

적응 제어 방식을 이용한 혈압자동 조절기에 관한 연구

이상훈, 김영철, 민병구

서울대학교 의공학과, 제어계측학과, 전기공학과

A Study on the Automatic Pressure Controller using Adaptive Control Algorithm

S. H. Lee, Y. C. Kim, B. G. Min

Dept. of Biomedical Eng.& Dept. of Control and Instrumentation & Electrical Eng.

Seoul National University.

ABSTRACT

Sometimes, there are conditions when rapid control of the hypertension needed such as malignant hypertension, and the preoperative preparation of the hypertensive patient requiring emergency operation, etc. Using the adaptive control algorithm, the mean arterial pressure reduction is achieved rapidly and safely in hypertensive rabbit. Among the adaptive control algorithms the pole assignment self tuning control algorithm is superior to the one step ahead minimum variance control algorithm. The convergence time is less than 600 sec, and the standard deviation of experimental data are less than 4 mmHg.

1. 서론

고혈압의 치료시에는 심혈관 계통의 균형상태를 유지하기 위하여 수분 혹은 수시간 내에 혈압의 급격한 감소를 필요로 하는 임상적 상황이 있다. 이러한 경우로는 고혈압성 뇌 증후를 동반하는 악성 고혈압증, 두개공내 출혈등이 있고 응급수술을 요하는 고혈압 환자의 수술 전후 조치로서의 가능성도 고려해야 한다.

따라서 이러한 상황의 응급처치시 반응시간과 약효지속시간이 짧은 비경구용 제제로서 Sodium Nitropruside (Nipride)등을 연속적으로 정맥내에 주입시키게 되는데 이때 강압제의 적절한 주입을 위해 연속적인 혈압의 Monitoring과 처리를 위한 입력이 요구된다. 여기서 요구되는 혈압의 수준을

유지하기 위해 강압제의 투입량을 혈압의 변화에 따라 자동적으로 계산하고 주입시키는 페루우프 혈압 자동 조절 장치가 연구 되어 왔다.

이런 장치로는

- (1) 비례, 미분, 적분 제어기 (PID Controller)
- (2) 최적 귀환 제어기 (Optimal Feedback Controller)
- (3) 적응 제어기 (Adaptive Controller) 등이 있다.

본 논문에서는 시 변수들을 실시간 측정하며, 지연시간 특성을 갖는 시스템에서도 잘 적응 할수 있는 적응제어 방식중 Pole - Assignment Self Tuning Controller (이하 PASTC)를 이용하여 B.P가 자동조절 범을 동물실험을 통하여 입증하여 보았으며, 이를 One Step Ahead Minimum Variance Method 와 비교하여 보았다.

## II. 제어 방식

### 2.1 생체계의 특성

생체계에 대한 Pharmacodynamics 를 수학적으로 Modelling 하면 다음과 같은 특성을 갖는다.

- 1) 시변 계수를 갖는다.
- 2) 대상에 따라 반응계시 까지의 지연시간(Time Delay)이 다르다.
- 3) 비 최소 위상계(Nonminimum Phase System)일 수 있으므로 일반적인 귀환제어방식(Feedback Control System)의 경우 불안 해진다.
- 4) 입력의 크기와 출력의 반응 정도(Response Rate)에 제약조건이 있을수 있다.
- 5) 본질적으로 비선형 계이다.

따라서 생체계의 어떤 특성을 강제로 조정하려 할때 무엇보다도 안정성과 신뢰도가 요구되므로 위와 같이 처리하기 어려운 문제점들을 충분히 고려하여 안정성을 고려 해야한다.

### 2.2 극 지정 자조 조절기(Pole Assignment Self Tuning Control)

이 제어 방식은 최상의 제어는 아니지만 안정도에 대해서는 강인성(Robustness)이 뛰어나 생체계의 제어에 특히 유용하다.

제어 하려는 System 을 다음과 같이 자동 회귀 이동 평균(ARMA) 모델로 표현하면,

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B'(z^{-1})U(t) + C(z^{-1})e(t) + d$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a}$$

$$B(z^{-1}) = b_1'z^{-1} + \dots + b_{n_b}'z^{-n_b'}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_{n_c}z^{-n_c}$$

\* A, B', C : 계수 다항식 (Parameter Polynomials)

$n_a, n_b', n_c$  : 다항식 차수(Degree)

K : 지연 시간을 Sampling Interval 로 나눈 값이며 정수로 취함.

$y(t), U(t), e(t)$  : 출력, 입력, 잡음

d : 출력의 편이값을 나타내는 상수.

