

## 신경회로망을 이용한 열성층 풍동내의 온도 분포 제어

### Control of Temperature Distribution in a Thermal Stratified Wind Tunnel by using Neural Networks

○부 광 석\*, 김 경 천\*\*

\*인제대학교 기계공학과(Tel: 0525-20-3186; Fax: 0525-22-2679; E-mail: mechboo@ijn.inje.ac.kr)

\*\*부산대학교 기계공학부(Tel: 051-510-2324; Fax: 051-512-9835)

**Abstract** This paper describes controller design and implementation method for controlling the temperature distribution in a thermal stratified wind tunnel(TSWT) by using a neural network algorithm. It is impossible to derive a mathematical model of the relation between heat inputs and temperature outputs in the test section of the TSWT governed by a nonlinear turbulent flow. Thus inverse neural network models with a multi layer perceptron structure are used in a feedforward control loop and feedback control loop to generate an arbitrary temperature distribution in the test section of the TSWT.

**Keywords** Neural Networks, Thermal Stratified Wind Tunnel, Temperature Distribution Control

#### 1. 서론

성층화된 유체의 난류현상 및 환경 오염문제를 다룰때 대기 환경의 모형화는 매우 중요하다. 이를 실현하기 위해서는 지표면의 마찰, 현열 및 잠열의 영향과 태양열의 복사량에 의해서 빈번하게 변화되는 온도 성층을 원하는 형태와 크기로 재현 시킬 수 있어야 한다. 이러한 임의의 온도분포를 갖는 성층류의 재현은 열성층 풍동을 이용하여 이루어 지나 풍동내의 유동은 층류의 온도 구배에 의해서 발생하는 난류 현상에 의하여 지배를 받기 때문에 풍동의 상류측에 설치된 히터에의 공급 열량과 하류측 시험단의 온도분포 사이에는 강한 비선형 특성을 보여 주어 시험단에서 임의의 형상의 온도 분포를 재현하는 것은 매우 어렵다. 따라서 지금까지는 정형화된 온도 분포만을 이용하였으므로 그 적용에 많은 한계를 갖고 있었다.<sup>(1)</sup>

열성층 풍동에서 임의의 형상의 온도 분포를 형성하기 위하여 열성층 풍동의 상류측에 수개의 히터로 구성된 히터열을 층상으로 배열하고 각각의 히터열은 열교환용 핀을 장착하여 유동이 있을때 각각의 열교환기에서 열교환이 일어나면서 공기층에 열량을 공급한다. 각층의 열교환기를 통하여 데워진 공기층은 풍동내의 수축부를 통과하면서 데워진 공기들의 부력효과와 혼재되어 복잡한 난류유동을 형성하면서 하류측으로 이행된다. 이러한 풍동에 공급된 열량과 온도분포 사이에는 풍동내 층의 위치와 시간에 따라 매우 높은 비선형 특성을 보여주므로 수학적 모델의 유도가 거의 불가능하다. 그리고 다입력 다출력 이면서 입, 출력간이 서로 매우 밀접하게 서로 영향을 미치게 되어 있어 고전적인 제어 기법을 적용하는 것도 매우 어렵다. 근래에 이상의 시스템과 같이 수학적 모델의 유도가 어렵고 다입력, 다출력의 시스템 또는 비선형 시스템에 신경회로망을 이용하거나<sup>(2),(3)</sup> 퍼지논리등과 같은 인공지능 기법을 이용하여 제어하는 연구가 많이 이루어지고 있다.

본 논문에서는 입, 출력변수가 많고 서로 비선형적인 관계에 있는 열성층 풍동의 온도분포를 제어하기 위해서 신경회로망 모델을 이용하였다. 사용된 신경회로망 구조는 비교적 학습이 용이하고 적용하기가 쉬운 Feedforward 다층구조를 선택하였다.<sup>(3)</sup>

