

# 이동국 위치 추정을 위한 TOA와 TDOA방법의 비교 분석

윤현성\*, 이창호\*\*, 변건식\*\*\*

## Comparative Analysis of TOA and TDOA method for position estimation of mobile station

Hyun-Seung Yoon, Chang-Ho Lee, Kun-Sik Byon

### 요 약

본 논문은 휴대폰이나 PCS의 통신망 기반 구조를 사용하여 이동국의 위치 추정 시스템을 개발하는데 목적이 있다. 이동국의 위치 추정이 가능하게 될 때 도시 교통 관리, 119 긴급 구조, 범죄 수사, 환자 안전 보호 특히 치매 환자를 위한 서비스가 가능하게 된다. 본 논문은 기지국과 이동국의 위치를 나타내기 위해 전파 경로가 NLOS 환경일 경우 표준 잡음을 모델링 할 때 LOS 환경의 통계적 특성을 이용한다고 가정하였다. 우선 표준 잡음의 평균 표준 편차를  $\pm 150$ 으로 하여 측위 알고리즘인 TOA와 TDOA를 이용하여 위치 추정값을 비교 분석하고 Kalman filter를 이용해 표준 잡음을 제거한 후 측위 알고리즘을 이용하여 위치 추정값을 비교 분석하였다. 그리고 결과치를 smoothing 처리하여 비교 분석하였다. 표준 잡음을 제거하지 않은 경우에 비해 Kalman filter를 사용하여 표준 잡음을 제거하면 TOA에서는 51.2 m, TDOA에서는 34.8 m의 2차원 평균 위치 오차가 향상된 결과를 얻었다. 그 결과에 smoothing 기법을 이용하면 2차원 평균 위치 오차가 약 3 m 정도 개선됨을 확인하였다.

### Abstract

This paper is aimed at developing an location tracking system of mobile station based on currently

\* 동아대학교 대학원 전자공학과(공학 석사)

\*\* 동명정보대학교 정보공학부 겸임 교수

\*\*\* 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

접수일자 : 2000년 6월 16일

available mobile communication network of mobile phone and PCS(Personal Communication System). When the location tracking of mobile stations is in services, Emergency-119, all of crime investigation, effective urban traffic management and the safety protection of Alzheimer's patients can be available. In order to track the location of the mobile and base station, assumption in this paper is to use the statistic characteristics of LOS when modeling the standard noise in case that radio path is LNOS environment. The standard variation of the standard noise is  $\pm 150$ . First, location is estimated by the positioning algorithms of TOA and TDOA and compared each other. Second, after canceling the standard noise by Kalman filter, location is estimated by the above two positioning algorithms. Finally, the location by the Kalman filter and two positioning algorithms is estimated by smoothing method. As a result, 2 dimensional average location error is improved by 51.2m in TOA and 34.8m in TDOA when Kalman filter and two positioning algorithms are used, compared with the two positioning algorithms used. And there is 3 more meter improvement after smoothing than Kalman filter and two positioning algorithms used.

## I. 서 론

이동 통신 서비스에서 이동국 위치 확인 서비스는 119응급 서비스, 치매 환자를 위한 안전 보호, 도심지의 교통 관리, 범죄자 수사 등과 같은 다양한 분야에 사용할 수 있다.[1]

이동 통신 환경 하에서 이동국(MS : Mobile Station)과 기지국(BS : Base Station)은 서로간에 방해물이 전혀 없는 가시선 환경(LOS : Line of Sight)과 이동국과 기지국 사이에 방해물이 존재하는 비가시선 환경(NLOS : Non Line of Sight)으로 나눌 수 있다. 도심 환경과 같은 건물이 많은 밀집 지역에서는 이동국과 기지국간의 직선 경로를 가지지 못하고, 반사나 굴절로 인한 다중 경로(multipath)가 발생하여 전파의 전파 거리가 직선 경로보다 더욱 길게 된다. 이러한 오차를 NLOS로 차라고 하며 이러한 bias값을 예측해서 제거함으로써 보다 정확한 이동국의 위치를 추정할 수 있다.

