

오메가 電波의 位相予測에 關한 研究

金 東 一

A Study on the Phase Prediction of Omega Radio Wave

Kim Dongil

目	次
1. 序 論	
2. 오메가 電波의 傳播에 對한 理論的 解 析	
2.1 位相速度의 모델화 및 傳播豫測式의 算出	3.1 測定時期 및 場所 測定機器
2.1.1 位相速度의 모델화	3.1.1 測定時期
2.1.2 傳播豫測式의 算出	3.1.2 測定場所, 送信局의 位置
3.2 測定位相差에 依한 平均 傳播位相 速度의 計算式	3.2 測定機器
3.2.1 測定值	3.2.1 測定值
3.2.2 計算表	3.2.2 計算表
2.3 相對位相速度係數의 算出式	3.3 係數의 算出
3. 測定 및 解析	3.4 標準誤差
	4. 結 論

Abstract

The aspects of Omega phase prediction are briefly reviewed, and Swanson's Model and Pierce's Model are presented.

The equations for the Omega phase prediction and the most probable coefficients of the propagating equations are derived on the base of Pierce's Model by the least square method.

The coefficients are calculated from the data which are the phase differences between the pairs of the Station A (Aldra, Norway), C (Haiku, Hawaii), and D (La Mour, North Dakota) observed at Busan Harbor of the South Coast of Korea in June and September, 1976.

It is clearly shown that the standard deviations of the observed lane values at Busan Harbor are as followed:

1. June, 1976.
 - Pair (A-C): 0.1446
 - Pair (C-D): 0.2598
2. September, 1976.
 - Pair (A-D): 0.3958
 - Pair (C-D): 0.3278

As a conclusion of the above investigation, it is shown that the Omega phase velocity can be predicted by the method, proposed in this paper, of analyzing the diurnal and seasonal variations of the Omega phase velocity except SID, PCD and AZD.

If more observed data are employed, more exact Omega phase velocity is expected to be obtained.

1. 序 論

오메가 방식(Omega System)은 時分割方式에 依하여 各 送信局이 發射하는 超長波(VLF, 10~14KHz) 持續波의 位相을 比較하여 船位를 決定하는 雙曲線航法의 一種으로, 電離層과 大地 사이에 形成되는 導波路(Wave guide)의 傳播를 利用하기 때문에¹⁾ 傳送距離가 대단히 길고 (7,000마일 以上)²⁾ 安定하여 全世界에 8個의 送信局을 設置함으로써 船舶은 물론 航空機, 陸上移動體, 海面下 約 50피트의 潛水艦에서도 利用 可能한 汎世界的인 航法이며,^{2),3)} 雙曲線航法에 있어서 最終的인 것 이라는 意味로 붙여진 이름이다.

이 方式은 基線長이 길어서 位置線의 發散이 작고(30% 以內) 受信電界가 安定되어 全世界에 있어서 晝間에 約 1마일, 夜間에 約 2~3마일의 精度로 位置線을 求할 수 있다고 期待되고 있다.³⁾

VLF의 傳播特性에 對하여는 美海軍 電波研究所(NRL; Naval Research Lab.)가 主動이 되고, 他機關의 協力을 얻어 廣範圍한 實驗을 行하였고 그 結果 VLF의 位相速度의 豫測에 關하여 相當한 成果를 거두었으나,^{2),3)} 그 日變化, 季節變化, 各種 擾亂效果 等に 關하여 研究가 不足하며, 따라서 오메가에 依한 船位誤差도 最初에 期待한 값 以下로 抑制시키기 위하여 많은 實驗結果 및 解析이 要求되고 있다.

現在까지의 解析方法으로는 Pierce's Model 및 Swanson's Model이 그 代表的인 것이다.^{4),5)} 本 論文에서는 1976年 6月과 9月을 通하여 A局(Aldra, NORWAY), C局(Haiku, HAWAII), D局(La Mour, NORTH DAKOTA)의 船舶用 標準周波數인 10.2 KHz의 電波를 釜山港에서 測定하여 Pierce's Model에 立脚, 電波의 傳播位相速度의 日變化 및 季節變化에 對한 豫測式을 算出 하고 韓國近海에 있어서 오메가 利用上의 船位誤差의 抑制를 期待하였다.

2. 오메가 電波의 傳播에 對한 理論的 解析

2.1 位相速度의 모델화 및 傳播豫測式의 算出

오메가 電波의 傳播에 對한 가장 正確한 解析의 모델은 地球와 電離層(D層) 사이에 形成되는 導波管 모델이다. 이 導波管의 遮斷周波數는 約 4KHz(晝間)이나, 電離層이 不安全磁壁이어서 遮斷周波數 附近에서 相當한 減衰를 가져오므로 이를 避하기 爲하여 10KHz 내지 14KHz波를 利用하였다.

따라서 도미난트 모우드(Dominant mode)인 TM₁, 이 외에 TM₂, TM₃ 등의 高次 모우드가 混在하며 이들 各各 모우드의 傳送速度가 서로 다르므로 2個 以上의 모우드가 同時에 優勢한 경우에는 相互間의 干涉으로 因하여 位相速度의 豫測이 困難하다.

航法上 重要한 事實은 1個의 모우드가 支配的으로 優勢한 경우에는 位相과 振幅이 送信機로 부터 의 距離의 函數로 規則하게 變化하므로 그 豫測이 可能하다는 事實이다.⁴⁾

1) 一次, 二次, 三次, 四次, 五次, 六次, 七次, 八次, 九次, 十次, 十一次, 十二次, 十三次, 十四次, 十五次, 十六次, 十七次, 十八次, 十九次, 二十次, 二十一次, 二十二次, 二十三次, 二十四次, 二十五次, 二十六次, 二十七次, 二十八次, 二十九次, 三十次, 三十一次, 三十二次, 三十三次, 三十四次, 三十五次, 三十六次, 三十七次, 三十八次, 三十九次, 四十次, 四十一次, 四十二次, 四十三次, 四十四次, 四十五次, 四十六次, 四十七次, 四十八次, 四十九次, 五十次, 五十一次, 五十二次, 五十三次, 五十四次, 五十五次, 五十六次, 五十七次, 五十八次, 五十九次, 六十次, 六十一次, 六十二次, 六十三次, 六十四次, 六十五次, 六十六次, 六十七次, 六十八次, 六十九次, 七十次, 七十一次, 七十二次, 七十三次, 七十四次, 七十五次, 七十六次, 七十七次, 七十八次, 七十九次, 八十次, 八十一次, 八十二次, 八十三次, 八十四次, 八十五次, 八十六次, 八十七次, 八十八次, 八十九次, 九十次, 九十一次, 九十二次, 九十三次, 九十四次, 九十五次, 九十六次, 九十七次, 九十八次, 九十九次, 一百次.

