

그림 1. 다결합 계통

Fig. 1 Multicoupled dynamic system

입력의 항에서 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_j(t) = \int_0^\infty x_i(t-u)h_{ij}(u)du + n_i(t) \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{여기서 } n_i(t) = \sum_{k=1}^m \int_0^\infty x_k(t-u)h_{ik}(u)du \dots \dots \dots (2)$$

식(1)은 다만  $y_j$ 와  $x_i$ 를 측정할 수 있다는 가정 아래  $h_{ij}$ 가 결정된다. 즉,  $n_i$ 는 일반적으로  $y_j$ 와  $x_i$ 를 측정하는데 있어 랜덤 측정 오차를 포함 시킬 수 있다고 생각할때 부가되는 의란이다.

편의상 단일 입출력 계통만을 고려하면 다음 식과 같이 간단하게 된다.

$$y(t) = \int_0^\infty x(t-u)h(u)du + n(t) \dots \dots \dots (3)$$

식(3)에서  $x, y$ 의 측정으로 미지인 하중함수  $h$ 를 단일 측정하는 것이 어려우므로 다른 방법의 모색을 필요로 한다.

그러므로 여기서는 자승 평균오차법을 사용하여 식(3)에서 얻어진 상호 상관함수는 다음식과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_{yx}(\tau) \cong \int_0^\infty h(\alpha)\phi_{xx}(\tau-\alpha)d\alpha \dots \dots \dots (4)$$

여기서  $\phi_{xx}(\tau)$ 는 자기 상관 함수이다.

식(4)는 측정 방법의 기초가 되며,  $\phi_{yx}(\tau)$ 와  $\phi_{xx}(\tau)$ 를 측정함으로써 적분 방정식은  $h$ 에 대하여 구해진다. 임의의 함수  $\phi_{xx}$ 에 대한 적분방정식의 계산은 어려우나, 특별히 시험섭동 (test perturbation)의 형태를 취해줌으로써  $\phi_{xx}$ 에 대한 델타 함수 근사법을 사용하는 것이 가능하다. 즉,

$$\phi_{xx}(\tau, \alpha) \cong \Delta\delta(\tau-\alpha) \dots \dots \dots (5)$$

이 경우에  $\phi_{yx}(\tau)$ 와  $\phi_{yx}(0)$ 은

$$\left. \begin{aligned} \phi_{yx}(\tau) &\cong \Delta h(\tau) \quad \tau > 0 \\ \phi_{yx}(0) &\cong \frac{\Delta}{2} h(0) \quad \tau = 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

이 결과는 계통—하중 함수의 근사적인 추정이 적당히 선택된 시험섭동과 계통에서 얻어진 응답 사이의 상호 상관함수를 측정 함으로서 이루어 질 수 있음을 보여준 것이다. 이것을 그림 2와 같이 블록 선도로 표시할 수 있다.

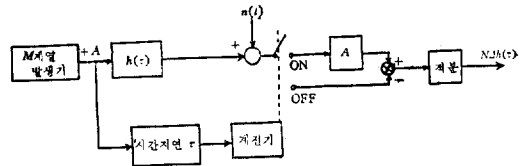


그림 2. 상관함수의 계산 블록 선도

Fig. 2 Block diagram to calculate cross-correlation function

(2) 유사—선형 휴먼 오퍼레이터

기본적인 선형 제어이론과 더불어 휴먼 오퍼레이터의 유사—선형 모델(continuous quasi-linear model)이 대부분 2차 대전중에 나왔다.

휴먼 오퍼레이터 모델 형성에 있어서 Tustin은 문제의 해결 방법으로 잔여항(remnant)을 최소화 하는 선형계통의 전달함수를 선택하였다. 이것은 비선형 제어이론에서 많이 사용되며, 오늘날 유사—선형 모델은 Tustin의 초기 모델과 개념상으로 달라진 것은 없다.

a) Tustin의 유사—선형 모델<sup>(7)</sup>

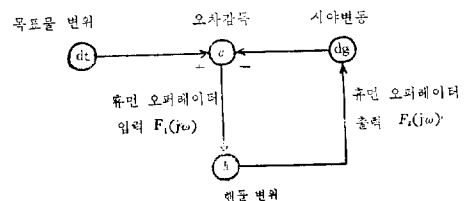
이 모델은 휴먼 오퍼레이터가 그림 3과 같은 제어 경로에 삽입되어 자기의 능력을 최대한 발휘하게 해서 입력을 추적한다.

