

# DFNN을 이용한 헤테로다인 레이저 간섭계의 적응형 오차 보정

論 文

57-6-21

## Adaptive Error Compensation of Heterodyne Laser Interferometer using DFNN

許健行\* · 李우람\* · 劉寬鎬†  
(Gun-Haeng Heo · Woo-Ram Lee · Kwan-Ho You)

**Abstract** - As an ultra-precision measurement system the heterodyne laser interferometer plays an important role in semiconductor industry. However the errors of environment and nonlinearity which are caused by air refraction and frequency-mixing separately reduce the accuracy of displacement measurement. In this paper we propose a DFNN(data fusion and neural network) method for error compensation. As a hybrid method of data fusion and neural network, DFNN method reduces the environmental and nonlinear error simultaneously. The effectiveness of the proposed error compensation method is proved through experimental results.

**Key Words** : Laser interferometer, Neural network, Data fusion, Nonlinearity

### 1. 서 론

헤테로다인 레이저 간섭계는 반도체 산업에서 나노 리소그래피 구현을 위한 패터닝 장비로써, 수 나노미터에서 수 미터까지의 넓은 범위에서 측정이 가능하다[1], [2]. 그러나 헤테로다인 레이저 간섭계에는 거리측정 상에 몇 가지 오차 요인이 존재하여 실제 실험 환경에서는 이론상의 정확한 측정값을 얻기에 한계가 존재한다. 오차 요인으로는 크게 환경적 오차와 비선형 오차로 나눌 수 있다. 환경적 오차는 온도, 습도, 기압, 그리고 공기 굴절률 등의 변화로 발생한다. 이 중에서 다른 환경적 오차 요인보다 레이저 간섭계의 오차에 크게 영향을 미치는 요소는 공기 굴절률이다. 공기 중에서 레이저 빔의 파장의 길이는 공기 굴절률에 따라 달라지는 특징을 갖기 때문이다. 공기 굴절률에 따른 측정값 보정 방식으로 에들린(Edlen) 공식에 의한 방법[3]이 있으나, 이 방법은 굴절률에 대한 보정일뿐더러 레이저 간섭계의 설치환경에 따라 보정식이 달라지므로 실제적인 적용에는 한계가 있다. 비선형 오차의 주요 요인으로는 주파수 혼합에 의한 신호간섭을 들 수 있다. 이러한 비선형 오차는 타원 편광, 두 주파수 성분의 비 직교성, 편광 분리의 불완전한 배열에 의하여 발생하게 된다. 따라서, 이러한 비선형 오차 요인은 환경적 오차 요인과 함께 헤테로다인 레이저 간섭계의 측정 정밀도를 저해하는 주요 요인이 된다.

이러한 오차 요인을 제거함으로써 측정값을 보정하고 정밀도를 향상시키기 위하여 지금까지 다양한 방법으로 많은

해결책이 제시되었다[4]-[7]. Bobroff[4]는 헤테로다인 레이저 간섭계에 존재하는 비선형적 요소들을 실험적으로 증명하였는데, 광학적 구간의 길이 변동이 측정상의 비선형성에 영향을 끼친다는 사실을 밝혀냈다. 또한, Park[5]은 비선형 오차가 백색잡음이라는 가정하에 칼만필터를 적용하여 측정 정밀도를 향상시키는 방법을 제시하였다. 그러나 칼만필터를 적용하는 방법은 실시간적인 구현이 어렵고 계산이 복잡하여 헤테로다인 레이저 간섭계에는 제한적이다. Wu[6]는 헤테로다인 레이저 간섭계의 주기적 비선형성을 주파수 혼합과 편광혼합을 통한 해석적인 방법으로 접근하였으며, Eom[7]은 비선형 오차 보정을 위해 최소 자승법에 기반한 위상 직교 혼합방법을 제안하였다.

본 논문에서는 헤테로다인 레이저 간섭계에 존재하는 환경적 오차와 비선형 오차를 제거하기 위한 방법으로, 데이터 융합(data fusion)방법과 신경 회로망(neural network)을 혼합한 DFNN이라는 방법을 제안한다. 데이터 융합 방법은 환경적 오차 요인을, 그리고 신경 회로망은 비선형 오차 요인을 제거하는 역할을 한다. 데이터 융합 방법을 적용하기 위하여 우리는 같은 제원을 갖는 두 대의 레이저 헤드를 이용하여, 같은 상황에서 서로 독립된 두 개의 측정값을 얻을 것이다. 그리고, 레이저 간섭계의 측정값으로부터 위상신호를 얻기 위하여 락인 증폭기(lock-in amplifier, LIA)를 이용한다. LIA에서는 광 검출기로부터 측정된 기본신호와 측정신호가 위상 변화된 후, 혼합되는 과정을 거쳐 최종 위상 신호를 얻게 된다. 보정된 결과값의 오차 정도를 비교하기 위한 기준신호로써 정전용량 센서로부터의 측정값을 이용하며, 이 측정값은 신경 회로망의 학습단계에서 목표값이 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 헤테로다인 레이저 간섭계에서 발생하는 비선형성과 환경적 오차 요인에 대해 설명하고, 신경 회로망과 데이터 융합 방법을 이용한 오차 보정 방법을 제안한다. 3장에서는 제안된 오차 보정 방법을 이용한 실험 결과를 통해 정전용량 센서로부터 측정된

\* 學生會員 : 成均館大學校 電氣電子工學部 碩士

† 교신저자, 正會員 : 成均館大學校 情報通信工學部  
副教授 · 工博

E-mail : khyou@ece.skku.ac.kr

接受日字 : 2008年 4月 14日

最終完了 : 2008年 5月 2日

기준신호와 비교하여 개선된 오차 보정 효과를 입증한다. 4 장에서는 논문의 결론에 대해 마지막으로 정리하였다.