일반적으로 기지국을 이용한 무선 측위 시스템에서의 위치 측정 방법은 크게 세 가지 방법으로 분류할 수 있다. BS에서 MS으로부터 보내온 신호의 도래각(AOA : Angle of Arrival)을 측정하여 BS를 기준으로 MS으로부터 오는 신호의 방향을 찾아내어 MS의 위치를 구하는 방법, BS와 MS사이의 전파 도달 시간(TOA : Time of Arrival)을 측정하는 방법과 두 개의 BS으로부터의 전파 도달 시간의 상대적인 차(TDOA : Time Difference

of Arrival)를 측정값으로 이용하는 방법으로 나눌 수 있다.[2]

본 논문에서는 NLOS 환경일 경우 표준 잡음을 모델링 할 때 LOS 환경의 통계적 특성을 이용할 수 있다는 가정 하에서, Kalman filter를 사용하여 에러를 보정한 TOA와 TDOA의 측위 알고리즘을 이용하여 위치 추정값을 비교 분석하였고 그 결과를 smoothing 처리하였으며 보상 후 비교 분석하였다.

## II. Kalman filter를 이용한 표준 잡음 추정과 smoothing

Kalman filter의 일반적인 성질은 랜덤 프로세스의 벡터 모델링이며, 측정 잡음 데이터의 순환 processing이다. 이러한 성질 때문에 이산적 잡음 데이터의 통계적 특성을 알고 있다면, 측정 잡음을 효과적으로 줄일 수 있다. [3]

표준 Kalman filter 모델링은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \phi_k x_k + w_k \\ z_{k+1} &= H_k x_k + v_k \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서

- $x_k$  : 시간  $t_k$ 에서의 프로세스 상태 벡터
- $\phi_k$  : 시간  $t_k$ 에서의 전이 행렬
- $w_k$  : 시간  $t_k$ 에서의 백색 잡음 벡터
- $z_k$  : 시간  $t_k$ 에서의 측정 벡터

$H_k$  : 시간  $t_k$ 에서의 연결 행렬

$v_k$  : 시간  $t_k$ 에서의 백색 잡음

은 통계적으로 독립이라고 가정한다.

$$\begin{aligned} E[W_k \cdot W_i^T] &= \begin{cases} Q_k & i=k \\ 0 & i \neq k \end{cases} \\ E[V_k \cdot V_i^T] &= \begin{cases} R_k & i=k \\ 0 & i \neq k \end{cases} \dots\dots\dots (2) \\ E[W_k \cdot V_i^T] &= 0 \end{aligned}$$

Kalman filter의 순환 루프는 그림 1과 같다.

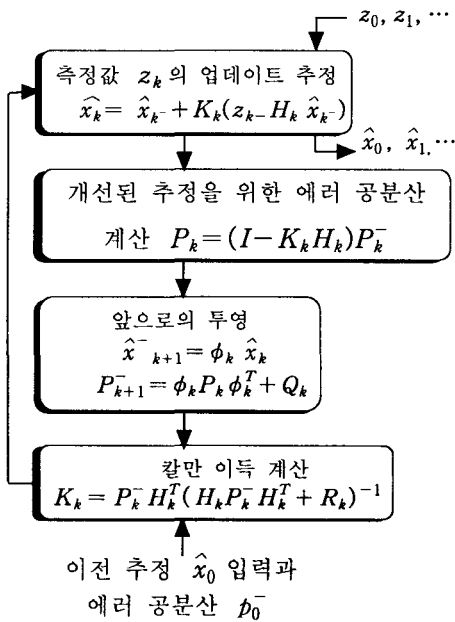


그림 1. Kalman filter의 루프  
Fig 1. Kalman filter loop

이동국의 운동 모델은 그림 2와 같이 속도가 random walk로 표현되는 운동 모델로 한다. 백색 잡음을 적분해서 얻은 표준 잡음 error의 통상 속도는 또 다른 적분을 통해 거리를 만든다. 따라서 속도의 적분은 측정 거리의 표준 잡음 오차를 만든다. 그림2는 속도에 대한 랜덤 walk모델이다.

