

## 모델실험에 의한 객실 운동의 능동제어 연구

배종국\*, 이재원\*\*, 주해호\*\*, 신찬배\*\*\*

### An Experimental Study on the Active Control of the Motion of Ship Cabin

Jong-Gug Bae\*, Jeh-Won Lee\*\*, Hae-Ho Joo\*\*, Chan-Bai Shin\*\*\*

#### ABSTRACT

A need for stable and comfortable cabins in the high-speed passenger ships has increased. For active control of the motion of the ship cabin, a few control algorithms have been applied to the three dimensional real models in the vibration basin. Experimental results show that the feedforward neural network with a linear feedback controller is one of the promising control algorithms for this active control.

**Key Words** : high speed passenger ship(고속 여객선), adaptive linear structure(선형근사구조), neural network controller(신경망회로 제어기), ship cabin motion control(선실운동제어)

#### 1. 서론

쾌적한 승선감을 제공할 수 있는 여객선에 대한 요구가 증대되고 이를 위한 연구가 많이 진행되어 왔으나 선박의 운항 성능을 향상시키는 연구에 국한되어 왔다. 한편 차량의 능동 현가장치와 같이 객실을 선체와 분리시키고 객실에 전달되는 선체운동을 능동적으로 감쇠시키는 능동제어 시스템에 대한 연구는 일본 미쓰비시 중공업(MHI)에서 이미 15여년 전부터 진행되어 200인승 고속 여객선에 이 개념이 적용된 바 있다[1]. 국내에서도 향후 장거리 고속 여객선에 대한 수요가 증가하고 있는 추세를 감안할 때 승객에게 안락한 승선감을 제공하기 위해서는 객실 운동의 능동제어에 대한 연구가 필요한 실정이다.

현대선박해양연구소에서는 여객선의 승선감을 향상시키기 위해 능동제어 기법을 적용한 선실 감요장치 개발에 대한 연구를 수행하여 왔다. 유압구동기를 이용한 이 장치가 분리된 객실과 선체사이에 설치되어 객실의 운동을 제어하기 위해서, 기 발표[2,3]된 바와 같이 1, 2자유도 모델실험을 통해서 제어 효과가 가장 뛰어난 제어 알고리즘이 선정되었다. 모델 실험에 적용된 제어 알고리즘은 근사신경회로망과 선형귀환제어이론으로 분류되며 모델 실험결과에 의하면 근사신경회로망 중 선형근사회로망과 선형귀환제어기를 병렬로 적용한 경우가 가장 안정적인 제어효과를 보여주었다.

따라서 본 연구에서는 쌍동 모형선 위에 평판형태의 객실과 유압 구동기를 이용한 선실감요장치를 제작 설치하여 객실의 히이브(heave), 피치(pitch),

☞ 2001년 10월 15일 접수  
\* 현대중공업(주) 선박해양연구소  
\*\* 영남대학교 기계공학부  
\*\*\* 울산과학기술대학 기계학부

롤(roll) 운동을 제어하는 모델을 제작하여 진동 수조에서 실험하고자 한다. 이러한 실험을 통하여 파도의 주파수에 강인한 제어를 선정하고자 한다.

## 2. 제어이론

### 2.1 선형제어

객실의 운동을 감소시키기 위한 제어신호  $u(t)$ 는 히이브, 피치, 롤의 변위, 속도, 가속도 신호를 피드백하였다.

$$u(t) = k_1 z_c + k_2 \dot{z}_c + k_3 \ddot{z}_c + k_4 \theta_x + k_5 \dot{\theta}_x + k_6 \ddot{\theta}_x + k_7 \theta_y + k_8 \dot{\theta}_y + k_9 \ddot{\theta}_y \quad (1)$$

여기서,  $z_c$ =히이브 변위  $\dot{z}_c$ =히이브 속도  
 $\ddot{z}_c$ =히이브 가속도  $\theta_x$ =피치 변위  
 $\dot{\theta}_x$ =피치 속도  $\ddot{\theta}_x$ =피치 가속도  
 $\theta_y$ =롤 변위  $\dot{\theta}_y$ =롤 속도  
 $\ddot{\theta}_y$ =롤 가속도

여기에서 최적 피드백 게인은 시스템의 안정성을 주기 위해 skyhook damper 이론<sup>[5]</sup>에 기초하여 결정하였다.

