

船速誤差가 NNSS 船位에 미치는 영향에 관한 研究

鄭 世 謨

On the Study of the NNSS Position Error due to Ship's Speed Error

Se-Mo Chung

目 次

- | | |
|----------------------------|-------------------------|
| 1. 序 論 | 2.3 衛星의 高度 및 豫想最高高度의 計算 |
| 2. 理論的 考察 | 3. 시뮬레이션 結果에 對한 考察 |
| 2.1 Doppler Shift 積分值의 計算 | 4. 結 言 |
| 2.2 Doppler 測定值에 依한 船位의 計算 | |

Abstract.

The NNSS position error due to ship's speed error is analyzed quantitatively and qualitatively by computer simulation.

Equations of calculating the doppler shift of the NNSS signal received by the ship is proposed, and by assuming the calculated results as measured data, the ship's position is recalculated by error and correction method. By comparing the true position with the calculated position based on an incorrect speed data, the dependancy of the position error upon parameters such as the ship's latitude, meridian angle and declination of the satellite, ship's course and the amount of the speed error.

The results are shown well coincide with the measured data qualitatively and it is shown clear that the NNSS position error increases largely when the meridian angle of the satellite is small so that the two position lines of two successive doppler integrations are nearly parallel.

1. 序 論

美海軍航海衛星 方式(Navy Navigation Satellite System, 以下 NNSS라 略稱한다.)은 그 利用

範圍가 全世界의 이면서도 船位의 精度가 LORAN A方式을 증가하고 있어, 現用의 電波航海方式中에서 가장 效率的인 航海方式으로 期待되고 있다. 다만 이 方式의 가장 큰 취약점을 든다면, 平均 2時間에 1回程度의 빈도로 船位를 求할 수 있다는 點과 本船의 船速을 비교적 正確하게 알아야만 正確한 船位를 求할 수 있다는 點이라 하겠다. 이 中에서 前者는 협수로통과나 變針이 잦은 沿岸接近航海의 경우를 除外하고는 감수할 수 있는 制約으로 받아들일 수 있겠으나, 後者의 경우는 바로 測定船位의 誤差와 관련된 問題인 만큼, 本方式의 成敗를 左右하는 重要한 制約이 될 수도 있겠다. 이 문제는 本方式을 開發하는 단계에서 마땅히 充分한 검토가 이루어졌을 것으로 생각되지만, 筆者가 調査한 範圍에서는 이 問題를 다른 論文이 發見되지 않으며, 이것은 本方式이 美海軍用으로 보안조치하에 연구가 進행되었고, 後에 民間에 개방된 때문이라 思料된다.

本論文에서는 船速誤差가 船位誤差에 미치는 영향을 計算機시뮬레이션에 依하여 分析하였다. 먼저 船舶이 航行하면서 任意의 相對位置에 있는 衛星이 發射하는 電波의 Doppler Shift의 一定時間 積分值를 計算하고, 이 값을 測定值로 삼아 船速이 다르다고 가정하였을 때에 이 값을 測定하기 爲한 船位를 修正差法에 依하여 計算하여, 이 船位의 偏位量, 即 船速誤差에 依한 船位誤差를 檢討하였다.

2. 理論的 考察

經度를 本初子午線에서부터 東으로 360°까지, 緯度를 北極에서부터 180°까지로 表示하는 赤道球面座標系에 있어서, 船舶의 位置의 座標를 (r, θ, ϕ) , 航海衛星의 地位를 (R, Θ, Φ) 라 하면, 球面座標系로 부터 Cart座標系로의 變換式

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \phi \\ y &= r \sin \theta \sin \phi \\ z &= r \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

을 고려하면, 船舶과 衛星間의 距離 D 는 (2)式에 依하여 求하여 진다.

$$\begin{aligned} D^2 &= (r \sin \theta \cos \phi - R \sin \Theta \cos \Phi)^2 \\ &\quad + (r \sin \theta \sin \phi - R \sin \Theta \sin \Phi)^2 \\ &\quad + (r \cos \theta - R \cos \Theta)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

現在運用되고 있는 5個의 Transit衛星의 平均軌道는 長半徑 約4,060 마일, 離心率 10^{-5} 內外, 赤道昇交角 $89^\circ \sim 91^\circ$ 平均周期 108分의 타원궤도이지만 計算의 便宜上 本論文에서는 圓軌道로 近似한다.

