하여 $x(t) \rightarrow (x(t) - \Delta x(t))$ 로 바뀌어 짐을 알 수 있다. 따라서 시스템의 상태편차 $\Delta x(t)$ 을 직접 보상에 이용할 수 있다.

그러므로 입력보상을 고려한 상태 피드백 제어계의 입력은 다음과 같이 결정된다.

$$u_c(t) = -K(x(t) - \Delta x(t)) \quad (5.21)$$

$$= -Kx(t) + K\Delta x(t) \quad (5.22)$$

여기서 K 는 상태 피드백 이득이며, $\Delta x(t)$ 는 적분을 행함으로서 다음과 같이 얻을 수 있다.

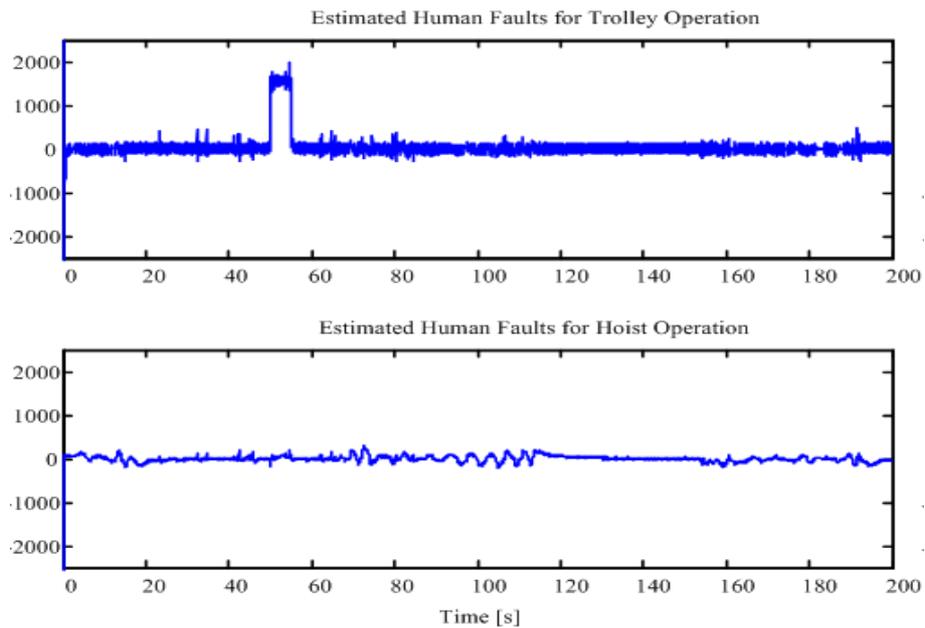
$$\Delta x(t) = \int_0^t (B\dot{\alpha}(t) + D\dot{\delta}(t)) dt \quad (5.23)$$

