

## 인공위성 추적자료의 미분보정에 의한 궤도결정<sup>\*,\*\*</sup>

이병선,<sup>\*\*\*</sup> 조중현, 박상영, 최규홍  
연세대학교 천문기상학과

김 천 휘  
천문우주과학연구소  
(1988년 5월 20일 받음; 1988년 6월 10일 수리)

### Orbit Determination from Tracking Data of Artificial Satellite Using the Method of Differential Correction<sup>\*,\*\*</sup>

Byoung-Sun Lee,<sup>\*\*\*</sup> Jung-Hyun Jo, Sang-Young Park, and Kyu-Hong Choi

Department of Astronomy and Meteorology, Yonsei University, Seoul 120-749  
and

Chun-Hwey Kim

Institute of Space Science and Astronomy, Daejeon 302-348

(Received May 20, 1988; Accepted June 10, 1988)

### 요 약

인공위성의 추적자료로부터 예비궤도를 결정하고 이것을 초기값으로 해서 계산한 관측치(C)와 실제의 관측치(O)의 차이가 최소가 될 때까지 반복계산함으로써, 어떤 시각에 있어서 실제의 궤도에 가장 가까운 접용궤도 요소를 얻어내는 미분보정의 과정을 수행했다. 추적한 인공위성은 TIROS-N계열 위성인 NOAA-9이고 추적자료는 컴퓨터에 의한 프로그램 추적을 위해서 TBUS의 평균궤도요소로부터 미리 계산한 예측자료와 위성으로부터 송신되는 1.707GHz의 HRPT 신호를 전파연구소의 직경 5m인 자동추적안테나로 추적해서 얻은 실제 자료를 이용했다. 예비궤도의 결정은 추적자료에 따라 Gauss 방법과 Herrick-Gibbs 방법을 사용했고 미분보정의 과정에 있어서 미분보정행렬의 각 원소들은 Escobal(1975)의 해석적인 방법과 f, g 급수를 이용한 수치적인 방법으로 각각 구해서 그 결과를 비교해 보았다. 해석적인 방법과 수치적인 방법의 결과는 거의 일치하였고 각 시간간격에 따른 예비궤도가 다름에도 불구하고 미분보정된 궤도는 같은 값으로 수렴했다.

\* Yonsei University Observatory Contribution, No. 59.

\*\* 이 연구는 과학기술처 특정연구사업 연구비의 지원을 받았음.

\*\*\* 현 천문우주과학연구소 연구원

### Abstract

The differential correction process determining osculating orbital elements as correct as possible at a given instant of time from tracking data of artificial satellite was accomplished. Preliminary orbital elements were used as an initial value of the differential correction procedure and iterated until the residual of real observation(O) and computed observation(C) was minimized. Tracking satellite was NOAA-9 or TIROS-N series. Two types of tracking data were prediction data precomputed from mean orbital elements of TBUS and real data obtained from tracking 1.707GHz HRPT signal of NOAA-9 using 5 meter auto-track antenna in Radio Research Laboratory. According to tracking data either Gauss method or Herrick-Gibbs method was applied to preliminary orbit determination. In the differential correction stage we used both of the Escobal(1975)'s analytical method and numerical method using  $f, g$  series for the comparison. The results between analytical and numerical ones are nearly consistent. And the differentially corrected orbit converged to the same value in spite of the differences between preliminary orbits of each time span.

## I. 서 론

인공위성이 주어진 임무를 수행하기 위해서는 지상국의 통제를 받아야만 하는데, 이러한 과정들은 TT & C(Tracking, Telemetry and Command)를 통해서 이루어진다. 지상국에 있는 안테나로 위성을 추적하면서, 위성으로부터 정보를 수신하고, 위성을 제어하기 위해서는 그 궤도를 결정해야 하고 그로부터 궤도를 예측해야만 한다.

궤도의 결정은 예비궤도와 결정궤도에 대한 연구로 나뉘어진다(Baker 1964). 예비궤도의 결정은 궤도를 결정하는 과정에 있어서 필요한 최소한의 추적자료를 이용해서 궤도의 초기값을 결정하는 것으로 추적자료(각 위치, 각 위치 변화율, 시선거리, 시선거리변화율 등)에 따라서 여러 가지 변형된 방법들이 있다. 우리가 예비궤도 결정방법을 이용해서 어떤 위성의 궤도를 결정했을 때, 이것과 실제의 위성궤도와는 차이가 있다. 예비궤도를 결정하는 방법을 달리했을 때 그 궤도는 각각 달라지고, 같은 방법이라도 추적자료의 시간간격에 따라서 다른 궤도를 결정하게 된다(김두환 등, 1987). 또한, 인공위성에 대한 추적자료도 추적시스템의 systematic error와 random error 등으로 인해서 완전하다고는 볼 수 없다. 한편, 인공위성은 Shrivastava(1978)가 지적했듯이 여러 가지의 영향으로 인해 계속해서 섭동을 받고 있다. 이런 점에서 인공위성에 대한 더 많은 양의 추적자료를 가지고 있다면 그것을 다 포함하는 궤도를 구해서 섭동의 영향이나 추적자료의 오차를 최소화시킬 수 있다. 미분보정은 예비궤도를 결정한 후에 어떤 시각에 있어서 위성의 궤도를 가장 잘 나타내 줄 수 있는 점용궤도요소를 구하는 과정이다. 이것은 우리가

