東支那海의 SEASAT 衛星 高度計 資料分析

An Analysis of SEASAT Altimeter Measurements over the East China Sea

崔 秉 昊*
Choi, Byung Ho

Abstract

An initial attempt was made to investigate sea surface topography in the East China Sea using the SEASAT-A altimeter data. Over the study area for the two major typhoon surges generated during the SEASAT mission, space and time variability of the shallow water tides, meteorological effects and earth tides were removed from the altimetric measurements using the systematic procedures which include the two-dimensional sea model of the East China Sea. The analysis of ten flights over the ground track for the typhoon periods were presented and discussions were made for further studies. This initial study has been undertaken in association with the programme of establishment of systematic altimeter data reduction system for the study of shelf dynamics in the East China Sea.

要 旨

1978年 NOAA/NASA의 SEASAT 衛星 高度計資料를 利用한 東支那海의 海面變位를 研究하기 위한 初期努力이 敍述되었다. SEASAT 運用期間中의 東支那海의 두 颱風通過時期를 選擇하여 空間的, 時間的 變化度가 큰 淺海潮汐, 海溢 및 地球潮汐에 대한 高度計 資料更正을 하였는 바 一連의 作業을 一貫된 高度計處理體系를 樹立하여 遂行하였다. 初期結果들이 提示되었으며 追後의 研究에 대한 討議를 하였다. 本 研究는 追後 利用可能한 海洋衛星의 高度計資料를 徹底하게 利用하여 東支那海의 局地海洋學的인 特性을 糾明하기 위한 첫 試圖로서 遂行된 것이다.

1. 序 言

SEASAT 資料의 工學的 評價 및 地球科學的, 海洋學的인 研究가 過去 數年에 걸쳐 活發하게 遂行되었는 데 槪念確認을 目的으로 하는 研究 및 汎世界的 規模의 研究[1]~[3]들이었다. 그 중에도 高度計資料를 利用한 海洋潮汐의 研究는 GEOS 3의 資料를 利用한 研究[4,5]들보다 改善된 結果를 가졌는 바 Cartwright와 Alcock[6]은 SEASAT 資料에 의한 北東大西洋海域의 主太陰半日週潮의 分布가 觀測値와 좋은 一致를 보이고 있음을 提示하였다. 또한 Le Provost[7]는 英佛海峽의 海洋資料와 SEASAT 高度計資料를 分析한 結果 局地的인 海面變位를 研究하는 데도 人工衛星에 의한 高度計資料가 有用함을 立證한 바 있다. 現在 美海軍의 GEOSAT(Geopotential Satellite)는 SEASAT型 高度計를 搭載하여 運

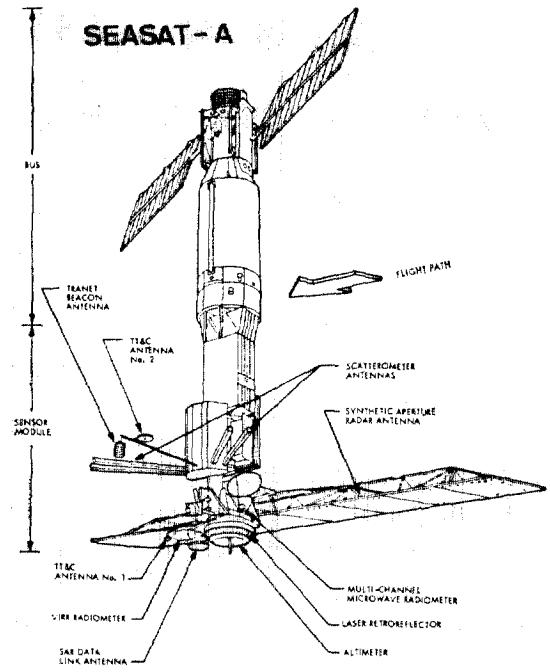
*正會員·成均館大學校 工科大學 副敎授, 土木工學科

用中에 있으나 그 資料가 利用可能하지 않지만 計劃中인 TOPEX 衛星[8]의 高度計資料는 汎世界的인 海洋循環을 糾明하기 위해서 一般에게 提供되리라 생각되는 바 高度計資料를 利用한 物理海洋學的, 海洋測地學的 硏究가 向後 十餘年에 걸쳐 活潑할 것이다.