#### 2. 열성층 풍동의 온도 제어 시스템

Fig. 1은 열성층 풍동내에 유속이 형성되었을때 풍동내에 임의의 온도 분포를 갖는 공기층을 형성 시키기위한 온도 제어시

스템을 보여준다. 그림에서 팬을 돌려서 공기를 풍동내에 불어넣어 주면 공기는 14개층의 히터열들을 지나면서 열교환을 일으킨다. 열교환을 통하여 공기는 데워지거나 이때 각 히터층에 공급된 열량이 다르므로 히터에 공급된 열량에 따라 서로 다른 온도를 갖는 공기층을 형성하게 된다. 이러한 공기층은 풍동내의 수축부를 통과하면서 부분적으로 혼합되게 되어 시험단(test section)에서 특정 온도 분포를 갖는 공기층이 된다. 시험단에 형성된 온도 분포를 측정하기 위해서 시험단의 바로 뒷부분에 20개의 열전대를 수직으로 배열하였다. 열전대와 증폭기를 통하여 측정된 각 공기층의 온도값은 A/D 변환기를 거치면서 디지털 값으로 변환되어 컴퓨터에 입력된다. 컴퓨터에서는 측정된 온도분포가 시험단에서 필요로 하는 온도 분포가 되도록 설계된 제어 알고리즘이 계산되며 각 히터열로의 공급 열량이 결정된다. 각 히터열에서 필요로 하는 열량을 생성 시키기위해서 히터의 전력량을 제어하여야 하는데 이는 컴퓨터에서의 명령에 따라 SSR(Solid State Relay)를 이용한 전력제어장

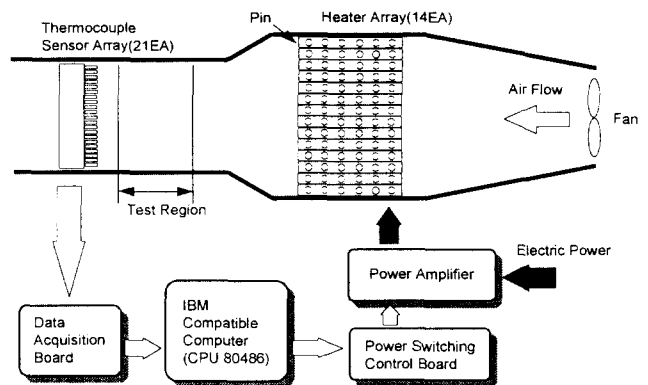


그림 1. 열성층 풍동의 온도 제어 시스템 개념도  
Fig. 1. Schematic diagram of the control system for controlling the temperature distribution in a thermal stratified wind tunnel.

치에서 이루어진다. Fig. 2에 히터로 공급되는 전력 제어 장치의 제어 개념도를 나타 내었다. 컴퓨터에서 제어 명령을 Data Bus에 쓰면 이는 Data Latch에 저장된다. 이값과 AC 전원에서 공급되는 전력의 양을 비교하여 원하는 양이 되었을 때 SSR을 trig하여 공급 전원을 끊어 준다. 이러한 과정을 계속해서 반복하므로 히터에의 공급 전력을 제어하게 된다. AC 전원의

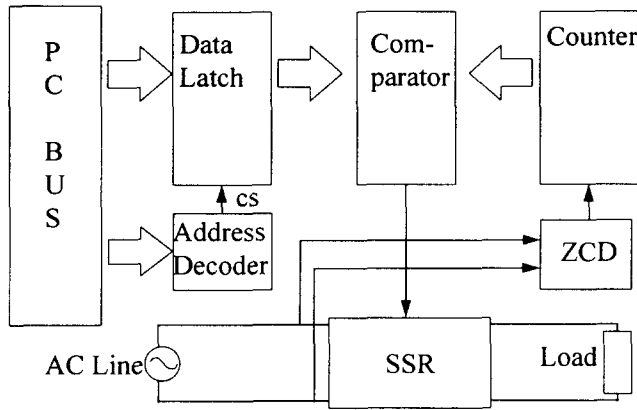


그림 2. 히터열 전력 제어 개념도

Fig. 2. Block diagram for control of an electric power supplied to a heater array.

공급량은 ZCD(Zero Cross Detector)에서 AC 전원이 교번 될때의 상태를 감지하므로써 알게된다.