어떤 위성을 추적해서 얻는 관측치(O)와 예비궤도 요소로부터 계산된 관측치(C)의 차이  $\Delta = (O - C)$ 의 제곱의 합이 최소가 되는 궤도요소를 구해 내는 것이다(Herrick 1971). 이렇게 해서 얻은 궤도를 결정궤도(definitive orbit)라고 한다.

Gauss로부터 시작된 미분보정법은 탄도계산, 궤도결정, 그리고 디지털필터 설계에 이르기까지 폭 넓게 쓰여지고 있다(Rao 등, 1976). Herget(1968)은 목성의 위성들에 대한 궤도개선을 위해 미분보정을 사용했고 Wackernagel(1970)은 이를 인공위성에 맞게 수정해서 섭동을 받고 있는 위성의 궤도를 수치적으로 미분보정했다. Rao 등(1976)은 고층탐사 rocket의 자유비행에 대한 추적자료를 가지고 탄도계산을 했는데, 미분보정법은 계산한 탄도와 관측한 탄도의 차이에 대한 RMS 값이 최소가 되는 초기조건을 구하는 데 사용했다. 이들은 미분보정식을 구하는데 있어서 각 매개변수에 대한 미분값을 해석적인 방법과 수치적인 방법을 사용해서 비교해 보았는데, 그 값이 거의 일치했다.

이 논문에서는 인공위성을 추적해서 예비궤도를 결정하고 미분보정을 통해서 어떤 시각에 있어서 위성의 실제궤도에 가장 가까운 결정궤도를 알아내고자 한다. 실제로 추적한 인공위성은 TIROS-N/NOAA-9이고 추적시스템은 경기도 안양시에 있는 전파연구소의 직경 5m인 parabola antenna로서, 5-beam feed amplitude-comparison monopulse 시스템이다. 추적자료는 NOAA-9으로부터 송신되는 1.707GHz의 HRPT신호를 자동 추적해서 얻은 방위각과 고도자료와 TBUS 전문을 가지고 컴퓨터에 의한 프로그램 추적을 위해서 예측한 방위각, 고도, 시선거리, 그리고 시선거리 변화율 자료이다. 추적자료의 시간 간격에 따라 각각 다르게 결정된 예비궤도를 가지고 미분보정을 했으며 미분보정 행렬을 구하는 데에 있어서 해석적인 방법과 수치적인 방법으로 각각 결과를 비교해 보았다. 전체적인 미분보정의 과정은 batch process로 하였다.

## II. 미분보정식

우리가 인공위성을 추적해서 얻을 수 있는 관측자료가 어떤 시각에 있어서의 각 위치(방위각과 고도각 또는 적경과 적위), 시선거리( $\rho$ ), 시선거리변화율( $\dot{\rho}$ )이고 이러한 관측자료가  $n$ 쌍이 있는 경우, 이에 대한 미분보정식은 Escobal(1975)의 식을 확장, 변형시켜 다음의 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0, \Delta \dot{x}_0, \Delta \dot{y}_0, \Delta \dot{z}_0]^T = [M^T M]^{-1} M^T [\bar{A}_1 \cdot \Delta \bar{L}_1, \dots, \bar{A}_n \cdot \Delta \bar{L}_n, \bar{D}_1 \cdot \Delta \bar{L}_1, \dots, \bar{D}_n \cdot \Delta \bar{L}_n, \Delta \rho_1, \dots, \Delta \rho_n, \Delta \dot{\rho}_1, \dots, \Delta \dot{\rho}_n]^T \dots \dots \dots (1)$$

(1)식에서 미분보정행렬인 M은  $(4n \times 6)$ 행렬로 다음의 (2)식과 같다.

