

전달함수를 이용한 Man-Machine System의 평가 모델 구축에 관한 연구

- A Study on Evaluation Model Construction of Man-Machine System Using Transfer Function -

김 만 균*

Kim, Man-Kyun

합 효 준**

Hahm, Hyo-Joon

Abstract

This study is concerned with the evaluation model construction of Man-Machine System(MMS) using Transfer Function in order to improve the control characteristics of an operator in the system and the procedure for ergonomic system design.

When man, as a subsystem, performs his allocated functions in a system, many physical and physiological problems such as fatigue, stress and error occur. And the imperfect design of a MMS may itself be a situational factor that accelerates stress as well as an idiosyncratic factor that causes errors. So, the economy of design should be considered together with the ergonomic characteristics on the evaluation of MMS.

I. 서 론

과학이 발달하지 않았던 시대의 생산 활동은 거의 인간의 노동력에 의존하고 있었다. 그후 문명이 발달하고 연장과 기계가 발명됨에 따라 인간이 노동력이 사용되었던 많은 분야에 기계가 대체 사용되는 비율이 점차 높아졌고 산업혁명 이후 과학의 눈부신 발달에 힘입어 현대의 Automation System 산업구조가 구성되었다. 그러나 오늘날 Computer를 비롯하여 업무의 자동화를 위한 기술이 고도로 발달하였음에도 불구하고 아직도 인간의 육체적 노동이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 따라서 어떤 조직이든 직무를 담당하는 주체로서 인간과 기계를 시스템화하지 않을 수 없게 되는데 그것이 현대 생산 조직의 특징인 Man-Machine System(MMS)이다. MMS는 인간이 기계를 사용하여 목표로 하는 결과를 얻고자 활동하는 모든 Operation System을 말하여, 인간과 인간이 취급하는 모든 설비 및 환경(Environment)을 총칭하는 기계는 업무 수행에 필요한 기능에 의하여 유기적인 결합을 하고 있다. 이때에 인간은 독립된 기체로서 뿐만 아니라 시스템을 구성하는 하나의 Sub-system으로 파악되어야 한다.

인간공학은 주로 Sub-system으로서의 인간과 MMS의 통합 시스템을 연구 대상으로 하며, 수행도(Performance)의 향상, 인력이용률(Man Power Utility)의 향상, 생산 및 보전(Production and Maintenance)에서의 경제성 증대 등과 같은 일반목적을 달성하고자 하는 학문이다. 이러

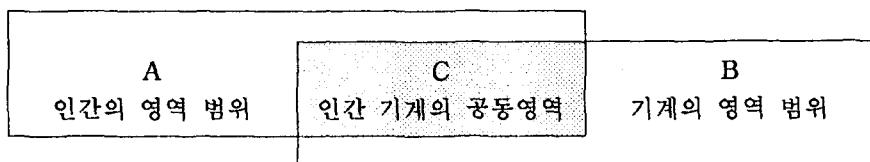
* 대우그룹 회장비서실

** 아주대학교 산업공학과

한 인간공학은 기계의 기능중시 사상에서 인간중시로, 개인적 인간·기계의 분리 개념에서 스템의 유효성 중심으로 발전되어 왔으며, 어떠한 경우이든 기계의 설계나 인간에게 부과해 직무를 할당함에 있어서는 인간의 능력과 특성이 고려되어야 한다는 것은 명백하다. 인간공학의 연구분야는 MMS, 입력정보, 출력제어, 작업조건, 인간공학적 설계, 인적 조건의 적용, 작업 조건 등으로 나눌 수 있으며, 기 설계된 기계나 운영중의 시스템이 인간공학적 측면에서 인간과 기계간에 어떻게 조화되고 있느냐를 시스템적 측면에서 계량적으로 평가할 수 있는 모델을 제시함으로써 MMS 설계의 평가 척도로 이용할 수 있고 인간공학적 관점에서 시스템간의 상호우위를 비교할 수 있도록 한다. 따라서 본 연구에서는 MMS를 대상으로 전체 시스템적인 측면에서 전달합수를 이용하여 Man-Machine 관계를 시스템적으로 평가할 수 있는 모델을 제시하고자 한다.