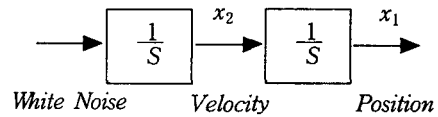


그림 2. 랜덤 워크 모델  
Fig 2. Random walk model

이 process의 벡터 미분 방정식은 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ u_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

여기서

$x_1$  : 이동국과 기지국간의 표준 경로 잡음

$x_2$  : 기지국에서 이동국으로의 이동 속도

$(\dot{x}_1, \dot{x}_2)$  :  $(x_1, x_2)$ 의 미분형

$u_2$  : 백색 가우시안 잡음

Kalman filter에 이 모델을 기초로 하면 필요한 변수는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad \phi = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ Q_p &= \begin{bmatrix} \frac{S_p \Delta t^3}{3} & \frac{S_p \Delta t^2}{2} \\ \frac{S_p \Delta t^2}{2} & S_p \Delta t \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4) \\ z &= [z], \quad H = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

$x_1$  : 거리,  $x_2$  : 움직임 속도

$\Delta t$  : 샘플링 시간,  $S_p$  : 백색 잡음 스펙트럼 진폭

$z$  : 이동국과 기지국간의 측정 거리

이 변수들을 식(3)에 대입해서 Kalman filter링 과정을 적용시키면 이동국의 위치 에러를 줄일 수 있다.

Kalman filter의 순환 루프를 나온 값들을 보다 더 좋은 추정치를 얻기 위하여 smoothing 처리하였다.

### Ⅲ. 시뮬레이션

이동국의 시나리오는 그림3과 같으며 이동국의 경로에 따른 속도 변화는 그림4와 같다.[2]

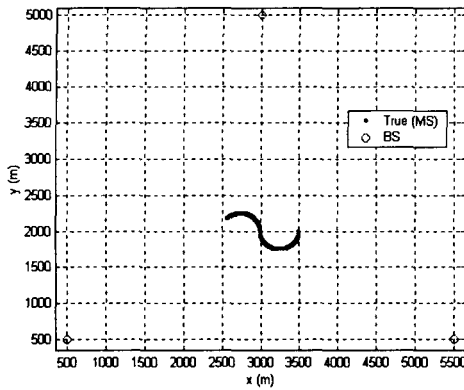


그림 3. 이동국의 시나리오  
Fig 3. course of MS

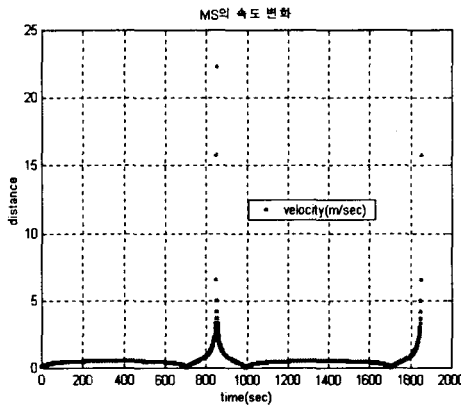


그림 4. 이동국 경로에 따른 속도 변화  
Fig 4. MS velocity by course variety

도심 환경에서 이동국과 기지국 사이의 측정 거리는  $r_m(t_i) = L_m(t_i) + n_m(t_i) + NLOS_m(t_i)$  이다.

여기서

$L_m$  : 직선거리  $n_m$  : 표준 잡음

$NLOS_m$  : NLOS 오차

$m=1, \dots, M \quad i=1, \dots, n-1$

$M$  : 기지국의 수  $n$  : 측정 데이터의 개수

실제의 직선거리를 구하기 위하여 우선 전파 환경에 따른 통계적 특성의 차이를 이용하여 측정 데이터가 NLOS 오차를 가지고 있는지 확인한 후 Kalman filter를 통해 표준 잡음을 줄이고 NLOS 오차를 제거하여 LOS 환경에서의 데이터로 변환

한다. 그 다음 단계에서 2차원 평면상에서 이동국의 위치를 찾는다.

NLOS 모델 식에 근거해서, 표준 잡음과 NLOS 에러 성분의 합은 Gaussian 잡음이라고 가정한다.

