

LMS 알고리즘을 이용한 전자기 베어링계에서의 런아웃, 불균형력 및 와전류 효과 규명

◦김하용*, 김승종**, 이종원*

Identification of Runout, Unbalance and Eddy Current Effect in Active Magnetic Bearing System Using LMS Algorithm

Ha-Yong Kim, Seung-Jong Kim and Chong-Won Lee

ABSTRACT

This paper proposes an adaptive feedforward controller (AFC) based on LMS for periodic disturbance rejection in active magnetic bearing system. The proposed controller does not alter the stability and robustness of the existing AMB system. It is shown that the control delay due to the eddy current as well as runout and unbalance can be identified and compensated using the estimated displacement from the measured magnetic flux. The simulation results confirm that the proposed scheme successfully identifies and compensates for the runout, unbalance and eddy current effect, leading to a high-precision magnetic bearing system.

1. 서론

전자기 베어링에서 런아웃과 불균형력은 정밀 구동을 저해하는 요소로 작용할 수 있다. 또한, 와전류(eddy current)에 의한 영향은 전자기 베어링의 제어력을 감소시켜 시스템을 불안정하게 만들 수 있다. 이러한 외란은 일반적으로 회전 주파수나 그 배수배 성분들을 포함한 주기적 외란으로 전자기 베어링의 필수 요소인 변위 센서에 의해 측정되어 피드백 되므로 외부 가진력처럼 회전축을 가진시키는 요인이 될 수 있다[1]. 런아웃과 불균형력을 없애기 위한 방법으로

3점 측정법과 같이 정지 상태에서 부가적인 장치를 추가하여 런아웃과 불균형력을 규명하거나 피드백시 노치 필터를 이용하여 주기적 외란을 제거 하는 방법이 있다[2,3]. 노치 필터의 경우는 특정 주파수에서 위상을 왜곡시켜 시스템의 상대 안정성을 저하시킬 수 있다. 또한, 확장 영향 계수법을 이용하여 전자기 베어링 시스템에서 효과적으로 런아웃 및 불균형력을 규명할 수 있는 방법이 있으나, 이 방법은 주어진 운전 조건하에서만 규명이 가능하며 알고리즘의 구조와 계산이 다소 복잡하고, 운전 조건의 변화에 쉽게 대응할 수 없다는 단점이 있다. 와전류에 의한 영향을 고려하기 위해서는 제어기 설계시 보상을

* 한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터

**한국과학기술연구원 Tribology 연구센터

설계하거나 자속 신호를 부가적으로 피드백 할 수 있는 제어기 설계를 통하여 보상하였다[4,5].

본 논문에서는 LMS 알고리즘을 이용한 적응 피이드 포워드 제어를 사용하여, 주기적 외란인 런아웃과 불균형력 이외에 와전류 영향을 주기적 외란 신호로 가정하여 이들의 영향을 규명할 수 있는 방법을 제시한다. 또한, 모의 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 효용성 및 특성을 검증한다.

2. 주기적 외란 제거를 위한 적응 피이드 포워드 제어

피이드 포워드 제어 방법을 이용하면 시스템의 안정성 및 강건성에 영향을 주지 않고 외란을 제거할 수 있다. 그 중에서도 LMS 알고리즘을 이용한 방법은 간단하고, 효율적인 외란 제거가 가능하다. 그림 1-(a)는 전자기 베어링에서의 주기적 외란을 제거하기 위한 피이드 포워드 알고리즘이 포함된 블록 선도이다. 그러나, 전자기 베어링은 피이드백 루프에 의해 안정된 시스템이 되므로 추정된 피이드 포워드 제어기로는 안정된 시스템의 응답을 추정할 수 없다. 시스템에 영향을 미치지 않는 피이드 포워드 제어기를 갖는 시스템으로 제안된 것이 그림 1-(b)이다. 이 방법은 전류 신호와 전자기 베어링의 자속으로부터 변위를 추정하여 주기적 외란을 제거할 수 있다. 전류 신호와 전자기력으로부터 변위 신호를 추정하는 방법과 달리 하중계를 내장하고 있지 않은 시스템에 대해서도 적용 가능하다[6]. 이 방법은 전자기 베어링의 제어 흐름과 독립적으로 주기적 외란을 제거하기 위한 제어 흐름 선도를 갖고 있어 시스템의 안정성에 영향을 미치지 않는다. 하지만, 자속으로부터 변위를 정확히 추정하기 위하여 시스템을 호모 폴라형(homo-polar type)이나 수직형(vertical type)과 같이 마주보는 두 전자석에 흐르는 공칭 자속(nominal flux)이 같은 경우로 가정한다.

