

실시간 정밀측위를 위한 AFM 알고리즘의 성능개선에 관한 연구

The advanced Algorithm of Ambiguity Function Method for Realtime Precise GPS Positioning

김용일* · 김동현**

Kim, Yong-Il · Kim, Dong-Hyun

요 旨

AFM은 반송파 위상을 이용하는 GPS 정밀측위에서 일반적으로 문제가 되는 초기미지정수와 cycle-slip에 영향을 받지 않는 기법이다. 그러나 기존의 AFM 알고리즘에는 두 가지의 어려움이 있다. 첫째, 최적의 수신기 위치를 구하기 위한 계산시간이 너무 길다는 점이다. 둘째, 검색공간 내에 최적의 수신기 위치로 선정이 가능한 후보가 많을 수 있다는 점이다. 따라서 기존의 AFM 알고리즘이 갖는 단점을 개선하여 OTF의 환경에 적용할 수 있도록 계산시간을 획기적으로 단축시키는 새로운 알고리즘이 본 논문에서 제시되었다. 또한 결정된 최적의 수신기 위치의 진위 여부를 통계적으로 검정하는 알고리즘이 제시되었다.

ABSTRACT

The AFM (Ambiguity Function Method) is insensitive to the integer ambiguity and the presence of cycle slips in the carrier phase observations. But there are two significant problems with using the AFM to determine GPS baselines. The first problem is the long computation time required to determine the optim position. The second problem is that there may be sever maxima points that the AFM gorithm must discriminate between within the search volume in order to identify the optim position. A new gorithm which enables the AFM to be applied to the OTF (On-the-Fly) environments by significantly shortening the computation time is proposed in this paper. In addition to it, sever statistic procedures which verify whether the optim position is true or not are proposed.

1. 서 론

GPS 반송파의 위상측정값을 이용하여 mm 수준의 정밀측위를 수행하는 정지측위기법(static surveying)이 제시된 것은 VLBI(Very Long Baseline Interferometry)에 관한 연구로부터 비롯되었고, 이러한 GPS 정지측위가 성공적으로 적용되기 시작한 것은 1980년대 초에 Counselman, Bossler, MacDoran 등에 의해서이며, 그 후 80년대 중반에 Remondi와 Goad에 의하여 다양한 GPS 정지측위 프로그램들이 개발되면서 본격적으로 GPS 정밀측위가 실용화되기 시작하였다.¹⁾ 또한 이 시기에 Remondi²⁾에 의해 이동측위기법(kinematic surveying)이 제시되면서 GPS 정밀측위의 영역이 급속히 확대되었으

며, 정지측위기법의 단점인 낮은 생산성을 극복하게 되었다. 일반적으로 GPS 정밀측위를 위하여 반송파의 위상측정값을 이용할 경우 위성-수신기간의 거리에 대한 반송파 위상의 정수 cycle 수인 초기미지정수(integer ambiguity)와 수신되는 신호가 차단되는 현상인 cycle-slip을 해결해야 한다. 정지측위기법들은 이러한 두 가지 문제점을 수신기가 정지한 상태로 1~2시간 동안 관측을 수행하고 특별한 cycle-slip 보정기법을 이용함으로써 해결하고 있지만, 초기의 이동측위기법에서는 수십분 동안의 정지관측만으로도 초기미지정수를 구할 수가 있게 되었다. 그러나 수신기가 이동중인 상태에서의 cycle-slip에 대해서는 별다른 해결책이 없었다. 따라서 이후의 연구는 주로 이동중인 상태에서 초기미지정수와 cycle-slip을 해결하는 기법의 개발에 집중되었으며, 이를 OTF(On-The-Fly)라고 한다. 현재까지 제시된

* 서울대학교 도시공학과 조교수
** 서울대학교 도시공학과 박사과정

OTF의 알고리즘은 크게 4가지 영역으로 구분되고 있는데, 첫째는 Hatch,³⁾ Wubbena,⁴⁾ Blewitt,⁵⁾ Aidin & Wells,⁶⁾ Goad,⁷⁾ Dedes & Goad,⁸⁾ 등에 의해 연구가 이루어진 코드역사거리를 이용하는 방법이다. 둘째는 Counselman & Gourevitch,⁹⁾ Remondi,¹⁰⁾ Mader,¹¹⁾ Han & Rizos¹²⁾에 의해 주로 연구가 진행된 AFM(Ambiguity Function Method)이다. 셋째는 Loomis,¹³⁾ Hwang,¹⁴⁾ Hatch,¹⁵⁾ Erickson¹⁶⁾에 의해 연구가 진행된 LSAST(Least Squares Ambiguity Search Technique)이다. 넷째는 추정된 초기미지정수의 공분산행렬을 이용하는 기법들로서, Frei & Beutler¹⁷⁾에 의해 제시된 FARA(Fast Ambiguity Resolution Approach), Euler & Landau¹⁸⁾에 의해 제시된 cholesky decomposition 기법, Chen¹⁹⁾에 의해 제시된 FASF(Fast Ambiguity Search Filter), Teunissen²⁰⁾이 제시한 LAMBDA(Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment), Wei & Schwarz²¹⁾에 의한 DIAS(Direct Integer Ambiguity Search), Li²²⁾에 의해서 제시된 genetic 알고리즘을 이용하는 방법 등이 있다. 이러한 일련의 연구성과들 중에서 Counselman & Gourevitch⁹⁾에 의하여 제시된 AFM은 cycle-slip과 초기미지정수에 영향을 받지 않는 기법으로 다음과 같은 이유로 여전히 관심의 대상이 되고 있다. AFM을 GPS 기선측정에 이용할 경우 일반적으로 두 가지의 어려움이 있다. 첫째는 최적의 수신기 위치를 결정하기 위해서는 측정되는 반송파 위상의 파장 보다 작은 크기의 검색격자(searching grid)가 형성되어야 하기 때문에 계산시간이 매우 길다는 점이다. 두 번째 어려움은 AFM 알고리즘으로 계산되는 최적의 수신기위치 후보가 많을 수 있다는 점이다. 따라서 여러 후보들 중에서 최적의 해를 구분해 내기가 어렵다. 본 논문은 이러한 어려움을 해결하기 위한 새로운 알고리즘을 제시하고 있다. 계산시간의 단축을 위해서는 우선 추정된 수신기의 초기위치의 정확도를 높여야 한다. 추정된 초기위치의 정확도가 높을 경우 검색공간을 줄일 수 있기 때문에 계산시간을 단축시킬 수 있다. 본 논문에서는 이에 대해서는 상세한 검토를 생략하고, 대신 어느 특정한 한 방법으로 초기위치를 추정하는 경우를 상정하고 동일한 조건에서 계산속도를 높이는 알고리즘에 대한 검토를 수행하였다. 계산속도의 향상을 위한 방법으로 기존의 단차분모형을 이용하는 대신 이중차분모형을 이용하는 방법이 검토되었다. 계산시간을 줄이기 위한 또다른 방법으로 최적화된 검

색공간을 형성하는 새로운 방법을 제시하였다. 참값을 포함하는 최적화된 검색공간은 계산시간의 최적화를 의미한다. 검색공간을 형성하는 가장 단순한 방법은 3차원 좌표계에서 각 축방향으로 일정한 검색범위를 설정함으로써 육면체의 검색공간을 만드는 것이다. 이 방법보다 개선된 것으로는 추정된 초기위치의 공분산행렬을 이용하여 좌표축의 변환을 수행하여 타원체 공간을 형성하는 것이다. 가장 높은 효율로 검색공간을 줄이는 방법은 위치영역(position domain)에서의 검색공간을 주파수영역(frequency domain)으로 변환하는 것이다. 본 논문에서 제시된 방법은 주파수영역에서 표준거리에 제한받는 타원체공간을 형성하는 것이다. 두 번째 문제점에 대하여 본 논문에서 제시한 해결책은 여러 개의 참값 후보들 중에서 참값을 통계적으로 구분해 낼 수 있는 새로운 알고리즘이다. 이는 잔차분석을 통한 카이제 곱검정과 비율검사(ratio test)를 이용하여 참값의 진위 여부를 통계적으로 확인하는 절차로서 기존의 AFM이 갖는 한계를 극복하는 알고리즘이다.