이와 같은 수열에서 임의의 한 항을 선택하여, 그 항의 위치상관계수를 구한다. 이 때, 위치상관계수의 크기는 0에서 1까지의 값을 가지며, 0이면 완전히 무관하고, 1이면 완전히 상관이 있다. 이 때, 위치상관계수의 크기는 0에서 1까지의 값을 가지며, 0이면 완전히 무관하고, 1이면 완전히 상관이 있다. 이 때, 위치상관계수의 크기는 0에서 1까지의 값을 가지며, 0이면 완전히 무관하고, 1이면 완전히 상관이 있다.

2.1.1 위치상관계수의 모델화

全位相遅延량을 計算하는 데 있어서 傳播經路에는 晝間經路가 包含되므로 全位相遅延量 ϕ 는

$$\phi = \phi_{day} + K_1(\phi_{night} - \phi_{day}) \dots \dots \dots (1)$$

- ϕ_{day} ; 晝間經路의 位相遅延量
- ϕ_{night} ; 夜間經路의 位相遅延量
- K_1 ; 經路의 平均的인 實効補間係數

로 計算할 수 있다.

E. R. Swanson²⁾의 (1)式을 다음 式으로 모델화하였다.

$$\phi = K_0 + \bar{F} \cdot DK_0 + \int_{path} [K_1 \sigma + F \cdot DK_1 \sigma] + [K_2 + F \cdot DK_2] B_2 + [K_3 + F \cdot DK_3] B_3 dy \dots (2)$$

- 但, K_0 ; 勵振定數(Excitation Factor)
- F ; Diurnal Function (Solar Position)
- \bar{F} ; 經路上的 F 의 平均値
- DK_0 ; 晝夜間의 勵振定數의 差
- K_1 ; 晝間 大地導電 係數
- σ ; 大地 導電率
- DK_1 ; 晝夜間의 導電係數의 差
- B_2 ; 磁氣 Parameter.
- K_2 ; 晝間의 磁氣方向 係數
- DK_2 ; 晝夜間의 磁氣方向 係數의 差
- B_3 ; 緯度 Parameter.
- K_3 ; 晝間緯度係數
- DK_3 ; 晝夜間의 緯度係數의 差
- dy ; 傳播經路의 微小距離

이와 같은 Swanson's Model이라 하며, 現在 市販되고 있는 表에가 傳播補正表(Predicted Propagation Correction Table)는 거의 이 式에 依하여 計算된 것이다.^{2) 90-9)}

이 表를 利用하여 있는 係數 變換하기 때문에 自動化 表에가(Automega)가 要求되며, Swanson'

Model은 比較的 精密하다고는 하지만 複雜하기 때문에 小型의 컴퓨터로는 處理가 不可能하여 簡略化한 모델이 要求된다.⁵⁾

한편, Pierce는 傳播位相速度에 가장 크게 影響을 미치는 電離層의 反射高度만을 考慮하여 相對 傳播位相速度를 太陽의 天頂角(X, Solar Zenith Angle)의 餘弦(cosine)의 函數로 나타내었다.

그림 1.에서 보는 바와 같이 오메가 位相遲延의 日變化는 三次曲線에 매우 가까우며 曲線의 極值에 對하여도 거의 左右對稱이므로 相對傳播位相速度 v_R 을 (3)式으로 近似化하였다.

$$v_R = A_3(\cos X)^3 + A_2(\cos X)^2 + A_1(\cos X) + A_0 \dots\dots\dots(3)$$

但, X; 太陽의 天頂角

A_3, A_2, A_1, A_0 ; 係數(以下 相對位相速度係數라 함)

이것을 Pierce's Model⁹⁾이라 한다.

2.1.2 傳播 豫測式의 算出

本 論文에서는 Pierce's Model에 立脚하여 傳播豫測式을 算出한다.

相對位相速度 v_R 은 (4)式과 같이 定義된다.

$$v_R = \frac{V_P}{V_C} \dots\dots\dots(4)$$

但, V_P ; 平均 傳播位相速度

V_C ; 光速(1.61987041×10^8 mi/sec)

또한 全位相 遲延量 ϕ 는 (5)式에 依하여 求해진다.

$$\phi = \frac{f \cdot \int dy}{V_P} \dots\dots\dots(5)$$

但, f ; 電波의 周波數[c/s]

dy ; 傳播經路의 微小距離

따라서 (5)式의 積分을 求하려면 電波의 傳播經路를 太陽의 天頂角에 따라 區間區分*을 하고, 天頂角이 X_i 인 各各의 微小 區間에 있어서의 傳播速度 $V_{P,i}$ 를 求한다.

$$V_{P,i} = V_C \cdot v_{R,i} = V_C \cdot (A_3 \cos^3 X_i + A_2 \cos^2 X_i + A_1 \cos X_i + A_0) \dots\dots\dots(6)$$

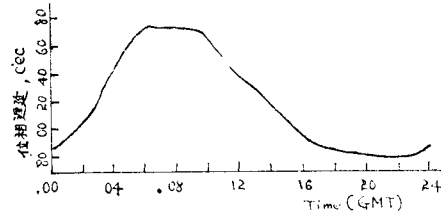
Pair(A-B)의 信號를 受信할 경우, 太陽의 天頂角이 X_i 인 區間에 있어서의 位相遲延量의 差(位相差) $\phi_i^{A,B}$ 는 다음과 같다.

$$\phi_i^{A,B} = \frac{f \cdot (D_i^A - D_i^B)}{V_{P,i}} \dots\dots\dots(7)$$

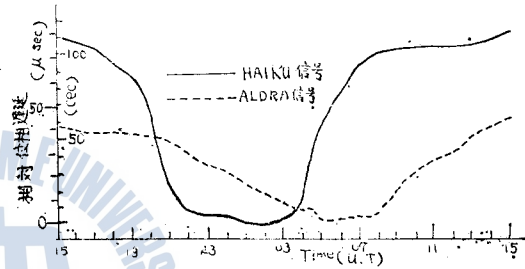
但, D_i^A, D_i^B ; A, B局 信號의 傳播經路上 天頂角이 各各 X_i 인 區間長.

