

보간법을 이용한 견인 어레이 형상 추정 기법의 성능 개선

Performance Improvement of Towed Array Shape Estimation Using Interpolation

박 민 수*, 도 경 철**, 오 원 천**, 윤 대 희*, 이 충 용*
(Min Su Park*, Kyeong Cheol Dho**, Won Tcheon Oh**, Dae Hee Youn*,
Chung Yong Lee*)

* 이 연구는 수중음향특화연구센터의 연구비 지원으로 이루어졌음.

요 약

칼만 필터를 이용한 2차원 견인 배열 (towed array) 형상 추정 기법의 성능을 개선하는 방법을 제안한다. 변위 센서를 이용할 경우, 기존의 칼만 여파기 방법에 의해 추정된 2차원 하이드로폰 수평 좌표는 총 길이가 배열의 길이와 일치하며 등간격 값을 갖게 된다. 이렇게 고정된 수평 좌표를 사용하는 경우 배열의 왜곡 정도가 심화됨에 따라 오차가 증가하게 된다. 이를 개선하기 위해 선형 근사화 방법 또는 스플라인 보간법을 이용하여 발생하는 오차를 줄일 수 있는 방법을 제안하고 컴퓨터 모의 실험을 통해 그 성능을 검증한다.

핵심용어: 칼만 필터, 어레이 형상추정, 견인 어레이, 선형모델, 스플라인 보간법

ABSTRACT

A calibration technique is proposed to improve the performance of 2-D towed array shape estimation using the Kalman filter. In the case of using displacement sensors, 2-D hydrophone positions estimated by the Kalman filter are calculated by assuming that the adjacent hydrophones are horizontally equi-spaced so that maximum distance is equal to the array length. The assumption causes errors in estimating hydrophone positions. The proposed technique using linear model approximation or spline interpolation can reduce the errors by exploiting the fact that the whole length of array is preserved whatever the array shape is. The numerical experiments show that the proposed method is very effective.

Key words: Kalman filter, Array shape estimation, Towed array, Linear model, Spline interpolation

투고분야: 수중음향(5.6)

I. 서 론

해양 환경에서 견인 배열은 음파를 발생하는 수중의 물체에 대한 방향을 수동으로 탐지하기 위해 사용되는 형태이며, 이러한 견인 배열에 적용되어 왔던 배열 신호 처리 기법들은 대부분 일정한 깊이의 수심에서 직선을 유지하며 배열이 이동하는 환경을 가정하였다. 그러나 견인선의 속도와 운항 경로, 해류 및 파도등과 배열의 길이, 두께 등으로 말미암아 실제 상황에서는 그러한 가정은 성립하지 않으며, 이로 말미암아 등간격 선형 배열을 가정한 기존의 시스템은 성능이 매우 떨어지게 된다[2].

이러한 문제점을 해결하기 위하여 견인 배열의 형상 변화를 추정하려는 노력들이 진행되어 왔다. 견인 배열의 형상 추정 방법에는 배열에 수심센서나 방위센서 또는

경사 센서 등의 비음향 센서를 보조 센서로 장착하여 형상을 추정하는 방법과[1-4] 하이드로폰으로부터 받아들이는 데이터만으로 형상을 추정하는 방법이 있다[5-7]. 보조 센서를 사용하는 방법 가운데, Gray [2]는 적은 수의 측정 센서를 선형 배열에 설치하고 유체역학적 배열 모형과 보조센서 출력을 이용하는 칼만 여파기(Kalman filter)를 설계하여 배열 형상을 추정하였다.

이 논문에서는 변위를 측정하는 보조센서를 이용할 때, 기존의 칼만 여파기 방법을 모의 실험을 통해 성능을 분석해보고, x좌표의 근사화로 말미암아 발생하는 하이드로폰 좌표의 오차를 수정하기 위해 직선 모델을 이용한 좌표 수정 방법과 스플라인 보간법을 사용한 방법을 제안한다.