地球도 離心率 $1/273$ 의 회전타원체이지만 이것을 半徑 3,440마일의 球體로 近似하고 Ion층의 電波의 屈折은 無視한다. 本論文에서 다루는 問題는 船位의 計算方法보다는 船速誤差로 因한 測定船位의 偏位量이므로, 上記한 近似는 시뮬레이션結果에 거의 영향을 미치지 않을 것으로 豫想된다.

1.1 Doppler Shift 積分值의 計算

衛星의 地位의 變化中 緯度變化는 衛星의 公轉周期를 108分으로 보면

$$\frac{d\Theta}{dt} = \pm \frac{2\pi}{108 \times 60} \text{ Rad/sec} \quad (3)$$

이며, 地球의 自轉으로 因한 經度變化는

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{2\pi}{24 \times 60 \times 60} \text{ Rad/sec} \quad (4)$$

로 表示된다. 式(3)의 正符號는 衛星이 北極에서 南極으로 向하고 있는 경우이며, 負符號는 南極에

서 北極으로 向하고 있는 경우이다.

船舶의 針路를 $\cos(\text{度數})$, 速度를 V 라 하면, 船舶의 緯度 및 經度變化는 各各 다음과 같이 表示된다.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{-2\pi V \cos\theta}{60 \times 60 \times 60 \times 180} \text{ Rad/sec} \quad (5)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{+2\pi V \sin\theta}{60 \times 60 \times 60 \times 180 \times \sin\theta} \text{ Rad/sec} \quad (6)$$

따라서 T 時刻의 衛星의 地位 및 船位를 各各 (R, Θ, Φ) 및 (r, θ, ϕ) 라 할때 $T_2 = T_1 + \Delta T$ 에는 $(R, \Theta + \frac{d\Theta}{dt} \Delta T, \Phi + \frac{d\Phi}{dt} \Delta T)$ 및 $(r, \theta + \frac{d\theta}{dt} \Delta T, \phi + \frac{d\phi}{dt} \Delta T)$ 가 된다.

送信周波數가 f_T 이고, 送信體와 受信體間의 距離 變化를 dD/dt 라 할 때에 受信周波數 f_R 은 다음 式으로 表示된다. (但 C 는 光速)

$$f_R = f_T \left(1 - \frac{dD}{dt} \times \frac{1}{C} \right) \quad (7)$$

上記한 T_1, T_2 時의 船舶과 衛星間의 距離를 D_1, D_2 라 하면, 船舶에서 受信한 衛星電波의 Doppler Shift $f_T - f_R$ 의 ΔT 時間동안의 積分值 DOP를

$$\begin{aligned} DOP &= \int_{T_1}^{T_2} (f_R - f_T) dt \\ &= - \frac{f_T}{C} (D_2 - D_1) \end{aligned} \quad (8)$$

에 依하여 求하여 진다.

2.2 Doppler測定值에 依한 船位의 計算

一定時間동안, 例를 들어 前節의 T_1 에서 T_2 時까지의 Doppler의 積分值를 알면, 式(8)에서 $D_2 - D_1$ 을 아는 것이 되며, 따라서 船舶의 位置線은 T_1 및 T_2 時의 衛星의 位置를 焦點으로 하고 距離差 $D_2 - D_1$ 을 갖는 回轉雙曲面과 地表와의 交線이 되며, T_2 및 T_3 時間에 對하여 또 하나의 位置線을 求하면, 두 位置線의 交點으로 船位를 求할 수 있다. 그러나 이 位置線의 方程式은 大膽이 複雜하며 直接計算하기가 힘들므로, 本論文에서는 假想位置를 修正하여 眞位置를 求하는 修正差法을 採擇하기로 한다. 假想船位를 (θ, ϕ) , 船位修正量을 各各 $\Delta\theta, \Delta\phi$ 라 하고, T_1 및 T_2 時間에 假想船位로 부터 衛星까지의 距離를 各各 D_1' 및 D_2' 라 하면 다음式을 얻는다.