結局 位相差는 各 區間의 距離差($D_i^A - D_i^B$)에 依해서 일어나므로 全距離差 $\sum_i (D_i^A - D_i^B)$ 에 對한

*附錄; 傳播經路의 區間區分



1) Average 10.2KHz phase of Kaiku, Hawaii, received at Foresport, New York, 17~21 May 1956(參考文獻 4에서)



2) Haiku와 Aldra兩局信號의 日變化; 1938. 10. 11. 13.6KHz, Kagoshima, Japan (參考文獻 2에서)

그림 1. OMEGA 傳播位相의 日變化

平均傳播位相速度 V_p^{AB} 는 (8)에 依해 計算된다.

$$V_p^{AB} = \sum_i \left[V_c \cdot \frac{D_i^A - D_i^B}{D^A - D^B} (A_3 \cos^2 X_i + A_2 \cos X_i + A_1 \cos X_i + A_0) \right] \dots \dots \dots (8)$$

但, $D^A = \sum_i D_i^A$
 $D^B = \sum_i D_i^B$

2.2 測定位相差에 依한 平均傳播位相速度的 計算式

오레가 海圖, 오레가 表에서와 같이 受信器가 指示하는 指示位相差는 實際의 位相差에 보유된 딜레이(coding delay) 900레인(lane)을 除한 값이므로, Pair(A-B)의 指示位相差를 $(\phi_0^A - \phi_0^B)$ 라 하면 實際의 位相差는 $[(\phi_0^A - \phi_0^B) - 900]$ 이 되고, 이 位相差를 일으킨 平均 傳播速度 V_o^{AB} 는

$$V_o^{AB} = \frac{f \cdot (D^A - D^B)}{[(\phi_0^A - \phi_0^B) - 900]} \dots \dots \dots (9)$$

의 式으로 求해진다.

2.3 相對 位相速度係數의 算出式

(3)式的 係數 A_3, A_2, A_1, A_0 의 最適值를 求하기 爲하여 最小自乘法를 利用한다. 平均 傳播位相速度的 計算值와 測定值의 差(誤差)에 依해서 位相差도 決定되므로, 이 平均 傳播位相速度的 計算值와 測定值의 差를 最小로 하는 相對位相速度 係數를 求하면 된다.

(8), (9)式에서

$$V_p^{AB} - V_o^{AB} = \sum_i \left[V_c \cdot \frac{D_i^A - D_i^B}{D^A - D^B} (A_3 \cos^2 X_i + A_2 \cos X_i + A_1 \cos X_i + A_0) \right] - \frac{f \cdot (D^A - D^B)}{(\phi_0^A - \phi_0^B) - 900} \dots \dots \dots (10)$$

또한, 이들 各各의 체인(chain), 測定日(Day), 測定時刻(Time)에 對한 誤差의 계급의 數 S는 (11)式과 같다.

$$S = \sum_c \sum_d \sum_t (V_{p, cdt} - V_{o, cdt})^2 \dots \dots \dots (11)$$

但, suffix c; 測定 chain

d; 測定 day

t; 測定 time

(11)式은 Matrix를 利用하여 (12)式으로 나타낼 수 있다.

즉,

$$S = \| M\bar{x} - \bar{y} \|^2 \dots \dots \dots (12)$$

但,

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} A_3 \\ A_2 \\ A_1 \\ A_0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{matrix}
 M = V_C \cdot \\
 (n \times m \times l) \times 4 \\
 \text{matrix}
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 P_3, c_1 d_1 t_1 & P_2, c_1 d_1 t_1 & P_1, c_1 d_1 t_1 & P_0, c_1 d_1 t_1 \\
 P_3, c_1 d_2 t_1 & P_2, c_1 d_2 t_1 & P_1, c_1 d_2 t_1 & P_0, c_1 d_2 t_1 \\
 P_3, c_1 d_m t_1 & P_2, c_1 d_m t_1 & P_1, c_1 d_m t_1 & P_0, c_1 d_m t_1 \\
 P_3, c_2 d_1 t_1 & P_2, c_2 d_1 t_1 & P_1, c_2 d_1 t_1 & P_0, c_2 d_1 t_1 \\
 P_3, c_2 d_2 t_1 & P_2, c_2 d_2 t_1 & P_1, c_2 d_2 t_1 & P_0, c_2 d_2 t_1 \\
 P_3, c_2 d_m t_1 & P_2, c_2 d_m t_1 & P_1, c_2 d_m t_1 & P_0, c_2 d_m t_1 \\
 P_3, c_n d_1 t_1 & P_2, c_n d_1 t_1 & P_1, c_n d_1 t_1 & P_0, c_n d_1 t_1 \\
 P_3, c_n d_m t_1 & P_2, c_n d_m t_1 & P_1, c_n d_m t_1 & P_0, c_n d_m t_1
 \end{pmatrix}
 \begin{matrix}
 \bar{y} = \\
 V_0, c_1 d_1 t_1 \\
 V_0, c_1 d_2 t_1 \\
 V_0, c_1 d_m t_1 \\
 V_0, c_2 d_1 t_1 \\
 V_0, c_2 d_2 t_1 \\
 V_0, c_2 d_m t_1 \\
 V_0, c_n d_1 t_1 \\
 V_0, c_n d_m t_1
 \end{matrix}$$

$$\begin{aligned}
 P_3 &= \frac{1}{D^A - D^B} \cdot \sum \left[(D_i^A - D_i^B) \cos^3 X_i \right] \\
 P_2 &= \frac{1}{D^A - D^B} \cdot \sum \left[(D_i^A - D_i^B) \cos^2 X_i \right] \\
 P_1 &= \frac{1}{D^A - D^B} \cdot \sum \left[(D_i^A - D_i^B) \cos X_i \right] \\
 P_0 &= \frac{1}{D^A - D^B} \cdot \sum \left[(D_i^A - D_i^B) \right] = 1
 \end{aligned}$$

(12)式에서

$$\begin{aligned}
 S &= \| M\bar{x} - \bar{y} \|^2 = (M\bar{x} - \bar{y})' (M\bar{x} - \bar{y}) \\
 \frac{\partial S}{\partial \bar{x}} &= 2M'(M\bar{x} - \bar{y}) = 0
 \end{aligned}$$

相對位相速度 係數의 最適値는 다음의 (13)式에 依하여 計算된다.

$$\bar{x} = (M'M)^{-1} M' \bar{y} \dots \dots \dots (13)$$

3. 測定 및 解析

3.1 測定時期 및 場所, 測定機器

3.1.1 測定 時期

- ① 1976年 5月 31日부터 1976年 6月 20日까지(每 2時間 마다)
; Pair(A-C), (C-D).
- ② 1976年 9月 13日부터 1976年 9月 26日까지(每 2時間 마다)
; Pair(A-D), (C-D).