### 2.2 선형근사 신경회로망

본 실험에 적용된 신경회로망은 Fig. 1과 같이 비례제어밸브로 가는 제어 입력은 선형제어기의 출력과 신경회로망 출력의 합으로 이루어진다. 즉 매 샘플링마다 학습을 하여 적절한 가중치를 구하게 되는 실시간 제어시스템이다. 제어 초기의 안정성은 선형제어기가 담당 하지만 학습을 해감에 따라 신경회로망의 역할이 커지게 된다.

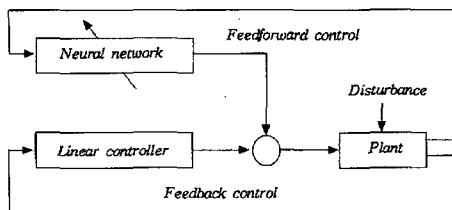


Fig. 1 Block diagram of control system with neural network

이 실험에서 사용되는 선형근사 신경회로망(linear approximation neural network)으로 계측 가능한 모든 상태변수를 입력으로 하는 입력층과 하나의 출력층 만으로 이루어진 Fig. 2와 같은 ADALINE (ADaptive LINear Element) 구조<sup>[6]</sup>이다.

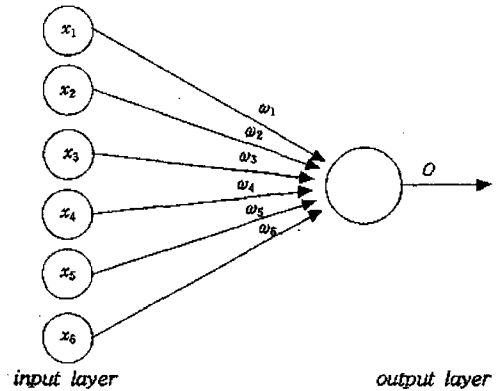


Fig. 2 ADALINE network architecture

학습 알고리즘은 출력되어야 할 값과 실제 출력 값 사이의 오차를 이용하여 적당한 학습률로 앞단의 가중치를 변화시켜 원하는 오차를 최소화 하는데 있다. 학습의 목적은 오차( $\epsilon$ )의 제곱으로 표시되는 오차 함수  $E$ 를 최소화 시키는 것이다.

$$E = \epsilon^2 = (k_1 x + k_2 \dot{x} + k_3 \ddot{x})^2 \quad (2)$$

따라서 Fig. 2에서 출력층의 오차의 함수를 최소화 시키는 가중치  $w_i$ 는 다음과 같은 최급 강하법(steepest descent rule)에 따라 바뀌게 되는데  $i$ 번째 가중치 갱신량  $\Delta w_i$ 는 다음과 같다.

$$\Delta w_i = \eta \frac{\partial E}{\partial w_i}, \quad \eta = \text{학습율} \quad (3)$$

또 출력층의 총 입력  $O$ 는 다음과 같다.

$$O = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (4)$$

그러므로 (3)식의 가중치 갱신량  $\Delta w_i$ 는 체인룰에 의해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta w_i &= 2\eta\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial w_i} \\ &= 2\eta\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial O} \cdot \frac{\partial O}{\partial w_i} \\ &= -2\varepsilon\eta x_i \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.3 역전파 회로망

역전파 회로망(back propagation, BP)<sup>[6]</sup>은 Fig. 3에서 보는바와 같이 입력층과 출력층 사이에 중간층이 있는 다층 구조이다.