II. 시스템내에서의 MMS

시스템내에서 인간은 개체로서의 기능을 독립적으로 수행할 뿐아니라, 기계와 관련되는 제반 기능도 수행하게 된다. 이는 System이 어떻게 구성되느냐에 따라 다르며 <그림 1>에서와 같이 세 영역으로 분류할 수 있다.

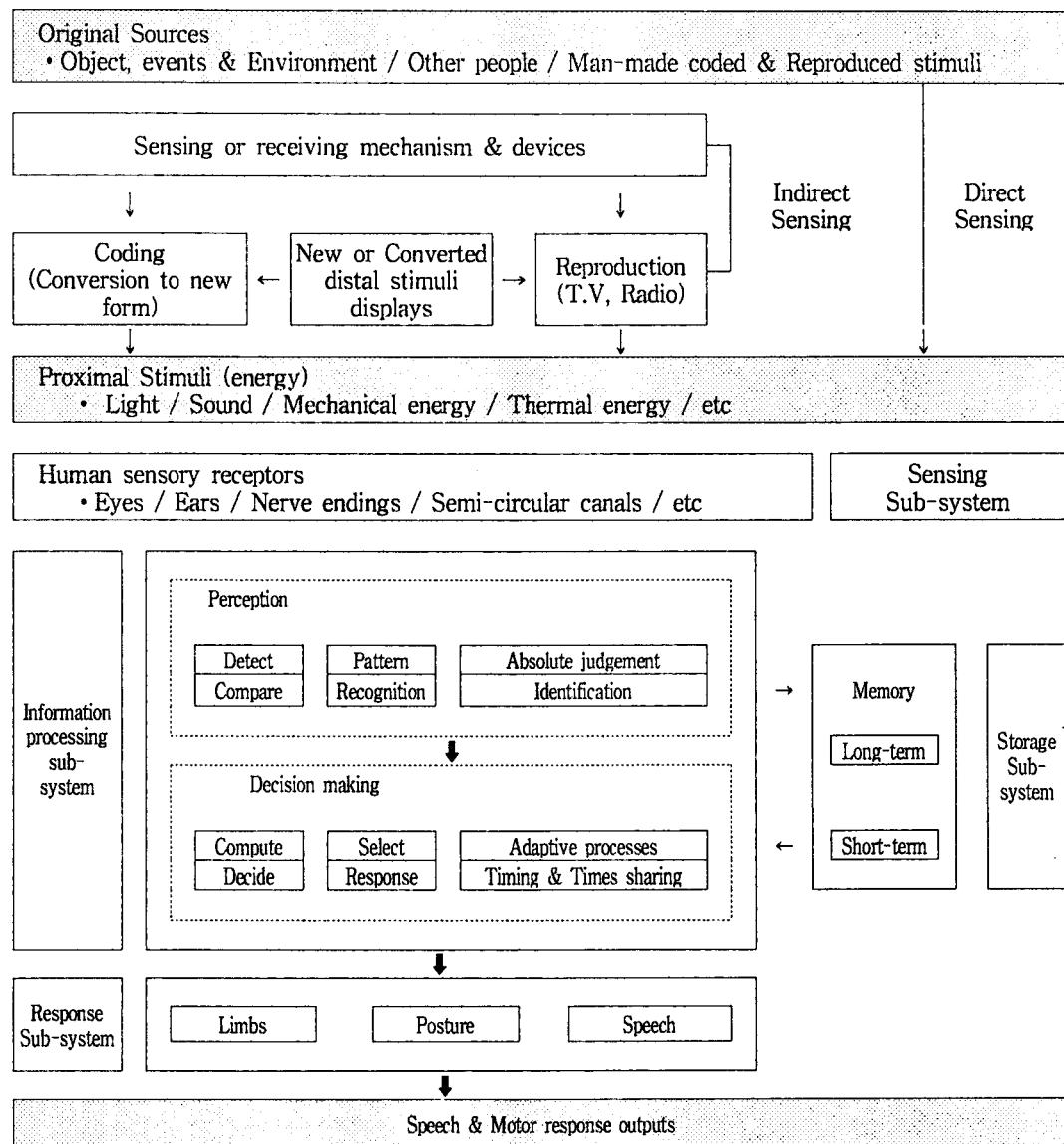


<그림 1> 인간과 기계 사이의 기능적 관계도

위 그림에서와 같이 A영역은 항공기 조정 시스템에서 처럼 시스템을 움직이게 하는 주역이 인간이고, 기계 특히 정보처리 기계가 인간을 뒷받침해 주는 시스템이다. B영역은 주역이 기계이고 인간이 기계를 뒷받침해 주는 시스템이다. 이중 인간은 기계가 정상적으로 작동하고 있는지 항상 Check하여야 하며, 이상이 발생하였을 때에는 즉시 인간이 기계를 대신하여 제어하여야 한다. C영역은 인간과 기계가 협조하여 공동으로 시스템을 움직여 나가는 경우이며, 대부분의 반자동 시스템이 여기에 속한다. 그 외에도 실제로는 ABC 혼합 영역의 시스템도 있다. 일반적으로 MMS의 영역은 B, C 영역 또는 그 혼합 영역을 말하며, 자동화가 될수록 기계의 기능 영역이 넓어져서 인간은 기기의 조작, 수리, 부품 교환등의 단속적 작업은 줄어들고, Vigilance, Monitoring, Tracking 등의 연속적인 업무가 증가한다.⁽³⁾ 즉 시스템이 자동화되고 안정될수록 연속적인 업무 수행의 비중이 커진다.