3.1.2 測定場所, 送信局의 位置

① 測定 場所

釜山港의 朝島앞 海上

; 緯度 35° 04'.6N

經度 129° 05'.2E

② 送信局의 位置

- | | |
|--------------------------|--|
| A; Aldra, Norway | {
Lat. 66° 25' 15" N.
Long. 13° 09' 10" E. |
| C; Haiku, Hawaii | |
| D; La Mour, North Dakota | {
Lat. 46° 21' 52" N.
Long. 98° 20' 06" W. |

3.1.3 測定 機器

- ① 受信器; Omega-5 Navigation Receiver, Model NR-1005
 - ② Maker; OKI Electric Industry Co., Ltd.
2. 設置船隻; 韓國海洋大學 練習船 "HANBADA"號

3.2 測定值 및 計算表

3.2.1 測定值

그림 2.에서 보는 바와 같이 測定位相差는 每月中 거의 같은 日變化를 反復한다. 이것은 每月の 每日 같은 時刻에 對하여 一定한 傳播經路에서는 太陽의 天頂角이 거의 同一하기 때문이다.

따라서 每月中의 같은 時刻의 測定值에 對한 平均値를 利用하여 計算을 行하였다.

測定H/day는 1976年 6月中의 것을 d_1 , 1976年 9月中의 것을 d_2 로 하고 測定時刻(time)은 그리니치 時分(GMT)의 2時間 간격으로 하였다. 따라서 $t=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$ 는 各各 그리니치 時分 00^h, 02^h, 04^h, 06^h, 08^h, 10^h, 12^h, 14^h, 16^h, 18^h, 20^h, 22^h를 表示한다.

單位表

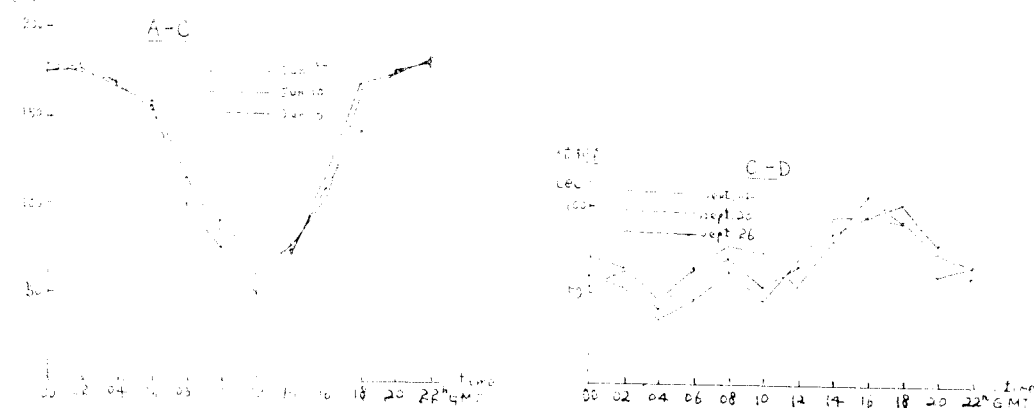


그림 2. 測定 位相差의 日變化 例

表 1. 平均 傳播位相速度(V_0) 및 位相差의 測定值

		Time					
chain		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
A-C	位相差(cycles)	11.81	11.78	11.70	11.53	11.13	10.82
(d_1)	V_0 (mi/sec)	155,832.9	156,229.7	157,297.9	159,617.2	165,353.6	170,091.1
C-D	位相差	-89.49	-89.47	-89.50	-89.46	-89.14	-88.80
(d_1)	V_0	161,542.7	161,578.9	161,524.7	161,596.9	162,177.0	162,798.0
A-D	位相差	-77.45	-77.70	-77.96	-78.17	-78.36	-78.68
(d_2)	V_0	162,893.1	162,369.0	161,827.5	161,392.8	161,001.5	160,346.6
C-D	位相差	-89.36	-89.43	-89.55	-89.39	-89.25	-89.43
(d_2)	V_0	161,777.8	161,651.1	161,434.5	161,723.5	161,971.1	161,651.1
		Time					
Chain		t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
A-C	位相差(cycles)	10.74	10.86	11.08	11.65	11.75	11.81
(d_1)	V_0 (mi/sec)	171,358.1	169,464.6	166,099.8	157,973.0	156,628.6	155,832.9
C-D	位相差	-88.77	-89.79	-88.84	-89.22	-89.46	-89.54
(d_1)	V_0	162,853.0	162,816.3	162,724.7	162,031.6	161,596.9	161,452.5
A-D	位相差	-78.37	-77.95	-77.73	-77.45	-77.15	-77.18
(d_2)	V_0	160,980.9	161,848.3	163,206.4	162,893.1	163,526.6	163,463.0
C-D	位相差	-89.38	-89.13	-88.97	-89.15	-89.28	-89.39
(d_2)	V_0	161,741.6	162,195.2	162,486.9	162,158.8	161,922.7	161,723.5

$$\sum_{c d t} V_0 = 7.771083054 \times 10^6$$

表 1은 1976年 6月과 9月의 測定 位相差의 平均值 및 (9)式에 依하여 計算한 平均 傳播位相速度 V_0 를 나타낸다.

3.2.2 計算表

附錄에 記述한 方法에 依하여 各各의 傳播經路에 對하여, 太陽의 天頂角이 約 $0 \sim 5^\circ$, $5^\circ \sim 10^\circ$, $10^\circ \sim 15^\circ$ 等과 같이 되도록 區間을 定하고, 各 區間마다 中間의 天頂角(X_i)과 같은 天頂角을 가지는 Pair(A-B)의 各 區間의 距離差($D_i^A - D_i^B$)를 求하여, (12)式의 P_3, P_2, P_1 을 計算한 結果는 表 2와 같다.

表 3은 各 送信局과 受信點間을 連結하는 傳播經路長을 나타낸다.

또한, 表 4는 各 測定時刻에 있어서의 太陽의 地位를 表示한다.

表 2 P_0, P_2, P_1 의 값

		P_0	P_2	P_1
A-C (d_1)	t_1	-14.37867	-12.57138	-10.63576
	t_2	-9.116832	8.394325	-6.147481
	t_3	-7.719765	0.7424486	0.799204
	t_4	6.147980	7.405254	8.685451
	t_5	5.484434	6.946794	11.04977
	t_6	5.162279	2.001663	17.54891
	t_7	4.811284	-2.088234	16.63920
	t_8	2.882281	-2.155295	12.13296
	t_9	0.672946	-0.075485	4.72366
	t_{10}	-0.440219	-0.407305	-2.575071
	t_{11}	-3.526187	-5.54420	-10.54952
	t_{12}	-10.43657	-11.71862	-11.55545
C-D (d_1)	t_1	-0.9071263	-0.559120	0.016320
	t_2	-0.686615	-0.529493	-0.195209
	t_3	-0.154310	-0.1078217	-0.110118
	t_4	0.105066	0.200706	0.155528
	t_5	0.094990	0.019877	0.515981
	t_6	0.289522	-0.494375	1.024878
	t_7	0.365498	-0.641177	1.231504
	t_8	0.313752	-0.230810	1.436541
	t_9	0.388852	0.4055245	1.373259
	t_{10}	0.666175	0.831821	1.168010
	t_{11}	0.507902	0.613480	0.752657
	t_{12}	-0.277920	-0.036160	0.355415
A-D (d_2)	t_1	0.306314	0.547919	1.431549
	t_2	0.203018	0.306330	0.474512
	t_3	-0.0845926	0.0973667	-0.527404
	t_4	-0.387947	-0.105945	-1.457805
	t_5	-0.2877557	0.1251470	-1.812034
	t_6	-0.171683	0.1615368	-1.798459
	t_7	-0.252193	0.3758840	-1.409930
	t_8	-0.147900	0.2380200	-0.49349