$$\approx \int_0^t (B\hat{\alpha}(t) + D\hat{\delta}(t)) dt \quad (5.24)$$

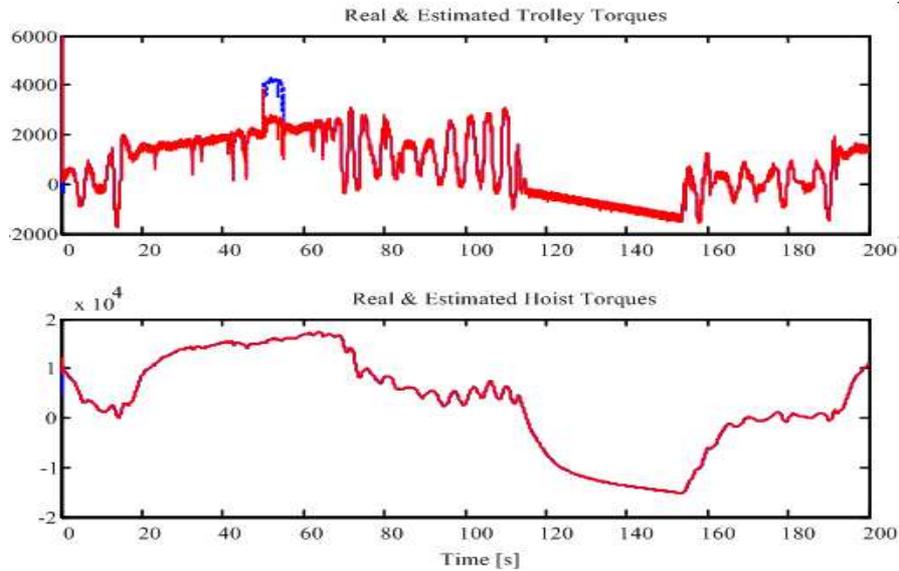
주의 2 : 신뢰성 보상 시스템의 안정성은 휴먼에러의 크기에 의존하며, 저주파형의 휴먼에러는 본 신뢰성 보상 기법으로 유효하나, 특정 주파수 성분의 휴먼에러에 대해서는 이들 요소를 완벽히 고려할 수 있는 일반 구조형 관측기(이충환 외 2인, 2000)에 의한 신뢰성 보상법 설계가 필요하다.

5.5 시뮬레이션 및 결과

본 장에서는 앞 장에서 행하여진 크레인 모델과 작업자 모델을 이용하도록 한다. 본 장에서 이용된 갠트리 크레인은 작업자의 직각 경로를 추종하여야 하며, 이때 작업자의 에러를 진단하여 이를 이용하여 제어계에 보상하도록 한다. 기본조건은 제4장의 시뮬레이션과 같으며, 작업자 에러를 트롤리 조작에 대한 $2000 [N]$ 으로 가정한다. 작업자 보상을 하지 않은 경우의 시뮬레이션 결과는 제4장에서와 같이 다음과 같이 나타내어진다.



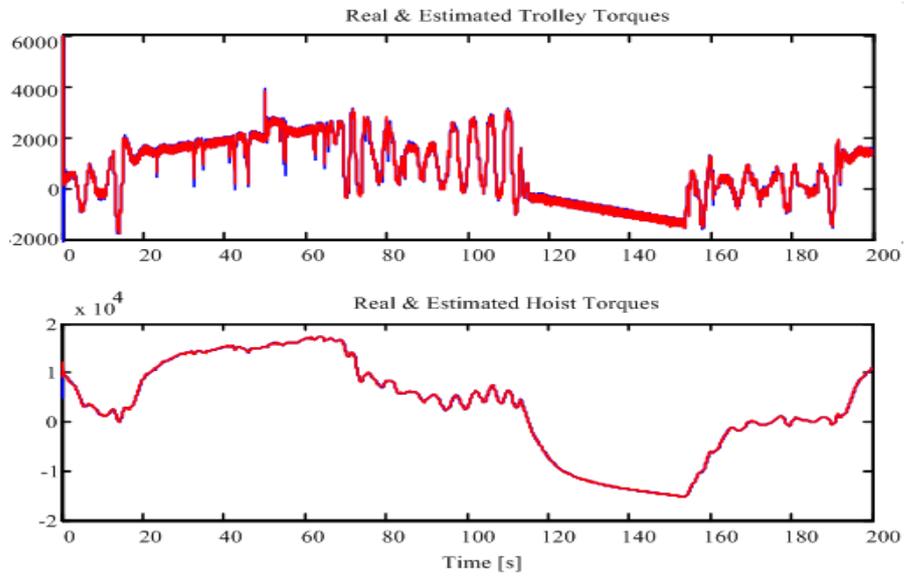
<그림 5-2> Estimated Human Faults for Crane System