풍동내의 온도 분포가 형성되는 동적 특성을 알기 위해서 히터에 정해진 분포의 전력량을 시간에 대해 일정하게 공급하고 이때 시험단에서 온도분포를 측정하였다. Fig. 3은 최하단부인 1번 히터열에서 최상층부 14번 히터열까지 최대 공급 가능 전력량의 0%에서 50%까지 선형적으로 증가하는 값을 갖는 전력량을 공급하였을 때 시간에 따라 변화하는 시험단의 온도 분포를 보여준다.  $t=0$  sec일 때 최하단의 1번 열전대에서 최상층부 20번 열전대까지 균일한 약 30°C의 분위기 온도분포를 나타내며 시간이 흐를수록 전력 공급량이 많은 상층부의 온도는 급격히 증가하는 반면 전력 공급량이 작은 하층부는 온도 상승 정도가 매우 작음을 알수 있다. 이는 공급된 열량이 다르므로 예견할수 있는 것이나 히터열에 선형 분포를 갖는 전력량을 공급하였으나 결과적으로 정상 상태에서의 시험단의 온도 분포는 선형적 분포가 아닌 고차원적인 함수관계의 비선형 분포를 보여준다. 이는 데워진 더운 공기는 비중이 가벼워져서 상층부로 이동이 있기 때문이다. 그리고 최상부의 온도분포는 공급 열량이 선형 증가된 분포로 공급된데 반하여 시간이 증가함에 따라 균일 분포를 유지하다가 정상 상태에서 어떤 구배를 갖는 분포를 보여준다. 이는 상층부의 경계부에서 대기로의 열전달이 있기때문이다. Fig. 4는 Fig. 3과의 경우와는 반대로 최하단부의 히터열에서 최상층부까지 50%에서 0%로 선형적으로 감소하는 분포를 갖는 열량을 공급 하였을 때 시험단에서의 온도 분포의 변화를 보여 준다. Fig. 3과 정 반대의 분포를 갖는 열량을 공급하였으나 Fig.4의 온도 분포는 Fig. 3과 반대적인 분포를 보여 주는 것이 아니라 시험단의 하단부에서는 온도 구배가 거의 없는 분포를 유지하다가 상층부에서 급격히 감소하는 온도 분포를 보여준다. 이는 앞서의 Fig. 3에서와 같이 더운 공기는 위로 상승하는 효과에 의해서 발생하는 결과이다. 그리고 Fig. 4는 최하단부에서는 최상부와 같이 경계부에서의 열전달에 의한 영향이 있음을 보여준다. 이상의 실험에서 열성층 풍동의 온도 분포는 시험단의 위치에 따라 비선형적인 관계가 있음을 보여주며, 특히 시험단의 각 위치에서 시간에 따른 온도의 동특성이 서로 다를수 있음을 알수 있었다.

### 3. 신경회로망 제어기 설계

열성층 풍동에서 온도분포의 동특성 실험은 온도분포가 풍동내의 위치와 시간에 따라 비선형적인 특성이 있음을 보여주

며 그 입력과 출력사이의 난류유동에 의해서 형성된 매우 복잡한 관계가 있음을 보여 준다. 이는 풍동내의 온도 분포를 제어

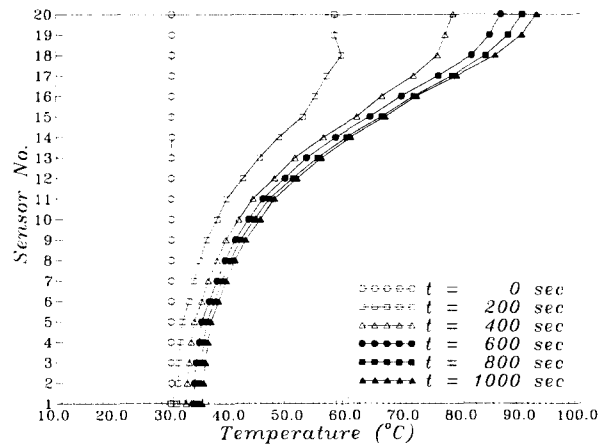


그림 3. 선형 증가 분포의 열량 공급에 의한 온도 응답 특성  
Fig. 3. Temperature responses due to heat input with linearly increasing distribution.