2. AFM을 이용한 위치결정 알고리즘

일반적으로 AFM을 이용하여 미지의 수신기 위치를 계산하기 위해서는 다음과 같은 두 수신기에서 측정된 반송파 위상의 단차분모형을 이용한다.

$$\Phi_{AB}^j(t) = -2\pi\phi_{AB}^j(t) = \frac{2\pi}{\lambda}\rho_{AB}^j(t) + 2\pi N_{AB}^j - 2\pi\delta_{AB}(t) + 2\pi\omega_{AB}^j(t) \quad (2-1)$$

- 여기서, 윗첨자 j: 위성 식별자
- 아래첨자 A, B: 수신기 식별자
- λ, f : 위성신호의 표준파장, 주파수
- ϕ : 측정된 누적위상수
- N: 미지정수
- δ : 수신기에 공통인 오차
- ω : 관측되는 위성에 의존하는 오차

식(2-1)은 라디안 단위로 표현되어 있으며, 식에서는 두 수신기 A, B에 공통인 오차, 즉, 수신기시계의 편차량 및 수신기의 신호측정잡음을 나타내며, 는 대류권 및 전리층 신호전달지연량, 위성궤도 편차량, 다중경로 오차 등과 같이 관측되는 위성에 따라 영향이 달라지는 오차를 나타낸다. 수신기식별자 A, B에서 A는 위치를

알고 있는 지점이며, B는 구해야 할 수신기의 위치를 나타낸다. 만약 B의 위치를 사전에 추정할 수 있다면 식(2-1)은 다음과 같이 변형된다.

$$\Phi_{AB}^j(t) - \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) = 2\pi N_{AB}^j - 2\pi f \delta_{AB}^j(t) + 2\pi \omega_{AB}^j(t) \quad (2-2)$$

따라서 식(2-2)의 좌변은 기지의 값이 되며, 우변은 미지값의 항들로 구성되어 있다. 그런데 우변항 중에서 N은 정수이므로 식(2-2)를 다음과 같이 웨이저(phasor)로 표현한다면 N을 소거할 수 있다.

$$\begin{aligned} e^{j\{\Phi_{AB}^j(t) - \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{AB}^j(t)\}} &= e^{j\{2\pi N_{AB}^j - 2\pi f \delta_{AB}^j(t) + 2\pi \omega_{AB}^j(t)\}} \\ &= e^{j2\pi N_{AB}^j} e^{j\{-2\pi f \delta_{AB}^j(t) + 2\pi \omega_{AB}^j(t)\}} \end{aligned} \quad (2-3)$$

식(2-3)에서 N이 소거되는 이유는 다음과 같다.

$$e^{j2\pi N_{AB}^j} = \cos(2\pi N_{AB}^j) + j \sin(2\pi N_{AB}^j) = 1 \quad (2-4)$$

또한 식(2-2)의 우변항 중에서 두 수신기에 공통인 오차는 다음과 같은 과정으로 소거할 수 있다. 우선 epoch k에서 관측되는 모든 위성에 대하여 식(2-3)의 값을 합하면 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^{n_k} e^{j\{\Phi_{AB}^j(t) - \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{AB}^j(t)\}} = e^{-j2\pi f \delta_{AB}^j(t)} \sum_{j=1}^{n_k} e^{j2\pi \omega_{AB}^j(t)} \quad (2-5)$$

다음으로 식(2-5)의 양변에 norm을 취하면 다음의 관계가 성립된다.

$$\begin{aligned} \left\| \sum_{j=1}^{n_k} e^{j\{\Phi_{AB}^j(t) - \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{AB}^j(t)\}} \right\| &= \left\| e^{-j2\pi f \delta_{AB}^j(t)} \sum_{j=1}^{n_k} e^{j2\pi \omega_{AB}^j(t)} \right\| \\ &= \left\| e^{-j2\pi f \delta_{AB}^j(t)} \right\| \left\| \sum_{j=1}^{n_k} e^{j2\pi \omega_{AB}^j(t)} \right\| \quad (2-6) \\ &= \sum_{j=1}^{n_k} \left\| e^{j2\pi \omega_{AB}^j(t)} \right\| \leq n_k \end{aligned}$$

식(2-6)의 부등식에서 등호의 성립은 단차분된 오차가 무시할 수 있을 만큼 작다고 가정될 때이다. 일반적으로 이러한 가정은 단기선(대략 10~15 km 이내)에서만 타당하다. 식(2-6)에서 공통오차가 소거되는 이유는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left\| e^{-j2\pi f \delta_{AB}^j(t)} \right\| \\ = \left\| \cos\{2\pi f \delta_{AB}^j(t)\} + j \sin\{2\pi f \delta_{AB}^j(t)\} \right\| = 1 \end{aligned} \quad (2-7)$$

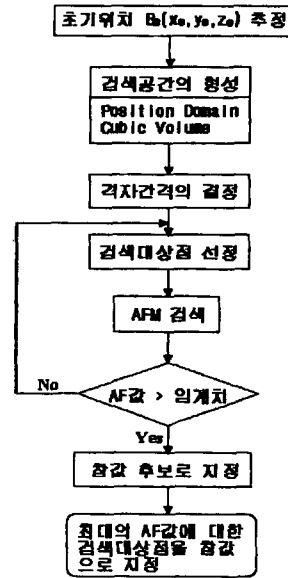


그림 1. AFM 검색과정

이상의 과정을 이용하여 미지의 수신기 위치는 그림 1과 같이 결정된다. 즉, 어느 순간의 측정값을 이용하여 수신기 B의 초기위치 B_0 를 추정하고, 일정한 검색범위를 형성한 다음 그 범위에 속해 있는 임의의 좌표 b 를 식(2-6)의 좌변에 대입하였을 경우 참위치에 한하여 우변의 값 n_k 가 주어진다. 실제로는 참위치를 대입할지라도 위상측정값에 포함된 오차 ω 로 인하여 식(2-6)의 좌변값은 n_k 보다 작은 값을 나타낸다. 따라서 계산된 좌변값에 대하여 사전에 결정된 임계치를 초과하는 참위치 후보들 중에서 가장 큰 값을 참위치로 결정하게 된다.

지금까지 설명된 AFM의 특징은 다음과 같다. 첫째, 미지의 수신기 위치를 구하는데 미지정수 N을 이용할 필요가 없으며, 둘째, cycle-slip이 발생해도 참값의 수신기 위치를 결정하는데 아무런 영향이 발생하지 않는다. 이는 AFM이 웨이저를 이용하므로 정수 특성을 주는 모든 인자가 소거되기 때문이다. 즉, cycle-slip이 발생할 경우 측정된 위상값에 임의의 크기의 정수가 더해지는 것이므로 AFM에서는 아무런 영향을 주지 않는다. 셋째, 두 수신기에 공통인 오차도 전혀 영향을 미치지 못한다. 이러한 특징에도 불구하고 AFM은 일반적으로 계산속도가 느리다는 단점을 가지고 있다. 또한 참값의 수신기 위치의 결정에 대한 통계적 신뢰수준을 제공하지 못한다. 따라서 AFM에 관련된 연구는 주로 계산속도의 향상과 계산결과의 신뢰성에 대한 지표의

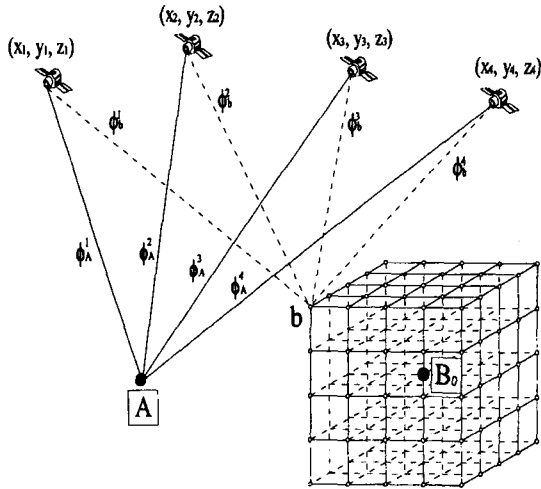


그림 2. AFM 처리과정 개념도

개발에 관한 것이다. 계산속도의 향상을 위해서는 계산 과정의 효율성을 높이고 참위치 후보의 검색공간을 최소화하는 알고리즘이 필요하다. 또한 계산결과에의 신뢰성 지표를 구하기 위해서는 카이제곱검사와 비율검사 (ratio test)를 수행할 수 있도록 알고리즘을 변형시켜야 한다.

