

자기베어링용 유도형 위치 센서의 성능에 미치는 와전류와 히스테리시스의 영향

노명규* · 정민경**

The Effects of Eddy Currents and Hysteresis on the Performance of Inductive Position Sensor for Magnetic Bearings

Myounggyu Noh, Min-Kyoung Jeong

Key Words: Inductive Position Sensor(유도형 위치센서), Magnetic Bearing(자기베어링), Hysteresis(히스테리시스), Eddy Currents(와전류)

Abstract

The performance of an inductive position sensor is described by the accuracy and the dynamic characteristics of the sensor. Both of these performance indices are affected by magnetic hysteresis and eddy currents. In this paper, a model of an inductive sensor is presented. This model includes the effects of hysteresis and eddy currents. Computer simulation shows that the sensitivity of the sensor is greatly affected by hysteresis and eddy currents. Repeatability error increases with hysteresis and eddy currents effects. Results also show that eddy currents influence more on the sensor performance than hysteresis does. To reduce the effects of hysteresis and eddy currents, the sensor should be made out of thin laminations with high resistivity.

	기호설명		ϕ	자속
V	전압		B	자속 밀도
i	전류		H	자화 강도
R	코일 저항		δ	와전류 표피두께 (skin depth)
N	각 pole의 코일 권선수			
A_g	각 pole의 면적			
μ_0	공기의 투자율 $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$			
μ_r	자성체의 상대 투자율			
g	공기 간극			
x	부상체의 변위			

1. 서론

자기베어링은 초전도체를 사용하지 않는 이상 불안정성을 극복하기 위하여 귀환제어를 필요로 하며 이 귀환제어를 위해 부상체의 위치신호가 주로 사용된다. 위치를 측정하는 센서로는 와전류형, 정전형, 유도형 센서등이 쓰이며, 광센서 등이 적용되기도 한다.

자기베어링에 사용되는 위치센서는 정밀도, 주파수대역, 가격, stray field의 영향 등을 고려하여 선정한다. 일반적으로 고정밀도가 요구되

* 충남대 메카트로닉스공학과
E-mail: mnoh@cnu.ac.kr

** 충남대 메카트로닉스공학과 대학원
E-mail: mink_j79@pony.cnu.ac.kr

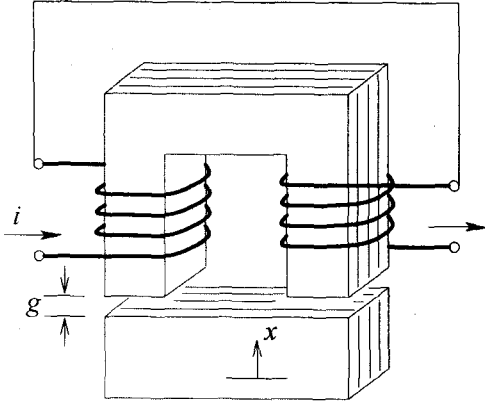


Fig. 1 Schematic of an inductive sensor

는 경우, 광센서나 정전형 센서가 많이 사용되고, 넓은 주파수 대역이 필요한 경우, 와전류형이 사용된다. 유도형 위치센서는 인덕턴스가 공기 간극에 의해 결정되는 성질을 이용하여 위치를 측정하는 센서로서, 일반적으로 성능 면에서 와전류형보다는 떨어지지만, 제작이 용이하고 비용이 매우 저렴하다는 특성으로 인하여 자기 배어링 시스템에 많이 사용되고 있다.

유도형이나 와전류형 위치센서는 위치 감지방 법으로 진폭변조를 많이 사용하는데 이는 고주파 신호의 진폭이 센서에 의해 변하는 것을 신호처리하여 출력을 얻어내는 방식이다. 기존의 유도형센서의 경우, 변조신호로 정현파를 주로 사용하였다. 그러나 센서의 감도를 높이고자 할 때에는 변조신호에 큰 전력이 요구되고, 이러한 경우 정현파보다는 스위칭 증폭기를 이용하여 센서를 구동함으로써 전압과 전류를 제어할 수 있다.