## 2. 적응형 오차 보정

### 2.1 헤테로다인 레이저 간섭계의 비선형성

헤테로다인 레이저 간섭계를 이용한 거리측정시 존재하는 비선형 오차의 주요원인으로, 타원 편광, 두 주파수 성분의 비직교성, 편광 분리기의 불완전한 배열 등에 의해서 발생하는 주파수 혼합(frequency-mixing)이 있다. 그림 1은 주파수 혼합으로 인한 비선형 성분이 포함되어 있는 헤테로다인 레이저 간섭계의 모식도이다.

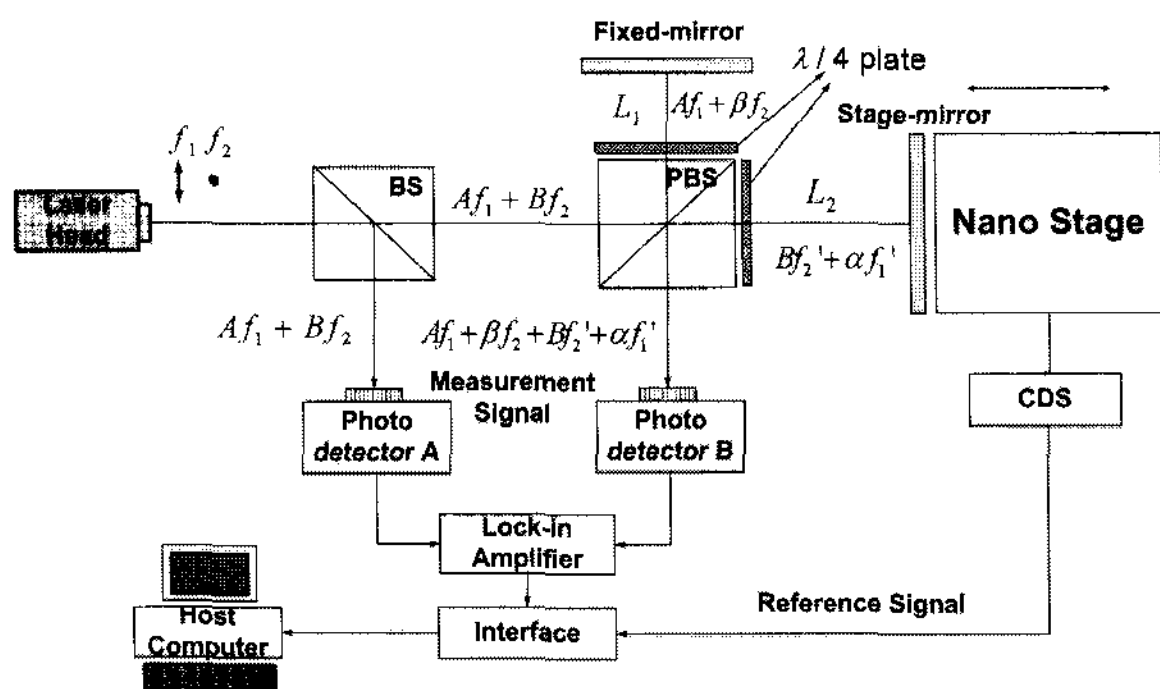


그림 1 비선형성을 포함한 헤테로다인 레이저 간섭계  
Fig. 1 Heterodyne laser interferometer with nonlinearity

그림 1에서 빔  $Af_1$ 은 기본구간  $L_1$ 을 통과하여 비선형 성분인  $\beta f_2$  신호와 합쳐진다. 이와 마찬가지로 빔  $Bf_2'$ 는 측정구간인  $L_2$ 를 통과하여 또 다른 비선형 성분인  $\alpha f_1'$  신호와 섞이게 된다. 주파수 혼합과 같은 외부 간섭이 없는 이상적인 경우, 편광분리기(PBS)를 통과한 두 빔은 고정거울(fixed-mirror)과 이동거울(stage-mirror)에 반사되고, 서로 간섭이 일어나지 않는다. 여기서  $f_1'$ 와  $f_2'$ 는 도플러 효과에 의하여  $f_1$ 과  $f_2$ 가 주파수 변환된 것이다. 또한  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 비선형 성분 신호의 세기를 의미한다. 그림 1의 He-Ne 레이저 헤드로부터 얻어지는 두 광원의 전기장에 관한 식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} E_{A1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} A e^{i(2\pi f_1 t + \Phi_A)} \\ E_{A2} &= \frac{1}{\sqrt{2}} B e^{i(2\pi f_2 t + \Phi_B)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $A$ 와  $B$ 는 신호의 진폭을 의미하며,  $\Phi_A$ 와  $\Phi_B$ 는 초기 위상값을 의미한다. 식 (1)을 이용하여 광 검출기(photo detector) A를 통해 얻어지는 기준 신호의 세기는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_r &\propto (E_{A1} + E_{A2})(E_{A1} + E_{A2})^* \\ &= \frac{1}{2}(A^2 + B^2) + AB \cos [2\pi \Delta f t + (\Phi_B - \Phi_A)] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\Delta f$ 는  $f_2$ 와  $f_1$ 의 주파수 차이를 의미한다. 주파수 혼합에 의하여 광 검출기 B에서는 식 (3)과 같이 비선형 요소를 포함한 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} E_{B1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} A e^{i(2\pi f_1 t + \Phi_A)} + \frac{1}{\sqrt{2}} \beta e^{i(2\pi f_2 t + \Phi_B)} \\ E_{B2} &= \frac{1}{\sqrt{2}} B e^{i(2\pi f_2' t + \Phi_B)} + \frac{1}{\sqrt{2}} \alpha e^{i(2\pi f_1' t + \Phi_A)} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여, 식 (2)와 같은 형태의 광 검출기 B에 관한 신호로 표현할 수 있다. 광 검출기 B로부터 측정된 신호는 초기 위상값을 무시하고 저대역 통과 필터(low pass filter)를 거친 후에, 식 (4)와 같이 근사화시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} I_m &\propto (E_{B1} + E_{B2})(E_{B1} + E_{B2})^* \\ &\approx AB \cos (2\pi \Delta f t + \Phi) + (A\beta + B\alpha) \cos (2\pi \Delta f t) \\ &\quad + \alpha\beta \cos (2\pi \Delta f t - \Phi) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $\Phi$ 는 도플러 효과에 의한 주파수 차이를 의미한다.