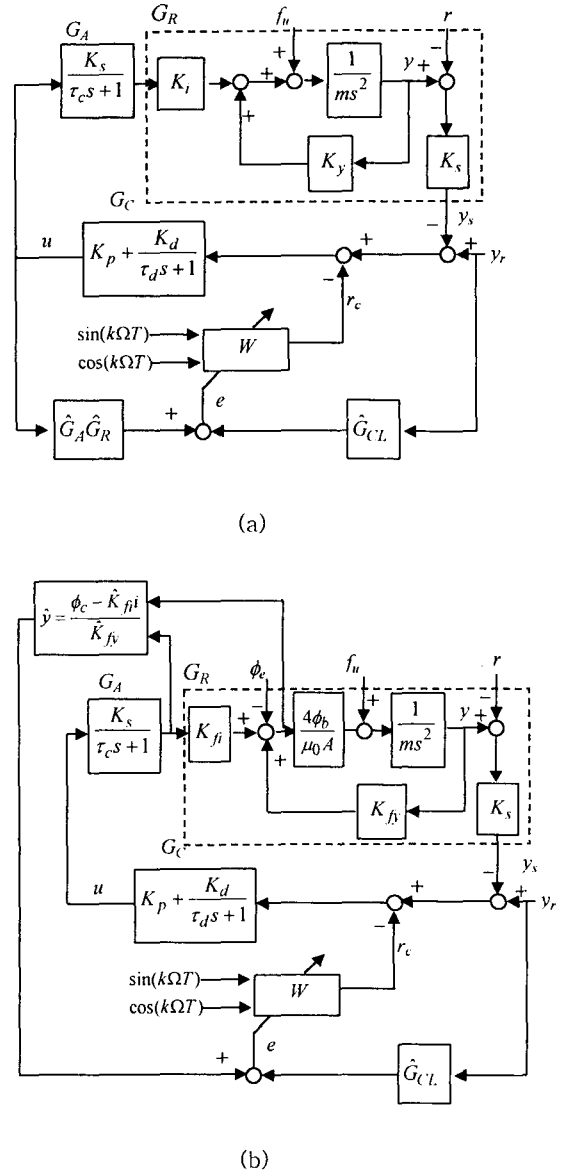


Fig. 1 Block diagrams of AFC based on LMS algorithm (a) with control input voltage feedback and (b) with current and flux feedback

2.1 런아웃 및 불균형력 규명

그림 1-(b)에서 런아웃과 불균형력을 갖는 전자기 베어링에서의 기준 입력에 대한 응답 값은 다음과 같다.

$$y = G_{CL}y_r + G_{CL}(K_s r - r_c) + G_u f_u \quad (1)$$

여기서,

$$G_{CL} = \frac{G_A G_R G_C}{1 + K_s G_A G_R G_C}$$

$$G_u = \frac{1}{(ms^2 - \frac{4\phi_b}{\mu_0 A} K_{fb}) (1 + K_s G_A G_R G_C)}$$

r 은 런아웃, f_u 는 회전체에 작용하는 불균형력을 나타낸다. 보상 신호 r_c 가 런아웃과 불균형력을 제거하도록 목적 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$J = e^2(k) = \{G_{CL}(K_s r(k) - r(k) - r_c(k)) + G_u f_u(k)\}^2 \approx \{\hat{y}(k) - \hat{G}_{CL}y_r(k)\}^2 \quad (2)$$

여기서, $\hat{}$ 는 추정 값을 의미하며, 추정된 변위는 다음과 같은 관계로부터 구할 수 있다.