$$\begin{matrix}
 \bar{A}_1 \frac{\partial \bar{r}_1}{\rho_1 \partial x_0} & \bar{A}_1 \frac{\partial \bar{r}_1}{\rho_1 \partial y_0} & \bar{A}_1 \frac{\partial \bar{r}_1}{\rho_1 \partial z_0} & \bar{A}_1 \frac{\partial \bar{r}_1}{\rho_1 \partial \dot{x}_0} & \bar{A}_1 \frac{\partial \bar{r}_1}{\rho_1 \partial \dot{y}_0} & \bar{A}_1 \frac{\partial \bar{r}_1}{\rho_1 \partial \dot{z}_0} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \bar{A}_n \frac{\partial \bar{r}_n}{\rho_n \partial x_0} & \dots & \dots & \dots & \dots & \bar{A}_n \frac{\partial \bar{r}_n}{\rho_n \partial \dot{z}_0} \\
 \bar{D}_1 \frac{\partial \bar{r}_1}{\rho_1 \partial x_0} & \dots & \dots & \dots & \dots & \bar{D}_1 \frac{\partial \bar{r}_1}{\rho_1 \partial \dot{z}_0} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \bar{D}_n \frac{\partial \bar{r}_n}{\rho_n \partial x_0} & \dots & \dots & \dots & \dots & \bar{D}_n \frac{\partial \bar{r}_n}{\rho_n \partial \dot{z}_0} \\
 \frac{\partial \rho_1}{\partial x_0} & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial \rho_1}{\partial \dot{z}_0} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial \rho_n}{\partial x_0} & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial \rho_n}{\partial \dot{z}_0} \\
 \frac{\partial \dot{\rho}_1}{\partial x_0} & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial \dot{\rho}_1}{\partial \dot{z}_0} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial \dot{\rho}_n}{\partial \dot{x}_0} & \frac{\partial \dot{\rho}_n}{\partial \dot{y}_0} & \frac{\partial \dot{\rho}_n}{\partial \dot{z}_0} & \frac{\partial \dot{\rho}_n}{\partial \dot{x}_0} & \frac{\partial \dot{\rho}_n}{\partial \dot{y}_0} & \frac{\partial \dot{\rho}_n}{\partial \dot{z}_0}
 \end{matrix}
 \quad \dots \dots \dots (2)$$

(1)식과 (2)식에 있는  $\bar{L}$ ,  $\bar{A}$ ,  $\bar{D}$ 는 서로 직교하는 단위벡터로  $\bar{L}$ 은 관측지점으로부터 인공위성에 이르는 단위벡터이고,  $\bar{A}$ 는 동쪽 방향으로 적도면에 평행한 단위벡터이며,  $\bar{D}$ 는 관측지점의 자오선을 따라 북쪽으로 향하는 단위벡터이다(Herrick 1971). (2)식에 있는 편미분 값들은 각 시각에 있어서의 위치벡터와 속도벡터를 기준시각의 위치벡터와 속도벡터로 편미분한 값, 즉

$$\frac{\partial \bar{r}_i}{\partial \bar{r}_0}, \frac{\partial \dot{\bar{r}}_i}{\partial \dot{\bar{r}}_0}, \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial \bar{r}_0}, \frac{\partial \dot{\bar{r}}_i}{\partial \dot{\bar{r}}_0} \dots \dots \dots (3)$$

을 사용했는데, Escobal (1975)의 해석적인 방법과 f, g 급수에 의한 수치적인 방법을 각각 이용하여 결과를 비교해 보았다.

우리가 (1)식의 우변에 있는 state transition partial derivatives 인 미분보정행렬  $M$ 과 observation residual vector 인 (O-C) 값을 계산해 내면 좌변에 있는 state vector 인 위치 벡터와 속도벡터의 증감치를 알 수 있다. 이러한 state vector 는 초기치인 위치벡터와 속도벡터에 더해져서 (4)식과 같은 새로운 초기치를 만들어 낸다.

$$[x_0, y_0, z_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0]_{n+1}^T = [x_0, y_0, z_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0]_n^T + [\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0, \Delta \dot{x}_0, \Delta \dot{y}_0, \Delta \dot{z}_0]_n^T \dots \dots \dots (4)$$

미분보정의 과정은 (4)식과 같이 새로운 초기치를 가지고 residual 값이 가능한 한 작아지도록 반복 계산하게 된다. 또한 관측치에 따라 (1)식과 (2)식의 필요한 부분만을 가지고 미분보정할 수 있다.

이 논문에서 사용한 미분보정의 과정은 하나의 지상추적소에서 인공위성이 1회 뜨고 졌을 때를 추적해서 얻은 자료들을 이용해서, 중간관측시각에 대한 위치벡터와 속도벡터를 개선시키는 batch process 이다. 이와 같은 점을 고려해서 운동방정식은 단순히 2체문제에 국한해서 과정을 간단히 하였다. 좀더 정밀한 계산을 요할 때와 추적자료를 더해가는 방식인 recursive process 에 있어서는 섭동력을 고려한 운동방정식을 써야 한다.