$$\frac{\partial D_1'}{\partial \theta} \Delta\theta + \frac{\partial D_1'}{\partial \phi} \Delta\phi = D_1 \quad (9)$$

$$\frac{\partial D_2'}{\partial \theta} \Delta\theta + \frac{\partial D_2'}{\partial \phi} \Delta\phi = D_2 \quad (10)$$

따라서 式(9)와 式(10)에서 다음式을 얻는다.

$$\left(\frac{\partial D_2'}{\partial \theta} - \frac{\partial D_1'}{\partial \theta} \right) \Delta\theta + \left(\frac{\partial D_2'}{\partial \phi} - \frac{\partial D_1'}{\partial \phi} \right) \Delta\phi = D_2 - D_1 \quad (11)$$

時間 T_2 및 $T_3 (= T_2 + \Delta T)$ 에서도 같은 方法으로

$$\left(\frac{\partial D_3'}{\partial \theta} - \frac{\partial D_2'}{\partial \theta} \right) \Delta\theta + \left(\frac{\partial D_3'}{\partial \phi} - \frac{\partial D_2'}{\partial \phi} \right) \Delta\phi = D_3 - D_2 \quad (12)$$

을 얻는다. 式 (11) 및 (12)의 좌변항은 式(2)의 微分式

$$\frac{dD}{d\theta} = \frac{r \cdot R}{D} [\cos\Theta \sin\theta - \sin\Theta \cos\theta \cos(\Phi - \phi)] \quad (13)$$

$$\frac{dD}{d\phi} = \frac{r \cdot R}{D} \sin\Theta \sin\theta \sin(\phi - \Phi) \quad (14)$$

에 各 T_1, T_2, T_3 時刻의 座標值를 代入하여 얻을 수 있으며, 우변항은 觀測值(本論文에서는 前節에서 正確한 船速을 써서 計算한 값)을 式(8)에 代入하여 얻을 수 있다.

式(11) 및 (12)의 연립방정식을 풀면, 船位修正值 $\Delta\theta$ 와 $\Delta\phi$ 를 얻을 수 있지만, 式(9) 및 式(10)이 Taylor 級數의 二階以上の 項을 省略한 近似式이므로 假想船位의 誤差가 클 때에는 式(11) 및 (12)에 依하여 求한 位置를 假想船位로 하여 反復計算에 依하여 精密한 船位를 求할 수 있으며, 初期假想船位의 誤差가 1라디안 以內이면 수렴한다. 本論文에는 式(11) 및 (12)의 連립방정식을, 倍精度가우스法에 依하여 計算하였고, 前節의 Doppler 值計算에 使用한 眞位值를 假想位值로하여 船速 誤差가 最大3노트일때의 船位를 計算하였으며, 3~5回의 反復計算에 依하여 船位修正值 $\Delta\theta$ 및 $\Delta\phi$ 가 10^{-10} Radian 以內가 됨을 確認하였다.

2.3 衛星의 高度 및 豫想最高高度의 計算

그림 1에서 O 를 地球의 中心 P 를 船位, S 를 衛星이라 하고 各點間의 距離를 地球의 半徑 r 로 正規化하면, 餘弦法測에 依하여 角 B 는

$$\cos^{-1} \frac{1+d^2-1.18^2}{2d} = B \quad (15)$$

에 依하여 求하여 지며, 衛星의 高度 x 는 B 가 正이면 $x = B - \frac{\pi}{2}$ 이고, B 가 負이면 $x = \frac{\pi}{2} - B$ 가 된다.

衛星의 豫想最高高度는 時間의 變化에 따르는 高度變化를 計算하여 뉴우튼法에 依한 極值探索法으로 求하였다.