3. AFM 성능향상을 위한 알고리즘의 개선

AFM의 최대 약점인 계산속도를 향상시키기 위해서는 보다 효율적인 계산과정과 검색공간을 최소화하는 알고리즘이 필요하다. 또한 기존의 AFM에서 참값을 결정하는 과정의 불합리성을 해결하기 위해서는 계산 과정에서 주어지는 통계치들을 이용하여 참값의 여부를 검정하는 절차가 고려되어야 한다. 이와 같은 사항들을 고려하여 본 논문에서 제시된 개선 알고리즘은 다음과 같다.

3.1 계산과정의 효율화

식(2-6)은 계산과정상 두 가지의 단점을 지니고 있다. 첫째는 관측되는 모든 위성에 대하여 단차분값의 cosine과 sine을 구해야 하는 것이며, 둘째는 계산된 cosine과 sine의 norm을 계산해야 하는 것이다. 이러한 단점은 웨이저의 허수항, 즉, sine을 계산하지 않는 방법을 고려함으로써 해결할 수 있다. 이는 이중차분을 이용하여 식(2-2)에서 표현된 두 수신기의 공통 오차항

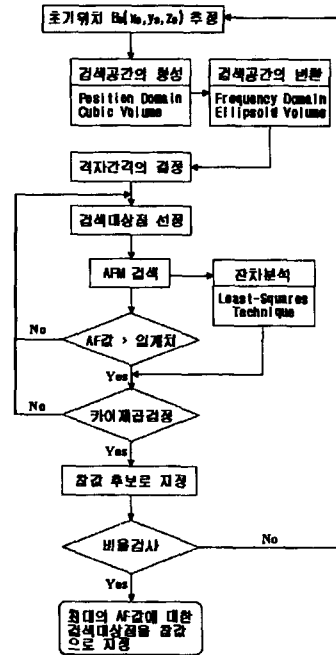


그림 3. 제안된 AFM 검색과정

을 소거함으로써 가능해진다.

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{AB}^{jh}(t) + 2\pi N_{AB}^{jh} + 2\pi\omega_{AB}^{jh}(t) \quad (3-1)$$

식(3-1)은 이중차분식을 나타내며, 윗첨자 h는 j와 마찬가지로 위성 식별자를 나타낸다. 이 식을 웨이저로 나타내어 N을 소거하면 다음과 같다.

$$e^{i(\Phi_{AB}^{j}(t) - \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{AB}^{jh}(t) - 2\pi\omega_{AB}^{jh}(t))} = e^{i2\pi N_{AB}^{jh}} = 1 \quad (3-2)$$

식(3-2)에서 이중차분된 오차는 의도적으로 좌변으로 이항시켰으며, 그 결과 식의 우변값이 실수가 되므로 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\cos \left\{ \Phi_{AB}^{jh}(t) - \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{AB}^{jh}(t) - 2\pi\omega_{AB}^{jh}(t) \right\} = 1 \quad (3-3)$$

여기서 식(3-2)의 좌변의 sine항이 0이 됨을 이용하여 식(3-3)을 변형시키면 다음과 같다.

$$\cos \left\{ \Phi_{AB}^{jh}(t) - \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{AB}^{jh}(t) \right\} = \leq 1 \quad (3-4)$$

식(3-4)에서 등호의 성립은 식(2-6)에서와 마찬가지로

로 이중차분된 오차 ω 가 무시할 수 있을 만큼 작다고 가정될 때이다. Epoch k 에서 관측되는 모든 위성 n_k 에 대하여 식(3-4)를 적용하여 합하면 다음의 관계가 성립된다.

$$\sum_{j=1}^{n_k-1} \cos \left\{ \Phi_{AB}^{jh}(t) - \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{AB}^{jh}(t) \right\} \quad (3-5)$$

식(3-5)는 식(2-6)에 비해 월등한 계산효율을 지닌 식이다. 즉, 식(2-6)에서와 같은 sine항과 norm을 계산할 필요가 없어졌다. 이 식은 또다른 면에서 계산효율을 향상시킬 수 있는데, 이는 epoch k 에서 관측되는 모든 위성에 대하여 각각 cosine을 계산할 때마다 식(3-4)의 계산값에 대한 임계치를 설정함으로써 가능해진다. 즉, 각 위성에 대한 식(3-4)의 계산값이 설정된 임계치보다 작다면 나머지 위성에 대한 계산을 수행할 필요가 없이 다음의 검색위치에 대한 계산을 진행할 수 있다.

3.2 검색공간의 최적화

Remondi¹⁰⁾는 추정된 수신기의 초기위치에 대하여 $4\sigma_x$, $4\sigma_y$, $4\sigma_z$ 의 직육면체 검색공간을 제시하였으며, 검색공간 내에서의 검색대상점은 0.25-0.33의 간격으로 형성된 격자점을 사용하였다. Mader¹¹⁾의 경우는 각 좌표축에 대하여 1m의 검색공간을 제시하였으며, 2cm의 격자간격을 사용하였다. Han¹²⁾의 경우는 사용하는 반송파의 종류에 따라 서로 다른 크기의 검색공간과 격자간격을 실험적으로 결정한 후, 2주파의 반송파를 모두 이용할 수 있는 경우에 검색속도를 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 이들 모두에게서 공통적인 점은 검색공간이 위치영역에서 결정된다는 점이다. 즉, 추정된 초기위치를 중심으로 일정한 범위의 3차원 검색공간을 설정하고, 검색공간을 일정한 크기의 격자로 분할하고 있다. 이 경우 격자의 간격이 클수록 검색대상점의 수가 적어져 계산효율이 향상되지만 참값의 수신기위치가 설정된 검색대상점에 포함되지 않을 수 있으므로 적절한 크기의 격자간격을 사용해야 한다. 따라서 격자간격의 설정에는 임의성이 개입되며, 절대적인 기준이 주어지지 않는다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 검색공간을 주파수영역으로 결정하는 것을 생각할 수 있다. 이 경우 격자간격이 사용되는 반송파의 파장단위로 결정되므로 비교적 큰 격자간격으로 인하여 검색대상점의 수

가 적어진다. 또한 격자간격의 설정에 임의성이 배제된다. 검색공간을 주파수영역으로 변환하기 위해서는 다음의 과정을 거친다.

$$\left\| \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_{0x} \\ B_{0y} \\ B_{0z} \end{bmatrix} \right\| \leq m_\alpha \begin{bmatrix} \sigma_{B_x} \\ \sigma_{B_y} \\ \sigma_{B_z} \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

식(3-6)은 추정된 수신기의 초기위치 B_0 를 중심으로 형성된 육면체의 검색범위를 나타내며, m_α 는 유의수준 α 에 대한 신뢰계수를 나타낸다. 즉, 5%의 유의수준에 대해서 m_α 는 1.95가 적용된다. 이 식은 위치영역으로 표현된 검색공간이며, 이를 주파수영역으로 변환하기 위해서는 육면체의 8개 꼭지점과 수신기의 초기위치의 좌표를 식(3-1)에 대입하여 N 을 결정해야 한다. 이 때, 주파수영역의 차원은 3으로 한다. 이중차분모형에서 수신기의 위치를 결정하기 위해서는 3개의 이중차분된 측정값으로 충분하기 때문이다.

$$N_{AB}^{jh} = \text{round} \left\{ \frac{1}{2\pi} \Phi_{AB}^{jh}(t) - \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jh}(t) \right\} \quad \left[\begin{matrix} j=1 \\ h=2,3,4 \end{matrix} \right] \quad (3-7)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} N_{AB}^{12} \\ N_{AB}^{13} \\ N_{AB}^{14} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_{AB_0}^{12} \\ N_{AB_0}^{13} \\ N_{AB_0}^{14} \end{bmatrix} \right\| \leq \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