$$\Phi = 2\pi(f_2' - f_2)t = 2\pi(f_1' - f_1)t \quad (5)$$

식 (4)에서 두 번째와 세 번째 항은 거리측정에서 비선형 오차의 요인이 되는 불필요한 부분이다. 식 (2)와 식 (4)의 두 신호는 LIA의 입력값이 되어, LIA를 통하여 위상정보를 가진 원하는 형태의 신호로 표현이 가능하다. LIA에서  $I_r$ 은  $0^\circ$ 와  $90^\circ$ 로 위상지연이 이루어지며, 각각의 신호는  $I_m$ 과 곱해져서 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I_m I_r &= \cos (2\pi \Delta f t) [AB \cos (2\pi \Delta f t + \Phi) \\ &\quad + (A\beta + B\alpha) \cos (2\pi \Delta f t) + \alpha\beta \cos (2\pi \Delta f t - \Phi)] \\ I_m I_r e^{i\pi/2} &= \sin (2\pi \Delta f t) [AB \cos (2\pi \Delta f t + \Phi) \\ &\quad + (A\beta + B\alpha) \cos (2\pi \Delta f t) + \alpha\beta \cos (2\pi \Delta f t - \Phi)] \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)은 저대역 통과 필터를 이용하여 고대역 성분은 제거되고, 최종적으로 위상정보를 포함한 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{I}_x &= \frac{AB + \alpha\beta}{2} \cos \Phi + \frac{A\beta + \alpha B}{2} \\ \hat{I}_y &= \frac{AB - \alpha\beta}{2} \sin \Phi \end{aligned} \quad (7)$$

## 2.2 신경 회로망을 이용한 비선형 오차보정

이 장에서는 신경 회로망을 이용한 레이저 간섭계의 비선형 오차보정 방법을 소개한다. 신경 회로망은 다차원량의 데이터가 존재하여 선형화가 불가능한 이미지나 통계 등의 문제에 대하여 비교적 적은 계산량으로도 양호한 응답을 얻을 수 있는 장점을 갖는다. 그 때문에 패턴 인식이나 데이터 마이닝, 회귀분석, 통계적 모델링, 필터링 등에 널리 응용되고 있다.

본 논문에서는 수 나노미터급의 정밀한 측정오차를 보정하기 위한 기준 측정신호로써 정전용량센서를 이용한다. 정전용량센서는 미소범위 내에서 수 나노미터의 정밀도를 갖는 측정장치로서, 다음의 관계식에 의하여 정전용량 센서로부터 얻는 거리측정값( $L$ )을 위상신호( $\Phi$ )로 변환할 수 있다.

$$\Phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (8)$$

여기서  $\lambda$ 는 레이저 헤드로부터 나오는 두 레이저빔의 평균 파장이며,  $L$ 은 측정 거리값이다. 그리고  $n$ 은 공기 굴절률을 의미한다. 비선형 오차가 없는 이상적인 경우에는 위 식의 위상신호는 식 (7)을 이용하여 다음 식과 같이 신호 세기에 관한 식으로 표현할 수 있다.

$$I_x = \frac{AB}{2} \cos \Phi \quad (9)$$

$$I_y = \frac{AB}{2} \sin \Phi$$

위의 식과 유사한 방법으로 레이저 간섭계로부터 얻은 측정신호 역시 LIA를 통과한 후 다음 식과 같이 요약될 수 있다.

$$\hat{I}_x = \frac{AB}{2} \cos \hat{\Phi} \quad (10)$$

$$\hat{I}_y = \frac{AB}{2} \sin \hat{\Phi}$$

여기서  $\hat{\Phi}$ 는 레이저 간섭계로부터 측정된 값으로써 비선형성을 포함하고 있다. 식 (10)은 다시 비선형 정도를 파악하기 위하여 식 (11)과 같이 정전용량센서로부터 얻은 위상신호  $\Phi$ 를 이용하여 표현할 수 있다.

$$\hat{I}_x = a \cos \Phi + h \quad (11)$$

$$\hat{I}_y = b \sin \Phi$$

여기서  $a$ ,  $h$ , 그리고  $b$ 는 각각  $(AB + \alpha\beta)/2$ ,  $(A\beta + \alpha B)/2$  그리고  $(AB - \alpha\beta)/2$ 를 의미한다. 비선형 오차가 없는 이상적인 경우에는  $\hat{I}_x$ 와  $\hat{I}_y$ 를 좌표 평면상에

표현했을 때, 원점을 중심으로 하는 원이 되어야 한다. 하지만 실제로는 비선형 오차에 의하여 중심점이 원점에서 떨어진 타원의 형태를 갖는다.

이러한 비선형 오차 요인을 제거하기 위하여 우리는 신경 회로망을 이용한 보정 방법을 제안한다. 신경 회로망의 학습을 위하여 입력값과 목표값을 정해야 하는데, 본 논문에서 입력값은  $I = [\hat{I}_x, \hat{I}_y]$ , 그리고 목표값은  $O = [I_x, I_y]$ 으로 정한다.