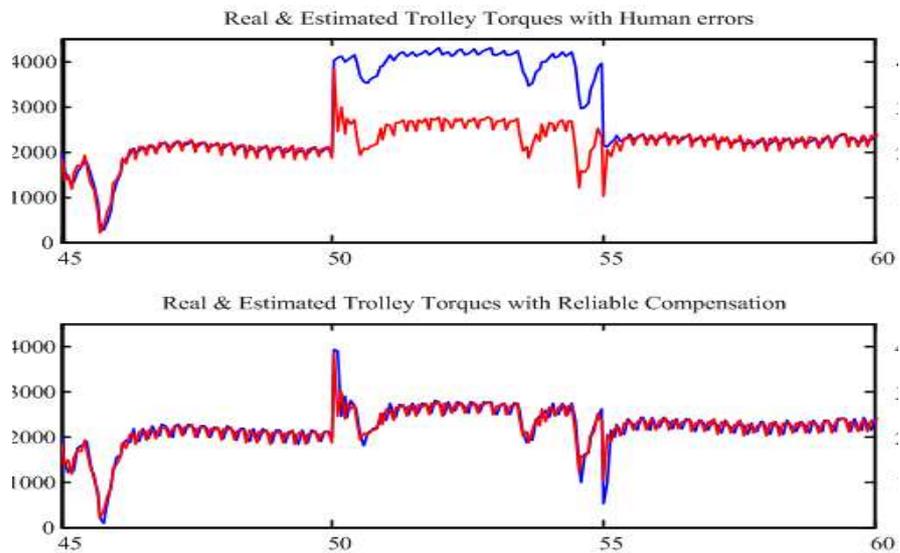
<그림 5-3> Responses of Container Crane Operation with Human Faults

시뮬레이션 결과 <그림 5-2>는 크레인 시스템에 대해서 휴먼에러의 추정을 나타내고 있으며, 이 경우 50 - 55초 사이에 약 2000 [N]의 트롤리에 대한 휴먼에러가 발생하고 있음을 보여주고 있다. 이에 대해 <그림 5-3>은 휴먼에러에 대한 실제 크레인의 트롤리와 호이스트에 대한 동력 전달을 보여주고 있으며 여기서 50 - 55초사이의 파란 점선은 트롤리에 대한 휴먼에러로 인한 결과를 보여주고 있다. 위의 트롤리 조작에 대한 오류가 실제 크레인에 전달됨으로 인하여 작업자 오류로 인한 사고가 발생된다.

이에 대하여, 본 장에서 제안된 옵저버를 이용하여 신뢰성 보상을 행한 결과는 다음과 같이 나타내어진다. <그림 5-4>는 <그림 5-3>의 조건에서 휴먼에러를 검출하여 이를 보상한 결과를 나타내고 있다. <그림 5-3>과 비교해 보면 50 - 55초 사이의 파란 점선이 없어진 것을 알 수 있다. <그림 5-5>는 <그림 5-3>과 <그림 5-4>의 결과를 50 - 55초 사이를 확대하여 비교한 결과를 나타낸다.



<그림 5-4> Responses of Container Crane Operation with Human Faults Compensation



<그림 5-5> Comparison of Container Crane Operation with/without Human Faults Compensation

<그림 5-5>의 위쪽 결과에서는 휴먼에러를 보상하지 않은 결과로서 2000 [M]에 해당하는 트롤리 방향의 조이스틱 조작에러가 그대로 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면에, <그림 5-5>의 하단에서는 보상을 행한 결과로서 정상적인 경우와 일치하고 있음을 알 수 있다.

따라서 본 장에서 제안한 관측기법과 이를 이용한 신뢰성 향상 기법이 유효함을 보여준다. 그러나 본 연구에서 휴먼에러 및 외란을 고려한 신뢰성 향상 기법은 한정된 범위 내의 휴먼에러에 한하여 유효하며, 절대적인 휴먼에러에 대해서는 별도의 알고리즘이 채택될 수 있는 기법이 요구된다.