3. 시뮬레이션結果에 대한 考察

前章에서도 言及한 바와 같이, NNSS方式은 衛星의 電波의 도플러의 積分值를 測定하여, 衛星의 隔時의 位置들로부터의 距離差를 求하는 雙曲線航法이며, 이러한 방식에 있어서의 船位誤差는 測定한 距離差에 包含된 誤差와 單位距離誤差에 對한 位置線의 間隔 및 船位決定에 使用된 두 位置線의 交角等에 依하여 左右된다. 船速誤差로 인한 도플러測定誤差는 直觀的으로 考察할때

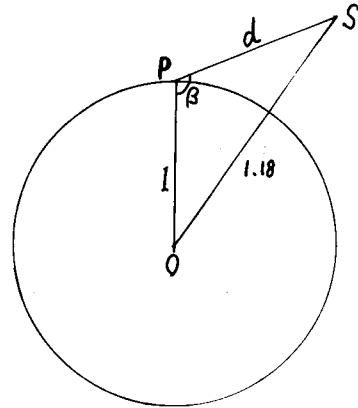


그림 1. 衛星의 高度計算說明圖

船舶의 針路가 衛星의 方位 또는 反方位와 一致할때 最大가 될 것으로 豫測된다. 또 單位距離差誤差에 對한 位置線의 偏位間隔는 基線, 即 衛星의 地位의 軌跡에 접근할 수록 감소하며, 特히 衛星의 直下에서는 船位變動에 따르는 距離差가 極小임으로 같은 基線上이라도 船舶의 緯度와 衛星의 赤緯의 差가 클수록 位置線의 間격이 줄어들 것이 豫想된다. 한편 位置線의 交角에 對하여 考察하면, 二回의 도플러測定에 의한 位置線의 基線, 即 前章에서 說明한 T_1, T_2 時의 衛星의 地位를 連結하는 大圈과 T_2, T_3 時의 그것과의 角度가 매우 작으므로 衛星의 直下部近에서는 두 位置線은 거의 平行이며, 基線에서 멀어질 수록 또 衛星의 地位와 船位의 緯度와의 差가 클수록 位置線의 交角이 증가할 것이 豫想된다.

이렇게 볼때 船速誤差에 依한 船位誤差는 船舶의 針路와 船速誤差의 크기에 依存함은 勿論이거나 衛星의 船舶에 對한 相對位置如下에 따라 서로 相反되는 세가지의 影響의 復合으로 나타나므로 豫測하기 힘들기 때문에, 그概要를 파악하기 위하여 船舶의 針路와 速度, 船舶의 緯度, 衛星의 赤緯와 子午線角 및 衛星의 出沒等 狀況을 차례로 바꾸어 이들에 對한 船位誤差의 依存性을 檢討하였다.

먼저 船舶의 緯度 0° , 衛星의 赤緯 $10^{\circ}N$, 子午線角 $0^{\circ}, 10^{\circ}, 20^{\circ}$ 이고, 船速誤差가 $2kt$ (船舶이 停止하여 있다고 看做하였으나 實際로는 $2kt$ 의 速力이 있었다는 意味이며, 例를 들이 船速이 $10kt$ 라고 看做하였으나 實際로는 $12kt$ 인 경우도 같다)인 경우의 船舶의 針路變化에 따르는 船位誤差의 變化를 그림2에 나타내었다. 위 그림은 衛星이 떠오르는 경우이고, 아랫그림은 衛星이 지는 경우이다. 대체로 東西針路에서는 船位가 약간 南北으로 偏向하고, 南北針路에서는 船位가 크게 東西로 偏向하는 타원궤적을 나타내고 있다. 특히 子午線角이 작아짐에 따라 타원의 離心率는 커져서, 子午線角이 0° 인 경우에는 $2kt$ 의 船速誤差에 의하여서도 船位가 東西로 $6\sim 7$ 마일이나 偏向됨을 보여주는데, 이것은 雙曲線의 두 基線(T_1 과 T_2 時의 衛星의 地位를 지나는 大圈 및 T_2 와 T_3 時의 그것)의 交角이 매우 작아서 船位가 基線에 가까워짐에 따라 位置線의 交角이 매우 작아지는 事實을 想起하면 理解될 수 있다.