자동화된 시스템내에서의 인간의 제어 기능은 정보전달 기능이라고 볼 수 있다. <그림 2>는 인간의 정보처리 과정을 나타낸 것으로서 이는 Mc Cormick⁽¹⁾, Salvendy⁽⁶⁾ 및 Van Cott⁽¹⁾의 모형을 기초로 하여 자극의 입력에서부터 출력 반응에 이르기까지 전 과정을 하나의 모형으로 표현하였다. 아래 <그림 2>에서와 같이 대상물로부터 얻어지는 자극을 Distal Stimuli(원자극)이라 하며, 인간은 이러한 원자극을 그 종류에 따라 그 감각 기관으로부터 직접 받아들이거나, 어떤 수용기를 통하여 받아들여 인간이 감지할 수 있는 에너지로 변환시켜 지각하는 간접적인 방법을 택하기도 한다. 자동화된 MMS에서는 여러가지 계측기나 신호기, 지시계기 등의 판넬이나 표시장치 등이 자극원이 된다. 인간의 정보처리 시스템은 <그림 2>에서와 같이 정

보지각, 정보처리, 기억 및 반응의 네 가지 Sub-system으로 나눌 수 있으며, 이것은 인간의 내적 특성이라고 일컬어지며, 외적 특성인 인간의 형태적, 근력적 특성과 함께 MMS의 Design에 고려되어야 할 필수적인 요소이다.



<그림 2> 인간의 정보처리 과정 (자극의 입력에서 출력 반응까지)

III. 모델 분석

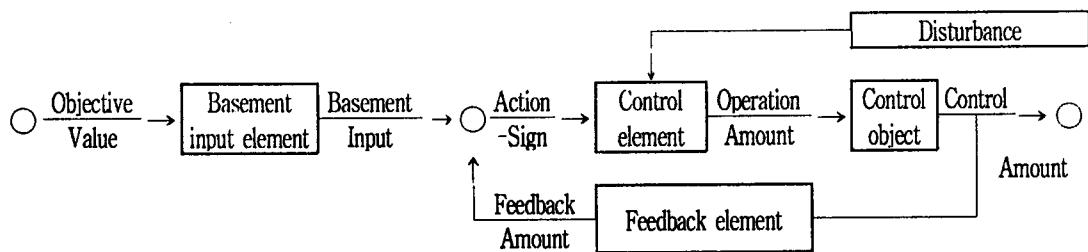
1. 전달함수

시스템의 입출력간의 관계 또는 그 제어요소의 신호전달 특성을 말한다. 즉, 제어계 또는

요소의 입출력 신호의 관계를 전달함수라 정의하며, 선형시스템에서 모든 초기값을 “0”으로 하였을 때 출력신호의 Laplace 변환과 입력신호의 Laplace 변환과의 비로서 정의되고⁽⁹⁾ 함수 $f(x)$ 는 신호의 크기와 위상의 관계로 표시된다.