이때 제어 입력 관계식은 다음과 같다.

$$F(z^{-1})U(t) = -G(z^{-1})y(t) + H(z^{-1})r(t) - F(z^{-1})/B(z^{-1}) \cdot d$$

F, G, H : 계수 다항식

r(t) : 기준값 (Reference Value)

여기서 새로운 제어입력

$$U(t) = -G(z^{-1})y(t) + (1-F(z^{-1}))U(t) + H(z^{-1})r(t) - \frac{F(z^{-1})}{B(z^{-1})} d$$

PASTA 의 Algorithm Flow 는

- 1) 초기치를 설정해준다.
- 2) 출력 y(t) 를 Update 시킨다.
- 3) Recursive Least Square Estimator 에 의해 계수  $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$  를 계산한다.  $-\hat{A}', \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$
- 4) Step 3) 의  $\hat{A}, \hat{B}$  를 사용하여 F, G 를 계산한다.
- 5) 새로운 입력 U(t) 를 계산 한다.
- 6) Sampling Time 이 지나면 Step 2) 로 돌아가서 반복한다.

### 2.3 One Step Ahead Mimim Adaptive Control

이 방식은 지연시간이 한 Sampling Time과 정확히 같다고 가정한 것이다. 그리고 입력보다 한 Step 앞의 출력을 예측기를 이용하여 구한뒤 Minimum Variance Control 방식을 도입 하여 한 Step 앞선 제어 입력을 계산하는 방식이다.

시스템 모델은

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-1}B(z^{-1})U(t) + C(z^{-1})e(t) + d$$

Optimal One - Step Ahead Predictor  $\hat{y}_0(t)$

$$\hat{y}_0(t+1) = a(z^{-1})y(t) + B(z^{-1})u(t) + z(1-c(z^{-1}))\hat{y}_0(t) + d$$

$$\lambda(z^{-1}) = z(c(z^{-1}) - \lambda(z^{-1})), \quad \hat{e}(z^{-1}) = \Gamma(z^{-1})$$

여기서 목적함수

$$J(t+1) = E\left\{\frac{1}{2}[y(t+1) - y^*(t+1)]^2 + \gamma/2[u(t) - u(t-1)]^2\right\}$$

최소화 시키는 입력은

$$U(t) = \frac{-\hat{\lambda}_2}{\hat{\beta}_0 + r} \left\{ \hat{\beta}_0 \{\hat{a}y(t) + (\hat{\beta} - \hat{\beta}')u(t) + z(1-\hat{c})\hat{y}_0(t) + \hat{d} - y(t+1)\} - ru(t-1) \right\}$$

r : 하중 인수 (Weighting Factor)

Algorithm Flow 는

- 1) 초기치  $\{\alpha(0), \beta(0), c(0), \hat{y}_0(0), y(0), u(0)\}$
- 2) Output  $y(t)$  를 Update 한다.
- 3) RLSE 에 의해 계수  $\alpha, \beta, c, d$  를 추정한다.  $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{c}, \hat{d}$
- 4) 새로운 제어 입력  $U(t)$  를 계산 한다.
- 5) Sampling Time 경과후 Step 2)로돌아가 반복한다.  
반복한다.

이 방식의 문제점은 지연시간 인수  $K = 1$  보 가정하였기 예측기  $\hat{y}_0(t+1)$  은 부정확한 값을 갖게 되고 이것이 오차의 누적을 가져와 매우 불안정 해 진다.

### III. 혈압 조절기의 구성

혈압 조절기는 다음과 같은 4 가지 중요한 부분으로 구성되어 있다. (Fig 1)

#### 1) 혈압 측정기 (ICM - 5H Polygraphy)

실험동물의 혈압을 연속적으로 측정하여 이 측정기로 부터 평균 동맥혈압 (Mean Arterial Pressure)을 A/D 변환기를 거쳐 Microcomputer와 Interface 시킴

#### 2) Microcomputer

모델계수를 추정하는 Estimator의 기능과 제어 입력을 계산하는 Controller의 기능을 수행한다. 본 실험에서는 Apple II를 사용하였다.

#### 3) Infusion Pump

수동형 IMED 922 ( Range 1 - 299 ml/hr)를 자동으로 변형하고 Microcomputer 에 Interface 시켜 Computer 에 의한 직접 조정이 가능 하도록 하였다.

#### 4) Monitor & Printer

Monitor는 매 Sampling Time 의 혈압, 약물의 주입량 (Infusion Rate) 및 기타 정보를 나타내주며

이들 정보를 Printer 에 기록시키도록 하였다.