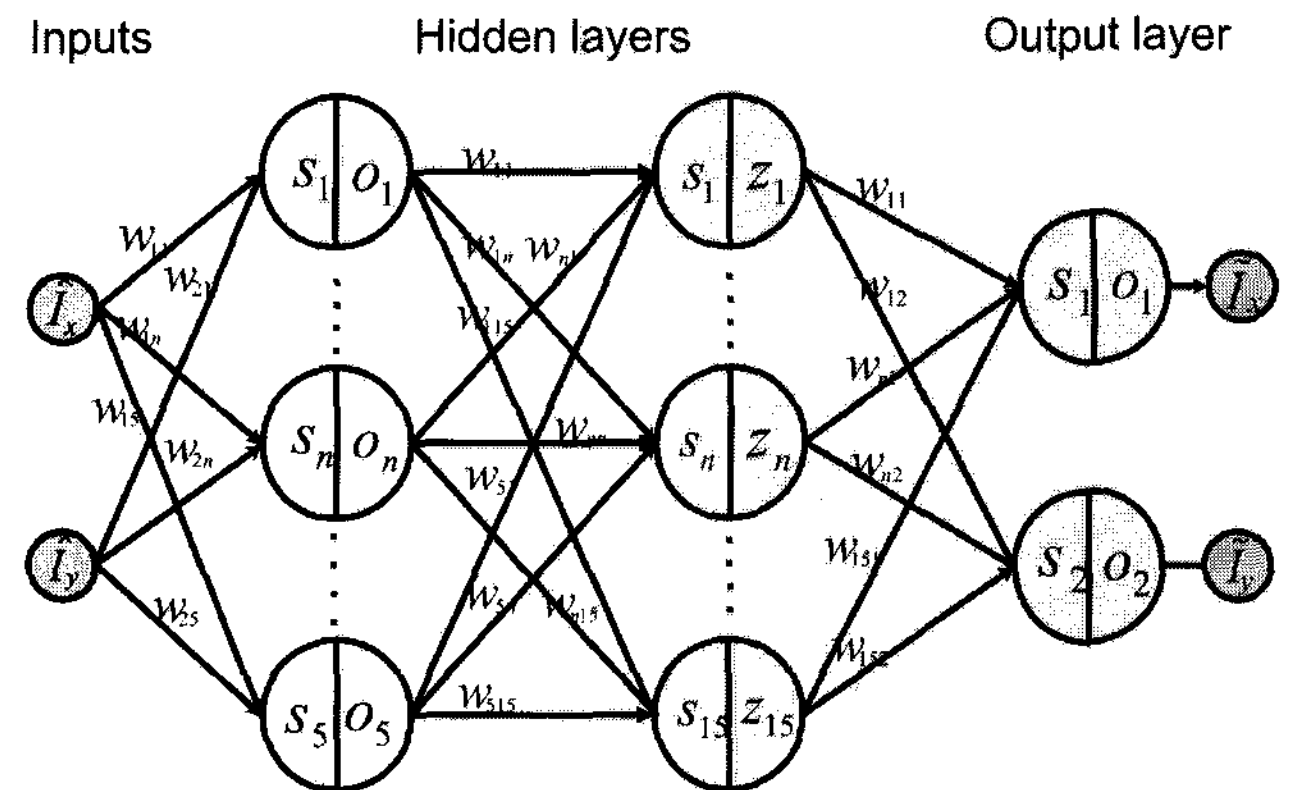


그림 2 신경 회로망 모델  
Fig. 2 Neural network model

그림 2는 헤테로다인 레이저 간섭계의 비선형 오차 보정을 위하여 사용한 신경 회로망 모델이다. 각각 한 개의 입력층 및 출력층이 있으며, 은닉층은 2개의 층으로 구성되어 있다.  $w_{ij}$ 로 표현되는 값들은 가중치를 의미한다. 그림 2에서  $\tilde{I}_x$ 와  $\tilde{I}_y$ 는 신경 회로망 모델의 출력값이 되며, 목표값과 출력값의 오차는 다음의 오차함수(error function)에 관한 식 (12)로 설명된다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^c [(I_x - \tilde{I}_x)^2 + (I_y - \tilde{I}_y)^2] \quad (12)$$

식 (12)에서 정의된 오차함수가 최소가 되도록 기울기 강하방법(steepest gradient descent)이 적용된 오차 역전파 방법(error back-propagation algorithm)으로 목표 오차값에 도달할 때까지 신경 회로망을 학습시켜 최적의 가중치를 구하게 된다. 식 (13)으로부터 오차 역전파 방법에 의한 가중치 변환이 이루어진다.

$$w_j^{t+1} = w_j^t + \eta \cdot \left(-\frac{\partial E}{\partial w_{kj}}\right) \quad (13)$$

$\eta$ 는 학습률이고, chaining rule을 적용하여  $\partial E / \partial w_{kj}$ 을 계산하면 다음과 같다.

$$z_k = f(w_{k1} \cdot o_1 + w_{k2} \cdot o_2 + \dots + w_{km} \cdot o_m) \quad (14)$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_{kj}} = -(y_k - z_k) f'(s_k) o_j$$

이와 유사한 방법으로, 은닉층(hidden-layer)에서의 최종  $\partial E / \partial w_{ji}$ 는 다음과 같다.

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = \left( - \sum_{k=1}^c \delta_k \cdot w_{kj} \right) f'(s_j) w_{kj} \quad (15)$$

여기서,  $\delta_k = (y_k - z_k) f'(s_k)$ 이다.

신경 회로망의 학습에 있어서 적용되는 입력값과 목표값은 전체 데이터 중에서 10~20%에 해당하는 데이터를 샘플링하고, 이 데이터를 이용한다. 학습시킬 데이터의 양이 많아지면 학습시간이 오래 걸리는 점을 감안하여, 적절하게 조절한다. 그리고 레이저 간섭계의 정밀도를 높이기 위해서 목표오차를  $1.0 \times 10^{-9}$ 로 하였으며, 시간적 효율성을 고려하여 학습 횟수는 10,000회를 넘지 않도록 하였다.