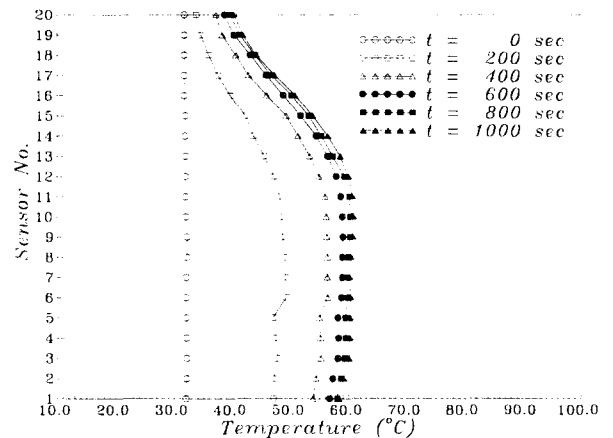


그림 4. 선형 감소 분포의 열량 공급에 의한 온도 응답 특성  
Fig. 4. Temperature responses due to heat inputs with linealy decreasing distribution.

하기 위해서 필요한 입, 출력간의 수학적 모델의 유도가 매우 어려움을 말해주며 따라서 수학적 모델에 근거한 제어기의 설계기법을 이 시스템에 적용하는 것은 불가능하다. 그리고 단순 입, 출력관계만을 고려하여 적용하는 고전적인 여러 제어 기법들도 입력이 14개, 출력이 20개인 열성층 풍동 온도 제어 시스템에 적용하는 것이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 열성층 풍동의 입력과 출력사이의 관계를 신경회로망을 이용하여 모델링하고 이를 이용하여 제어기를 설계하고, 이를 열 성층 풍동의 온도 제어에 적용하고자 한다.

Fig. 5는 열성층 풍동의 온도 제어 개념도를 나타낸다. 풍동내의 시험단에서 형성되기를 바라는 온도 분포를 입력으로 하고 이를 이용하여 플랜트에 공급되는 열 입력량의 크기들을 결정한다. 공급열량은 다음의 관계에 따라 계산된다.

$$\bar{U}(t) = \bar{u}_0 + \Delta \bar{u}(t) \quad (1)$$

여기서,  $U(t)$ 는 플랜트 공급 열량이고,  $u_0$ 와  $\Delta u(t)$ 는 각각 기준 열입력량과 증분 열입력량으로서 다음식에 따라 계산된다.

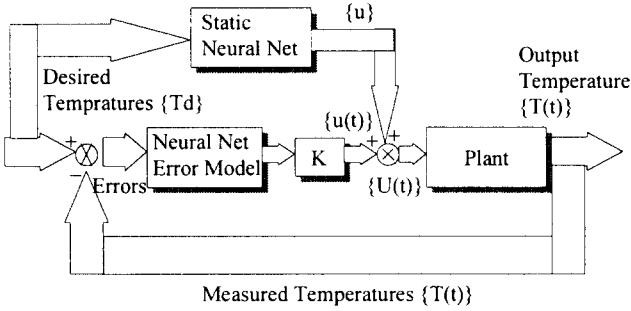


그림 5. 신경회로망 제어 블록 선도.

Fig. 5. Block diagram of the neural network controller.

$$u_0 = N.N_{static}(T_d) \quad (2)$$

$$\Delta u(t) = K \cdot N.N_{error}(e(t))$$

여기서,  $T_d$ 는 기준온도 분포이며,  $T(t)$ 를 플랜트의 출력 온도 분포라고 했을때 그들간의 오차를  $e(t)=T_d-T(t)$ 라고 한다. 그리고,  $N.N_{static}()$ 과  $N.N_{error}()$ 는 각각 신경회로망 정적 역모델과 오차 모델을 나타내며,  $K$ 는 비례이득이다.