5.6 결 언

본 장에서는 휴먼에러 및 외란진단 옵저버를 이용하여 작업자의 작업오류 및 외란을 동시에 추정하는 옵저버를 제안하였다. 이는 기존의 외란을 미지입력으로 가정한 상태에서 벗어난 형태로서 보다 광범위한 외란형태를 고려하였다고 볼 수 있다. 이후, 휴먼에러 및 외부외란에 대해서도 맨-머신 시스템이 정상적으로 작업을 진행할 수 있는, 즉 신뢰성을 지닐 수 있는 보상기법을 제안하였다. 이는 옵저버를 이용하여 추정한 휴먼에러 및 외부외란의 크기를 역으로 보상하는 방법을 택한 것으로 휴먼에러가 발생한 맨-머신 시스템에서 머신(자동화 장비)이 작업자 에러를 자동적으로 보상하는 방법이다.

시뮬레이션에서는 선행연구 결과를 바탕으로 행하였으며, 가정한 작업오류에 대해서도 정확히 진단하였으며, 이를 보상하는 맨-머신 시스템이 가능함을 확인하였다.

추후 연구방향으로서는 작업자의 에러를 보상하는 방법으로 현재는 자동적으로 행하였으나, 작업자가 의도적인 작업인가를 명확히 판단하는 알고리즘과 함께, 이를 상부에 보고하여 조치를 취할 수 있는 HWLS(Hot Warning Line System)을 개발하는 것이다.

제 6 장 결 론

인간실수는 그 결과로 나타나는 사회적, 경제적인 피해의 심각성 때문에 관심을 가지고 대비하지 않을 수 없는 상태이며 그 관심이 점점 고조되고 있다. 인간이 활동하는 곳에서는 필연적으로 실수가 발생할 가능성이 있기 때문에 실수를 유발하는 요소를 찾아 제거함으로써 신뢰성 있는 맨-머신 체계가 구축될 수 있다고 할 수 있다.

특히, 항만서비스는 작업자가 장비를 조작하므로 실수에 의한 사고가 일어나지 않도록 하여야 할 것이다. 본 논문은 시스템 설비를 운영하는 곳에서 인간실수로 나타나는 결과를 분석하기 위해서 실수를 유발하는 요인의 원인규명을 하기 위한 평가방법과 절차를 제시하고 이러한 방법에 대한 신뢰성을 적용하여 검증하였다.

이와 같은 연구를 통하여 맨-머신 시스템은 인간의 여러 특성과 능력을 결합시켜 시스템에 어떤 역할을 할 것인가 하는 문제가 고려될 경우 유용성과 능력성, 작업자 만족도 그리고 안전성과 같은 기준을 충족시키면서 전체시스템에도 신뢰를 향상시킬 수 있었다.

시스템의 신뢰를 향상시키기 위해서는 시스템과 인간 모두 만족할 수 있는 방법을 목표로 설정하여 설비, 환경, 개인적 변수, 업무 등이 조성되어야 하며, 기계와 인간이 공존하는 경우에는 보다 더 적극적으로 인간실수를 고려하여 대응하는 방향으로 진행되어야 할 것이다.

본 논문에서는 신뢰성을 향상시키기 위한 항만서비스의 작업 중 컨테이너의 수송에서 이루어지고 있는 갠트리 크레인 운전자의 동적 행위에서의 변수를 모델에 적용하여 실제 데이터와 비교하였고, 인적실수가 어느 정도 영향을 미치는 경우 휴먼에러의 검출 및 진단을 통하여 신뢰성을 향상시키는 방법을 제시하였다. 이러한 실험을 위해서 갠트리 크레인의 반응에 따른 입·출력으로 작업형태, 인간실수의 분석을 위한 휴먼 모델을 검증하였으며, 갠트리 크레인의 시뮬레이

터는 운전의 속성을 전달하는 데 사용되었다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째는 갠트리 크레인의 반응에 따른 인간모델 확인을 위하여 8개 입·출력 자료로 ARX확인 방법을 사용함으로써 모델 척도를 평가하였다. 작업모델을 얻기 위해서 크레인 운전자가 2-D그래픽 움직임을 사용하면서 조이스틱을 이용하여 갠트리 크레인을 조작하는 시뮬레이션 결과 트롤리 및 호이스트 제어 힘의 평균 적합도를 나타내었다. 이것은 작업자 모델을 사용하면서 작업케적과 효율성을 입증한 것이다.