Tustin은 여러주파수에서 계산한 입출력 데이터의 집합으로부터 선형 전달함수를 정확히 가장 근사적인 선형법칙에 맞추었다.

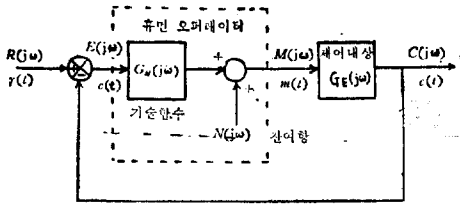
$$G_H(s) = K \left( \frac{K_1}{s} + K_2 \right) \exp(-D_H s) \dots \dots \dots (7)$$

여기서  $D_H$ 는 시간지연이고,  $K, K_1$  및  $K_2$ 는 제어된 요소 특성의 선택에 의존하는 파라미터를 나타낸다.

Tustin의 최초 모델 형성 방법을 약간 수정한 것이 Bode 선도의 측정에서 입출력 데이터를 작도 함으로서 얻어진다.



(a) Tustin의 원래 그림



(b) 등가 블럭 선도

그림 3. Tustin의 보상 트래킹 모델

Fig. 3 Tustin's compensatory tracking model

b) McRuer & Krendel의 모델

Tustin의 유사-선형 모델을 정상랜덤 기술함수에 적용할 수 있게 선형화된 모델을 전달함수로 표시한 것이 다음 식이다.

$$G_H(s) = \frac{C(s)}{E(s)} = \frac{K \exp(-D_H s)(1 + T_L s)}{(1 + T_N s)(1 + T_I s)} \dots (8)$$

여기서  $T_L$  및  $T_I$ 은 휴먼 오퍼레이터의 진상(進相)상수 및 지상(遲相)상수이고,  $T_N$ 은 신경근육 지상상수이며,  $D_H$ 는 시간지연정수이다.

이것을 그림 3(b)와 같은 등가 블럭선도에서 신호-흐름 그래프(signal flow graph)로 나타내면, 그림 4와 같다.

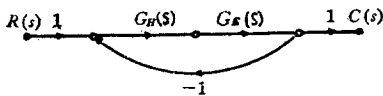


그림 4. 그림 3(b)의 신호-흐름 그래프

Fig. 4 Signal flow graph of Fig.3(b)

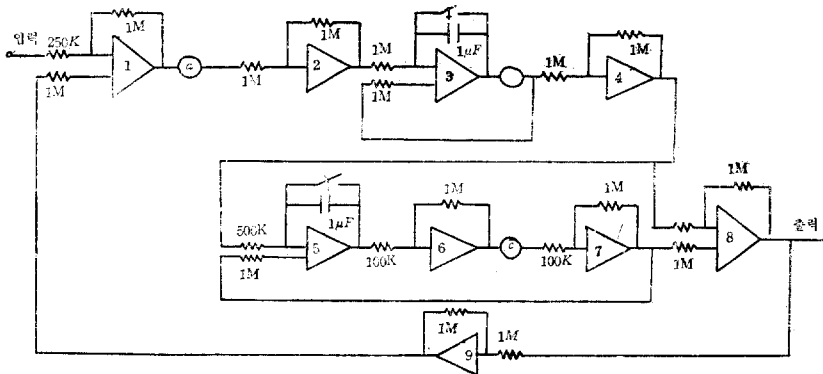


그림 5. 휴먼 오퍼레이터의 시뮬레이션

Fig. 5 Analog simulation of human operator a=0.837 b=0.886 c=조정되는 상수 (1, 0.5, 0.3, 0.25)

그림 4에서 제어대상  $G_T(s) \approx 1$ 인 경우, 유사-선형 모델을 나타낸 식(8)에서  $T_L$ 과  $T_I$ 은 거의 0이다. 그러므로 다음 식과 같이 근사화 된다.

$$G_H(s) = \frac{K \exp(-D_H s)}{1 + T_N s} \dots (9)$$

c) 시간 영역에 있어서 검토

식(8)을 시간영역으로 나타내기 위해서 각 항으로 분리하여 다시 쓰면 그 결과는 다음 식과 같다.