학습 방법은 실제 중간층의 뉴런(neuron)들은 어떤 출력을 내보내야 하는지 미리 알 수 없으므로 출력층의 뉴런들로부터 오차에 관한 정보를 역으로 전달받아 자신의 학습에 이용하게 되는 것이다.

따라서 입력이 주어지면 각각의 뉴런은 식(6), 식(7)과 같이 출력을 계산하여 다음층의 뉴런에 넘겨준다. 이때  $w_{ij}$ 는 뉴런  $i$ 와  $j$ 사이의 가중치이다. 또  $\theta_i$ 는 bias로서 다른 가중치와 같이 학습을 하게 된다.

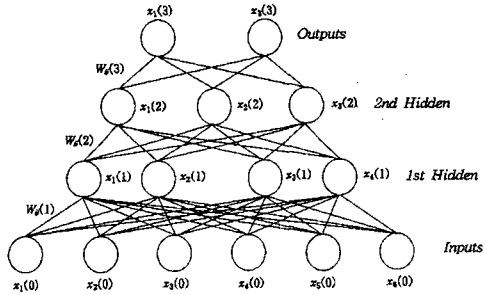


Fig. 3 Back propagation network architecture

식(8)은 활성화 함수를 나타내며 여기서  $net_i$ 는 뉴런  $i$ 로의 입력이고  $x_i$ 는 뉴런  $i$ 의 출력이다.

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (6)$$

$$net_i = \sum_j w_{ij} \cdot x_j + \theta_i \quad (7)$$

$$x_i = f(net_i) \quad (8)$$

역전파 법칙은 출력층 뉴런의 실제 출력  $x_i$ 와 원하는 출력  $T_i$ 와의 차이를 줄이는 방향으로 가중치를 조절한다. 즉 전체 오차를 식(9)와 같이 나타내면 이 오차를 최소화 하기 위해 가중치는 식(10)과 같이

경사법을 사용한다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_i (T_i - x_i)^2 \quad (9)$$

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \eta \cdot \delta_i \cdot x_j \quad (10)$$

이때 출력층 뉴런에 대해서는

$$\delta_i = (T_i - x_i) f'(net_i) \quad (11)$$

이며, 중간층 뉴런에 대해서는

$$\delta_i = f'(net_i) \sum_k \delta_k \cdot w_{ki} \quad (12)$$

으로 주어진다. 이 역전파 회로망을 이용한 제어 구조도 Fig. 2와 동일한 형태이다.

### 3. 실험 장치

3자유도 모델실험은 Fig. 4와 같이 길이 3470 mm이고, 폭 940 mm인 쌍둥 모형선을 주선체로 하고, 그 위에 1000×500×50 mm인 아크릴판으로 제작된 삼각형 형태의 객실모형을 3개의 유압구동기가 지지하는 구조이다. 유압실린더는 서보밸브의 유량조절에 의해 구동된다. 또 선체에 대한 상대 각변위를 자유롭게 하기 위해 구동기의 상하단에 볼 조인트(ball joint)를 설치하였다. 이 모형선은 5400×2450×1850 mm 크기의 대형 수조에서 수행되었다.

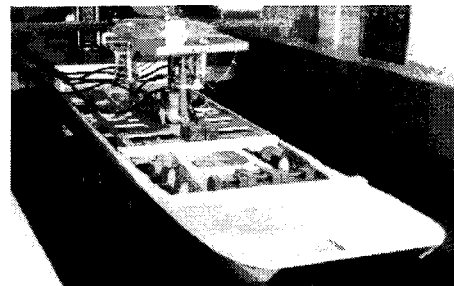


Fig. 4 3D Experimental mockup

Fig. 5에서 보는 바와 같이 객실의 히이브(z), 피

치( $\theta_x$ ), 롤( $\theta_y$ ) 운동을 제어하고자 한다. 객실과 선체의 운동을 계측하기 위해서 가속도계와 변위 센서를 사용하였으며 속도 성분을 계측하기 위하여 적분계를 사용하였다.