II. 칼만 필터를 이용한 배열 형상추정

배열의 직경이 길이에 비해 충분히 작고 유연하며 수중에서 일정한 속도로 움직일 때, 식 (1)로 표현되는 무

* 연세대학교 기계전자공학부

** 국방과학연구소

접수일자: 1999년 8월 7일

차원 주파수가 $\bar{f} < 1$ 이면, 2차원 배열의 형상은 식 (2)와 같이 편미분 방정식으로 표현된다. 이 때 배열의 수평, 수직 모양은 독립적으로 취급할 수 있다고 가정한다.

$$\bar{f} = f \frac{L}{U} = fT = \frac{T}{T_f} \quad (1)$$

$$P \frac{\partial \eta}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = 0 \quad (2)$$

여기서 f 는 배열 모양을 나타내는 파형의 주파수, L 은 배열의 전체 길이, U 는 배열의 이동 속도이다. 또한 배열 원점으로부터의 길이 x 와 시간 t 를 차원을 갖지 않는 변수로 바꾸어 각각 $\tau = t \cdot U/L$ 와 $\xi = x/L$ 로 정의되었다. y 는 t 와 x 값에 따른 배열 형상의 변위이며, 이에 해당하는 무차원 변수가 $\eta = \eta(\tau, \xi) = \frac{y(t, x)}{L}$ 이다. P 는

$$P = \frac{\pi c_t + c_n}{c_n}$$

하는 수평 및 수직 항력 계수이다.

식 (2)로 표현되는 배열 운동 모양을 수차 모형 (water pulley model) 이라 하고, 실제 환경에서 나타나는 배열 형상을 잘 모형화 한다[2-4]. 이 방정식의 해는 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta(\tau, \xi) = f(\xi - P\tau) \quad (3)$$

식 (2)를 칼만 여파기에 적용하기 위해서는 다음 식 (4)로 표현되는 상태 방정식과 (5)로 표현되는 측정방정식이 사용된다.

$$\underline{\eta}(k+1) = F \underline{\eta}(k) + \underline{u}(k) + \underline{w}(k) \quad (4)$$

$$\underline{z}(k) = H^T \underline{\eta}(k) + \underline{v}(k) \quad (5)$$

여기서 F 와 H 는 각각 시간에 따른 상태의 변화를 나타내는 천이 행렬과 보조센서의 위치를 나타내는 측정 행렬로서 다음 식 (6)과 (7)로 표현된다.

$$F = (1 - p)I + pL \approx aL \quad (6)$$

$$H_{mj} = \delta_{mji}, \quad m = 1, 2, A, M, \quad j = 1, 2, A, K \quad (7)$$

여기서 $p = \hat{p} \frac{h_r}{h_\xi}$ 이고, h_r , h_ξ 는 각각 시간과 배열의 길이를 구역으로 나눈 간격의 무차원 표현이다. p_j 는 j 번째 보조센서가 위치해 있는 구역을 나타내는 값으로써 m 가운데 하나의 값을 갖게 된다. 따라서 H 는 보조센서가 있는 부분 만이 1이되고 나머지의 위치에는 0의 값을 갖는 형태의 행렬이 된다. M 은 배열의 부분 수 K 는 보조센서의

수이다. α 는 1차 모형에서 실험적으로 1의 값을 사용하며, $\underline{u}(k)$ 는 견인점의 운동에 따른 초기 변위이고, $\underline{u}(k)$ 와 $\underline{w}(k)$ 는 각각 모형 오차와 측정센서의 오차를 나타낸다.

변위센서를 사용했을 경우 칼만 필터에 의해 추정된 결과의 변위는, 부분의 수와 배열의 하이드로폰 수가 동일할 때, 기존의 방법을 사용할 경우 각 부분의 변위가 고정된 x 좌표에 의해 하이드로폰의 좌표로 복원된다. 이 때 사용되는 x 의 최대값은 L 이며, 이를 등간격으로 나누어 값을 고정하므로, 실제 좌표와 칼만 필터에 의해 추정된 결과 좌표는 다음 그림 1과 같이 반드시 오차를 갖게 된다.

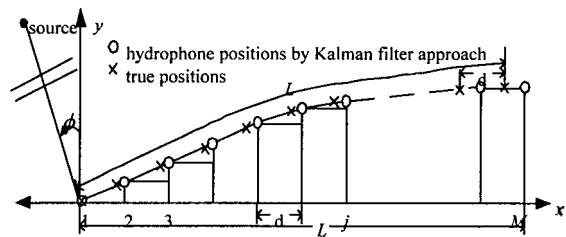


그림 1. 추정된 하이드로폰 좌표와 실제 좌표의 비교
Fig. 1. A comparison between estimated and real hydrophone positions.