신경 회로망의 학습을 수행한 후, 검증과정을 거쳐서 다음과 같은 신경 회로망을 얻게 된다.

$$[\tilde{I}_x, \tilde{I}_y] = NN(\hat{I}_x, \hat{I}_y) \quad (16)$$

식 (16)으로부터 얻어진 새로운  $[\tilde{I}_x, \tilde{I}_y]$ 는 목표값  $[I_x, I_y]$ 에 근접하는 값이다. 즉, 레이저 간섭계의 비선형 오차가 제거된 값을 의미한다.  $[\tilde{I}_x, \tilde{I}_y]$ 의 값과 식 (17)을 이용하여 보정된 위상값을 구할 수 있다.

$$\tilde{\Phi} = \tan^{-1} \left( \frac{\tilde{I}_x}{\tilde{I}_y} \right) \quad (17)$$

마지막으로 식 (8)과 변환한 식 (18)로부터 최종 보정된 거리값을 구하게 된다.

$$\tilde{L} = \frac{\tilde{\Phi} \lambda}{4\pi n} \quad (18)$$

### 2.3 데이터 융합 방법을 이용한 환경 오차 보정

신경 회로망 방법만으로는 비선형 오차를 줄일 수 있지만, 환경 요인에 의한 오차 성분은 보정할 수 없다. 그러므로 환경적 오차 요인을 제거하기 위한 추가적인 보정 방법이 필요하다. 이 장에서는 헤테로다인 레이저 간섭계 측정시 공기 굴절률에 의해 발생하는 환경오차를 보정하기 위하여 데이터 융합 방법을 제안한다.

헤테로다인 레이저 간섭계에서 제원은 서로 같으면서 각각 다른 광원을 갖는 두 대의 레이저 헤드를 이용하고, 독립된 광학 시스템을 구축한다. 이렇게 구축된 시스템으로부터 하나의 이동물체에 대한 거리 측정값을 얻도록 한다. 이때, 이동물체에 대하여 서로 반대 방향에서 레이저 빔을 쏘아

측정을 하게 되므로 측정된 위치 측정값  $\Delta M_1$ ,  $\Delta M_2$ 에 대하여, 다음과 같은 이상적인 관계가 성립되어야 한다.

$$\Delta m_{1i} + \Delta m_{2i} = 0, \quad i = 1, \dots, q \quad (19)$$

여기서  $q$ 는 측정 데이터의 갯수를 의미한다. 하지만 공기 굴절률과 같은 환경적 오차 요인과 주파수 혼합에 의한 비선형 오차 요인에 의하여 실제 측정 데이터 값으로는 식 (19)와 같은 관계가 성립하지 않는다. 같은 시간에 얻어지는 측정 데이터일지라도 각 데이터의 양상은 서로 달라진다.  $\Delta M_1$ 을 수평축( $x_{m_1}$ ),  $\Delta M_2$ 를 수직축( $y_{m_2}$ )으로 하여 좌표 평면상에 표현하면,  $y_{m_2} = -x_{m_1}$ 와 같이 직선의 주위로 넓게 퍼져있는 점들로 표현된다. 이러한 점들은 환경적 오차 요인을 포함하고 있는 데이터들이며, 이상적인 경우에는  $y_{m_2} = -x_{m_1}$ 의 직선 주위에 가깝게 근접하는 형태를 갖추어야 한다. 따라서 측정오차를 보정하기 위하여 이러한 점들을  $y_{m_2} = -x_{m_1}$ 의 직선위로 사상시켜야 한다. 여기서, 사상점으로 옮겨진 점들은  $J = (1/2) \Sigma \| (I_x - I_x^*)^2 + (I_y - I_y^*)^2 \|$ 의 목적함수를 최소화시키는 방향으로 결정되어야 한다. 동일한 시간동안에 측정된  $\Delta M_1$ ,  $\Delta M_2$ 의 데이터를 분석해 보면 각각의 데이터들 중에서 표준편차가 적은 데이터 집합이 훨씬 신뢰도가 높음을 알 수 있다.

본 절에서는 신경 회로망 기법을 이용하여 헤테로다인 레이저 간섭계에 존재하는 비선형 오차를 제거한 이후의  $\Delta \tilde{M}_1$ ,  $\Delta \tilde{M}_2$ 를 데이터 융합 방법을 이용하여 환경적 오차를 보정하는 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 데이터 융합 방법은  $\Delta \tilde{M}_1$ ,  $\Delta \tilde{M}_2$  각각의 표준 편차값을 장축 및 단축으로 하는 타원을 이용하는 것이다. 이러한 방법은 좌표 평면상의  $(\Delta \tilde{M}_1, \Delta \tilde{M}_2)$ 점을  $y_{m_2} = -x_{m_1}$ 의 직선에 사상시키기에 최적의 해법을 제시한다.  $\Delta \tilde{M}_1$ ,  $\Delta \tilde{M}_2$ 의 표준 편차값을 각각  $\sigma_1, \sigma_2$ 라고 하고 이들을 타원의 형태를 결정하는 두 축으로 삼아,  $\Delta \tilde{M}_1$ ,  $\Delta \tilde{M}_2$ 에 대한 각각의 데이터  $(m_{1k}, m_{2k})$ 를 타원의 중점으로 잡아서 좌표 평면상에 표현한다. 그리고 이 타원의 크기를 일정한 비율로 조절하여  $y_{m_2} = -x_{m_1}$ 의 직선과 접하는 점으로 사상하게 된다. 따라서 위에서 언급한 측정 데이터  $\Delta \tilde{M}_1$ 과  $\Delta \tilde{M}_2$ 에 대해 다음과 같은 타원 방정식으로 표현된다.

$$\frac{(x_{m_1} - m_{1k})^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y_{m_2} - m_{2k})^2}{\sigma_2^2} = 1, \quad k = 1, 2, \dots, q \quad (20)$$