식(3-7)에서 round()는 가장 가까운 정수값을 의미하는 연산자이고, 식(3-8)에서 β 는 각각의 이중차분된 미지정수에 대하여 결정된 정수의 검색범위를 나타낸다. 식(3-8)은 이중차분된 미지정수를 직교축으로 하는 육면체 검색공간을 나타내며, 일반적으로 위치영역에서의 격자간격보다 큰 격자간격의 적용으로 인하여 검색대상점이 줄어든다. 그러나 식(3-8)로 표현된 각각의 미지정수는 서로 독립적이지 않고 상관되어 있으므로 보다 최소화된 검색공간의 결정을 위해서는 계산된 각각의 미지정수의 통계치를 이용하여 다음과 같은 타원체의 검색공간을 형성하는 것이 타당하다.

$$\begin{aligned} & (N_{AB}^{jh} - N_{AB_0}^{jh})^T \sum_{N_{AB_0}^{jk}}^{-1} (N_{AB}^{jh} - N_{AB_0}^{jh}) < \chi_{(3,1-\alpha)}^2 \\ & \sum_{N_{AB_0}^{jk}} = \frac{1}{\lambda^2} A \sum_{B_0} B_0^T + \frac{1}{4\pi^2} \sum_{AB} \Phi_{AB}^{jk} \end{aligned} \quad (3-9)$$

여기서, a : 유의수준

\sum_{B_s} : 추정된 수신기위치의 공분산행렬
 $\sum_{\Phi_{AB}^{jh}}$: 이중차분된 위상측정값의 공분산
 행렬

$$A = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]^T$$

$$a_i = \left[\left(\frac{x_o - x^k}{\rho_{AB_s}^k} \right) - \left(\frac{x_o - x^i}{\rho_{AB_s}^i} \right) \left(\frac{y_o - y^k}{\rho_{AB_s}^k} \right) - \left(\frac{y_o - y^i}{\rho_{AB_s}^i} \right) \right. \\ \left. \left(\frac{z_o - z^k}{\rho_{AB_s}^k} \right) - \left(\frac{z_o - z^i}{\rho_{AB_s}^i} \right) \right]$$

이 때, 식(3-9)에 적용할 미지정수의 조합은 다음의 제한식을 이용하여 형성한다.

$$|N_{AB}^{jh} - N_{AB_s}^{jh}| \leq m_\alpha \rho_{N_{AB_s}^{jh}} \begin{cases} j=1 \\ h=2,3,4 \end{cases} \quad (3-10)$$

식(3-10)에서 m_α 는 유의수준에서의 신뢰계수를 나타내며, 는 추정된 미지정수의 표준편차이다.

3.3 참값에 대한 검정절차

기존의 AFM을 이용하여 참값의 수신기 위치 B 를 결정하는 과정은 검색대상점들 중에서 식(2-6)에 의하여 계산된 값이 임의로 설정된 임계치를 넘는 것을 참값의 후보로 지정하고, 이들 중에서 가장 높은 값을 갖는 검색대상점의 위치를 참값으로 지정하는 것이다. 이러한 과정이 갖는 문제점은 임계치 설정에 명백한 기준을 두기가 어려우며, 식(2-6)에 의해 계산된 값이 단차분된 오차 ω 로 인하여 영향을 받으므로 가장 높은 값이 참값이 아닐 가능성이 내재한다는 것이다. 계산효율을 월등히 향상시킨 식(3-5)를 적용할 경우도 동일한 문제점을 갖는다. Han¹²⁾의 경우 식(2-6)의 임계치를 n_x 의 95%로 설정하고 있으며, Mader¹¹⁾의 경우 식(3-4)의 임계치를 0.7로 하고 있다. 물론 이들의 경우 나름대로의 통계적 의미를 지니고 있으나, 차분된 위상측정값에 포함되어 있는 오차에 의해 이들 기준은 의미를 잃게 된다. 즉, 의 영향이 무시될 수 있는 단기선의 경우에는 이들 기준이 유효하지만 대략 15 km 이상의 장기선의 경우에는 로 인하여 참값은 임계치를 통과하지 못하고

오히려 참값이 아닌 검색대상점이 임계치를 통과하여 참값으로 결정될 가능성이 높아진다. 따라서 의 영향을 고려한 임계치의 설정 기준이 필요하며, 참값에 대한 통계적 검정과정이 제시되어야 한다.

3.3.1 미지정수 조합의 결정

미지정수 조합 중에서 3개는 독립적이고 나머지는 종속적이라는 사실을 이용하면, 식(3-10)에서 이미 결정된 각각의 기본위성군의 미지정수 조합에 대하여 보조위성군의 미지정수 조합이 다음과 같은 순차적 최소제곱조정 과정으로 쉽게 결정할 수 있다.

$$v_c = \frac{1}{\lambda} A_c \delta x - w_c$$

$$v_c = \begin{bmatrix} v_p \\ v_s \end{bmatrix} \quad A_c = \begin{bmatrix} A_p \\ A_s \end{bmatrix} \quad w_c = \begin{bmatrix} w_p \\ w_s \end{bmatrix} \quad P_c = \begin{bmatrix} P_p & 0_p \\ 0 & P_s \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

여기서, v : 잔차

$$w = I_{AB}^{jh} - N_{AB}^{jh}, \quad I_{AB}^{jh} = \frac{1}{2\pi} \Phi_{AB}^{jh}(t) - \frac{1}{\lambda} \rho_{AB_s}^{jh}(t) \\ P = \sigma_0^2 \sum_{AB}^{jh-1}$$

또한 아래첨자 c 는 전체 위성에 대한 식별자이며, p 와 s 는 각각 기본위성군과 보조위성군에 대한 식별자이다. 식(3-10)의 기본위성군의 미지정수조합에 대한 초기추정위치 B_0 의 변동량 δx^* 를 구하면 다음과 같다.

$$\hat{w}_p = \frac{1}{2\pi} \Phi_{AB}^{jh}(t) - \frac{1}{\lambda} \rho_{AB_s}^{jh}(t) - N_{AB}^{jh} \begin{cases} j=1 \\ h=2,3,4 \end{cases} \\ \delta x^* = (A_p^T P_p A_p)^{-1} A_p P_p \hat{w}_p \quad (3-12)$$

보조위성군의 미지정수 조합은 식(3-12)의 기본위성군의 초기위치 변동량을 이용하여 다음과 같이 결정된다.

$$N_{AB}^{jh} = \text{round} \left\{ \frac{1}{2\pi} \Phi_{AB}^{jh}(t) - \frac{1}{\lambda} \rho_{AB_s}^{jh}(t) - A_s \delta x^* \right\} \\ \begin{cases} j=1 \\ h=2,3,4 \end{cases} \quad (3-13)$$

식(3-13)은 기본위성군의 미지정수 조합에 의해 결정되는 수신기의 위치에서의 보조위성군의 미지정수 조합을 의미하며, 보조위성군에 대한 미지정수의 검색이 필요 없으므로 계산처리의 효율을 높이는 역할을 한다. 보조위성군으로 인한 초기추정위치의 변동량 δx 는 다

음과 같이 계산된다.

$$\hat{w}_p = \frac{1}{2\pi} \Phi_{AB}^{jh}(t) - \frac{1}{\lambda} \rho_{AB_s}^{jh}(t) - N_{AB}^{jh} \begin{cases} j=1 \\ h=5, \dots, n_k \end{cases}$$

$$\Delta x = (A_p^T P_p A_p + A_s^T P_s A_s)^{-1} A_s^T P_s (\hat{w}_s - A \delta x^*) \quad (3-14)$$

3.3.2 적합성검정

식(3-12)와 (3-14)로부터 전체적인 초기추정위치의 변동량과 최소제곱조정된 잔차를 구하면 다음과 같다.

$$\hat{\delta x} = \delta x^* + \Delta x$$

$$\hat{v}_c = A_c \hat{\delta x} - \hat{w}_c \quad (3-15)$$

검색대상점이 참값의 후보가 되기 위해서는 식(3-15)의 최소제곱조정된 잔차로부터 추정된 후 분산(a posteriori variance)을 이용하여 카이제곱검정을 수행해야 한다.