III. 직선 모형과 곡선 모형을 이용한 하이드로폰의 좌표 수정 방법

3.1. 직선 모형을 이용한 하이드로폰 좌표수정

부분의 수를 배열에 장착된 하이드로폰의 수와 동일하게 설정하였을 때, 칼만 여파기에 의해서 추정된 결과는 그림 2에서와 같이 각 부분의 변위, 곧 하이드로폰의 y 좌표이다. 이 때 고정된 x 좌표를 사용할 경우 칼만 여파기에 의해 추정된 하이드로폰 좌표들 사이의 거리는, 배열의 꼬리쪽으로 갈수록 실제 좌표들 사이의 고정된 간격보다 더 커지는 형태가 된다. 따라서, 처음 추정된 좌표들 사이가 그림 2처럼 직선으로 연결되어 있고, 실제 하이드로폰이 그 직선 위에 위치해 있다고 가정하면, 선형 배열은 등간격으로 이루어져 있으므로 다음과 같이 좌표를 수정할 수 있다.

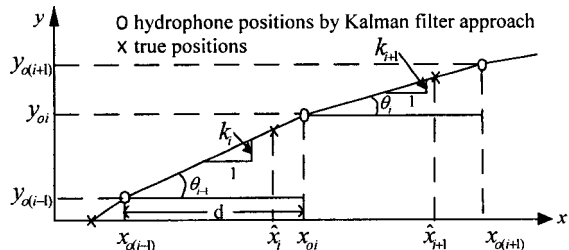


그림 2. 직선 모형화로 근사화된 배열 구조
Fig. 2. An approximated array structure by linear model.

칼만 여파기 접근 방법에 의해 추정된 x, y 좌표 벡터를 X_I, Y_I 라 하면, X_I 는 다음 식 (8)과 같이 주어진다.

$$X_I^T = [0, d, 2d, \dots, (M-1)d] \quad (8)$$

여기서 d 는 하이드로폰 사이의 간격이며, M 은 하이드로폰의 개수이다. 제안한 알고리즘은 주어진 좌표를 이용하여 다음의 과정을 반복함으로써, 좌표들 사이의 거리가 d 가 되도록 위치를 수정하여 최종 좌표 \hat{X}, \hat{Y} 를 구하게 된다

- ▶ 초기화 : $\hat{X} = [x_i], \hat{Y} = [y_i]$
- ▶ $m = 1, 2, \dots, M-1$ 에 대해 식 (9)~(14) 반복
- ▶ 주어진 좌표 사이의 기울기 계산 :

$$k_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}, i = 1, 2, \dots, M-m \quad (9)$$

- ▶ 주어진 좌표 가운데 $M-m$ 개 만큼 선택 :

$$X_o^T = [x_1, x_2, \dots, x_{(M-m)}], Y_o^T = [y_1, y_2, \dots, y_{(M-m)}] \quad (10)$$

- ▶ 식 (10)을 기준으로 거리가 d 만큼 되는 곳의 좌표 계산 :

$$x_{ni} = d \cos \theta_i + x_{oi}, \cos \theta_i = \frac{1}{\sqrt{k_i^2 + 1}} \quad (11)$$

$$y_{ni} = k_i(x_{ni} - x_{oi}) + y_{oi} \quad (12)$$

- ▶ 구하고자 하는 좌표 갱신 :

$$\hat{X}^T = [\hat{X}^T, x_{ni}], \hat{Y}^T = [\hat{Y}^T, y_{ni}] \quad (13)$$

- ▶ Iteration을 위한 치환 :

$$X_o = X_n, Y_o = Y_n \quad (14)$$

여기서 벡터 X_I, Y_I 의 원소는 x_i, y_i 표시하였으며, 마찬가지로 X_o, Y_o 의 원소는 x_{oi}, y_{oi}, X_n, Y_n 은 x_{ni}, y_{ni} 로 표시하였다.