$$\hat{y}(k) = \frac{\phi_c(k) - \hat{K}_{fi}i(k)}{\hat{K}_{fb}} \quad (3)$$

목적 함수를 최소화하기 위한 LMS 알고리즘에서 외란의 회전 주파수($f_0; f_0 = \Omega/2\pi$) 성분 에 대한 보상 신호 $r_c(k)$ 는 다음과 같다.

$$r_c(k) = w_{1s} \sin(k\Omega T) + w_{1c} \cos(k\Omega T) \quad (4)$$

적응 필터 계수 w_{1s} 와 w_{1c} 는 다음과 같이 수정된다.

$$\begin{aligned} w_{1s}(k+1) &= w_{1s}(k) + 2\mu e(k) \sin(k\Omega T) \\ w_{1c}(k+1) &= w_{1c}(k) + 2\mu e(k) \cos(k\Omega T) \end{aligned} \quad (5)$$

이와 같은 제어를 통해 최종적으로 구해지는 보상 신호는 다음과 같다.

$$r_c(k) = K_s r(k) + \frac{1}{K_i G_A G_C} f_u(k) \quad (6)$$

만약 n 개의 주파수에 대해 외란을 제거하고 싶은 경우에는 식 (4)와 (5)를 $w_{1s}, w_{1c}, w_{2s}, w_{2c}, \dots, w_{ns}, w_{nc}$ 와 같이 sine과 cosine의 함수로 $2n$ 개의 계수를 지정하면 된다.

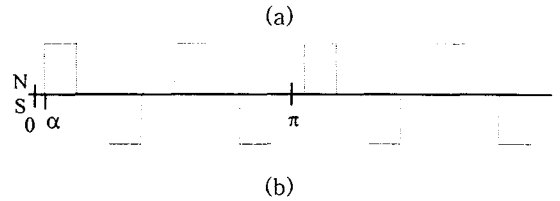
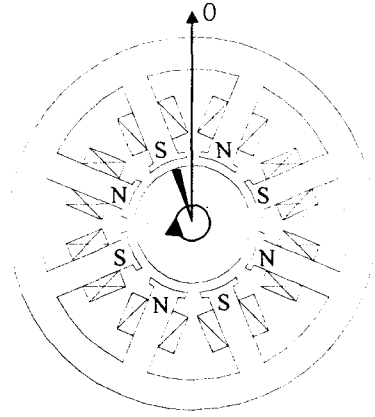


Fig.2 Magnetic bearing model (a) bearing plane with 8 poles and (b) magnetic flux density model

2.2 와전류 효과 규명

전자기 베어링은 회전축을 부상시키기 위하여 한 축에 대해 마주보는 한 쌍의 전자석을 사용한다. 부상된 축이 회전하는 경우 회전축은 시간에 대한 자속의 변화를 겪게 되어 회전축에 와전류가 발생하게 된다. 이 때 발생한 와전류는 전자기 베어링의 제어력을 감소시키는 원인이 된다. 그림 2-(a)는 일반적인 8개의 극을 갖는 전자기 베어링의 단면이며, 그림 2-(b)는 자속 밀도를 나타낸 것이다. 이 자속 밀도를 푸리에 급수(Fourier Series)를 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} B(t) &= B_0 \sin(n\Omega t) \\ B_0 &= -\frac{8B_m}{n\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \cos n\left(\frac{\pi}{4} - \alpha\right) - \cos n\alpha \right\} \quad (7) \\ & \quad n = 4k, k = 1, 3, 5 \dots \end{aligned}$$

여기서 B_m 은 바이어스 자속 밀도, α 는 극의 위치 각이다. 자속 밀도 변화로부터 회전축에 전압이 발생되며, 이로 인한 와전류 자속은 다음과 같다.

$$\phi_e = \frac{N_e i_e}{R_m} \quad (8)$$

여기서 i_e 는 와전류를 나타내며, R_m 은 자기 저항을 나타낸다. 식 (8)로부터 발생하는 감소 자속을 포함한 전자기 베어링 한 축에서 마주보는 전자석의 자속과 전자기력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_u &= \phi_b + \phi_c - \phi_e \\ \phi_l &= \phi_b - \phi_c + \phi_e \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{\mu_0 A} (\phi_u + \phi_l)(\phi_u - \phi_l) \\ &= \frac{4}{\mu_0 A} \phi_b \phi_c - \frac{4}{\mu_0 A} \phi_b \phi_e \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, ϕ_u 와 ϕ_l 는 각각 위, 아래 전자석의 자속, ϕ_b 는 바이어스 자속, ϕ_c 는 제어 자속, A 는 극의 단면적을 나타낸다. 그림 1-(b)의 적응 피드포워드 제어기를 이용하여 와전류를 포함한 보상신호는 다음과 같다.