둘째는 작업자의 모델에 대하여 휴먼에러 진단 옵저버를 이용하여 작업자의 작업오류를 진단하는 방법으로 휴먼에러 진단 옵저버의 설계조건 및 존재조건 등을 크레인 작업자의 작업모델을 대상으로 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션을 행한 결과 정상적인 경우와 작업자 오류가 발생한 경우에 대한 오차가 함몰되는 현상을 보였는데 이 현상은 작업자의 오류에 의한 트롤리 조작 핸들에서는 작업자의 운전실수가 있는 경우 실제값과 추정값이 서로 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이로써 작업자의 작업오류를 정확히 진단 및 분리됨을 보이는 것으로 보아서 제안된 옵저버의 실제 실효성이 확인되었다.

셋째는 휴먼에러 및 외란진단을 이용하여 작업자의 작업오류와 외란을 동시에 추정하는 옵저버를 제안하였다. 이것은 기존의 외란은 미지입력으로 가정한 상태에서 벗어난 보다 광범위한 외란형태를 고려하였다. 이는 옵저버를 이용하여 추정한 휴먼에러와 외부외란 크기를 역으로 보상하는 방법을 택한 것으로 휴먼에러가 발생한 맨-머신 시스템에서 작업자 에러는 자동적으로 보상하는 방법을 확인할 수 있는 것이다.

향후 본 논문에서 제안된 작업 모델을 활용하여 인간실수의 알고리즘이 설계할 경우 3-D그래픽 움직임으로 비선형 동역학 항목을 포함한 크레인 모델을 개발할 수 있음을 입증하였다. 또한 작업자의 에러를 보상하는 방법으로는 자동적인 것 보다 의도적인 작업인가를 명확히 판단하는 알고리즘 시스템도 개발할 수 있는 것이다.

參 考 文 獻

- 김상봉, 하주식, “메카니칼 시스템 제어”, 한미출판사, pp. 90-95, pp.192-205, 1992.
- 김승호, “무재해운동 추진” 한국산업 안전공단, pp11-21, 2004
- 김환성, 박홍수, 김상봉, “컨테이너 크레인 시스템의 화물 중량 추정에 관한 연구”,
한국항만 학회 ‘98 추계 학술대회 논문집, pp. 175-180, 1998.
- 노동부, “2003년 산업재해 현황 분석”, 2004
- 박경수, “신뢰성 공학 및 정비이론” 희종당, 1988
- 연건화, “Human Error가 System 신뢰도에 미치는 영향에 관한소고” 지역개발 연
구.12, 상지대학교, 1990
- 이순효, “미래 지향적 인간공학”, 양영각, 1995
- 정광태, “인간기계 체계에서 인적오류 정량화에 관한 연구” 한국과학기술원, 1995
- 최홍환, “인적 신뢰도 분석을 위한 정보 분석 체계를 위한 연구”, 한국과학기술원,
1999
- 한균원, “산업안전보건 실무”, 형설출판사, 2005
- 홍금식, 손성철, 이만형, “컨테이너 크레인의 흔들림 제어 (Part I): 모델링, 제어전
략, 기준 선도를 통한 오차 피드백 제어”, 제어·자동화·시스템공학회지, 제 3
권, 제 1호 pp.23-31, 1997.
- 陶山貢市, “Reliable Control”, 計測と制御, Vol. 35, No. 2, pp.151-159, 1996.
- 川路 等, “オブザーバ”, コロナ社, 1994.
- Aldeen, M and Marsh, J. F., “Decentralised Observer-based Control Scheme for
Interconnected Dynamical Systems with Unknown Inputs”, *IEEE Proc. Control
Theroy Appl.*, Vol. 146, No. 5, pp.349-358, 1999.
- Antsaklis, Panos. J and Michel Anthony N., “Linear Systems”, Mc Graw-Hill, 1988
- Apostolakis, G. E, Bier, V, M. and Mosleh, A., “A Critique of Recent Models for