釜山韓國海洋大學에 設置한 美國Magnavox 社製品の NNSS 受信器 MX702에 船速이 $2kt$ 라고 入力하였을 때의 實測位置를 그림 3에 보였다. 船速誤差가 衛星電波의 Doppler를 增加시키는 경우에는 이것을 보정하기 위하여 船位가 衛星의 時圈에 가까운 쪽으로 偏向하고, Doppler를 감소시키는 경우에는 反對쪽으로 偏向하는 경향이 시뮬레이션결과와 定性的으로 完全히 一致하고 있다.

다음에는 船速誤差의 크기와 船位誤差와의 關係를 파악하기 위하여 衛星의 地位를 一定히 하고, 赤道[에 있는 船舶의 船速誤差를 北方 및 東方針路로 $0kt$ 에서 $3kt$ 까지 變化시켰을 때의 船位誤差의 크기를 그림4에 표시하였다. 이 그림에서 船位誤差의 크기는 船速誤差의 크기에 거의 비례함을 보여주고 있다. 이것은 좁은 범위 안에서는 인접한 位置線들이 거의 平行하기 때문이라 간주되며, 理論적으로 매우큰 船速誤差가 있을 때는 이 비례 關係가 成立하지 않을 것이 豫想된다.

세번째로는 船舶의 緯도에 對한 船位誤差의 依存度를 調査하기 위하여, 衛星의 赤緯를 船舶緯도보다 10° 높게 하고 船舶의 緯도를 變化시켰을 때에 北方針路 2노트 船速誤差에 의한 船位誤차를

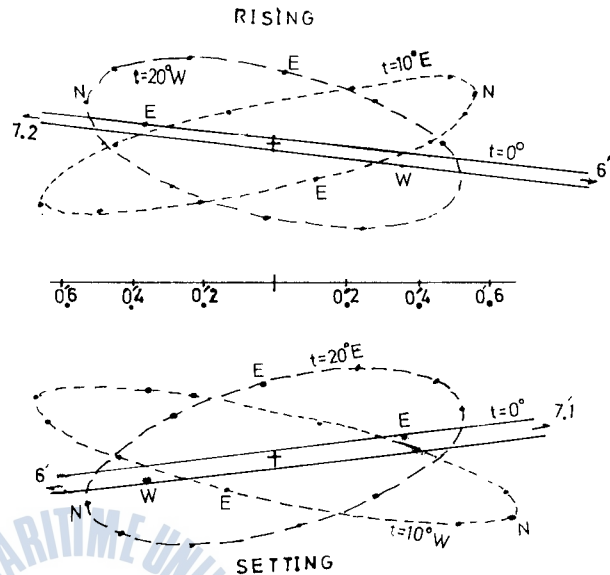


그림 2. 船舶이 赤道[에 있고 衛星의 赤緯 $10^{\circ}N$, 子午線角(t)이 0° (衛星의 水平線上 高度 $h=38^{\circ}$), 10° ($h=27^{\circ}$) 및 20° ($h=12^{\circ}$)인 경우에 船速誤差 $2kt$ 에 對한 針路變化에 따르는 船位誤差의 軌跡.

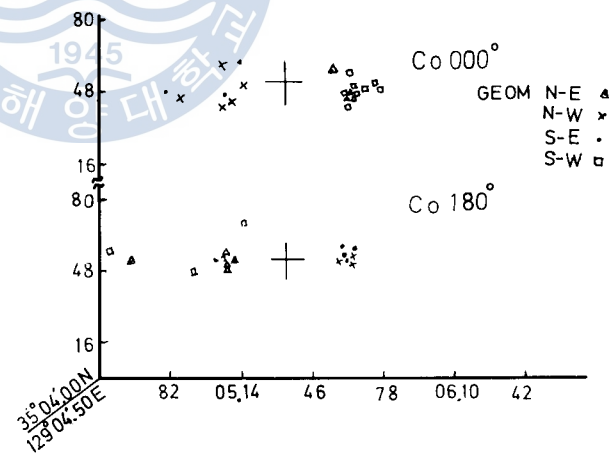


그림 3. 南 및 北針路로 船速誤差 $2kt$ 를 가졌을 때의 NNSS 船位의 實測值分佈(GEOM N-E란 衛星이 北에서 南으로 돌고 子午線角이 東方號임을 意味함, 釜山朝島에서 測定함)