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{v}_c^T P_c \hat{v}_c}{n_k - 4} \quad (3-16)$$

식(3-16)으로 추정된 후 분산은 자유도가 (nk-2)인 2-분포를 따른다. 따라서 다음의 조건을 만족할 경우에 한하여 참값의 후보로 결정한다.

$$(n_k - 2) \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \leq x_{(n_k - 2, \alpha)}^2 \quad (3-17)$$

식(3-17)는 식(3-5)를 대신하여 검색대상점의 참값의 후보 여부를 결정하는 기준으로 사용되며, 여기서 σ_0^2 은 단위가중치의 선 분산(a priori variance)을 나타낸다.

3.3.3 참값의 결정

카이제곱검정을 이용하여 적합성 검토를 수행한 후, 이를 통과한 검색대상점들에 대하여 참값의 여부가 결정되어야 한다. 남아 있는 검색대상점이 1개일 경우에는 이를 참값으로 결정하게 되며, 여러 개일 경우에는 다음과 같은 비율검사(ratio test)를 수행한다.

$$\frac{\hat{\sigma}_0^{2*}}{\hat{\sigma}_0^2} \geq F(k_1, k_2; 1 - \alpha) \quad (3-18)$$

여기서, $\hat{\sigma}_0^{2*}$: 두 번째 최소 후 분산값 (자유도 k_1)

$\hat{\sigma}_0^2$: 최소 후 분산값 (자유도 k_2)

α : 유의수준

일반적으로 식(3-18)의 좌변에 의해 계산된 비율이

3이상일 경우 선택된 최적의 수신기 위치가 참값이라고 판정한다.

4. 실험 및 분석결과

실제의 측량환경에서 제안된 AFM의 성능을 평가하기 위하여 두 가지의 실험을 수행하였다. 두 실험 모두 L1, L2 및 C/A, P-code가 수신되는 2주파 측지용 수신기인 Trimble의 4000SSi를 사용하였다. 첫 번째 실험은 기선의 길이가 대략 5 m인 두 지점에 수신기를 설치하고 정지측위를 수행하였다. 이는 제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서 수행된 실험이다. 두 번째는 위치를 정확히 알고 있는 한 지점에 수신기를 고정 설치하고 다른 수신기는 고정점에 대하여 사전에 2 m의 반경으로 위치를 표시해 둔 원을 따라 이동하면서 측정을 수행하는 이동측위이다. 이는 실시간의 환경에서 구현된 AFM이 제대로 성능을 발휘하는지를 평가하기 위해서이다.

4.1 정지측위실험

제안된 AFM 결과의 타당성을 검증할 기선의 길이와 수신기가 설치된 고정점의 WGS-84 좌표의 측정은 WGS-84 좌표계에 연결되어 있는 절대기준점을 필요로 한다. 이는 상대위치 측정시 고정된 기준점으로 사용하는 관측점의 WGS-84 좌표오차가 계산된 기선의 길이 및 WGS-84 절대좌표에 영향을 주기 때문이다. 따라서 5 m 기선의 상대위치 측정실험 전에 미리 기준점으로 사용할 지점의 WGS-84 좌표를 정확히 결정해야 하며²³⁾, 이를 위해서 대전 천문대 GPS 관측소의 고정점과 대략 2시간 정도의 정지측량을 수행한 후, Trimble의 상용프로그램인 GPSurvey를 이용하여 기존의 정지측량 처리방법인 일괄최소제곱법으로 처리하였다. 이 방법은 2시간 정도의 측정자료를 모두 이용하므로 가장 높은 정확도의 결과를 주는 것으로 알려져 있다. 제안된 AFM을 이용한 5 m 기선의 정지측량 실험은 15초 간격으로 97회 반송파 위상을 측정하였으며, 위성의 배치상태 및 측정자료의 질적 조건을 일괄최소제곱법에서 처리한 것과 일치시키기 위하여 2시간의 측정자료 중에서 약 24분간의 자료를 추출하였다. 관측된 위성은 9대로 이들 중에서 가장 낮은 PDOP을 나타내는 4대의 위성군이 제안된 AFM의 기

표 1. 수신기 초기위치 추정결과

항목 위성수	x축 편의량 (m)			y축 편의량 (m)			z축 편의량 (m)		
	평균	1σ	95%	평균	1σ	95%	평균	1σ	95%
9	0.558	0.443	1.427	1.015	0.771	2.527	0.564	0.493	1.530
8	0.662	0.554	1.747	0.995	0.877	2.715	1.128	0.806	2.707
7	0.492	0.363	1.204	1.072	0.935	2.905	0.867	0.655	2.151
6	0.469	0.351	1.156	1.258	1.015	3.247	0.882	0.688	2.231
5	0.469	0.351	1.156	1.258	1.015	3.247	0.882	0.688	2.231

준위성군으로 선정되었고, 그 중에서 가장 관측고도각이 높은 위성인 SV3을 기준위성으로 결정하였다. 따라서 SV3에 대하여 8개의 이중차분된 측정값이 형성되었으며, 이들을 이용하여 제안된 AFM 알고리즘의 효율성을 분석하고 미지의 수신기 좌표를 결정하는 실험이 수행되었다.

표 1은 97회의 측정값들에 대하여 매회마다 이중차분된 코드의사거리를 이용하여 추정된 수신기의 초기 위치가 갖는 편의량을 관측된 위성의 수를 변화시키면서 분석한 것이다. 이는 제안된 AFM에 적용할 검색공간의 크기를 결정하기 위해서이다. 검색공간의 크기를 결정하는 방법으로는 Remondi¹⁰⁾에 의해서 사용되었던 추정된 초기위치의 표준편차를 이용하는 방법(①)과 Mader¹¹⁾와 Han¹²⁾ 등이 사용한 각 축에 대하여 고정된 편의량을 이용하는 방법(②)이 있다. 추정된 초기위치의 표준편차를 이용하는 경우, 높은 정밀도로 초기위치가 추정될 경우에는 검색공간이 작아져서 AFM의 성능이 향상되지만 그 반대로 낮은 정밀도를 가질 경우에는 지나치게 큰 검색공간이 형성되어 비효율적이 된다. 각 축에 대해 고정된 편의량으로 검색공간을 형성하는 경우에는 AFM의 성능이 항상 일정하게 발휘되는 반면, 참값이 검색공간 내에 포함되지 않을 가능성과 추정된 초기위치의 정밀도를 탄력적으로 반영하지 못하는 단점이 있다.

표 2는 97회의 초기위치 추정값으로부터 참값을 포함하는 검색공간의 크기를 앞에서 설명된 방법 ①, ②의 경우에 대하여 구한 후 비교한 것이다. 표에서 기준체적은 초기위치의 추정값을 중심으로 참값을 포함하는 최소의 검색공간의 크기를 의미하며, 표준승수(k)는 계산된 각 축의 표준편차에 상수 k를 곱한 크기로 형성된 검색공간이 95%의 신뢰도로 참값을 포함할 수 있음을 나타내는 지표이다. 표준거리(d)는 95%의 신

표 2. 검색공간의 평균체적 (95%)

항목 위성수	기준체적 (m ³)	표준편차를 이용		축 편의량을 이용	
		표준승수	평균체적 (m ³)	표준거리 (m)	평균체적 (m ³)
9	4.136	2.4	512.951	2.4	110.592
8	9.560	2.2	752.653	3.3	287.496
7	4.481	3.0	861.899	3.3	287.496
6	6.321	1.7	1707.048	4.0	512.000
5	6.321	5.7	19016.015	4.0	512.000