기지국 위치는 (500, 500), (3000, 500), (3000, 5000)이고 이동국 초기 위치는 (2570, 500) 이다.

측정 거리 데이터의 통계적 성질을 Kalman filter에 적용하기 위해  $\Delta t=1$ ,  $S_p=0.25$ ,  $R=150$ 를 선택했다

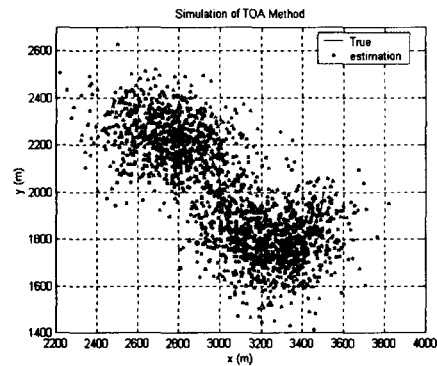


그림 5. TOA 알고리즘의 위치해  
Fig 5. Position solution of TOA algorithm

그림 5는 NLOS 환경 하의 위치 측정 데이터를 통계적 특성을 이용하여 LOS 환경의 데이터로 변환하여 GPS에서 사용하는 직접해로 이동국의 위치를 추정값이다.[4]

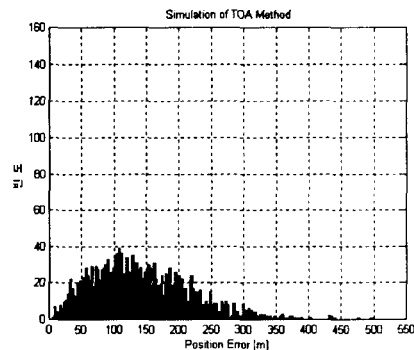


그림 6. TOA 위치해의 위치 오차 히스토그램  
Fig 6. Position error histogram of TOA position solution

그림 6은 그림 5의 이동국 위치 오차 히스토그램으로 이동국의 위치 오차가 약 400m 이내에 분포함을 알 수 있다.

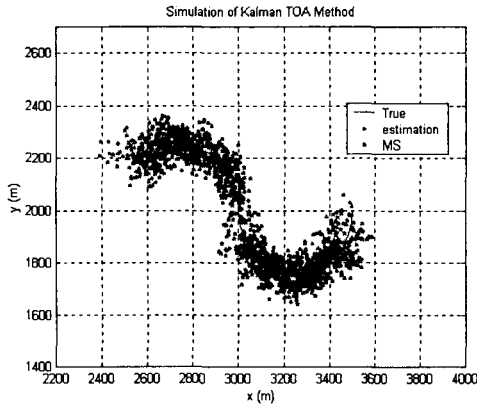


그림 7. Kalman filter를 이용한 TOA 알고리즘의 위치해

Fig 7. Position solution of TOA algorithm using Kalman filter

그림 7은 LOS 환경의 데이터로 변환 후 Kalman filter를 적용하여 표준 잡음 에러를 보정한 이동국의 위치를 추정값이다.

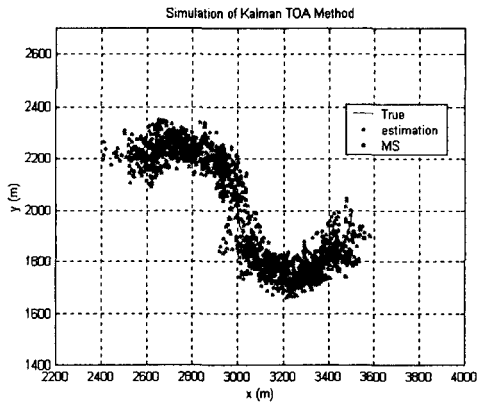


그림 8. smoothing 방법을 이용한 TOA 알고리즘의 위치해

Fig 8. Position solution of TOA algorithm using smoothing

그림 8은 Kalman filter를 적용하여 표준 잡음 에러를 보정하고 smoothing 처리한 후 이동국의 위치 추정값이다.