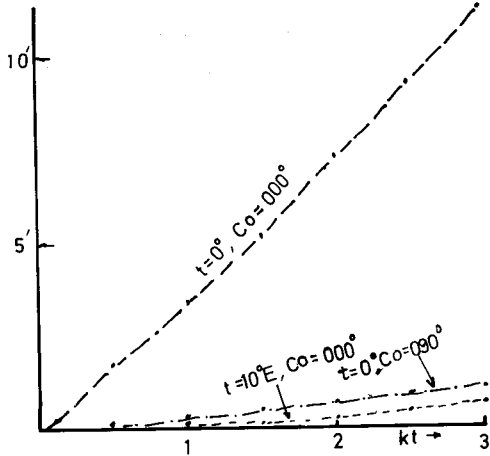


그림 4. 船舶의 緯度 0°, 衛星의 赤緯 10°N, 子午線角 0° 및 10°인 경우에 北方 및 東方針路로 船速誤差가 0~3kt 있었을 때의 船位誤差의 變化

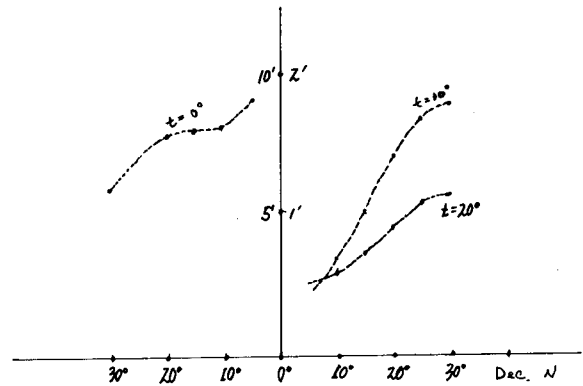


그림 5. 衛星의 子午線角 各各 0°, 10°, 20°이고 赤緯를 船舶의 緯度보다 10° 높게 固定시킨 경우의 船位誤差에 따른 船位誤差(船速誤差는 北 2kt임)

계산한 결과를 그림 5에 표시하였다. 이 그림에서 子午線角이 10° 및 20°의 경우에는 衛星의 赤緯가 높아짐에 따라 船位誤差는 증가하지만 子午線角이 0°인 경우에는 赤緯가 높아지면 반대로 船位誤差는 감소함을 보여주고 있는데 그 이유는 다음과 같이 推理된다. 即 前者의 경우는 赤緯가 높아지면 衛星과 船舶間의 東西距가 감소하므로 船位가 位置雙曲線의 基線에 接近하기 때문에 첫번째 경우에서 說明한 바와같이 位線間의 交角이 작아지기 때문이라 豫想된다. 한편 後者의 경우는 이미 船位가 거의 雙曲線의 基線附近에 있으므로 位置線의 交角은 變하지 않으나 衛星의 高度가 낮아지므로 衛星의 公轉으로 인한 Doppler가 현저하여 單位 Doppler當의 位置線의 間隙이 좁아지기 때문이라 해석할 수 있다.