3.2. 스플라인 보간법을 이용한 하이드로폰 좌표수정

초기에 추정된 좌표를 기준으로 했을 때 직선으로 모형화할 경우에는 곡선부분에서 많은 오차가 발생한다. 따라서 곡선 모형화를 통해 하이드로폰 사이의 거리가 등간격 d 가 되도록 하는 새로운 좌표를 스플라인 보간법을 [8] 사용하여 찾음으로써 좌표 추정 오차를 줄일 수 있다.

칼만 여파기에 의해 추정된 점의 좌표를 P_i 라 하면, 스플라인 보간법은 이 좌표들을 포함하는 부드러운 곡선 위에 새로운 좌표들을 지정한 개수만큼 구한다. 그러한 표본 좌표 가운데에는 그림 3에 나타나 있듯이 실제 좌표 \hat{P}_i 와 일치하는 경우도 있을 수 있지만 그렇지 않은 경우가 대부분이므로 실제 좌표와 가장 가까운 표본을 찾는 과정이 필요하다.

스플라인 방법에 의해 생성된 좌표들을 P_j 라 하자. 이때 $j = 1, 2, \dots, N$ 이며, N 은 생성된 표본 좌표 수이다. N 이 충분히 클 경우, 표본 좌표들 사이는 직선으로 근사화할 수 있으므로, 다음 식 (15)를 만족시키는 표본 좌표들을 모두 선택함으로써 실제 좌표와 가장 가까운 점을 정할 수 있게 된다.

$$\min_{P_{k+1}} \left\{ nd - \sum_{j=1}^n |P_j - P_{j+1}| \right\}, n = 1, 2, \dots, M-1, \quad (15)$$

$$k = 1, 2, \dots, N-1$$

각 n 에 대해 k 를 증가 시키면서 오차가 최소인 P_{j+1} 을 선택하면, 그 점이 바로 하이드로폰의 실제좌표가 된다.

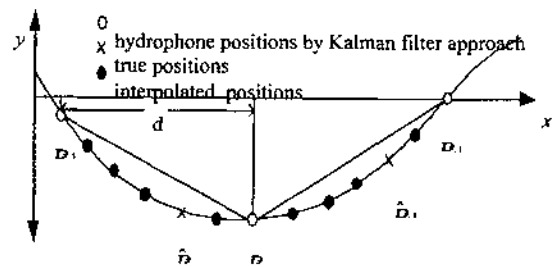


그림 3. Spline 보간법에 의한 곡선 모형과 직선 모형과의 비교
Fig. 3. The comparison of spline interpolation model and linear model.

IV. 모의 실험 및 결과

제안한 방법을 검증하기 위해 이 모의 실험에서는 하이드로폰 21개, 배열 총 길이 100m인 건이 배열을 가정하였다. 배열의 휘어진 정도를 나타내는 무차원 주파수는 0.892이며, 모델 잡음의 분산과 변위 측정 센서 잡음의 분산은 모두 0.1로 설정했고, 이는 0.33m정도의 오차를 나타낸다.

그림 4는 실제 하이드로폰 좌표와, 칼만 필터에 의해 추정된 좌표, 그리고 제안한 직선 모델 방법 및 스플라인 보간법에 의해 수정된 좌표이다. 다시말하면 배열의 실제 형상과 기존의 칼만필터 방법에 의해 추정된 형상, 그리고 제안된 방법들에 의해 수정된 배열의 형상이다. 제안한 직선 근사화 방법에 의해 수정된 좌표는 기존의 칼만 필터 방법보다는 좌표가 실제 형상과 유사하게 수정되었지만, 곡선 부분에서는 실제 형상과 비교 했을 때 오차를

포함하는 것을 볼 수 있다. 반면에 스플라인 방법에 의해 수정된 좌표는 실제 좌표와 거의 일치한다. 이러한 결과는 그림 5에 나타나 있는 실제 좌표와 제안한 방법에 의해 수정된 좌표와의 거리 오차를 비교했을 때 명백하게 알 수 있다. 기존의 칼만 여파기 방법에 의해 추정된 좌표와 실제 좌표와의 오차는 비교적 큰 반면에, 직선 근사화 방법에 의해 수정된 좌표 또는 스플라인 방법에 의해 수정된 좌표와 실제좌표와의 오차는 매우 작은 것을 알 수 있다.