진동수조 내에서의 파도를 발생시키기 위해서 유압실린더를 이용하여 조파기(wave generator)를 제작 설치하였으며 파고와 주파수는 신호발생기에서 발생된 신호에 의해서 조절하였다. 또한 좁은 수조 내에서의 파도의 간섭 및 반사를 줄이기 위해서 수조 한편에 소파기(wave absorber)를 설치하였다.

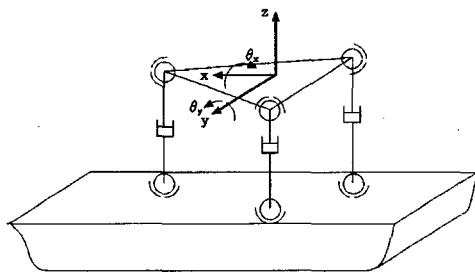


Fig. 5 Skematic diagram of 3D model

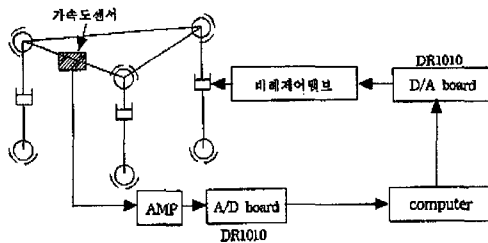


Fig. 6 Block diagram of experimental equipment

Fig. 6은 제어실험장치의 블록선도를 나타내고 있다. 선형회로망에서 입력노드는 6개로서  $x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$ ,  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\ddot{\theta}$  이며, 출력노드는 1개로서 유압실린더 입력이다. 학습율은 0.001로 정하였다. 활성화 함수는 선형근사회로망에서는 선형함수, 역전파회로망에서는 Sigmoid함수를 사용하였다.

#### 4. 실험 방법 및 결과

쌍동모형선에 설치한 선실감요장치 제어실험은 다음 두 가지 경우에 대해서 행하였다.

(1) 0.5 Hz에서 0.85 Hz까지 0.1 Hz 간격으로 단 일주파수로 가진

(2) 모형선의 해상 상태 시뮬레이션 결과에 의한 가진

표 1은 가진주파수에 따른 제어전과 제어 40초 후의 객실 상하방향 가속도 크기의 평균치를 보여주고 있다.

Table 1 Vertical acceleration of ship cabin according to exciting frequency

(단위:  $\text{cm}/\text{sec}^2$ )

Exciting frequency (Hz)	0.55	0.65	0.75	0.8	0.85
Before control	4.1	4.75	5.44	6.11	16.0
After control	2.54	2.22	2.31	2.32	1.85

모형선의 가진은 특정 주파수(0.85 Hz)에서 잘 일어나며 이는 모형선 크기와 진동수조 길이 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7은 실제 해상상태 시뮬레이션 신호 입력시의 선체운동의 PSD(power spectral density) 함수이며 중심 주파수는 0.7 Hz 근처이다.

Fig. 8, 9, 10은 해상상태 시뮬레이션 신호를 이용하여 가진 할 경우 제어가 되는 동안의 선체와 객실의 히이브, 피치, 롤 운동성분을 각각 보여주고 있다. 실험 결과를 살펴보면 본 연구에서 제안한 선실감요장치에 의한 객실의 운동성분의 제어효과가 우수함을 알 수 있다.