$$r_c(k) = K_s r(k) + \frac{1}{K_i G_A G_C} \left\{ f_u(k) - \frac{4\phi_b}{\mu_0 A} \phi_e(k) \right\} \quad (11)$$

3. 모의 실험

설계된 적응 피드포워드 제어기를 이용하여 주기적 외란을 규명할 수 있음을 보이기 위하여 모의 실험을 수행하였다. 그림 3은 1X와 2X성분 런아웃이 있고, 1800rpm으로 회전하는 경우에, $y_r=0$ 의 기준 입력에 대한 시스템 응답과 필터 계수이다. 0.2sec부터 적응 제어기가 동작하여 런아웃이 보상되고 있음을 보여주고 있다. 이때의 런아웃 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r(k) &= 12 \sin(60k\pi T) + 5 \cos(60k\pi T) \\ &\quad + 4 \sin(120k\pi T) + 8 \cos(120k\pi T) \quad (\mu m) \end{aligned}$$

그림 3-(b)의 수렴된 필터 계수로부터 얻어지는 보상 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_c(k) &= \{12.0 \sin(60k\pi T) + 5.0 \cos(60k\pi T) \\ &\quad + 4.0 \sin(120k\pi T) + 8.0 \cos(120k\pi T)\} \times 10^{-6} \end{aligned}$$

최종 보상 신호는 런아웃 신호와 일치하는 값을 보인다.

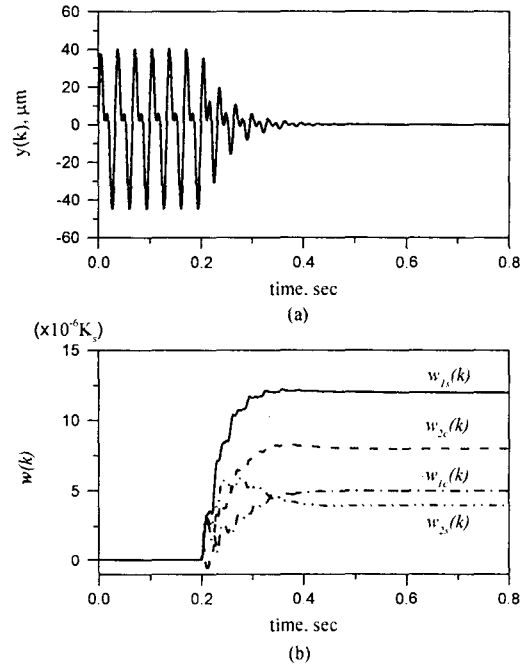


Fig.3 Runout compensation at 30Hz: (a) rotor displacement and (b) filter coefficients

주기적 외란으로 런아웃과 불균형력이 동시에 존재하는 경우, 그림 4와 5는 시스템의 응답과 필터 계수를 나타낸다. 런아웃과 불균형력을 규명하기 위하여 1200rpm과 1800 rpm의 두 가지의 회전 속도에서 모의 실험하였다. 이 경우의 런아웃은 그림 3의 경우와 같고 불균형력은 $me = 7 g \cdot cm$, $\theta = 30^\circ$ 이다. 그림 4와 그림 5의 수렴된 두 보상 신호로부터 규명된 런아웃과 불균형력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_c(k) &= \{11.99 \sin(60k\pi T) + 5.01 \cos(60k\pi T) \\ &\quad + 3.99 \sin(120k\pi T) + 7.98 \cos(120k\pi T)\} \times 10^{-6} \\ me &= 7 g \cdot cm \quad \theta = 34.1^\circ \end{aligned}$$

런아웃과 불균형력이 동시에 존재하는 일반적인 회전체 시스템에서 적응 피이드 포워드 알고리즘을 이용하면 정확하게 두 가지 주기적 외란을 규명할 수 있다.