유도형 위치센서의 성능은 센서 재료의 자화특성, 특히 히스테레시스(hysteresis)와 와전류(eddy current)에 의해 제한을 받는다. 히스테레시스는 센서의 정밀도와 반복성에 영향을 미치고, 와전류는 센서의 동적 특성과 관련이 있다.

본 논문에서는 유도형 위치센서의 설계와 평가를 위해 히스테레시스와 와전류를 포함한 자성재료의 자화 특성을 모델링하고, 자화 특성이 센서 성능에 미치는 영향에 대하여 분석하고자 한다.

2. 유도형 위치 센서의 모델

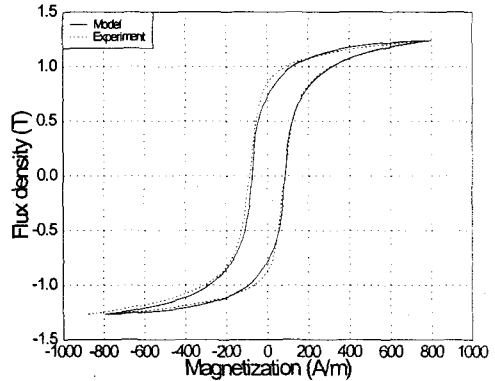


Fig. 2 Magnetization curve of silicon iron

2.1 유도형 위치센서의 작동 원리

Fig. 1에서 보여 주는 바와 같이 자성체에 코일을 감았을 때, 코일에 인가되는 전압과 전류의 관계는 Faraday의 법칙으로부터

$$V = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (1)$$

와 같이 쓸 수 있으며, 식(1)에서 인덕턴스 L 은

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A_g}{2(g_0 - x)} \quad (2)$$

로 주어진다. 즉, 인덕턴스는 공기 간극에 반비례한다. 만일 전압이 매우 빠른 주파수로 $+V_s$ 와 $-V_s$ 를 반복한다면 저항에 따른 전압 강하는 무시할 수 있으며, 식(1)로부터

$$\frac{1}{L} = -\frac{\Delta i}{V_s \Delta t} \quad (3)$$

와 같은 관계식을 얻을 수 있다. 식(3)에서, 전압의 스위칭 주파수가 일정하다면, Δt 는 정해져 있고, 전류의 진폭 Δi 를 측정하여 인덕턴스의 역수를 구할 수 있다. 즉, 전압과 전류의 측정값으로부터 공기 간극을 추정하는 것이 유도형 위치센서의 원리이다.

2.2 자성체의 히스테레시스와 와전류 모델링

자성재료의 자화 특성이 센서의 성능에 미치는 영향을 알아내기 위해서는 자화 특성을 기술하는 모델이 필요하다. 자기포화(saturation)나 자기이력(hysteresis)에 대한 모델은 지금까지 많은 연구자에 의해 연구되었으며, 그 중 대표적인 것으로 Hodgdon(1)과 Jiles(2)의 모델이 있다. 이러한 모델들은 magnetic domain 이론에 근거하거나, Preisach이론에 근거하여 발전되었으며, 미분 방정식이나 적분 방정식의 형태로 주어진다. 본 연구에서는 이러한 복잡한 형태의 모델보다는 간단한 대수 방정식에 의해 주어지는 모델(3)을 사용하였다. 이 모델은 자화 곡선이 다음과 같은 두 개의 외곽선에 제한을 받는다고 가정한다.

$$H_1(B) = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} + \frac{\sigma}{\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_r}\right) \cdot \log(1 + \eta \cdot e^{(B-B_0)/\sigma}) + H_r \quad (4)$$

$$H_2(B) = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} - \frac{\sigma}{\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_r}\right) \cdot \log(1 + \eta \cdot e^{(B-B_0)/\sigma}) - H_r \quad (5)$$