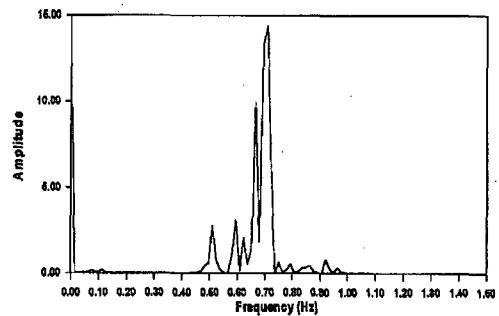


Fig. 7 PSD Function of Ship motion

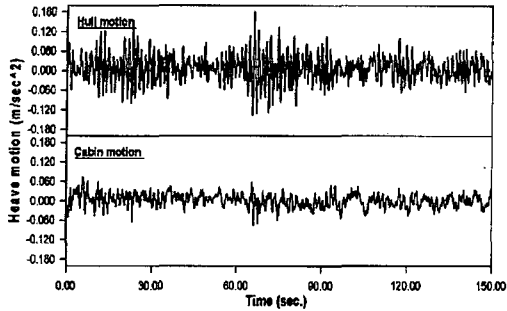


Fig. 8 Experimentally measured time response of heave motion

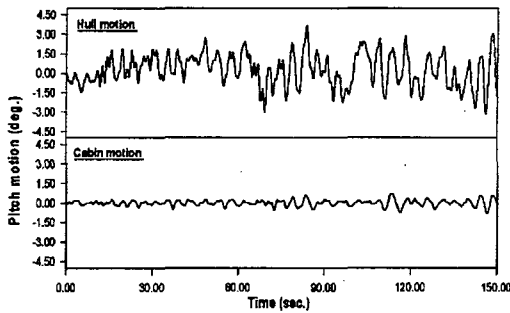


Fig. 9 Experimentally measured time response of pitch motion

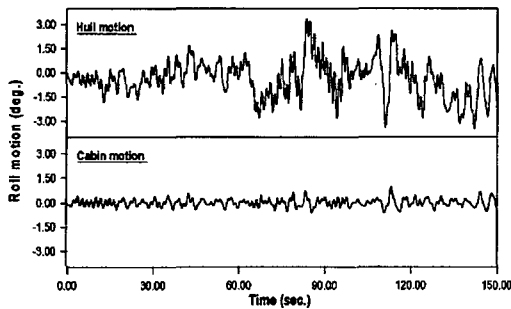


Fig. 10 Experimentally measured time response of roll motion

## 5. 결론

쌍동 모형선의 선실 운동의 과도로부터 절연하기 위한 실험장치를 제작하였고, 선형제어, 선형근사 신경회로망, 역전파 신경회로망 등 여러 제어알

고리즘을 사용하여 그 제어성능을 비교하였다.

제어장치의 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 선박과 같이 운동특성이 복잡하고 비선형성이며 선체운동이 시간에 따라 변하는 시스템의 제어에는 신경회로망을 이용한 on-line 학습제어가 효과적인 것을 알 수 있었다.
- (2) 값비싼 자이로(gyroscope) 센서를 사용하지 않고 가속도계에 의한 상하방향 가속도만을 측정하여도 객실의 운동제어가 가능하다는 것이 모델실험을 통해서 증명되었다.

향후, 객실 하중의 정적 지지방법을 고려한 연구가 더 진행되어야 한다고 생각된다.

## 참고문헌

1. Takahashi, T., Arinaga, S., Ishii, T., "Investigation into the Technical Feasibility of a Hi-Stable Cabin Craft," Transaction of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol.72, 1986.
2. 배종국, 주원호, 정균양, "모델실험에 의한 객실 운동의 능동제어 연구," 춘계조선학회 연구발표회, 1995.
3. 배종국, 주원호, 정균양, "선실감요장치의 제어 알고리즘 선정," 선박해양 구조연구회, 1996.
4. Merit, H. E., Hydraulic control system, John Wiley & Sons Inc.
5. Finney, J. M., Gill, G. S., "A Pole-Assignment for an Electrohydraulic Cylinder Drive," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 107, 1985.
6. Freeman, J. A., Skapura, D. M., Neural Networks Algorithms, Applications, and Programming Techniques., Addison-Wesley Pub., 1991.