表 2 P_3, P_2, P_1 의 값

		P_3	P_2	P_1
$A-C (d_1)$	t_1	-14.34863	-12.57178	-10.63576
	t_2	-9.116832	8.394325	-6.147481
	t_3	9.719305	0.7424486	0.799204
	t_4	6.147983	7.405254	8.655451
	t_5	6.484434	6.946794	14.04977
	t_6	5.162279	2.001663	17.54831
	t_7	4.811284	-2.088234	16.63920
	t_8	2.882281	-2.155297	12.13293
	t_9	0.672947	-0.675480	4.72366
	t_{10}	-0.442219	-0.467305	-2.575071
	t_{11}	-3.526187	-5.54420	-10.54952
	t_{12}	-10.43637	-11.71862	-11.55545
$C-D (d_2)$	t_1	-0.9071262	-0.559120	0.016320
	t_2	-0.686615	-0.529493	-0.195209
	t_3	-0.154310	-0.4078247	-0.110118
	t_4	0.105066	0.290706	0.155528
	t_5	0.094990	0.319877	0.515981
	t_6	0.259522	-0.494375	1.024878
	t_7	0.355498	-0.641177	1.231504
	t_8	0.313752	-0.230810	1.436541
	t_9	0.388852	0.4055246	1.373259
	t_{10}	0.665175	0.831821	1.168010
	t_{11}	0.507902	0.613480	0.752657
	t_{12}	-0.277920	-0.036160	0.355415
$A-D (d_2)$	t_1	0.306314	0.547919	1.431549
	t_2	0.203018	0.306330	0.474512
	t_3	-0.0845926	0.0973667	-0.527404
	t_4	-0.387947	-0.105945	-1.457805
	t_5	-0.2877557	0.1251470	-1.812034
	t_6	-0.171683	0.1615368	-1.798459
	t_7	-0.252193	0.3758840	-1.409930
	t_8	-0.147900	0.2380200	-0.49349

	t_9	-0.146669	0.125648	0.641757
	t_{10}	0.394302	0.1783696	1.542385
	t_{11}	0.382280	0.420101	3.105083
	t_{12}	0.290629	0.551796	2.776591
C-D (d_2)	t_1	-1.080406	-1.005355	-0.588069
	t_2	-0.727411	-0.7745361	-0.745700
	t_3	-0.233141	-0.150335	-0.704692
	t_4	-0.128449	0.242645	-0.458005
	t_5	0.052779	-0.021421	-0.000635
	t_6	0.653927	-0.725520	0.508622
	t_7	0.9299122	-1.012446	0.765180
	t_8	0.6295350	-0.724603	0.913942
	t_9	0.251034	-0.063325	0.857991
	t_{10}	0.210993	0.345763	0.618126
	t_{11}	0.004057	0.069498	0.2013476
	t_{12}	-0.696232	-0.644662	-0.280392

表 3. 傳播經路長 및 距離差

DA	4,046.83 N. miles
DC	3,866.40 "
DD	5,283.70 "
$DA-DC$	180.43 "
$DA-DD$	-1,236.87 "
$DC-DD$	-1,417.30 "

表 4. 測定時期에 있어서의 太陽의 地位(GP)

Day	Time	Lat.	Long
d_1	t_1	23° 18. '0N	179° 55. '0W
	t_2	"	150° 05. '2E
	t_3	"	120° 05. '5E
	t_4	"	090° 05. '8E
	t_5	"	060° 06. '2E
	t_6	"	030° 06. '3E
	t_7	"	000° 06. '6E

d_2	t_0	°	129° 52.42W	
	t_1	°	069° 52.19W	
	t_2	°	089° 52.16W	
	t_3	°	119° 52.14W	
	t_4	°	149° 52.11W	
	t_5	3700.70N	178° 48.12E	
	t_6	°	148° 48.18E	
	t_7	°	118° 48.13E	
	t_8	°	088° 48.19E	
	t_9	°	058° 47.14E	
	t_{10}	°	028° 47.10E	
	t_{11}	°	001° 13.14W	
	t_{12}	°	131° 13.19W	
	t_{13}	°	061° 14.13W	
	t_{14}	°	091° 14.18W	
	t_{15}	°	121° 15.12W	
	t_{16}	°	151° 15.17W	

3.3 係數의 算出

表 1, 表 2, 表 3, 表 4를 基礎로 하여 (13)式의 要素를 計算하면 (14)式과 같다.

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} = V_P^{-1} \begin{pmatrix} 543.8623611 & -493.2797255 & 716.9626604 & -11.27339868 \\ 493.2797255 & 547.5495839 & 528.775133 & -28.7384048 \\ 716.9626604 & 528.775133 & 1426.136963 & 42.38783399 \\ -11.27339868 & -28.7384048 & 42.38783399 & 48 \end{pmatrix}^{-1}$$

$$\begin{pmatrix} -1.483779514 \times 10^9 \\ -4.43534385 \times 10^9 \\ 7.55892672 \times 10^9 \\ 7.771083054 \times 10^9 \end{pmatrix} \quad \dots \dots \dots (14)$$

위의 (14)式을 計算하면 最適 相對位相速度 係數 A_0, A_1, A_2, A_3 가 求해진다.

- 즉, $A_0 = 0.00263035$
- $A_1 = -0.00288058$
- $A_2 = 0.002868565$
- $A_3 = 0.995807573$

結果的으로 傳播位相速度 V_P 는 (6)式에 依하여 다음과 같이 表示된다.