식(4), (5)와 같이 외곽선이 주어지면, 자화곡선은

$$H(B) = \begin{cases} H_1(B) - [H_1(B_0) - H(B_0)] \cdot e^{-\beta(B-B_0)} & \text{if } B \geq 0 \\ H_2(B) - [H_2(B_0) - H(B_0)] \cdot e^{-\beta(B-B_0)} & \text{if } B < 0 \end{cases} \quad (6)$$

으로 주어진다. 식(6)에서 B_0 는 자속밀도가 방향을 바꾸는 점에서의 값을 나타낸다. Fig. 2는 식(6)을 이용하여 만들어진 규소강의 자화곡선을 실험치와 비교하여 보여준다.

와전류(eddy current)는 자화곡선을 주파수에 의존하는 함수로 발전시키거나(4), 주파수에 의존하는 자기투자율(permeability)(5)을 도입함으로써 기술할 수 있다. 본 논문에서는 와전류가 가상의 코일에 의해 발생한다고 가정하여 와전류 모델을 도출하였다.

와전류는 Fig. 3(a)에서와 같은 도체에 지나가는 자속이 시간에 따라 변할 경우, 도체에 유도되는 전류를 말하는데, 이로 인해 자속의 흐름이 방해받게 되고 와전류 손실로 인한 열이 발생하게 된다. 그러므로 자기베어링이나 유도형 센서에서는 와전류의 영향을 최소화하기 위하여 얇은 판을 적층하여 자심(core)을 만든다.

와전류를 모델링하기 위하여 Fig. 3(b)와 같이 와전류가 표면으로부터 δ 만큼의 두께를 가진 경로에 흐르며, 와전류를 생성시키는 자속은

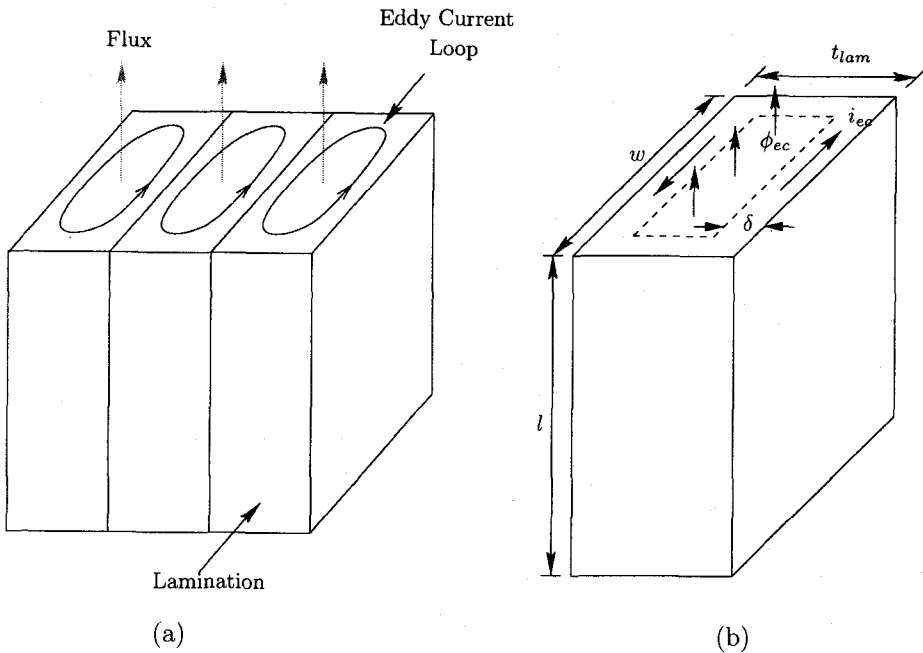


Fig. 3 Eddy currents are generated when the flux is changing over time

$$\phi_{ec} = \left(\frac{t_{lam} - \delta}{t_{stack}} \right) \phi \quad (7)$$

와 같이 결정될 수 있다고 가정하면 와전류가 흐르는 경로의 저항은

$$R_{ec} = \frac{2\rho w}{l\delta} \quad (8)$$

로 정해진다.