여기서  $m_{1k}, m_{2k}$ 는 같은 샘플링 순간의 두 데이터값  $\Delta \tilde{M}_1, \Delta \tilde{M}_2$ 를 의미하며,  $x_{m_1}, y_{m_2}$ 는 타원의 궤적을 의미한다. 타원과 직선  $y_{m_2} = -x_{m_1}$ 의 교점은 식 (21)에 의하

여 결정됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta m_{1k}^* &= \pm \frac{\zeta^2 m_{1k} - m_{2k}}{1 + \zeta^2}, \\ \Delta m_{2k}^* &= \mp \frac{\zeta^2 m_{1k} - m_{2k}}{1 + \zeta^2} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서  $\zeta$ 는  $\tilde{M}_1$ 과  $\tilde{M}_2$ 의 분산값인  $\sigma_1$ 과  $\sigma_2$ 사이의 비율을 의미한다( $\zeta = \sigma_2/\sigma_1$ ). 그림 3은 위에서 설명한 데이터 융합 방법에 관한 내용을 그림으로 표현한 것이다.

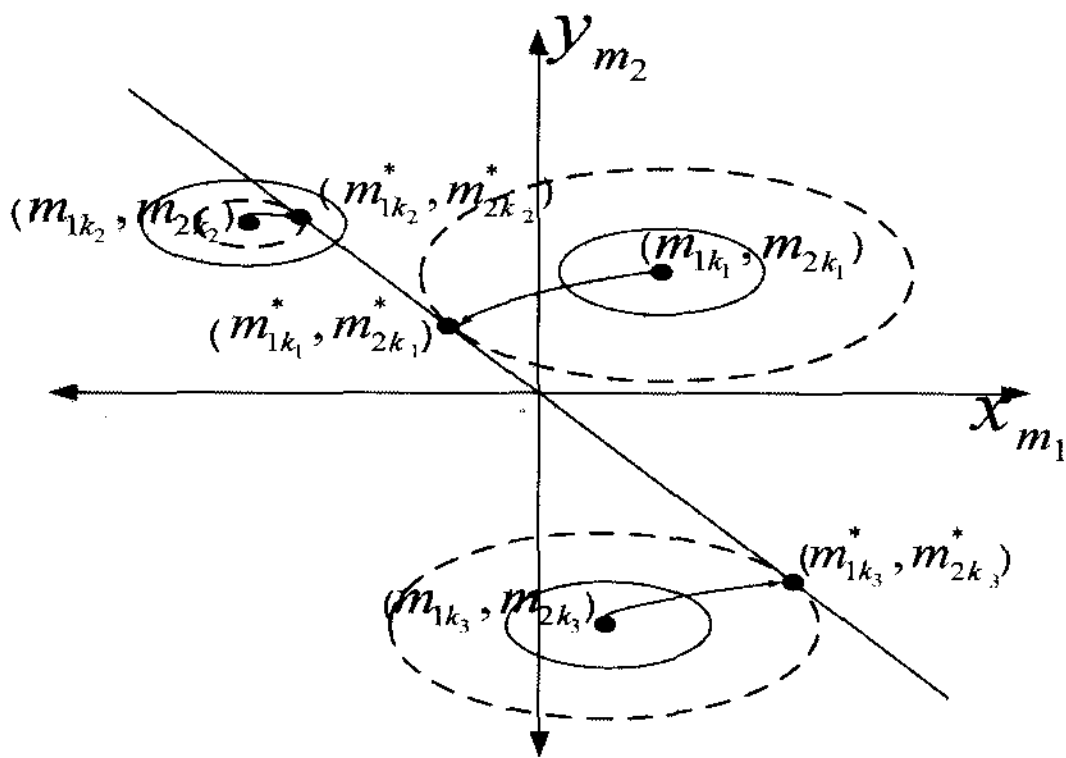


그림 3 타원 기법을 이용한 사상 방법  
Fig. 3 Projection method using ellipsoidal transform

여기서 좌표 평면상에 표현되는 모든 점들( $\Delta \tilde{M}_1$ ,  $\Delta \tilde{M}_2$ )은 식 (19)에 부합되도록 새로운 점으로 옮겨진다.  $y_{m_2} = -x_{m_1}$ 와 각 타원과 접점이 좌표 평면상의 각 점들의 사상점에 해당된다. 이 점들을  $\Delta M_1^*$ ,  $\Delta M_2^*$ 라고 표현하며, 이 값들은 헤테로다인 레이저 간섭계에 존재하는 환경오차가 제거된 최종 위치측정 보정값에 해당된다.

### 3. 실험 결과

이 장에서는 실험을 통하여 제안된 보정 알고리즘의 효율성을 증명하고자 한다. 두 대의 레이저 헤드는 Agilent사의 WT307B 모델을 이용하였고, 파장( $\lambda$ )은  $0.6329912 \mu m$ 이다. 이동 스테이지로는 나노 단위로 이동이 가능한 linear piezo-electric transducer(PI: P-621.1CL)가 이용되었다. 또한, 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 기준 신호로써 정전용량 센서(PI:D-100)로부터 얻어진 측정값을 이용한다. 정전용량 센서는 미소범위 내에서 측정 정밀도가 수 나노급으로 아주 정밀한 측정 장치로써, 이 장치로부터 얻어진 위치 측정값을 기준신호로 사용하여 보정 전과 보정 후를 비교할 수 있다.