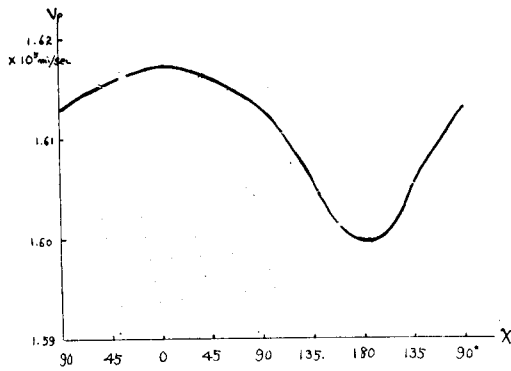


그림 3. 太陽의 天頂角(X)에 對한 傳播位相速度(V_p)

$$V_p = 161,307.9221 + 464.67043(\cos X) - 466.61651(\cos X)^2 + 426.08234(\cos X)^3$$

[mi/sec].....(15)

즉, 傳播位相速度는 太陽의 天頂角에 對한 餘弦(cosine)의 三次 函數로 表示되었으며, 윗 式에 依한 計算値는 그림 3과 같다.

傳播位相速度(V_p)는

晝間($X=0^\circ$); $V_p=161,732.0584$ mi/sec

夜間($X=180^\circ$); $V_p=159,950.5528$

日出沒時($X=90^\circ$); $V_p=161,307.9221$

로 晝間에 가장 크고, 夜間에 가장 작으며, 日出沒 時에는 그 사이의 값을 알 수 있다.

3.4 標準誤差

表 2와 (15)式을 利用하여 各 測點 및 測定時刻에 對한 平均 傳播位相速度 및 位相差를 計算하면 表 5와 같다.

Day	Chain	中央誤差	標集誤差
6 月	A-C	0.0975	0.1445

또한 表 1과 表 5에 依하여 求한, 測定 位相差의 計算 値에 對한 誤差는 表 6에 表示되어 있다.

① 測定値의 計算値에 對한 各 測點別 中央誤差 및 標準

α_1	f_3	↗	129° 53.13W	
	f_4	↗	139° 52.19W	
	f_5	↗	139° 52.16W	
	f_6	↗	119° 52.14W	
	f_7	↗	149° 52.14W	
			3700.70N	178° 49.12E
	f_8	↗	148° 48.98E	
	f_9	↗	118° 48.13E	
	f_{10}	↗	088° 47.19E	
	f_{11}	↗	058° 47.14E	
	f_{12}	↗	028° 47.10E	
	α_2	f_{13}	↗	001° 13.14W
f_{14}		↗	131° 13.19W	
f_{15}		↗	061° 14.13W	
f_{16}		↗	091° 14.18W	
f_{17}		↗	121° 15.12W	
f_{18}		↗	151° 15.17W	

3.3 係數의 算出

表 1, 表 2, 表 3, 表 4를 基礎로 하여 (13)式의 要素를 計算하면 (14)式과 같다.

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} A_3 \\ A_2 \\ A_1 \\ A_0 \end{pmatrix} = V_2^{-1} \begin{pmatrix} 543.8623611 & 493.2797255 & 716.9626604 & -11.27339868 \\ 493.2797255 & 547.5495839 & 528.775133 & -28.7384048 \\ 716.9626604 & 528.775133 & 1426.136963 & 42.38783399 \\ -11.27339868 & -28.7384048 & 42.38783399 & 48 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -1.483779514 \times 10^9 \\ -4.43534385 \times 10^9 \\ 7.55892672 \times 10^9 \\ 7.771083054 \times 10^9 \end{pmatrix} \quad (14)$$

위의 (14)式을 計算하면 最適 相對位相速度 係數 A_3, A_2, A_1, A_0 가 求해진다.

$$\begin{aligned} \text{즉, } A_3 &= 0.00263035 \\ A_2 &= -0.00288058 \\ A_1 &= 0.002868565 \\ A_0 &= 0.995807573 \end{aligned}$$

結果의 으로 傳播位相速度 V_P 는 (6)式에 依하여 다음과 같이 表示된다.

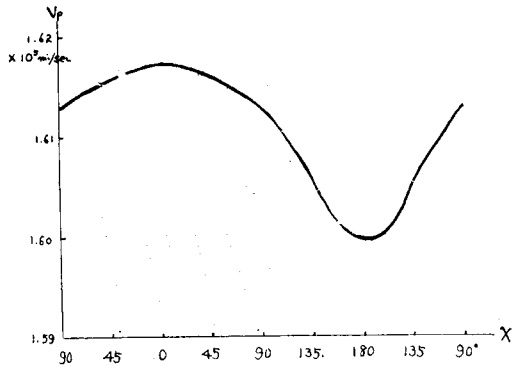


그림 3. 太陽의 天頂角(X)에 對한 傳播位相速度(V_p)

$$V_p = 161,307.9221 + 464.67043(\cos X) - 466.61651(\cos X)^2 + 426.08234(\cos X)^3$$

[mi/sec].....(15)

즉, 傳播位相速度는 太陽의 天頂角에 對한 餘弦(cosine)의 三次 函數로 表示되었으며, 위 式에 依한 計算値는 그림 3과 같다.

傳播位相速度(V_p)는

晝間($X=0^\circ$); $V_p = 161,732.0584$ mi/sec

夜間($X=180^\circ$); $V_p = 159,950.5528$

日出沒時($X=90^\circ$); $V_p = 161,307.9221$

로 晝間에 가장 크고, 夜間에 가장 작으며, 日出沒 時에는 그 사이의 값을 알 수 있다.

3.4 標準誤差

表 2와 (15)式을 利用하여 各 測點 및 測定時刻에 對한 平均 傳播位相速度 및 位相差를 計算하면 表 5와 같다.

Day	Chain	中央誤差	標準誤差
6 月 (d_1)	A-C	0.0975	0.1445
	C-D	0.1752	0.2598
9 月 (d_2)	A-D	0.2670	0.3958
	C-D	0.2211	0.3278

또한 表 1과 表 5에 依하여 求한, 測定 位相差의 計算 値에 對한 誤差는 表 6에 表示되어 있다.

① 測定値의 計算値에 對한 各 測點別 中央誤差 및 標準 誤差는 왼쪽의 表와 같다.

② 全 測定値의 計算値에 對한 誤差는 다음과 같다.

標準誤差 $\sigma = 0.2969$ (lane)

中央誤差(確率誤差) $r = 0.6745 \sigma = 0.2003$ (lane)

그림 4는 位相差에 對한 計算値와 測定値를 그래프로 表示한 것이다.