本 硏究에서는 우선 一貫的인 高度計資料處理體系를 樹立하여서 SEASAT 運用期間中의 東支那海의 두 颱風通過時期를 選擇하여 이 海域에서 空間的, 時間的인 變化度가 큰 淺海潮汐, 氣象影響에 의한 海面變化 및 地球潮汐에 대한 高度計資料 更正作業을 遂行한 바 海面變位를 硏究하기 위한 初期作業을 하였다. 이러한 一連의 硏究는 우리나라 南韓全域에 걸친 一等水準網의 形成[9]이 80年代後半에는 國立地理院에 의해 完了될 것인 바 이 水準網의 外的檢討에 의한 精密度評價 및 局地海洋學的인 側面에서 重要한 課業이다. 樹立된 高速컴퓨터를 利用한 高度計資料 處理體系는 多量의 高度計資料가 追後 利用可能할 경우 迅速한 處理를 遂行할 수 있도록 設計되어 이 海域의 海洋硏究에 寄與할 수 있을 것이다.

2. SEASAT GDR ALT 資料의 1次處理

그림 1에 提示된 SEASAT 衛星은 1978年 7月부터 10月初까지 約 70日間의 資料를 提供했다. 資料는 平均距離 1秒當, 即 地上軌道 7 km마다 提供되었으며 地上軌道의 交叉點間隔은 約 1~2°인데 1978年 9月에야 SEASAT은 完全한 軌道에 進入하여 地上軌道를 3日週期로 反覆하였다. 美商務省의 National Climatic Center의 Satellite Data Service Division에 SEASAT 資料를 期間 또는 地上軌道의 包含範圍를 明示하여 요청하면 資料는 磁氣테이프에 貯藏되어 提供받게 되는 데 이 SDSD 資料는 제트推進硏究所에서 作成된 여러 file을 入力하여 出力으로서 磁氣테이프를 만든 것이다. 各 file은 text records, sensor records 및 geophysical records로 構成되어 있는데 text records에는 每 file의 geophysical records의 仔細한 記錄이 說明되어 있다. 이 提供된 테이프를 利用하는 方法은 제트 推進硏究所의 GDR User's Handbook[10]이 唯一한 指針書이다. 이 指針書를 根據로하여 本 硏究에서는 SEASAT 高度計資料를 一次處理하는 過程을 樹立한 바 槪要는 다음과 같다.



The SEASAT satellite in-orbit configuration

그림 1. SEASAT 衛星의 構成圖

가) 供與받은 테이프의 file 數 및 8-bit bytes 8064 records가 各 file마다 收錄되어 있는 가를 tape listing system utility로 利用하여 確認한다. 境遇에 따라 block size는 8028 records로도 構成되어 있기도 한다.

나) 確認된 테이프 內容을 그대로 disc에 收錄한 後 PL/I로 쓰여진 unpacking program을 利用하여 收錄된 資料를 scale 및 offset 시켜서 利用할 수 있는 geophysical data로 變換시킨다. 이 geophysical data는 32項目으로 構成되는 데 7欄은 原資料를 機器誤差 및 大氣層距離更正後 參照楕圓에 대한 높이를 提示하며, 8欄의 參照楕圓에 대한 지오이드의 높이는 Goddard Earth Model 10B 地球重力모델[11]로서 1°×1° mean air free gravity data로서 作成되었으며, 11欄과 27欄의 海洋潮汐更正値는 各己 Schwiderski[12] 및 Parke-Hendershott[13]의

海洋潮汐모델에 의한 값이며, 12欄의 參照楕圓에 대한 平均海水面은 Marsh[14,15]에 의해 78年 7月 28日~8月 14日의 資料를 利用한 SS3 mean sea surface로서 海洋潮汐 및 波浪影響(sea state bias)은 補正되지 않은 것이다. 이에 反해 Estes의 SS4 mean sea surface는 海洋潮汐 및 波浪影響을 補正한 것이다.

다) unpacking되어 保管된 file別 資料를 作成된 프로그램에 의해 必要한 部分만을 抽出하여 利用한다. 即 time tag, 緯度, 經度 및 geophysical data의 必要項目만을 抽出하여 따로 file을 作成하는데 特定海域의 地上軌道를 圖化하는 일이 基礎的인 作業으로 包含된다.