그림 4와 그림 5는 헤테로다인 레이저 간섭계의 오차보정을 위하여 제안된 보정 알고리즘을 적용한 결과 그래프이다. 측정 구간의 조절을 위하여 나노 단위의 위치이동이 가능한 압전 변환기를 이용하였다. 그림 4는  $50 \sim 150 \text{ nm}$  구간에

서 여러 구간으로 나누어 측정한 결과이다. 점선은 보정 전의 레이저 간섭계의 측정값을 의미하며, 가는 실선은 정전용량센서(CDS)를 이용한 측정값을 의미한다. 그리고 굵은 실선은 DFNN 보정 알고리즘을 적용한 결과값을 의미한다. 그림 4에서 보여지듯이 DFNN을 이용한 보정값은 정전용량센서의 거리측정값과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

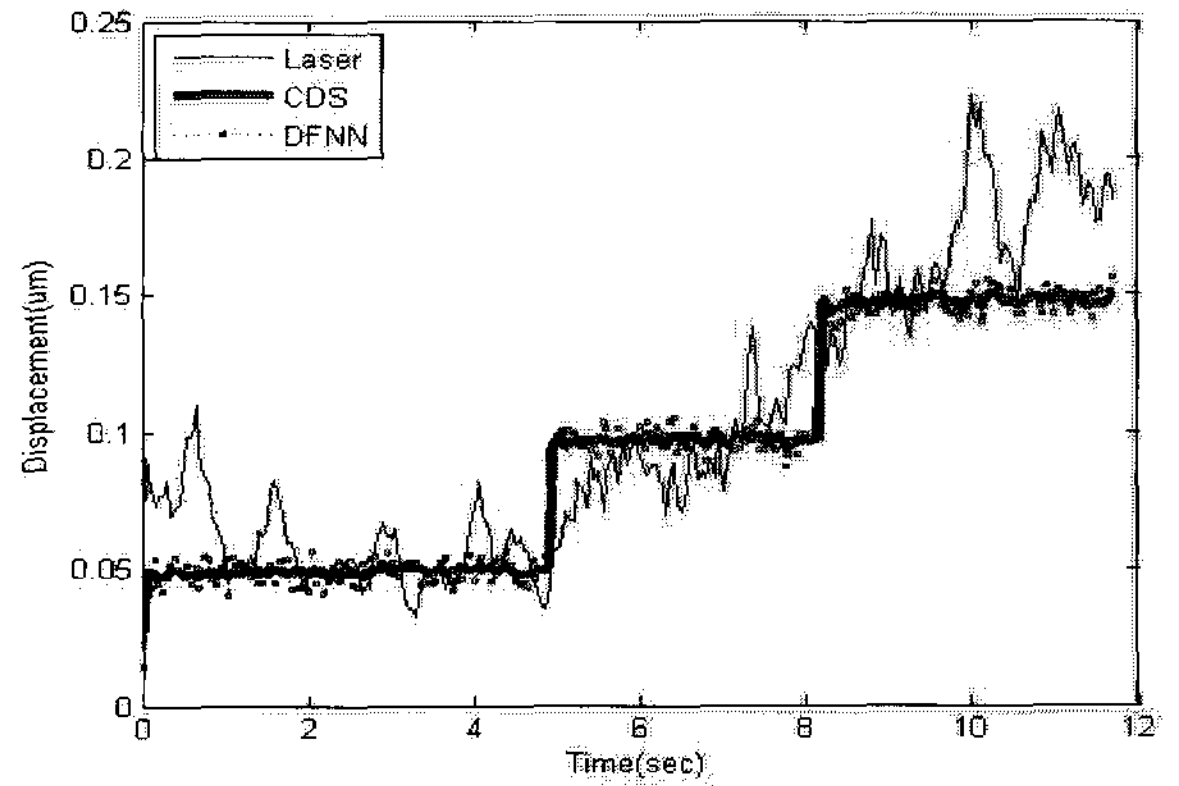


그림 4 고정 위치 측정시 DFNN을 이용한 레이저 간섭계의 오차보정 ( $y = 50, 100, 150 \text{ nm}$ )  
Fig. 4 Error compensation of laser interferometer using DFNN for fixed position measurements. ( $y = 50, 100, 150 \text{ nm}$ )

그림 5는  $0 \sim 300 \text{ nm}$ 구간에서 정해진 구간을 따라 이동하도록 스테이지를 구성한 뒤 측정한 값이다. 점선은 보정 전의 레이저 간섭계의 측정값을, 가는 실선은 정전용량센서의 측정값을, 그리고 굵은 실선은 DFNN 보정 알고리즘을 적용한 후의 측정값을 의미한다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 연속적으로 움직이는 거리 측정값에 대하여 그림 4에서와 마찬가지로 보정 효과가 우수한 것을 알 수 있다. 레이저 간섭계의 측정값은 크게 흔들리는 반면에 보정 후의 거리 보정값은 흔들림이 거의 없음을 확인할 수 있다. 위와 같이 제안된 보정 알고리즘을 적용한 결과 그래프를 통하여 DFNN 보정 알고리즘의 효율성을 증명하였다.

### 4. 결 론

헤테로다인 레이저 간섭계는 대변위의 측정범위 내에서 수 나노급의 정밀도를 갖는 초정밀 측정 장치이다. 그러나 헤테로다인 레이저 간섭계에는 주파수 혼합에 의한 비선형 오차 요인과 공기 굴절률로 대표되는 환경적 오차 요인에 의하여 측정 정밀도에 한계가 나타난다.

이러한 측정 오차의 요인을 해소하기 위하여 본 논문에서는 DFNN을 이용한 보정 방법을 제안하였다. DFNN 방법은 헤테로다인 레이저 간섭계에 존재하는 환경적인 오차와 비선형 오차의 요인을 대상으로 하는 하이브리드 오차 보정 방법이다. 이 방법을 구현하기 위하여 기준 신호로 정전용량 센서의 측정값을 이용한 신경 회로망을 구성하였고, 두 대의 동일한 제원의 레이저 헤드를 이용한 데이터 융합 방법을 적용하였다. 그리고 실험을 통하여 제안된 DFNN 보정 방법의 효율성을 입증하였다.