2.3 히스테레시스와 와전류를 포함한 센서 모델

앞에서 얻어진 히스테레시스 모델과 와전류 모

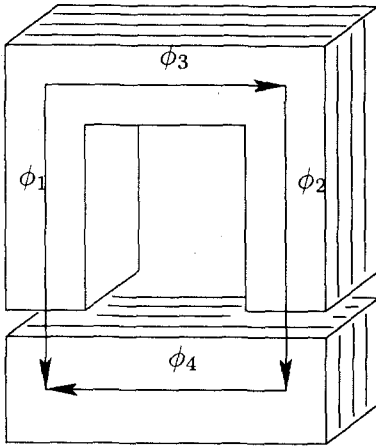


Fig. 4 Flux paths

델을 적용하기 위하여 자속이 지나가는 경로를 Fig. 4와 같이 네 구간으로 나누면, Faraday의 유도 법칙을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} N & -N & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V - \begin{bmatrix} 2R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{ec} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{ec} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{ec} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ I_{ec1} \\ I_{ec2} \\ I_{ec3} \\ I_{ec4} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(9)에서, α 는 코일전류에 의해 생성된 자속과 eddy current loop에 걸리는 자속의 비를 나타낸 것으로

$$\alpha = \frac{t_{lam} - \delta}{t_{stack}}$$

로 정의된다.

자속 보존법칙을 적용하면, 각 구간의 자속은 식(10)과 같은 관계를 가진다.

$$[\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \phi_4] = [1 \ -1 \ -1 \ -1] \phi \quad (10)$$

자심(core)부분의 reluctance가 모두 같다고 가정하면, 식(9)와 식(10)으로부터 식(11)과 같이 와전류를 포함한 Faraday법칙을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 2M \\ \alpha \end{bmatrix} \frac{d\phi}{dt} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} V - \begin{bmatrix} 2R \\ R_{ec} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ I_{ec} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Eddy current loop을 포함한 Ampere법칙은

$$2NI + 4I_{ec} = [l_1 \ -l_2 \ -l_3 \ -l_4] \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \end{bmatrix} + [g_1 \ -g_2] \begin{bmatrix} H_{g1} \\ H_{g2} \end{bmatrix}$$

혹은, 행렬 형태로

$$2NI + 4I_{ec} = LH + GH_g \quad (12)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식(12)에서 core의 자화 강도 H 는 자속의 함수로서 히스테레시스 모델로부터 결정되어 진다. 식(11)과 식(12)를 조합하면

$$\frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{NR_{ec}}{2N^2R_{ec} + 4\alpha R} \right) V - \left(\frac{R_{ec}}{2NR_{ec} + 4\alpha R} \right) (LH + GH_g) \quad (13)$$

$$I = \left(\frac{\alpha}{N^2R_{ec} - 2\alpha R} \right) V - \frac{NR_{ec}}{(2N^2R_{ec} - 4\alpha R)} (LH + GH_g) \quad (14)$$

와 같이 전압, 전류, 자속의 관계를 구할 수 있다. 식(13)과 (14)에서 R_{ec} 가 무한대가 되면, 즉, 와전류의 영향이 없으면 식(1)과 같은 선형 모델이 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Simulation 결과

식(13)과 (14)를 이용하여 Computer Simulation을 수행하였다. Simulation에 사용된 센서의 제원은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Sensor specifications

Core material	Silicon Iron (SiFe)
Pole width	3.175mm
Stack thickness	6.5mm
Nominal air gap	0.5mm
Coil turns per pole	120
Switching frequency	20kHz
Supply voltage	48V

Fig. 5는 코일 전류를 simulation한 결과를 나타낸다. 히스테레시스와 와전류가 없는 선형 모델의 경우, 코일 전류는 삼각파에 근접한 모양을 보이지만, 규소강판의 두께가 0.35mm인 경우, 전압의 극성이 바뀌는 곳에서 전류 파형에 불연속