라) 다項에서 衛星의 地上軌道가 判別되면 각 軌道에 있어 時間에 따른 必要項目을 圖化시키는 프로그램을 利用하여 그 變化度를 分析한다.

上記의 GDR ALT 資料의 一次處理過程은 充分히 汎用的인 것으로 世界의 어느 海域에서도 適用될 수 있도록 作成되었다.

3. SEA-TRUTH

高度計資料는 海洋學的, 地球物理學的 條件을 考慮한 更正이 必須的인 바 Tapley[16] 等은 다음과 같이 更正을 위한 式을 提示하였다.

$$h^*=h+h_{sg}+h_i+h_a+h_s+h_g+h_t+h_0+\varepsilon \quad (1)$$

여기서 h^*는 衛星의 質量中心부터 參照楕圓까지의 距離,

h는 高度計에 의해 測定되는 海面上 衛星高度,

h_{sg}는 衛星形態에 따른 影響 即 衛星質量中心과 高度計距離 및 衛星의 非垂直方向의 影響,

h_i는 測器更正後의 殘留誤差,

h_a는 大氣層距離 更正値,

h_s는 海面과 radar pulse 相互作用에 따른 更正値,

h_g는 지오이드높이,

h_t는 地球 및 海洋潮汐에 대한 更正値,

h_0는 海洋水 循環, 海面氣壓 및 바람에 의한 海面變位更正,

ε는 其他要因(random measurement noise)에 의한 誤差이다.

海洋學 및 地球物理學的 精密度를 위해서 SEASAT 實驗硏究陣은 衛星軌道更正, 機器誤差更正, 大氣層更正, 지오이드모델, 地球潮汐 및 海洋潮汐更正, 大氣壓等의 影響을 考慮하여 前節에 敍述한 바와 같이 Geophysical Data Record (GDR)테이프를 編輯하였다. 그러나 이러한 更正은 廣域의 硏究 및 地球全體에 대한 硏究에는 最少限의 要求條件의 充足할지 모르지만 特定地域을 다루기에는 適合하지 않은데 地域的인 氣象影響, 殘海影響에 의한 海面變化, 地域的인 重力分布, 地球 및 海洋潮汐 等이 더 仔細히 考慮되어야 하기 때문이다. 이러한 更正을 위해 Alcock과 Cartwright[17]는 衛星에 의한 資料를 다음과 같은 式으로 提示하였다.

$$Z(x,y,t)=Z_0-Z_a-Z_r \quad (2)$$

여기서 $Z(x,y,t)$는 衛星資料(satellite derived data), Z_0는 軌道半徑, Z_a는 機器誤差 및 傳播誤差 更正後의 高度計資料, Z_r은 採擇되는 參照楕圓(r=637814m 또는 GRS80에 의한 6379135.6 m, flattening은 1/298.257). (2)式에 의한 $Z(x,y,t)$로부터 다음 式에 의해 殘留高(residual height)인 $R(x,y,t)$가 提示된다.

$$R(x,y,t)=Z(x,y,t)-Z_B-Z_L-Z_r-Z_s-Z_A \quad (3)$$

여기서 Z_B는 body tide, Z_L은 海洋에 의한 loading tide, Z_r은 海洋潮汐, Z_s는 長期檢潮記錄을 分析하여 決定할 수 있는 低周波帶의 海面變化, Z_A는 氣象影響에 의한 海面變化인 데 이들成分이 更正된 後의 殘留高, $R(x,y,t)$는 지오이드와 恒流에 의한 時間에 無關한 海面分布를 意味한다. 本 硏究에서는 SEASAT 運用期間中 東支那海를 通過한 두 颱風海溢時期(78年 7月 28日~8月 2日, 78年 8月 15日~8月 21日)의 SEASAT 高度計資料를 前節에 敍述한 處理體系를 利用하여 抽出하였는 데 그 地上軌道가 그림 2에 提示되어 있다. 點線은 前期의 颱風 8號(Wendy 號)의 地上軌道이며 實線은 後期의 颱風 11號(Carmen 號)의 地上軌道이다. 各 軌道에 따른 海洋潮汐, 地球潮汐 및 氣象影響에 따른 海面更正作業이 後述되는 바와 같이 遂行되었다.