뢰도로 참값을 포함할 수 있는 각 축의 편의량의 크기를 의미한다. 표준편차를 이용하는 경우 탄력적으로 검색공간을 결정할 수 있는 장점이 있으나, 각 축에 대해 고정된 편의량을 이용하는 경우보다 평균효율이 떨어진다. 이와 같은 결과에 대한 합리적인 대안은 두 방식의 장점을 결합시키는 방법이다. 첫째, 표준편차를 이용하여 95%의 검색공간체적을 계산한 후, 고정된 편의량의 검색공간체적과 비교하여 작은 쪽을 선택하는 방법(③)이다. 둘째, 각 축의 표준편차에 표준승수를 곱한 값과 표준거리를 비교하여 작은 값을 선택하여 검색공간을 형성하는 방법(④)이다. 셋째, 이들과는 완전히 다른 대안으로 추정된 초기위치의 분포를 이용하는 것을 고려할 수 있다. 이는 Han¹²⁾에 의해 제시된 것으로 추정된 초기위치의 공분산행렬로부터 좌표축의 변환을 수행함으로써 타원체의 검색공간을 형성하는 방법(⑤)이다. 넷째, 세 번째 대안의 경우도 추정된 초기위치의 표준편차의 크기에 직접 영향을 받는 검색공간이 형성되므로 비정상적으로 큰 표준편차를 가질 경우 처음 두 가지의 대안보다 효율이 떨어질 가능성이 있다. 따라서 두 번째의 대안을 세 번째의 대안과 결합한 방식을 이용할 수 있다. 즉, 추정된 초기위치의 공분산행렬을 이용하여 변환된 축을 형성한 다음 변환

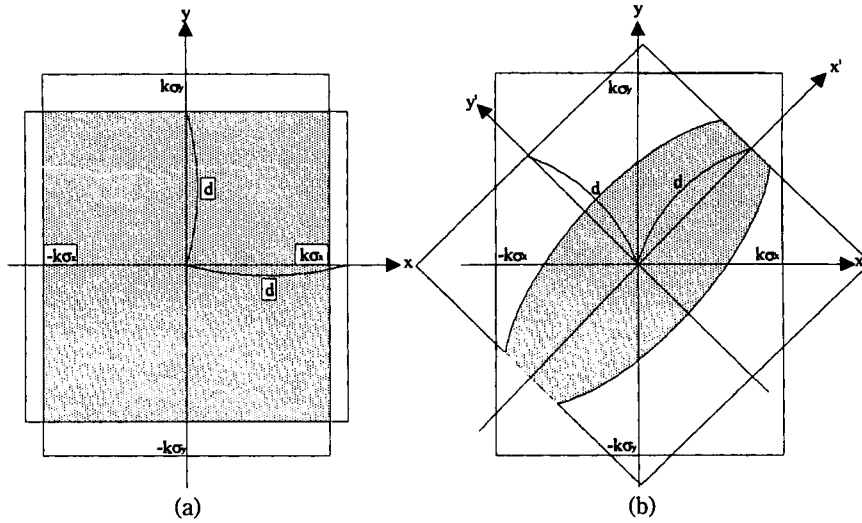


그림 4. 최적화된 2차원 검색공간 형성의 개념도

축의 95% 신뢰구간의 크기와 표준거리를 비교하여 작은 값을 선택하여 타원체의 검색공간을 형성하는 방법 ⑥이다.

그림 4에서 (a)는 검색공간 형성방법 ④를, (b)는 방법 ⑥을 설명하고 있다. 검색공간의 형성에 대한 또다른 관점은 위치영역에서의 검색공간을 주파수영역에서의 검색공간으로 변환하는 것이다. 주파수영역의 검색공간은 우선 위치영역의 검색공간을 형성한 후, 이를 주파수영역으로 변환하는 것으로 두 가지의 방법을 고려할 수 있다. 첫째, Mader¹¹⁾에 의해 제시된 것으로 위치영역에서 형성된 육면체의 8개 꼭지점의 좌표를 이용하여 기준위성군의 미지정수 검색범위를 결정하는 것이다. 둘째, Abidin²⁴⁾에 의해 제시된 것으로 미지정수의 계산식을 이용하여 추정된 초기 미지정수의 표준편차를 사용하여 검색범위를 결정하는 것이다. 이 경우 육면체의 검색공간을 타원체로 변환하는 것이 가능하다. 이상의 모든 경우에 대한 검토로부터 본 논문에서 제안된 최소의 검색공간 형성방법은 주파수영역에서의 표준거리에 제한 받는 타원체공간의 형성방법 ⑥이다.

표 3은 검색공간 형성방법에 따른 효율을 분석한 것으로 위치영역에서의 적용방법 ①-⑥)은 앞서 설명된 것과 동일한 방법이며, 주파수영역에서의 적용방법 ①)은 ①을, ②)는 ②를, ③)는 ③을, ④)는 ④를 ⑤)는 ⑤를, ⑥)는 ⑥을 주파수영역으로 변환한 것이다. 다만 ⑥)은 ⑤)를 주파수영역으로 변환한 후 타원체공간이 아닌 육

면체공간으로 적용했을 경우를 나타낸다. 표에서 비율은 식(3-18)에 의해 계산된 것이며, 참값기준은 위치영역에서 검색을 수행하는 경우는 식(3-5)를 사용하여 설정된 임계치를 통과한 참값의 후보들 중에서 최대의 AF값을 갖는 후보를 참값으로 선정하며, 주파수영역에서 검색을 수행하는 경우는 카이제곱검정을 통과한 참값의 후보들에 대하여 비율이 3이상일 경우에 참값으로 선정함을 의미한다. 이와 같은 기준으로 참값을 선정하였을 때, 표에 나타난 것과 같이 제시된 모든 방법으로 참값의 수신기의 좌표를 구할 수 있었다. 그러나 최대의 AF값을 갖는 후보를 참값으로 선정하는 경우 오류를 범하게 되는 경우를 표4에 나타내었다. 계산효율면에서는 검색공간 형성방법에 따라 현격한 차이를 보이고 있는데, 주파수영역에서의 검색공간 형성방법이 훨씬 우월함을 알 수 있다. 이상의 결과는 기존의 AFM이 지닌 문제점이 모두 해결되고 있음을 나타낸다. 즉, 제시된 AFM 알고리즘을 사용할 경우 계산시간이 매우 짧으며 참값에 대한 판단을 명백히 내릴 수가 있다.

표 4는 이중차분된 반송파 위상측정의 신호잡음이 커서 AFM 알고리즘이 참값을 찾아내지 못한 예를 나타내는 것으로, 여기서 참값에 대한 판단기준의 중요성이 명백히 나타난다. 즉, 참값의 후보들 중에서 최대의 AF값을 참값으로 선정하는 경우라면 위치영역에서 검색된 참값의 후보들 중에서 참값이 명백히

표 3. 검색공간의 효율비교 (I)

구 분	항 목	검색대상 점의 개수	계산시간(초)	참 값 후보수	비 율	참값 기준	참값 여부	
위 치 영 역	육면체 공간	①	1500960	528.93	5144	최대 AF값	○	
		②	1367631	468.85	4641		○	
		③	1367631	468.85	4641		○	
		④	1306026	451.87	4415		○	
	타원형 공간	⑤	775112	313.02	3279	○		
		⑥	712696	285.51	3090	○		
주 파 수 영 역	육면체 공간	a	6600	2.30	17	96.09	비율 3이상	○
		b	6050	2.14	16	96.09		○
		c	6050	2.14	16	96.09		○
		d	6050	2.14	16	96.09		○
		e	1331	0.44	3	97.73		○
	타원체 공간	f	1045	0.39	3	97.73	○	
		g	1045	0.39	3	97.73	○	

표 4. 검색공간의 효율비교 (II)

구 분	항 목	검색대상 점의 개수	계산시간(초)	참 값 후보수	비 율	참값 기준	참값 여부	참값 여부	
위 치 영 역	육면체 공간	①	43400	6.59	1245	최대 AF값	○	×	
		②	132651	20.43	5668		○	×	
		③	43400	6.59	1245		○	×	
		④	35700	5.32	936		○	×	
	타원형 공간	⑤	31250	6.32	1149	○	×		
		⑥	27153	5.38	915	○	×		
주 파 수 영 역	육면체 공간	a	270	0.06	6	1.86	비율 3이상	×	×
		b	864	0.16	30	1.86		×	×
		c	270	0.06	6	1.86		×	×
		d	240	0.01	6	1.86		×	×
		e	125	0.00	0	-		×	×
	타원체 공간	f	55	0.00	0	-	×	×	
		g	55	0.00	0	-	×	×	