表 5. 平均 傳播位相速度(V_p) 및 位相差의 計算値

Chain	Time		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
			A-C	位相差(cycles)	11.75	11.61	11.39	11.19
(d_1)	V_p (mi/sec)		156,601.85	158,483.73	161,639.20	164,447.52	166,931.78	170,727.93
C-D	位相差		-89.69	-89.70	-89.66	-89.61	-89.47	-89.19
(d_1)	V_p		161,189.89	161,171.73	161,241.32	161,331.31	161,578.88	162,083.42
A-D	位相差		-77.95	-78.13	-78.26	-78.40	-78.71	-78.69
(d_2)	V_p		161,847.97	161,472.36	161,201.80	160,919.31	160,285.00	160,323.70
C-D	位相差		-89.77	-89.78	-89.82	-89.83	-89.60	-89.15
(d_2)	V_p		161,043.44	161,012.89	160,951.28	160,927.15	161,340.11	162,161.43

		time					
		t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
A-C	位相差(cycles)	10.70	10.88	11.23	11.50	11.69	11.73
	V_p (mi/sec)	172,054.07	169,179.54	163,825.25	160,112.57	157,493.44	156,959.71
C-D	位相差	-89.65	-89.12	-89.28	-89.38	-89.47	-89.58
	V_p	162,333.68	162,216.82	161,922.49	161,743.37	161,587.81	161,371.53
A-D	位相差	-78.67	-78.41	-78.13	-78.82	-77.51	-77.67
	V_p	160,339.92	160,904.53	161,485.01	162,109.40	162,757.49	162,431.75
C-D	位相差	-88.95	-89.05	-89.32	-89.50	-89.59	-89.69
	V_p	162,531.27	162,338.95	161,843.11	161,523.71	161,370.78	161,181.79

表 6. 測定에 相差의 計算値에 對한 誤差(x_i) $X_i(\text{lane}) = \text{計算値} - \text{測定値}$

		time					
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
A-C	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	x_i^2	0.06	0.16	0.21	0.34	0.10	0.04
C-D	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	x_i^2	0.0035	0.0256	0.0441	0.1153	0.01	0.0016
A-D	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	x_i^2	0.20	0.23	0.16	0.15	0.33	0.39
C-D	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	x_i^2	0.01	0.0529	0.0256	0.0227	0.1689	0.1521
A-D	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	x_i^2	0.50	0.43	0.33	0.43	0.35	0.01
C-D	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	x_i^2	0.25	0.1849	0.69	0.1849	0.1225	0.0001
A-D	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)
	x_i^2	0.41	0.35	0.27	0.35	0.35	0.28
C-D	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	x_i^2	0.1681	0.1225	0.0729	0.1295	0.1225	0.0784

		time						$\sum_{i=1}^{12} x_i^2$
		t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}	
A-C	x_i	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	$ x_i = 1.41$
	x_i^2	0.04	0.02	0.1	0.15	0.06	0.08	
C-D	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	$ x_i = 2.72$
	x_i^2	0.0933	0.0904	0.0227	0.0225	0.0035	0.0064	
A-D	x_i	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	$ x_i = 4.43$
	x_i^2	0.28	0.33	0.44	0.16	0.01	0.04	
C-D	x_i	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	$ x_i = 4.43$
	x_i^2	0.0784	0.1689	0.1933	0.0256	0.0001	0.0016	

		time					
		t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
chain							
A-C	位相差(cycles)	10.70	10.88	11.23	11.50	11.69	11.73
(d_1)	V_p (mi/sec)	172,054.67	169,179.54	163,825.27	160,112.57	157,493.44	156,959.71
C-D	位相差	-89.05	-89.12	-89.28	-89.38	-89.47	-89.58
(d_2)	V_p	162,335.08	162,216.81	161,922.49	161,743.37	161,587.81	161,371.53
A-D	位相差	-78.67	-78.41	-78.13	-78.82	-77.91	-77.67
(d_3)	V_p	160,329.92	160,094.53	161,485.01	162,109.40	162,747.46	162,431.73
C-D	位相差	-88.95	-89.05	-89.32	-89.50	-89.59	-89.63
(d_4)	V_p	162,531.27	162,338.95	161,843.11	161,523.71	161,370.78	161,181.79

表 6. 測定에 相差의 計算值에 對한 誤差(x_i) $X_i(\text{lane}) = \text{計算值} - \text{測定值}$

		time						
		t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}	
chain								
A-C	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	
(d_1)	x_i^2	0.0036	0.0256	0.0441	0.1156	0.01	0.0016	
C-D	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	
(d_2)	x_i^2	0.04	0.0329	0.0256	0.022	0.1689	0.1521	
A-D	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	
(d_3)	x_i^2	0.25	0.1849	0.09	0.1849	0.1225	0.0001	
C-D	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	
(d_4)	x_i^2	0.1681	0.1225	0.0729	0.1296	0.1225	0.0784	
chain								
A-C	x_i	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	$ x_i = 1.41$
(d_1)	x_i^2	0.0016	0.0964	0.0225	0.0225	0.0036	0.0064	$x_i^2 = 0.2511$
C-D	x_i	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	$ x_i = 2.72$
(d_2)	x_i^2	0.0784	0.1689	0.1936	0.0256	0.0001	0.0016	$x_i^2 = 0.8102$
A-D	x_i	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	$ x_i = 4.48$
(d_3)	x_i^2	0.09	0.1916	0.16	0.1369	0.1296	0.2401	$x_i^2 = 1.8806$
C-D	x_i	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	$ x_i = 3.84$
(d_4)	x_i^2	0.1849	0.0964	0.1225	0.1225	0.0691	0.09	$x_i^2 = 1.2894$