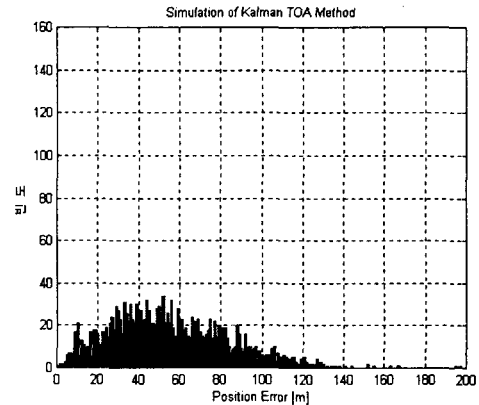


그림 9. Kalman filter를 이용한 TOA 알고리즘의 위치 오차 히스토그램

Fig 9. Position error histogram of TOA position solution using Kalman filter

그림 9는 그림 7의 이동국 위치 오차 히스토그램으로 이동국의 위치 오차가 약 140m 이내에 분포함을 알 수 있다.

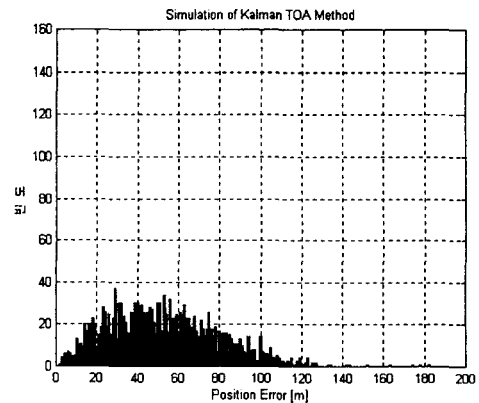


그림 10. smoothing 방법을 이용한 TOA 알고리즘의 위치 오차 히스토그램

Fig 10. Position error histogram of TOA position solution using smoothing

그림 10은 그림 8의 이동국 위치 오차 히스토그램으로 이동국의 위치 오차가 약 130m 이내에 분포함을 알 수 있다.

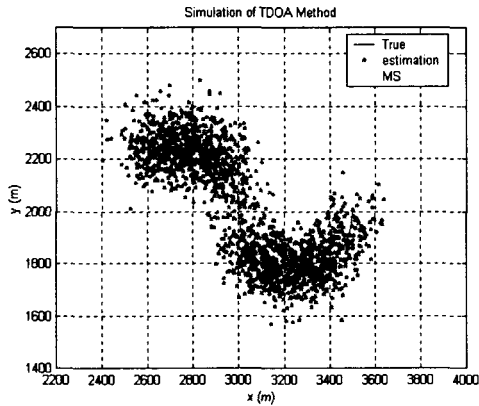


그림 11. TDOA 알고리즘의 위치해  
Fig 11. Position solution of TDOA algorithm

그림 11은 NLOS 환경 하의 위치 측정 데이터를 통계적 특성을 이용하여 LOS 환경의 데이터로 변환한 후 Chan이 제안한 방법으로 이동국의 위치 추정값이다.[2]

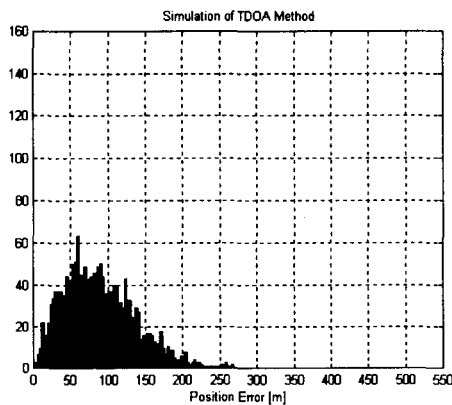


그림 12. TDOA 위치해의 위치 오차 히스토그램  
Fig 12. Position error histogram of TDOA position solution

그림 12는 그림 11의 이동국 위치 오차 히스토그램으로 이동국의 위치 오차가 약 270m 이내에

분포함을 알 수 있다.