$$C(s) + (T_N + T_L)sC(s) + T_N T_L s^2 C(s) = K \exp(-D_H s) E(s) + T_I K \exp(-D_H s) E(s) \dots (10)$$

식(10)을 역변환하여 시간영역으로 만들면 다음 식이 된다.

$$c(t) + (T_N + T_L)\dot{c}(t) + T_N T_L \ddot{c}(t) = K e^{-(t-D_H)} + T_I K e^{-(t-D_H)} \dots (11)$$

식(11)을 수치로 해석하기 위해서 상태변수 (state variable)를 다음과 같이 정한다.

$$\left. \begin{aligned} x_1(t) &= c(t) \\ x_2(t) &= \dot{x}_1(t) = \dot{c}(t) \end{aligned} \right\} \dots (12)$$

이 때 식(11)은 다음과 같이 된다.

$$x_2(t) = K \left( \frac{1}{T_N T_L} \right) [e^{-(t-D_H)} + T_I e^{-(t-D_H)}] - \frac{1}{T_N T_L} [x_1(t) + (T_N + T_L)x_2(t)] \dots (13)$$

식(13)은 시간영역에서 유사-선형 휴먼오퍼레이터의 모델에 대한 특성을 나타낼 수 있는 것이다.

3. 실험 및 결과 고찰

본 실험에서는 휴먼 오퍼레이터의 퍼라미터를 G. A. BeKey<sup>(8)</sup>가 정한 다음과 같은 값을 사용하여 식(9)에 적용하기로 한다.

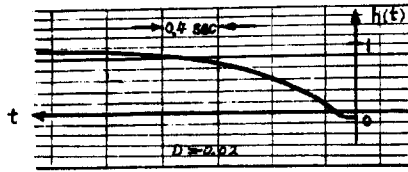
$K=3.35$

$T_N=0.886$  초

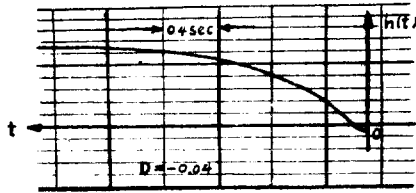
$D_H=-0.02, -0.04, -0.06, -0.08$  초

이것을 아나로그 전자계산기로 시뮬레이트한 것이 그림 5이다.

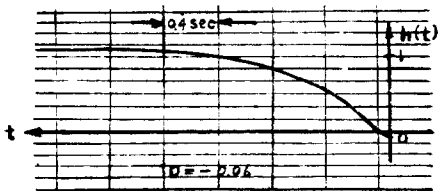
이때 단위 계산상 입력에 대한 응답을 기록한 것이 그림 6이다.