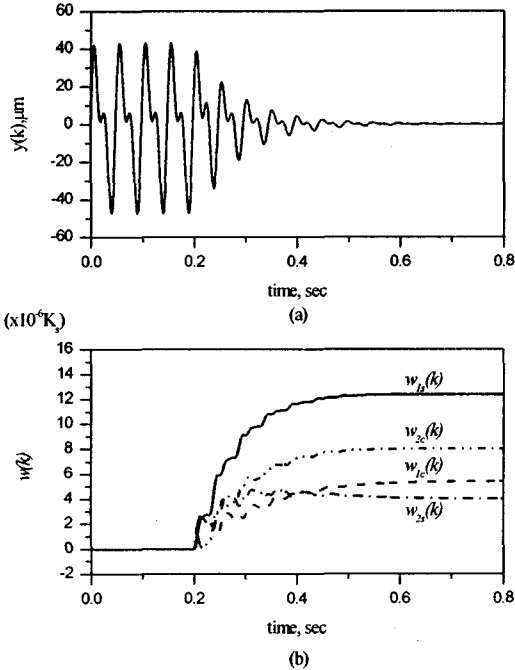


Fig.4 Periodic disturbance identification at 20Hz subject to both runout and unbalance force: (a) rotor displacement and (b) filter coefficients

전자기 베어링 시스템에서 제어시 지연 효과의 원인인 와전류 신호에 대한 보상을 하기 위하여 런아웃과 같은 차수의 주기 함수를 갖는 경우에 대해 모의 실험을 하였다. 전자기 베어링에서의 와전류에 의한 특성은 식 (7)에서와 같이 4X 성분부터 나타나지만, 런아웃과 구분됨을 검증하기 위하여 자속 밀도가 2X 성분을 갖는 경우로 가정하였다. 두 마주보는 전자석 가진기에서 발생하는 와전류 자속은 다음과 같다.

$$\phi_e = \phi_{e0} \Omega \cos(2k\Omega T)$$

$$\phi_{e0} = 1.365e-8$$

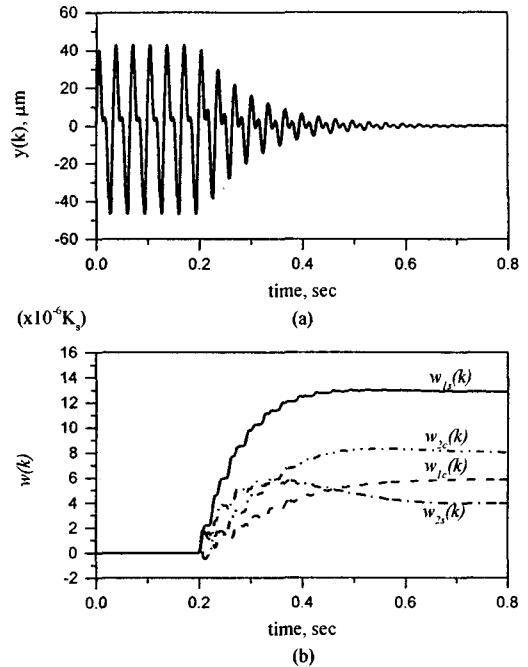


Fig.5 Periodic disturbance identification at 30Hz subject to both runout and unbalance force: (a) rotor displacement and (b) filter coefficients

이때 가해진 런아웃과 불균형력은 그림 4에서와 같은 경우이다. 그림 6과 같이 수렴된 필터 계수로부터 런아웃, 불균형력, 와전류 자속은 다음과 같이 규명된다.

$$r_c = \{11.92 \sin(60k\pi T) + 5.06 \cos(60k\pi T) + 4.21 \sin(120k\pi T) + 7.72 \cos(120k\pi T)\} \times 10^{-6}$$

$$m_e = 7.00g \cdot cm, \theta = 32.1^\circ$$

$$\phi_{e0} = 1.138e-8$$

최종 보상 신호로 규명된 세가지 주기적 외란은 실제 값과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 위의 결과로부터 전자기 베어링이 아닌 일반 전자석 가진기 시스템에서도 와전류에 대한 효과는 런아웃과 불균형력이 없는 경우와 같은 시스템이므로 제안된 알고리즘으로부터 규명, 보상이 가능하다.