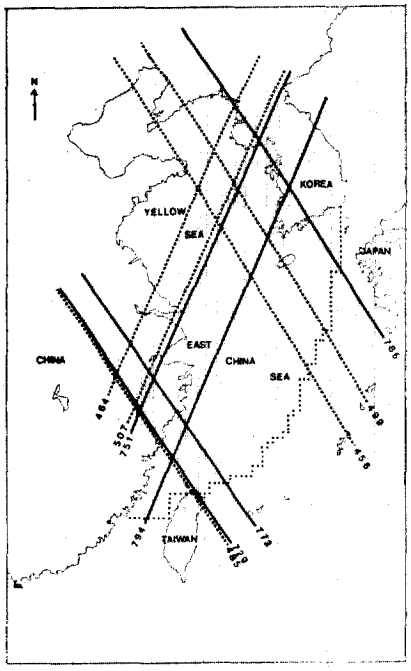


그림 2. '78년 7월 28일~8월 2일, 8월 15일~21일 기간 중의 東支那海의 SEASAT 衛星 地上軌道.

4. 地球潮汐

Body tide(Z_B)는 太陰과 太陽의 起潮力에 대한 彈性體인 地殼의 直接的인 反應을 나타내며 loading tide(Z_L)는 海洋潮汐의 負荷에 따른 地殼의 反應을 나타내는 데, Z_B와 Z_L을 通稱하여 地球潮汐[18]이라 한다. 高度計更正을 위한 精密度를 위해서는 Z_B와 Z_L은 love number와 Accad와 Pekeris[19]가 提示하는 瞬間海洋潮汐 ξ_i와 平衡潮汐 n_i의 百分率로서 槪略的으로 다음과 같이 나타내진다.

$$Z_B \fallingdotseq 0.612\, n_i \quad (4)$$

$$Z_L \fallingdotseq -0.0667\, \xi_i \quad (5)$$

美國 NSWC(Naval Surface Weapons Center)에 의해 提供되는 Schwiderski의 Ocean Tide Data[20](GOTD-1981)에는 地球上의 1°×1° 球面格子系의 中心點에서 M_2, S_2, K_1, O_1, N_2, P_1, K_2, Q_1, M_f, M_m, S_{sa}의 11個分潮의 振幅과 遲角이 11個의 file에 收錄되어 있는 바 이 dataset을 入力으로하여 一連의 프로그램[21,22](RPTIDE, GRTIDE, SST, SSTGTD, STT)을 利用하면 任意點에서의 地球潮汐을 算定할 수 있다. RPTIDE와 GRTIDE의 利用은 몇 점의 地球潮汐 算定을 위해 GOTD file 全體를 檢索하도록 되어 있어 莫大한 컴퓨터時間이 所要된다. 따라서 SEASAT 衛星의 地上軌道에 따른 새로운 格子網을 形成하고(SST), 이 새로운 格子網의 調和常數 data file을 새로 만들고(SSTGTD), 任意點의 地球潮汐을 算定(STT)하는 方法이 提示되었으나 後者의 過程이 아직은 完璧하게 樹立되어 있지 않아 本 硏究에서는 4個分潮(M_2, S_2, K_1, O_1)에 의한 地球潮汐을 GRTIDE에 의해 算定하였다.

5. 海洋潮汐 및 氣象에 의한 海面變化

東支那海 및 黃海에서의 海洋潮汐 및 氣象影響에 의한 海面變化는 短期海面攪亂을 惹起하는 主要素이다. SEASAT 高度計資料 即 Geophysical Data Record에는 Global Ocean Tide Model[20]에 의한 海洋潮汐更正이 包含되어 있으나