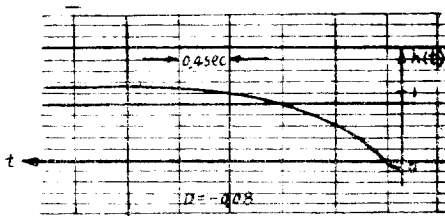
(a)  $D_H=-0.02$  초



(b)  $D_H=-0.04$  초



(c)  $D_H=-0.06$  초

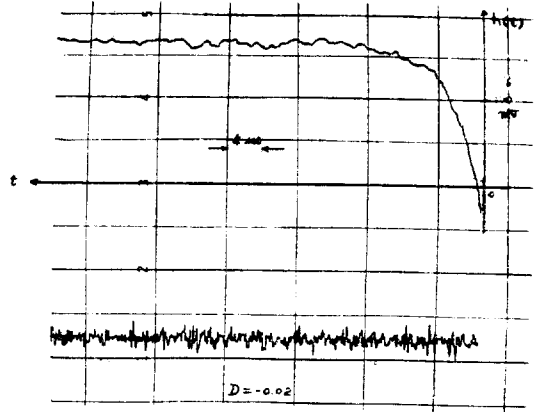


(d)  $D_H=-0.08$  초

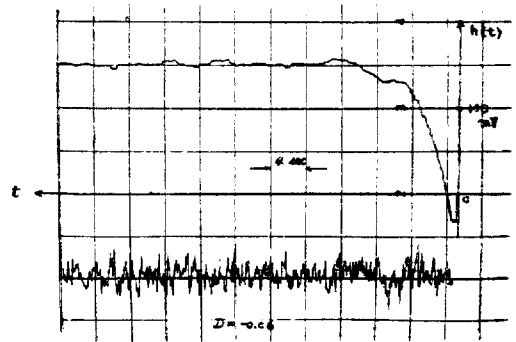
그림 6. 그림 5에 대한 단위 계단상 응답곡선

Fig. 6 Unit-step response curve of Fig.5

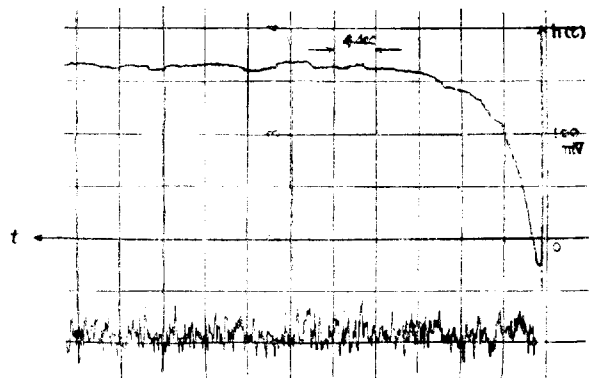
또한 랜덤잡음 발생기에서 나온 신호를 입력신호로 인가하여 기록한 출력은 그림 7이다. 기록된 출력에는 DC 바이이스가 약 150 mV 정도 포함되어 있다.



(a)  $D_H=-0.02$  초



(b)  $D_H=-0.06$  초



(c)  $D_H=-0.08$  초

그림 7. 그림 5에 대한 랜덤 잡음 응답곡선

Fig. 7 Random noise response curve of Fig. 5

이상에서 휴먼 오퍼레이터의 시물레이션이 안정하게 구성되어 있음을 알았다.

다음은 휴먼 오퍼레이터의 동특성을 측정하기 위하여 그림 8과 같이 아나로그 전자계산기로 시물레이션

하였다.

본 실험에 사용한 아나로그 전자계산기의 연산증폭기 최대출력을 고려하여 최종 연산증폭기의 출력이 0에서 10V까지 되도록 결선하였다.

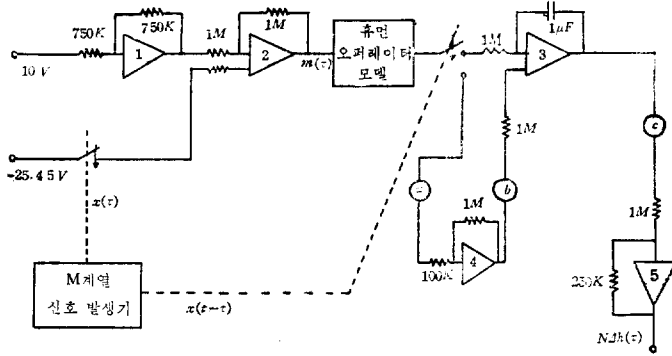
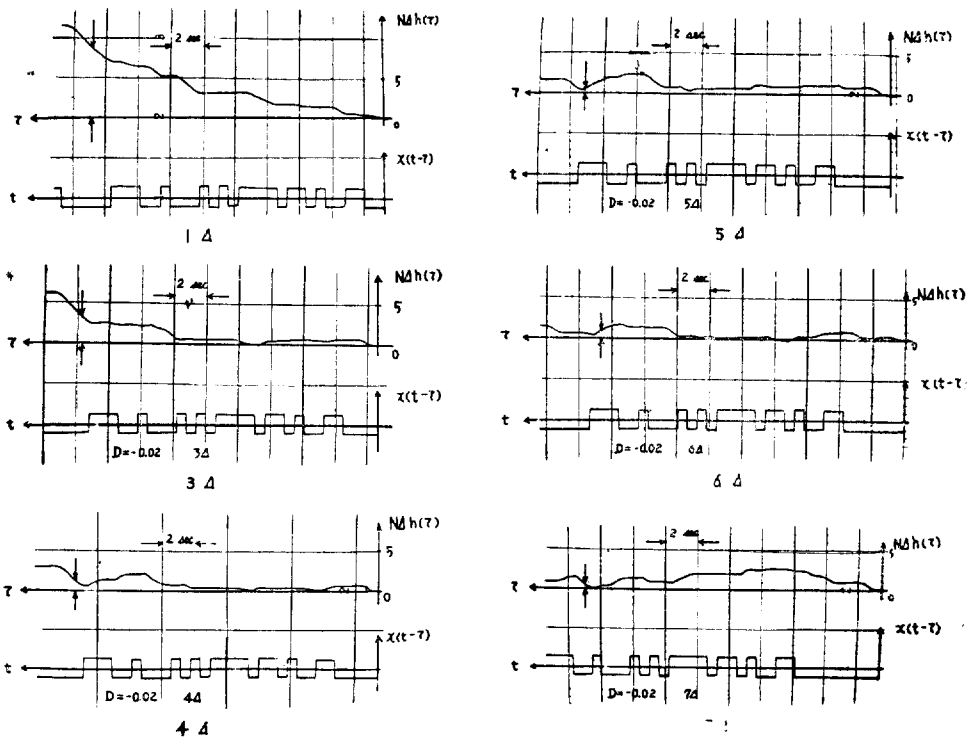