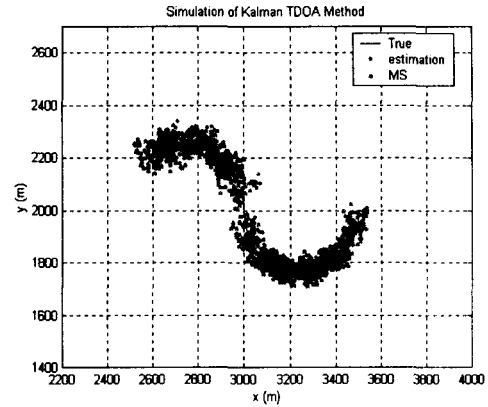


그림 13. Kalman filter를 이용한 TDOA 알고리즘의 위치해  
Fig 13. Position solution of TDOA algorithm using Kalman filter

그림 13은 LOS 환경의 데이터로 변환 후 Kalman filter를 적용하여 표준 잡음 에러를 보정한 후 이동국의 위치를 추정값이다.

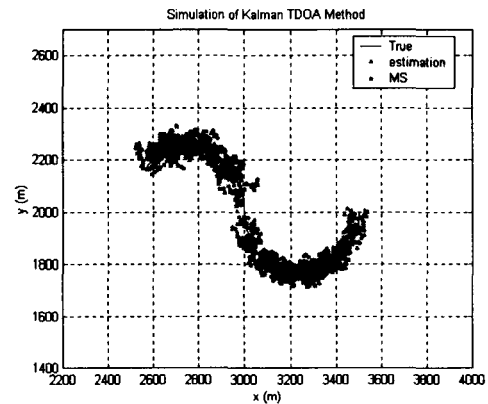


그림 14. smoothing 방법을 이용한 TDOA 알고리즘의 위치해  
Fig 14. Position solution of TDOA algorithm using smoothing

그림 14는 Kalman filter를 적용하여 표준 잡음 에러를 보정하고 이동국의 위치를 추정한 smoothing

처리한 위치 추정값이다.

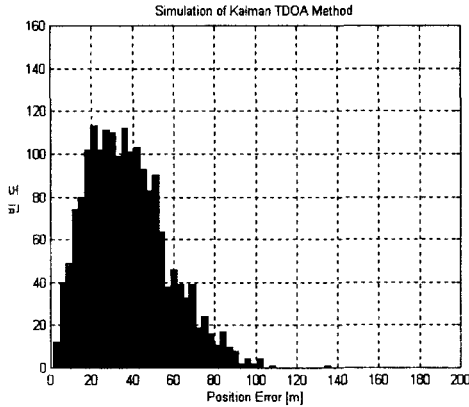


그림 15. Kalman filter를 이용한 TDOA 알고리즘의 위치 오차 히스토그램

Fig 15. Position error histogram of TDOA position solution using Kalman filter

그림 15는 그림 13의 이동국 위치 오차 히스토그램으로 이동국의 위치 오차가 약 110m 이내에 분포함을 알 수 있다.

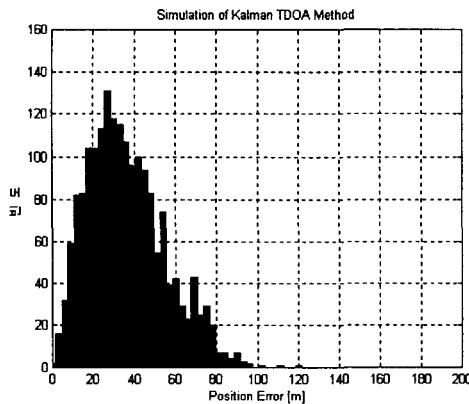


그림 16. smoothing 방법을 이용한 TDOA 알고리즘의 위치 오차 히스토그램

Fig 16. Position error histogram of TDOA position solution using smoothing

그림 16은 그림 14의 이동국 위치 오차 히스토그램으로 이동국의 위치 오차가 약 100m 이내에

분포함을 알 수 있다.

Matlab 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 작업을 하였다.