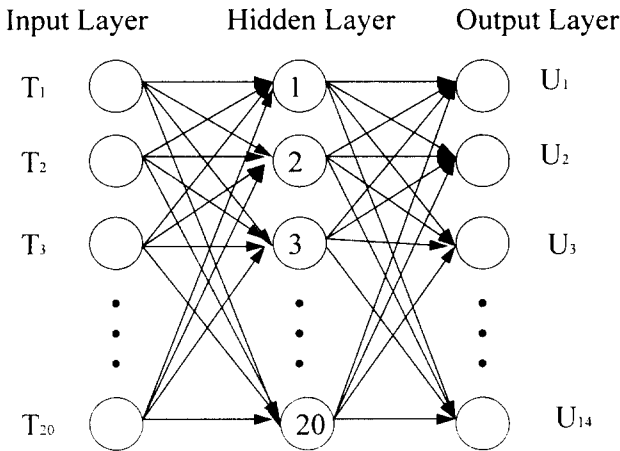


그림 6. 온도제어를 위한 신경 회로 구조

Fig. 6. Neural networks for temperature control of the TSWT.

Fig. 6은 신경회로 모델에서 사용한 구조를 보여준다. 입력은 기준온도  $T_d$ 이거나 오차  $e(t)$ 이며 입력단의 Node수는 20이다. 신경모델의 출력은 기준 열입력  $u_0$ 이거나 증분 열입력  $\Delta u(t)$ 이며 출력단의 Node수는 14이다. Hidden Layer는 한층을 두었으며 이 층의 Node수는 입력과 같은 20을 선정하였다. 신경회로의 구조는 Multilayer Perceptron으로서 오차역전파법을 이용하여 학습을 하였다. 학습시 learning rate는 0.5, Momentum rate는 0.3을 주었으며 이때의 학습 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 x축은 반복학습 수를 나타내며 y축은 무차원 예측 오차를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 무차원 예측 오차는 학습 횟수의 증가에 따라

점진적으로 감소하고 있으며 약 100000번째에는 거의 0.002이로 감소하고 있음을 알수있다. 이는 비록 많은 수의 입, 출력의 Node가 있지만 그 관계를 연결하는 신경 모델의

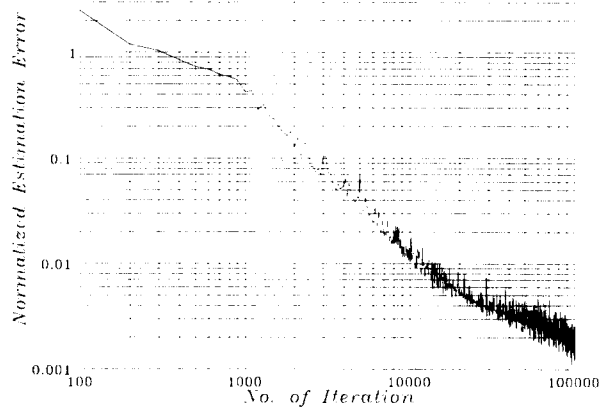


그림 7 학습에 따른 예측 오차 변화

Fig. 7. Variation of the normalized estimation error via iteration.

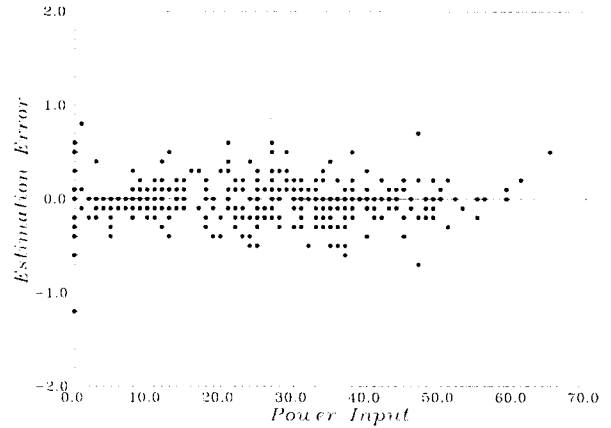


그림 8. 신경회로 모델의 출력의 레벨에 따른 예측 오차의 분포.