그림 8. 의사랜덤 2진 신호에 의한 휴먼 오퍼레이터의 동특성 측정 시물레이션

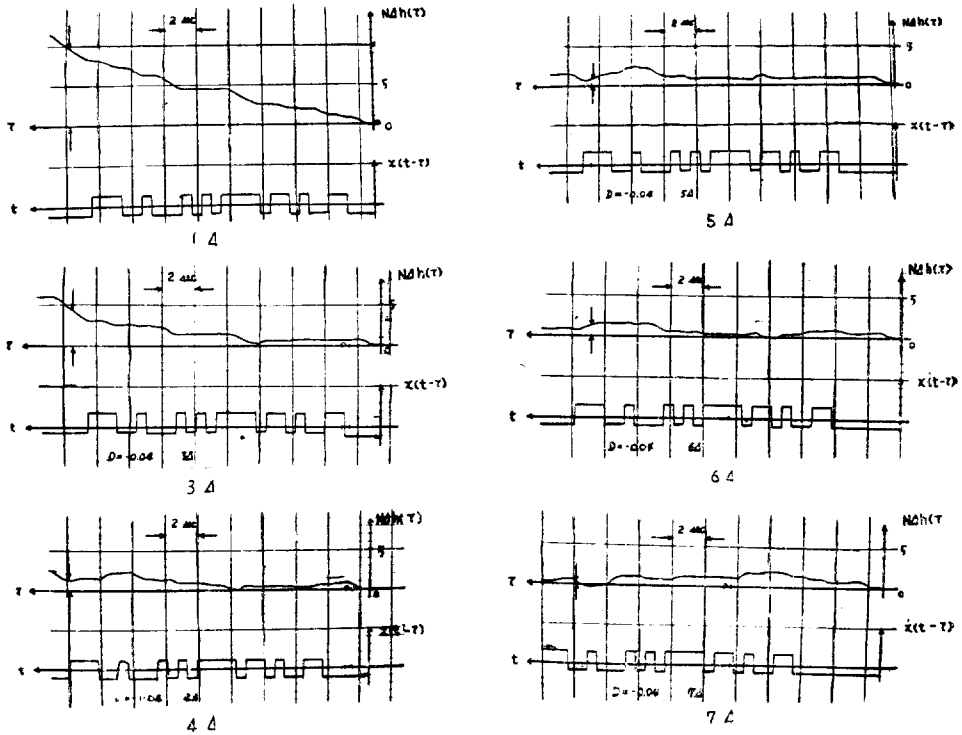
Fig. 8 Analog simulation of human operator dynamics measurement using Pseudo-random binary signals

시험신호로  $N=31$ ,  $\Delta=0.6$  초인 0 바이어스의 의사 랜덤 2진 신호를 그림 5로 표시된 휴먼 오퍼레이터의 모델에 인가하고, 내부 임피던스 10mV에서 최