네번째는 반대로 船位를 赤道상에 固定한 채로 衛星의 赤緯를 증가시키고 다른 조건을 前項과

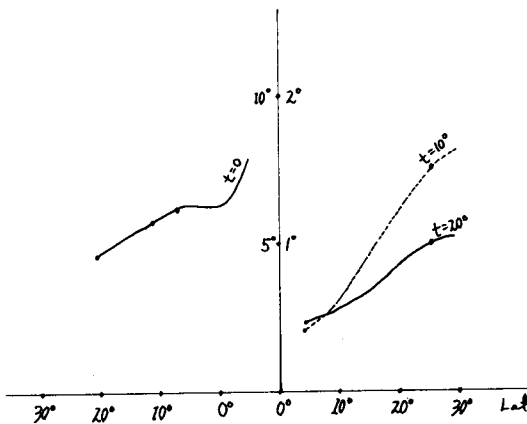


그림 6. 衛星의 赤緯 0°, 子午線角 0°, 10°, 20°로 一定히 할 때 船舶의 緯度에 따른 船速誤差로 인한 船位誤差의 變化(北方針路로 2kt의 誤差船速가 있을 때)

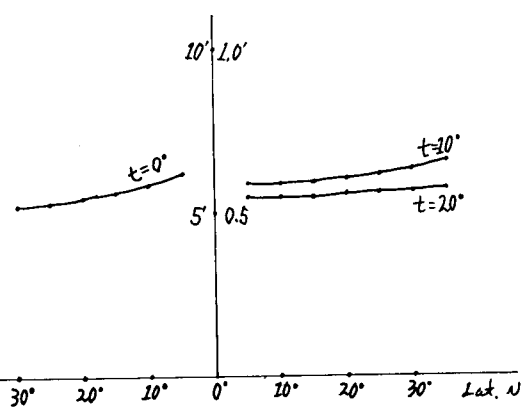


그림 7. 衛星의 赤緯를 船舶의 緯度보다 10° 높게 유지하면서 赤緯와 緯度를 함께 증가시켰을 때의 船位誤差의 變化(船速誤差는 北方 2kt임)

같이 하였을 때의 計算結果를 그림 6에 보였는데, 그림 5와 매우 유사한 경향을 보이면서도 대체로 (그리고 특히 子午線角이 0° 인 경우에는 현저하게) 赤緯가 증가함에 따라 船位誤差가 감소함을 나타낸다. 이것은 2회의 Doppler積分期間동안의 赤緯變化에 따르는 東西距變化가 赤緯가 높아질수록 증가하며 따라서 두 雙曲線位置線의 基線의 交角이 高赤緯에서 다소나마 증가하며, 結果的으로 位置線의 交角을 증가시키기 때문이라 解析된다.

마지막으로 衛星의 赤緯와 船舶의 緯度를 함께 증가시키고 다른 조건을 前項과 같게 한 경우를 그림 7에 보였는데 前2항의 경향을 약간 나타내지만 船位誤差의 變化는 극히 미소함을 보이고 있다.

4. 結 言

本論文에서는 NNSS方式의 本質的인 制約의 하나인 船速測定의 誤差에 基因하는 船位誤差를 理論的으로 解析하기 爲하여, 計算機시뮬레이션에 依한 研究方法를 提示하였고, 이 方法에 依한 計算結果가 實測한 데이터와 定性的으로 符合함을 확인하였다. 또 實測에서는 경험하기 힘든 各種 觀測 데이터의 變化에 따른 船位誤差의 變化를 計算한 結果 다음의 結論을 얻었다.

即 NNSS의 船位誤差는 衛星電波의 Doppler效果에 크게 左右된다고 받아들여지기 쉬우나 그 영향은 그리 크지 않고, 主로 位置線의 交角에 左右된다. 따라서 衛星의 子午線角이 0° 인 경우가 衛星電波의 Doppler效果가 가장 크지만 船速誤差로 因한 船位誤差는 가장 커서, 2초트의 船速誤差에 依하여서도 7~8마일의 船位誤差를 낼수 있다는 것이다.

앞으로는 現在 一部受信器에서 採用하고 있는 파와 같은 船位를 數回求하여 그 分散을 檢討하여 하나의 船位를 提示하는 方式을 채택하였을 때의 그 誤差의 限界를 규명하는 問題와 또 이러한 連續測定한 船位의 分布로 부터 船速을 推定하는 方法의 開發에 노력하여 보고자 한다.