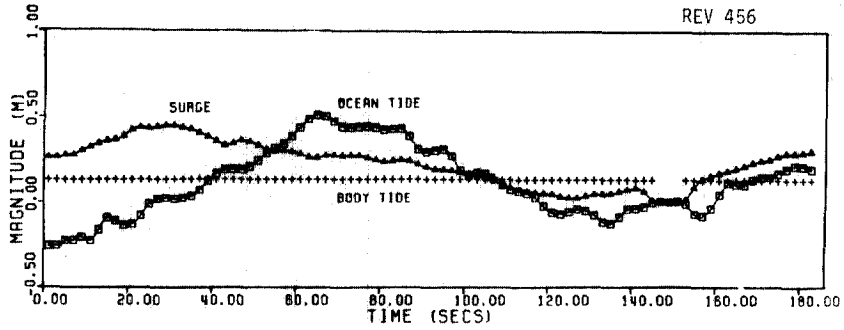


그림 3(1)

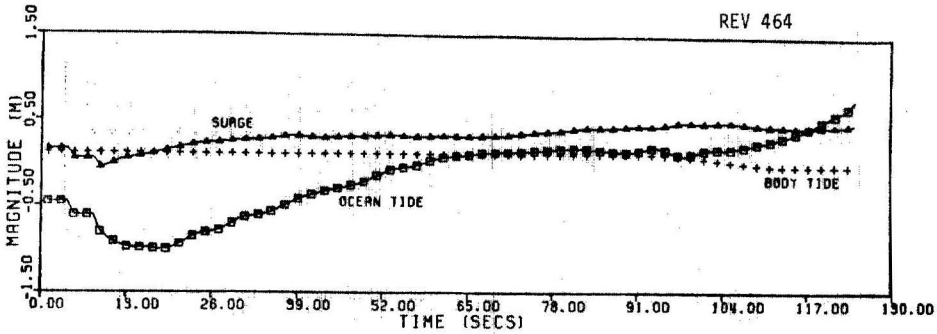


그림 3(2)

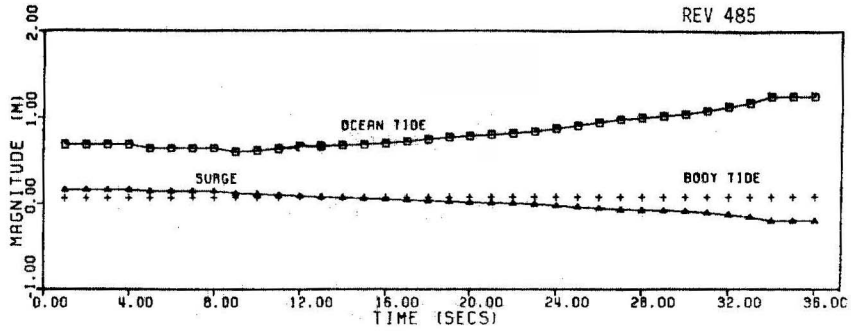


그림 3(3)

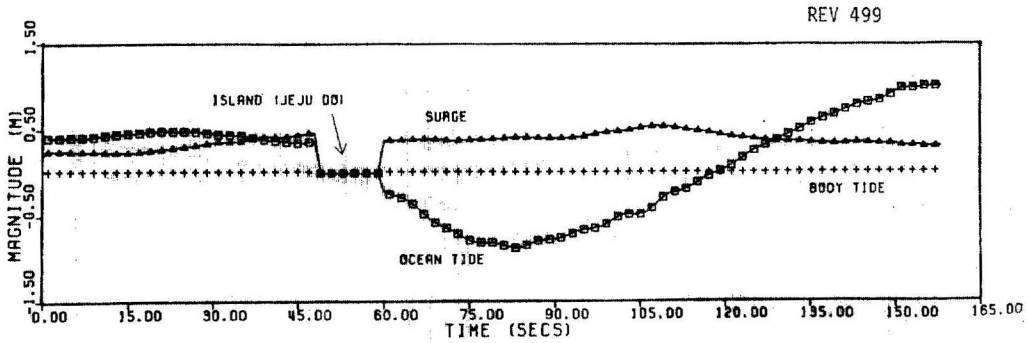


그림 3(4)