2. 제어시스템

일반적으로 제어 시스템은 <그림 3>과 같이 입출력요소, 제어요소, 제어대상, Feed-Back 요소 등으로 나누어지며, 인간과 기계가 주된 서브 시스템으로서 상호 유기적인 결합을 이루는 MMS를 하나의 제어시스템으로 파악하면 인간은 제어요소가 되고 기계는 제어 대상이 된다.



<그림 3> Black diagram의 제어시스템

이러한 제어 시스템으로서의 MMS는 그 결과의 형태에 따라 Uncompensated System, Aided Control System, Quickened Control System으로 나눌 수 있다.⁽⁸⁾ Uncompensated System은 시스템 내부에 아무런 변화가 없는 시스템을 말하며, Aided Control System은 기계 각 부분의 각 요소에서 평행 회로로 지원해 주는 Feed-Forward System은 각 요소에서 Feedback Compensation을 해주는 시스템이다.

3. MMS의 전달함수

3-1. 인간의 전달함수

제어 작업자로서의 인간의 행동양태는 복잡 다양하여 하나의 단순 모델로 나타내는 것은 거의 불가능하다. 인간의 행동양태는 선형요소뿐만 아니라 비선형, 동적변화, 확률적 변화를 가지며 실제로는 그들의 복합형일 때가 많다. 이러한 인간은 경험에 의하여 학습하는 고도의 적응성을 가진 제어기라고 볼 수 있으며, 그 성능은 동기부여, 피로 또는 경험적인 정보 등에 의하여서도 영향을 받는다. 이러한 시스템내에서의 인간의 전달함수 [$Hm(S)$]에 대하여는 많은 연구가 되어 왔으며, 그 대표적인 연구 모델은 다음과 같다.⁽⁸⁾

가. Ragazzini 모델

$$\text{인간의 전달함수, } Hm(S) = K_1(K_2 + K_3 \cdot S + \frac{K_4}{S}) \cdot e^{-DS} \quad \dots \quad ①$$

단, K_1, K_2, K_3, K_4 : 조작자의 트래킹 점수이며, 전달함수 Laplace 변수 S 의 다항식(Polynomial)의 비로 표시된다.

Ragazzini 모델은 조작자의 응답이 완전히 비선형이고 인간의 전달함수 [$Hm(S)$]는 시간에 따라 변하며, 또 랜덤한 특성을 지니고 있다는 것을 전제로 한다.

4. Phillips 모델

$$Hm(S) = K \frac{(1 + T_A \cdot S)}{S} \cdot e^{-DS} \quad \dots \quad ②$$

$$\doteq \frac{K}{S} \cdot e^{-DS} \text{ (T}_A \rightarrow 0)$$

단, D : 조작자의 전달지연, T_A : 얘기 시정수

Phillips는 Step Function의 응답에 기준을 두고 인간의 전달함수를 제시하였다.

다. Tustin 모델

$$Hm(S) = \frac{K(1 + T_A \cdot S)}{S} \cdot e^{-DS} \quad \dots \quad ③$$

Phillips와 Tustin의 모델은 비슷하게 보이나 Phillips는 $\frac{(1 + T_A \cdot S)}{S}$ 값 전체에 K배를, Tustin은 $(1+T_A \cdot S)$ 값에 K배를 한 것이 차이이다. 이 밖에도 Hyndman & Beach 모델, McRuer & Krendel 모델 등의 주요 전달함수가 있으며, 이러한 전달함수들도 제어공학적 표현에 의한 이론식들이 인간을 완전하게 대표할 수 있는 모델은 없는 것으로 판단된다.