### III. TIROS-N/NOAA-9의 추적과 궤도결정

#### 1. TIROS-N/NOAA-9의 추적

이 논문에서 사용한 NOAA-9의 추적자료는 두 가지이다. 하나는, 1987년 8월 21일자의 TBUS-2 중 PART IV의 평균궤도요소를 이용해서 얻은 프로그램 추적자료이고 다른 하나는 위성으로부터 송신되는 1.707GHz의 HRPT 신호를 자동추적안테나로 추적해서 얻은 실제 자료이다.

TBUS의 기본자료를 가지고 나정웅 등(1986)의 인공위성 추적 알고리즘에 따라  $J_2$  항에 의한  $\Omega$ ,  $\omega$ ,  $M$ 의 영년변화를 포함해서 계산한 1987년 8월 24일 16시 5분(KST)에서 16시 16분(KST)까지의 NOAA-9에 대한 23쌍의 방위각, 고도, 시선거리, 시선거리변화율은 다음의 표 1과 같다.

표 1. NOAA-9의 프로그램 추적자료(1987, 8, 24)

h	K.S.T.		AZIM (deg)	ELEV (deg)	RANGE (km)	RATE (km/s)
	m	s				
16	05	00	193.900	7.239	2670.56	-5.9911
16	05	30	196.098	9.448	2492.85	-5.8576
16	06	00	198.655	11.823	2319.69	-5.6867
16	06	30	201.664	14.385	2152.33	-5.4680
16	07	00	205.244	17.149	1992.41	-5.1876
16	07	30	209.550	20.114	1842.04	-4.8283
16	08	00	214.777	23.253	1703.88	-4.3691
16	08	30	221.157	26.480	1581.27	-3.7872
16	09	00	228.924	29.620	1478.20	-3.0633
16	09	30	238.227	32.381	1399.08	-2.1902
16	10	00	248.975	34.368	1348.19	-1.1858
16	10	30	260.678	35.200	1328.79	-0.0998
16	11	00	272.479	34.693	1342.26	+0.9927
16	11	30	283.481	32.970	1387.60	+2.0143
16	12	00	293.107	30.386	1461.77	+2.9100
16	12	30	301.193	27.344	1560.59	+3.6570
16	13	00	307.854	24.160	1679.60	+4.2591
16	13	30	313.319	21.032	1814.72	+4.7347
16	14	00	317.821	18.059	1962.47	+5.1063
16	14	30	321.656	15.281	2120.09	+5.3955
16	15	00	324.714	12.702	2285.37	+5.6204
16	15	30	327.394	10.311	2456.61	+5.7952
16	16	00	329.702	8.088	2632.48	+5.9311

NOAA-9는 137.62MHz의 APT (Automatic Picture Transmission), 1.707GHz의 HRPT (High Resolution Picture Transmission), 그리고 137.77MHz의 beacon 신호를 지구로 송신하는데, 여기에서는 실제의 추적자료를 얻기 위해서 1.707GHz의 L-Band HRPT 신호를 전파연구소의 직경 5m인 자동추적안테나시스템으로 추적했다. 여기에서는 추적을 원활하게 하기 위하여 프로그램추적과 자동추적을 병행했다. 이것은 먼저 프로그램추적자료를 가지고 위성의 신호를 수신한 후에 그 신호의 강도가 자동추적을 하기에 적합하면 자동추적방식으로 넘어가서 각 시각에 대한 위치자료를 컴퓨터의 data file에 기록하고, 자동추적이 불가능한 경우에는 다시 프로그램추적방식으로 넘어가는 방법인데 이와 같은 알고리즘을 프로그램화 하였다. 이런 방법으로 1987년 8월 24일 16시 12분 25초(KST)에서 16시 16분 11초(KST)까지 NOAA-9에 대한 15쌍의 방위각과 고도의 자동추적자료를 얻었다. 지구대기권에 의한 전파굴절의 보정은 고도각에 대해서 다음의 日本測地學會(1986)에 의해서 계산한 식

$$\text{Elev}_{tr} = \text{Elev}_{ap} + k \cot(\text{Elev}_{ap}) ;$$

$$K = -309.3972 \text{ arc second}$$

를 이용했고 방위각과 고도에 대한 data smoothing은 하지 않았다. 각 시각에 대한 자동추적 자료인 방위각, 고도, 대기굴절율을 보정한 고도, 그리고 프로그램 추적자료가 다음의 표 2에 있다.