그림 6은 SNR 0dB인 환경에서 150Hz의 톤신호가 10° 방향에서 입사될 때 (대역 통과 필터를 사용하지 않음), 제안한 직선 근사화 방법에 의해 수정된 좌표와 기존의 칼만 필터 방법에 의해 추정된 좌표를 이용하여 방향추정을 한 결과를 비교한 것이다. 기존의 칼만 필터 방법을 이용했을 때는 35°로 실제 입사방향 10°와는 많은 차이가 있는 반면에 선형 근사화 방법을 이용하여 보정한 경우는 1.4°로 방향 추정 오차가 줄어들었음을 알 수 있다. 그림 7의 스플라인 방법의 경우는 성능이 가장 우수하며, 실제 입사 방향과의 차이가 0.4° 정도 됨을 확인할 수 있다. 그림 6과 그림 7에서 실제 모양은 하이드로폰의 위치를 정확하게 알고 있는 경우의 방향 추정 결과를 의미한다.

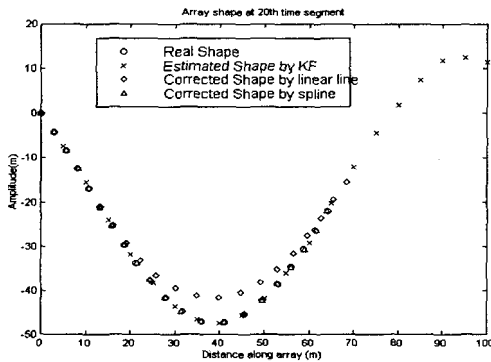


그림 4. 실제와 제안된 방법에 의한 하이드로폰 좌표
Fig. 4. Real and estimated hydrophone positions.

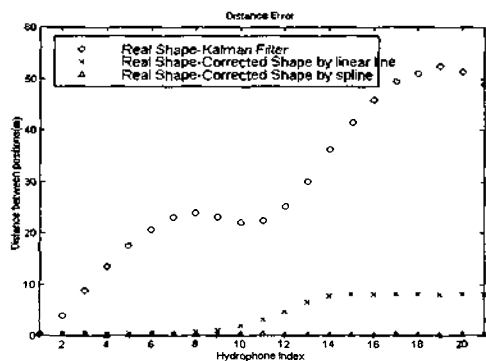


그림 5. 제안된 두 방법에 의한 좌표 추정 오차
Fig. 5. Estimation error of the proposed methods.

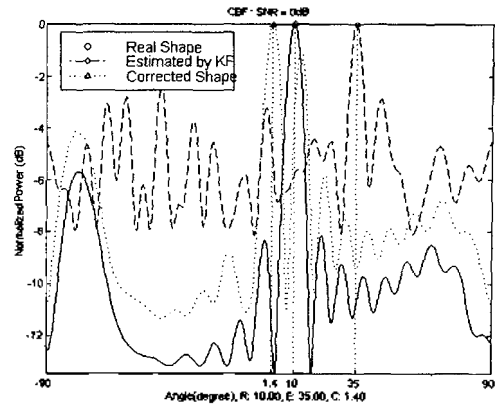


그림 6. 제안된 직선 근사화 방법에 의한 방향 추정 결과
Fig. 6. Bearing estimation by the proposed linear model.

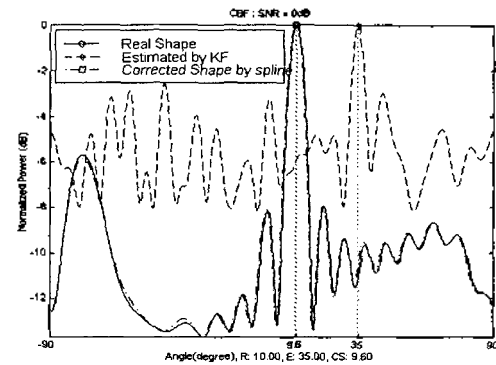


그림 7. 제안된 스플라인 방법에 의한 방향 추정 결과
Fig. 7. Bearing estimation by the proposed spline interpolation model.

V. 결론

수차 모형을 가정하는 경우에, 기존에 제안된 칼만 필터를 이용한 2차원 배열 형상 추정 기법에서, 변위 측정 센서를 이용하는 경우의 문제점을 직선 모델을 이용한 방법과 곡선 모형을 이용한 스플라인 보간법을 사용하여 개선하였다.

