

인공 신경망 제어기에 의한 생물공정에서 암모니아 농도의 제어

이 종 일

전남대학교, 화학공학부, 생물공정기술연구실

전화 (062) 530-1847, Fax (062) 530-1849

Abstract

A neural network based controller (NN controller) was studied for the control of ammonia concentrations in biological processes. An ammonia FIA has been employed to on-line monitor the concentrations of ammonia in a bioreactor. The optimal neural network structure was investigated by computer simulation and found to be a 3(inputlayer)-2(hidden layer)-1(output layer). The NN controller had advantage over the PID controller, even though the former is more time consuming. The 3-2-1 NN controller has been used to control the ammonia concentrations in a simulated bioprocess and also in a real cultivation process of yeast, and its performance were investigated.

서론

생물공정에서 공정변수를 모니터링하고 제어하는 것은 공정의 생산효율을 증대시키고 폐기물을 최소화하기 위해 매우 중요하다. 특히, 생물 반응기내 글루코스나 암모니아등 기질의 농도를 온라인 모니터링하고 적절히 제어할 때 저해산물 (inhibitory products)의 생산을 억제시킬 수 있을 뿐만 아니라 미생물의 성장을 촉진시킬 수 있다. 암모니아를 주요 질소원으로 사용하는 대개의 생물공정에서 반응기내의 암모니아는 그 농도에 따라 미생물의 성장에 크게 영향을 끼친다. 본 연구에서는 생물공정내 암모니아의 농도를 흐름주입분석장치(FIA)에 의해 온라인 모니터링하고 그 결과를 이용하여 반응기내의 암모니아 농도를 인공 신경망에 기초한 제어기 (artificial neural network based controller, NN controller)에 의해 제어하는 시스템에 대하여 고찰하고자 한다.

재료 및 방법

생물 반응기내 배양액중의 암모니아 농도는 가스 확산 (gas diffusion) 법을 이용하여 분석하였다. 암모니아 측정용 FIA 장치에서 시료 주입기 (injector)에 주입된 시료는 운반용액에 의해 가스 분리막 장치를 통과하면서 암모니아 가스를 분리하는 반면, 지시약 용액은 막 분리 장치를 통해 분리된 암모니아 가스를 흡수한 후 검출기인 spectrophotometer 에 도

달한다. 시료 주입기, 펌프, 검출기등의 자동화 및 결과 분석을 위해 컴퓨터를 이용하였다. 본 연구에 사용한 지시약, Bromocresol violet 은 Sigma 회사로 부터 구입하였으며, 다른 화학 약품은 Fluka 회사에서 분석용을 구입하였다. 암모니아 가스 분리에 사용한 분리막 장치는 분리면적은 0.1 cm² 이고 polypropylene 막을 Akzo Nobel 회사에서 구입하여 사용하였다.

인공 신경망 구조를 이용하여 생물 반응기내의 기질의 농도를 제어하기 위해 3 개의 층(입력층 (input layer), 숨겨진 층(hidden layer), 출력층(output layer))을 가진 backpropagation network 을 개발하였다 NN 제어기는 3 개 이상의 매개변수를 가지고 있는데, 제어하고자 하는 생물공정의 조건에 최적한 매개변수값을 얻기 위해서 선형 최소화 문제의 해를 구하는데 이용하는 simplex 방법을 사용하였다.

FIA 를 이용한 생물공정 제어기술을 연구하기 위해 1 Liter 용 교반형 연속 반응기를 사용하였다. FIA 에 의해 온라인 모니터링된 암모니아 농도 값을 기초로 NN 제어기를 이용하여 적절한 설정점으로 반응기내의 암모니아 농도를 제어하였다. 실제 미생물 발효공정에서 암모니아 농도를 제어하기 위해 *Saccharomyces cerevisiae* 를 배양하였다. 4.3 Liter 교반형 생물 반응기를 이용하여 25 °C, pH 6.5 에서 배양했으며 배양액으로는 (NH₄)₂SO₄ 이 주요 질소원인 최소 배양액을 사용하였다.

결과 및 고찰

생물공정에 이용된 NN 제어기의 최적 매개 변수값을 추정하기위해 turbo pascal 을 이용한 computer simulation 프로그램을 개발하였다.

생물 반응기내 암모니아의 농도를 암모니아 FIA 를 이용하여 온라인 모니터링하고 설정값으로 제어하는데 5 % 의 암모니아 FIA 장치의 분석오차를 고려했다. 인공 신경망 (artificial neural network) 구조를 이용한 제어기는 사용한 층 (layer) 과 신경 (neuron) 의 수에 따라 제어 구조가 복잡하고 계산시간도 길어지게 된다. 즉 3-0-1 구조를 가진 경우 3 개의 매개변수를 가진 PID 제어기와 같은 반면, 3-3-1 의 구조를 가진 경우에는 신경들 사이에 12 개의 연결선 (connection lines)를 가지게 되어 계산하는데 많은 시간이 소모된다.