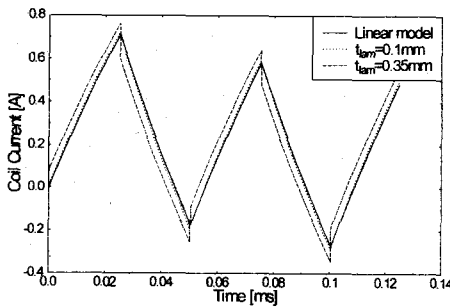


Fig. 5 Simulated coil currents

성이 나타난다. 이 불연속성은 규소강판의 두께가 0.1mm인 경우, 거의 나타나지 않는데 이는 전류파형의 왜곡에 hysteresis보다는 eddy current가 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

유도형 센서의 출력 감도(sensitivity)는 센서 구동회로의 스위칭 주파수와 밀접한 관계가 있다. 스위칭 주파수가 높을수록 감도는 줄어든다. Fig. 6은 스위칭 주파수에 따른 센서 감도의 변화를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 선형모델인 경우, 센서 감도는 주파수에 따라 log scale에서 선형적으로 감소한다. 그러나 히스테레시스와 와전류가 고려된 경우, 규소강판의 두께가 0.35mm 일 때 센서 감도는 100kHz 이상의 스위칭 주파수에서 매우 작아진다. 강판의 두께

가 0.1mm인 경우, 코일 전류 결과와 마찬가지로 와전류가 거의 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다.

히스테레시스와 와전류는 센서의 반복성에도 영향을 미친다. 반복성(repeatibility)을 알아보기 위하여 sensor target을 임의의 위치로 움직인 다음 원점으로 되돌리는 방법으로 simulation을 수행하였다. 선형모델의 반복오차는 $1.49\mu\text{m}$ 이고, 히스테레시스와 와전류가 고려되었을 경우, 강판의 두께가 0.1mm일 때 $1.53\mu\text{m}$, 0.35mm일 때 $1.73\mu\text{m}$ 로 반복오차가 증가함을 보였다.

3.2 고찰

센서의 성능은 정밀도와 동적 특성으로 기술된다. 진폭변조(amplitude modulation)를 이용한

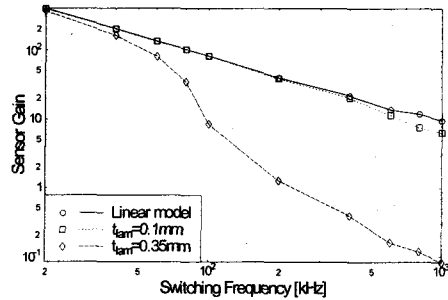


Fig. 6 Variation of sensor gain with respect to switching frequency

유도형 센서의 경우 동적 특성은 변조 주파수에 의해 궁극적으로 제한을 받는다. 일반적으로 유도형 센서의 변조 주파수는 와전류형 센서의 변조 주파수보다 낮다. 이는 변조 주파수가 높을 경우 센서 코어와 대상체에서 와전류가 발생하고 이 와전류에 의해 센서의 성능이 영향이 받기 때문이다.

본 논문에서는 히스테레시스와 와전류를 모델링하고, 자기 회로 이론을 이용하여 히스테레시스와 와전류를 포함하는 유도형 위치 센서의 모델을 개발하였다. 이 모델을 통하여 히스테레시스와 와전류의 영향을 정량적으로 살펴보았다.

와전류와 히스테레시스는 동시에 전류파형에 왜곡을 일으키며, 높은 변조 주파수(스위칭 주파

수)에서 센서 감도를 매우 저하시키는 결과를 보여 주었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 스위칭 주파수가 100kHz인 경우 규소 강판의 두께가 0.35mm일 때, 센서의 감도는 스위칭 주파수가 20kHz일 때와 비교하여 40배 이상 줄어들었다. 이는 선형 모델과 비교할 때 10배 차이가 난다. 센서 감도가 이와 같이 현저히 줄어든 경우, 실제 센서에서는 잡음으로 인해 의미 있는 출력을 얻을 가능성은 희박하다.