존재한다. 그러나 이러한 기준으로 선정된 값이 실제로는 참값이 아니므로 오류를 범하게 된다. 이에 반해 비율이 3이상일 때에 참값으로 선정하는 경우는 표에서와 같이 비율이 3보다 작으므로 참값이 아님을 판정할 수 있다. 따라서 올바른 결정이 내려진 것이다. 다음의 그림 5에서 7은 제안된 AFM 알고리즘을 정지측위에 적용하여 구한 수신기의 WGS-84 좌표, 기선길이 및 TM 투영된 평면좌표의 오차를 나타

내며, 표 5는 97회의 측정값에 대하여 매회 마다 제안된 AFM을 적용하여 구한 결과를 요약한 것이다. 표 5로부터 제안된 AFM이 단1회의 측정값으로도 기존의 정지측위기법과 거의 동일한 수준으로 위치 결정을 수행함을 알 수 있다. 계산된 수신기의 WGS-84 좌표의 평균제곱근오차는 1.8 cm 이내로 나타났으며, 또한 계산된 수신기의 평면위치가 모두 5 mm의 오차반경 이내에 있다. 따라서 이상의 모든 결과

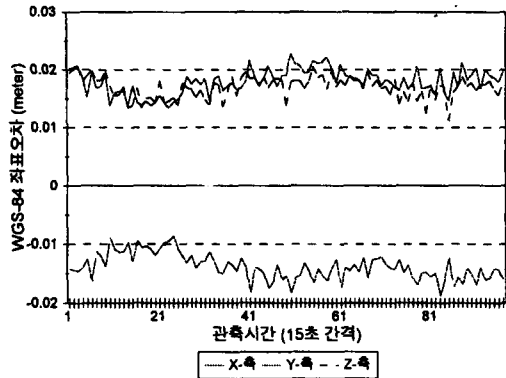


그림 5. WGS-84 좌표오차

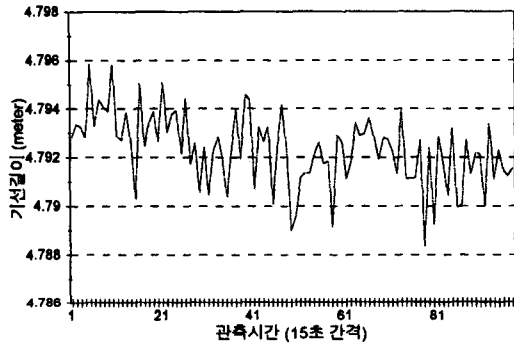


그림 6. 기선길이의 변화

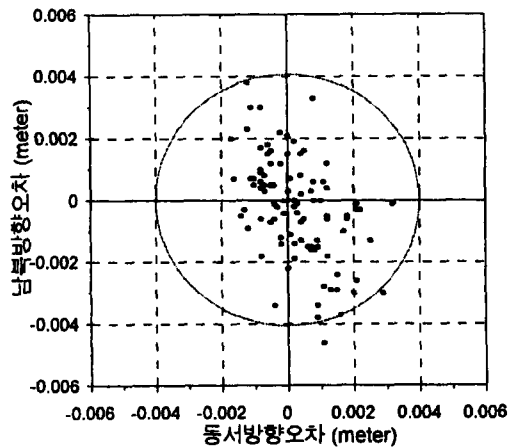


그림 7. 평면좌표오차

로부터 제안된 AFM 알고리즘이 효율성과 실용성을 지닌다고 판단할 수 있다.

4.2 이동측위실험

실시간 이동측위의 실험은 제안된 AFM을 이용할 경

표 5. AFM의 정지측위 결과

관측된 위성	3	22	29	27	18	19	15	28	31
구분	항 목	편의량 (m)		1σ(m)		r.m.s.e (m)			
	WGS-84	X축	-0.014	0.002		0.014			
	Y축	0.018	0.002		0.018				
	Z축	0.017	0.002		0.017				
TM	East	0.0	0.001		0.001				
	North	0.0	0.002		0.002				
	Height	0.028	0.003		0.029				
기선길이	0.0	0.001		0.001					

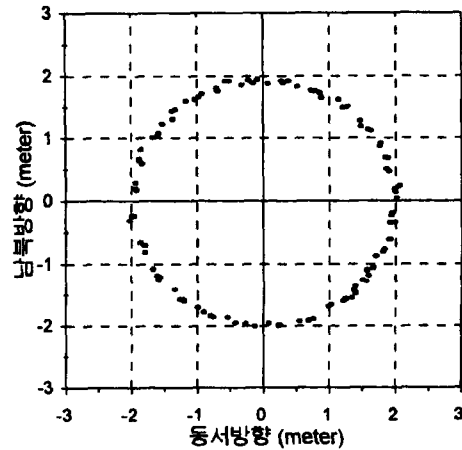


그림 8. 수신기의 이동궤적

우 움직이는 물체의 위치를 정지측위의 경우와 마찬가지로의 정확도로 결정할 수 있는지를 검증하기 위해서 수행되었다. 이를 위해서 사전에 WGS-84 좌표가 결정된 기준점에 한 대의 수신기를 고정설치하고 다른 한 대의 수신기는 미리 기준점에 대하여 2m 반경으로 표시를 해 둔 원을 따라 이동하면서 1초 간격으로 147회 반송파 위상을 측정하였다. 이와 같은 실험은 기존의 일괄최소제곱법으로는 처리할 수 없는 것으로 GPS의 응용분야가 매우 다양하게 확대될 수 있는 실험환경이며, 적용결과는 다음과 같다.

그림 8로부터 제안된 AFM이 이동측위를 정확히 수행하였음을 알 수 있다. 즉, 고정된 기준점에 대하여 2m 반경의 이동궤적이 4개 겹쳐져 나타나 있다. 반면, 그림 9에서 계산된 반경의 크기가 2m에서 약 10cm 정도의 편차를 보이는 이유는 수신기를 들고 이동하는

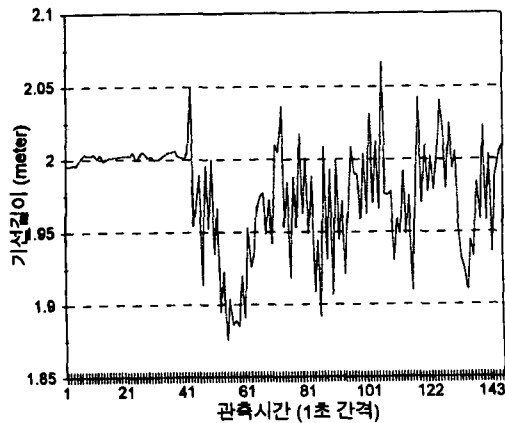


그림 9. 기선길이의 변화

사람의 작업오차 때문이다. 이러한 실험결과는 제안된 AFM이 OTF에 적합한 알고리즘임을 의미한다. 즉, 제안된 AFM 알고리즘은 매회 마다 측정값을 이용하여 cm 이하의 정확도로 수신기의 위치를 계산할 수 있으며, 추정된 초기위치의 표준편차가 대략 2m 이내에 있을 경우에는 1초 이내로 정확한 수신기의 위치를 계산할 수 있다. 따라서 실시간의 계산처리 능력을 가지고 있다.