표 2. NOAA-9에 대한 자동 추적자료(1987. 8. 24)

K.S.T. h m s	AUTO TRACK			PROGRAM TRACK			(AUTO-PROGRAM)		
	Azim. (deg)	Elev.ap. (deg)	refract. (deg)	Elev.tr. (deg)	Azim. (deg)	Elev. (deg)	$\Delta$ Az. (deg)	$\Delta$ ELap. (deg)	$\Delta$ ELtr. (deg)
16 12 25	300.075	28.055	-0.161	27.893	299.949	27.868	0.126	0.187	0.025
16 12 52	306.230	24.972	-0.185	24.787	306.205	25.010	0.025	-0.038	-0.223
16 13 02	308.325	23.917	-0.194	23.723	308.253	23.948	0.072	-0.031	-0.225
16 13 12	310.233	22.863	-0.204	22.659	310.170	22.895	0.063	-0.032	-0.236
16 13 32	313.705	20.782	-0.227	20.556	313.646	20.828	0.059	-0.046	-0.273
16 13 42	315.297	19.784	-0.239	19.545	315.223	19.821	0.074	-0.037	-0.276
16 14 01	318.026	18.297	-0.260	18.037	317.957	17.963	0.069	0.334	0.074
16 14 41	322.786	14.742	-0.327	14.415	322.782	14.313	0.004	0.429	0.102
16 14 51	323.849	13.901	-0.347	13.554	323.824	13.456	0.025	0.445	0.098
16 15 21	326.638	11.512	-0.422	11.090	326.633	11.010	0.005	0.502	0.080
16 15 31	327.424	10.778	-0.452	10.327	327.477	10.234	-0.053	0.544	0.093
16 15 41	328.260	10.004	-0.487	9.517	328.279	9.477	-0.019	0.527	0.040
16 15 51	329.061	9.251	-0.528	8.723	329.044	8.738	0.017	0.513	-0.015
16 16 01	329.717	8.603	-0.568	8.035	329.773	8.016	-0.056	0.587	0.019
16 16 11	330.466	7.864	-0.622	7.242	330.469	7.311	-0.003	0.553	-0.069

## 2. TIROS-N/NOAA-9의 예비궤도 결정과 미분보정

앞 절에 있는 표 1과 표 2의 NOAA-9에 대한 프로그램 추적자료와 자동 추적자료를 가지고 각각의 중간관측 시각에 있어서 예비궤도를 결정하고 그로부터 미분보정 과정을 통해 결정궤도를 구해내는 과정을 다음의 그림 1과 같은 방법으로 수행했다. 예비궤도를 결정하는 방법은 그림 1과 같이 각 위치 자료인 경우와 각 위치, 시선거리, 그리고 시선거리 변화율 자료인 경우에는 Gauss 방법을 사용했고 각 위치와 거리 자료인 경우에는 Herrick-Gibbs 방법을 각각 사용했다. 프로그램 추적자료로부터 예비궤도를 결정하는 과정은 중간관측시각인 16시 10분 30초(K ST)로부터 각각 30초, 1분, 2분, 4분, 그리고 5분 30초 간격인 자료를 사용해서 각 시간 간격에 따른 예비궤도의 변화를 알아보았다. 각 시간 간격에 따라 결정된 예비궤도를 초기값으

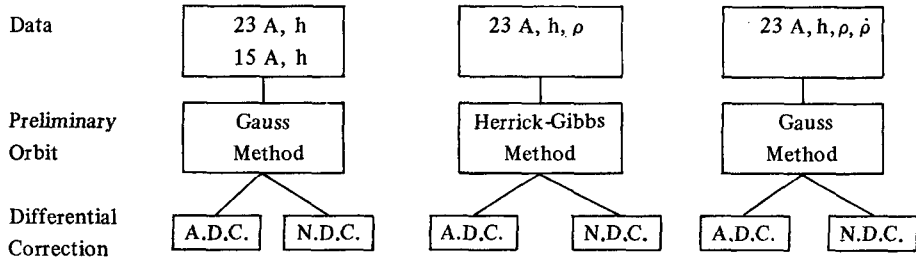


그림 1. NOAA-9의 궤도결정 과정

로 하는 미분보정의 과정은 미분보정 행렬을 구하는 데에 있어서 해석적인 방법(A.D.C.)과 수치적인 방법(N.D.C.)을 사용해서 그 결과를 비교해 보았다. 예비궤도의 결정과 미분보정에 있어서 관측지점에 대한 기준좌표계는 Bessel 타원체를 사용했기 때문에 중간관측시각에 대한 위치벡터의 성분을 Muller와 Jappel(1976)의 IAU 좌표계로 바꾸어 주기 위해 다음에 있는 理科年表(1987)의 식을 사용했다.

$$x(\text{IAU}) = x(\text{Bessel}) - 0.136 \text{ km}$$

$$y(\text{IAU}) = y(\text{Bessel}) + 0.521 \text{ km}$$

$$z(\text{IAU}) = z(\text{Bessel}) + 0.681 \text{ km}$$

Escobal(1975)에 있는 Gauss 방법과 Herrick-Gibbs 방법의 알고리즘을 사용해서 계산한 프로그램 추적자료에 대한 예비궤도는 다음의 표 3과 표 4에 있다.