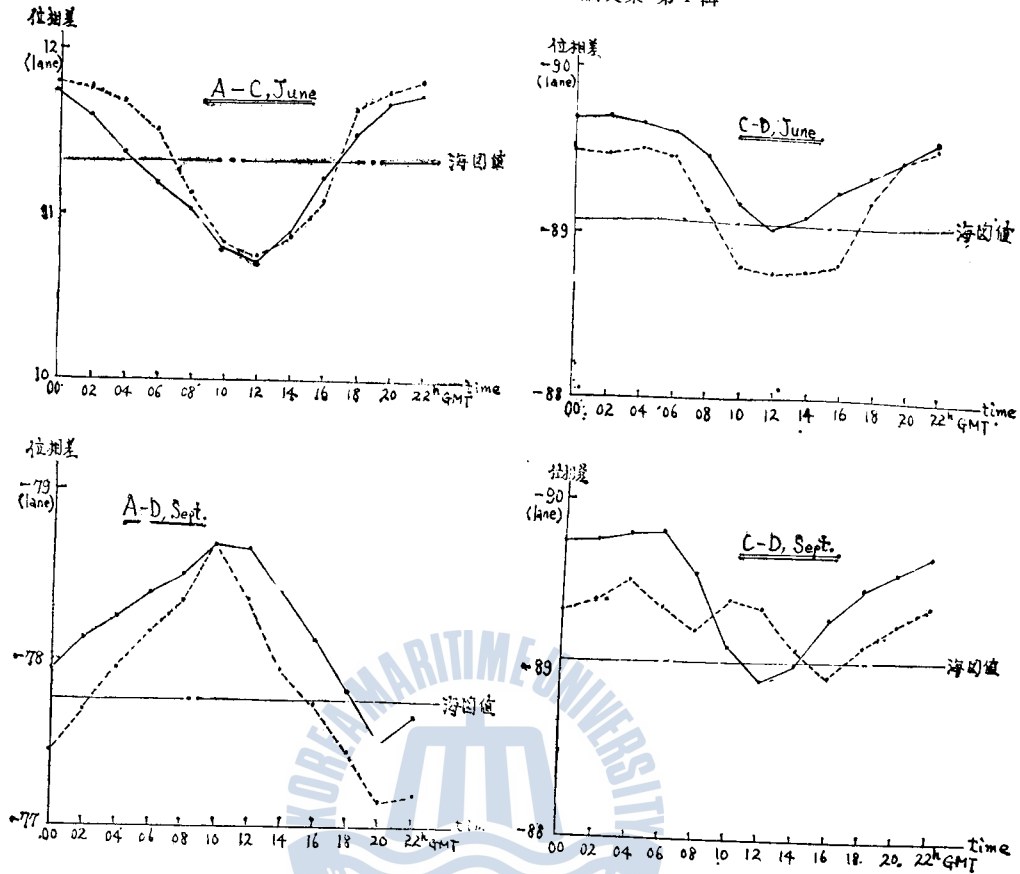


그림 4. 位相差의 計算值(實線)와 測定值(點線)

4. 結 論

以上の理論 및 實驗의 解析에 依하여 다음의 結論을 내릴 수 있다.

(1) 傳播位相速度를 簡略化된 Pierce's Model에 依하여 表示할 수 있음이 確認되었다. 즉, 相對位相速度 v_R 은

$$v_R = A_3(\cos X)^3 + A_2(\cos X)^2 + A_1(\cos X) + A_0$$

로 Model化 할 수 있다.

(2) 釜山 近海에 있어서 相對位相速度係數의 最適値는

$$A_3 = 0.00263035$$

$$A_2 = -0.00288058$$

$$A_1 = 0.002868565$$

$$A_0 = 0.995807573$$

으로 計算되었다.

(3) 따라서 傳播位相速度 V_p 는

$$V_p = 161,307.9221 + 464.67043(\cos X) \\ - 466.61651(\cos X)^2 + 426.08234(\cos X)^3$$

[mi/sec]로 決定되었으며, 이 式에 依하여 計算한 位相差에 對한 測定 lane值의 標準誤차는 다음과 같다.

1976年 6月中

Pair(A-C); 0.1446

Pair(C-D); 0.2598

1976年 9月中

Pair(A-D); 0.3958

Pair(C-D); 0.3278

(4) 本 論文에서 提示한 方法을 導入, 測定地点·測定 時期 및 체인(Chain)을 增加시켜 係數를 더욱 適合하게 決定하므로써 誤차는 減少된다.

(5) 測定 Data 中 計算值 또는 月中의 平均值와 크게 다른 것은 突然 電離層 擾亂(Sudden Ionospheric Disturbance; S. I. D.), 極冠擾亂(Polar Cap Disturbance; P. C. D.), 極光帶擾亂(Auroral Zone Disturbance; A. Z. D.) 等々の 各種 擾亂 効果에 依한 것으로 간주되며 이에 對하여는 더욱 研究되어야 할 것이다.

앞으로 傳播位相豫測에 對하여는 더욱 깊은 研究를 必要로 한다. 따라서 測定 資料를 增加시키고 Swanson's Model에 依한 解析을 並行하여 오메가 使用時의 船位誤差에 대하여 보다 完璧을 기 하고자 한다.

參 考 文 獻

- 1) 石井隆廣雄·日倉幸雄·永井清二·小内長七: 오메가電波의 傳播, 日本航海學會誌, 第47號, 東京, p. 18 (1975.10)
- 2) 山口一夫: 오메가航法 시스템, 成山堂, 東京, pp. 8-16, p. 24, pp. 31-34, pp. 152-153, pp. 248-250. (1975)
- 3) 오메가航法 編集委員會: 오메가航法, 鶴卷書房, 東京, pp. 1-4. (1958)
- 4) E. R. Swanson: OMEGA PROPAGATION, Paper prepared for the OMEGA SYMPOSIUM, Tokyo Japan, 12-13 June 1975.
- 5) 藤原雅一·塚田一雄·砂川 滿·坪田忠老: 自動化오메가에 於ける 電波傳播誤差補正에 對하여, 日本航海學會誌 第47號, pp. 41-43. (1975.10)
- 6) 古谷俊雄: 自動化오메가에 對하여, 日本航海學會誌 第47號, pp. 39-40. (1975.10)
- 7) 並川能正: 船位誤差論, 海文堂, pp. 41-44.

附錄. 傳播經路의 區間區分

傳播經路를 太陽의 天頂角에 따라 微少區間으로 區分하기 위하여 各 測定時期에 있어서의 太陽의 地位를 決定하고, 經路上의 太陽의 天頂角을 求한다.

本 論文에서는 天頂角(X)이 5° 變할 때마다 1區間으로 하였다. 왼쪽의 그림에서 P_i, P_j 및 D_i, D_j 를 計算하면 區間 $\overline{P_i P_j}$ 에 있어서의 太陽의 天頂角(X)은 다음과 같다

$$X \doteq \frac{X_i + X_j}{2} = \frac{D}{60} = \frac{1}{60} \left(\frac{D_i + D_j}{2} \right) \dots\dots\dots ①$$

但, X_i 는 點 P_i 의 天頂角

X_j 는 點 P_j 의 天頂角

D, D_i, D_j 는 nautical miles로 表示한 距離

$$X_i - X_j = \pm 5^\circ = \pm 300' \dots\dots\dots ②$$

T : 送信局의 位置, GP 太陽의 地位
 R : 受信 位置, P, P_i, P_j : 傳播經路上의 3點

이 經路上의 一點 P_i 를 求하기 위한 方程式은 ③式이며, P_i 와 GP 間의 距離를 求하는 式은 ④式이다.

$$L_i = \tan^{-1} \left[\frac{\tan L_2 \sin(\lambda_i - \lambda_1) - \tan L_1 \sin(\lambda_i - \lambda_2)}{\sin(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] \dots\dots\dots ③$$

$$D_i = 60 \cos^{-1} \left[\sin L_i \sin L_* + \cos L_i \cos L_* \cos(\lambda_* - \lambda_i) \right] \dots\dots\dots ④$$

또, 區間 $\overline{P_i P_j}$ 의 距離는 ④式의 L_*, λ_* 代身에 L_j, λ_j 를 代入하여 求한다.