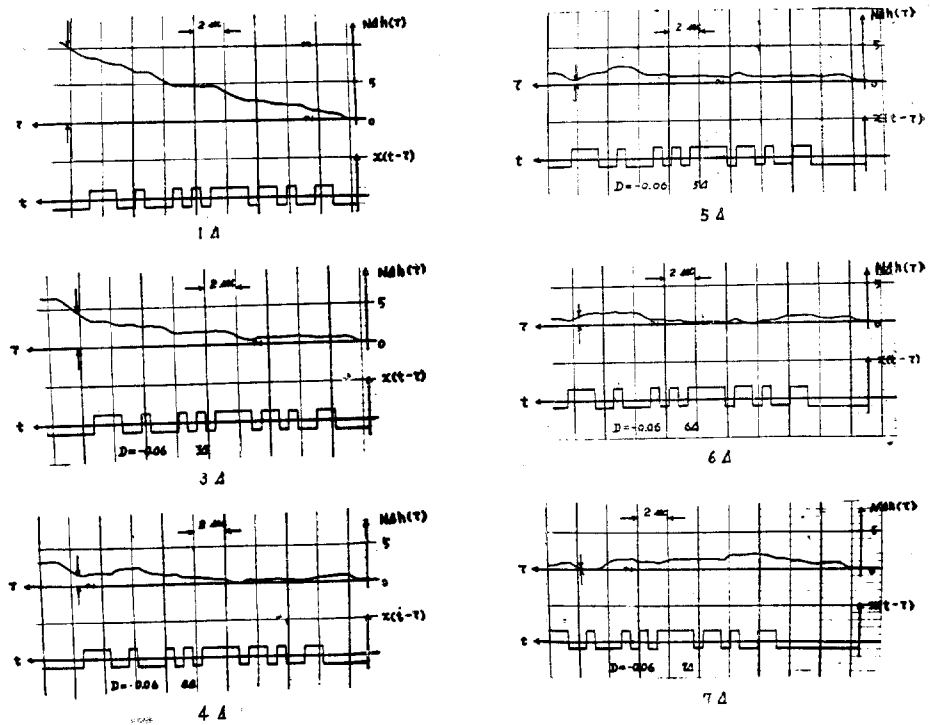
하 15KΩ인 기록기로서 속도 5mm/sec로  $N\Delta h(\tau)$ 를 추정하도록 휴먼 오퍼레이터의 퍼라미터터중  $D_H$ 를 변경하면서 각 경우를 기록한 것이 그림 9이다.