3-2. 기계의 전달함수

시스템내에서의 기계란 시스템을 구성하는 Hardware 전체를 의미하며, 시스템내에서의 기계 전달합수[$H_d(S)$]는 다음과 같이 표현된다.

가. 무보상 제어시스템

$$Hc(S) = \frac{Output}{Input} = a_1 \times \frac{1}{S} \times \frac{1}{S} \times \dots \times \frac{1}{S} = \frac{a_1}{S^n} \quad \text{----- ④}$$

나. 지원제어시스템

입력(E)에 대한 출력은

$$\begin{aligned} Output &= \delta \cdot a_n + \delta \cdot \frac{1}{S} a_{n-1} + \cdots + \delta \cdot \frac{1}{S^{n-1}} a_1 \\ &= \delta \left(a_n + \frac{1}{S} a_{n-1} + \cdots + \frac{a_1}{S^{n-1}} \right) \text{ 이 되며} \end{aligned} \quad ⑤$$

단, a_i : n 개의 다중회로($i=1 \rightarrow n$), δ 는 상수로서 단순증폭을 나타내며,
함수 $f(t)=1$ 의 Laplace 변환을 이용하여 변환 $f'(s) = 1/s$ 로 변환된다.

기계의 전달함수는

$$Hc(S) = \frac{Output}{Input} = \frac{1}{\delta} \cdot \delta \cdot (a_n + \frac{1}{S} a_{n-1} + \dots + \frac{a_1}{S^{n-1}})$$

$$= \frac{1}{S^{n-1}} (S^{n-1} a_n + S^{n-2} a_{n-1} + \dots + a_1) \quad \text{⑥의 된다.}$$

다. 측진제어 시스템

측진제어 시스템은 다중 Feedback이 되므로 Sequential Equivalent Block Diagram을 그려 가면서 구하거나 Bayesian Gain Formula에 의하여 계산하면 된다.

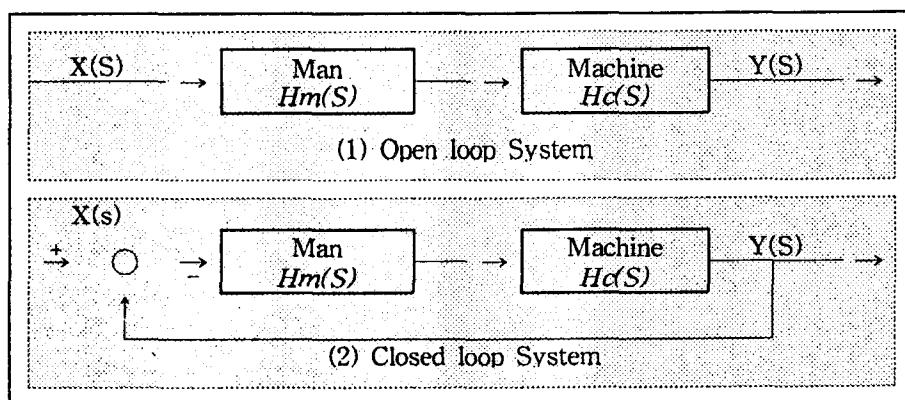
전달함수는

$$Hc(S) = \frac{\frac{1}{S} \cdots \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{S} \cdot \alpha_1}{1 + (\frac{1}{S} \cdot b_n + \frac{1}{S^2} \cdot b_{n-1} + \cdots + \frac{1}{S^n} \cdot b_1)} \\ = \frac{\alpha_1}{S^{n-1} + S^{n-2}b_2 + \cdots + Sb_1} \quad \text{--- (7)}$$

단, b_i : n개의 다중회로 ($i=1 \rightarrow n$)

3-3. 시스템의 전달함수

어떤 시스템이든 MMS를 인간과 기계의 요소로 표현하면 <그림 4>과 같은 간단한 Equivalent open loop 또는 Closed loop가 된다.