칼만 필터를 이용한 2차원 배열 형상의 변위 추정에서, 기존의 방법은 무차원 주파수가 매우 작다는 가정하는 경우, x좌표의 총 길이를 배열의 길이로 사용하여 등간격으로 나눈 결과 값을 근사화 된 좌표값으로 사용하였다. 이것은 무차원 주파수가 증가함에 따라 반드시 오차를 발생시킨다. 직선 모델을 이용한 좌표 수정방법을 통하여 하이드로폰의 좌표 추정 오차가 감소하며, 또한 신호원의 방향 추정 오차도 감소함을 확인할 수 있었다. 하지만 직선 모델 방법은 무차원 주파수가 증가할수록 배열의 휘어진 곡선 부분에서 오차를 발생시키므로, 무차원 주파수가 1에 가까운 경우에도 직선 모델을 사용한 방법보다 하이드로폰의 좌표 추정 오차 및 방향 추정 오차를 더욱 감소시

킬 수 있는 곡선 모델을 이용한 스플라인 보간법을 사용하는 방법을 제안하였다. 하지만 이는 모두 수차 모델을 가정할 경우이므로 무차원 주파수가 1보다 큰 경우에도 적용 가능한 배열 형상 추정법 및 성능 개선 방법에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. B. E. Howard and J. M. Syck, "Calculation of the shape of a towed underwater acoustic array," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 17, pp. 193-203, April 1992.
2. D. A. Gray, B. D. O. Anderson, and R. R. Bitmead, "Towed array shape estimation using Kalman filters theoretical models," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 18, pp. 543-556, Oct. 1993.
3. J. L. Riley and D. A. Gray, "Towed array shape estimation using Kalman filters experimental investigations," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 18, pp. 572-581, Oct. 1993.
4. P. Felisberto and S. M. Jesus, "Towed-array beamforming during ships maneuvering," *IEE Proc.-Radar, Sonar, Navig.*, vol. 143, pp. 210-215, June 1996.
5. H. Bucker, "Beamforming a towed line array of unknown shape," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 63, pp. 1451-1454, May 1978.
6. D. E. Wahl, "Towed array shape estimation using frequency-wavenumber data," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 18, pp. 582-590, Oct. 1993.
7. B. G. Quinn, R. F. Barrett, P. J. Kootsookos and S. J. Searle, "The estimation of the shape of an array using a hidden Markov model," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 18, pp. 557-564, Oct. 1993.
8. J. H. Mathews and K.D. Fink, *Numerical Methods Using MATLAB*, Prentice Hall International Inc., 1999.

1986년 2월~현재: 국방과학연구소, 선임연구원, 팀장
 ※ 주관심분야: 수중음향신호처리, 수중추적신호처리, 음향탐지신호처리, 음향측정 및 분석기법

▲ 오 원 천(Won Tcheon Oh) 1956년 9월 7일생

1980년 2월: 고려대학교 전자공학과(학사)

1982년 2월: 고려대학교 대학원 전자공학과(석사)

1992년 2월: The Univ, of Texas at, Austin(박사)

Dept, Electrical and Computer Eng.

1982년 1월~현재: 국방과학연구소, 책임연구원, 팀장

※ 주관심분야: 소나신호처리, 음향표적 탐지 및 추적 기법, 고차 통계적 신호처리, 배열신호처리 및 적응빔형성기법

▲ 윤 대 희(Dae Hee Youn)

한국음향학회지 제 18권 제 17호 참조

▲ 이 충 응(Chung Yong Lee)

한국음향학회지 제 18권 제 17호 참조

▲ 박 민 수(Min Su Park) 1973년 10월 22일생



1997년 2월: 연세대학교 전자공학과
(공학사)

1999년 8월: 연세대학교 전자공학과
(공학석사)

1999년 9월~현재: 텔리맨 연구원

▲ 도 경 철(Kyeong Cheol Dho) 1958년 8월 6일생

1984년 2월: 부산대학교 전기기계공학과(학사)

1986년 2월: 부산대학교 전자공학과(석사)

1999년 8월: 부산대학교 전자공학과(박사)