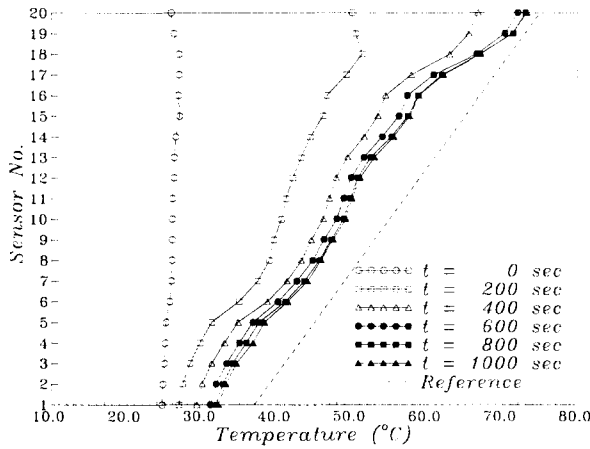
Fig. 8. Estimation error distribution for various power inputs.

신뢰도는 매우 높음을 보여준다. 이때의 신경 모델을 가지고 출력을 예측한 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8은 플랜트로의 열 입력량이 0에서 약 70%까지 변화하므로 해서 발생된 플랜트 출력단의 온도 분포를 신경회로 모델의 입력단에 넣고서 역으로 열 입력량을 예측 했을때 그 결과는 거의 -0.5에서 0.5이내의 범위에 들고 있음을 보여준다. 따라서 본연구에서 제시한 신경 회로 모델은 제어에 충분한 신뢰도와 정확도를 갖고 있는 것으로 판단된다.

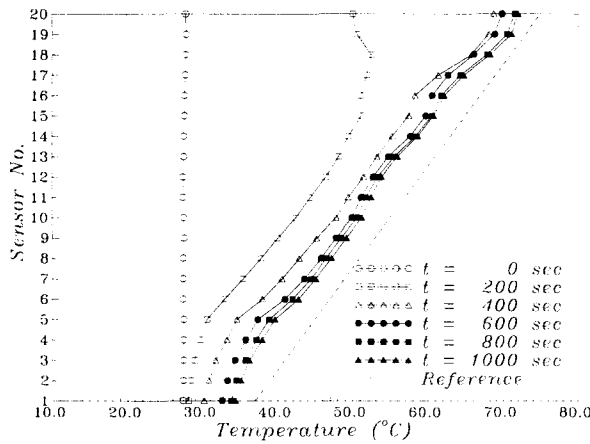
#### 4. 제어 실험 결과 및 검토

Fig. 9는 풍속이 3m/s일때 풍동내의 온도 분포가 최상층부 75C, 최하층부 37C가 되게하고 그사이의 그림의 점선과 같이 선형적으로 변화하는 분포를 갖게 하도록 기준 온도를 설정 하였을때의 제어 결과를 보여 준다. Fig. 9(a)는 Feedback Loop의 비례이득  $K$ 가 0.2일때의 결과를 나타내며, Fig. 9(b)와 (c)는 각각

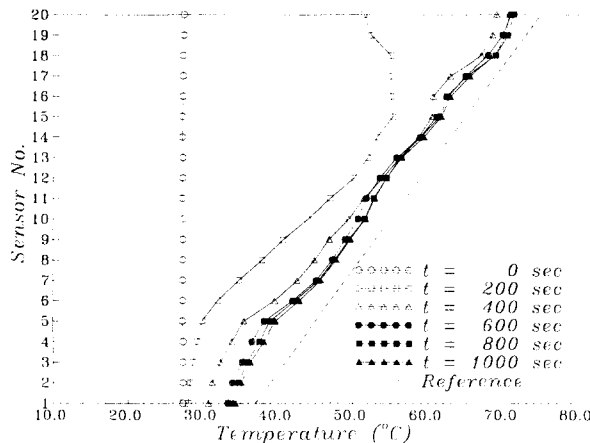
K가 1.0, 2.0일때의 결과를 보여준다. 그림에서 초기상태의 균일한 온도 분포가 시간이 지남에 따라 기준 온도와 유사



(a) K=0.2 일때



(b) K=1.0 일때



(c) K=2.0 일때

그림 9. 선형 분포의 기준온도에 대한 온도 제어 결과.  
Fig. 9. Results of the temperature control of the proposed controller.