- Human Error Rate Assessment", *Reliability Engineering and System Safety*", Vol.22, pp.201-217, 1988
- Astrom, Karl. J. and Wittenmark, Bjorn., "Computer-Controlled Systems Theory and Design", Prentice-Hall International, 1997
- Brodner, P., "Human Work Design for Man-machine system A challenge to Engineers and Labor sciences", *IFAC Analysis, Design, and Evaluation*
- Bryson, Arthur. E. Ho, Jr. Yu-Ch., "Applied Optimal Control Optimization, Estimation, and Control", John Wiley & Sons, 1975
- Cacciabue, P. C., "Evaluation of human Factors and man-machine Problems in the Safety of Nuclear Power Plants", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 109, pp417-431, 1988
- Cacciabue, P. C., "Understanding and modeling man-machine interaction", *Elsevier Science, Nuclear Engineering and Design* 165, pp.351-358, 1996
- Chapanis, A, *Engineering Psychology*, in M. Dunnette(ed.), "Handbook of Industrial Organizational Psychology", Rand Mc Nally, Chicago, 1976
- Charles, F. O., Agarwal G. C., Neill. W. D. O, and Gottlieb G. L., "Application of time-series modeling to human operator dynamics", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. SMC-10, no. 12, pp.849-860, 1980
- Christensen, J. M., Howard, J. M, Stevens, B. S., "Human Detection and Diagnosis of System Failures", New York Plenum Press, pp.111 ~ 112, 1981
- Comer, M, Seaver, D., Stillwell, W., and Gaddy., C, "Generating human Reliability estimates using expert judgment", *NUREG/CR-3688*, 2 Vols, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, 1983
- Cooper, J. I., "Human-Initiated Failures and Malfunction Reporting", *IRE Trans Human Factors Electron*, vol HFE, No.5, p.23.
- Dhillon, B. S., "Human Reliability with Human Factors", Pergamon Press, 1987
- Embery, D., "The Human Operator and System Reliability", *Applied Psychology*

- Department, University of Aston, Birmingham, A. P, P4, 1976
- Franklin, Gene. F, Powell, J. David, and Workman, Michael., "Digital control of Dynamic Systems", Addison Wesley Longman, 1998
- Fujita, Y., "human reliability analysis: a human point of view", Reliability Engineering and System Safety, Vol.38, pp72-79, 1992
- Glass, B. J and Wong, C. M., "A Knowledge-Based Approach to Identification and Adaptation in Dynamical Systems Control", IEEE, pp.881-886, 1988
- Hagen, E., "Reliability Analysis, Nuclear Safety", No. 17, pp.315, 1776
- Hall, R. E., Fragola, J. R and Wreathall, J., "Post Event Human Decision Errors: Operator Action Trees/ Time Reliability Correlation", NUREG/CR-3010, Brookhaven National Laboratory, November, 1982
- Hannaman, G. W., Spurgin, A. J., and Lukic., Y. D., "Human Cognitive Reliability Model for PRA Analysis", NUS-4531, NUS Corporation, December, 1984
- Johns E.J, Payne J.W, Bettman J.R., "Adapting to time constraints. In Time pressure and stress in human judgement and decision making", Ola Svenson & A. John Maule Eds. Plenum Press. New York and London, 1993
- Kailath. T., "Linear Systems", *Prentice Hall Information and System Sciences Series*, 1980.
- Kim, Hwan-Seong, Kim, Hak-Kyeong, Jeong, Nam-Soo, and Kim, Sang-Bong., "Behavior Analysis Method for Fishes in a Water Tank Using Image Processing Technology", ICASE, Vol. 1, No. 1, pp.111-118, 2003
- Kim, Hwan-Seong, Tran, Ngoc, Son, Hoang and Kim, Seung-Ho., "Design of Human Works Model for Gantry Crane System", Asia Navigation Conference 2004, pp.102-112, 2004
- Kim. H. S. and Kawaji. S., "Unknown-Input PI Observer Based Reliable Control for Decentralized Interconnected System with Actuator Failures", RESCCE'00, pp.199-204, 2000.