표 3. Gauss 방법에 의한 프로그램 추적자료의 예비궤도(KST 16:10:30)

궤도요소	예비궤도	30 초	1분	2분	4분	5분 30초
x (km)	-5655.78	-5659.54	-5657.61	-5656.86	-5656.63	-5656.70
y (km)	-1633.78	-1631.65	-1632.74	-1633.17	-1633.30	-1633.26
z (km)	4177.40	4178.51	4177.95	4177.73	4177.66	4177.68
$\dot{x}$ (km/s)	3.6554	3.6643	3.6590	3.6569	3.6560	3.6557
$\dot{y}$ (km/s)	2.5497	2.5585	2.5531	2.5511	2.5503	2.5499
$\dot{z}$ (km/s)	5.9531	5.9705	5.9599	5.9558	5.9541	5.9536
a (km)	7229.511	7276.841	7247.995	7237.131	7232.710	7231.353
e	0.00160	0.00772	0.00401	0.00261	0.00204	0.00185
i (deg)	99.055	99.082	99.066	99.061	99.059	99.058
$\Omega$ (deg)	202.606	202.593	202.599	202.601	202.602	202.601
$\omega$ (deg)	16.390	31.021	27.706	23.927	20.701	19.308
M (deg)	19.453	4.812	8.133	11.915	15.141	16.534



표 4. Herrick-Gibbs 방법에 의한 프로그램 추적자료의 예비궤도(KST 16:10:30)

궤도요소	예측궤도	30초	1분	2분	4분	5분 30초
x (km)	-5655.78	-5655.82	-5655.82	-5655.82	-5655.82	-5655.82
y (km)	-1633.78	-1633.76	-1633.76	-1633.76	-1633.76	-1633.76
z (km)	4177.40	4177.43	4177.43	4177.43	4177.43	4177.43
$\dot{x}$ (km/s)	3.6554	3.6537	3.6536	3.6536	3.6534	3.6527
$\dot{y}$ (km/s)	2.5497	2.5484	2.5484	2.5484	2.5483	2.5478
$\dot{z}$ (km/s)	5.9531	5.9504	5.9503	5.9503	5.9499	5.9489
a (km)	7229.511	7222.956	7222.577	7222.663	7221.792	7219.198
e	0.00160	0.00081	0.00078	0.00078	0.00070	0.00055
i (deg)	99.055	99.054	99.055	99.055	99.055	99.055
$\Omega$ (deg)	202.606	202.605	202.605	202.605	202.605	202.605
$\omega$ (deg)	16.390	353.580	350.749	351.866	344.746	314.257
M (deg)	19.453	42.262	45.093	43.977	51.096	81.585

표 3과 표 4에 있는 예비궤도의 결정결과를 보면 사용된 추적자료의 시간 간격에 따라 각각 다른 예비궤도가 결정 되었음을 알 수 있다. 그것은 각 위치자료만을 사용한 Gauss 방법이 각 위치와 시선거리자료를 함께 사용한 Herrick-Gibbs 방법보다 더 심했다. 이러한 결과로 볼 때 최소한의 추적자료로부터 궤도를 결정하는 예비궤도의 결정은 그 위성의 궤도와 사용한 방법에 있어서 가장 적합한 시간 간격을 알아야 하는 문제가 있다. 또한, 세 쌍의 추적자료에 있어서 오차를 포함한 자료가 있을 때에는 실제의 궤도에 많이 벗어난 예비궤도가 결정될 수밖에 없는 문제도 있다. 이와 같은 문제점들을 극복하기 위해서 좀더 많은 추적자료를 사용해서 궤도를 결정하는 미분보정의 과정을 수행했다.

표 3과 표 4에 있는 각 시간간격에 따른 예비궤도를 초기값으로 해서 표 1에 있는 프로그램 추적자료에 대한 미분보정을 한 결과는 다음의 표 5에 있다. 미분보정 행렬을 구하는 데에 있어서 각각 해석적인 방법과 수치적인 방법을 사용해서 그 결과를 비교해 보았는데, 그 결과는 위치벡터의 성분에 있어서  $10^{-6} km$ 까지, 속도벡터 각 성분에 있어서  $10^{-8} km/s$ 까지 일치하였다. 위치벡터(e. r. unit)와 속도벡터(c. s. u. unit)의 증감이  $10^{-6}$  보다 작아질 때까지 반복계산했을 때 그 반복회수는 해석적인 방법이 2번, 수치적인 방법이 3번이었다. 또한, 각각의 시간간격에 따라 초기치를 다르게 했음에도 불구하고 같은 값으로 수렴하였다.