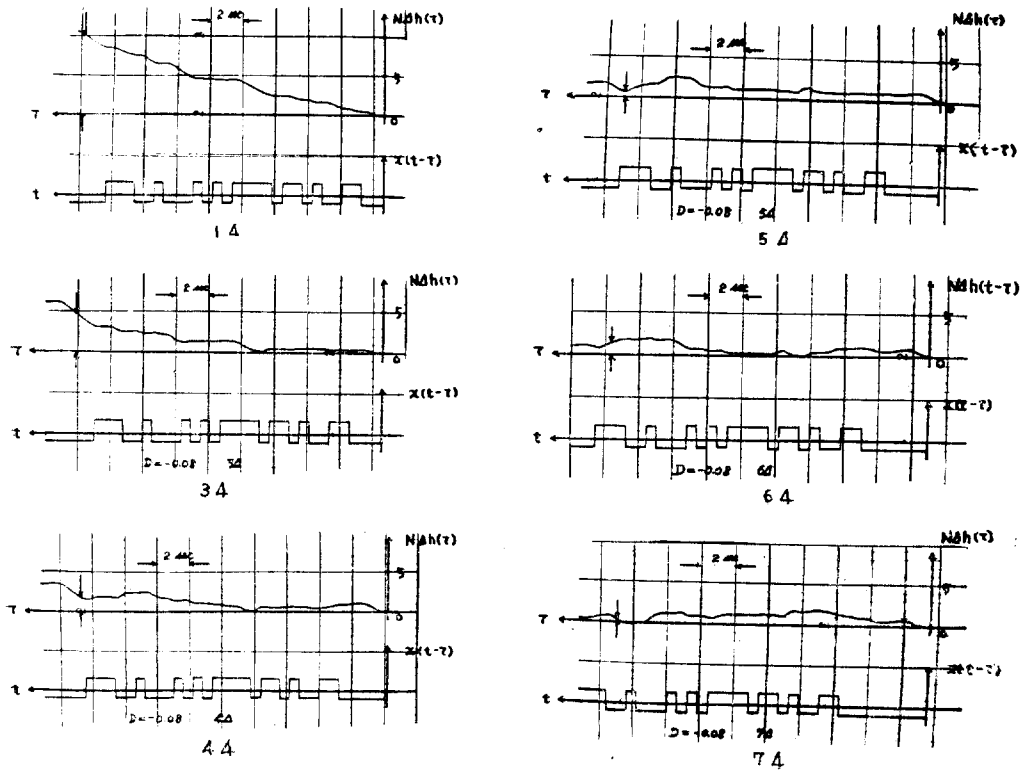
(a)  $D_H = -0.02$  초



(b)  $D_H = -0.04$  초



(c)  $D_H = -0.06$  초

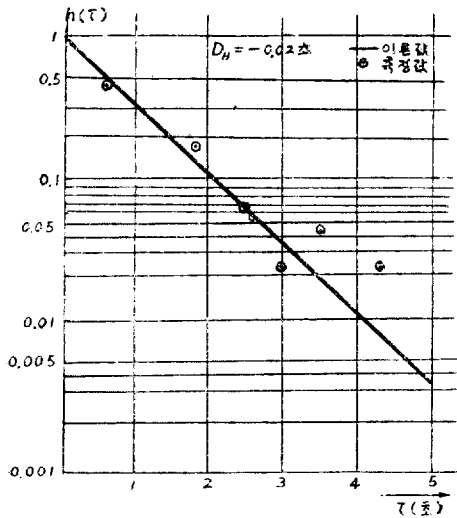


(d)  $D_H = -0.08$  초

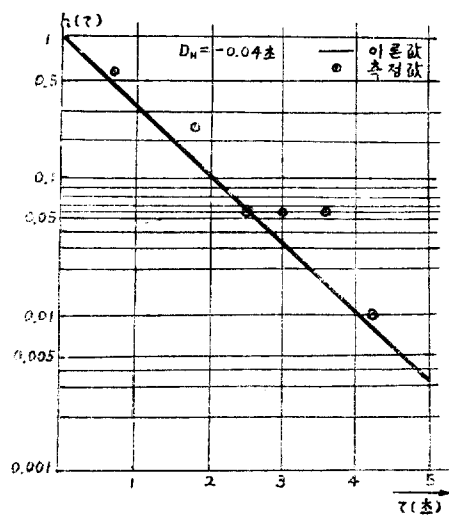
그림 9. 임펄스 응답  $N\Delta h(\tau)$  에 대한 기록

Fig. 9. Recorded curve of impulse response  $N\Delta h(\tau)$

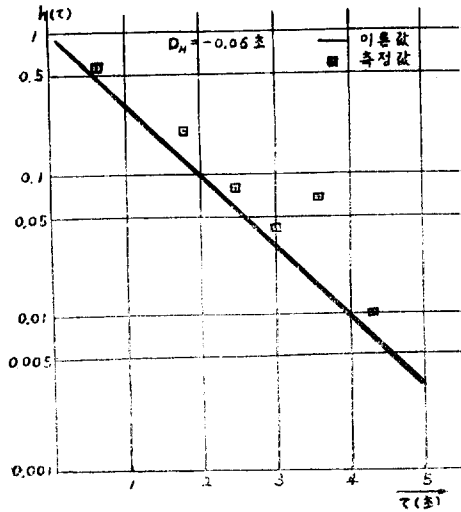
측정한 응답  $N\Delta h(\tau)$  의 값을  $h(\tau)$  로 환산하여 그림 10에 각각 표시 하였다.