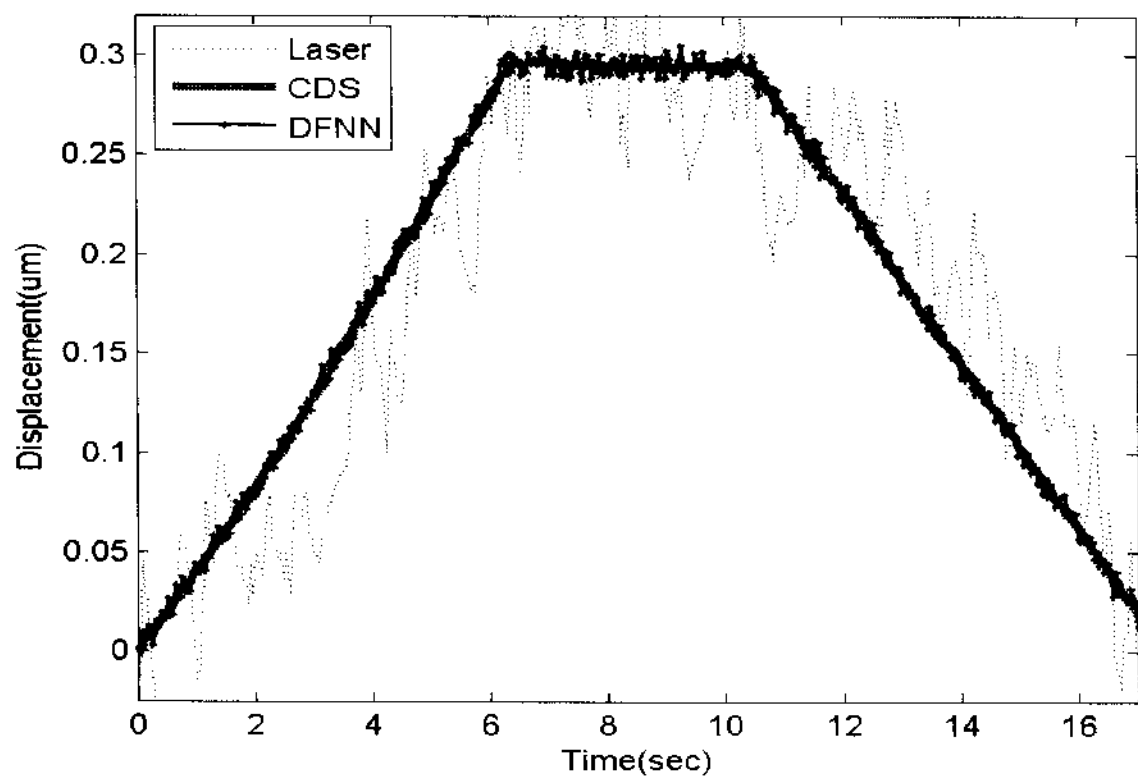


그림 5 이동 위치 측정시 DFNN을 이용한 레이저 간섭계의 오차보정 ( $y = 0 \sim 300 \text{ nm}$ )

Fig. 5 Error compensation of laser interferometer using DFNN for moving position measurements. ( $y = 0 \sim 300 \text{ nm}$ )

**감사의 글**

본 연구는 2006년도 한국 학술진흥재단의 지원 (KRF-2006-331-D00184)에 의하여 연구되었으며, 관계부처에 감사드립니다.

**참고 문헌**

[1] H.C. Yeh, W.T. Ni, and S.S. Pan, "Digital closed-loop nanopositioning using rectilinear flexure stage and laser interferometer", Control Engineering Practice, Vol. 13, pp. 559-566, (2005).  
 [2] W.T. Estler, "High-accuracy displacement interferometry in air", Applied Optics, Vol. 24, No. 6, pp. 808-815, (1985).  
 [3] J. Lawall and E. Kessler, "Michelson interferometry with 10 pm accuracy", Review of Scientific Instruments, Vol. 71, pp. 2669-2676, (2000).  
 [4] N. Bobroff, "Residual errors in laser interferometer from air turbulence and nonlinearity", Applied Optics Vol. 26, pp. 2676-2682, (1987).  
 [5] T.J. Park, H.S. Choi, C.S. Han and Y.W. Lee, "Real-time precision displacement measurement interferometer using the robust discrete time Kalman filter", Optics & Laser Technology, Vol. 37, pp. 229-234, (2005).

[6] C.M. Wu and R.D. Deslattes, "Analytical modeling of the periodic nonlinearity in heterodyne interferometry", Applied Optics, Vol. 37, No. 28, pp. 6696-6700, (1998).  
 [7] T.B. Eom, T.Y. Choi and K.H. Lee, "A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer", Measurement Science & Technology, Vol. 13, pp. 222-225, (2002).

**저 자 소 개**



**허 건 행 (許 健 行)**

1981년 4월 8일생. 2007년 성균관대학교 정보통신 공학부 학사졸업. 2007년~현재 성균관대학교 전자전기 및 컴퓨터 공학과 석사과정

Tel : 031) 290-7984

E-mail : idealgo@ece.skku.ac.kr



**이 우 램 (李 우 램)**

1982년 7월 7일생. 2006년 성균관대학교 정보통신 공학부 학사졸업. 2006년~현재 성균관대학교 전자전기 및 컴퓨터 공학과 석사과정

Tel : 031) 290-7984

E-mail : wooram@ece.skku.ac.kr



**유 관 호 (劉 寬 鎬)**

1970년 2월 24일생. 1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공석). 2000년 University of Minnesota 전자공학과 졸업(공박). 2000년~2001년 Texas A&M University-Kingsville 전자공학과 조교수. 2001년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 부교수.

Tel : 031-290-7148

Fax : 031-290-7984

E-mail : khyou@ece.skku.ac.kr