<그림 4> MMS의 등가 불록선도

<그림 4>의 (1)에서와 같이 Open loop system의 등가 전달함수는

$$Hs(S) = Hm(S) \cdot Hc(S) \quad \text{--- (8)}$$

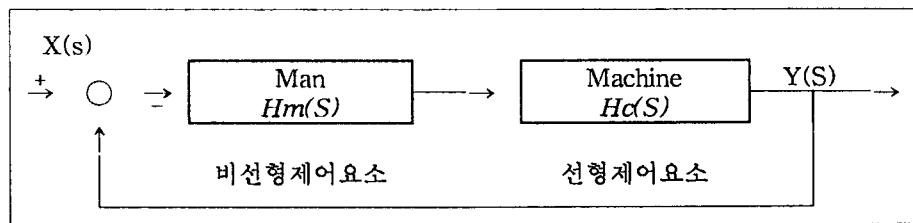
<그림 4>의 (2)에서와 같이 Closed loop system의 등가 전달함수는

$$Hs(S) = \frac{Hm(S) \cdot Hc(S)}{1 + Hm(S) \cdot Hc(S)} \quad \text{--- (9)}$$

가되며 式(8)과 (9)에서 $Hm(S)$ 과 $Hc(S)$ 는 위의 식에서 선택하여 계산하면 전체 시스템의 등가 전달함수를 구할 수 있다.

IV. MMS 평가모델 설정

전달함수는 입력신호에 대한 출력신호의 Laplace 변환 비이며, 신호의 크기와 위상에 대한 함수이다. 또한 인간의 전달함수는 인간의 행동 양태중 선형 요소만을 취한 불안전한 모델이거나 기술함수에 불과함으로 인간을 완벽하게 대표할 수는 없다.. 따라서 인간의 제어특성을 가장 잘 대표하는 가상의 전달함수를 $Hmd(S)$ 라 하고 그 제어시스템이 Closed loop system이라고 가정하면 MMS는 <그림 5>와 같다.



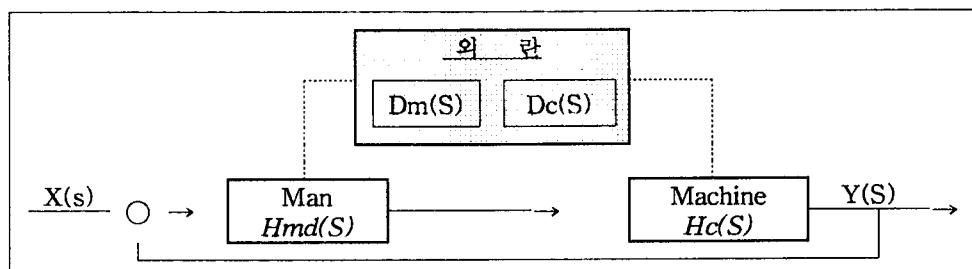
<그림 5> 선형 및 비선형요소를 가진 통제 시스템

<그림 5>의 전체시스템 전달함수는

$$Hs(S) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Hmd(s) \cdot Hc(s)}{1 + Hmd(s) \cdot Hc(s)} \quad \text{----- ⑩}$$

단, $Hs(S)$: Closed loop MMS에서의 전달함수,
 $Hmd(S)$: 선형화한 인간의 전달함수,
 $Hc(S)$: 기계의 전달함수

式 ⑨와 ⑩을 비교하면 동일한 형태를 취하지만 式⑨에 의한 방법은 MMS 평가함수를 대표하기에는 불안전함을 느끼게 한다. 따라서 이론적으로는 식⑩에 의한 평가가 이루어져야 할 것이다. 그러나 실제적으로 인간이나 기계는 외란적 요소에 많은 영향을 받는다.