한 분포를 갖도록 제어되고 있음을 알수 있다. 비례이득이 K=0.2로 작은 경우인 Fig. 9(a)에서는 정상상태의 온도분포가 기준입력과 같이 선형적인 관계를 보여 주지 못하며 정상상태 오

차도 매우 큼을 알수 있다. 그러나, K=1.0의 경우에는 정상상태의 온도 분포가 기준 온도 분포와 같이 거의 선형적이며 정상상태오차도 매우 감소 했음을 Fig. 9(b)의 그림에서 부터 볼수 있다. 그리고 비례이득이 커짐에 따라 시간에 따른 온도 상승 특성도 매우 빨라진다는 것도 Fig. 9(a)와 (b)의 비교에서 부터 알수 있다. Fig. 9(c)에서 비례이득이 K=2.0으로 더욱 증가한 경우, K=1.0의 경우와 제어 성능 면에서는 비슷하나 천이과정의 온도 분포가 좀더 빠르게 변화되는 것을 알수 있고, K=2.0의 경우가 K=1.0의 경우보다 다소 불안정 하다는 것을 알수 있다. 이는 이득의 증가에 따라 오차는 다소 감소하나 그에 따른 안정성은 상대적으로 감소함을 보여준다. 이상의 제어 실험에서 제안된 신경망 제어기는 기준온도의 선형분포와 유사한 온도 분포를 보여주고 천이과정이 개루프 제어에 비하여 매우 향상된 특성을 보여 주나 정상상태의 오차가 여전히 존재하는 문제점 또한 보여주고 있다. 이는 학습시와 제어시 분위기 온도가 변한것에 그 첫 원인이 있는것으로 판단되며 신경회로망 모델의 학습시에 초기온도의 영향을 고려하여 학습을 하면 보다 개선될 것으로 사료되며, 동특성을 더욱 향상 시키기 위해서는 정적 역모델이 아닌 동적 모델을 신경회로 모델로하는 연구가 이루어져야 할것으로 판단된다.

## 5. 결론

플랜트의 입력과 출력변수가 다변수이고 그들간의 관계가 난류유동에 의해서 지배되는 비선형 분포 매개변수의 관계를 나타내는 열성층 풍동에서 온도 분포를 제어 하기 위하여 신경 회로망을 이용하였다.

신경회로망 제어기는 Feedforward Loop와 Feedback Loop에 적용되었는데 플랜트에의 정적 상태의 역 입,출력 관계를 신경회로 모델로 구성 하였다. 신경 회로 모델은 비록 많은 수의 입, 출력의 Node로 구성 되었지만, 플랜트의 복잡한 입, 출력 관계에도 불구하고 신경회로망 모델의 신뢰도와 정확도는 매우 높음을 보여준다.

제어 실험 결과 제안된 제어기는 다소의 정상 상태 오차를 가지고 있으나 기준 온도의 분포를 재현 하는 성능은 매우 우수하였다. 정상상태 오차의 발생은 제어시 분위기 온도가 변한것에 그 첫 원인이 있는것으로 판단되며 신경회로망 모델의 학습시에 초기온도의 영향을 고려하여 학습을 하면 보다 개선될 것으로 사료된다. 제안하는 제어 방법이 만족할 만한 제어 성능을 보장하지는 못하였지만 신경 모델을 다입력, 다출력의 복잡한 관계에 있는 열 성층 풍동에의 온도 분포 제어에 적용시 충분한 가능성을 보여주고 있다고 결론되어 진다.

## 감사의 글

본 연구는 첨단 유체 공학 센터의 연구비 지원에 의하여 이루어 진것으로 연구비를 지원해 주신 연구 센터에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- [1] V. Lienhard, C.W. Van Atta, "Thermally Stratified a Wind Tunnel for Buoyancy Influenced Flows", Exp. in Fluids, Vol. 7, pp. 542-546, 1989.
- [2] D. Psaltis, A. Sideris, and A.A. Yamamura, "A Multilayer Neural Network Controller", IEEE Contr. Sys. Mag., Vol. 8, pp. 17-21, Apr., 1988.
- [3] S. Qin, H. Su and T. Mcavoy, "Comparison of Four Neural Net Learning Methods for Dynamic System Identification", IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 3, No.1, January, 1992, pp.122-130.