표 2에 있는 자동추적자료에 대한 예비궤도의 결정과 미분보정은 다음과 같이 수행하였다. 먼저, 중간관측시각인 16시 14분 41초(KST)를 기준으로 해서 1분 간격인 자동추적자료와 그에 해당하는 프로그램추적자료를 가지고 예비궤도를 결정했다. 그리고 그 값을 초기치로 해서 자동추적자료와 프로그램추적자료에 대해 미분보정을 하였다. 표 6에 있는 것과 같이 자동추적자료에 대한 예비궤도가 예측궤도에서 많이 벗어났음에도 불구하고 미분보정에 의해서 예측궤도에 접근했다. 자동추적자료에 대한 미분보정에 있어서 해석적인 방법과 수치적인 방법의 결과가

표 5. 프로그램추적자료에 대한 미분보정 (KST 16:10:30)

궤도요소	예측궤도	A, h	A, h, $\rho$	A, h, $\rho, \dot{\rho}$
x (km)	-5655.78	-5656.64	-5655.97	-5656.18
y (km)	-1633.78	-1633.31	-1633.75	-1633.60
z (km)	4177.40	4177.67	4177.50	4177.55
$\dot{x}$ (km/s)	3.6554	3.6561	3.6537	3.6550
$\dot{y}$ (km/s)	2.5497	2.5506	2.5486	2.5496
$\dot{z}$ (km/s)	5.9531	5.9546	5.9506	5.9527
a (km)	7229.511	7234.579	7223.608	7229.132
e	0.00160	0.00218	0.00086	0.00151
i (deg)	99.055	99.060	99.055	99.057
$\Omega$ (deg)	202.606	202.602	202.605	202.604
$\omega$ (deg)	16.390	21.381	356.719	14.585
M (deg)	19.453	14.460	39.123	21.256

표 6. 자동추적자료에 대한 예비궤도와 미분보정 (KST 16:14:41)

궤도요소	Program Track Data			Auto Track Data		
	예측궤도	예비궤도	미분보정	예비궤도	해석적	수치적
x (km)	-4562.88	-4561.51	-4561.56	-4543.27	-4559.97	-4559.96
y (km)	-948.47	-947.25	-946.35	-1368.27	-956.26	-956.34
z (km)	5514.33	5515.60	5516.65	5020.81	5505.89	5505.79
$\dot{x}$ (km/s)	5.0189	5.0177	5.0209	3.5119	4.9216	4.9213
$\dot{y}$ (km/s)	2.8948	2.8945	2.8951	1.8735	2.9179	2.9178
$\dot{z}$ (km/s)	4.6597	4.6570	4.6584	3.2496	4.7094	4.7091
a (km)	7229.567	7223.399	7232.133	4478.295	7167.454	7166.507
e	0.00161	0.00121	0.00191	0.54490	0.01448	0.01452
i (deg)	99.055	99.060	99.060	96.005	99.259	99.259
$\Omega$ (deg)	202.612	202.613	202.605	203.152	202.951	202.952
$\omega$ (deg)	16.299	350.734	17.480	223.972	294.095	293.637
M (deg)	34.308	59.884	33.144	185.544	115.811	116.270

약간 차이를 보이는데 그것은 반복계산 회수와 수치적인 방법에 있어서의 step size로 인한 것으로 보여진다. 표 7은 반복계산에 있어서 (O-C)값의 전체적인 표준편차를 나타내어 주는 것으로 반복회수에 따라 그 값이 변화하지 않는 것은 반복계산 여부의 판정을 위치벡터와 속도벡터의 성분의 증감에 의해서 결정하였기 때문이다. 자동추적자료에 있어서도 해석적인 방법에 의한 것이 수치적인 방법에 의한 것보다 반복회수가 작았다.

표 7. 반복계산에 따른 (O-C)값의 변화

반복횟수	해석적 방법 (deg)		수치적 방법 (deg)	
	$\sigma(\Delta\alpha\cos\delta)$	$\sigma(\Delta\delta)$	$\sigma(\Delta\alpha\cos\delta)$	$\sigma(\Delta\delta)$
1	0.53170	0.22345	0.53170	0.22345
2	0.09167	0.08594	0.09167	0.08594
3	0.09110	0.08652	0.09110	0.08592
4	0.09110	0.08652	0.09110	0.08592
5			0.09110	0.08592

## IV. 토 의

III장에 있는 표 3과 표 4와 같이 예비궤도를 결정함에 있어서 그 시간간격을 다르게 했을 때, 그로부터 결정된 예비궤도는 각각 다른 값을 나타내었다. 그렇지만 미분보정의 과정에 있어서는 각각 다른 예비궤도의 값을 초기치로 사용했음에도 불구하고 그 결과는 하나의 값으로 수렴했다. 미분보정행렬을 구하는 데에 사용된 해석적인 방법과 수치적인 방법에 의한 결과는 프로그램 추적자료와 같이 반복계산회수가 작을 때에는 그 값이 일치했지만 자동추적자료에 대한 미분보정과 같이 반복계산회수가 많아짐에 따라 약간씩 다르게 나타났다. 그렇지만 해석적인 방법에 의해서 각 궤도요소에 대한 편미분 값을 구해낼 수 없을 경우에는 수치적인 방법을 사용할 수밖에 없기 때문에 수치적인 방법의 정밀도를 좀더 향상시키기 위한 연구가 계속되어야 하겠다. 이를 위해서 Serafin(1982)의 symmetric difference quotient 를 이용한 수치적인 방법에 의한 알고리즘을 적용해서 해석적인 결과와 비교해 보는 것도 큰 의미가 있겠다.