- Ljung, Lennart., "System Identification", Prentice Hall PTR, 1999
- Malek, Aiman Abdel and Marmarelis, Vasilis Z., "Modeling of Task-Dependent Characteristics of Human Operator Dynamics Pursuit Manual Tracking", IEEE Trans. Syst., Man, and Cybernetics, Vol. 18, No. 1, pp.163-172, 1988
- Mark S. Sanders., Mc Cormick Ernest J., "Human factors in engineering and design", sixth edition, McGraw-Hill international editions, 1987
- Martens, D., "Neural networks as a tool for the assessment of human pilot behaviour in wind shear", Aerospace Science and Technology, No. 1, pp.39-48, 1999
- Meister, D., "Methods of Predicting Human Reliability in Man-Machine Systems", Human Factors, Vol.6, pp.621-646, 1964
- Meister, D., and G. Rabideau., "Human Factors Evaluation on system Development", John Wiley & Sons, Inc. New York, 1965
- Meister, David., "Human Factors: Theory and Practice", John Wiley & Sons, Inc, pp.98-100, 1971
- Onder. Efe. M and Kaynak. Okayay., "Neural-Fuzzy Approachs for Identification and Control of Nonlinear Systems", IEEE, pp.TU2-TU11, 1999
- Osafo-Charles, F, Agarwal, G. C., O'Neill, W. D., and Gottlieb. G. L., "Application of time-series modeling to human operator dynamics", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-10, no. 12, pp.849-860, Dec, 1980
- Park, K. S., "Human Reliability Analysis: Analysis, Prediction, and Prevention of Human Errors", Netherlands: Elsevier Science Publishers Co, 1987
- Park, H, and Park, K. S., "Human reliability grows in the absolute identification of tons", J. of Human Engineering Soc. Korea, Vol.%, No. 2, pp.3-7, 1986
- Reason, J., Generic error Modeling system(GEMS): "A cognitive framework for locating common human error forms". In New Technology and Human Error edited by J. Rasmussen, k. Duncan & J. Leplat. John Wiley & Vol.22, No.3, pp.63-83, 1987
- Regulinski, T. and Askren, W., "Mathematical modeling of human performance

- reliability”, Proc, Annual Symp. Reliability, pp.5-11, 1969
- Richard, C., Dorf, Robert, H, Bishop., “ Modern Control Systems”, Prentice-Hall, 2001
- Rook, L, Jr., “Reduction of Human Error in Industrial Production”, Sandia corporation, Albuquerque, N, M, SCTM 93-62(14), 1962
- Rouse, William B. and Rouse, Sandra H., “Analysis and Classification of Human Error”, IEEE Transactions on system Man, and cybernetics, Vol. SMC-13, No43, 1983
- Sayers, B. A., “Human Factors and Decision Making: their influence on safety and reliability”, Elsevier Applied Science, 1988
- Sheridan, P. B., “Measuring, Modeling, and Augmenting Reliability of Germany”, 1982, p152 Man-machine system IFAC Analysis. Designand Evaluation of Man-machine System, Baden Baden, Federal Republic of Germany, P342, 1982
- Siegel, A .I. and Wolf, J. J., “A technique for evaluating man-machine Systems”, Human Factors, Vol.3, No1, pp.16-28, 1961
- Siegel, A.I. and Wolf, J. J., “A model for digital simulation of two-operator man-machine systems”, Ergonomics, Vol.5, No.4, pp.557-572, 1962
- Sinha N. K and Kuszta, B., “Modeling and Identification of Dynamic Systems”, Van Nostrand Reinhold Company, 1983
- Shinners. S. M., “Modeling of human operator performance utilizing time series analysis”, IEEE Trans. Syst. Man Sybern., Vol. SMC-4, no. 5, pp.446-458, 1974
- Sigurd, Skogestad, Ian, Postlethwaite., “Multivariable feedback control, Analysis and Design”, John Wiley & Sons, 1996
- Swain, A. D. and Guttmann, H. E., “Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Applications”, NUREG/CR-1278, Sandia National Laboratories, August, 1983
- Swain, A. D., “Human Reliability Analysis: Need, Status, Trends and Limitations”, Reliability Engineering and System Safety”, Vol.29, pp301-313, 1990
- Terano. T, Murayama. Y, N. Kiyama. A., “Human Reliability and safety Evaluation of