<그림 6> 외란을 받는 MMS의 블록선도

<그림 6>에서와 같이 인간과 기계에 미치는 외란을 각각 $Dm(S)$, $Dc(S)$ 라 하면, 시스템의 출력 $Y(S)$ 는

$$Y(S) = \frac{Hmd(s) \cdot Hc(s)}{1 + Hmd(s) \cdot Hc(s)} \cdot X(S) + \frac{Hmd(s) \cdot Hc(s)}{1 + Hmd(s) \cdot Hc(s)} \cdot \frac{Hc(s)}{1 + Hmd(s) \cdot Hc(s)} \cdot Dc(S) \quad \text{----- ⑪}$$

$$\frac{Hc(s)}{1 + Hmd(s) \cdot Hc(s)} \cdot Dc(S) \quad \text{----- ⑫}$$

가 된다. 여기서 $Hmd(S) \cdot Hc(S) = n$ 라 두어 간단히 하면

$$Y(S) = \frac{1}{1+Hc(S) \cdot Dc(S)} \{ Hmd(S) \cdot Hc(S) + X(S) + Hnd(S) \cdot Hc(S) + Dmd(s) + Hc(s) \cdot Dc(S) \}$$

$$= \frac{\eta}{1 + \eta} \{ X(S) + \frac{Dc(S)}{Hmd(S)} + Dm(S) \} \quad \dots \quad (2)$$

단, $Dm(S)$: 인간측의 외란, $Dc(S)$: 기계측의 외란

式 ⑫와 같이 MMS의 평가 Model을 설정할 수 있다.

V. 결 론

MMS는 시스템의 형태와 요구되는 기능에 따라 그 결합의 형태가 달라지나, 기계가 자동화되고 안정화될수록 인간은 연속적인 제어 기능을 담당하는 비중이 커진다. 그러므로 인간과 기계와의 조화가 잘되는 시스템을 설계하기 위해서는 인간의 신체적·정신적·심리적 특성과 함께 인간의 제어 특성을 충분히 파악하여 체계적으로 설계하여야 한다. 따라서 식⑩과 같이 나타내어지는 시스템의 전달함수는 $Hmd(S)$ 와 $Hc(S)$ 대신에 각각 인간과 기계의 전달함수를 택하여 대입하면 MMS 평가함수를 구할 수 있다. 인간과 기계간의 조화가 잘되면 인간의 전달함수에서는 작업자의 예기시점수(T_A), 적응시점수(T_N), 지연시점수(T_L) 등이 인간 본래의 특성치 이상으로 커지는 것을 막을 수 있기 때문에 동일출력에서는 출력측의 전달이득($Transfer gain$)이 커진다.

그러나 식⑩에서의 인간의 전달함수 $Hmd(S)$ 는 실제로 인간의 여러가지 특성에 따라 달라지기 때문에 실용성이 부족하며, 인간과 기계와의 조화가 잘되면 시스템 내에서의 인간의 기능 수행도는 증가되고 기계는 효율이 좋아질 것으로 생각하면 제어시스템의 결과로 나오는 인간의 능률과 기계의 효율을 사용하여 역으로 MMS의 조화 상태를 유추해 보는 방법도 연구될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이근희, “인간공학”, 창지사, 1981, pp 4~5
 - [2] 박경수, “인간공학”, 8판, 영지문화사, 1987, pp 3~12
 - [3] 이상도 외2명, 인간-기계시스템의 평가에 관한 연구, “대한인간공학회지”, Vol.2, No.2, 1983, pp 11~16
 - [4] McCormick, E, "Human Factors in Engineering and Design", 4th Ed, McGraw-Hill, Inc, New York, 1976, pp 35
 - [5] Geyer. B. and C. Johnson, "Memory in Man and Machines", General Electric Review, Mar, Vol 60, No. 2, 1957
 - [6] Garrel Salvendy, "Handbook of Industrial Engineering", John Wiley & Sons, Inc, 1982, Ch. 6.1.7
 - [7] H. P. Van Cott and R.G. Kinkade, "Human Engineering Guide to Equipment Design", Rev. Ed., U. S. Government Printing Office, /washington D.C., 1972, pp 15

- [8] 박경수, 전갈서, pp 223~227
- [9] Benjamin C. Kuo, "Automatic Control System", 4th. Ed., Prentice-Hall, 1975, pp 73
- [10] Gavriel Salvendy(Ed.), "Handbook of Industrial Engineering", John Wiley & Sons, Inc., 1982. Ch. 6.1.7.