한편, 모사 생물공정에서 암모니아 농도를 제어하기위해 3-2-1 신경 구조를 가진 NN 제어기를 3-0-1 구조를 가진 제어기, 즉 PID 제어기와 실험적으로 비교하였다. 회분공정에서 반응기내 암모니아의 농도가 선형으로 감소한다는 가정을 이용하여 제어 매개변수를 추정하였고, 5 % 의 암모니아 FIA 장치의 분석오차와 150 훈련 주기를 이용하였다. 그럼

1 에서 0.7 g/l 의 암모니아 농도를 제어 설정값으로 했을때 인공 신경망 제어기에 의한 제어 편차 (17.5 %)는 PID 제어기에 의한 오차(30.3 %) 보다 낮음을 볼 수 있다. 즉 생물 공정내 기질의 농도를 제어하기 위해서는 PID 제어기 보다 3-2-1 구조의 NN 제어기가 더 유리하다고 할 수 있다.

또한, 인공 신경망 제어기는 FIA 장치에 의해 측정되는 분석시료의 체류시간에 영향을 받을 수 있는데 체류시간을 5 분, 30 분으로 변화 시켰을 때 인공신경망 제어기에 의한 제어 특성과 30 분의 체류시간을 가진 PID 제어기의 제어 특성을 비교하였다. 체류시간이 5 분인 경우 인공신경망 제어기는 진동없이 제어 설정값에 도달하는 반면, 30 분인 경우 두 제어기는 진동을 한 후 설정값에 도달한다. 그러나 인공 신경망 제어기는 PID 제어기보다 overshoot 및 진동횟수가 낮음을 볼 수 있었다. 암모니아 FIA 를 이용한 NN 제어기에 의한 모사 생물공정에서의 암모니아 농도의 제어 특성에 대한 결과를 이용하여 *S. cerevisiae* 발효공정에서 암모니아 농도를 제어하는 실험을 행하였다. 제어기의 최적 매개변수값을 구하기 위해 5 %의 암모니아-FIA 장치의 분석오차와 7 분의 생물 반응기에서 FIA 장치까지 분석시료의 체류시간을 고려하였다. 그리고 computer simulation 에 의해 구한 매개변수값을 이용하여 3-2-1 구조 를 가진 인공 신경망 제어기를 이용하였다. 그림 2 에 NN 제어기에 의한 발효공정의 암모니아 농도의 제어 특성을 보였다.

결론

생물 반응기내 암모니아 농도를 온 라인 모니터링하고 제어하기 위해 암모니아 FIA 장치를 사용하였으며, 이 장치의 분석 오차, 분석 시료의 체류시간등의 제어특성에 대한 영향을 비교, 고찰하였다. Computer simulation 에 의해 생물공정에 적합한 인공신경망 제어구조를 고찰하였고 3-2-1 구조의 NN 제어기가 PID 제어기보다 우수함을 알 수 있었다. 3-2-1 구조의 NN 제어기를 이용하여 모사 생물공정 및 yeast 발효공정에서 암모니아 농도를 제어하여 그 특성을 고찰하였다.

참고문헌

1. K.J. Hunt, D. Sbarbaro, R. Zbikowski, P.J. Gawthrop (1992), Neural networks for control systems – a survey, *Automatica*, 28, 1083-1112

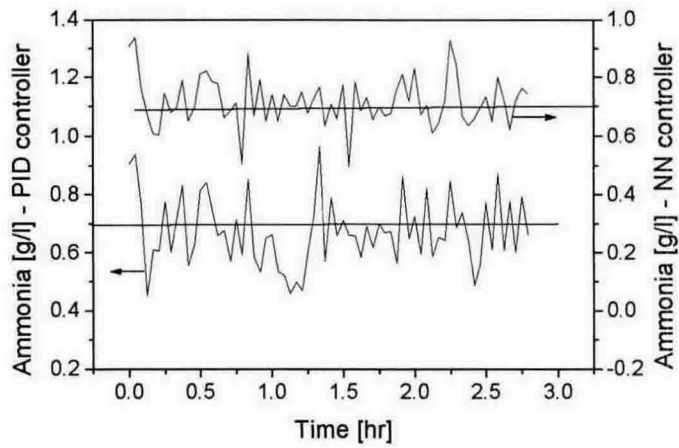


Fig. 1 Experimental comparison of a 3-2-1 NN-based controller with a PID controller for the control of ammonia concentration to 0.7 g/l (5 % analysis error, 150 training cycles)

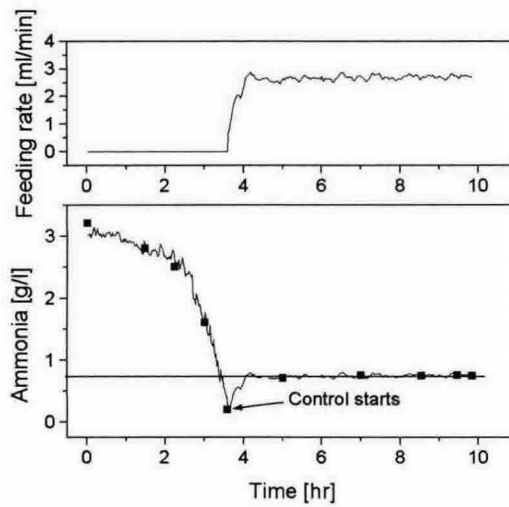


Fig. 2 Time course of ammonia concentration and feeding rate in a *S. cerevisiae* cultivation process controlled by a NN-based controller (set point : 0.7 g/l)