- man-machin system”, *Automatica*, Vol 19. No.6. P719, 1983
- Tillman, Lee, K. W, F. A., and Higgins, J. J., “A Literature Survey of the human Reliability Component in a Man-Machine System”, *IEEE Trans. Reliability*, Vol. 7, No.1, pp24-34, 1988
- Veillette, R. J, Medanic. J. V, Perkins. W. R., “Design of Reliable Control Systems”, *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 37, No. 3, pp. 290-304, 1992.
- William, S. Levine., “The Control Handbook”, *IEEE Press*, Vol. II, Section XVIII-80, R. A. Hess, Human-in-the-Loop Control, pp.1497-1505, 1996
- William, S. Levine., “The Control Handbook”, *IEEE Press*, Vol. II, Section XII-58, Lennart Ljung, System Identification, pp.1033-1054, 1996
- William, S. Levine., “The Control Handbook”, *IEEE Press*, Vol. I, Section II-7, Francois E. Cellier, Hilding Elmqvist, Martin Otter, William S. Levine, Determining Models, pp.99-112, 1996
- Woodson, W, and D. Conover., “Human Engineering Guide for Equipment Designers”(2nd), university of california Press, Bekeley, 1964
- Yehia M. E., “Human Operator Behaviour Modeling Using Nonlinear Identification Techniques”, *IEEE*, pp. 211-216, 1995
- Zhou, Kemin, Doyle, John. C., “Essentials of Robust Control”, *Prentice Hall*, 1998
- Zhou, K, Doyle, J. C. and Glover, K., “Robust Optimal Control”, *Prentice Hall*, 1996.

감사의 글

세상에서 가장 아름답고 소중한 것은 보이거나 만져지지 않고 가슴으로만 느낄 수 있는 것입니다. 그리고 어떤 일을 할 때나 희망을 가질 때 행복해지는 것입니다. 행복을 위해서 오늘을 알차게 산다면 바라는 것은 나타나게 되는 것이고 아름다운 사람이 될 것입니다.

많은 것이 부족함에도 항상 관심과 사랑으로 정성스럽게 지도해 주신 김환성 지도 교수님께 깊은 마음으로 고개 숙여 감사드립니다. 또한 모자라는 부분에 정성스럽게 격려와 지도를 해주신곽규석 교수님, 남기찬 교수님, 김상봉 교수님, 이진우 박사님, 물류시스템공학과 교수님과 박사과정에 많은 도움을 준 Tran, Ngoc, Son, Hoang, 배민주를 비롯한 실험실 가족에게 감사드립니다.

그리고 여러 가지로 본 논문이 완성되도록 지원을 아끼지 않았던 김기식 교수님과 사랑하는 후배 윤인식 교수를 비롯한 선배님, 후배, 동료들에게 감사를 드리며, 인천에서 부산까지 학문의 장을 열수 있도록 지원을 해주신 산업안전교육원 김삼암 원장님과 산업재해예방과 무재해를 위하여 혼심을 쏟고 있는 KOSHA 임·직원에게도 감사드립니다. 또한 힘들 때면 옆에서 격려와 용기를 가져다 준 남삼희 친구와 모든 사람에게도 감사드립니다.

항상 말없이 지내면서 가장 아름답고 오래가는 향기가 될 수 있도록 사랑으로 감싸준 아내 순덕, 건강하고 밝게 지내고 있는 딸 솔희, 동휘 그리고 노심초사 걱정을 해주신 부모님, 형, 동생, 조카 및 처남, 처형, 하늘에 계신 장인, 장모님께 이 논문을 바칩니다.