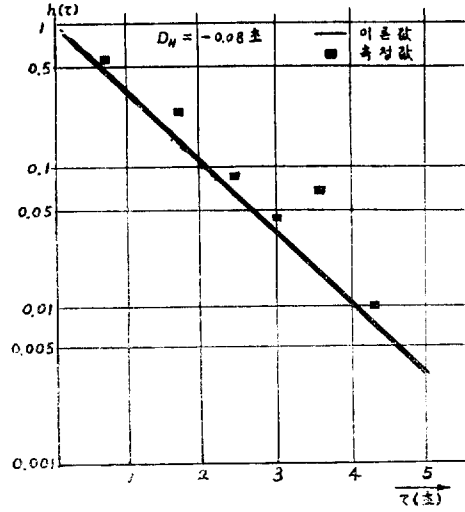
(a)  $D_H = -0.02$  초



(b)  $D_H = -0.04$  초



(c)  $D_H = -0.06$  초



(d)  $D_H = -0.08$  초

그림 10.  $h(\tau)$ 의 곡선

Fig. 10. curve of  $h(\tau)$

그림 10에서 알 수 있는 것과 같이 이론 값에 잘 부합되고 있으나, 약간 오차를 보여 주고 있는데 이것은 다음과 같은 원인에 기인된다고 생각한다.

첫째, 집적회로 전이 레지스터(shift register)를 이용하여 개발한 신호 발생기의 전원이 계전기 구동회로에 병렬로 연결됨으로 인한 리플(ripple)이 존재하고 또한 신호의 지연을 연속으로 측정할 수 있게끔 아직 완성하지 못한데 그 원인이 있다.

둘째, 전자관식 아나로그 전자계산기의 연산증폭기 사이에 성능이 근소한 차이가 존재 하고 있다.

셋째, 기록기의 저입력 임피던스의 써어보 전동기를 구동 시키기 위한 직류증폭기가 불안정하다.

넷째, 기타 실험에 사용된 각 장치 사이에 존재하는 오차가 종합되어 기록에 나타나고 측정된 점을 추적할 때 오차가 내포되어 있다고 생각된다.

특히 시험계통으로 선정된 휴먼 오퍼레이터의 모델에 대한 파라미터를 Bekey가 제시한 샘플 모델에서의 값을 이용하므로써 더욱 오차를 나타내게 되었다. 이점은 앞으로 샘플 홀드드 회로가 부가된 샘플 모델로 구성된 휴먼 오퍼레이터가 된다면 오차를 줄일 수 있게 될 것이다.

#### 4. 결 론

본 논문은 인간-기계 계통의 원만한 운전을 위해서 제어요소의 하나인 인간에 대한 연구중, 시험신호로서의 의사랜덤 2진신호를 사용하여 휴먼 오퍼레이터의 동

특성을 임펄스 응답으로 상관 측정한 것이다. 이 방법은 특히 외부 잡음 개입시에 유효하며 실험을 통하여 근소한 오차로 이론 값에 잘 부합하였다.

앞으로 시뮬레이터의 특성이 개선되고 실험장치를 확장하게 된다면 실험 오차를 더욱 감소시킬 수 있게 될 것이고, 본 연구의 결과는 휴먼 오퍼레이터의 동특성 측정을 효과적으로 수행할 수 있을 것이다. 또한 이러한 통계적인 상관법의 적용은 적응제어계통 연구에 크게 유효할 것으로 전망된다.

끝으로 논문이 완성 되기 까지 연세대학교 이공대학 장한만춘 박사님의 지도와 직접 실험에 협조하여 준 제어 연구실 여러분에게 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Truxal J.G.; "Review of Control Developments," Proc. IRE, May, p.781-786 (1962)
2. Meditch J.S.; "Stochastic Optimal Linear Estimation and Control," McGraw-Hill, N.Y. 1969.
3. Shinnars S.M.; "Techniques of System Engineering," McGraw-Hill, N.Y. 1967.
4. McRuer, D. T. & Krendel, E.S.; "The Human Operator as a Servo System Element," Journal of Franklin Institute, Part I, II (1959)
5. Park, S. H.; "A Study of M-sequence Signal Generator for determining System Dynamics," Journal of KIEE (Electronics Engineers) Vol. 7

No. 2, p.84—90 (1970)

6. Han, M.C. & Park, S.H.; "A Study of System Dynamics Estimation using Pseudo-random Binary Signals," M.O.E. Report (1970)
7. Tustin, A.; "The Nature of the Operator Response in Manual Control, and its Implications for Controller Design," Journal of IEE, Vol. 94, p.190

—202 (1947)

8. Bekey, G.A.; "The Human Operator as a Sampled-data System," IRE Trans. on Human Factors in Electronics, Sept., p.43—51 (1962)
9. Korn, G. A.; "Random-process Simulation and Measurements," McGraw-Hill, N.Y. 1966.