### IV. 실험 재료 및 방법

#### 4.1 실험 동물

2.1 - 2.5 Kg 의 토끼 10 마리를 사용하여 총 13 Case 의 실험을 실시 하였는데 본 실험 에서는 토끼를 고혈압으로 만들기 위해 한쪽 신동맥을 결찰 함으로 혈압을 상승 시키거나 혈압상승제(Epinephrine) 를 사용하여 상승시켰다.

#### 4.2 사용 약물

혈압 강하제로는 속효성 혈관 확장제인 Sodium Nitroprusside Dihydrate를 사용했으며 상승제로는 Epinephlin 을 사용했다.

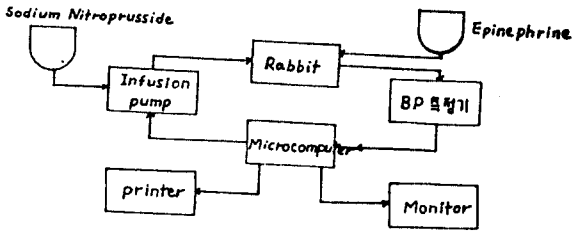
#### 4.3 실험 방법

토끼를 마취 시킨후 고정대에 사지와 머리를 고정하고 목 부분을 절제한후 경 동맥에 Polyethylen 관을 삽입, 고정시킨후 이를 혈압 측정기에 연결 하였다. 그리고 한쪽 귀 정맥에는 혈압 상승제를 주입할 관을 만들고 다른 한쪽에는 혈압 강하제를 주입할 관을 만들었다. 위와 같이 모든 장치를 Setting 한후 우선 4 - 5 분간 혈압 상승제를 주입하여 일정한 고혈압을 유지한후 전술한 Algorithm 을 Computer 를 통하여 수행 하였다.

### V. 결 론

PASTC 방식 8 개와 One-Step Ahead Minium Variance Control 방식 5개등 도합 13 개의 실험을 하였다. 이 중에서 PASTC 방식을 선택, 적용한 모든 경우에는 M.V 방식보다 더욱 안정적으로 혈압이

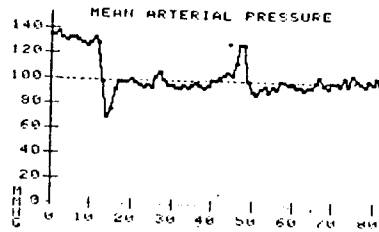
조절 유지범을 관찰 하였으며 혈압이 안정적으로 조절되기 까지의 시간은 300 - 690 초 이고, 표준 편차는 최대 3.9 mmHg 로서 응급처치시 안정적으로 유용하게 사용될수 있을 것으로 생각된다.(Fig 2)



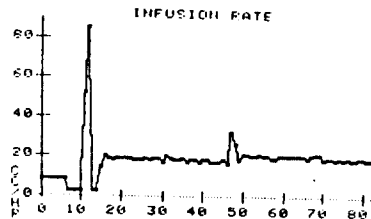
(Fig.1)

REFERENCE

1. 이 영 우 : "고혈압의 응급처치", J. of K.M.A. 22(2):104 - 107 , 1979.
2. Sheppard L.C., et al.: Dynamic Analysis of the B.P. Response to Hypertensive Agents, Studied in Postoperative Cardiac Surgical Patients. Comp. 10:237, 1977
3. Koivo A.J., et al.: An Automative Drug Administration System to Control B.P. in Rabbits. Math. Biosci. 38:45, 1978.
4. Koivo A.J., et al.: Microprocess Based Controller for Paramacodynamical Applications. IEEE Trans. Automat. Contr. Ac 26:1208,1981
5. Astrom K.J.: On Self - Tuning Regulators. Automatica. 9:185, 1973.
6. Goodwin G.C., Sim R.S.: Adaptive Filtering, Prediction and Control. Prentice - Hall, 1984
7. Wellstead P.E., Sanoff S.P.: Extended Self - tuning Algorithm. INT.Cont.34(3):433,1981
8. Sheppard L.C.: Computer Control of the Infusion of Vasoactive Drugs. Annals of Biomed. Eng. 8:431, 1980.
9. Ansparger J.M., et al.: Adaptive Control of Blood Pressure. IEEE. Trans. on Biomed. Eng. BME - 30(3) , 1983.
10. Wellstead P.E. et al.: "PASTR" Proc. IEEE, 126(8):781, 1979



(Fig 2-a)



(Fig 2-b)