표 1. 위치해의 평균 오차값

Table 1. Mean error of position solution

단위(m)

	TOA	TDOA
측위 알고리즘	142.93	89.1880
Kalman filter + 측위 알고리즘	55.4043	37.3707
Kalman filter + 측위 알고리즘 + Smoothing	51.2083	34.8964

표 1은 TOA 방법과 TDOA 방법의 평균 위치 오차와 두 가지 위치 추정 방법에 Kalman filter를 적용했을 때의 2차원 평균 위치 오차 그리고 Kalman filter를 적용한 후 smoothing 처리한 2차원 평균 위치 오차를 나타내었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 기지국과 이동국의 전파 경로를 NLOS 환경으로 가정하고 TOA 방법과 TDOA 방법을 이용하여 이동국의 위치를 추정하였으며 표2에서 보는 바와 같이 두 가지 방법 중 TDOA 방법이 2차원 평균 위치 오차가 TOA 방법보다 약 50 m 정도 양호한 결과를 얻었다. Kalman filter를 사용하여 표준 잡음 에러를 제거한 경우에는 TOA에서 55.4 m과 TDOA에서 37.4 m으로 2차원 평균 위치 오차가 측위 알고리즘만을 사용한 경우보다 향상된 결과를 얻을 수 있으며 Kalman filter를 통과한 추정값에 다시 smoothing 처리한 경우 TOA와 TDOA 모두 평균이 약 3 m 정도 향상시킬 수 있었다.

이동국의 속도에 따른 위치 추정의 오차는 속도가 늦을수록 위치 오차가 작다는 것을 알 수 있었다.

앞으로 위치 오차를 개선하기 위해 TOA + TDOA, TOA + AOA 등의 하이브리드 방식을 적용한 위치 측정 알고리즘에 대한 연구가 필요할

것으로 보이며 또한 신경망을 이용한 위치 추정 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. Hellebrandt, R. Mathar and M. Scheibenbogen, "Estimation Position and Velocity of Mobiles in a Cellular Radio Network ", IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. 46, NO. 1, pp 65-71, Feb. 1997
- [2] Y. T. Chan, K. C. Ho, "A Simple and Efficient estimator for Hyperbolic location", IEEE Trans. on Signal processing, Vol .42 . NO .8. pp 1905-1915, Aug. 1994
- [3] R. G. Brown and P. Y. C. Hwang, "Introduction to Random Signals and Applied Kalman filtering", John Wiley & Sons, INC., pp.190-288, 1985
- [4] I. Biton, M. Koifman, Y. Bar-Itzhack, "Improved Direct Solution of Global Positioning System Equation", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 21, No. 1, pp.45-49. Jan-Feb. 1998.



윤 현 성(Hyun-Seung Yoon)  
2000년 2월 동아대학교 전기전  
자컴퓨터공학부 전자  
전공 졸업(공학사)  
2000년 3월 ~ 현재 동아대학교  
대학원 전자공학과  
(공학 석사)

\*관심 분야 : ITS, 항만 자동화



이 창 호(Chang-Ho Lee)  
1993년 2월 동아대학교 전자공  
학과 졸업(공학사)  
1995년 3월 포항공과대학교 정  
보통신대학원 졸업  
(공학 석사)

1995년 2월 ~ 1997년 9월 현대자동차 승용제품 개  
발 연구소 근무

1998년 3월 ~ 2000년 2월 현재 동아대학교 대학원  
전자공학과 박사 수료

2000년 3월 ~ 현재 동명정보대학교 정보공학부 겸  
임 교수

2000년 3월 ~ 현재 동아대학교 정보기술연구소 특  
별 연구원

\* 관심 분야 : ITS, 항만 자동화



변 건 식(Kun-Sik Byon)  
1972년 2월 한국 항공대학교 항  
공전자공학과(공학사)  
1980년 2월 동아대학교 대학원  
전자공학과(공학석사)  
1987년 2월 영남대학교 대학원  
전자공학과(공학박사)

1977년 3월 ~ 1980년 2월 동의공업대학 전자공학  
과 조교수

1989년 9월 ~ 1990년 8월 국립 요코하마대학교 정  
보통신학과 객원 교수

1980년 2월 ~ 현재 동아대학교 전기전자컴퓨터공  
학부 교수