자동추적자료에 대한 미분보정은 자동추적과정에 있어서 위성의 신호를 놓쳐 버리는 경우가 많아서 15개의 방위각과 고도자료밖에 사용할 수가 없었는데 이로 인해서 예측한 값과는 약간의 차이를 보였다. 이에 대한 문제는 위성을 추적하는 방식에 따라서 하드웨어적으로 개선해 나가야 할 것이다. 자동추적자료에 대한 미분보정 결과는 각 반복회수에 따른  $\Delta\alpha\cos\delta$ 와  $\Delta\delta$  값의 표준편차를 나타내었는데, 처음에는 31.90 분각과 13.41분각의 표준편차를 보이던 것이 미분보정 후에는 5.47 분각과 5.19분각으로 개선되었다. 궤도의 결정에 있어서 오차의 계산은 중요한데 이 연구에서는 표준편차만을 계산하였다. 이보다 좀더 발전된 것으로는 Bressanin (1970)이 추적안테나의 pointing error에 의한 궤도요소의 정확도를 계산하였는데, 이에 대한 적용도 필요하다고 생각된다.

이 연구에서 미분보정을 통해 궤도를 결정한 위성은 극궤도위성이었는데 앞으로 정지궤도에 올려지게 될 방송통신위성에 대한 궤도결정을 위해서 Taff와 Sorvari(1982)와 같은 near-sta-

tionary orbit 에 대한 미분보정법도 개발되어져야 할 것이다. 또한, 최소자승법을 이용한 미분보정에서 한 걸음 더 나아가 Grimard와 Mainguy(1983)의 연구와 같이 추적시스템의 noise 까지 고려한 Kalman filtering 을 이용한 방법들도 개발되어져야 할 것이다. 미분보정법을 이용한 궤도계산은 보통 대형컴퓨터에서 수행되어지는데, 이 연구에서는 Hewlett-Packard사의 desktop 컴퓨터인 HP-9836 과 HP-9826 을 이용해서 모든 계산을 하였다.

### 감사의 말씀

이 연구를 수행하는 데에 도움을 주신 전파연구소의 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- 김두환, 김천취, 신종섭, 박필호, 최규홍, 이병선, 조중현, 박상영, 이정숙, 1987, 인공위성궤도의 추적과 예보의 기술개발(I), 과학기술처 N8613, pp.185 ~ 223.
- 나정웅, 윤명중, 최규홍, 염경환, 이재현, 김종준, 김경미, 박재우, 전재영, 하태숙, 신성호, 이병선, 조중현, 1986, 위성추적 및 수신시스템 기술개발에 관한 연구(I), 과학기술처 N114-2484-4, pp.44 ~ 69.
- 東京天文臺, 1987, 理科年表(丸善:東京), p.610.
- 日本測地學會, 1986, GPS (日本測量協會:東京), pp.155 ~ 159.
- Baker, R.M.L. 1964, *Space Exploration* ed. Le Galley, D.P. and Mckee, J.W. (McGraw-Hill: New York), pp. 125-128.
- Bressanin, G. 1970, *Celes. Mechan.*, 2, 77.
- Escobal, P.R. 1975, *Methods of Orbit Determination*, 2nd ed.(John Wiley & Sons: New York), pp. 318-359.
- Grimard, M. and Mainguy, A.M. 1983, *Acta Astronautica*, 10, 117.
- Herget, P. 1968, *Astron. J.*, 73, 737.
- Herrick, S. 1971, *Astrodynamics*, Vol. I. (Van Nostrand Reinhold: London), pp. 349-361.
- Muller, E.A. and Jappel, A. 1976, *Transactions of the International Astronomical Union* (D. Reidel: Boston), pp. 58-59.
- Rao, Y.J., Rao, C.S. and Pillai, S.K. 1976, *AIAA 4th Sounding Rocket Tech. Conf.*, pp. 1-11.
- Serafin, R.A. 1982, *Celes. Mechan.*, 26, 383.
- Shrivastava, S.K. 1978, *J. Spacecraft and Rocket*, 15, 67.

Taff, L.G. and Sorvari, J.M. 1982, *Celes. Mechan.*, **26**, 423.

Wackernagel, H.B. 1970, *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **2**, 253.