센서의 정밀도에 직접적으로 관련이 있는 반복성에도 히스테레시스와 와전류는 영향을 미친다. 앞의 결과에서 볼 수 있듯이 반복 오차는 히스테레시스와 와전류가 고려되었을 때 16%정도 증가한다. 이 결과는 센서 구동 주파수가 20kHz일 때 얻어진 것으로, 주파수가 높아질 경우, 반복 오차는 히스테레시스와 와전류에 더욱 영향을 많이 받을 것이다.

앞 절의 결과에서 볼 수 있듯이 규소강판의 두께가 0.1mm인 경우, 히스테레시스와 와전류의 영향은 거의 없다. 이로써 두 가지 결론을 이끌어 낼 수 있는데, 그 하나는 0.1mm 강판으로 센서를 제작하는 경우 선형 모델로 센서를 기술하는데 큰 오차가 없다는 것이고, 다른 하나는 히스테레시스보다는 와전류가 센서의 성능에 더 큰 영향을 미친다는 것이다. 규소 강판의 두께가 줄어들수록 히스테레시스 영향은 그대로 있지만, 와전류영향은 줄어들기 때문이다. 이와 같이 규소 강판의 두께가 얇을수록 센서의 성능은 개선되지만 경제적인 측면 또한 고려하여야 한다. 규소 강판의 최소 표준두께가 0.35mm이므로 그 이하 두께의 강판을 사용한다면 센서의 가격이 상승하게 될 것이다.

유도형 센서의 성능은 히스테레시스와 와전류 뿐만 아니라 leakage나 fringing에 의해서도 영향을 받는다. 본 논문에서는 leakage와 fringing을 무시하였는데 이를 고려하기 위해서는 leakage와 fringing에 의한 인덕턴스 증가를 자기회로에 고려하거나(5), 유한요소법을 이용함으로써 그 영향을 살펴 볼 수 있다.

4. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 와전류와 히스테레시스를 고려한 유도형 센서의 모델을 통하여 센서의 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 센서의 동적 특성을 개선하려면 센서 구동 주파수를 높여야 하는데, 이때 센서의 감도는 와전류에 영향을 받게 되고, 센서의 반복성 또한 와전류와 히스테레시스에 의해 영향을 받는다. 이러한 영향을 최소화하기 위해서는 규소강판의 두께를 줄이거나, 저항계수가 큰 재료를 센서에 사용하여야 한다.

본 논문의 simulation 결과는 실험을 통한 검증이 뒤따라야만 한다. 현재 여러 두께의 규소 강판을 이용한 센서와 실험 장치를 구성하고 있으며 이 실험 장치를 통하여 본 논문에서 제시된 유도형 센서의 모델의 신뢰도 확인이 필요하다. 또한 자기 회로 모델의 정확도와 leakage, fringing의 영향 등을 고려하기 위해서는 유한요소법을 이용한 센서 성능 해석도 요구된다.

참고문헌

- (1) Hodgdon, M. L., November 1988, "Mathematical theory and calculations of magnetic hysteresis curves", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 24, No. 6, pp. 3120-3122.
- (2) Jiles, D.C. and D.L. Atherton, 1986, "Theory of ferromagnetic hysteresis", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 61, pp. 48-60.
- (3) Noh, M., 1996, "Self-sensing magnetic bearings driven by a switching power amplifier", Ph.D. thesis, The University of Virginia.
- (4) Jiles, D.C., November 1994, "Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials", Journal of Applied Physics, Vol. 76, No. 10, pp. 5849-5855.
- (5) Meeker, D.C., E.H. Maslen and M. Noh, July 1996, "An augmented circuit model for magnetic bearings including eddy currents, fringing, and leakage", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 4, pp. 3219-3227.