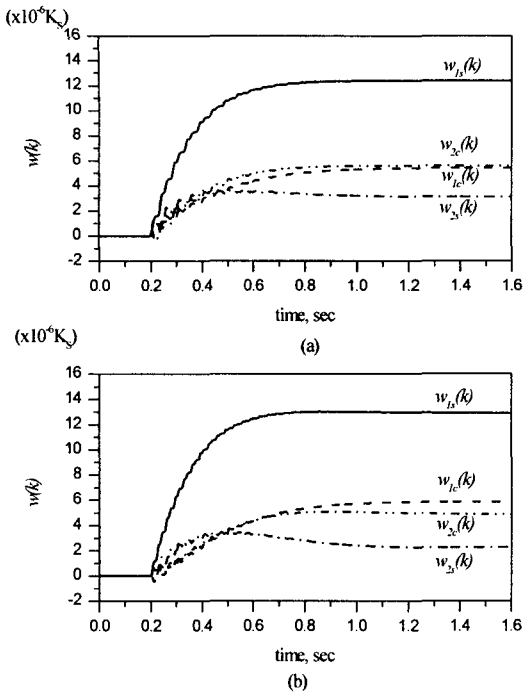


Fig.6 Periodic disturbance identification subject to runout, unbalance and eddy current flux effect: filter coefficients at (a) 20Hz and (b) 30Hz

4. 결론

전자기 베어링 시스템에서 정밀 회전 구동의 저해 요소인 주기적 외란을 규명하고 보상하기 위한 적응 피드 포워드를 제안하였다. LMS 알고리즘을 이용한 적응 피드 포워드 제어기는 런아웃과 불균형력 이외에 전자기 베어링에서 제어력을 감소시키는 와전류 효과에 의한 자속 또한 규명 가능하다. 실제 시스템에서 간단하고 편리하게 적용하기 위하여 부가적인 장치 없이 전자석 가진기의 자속을 측정하는 방법을 사용하였으며, 모의 실험을 통한 제안된 제어기의 성능은 원 시스템의 안정성에 영향을 미치지 않고 런아웃, 불균형력 및 와전류 효과 규명이 가능함을 보였다. 또한 이 알고리즘은 회전체의 경우가 아닌 전자석 가진기가 사용된 경우에도 와전류 효과에 의한 감소

자속 규명이 가능하다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 중점 국가 연구개발사업(기계설비요소기술개발)과 국방 과학 연구소의 지원으로 수행하였습니다.

참고 문헌

1. Kim, C. S. and Lee, C. W., "In-Situ Runout Identification in Active Magnetic Bearing System by Extended Influence Coefficient Method," IEEE/ASME Trans. On Mechatronics, Vol.2, No.1, pp.51-57, 1992.
2. Mitsui, K., "Development of New Measuring Method for Spindle Rotating Accuracy by Three Points Method," Proc. 23rd Int. MTDR Conf., pp.115-121, 1992.
3. 하영호, 이종원, "주파수 성형 가격 함수를 가진 최적 제어에 의한 능동 자기 베어링 시스템의 불균형 응답 제어," 대한기계학회 논문집 A권, 제22권, 제8호, pp.1431-1441, 1998.
4. Zmood, R. B., et al., "The Influence of Eddy Currents on Magnetic Actuator Performance," Proceedings of the IEEE, Vol.75, No.2, pp.239-240, 1987.
5. Hara, S., et al., "Improvement of Dynamic Response by Flux Feedback," Fifth International Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, pp. 49-54, 1996.
6. 김승중, 김하용, 이종원, "LMS 알고리즘을 이용한 전자기 베어링계에서의 자동 밸런싱 및 런아웃 규명," 대한기계학회, '99 동역학 및 제어분회 학회 학술대회 논문집, pp.111-116, 1999.
7. 나희승, 박영진, "주기적 외란을 제거하기 위한 효율적인 적응 제어기," 한국소음진동공학회, '94 추계 학술대회 논문집, pp.22-27, 1994.