5. 결 론

반송파 위상을 이용하는 GPS 정밀측위에서 일반적으로 문제가 되는 것은 초기미지정수와 cycle-slip이다. 1980년대 초 정지측위기법이 제시된 이후 현재까지 개발되어 온 많은 알고리즘들은 궁극적으로 이와 같은 두 가지 문제를 보다 정확하고 효율적으로 해결하려는 시도들이다. 이들 중에서 가장 광범위한 응용분야를 가능하게 하는 일련의 연구들은 OTF로 불리는 실시간 이동측위기법이다. 1981년 Counselman & Gourevitch⁹⁾에 의해 제시된 AFM도 이와 같은 흐름에 따라 발전과 변화를 해 왔으며, 특히 GPS 정밀측위에서의 두 가지 문제에 대해 전혀 영향을 받지 않는다는 점 때문에 초기의 정지측위기법에서부터 이동측위기법과 OTF에 이르기까지 전 분야에 걸쳐 AFM의 적용이 시도되어 왔다. 이러한 장점에도 불구하고 기존의 AFM 알고리즘은 다음의 두 가지 점에서 어려움을 겪어 왔다. 첫째, 최적의 수신기 위치를 구하기 위한 계산시간이 여타의 알고리즘보다 길다는 점이다. 이는 기존의 AFM이 실시간의

이동측위에 적절히 적용될 수 없음을 의미한다. 둘째, 최적의 수신기 위치로 예상되는 후보들로부터 참값을 구분해 내기가 어렵다는 점이다. 이러한 어려움을 해결하기 위하여 본 논문에서 제시된 알고리즘은 다음과 같다. 첫째, 이중차분모형을 이용할 경우 단차분모형을 이용하는 기존의 AFM에서의 계산과정이 매우 효율적으로 단순화되어 계산속도가 향상된다. 둘째, 계산시간에 가장 큰 영향을 주는 검색공간을 최적화하기 위해서는 위치영역의 검색공간을 주파수영역으로 변환시켜야 한다. 또한 육면체의 검색공간을 초기추정값의 공분산행렬을 이용하여 좌표축변환을 행한 후, 변환된 좌표축에서의 표준편차에 표준승수를 곱한 값이 표준거리에 제한되도록 타원체 공간으로 변환해야 한다. 셋째, 검색공간을 주파수영역으로 변환함으로써 검색되는 각각의 미지정수 조합에 대한 잔차를 순차적 최소제곱법으로 계산할 수 있게 되고, 그 결과 최적의 수신기 위치에 대하여 카이제곱검정과 비울검사를 수행함으로써 참값에 대한 통계적 판단이 가능해진다. 본 논문에서 제시한 알고리즘으로 AFM을 구현하여 정지측위실험과 이동측위실험이 수행되었으며, 그 결과 단 1회의 관측값으로도 기존의 정지측위와 거의 동일한 수준의 정확도로 위치를 결정하는 것이 가능하였다. 또한 추정된 초기위치의 표준편차가 대략 2m 이내일 경우 1초 이내에 최적의 수신기 위치를 결정하는 것이 가능하였다. 따라서 제시된 AFM 알고리즘이 OTF에 적합한 것임을 알 수 있다.

참고문헌

1. Remondi, B.W., Kinematic and Pseudo-Kinematic GPS, Proceedings of ION GPS-88, Institute of Navigation, Colorado Springs, CO, Sept. 19-23, 1988, pp.115-121
2. Remondi, B.W., Performing Centimeter-level Surveys in Seconds with GPS Carrier Phase: Initi Results, Navigation, Journ of The Institute of Navigation, Vol.32, No.4, The Institute of Navigation, Alexandria, VA, Winter 1985-86, pp.386-400
3. Hatch, R., The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements, Proceedings of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, DMA, Las Cruces, New Mexico, Feb. 8-12, 1982.
4. W. bben, G., The GPS Adjustment Software Package-GEONAP, Concept and Models, Proceedings of the 5th

- International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Vol. I, Las Cruces, New Mexico, March 13-17, 1989, pp. 452-461
5. Blewitt, G., Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Glob Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km, Journ of Geophysic Research, Vol. 94, No. B8, 1989, pp. 10187-10203
 - 6). Abidin, H.A. and D.E. Wells, Extra Widelaning for On-the-Fly Ambiguity Resolution: Simulation of Ionospheric Effects, Proceedings of the 2nd Internation Symposium on Precise Positioning with the Glob Positioning System, Ottawa, Sept. 3-7, 1990, pp. 1217-1232
 7. Goad, C., Robust Techniques for Determining GPS Phase Ambiguity, Proceedings of the Sixth Internation Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus, Ohio, March 17-20, 1992, pp. 245-254
 8. Dedes, G. and C. Goad, Re-Time cm-level GPS Positioning of Cutting Blade and Earth Moving Equipment, Proceedings of the Nation Technic Meeting, Institute of Navigation, San Diego, Cifornia, Jan. 24-26, 1994
 9. Counselman, C.C., III and S.A. Gourevitch, Miniature Interferometer Termins for Earth Surveying: Ambiguity and Multipath with Glob Positioning System, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.GE-19, No.4, Oct. 1981, pp.244-252.
 10. Remondi, B.W., Pseudo-kinematic GPS Results using the Ambiguity Function Method, Navigation, Journ of The Institute of Navigation, Vol.38, No.1, The Institute of Navigation, Alexandria, VA, Spring 1991.
 11. Mader, G.L., Rapid Static and Kinematic Glob Positioning System Solutions Using the Ambiguity Function Technique, Journ of Geophysic Research, Vol.97, No.B3, 1992, pp.3271-3283.
 12. Han, S.W., and C. Rizos, Improving the Computation Efficiency of the Ambiguity Function Algorithm, Submitted to Manuscripta Geodaetica, 1995
 13. Loomis, P.V.W., A Kinematic GPS Double-Differencing Algorithm, Proceedings of the 5th Internation Geodetic Symposium on Satellite Positioning, DMA, DoD, NGS, NOAA, Las Cruces, N.M., March 13-17, New Mexico State Univ., Vol.II, 1989, pp.611-620.
 14. Hwang, P.Y.C., Kinematic GPS: Resolving Integer Ambiguities on the Fly, IEEE Position, Location and Navigation Symposium, No. 90CH2811-8, Las Vegas, March 20-23, 1990, pp.579-586.
 15. Hatch, R., Instantaneous Ambiguity Resolution, Kinematic Systems in Geodesy, Surveying, and Remote Sensing, Spring-Verlag, IAG Symposia 107, Sept. 10-13, 1990.
 16. Erickson, C., An Anysis of Ambiguity Resolution Techniques for Rapid Static GPS Surveys Using Single Frequency Data, Proceedings of ION GPS-92, The Institute of Navigation, 1992, pp.453-462.
 17. Frei, E. and G. Beutler, Rapid Static Positioning Based on the Fast Ambiguity Resolution Approach (FARA): Theory and first results, Manuscripta Geodaetica, Vol. 15, No. 6, 1990, pp. 325-356
 18. Euler, H.-J. and H. Landau, Fast Ambiguity Resolution On-The-Fly for Re-Time Applications, Proceedings of the 6th Internation Symposium on Satellite Positioning, Columbus, Ohio, March 17-20, 1992, pp. 650-659
 19. Chen, D.S., Fast Ambiguity Search Filter (FASF): A Nov Concept for GPS Ambiguity Resolution, Proceedings of GPS-93, The Institute of Navigation, St Lake City, Utah, 22-24 Sept., 1993, pp. 781-787
 20. Teunissen, P.J.G., A New Method for Fast Carrier Phase Ambiguity Estimation, Proceedings of PLANS-94, IEEE, New York, 1994, pp. 562-573
 21. Wei, M. and K.-P. Schwarz, Fast Ambiguity Resolution Using an Integer Nonlinear Programming Method, Proceedings of ION GPS-95, The Institute of Navigation, Sept. 12-15, 1995
 22. Li, Z., Efficient Ambiguity Search Using Genetic Algorithms, Proceedings of ION GPS-95, The Institute of Navigation, Sept. 12-15, 1995, pp. 331-337
 23. 김용일, 김동현, 박민호, GPS 상대측위에서 기준점오차로 인한 기선오차 예측모형의 개발, 대한토목학회논문집, 제15권, 제2호, 1995, pp. 471-481
 24. Abidin, H. Z., On the Construction of the Ambiguity Searching Space for On-the-Fly Ambiguity Resolution, NAVIGATION, Journ of The Institute of Navigation, Vol. 40, No. 3, FI 1993, pp. 321-338