東支那海와 같은 淺海에의 局地的인 適用은 不正確하다. 따라서 本 硏究에서는 豫報를 窮極的인 目標로 하여 開發된 局地的인 黃海와 東支那海의 潮汐 및 海溢數値모델[23,24]을 利用하여 淺海潮汐 및 海溢에 대한 更正을 遂行하였다. 海洋潮汐의 算定은 開放境界面에서의 M_2, S_2, K_1, O_1 分潮의 振幅, 遲角을 賦與하고 長週期變化에 따른 nodal factor f, u 값을 算定期間의 첫날에 指定해 주므로서 이루어지며, 氣象에 依한 海面變化는 每6時間 日氣圖資料로부터 颱風期間의 境遇는 每時間別 日氣圖를 作成하고 이로부터 氣象資料 入力處理體系를 利用하여 東向, 北向의 바람成分에 의한 剪斷應力 및 氣壓傾斜가 算定되어 每算定時間, 每格子點에 入力된다. 開放境界面에는 靜水壓法則에 의한 海溢入力이 賦與되며 또한 放射條件이 考慮되었다. 開放境界面의

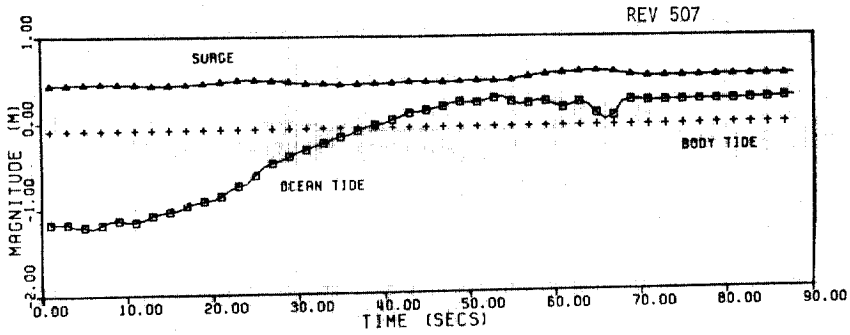


그림 3(5)

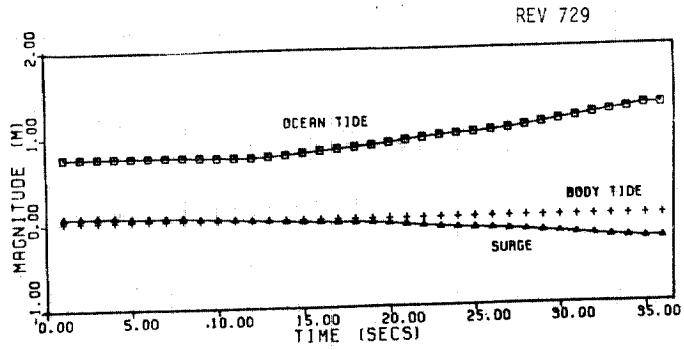


그림 3(6)

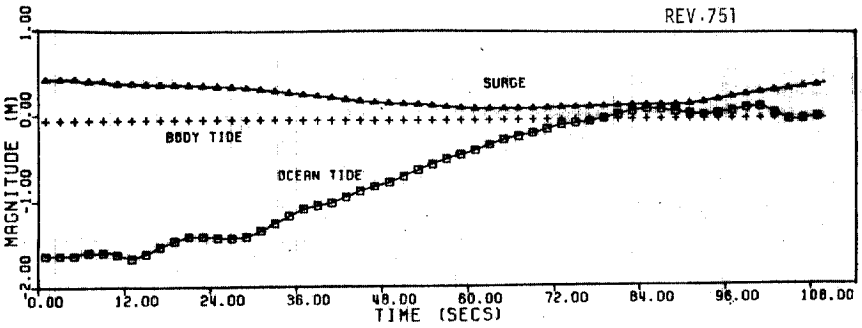


그림 3(7)

資料는 實際觀測에 의한 것이 아니므로 完全하지는 않으나 潮位 및 潮流觀測結果[25]로부터 檢證된 것으로 初期目的으로서는 滿足스러운 것이다. 仔細한 모델의 算定結果는 東支那海의 1978年 夏季 颱風海溢의 算定[24]이라는 題下로 別途로 報告되었으므로 再述치 않기로 한다. 本 硏究의 10回의 衛星通過期間의 高度計資料更正을 위한 모델의 算定値는 地上軌道를 따라 抽出하여 따로 file을 作成하였다.

6. 結果 및 討議

前述된 更正過程에 의해 그림 2에 提示된 6回의 上向軌道와 4回의 下向軌道에 대한 海洋

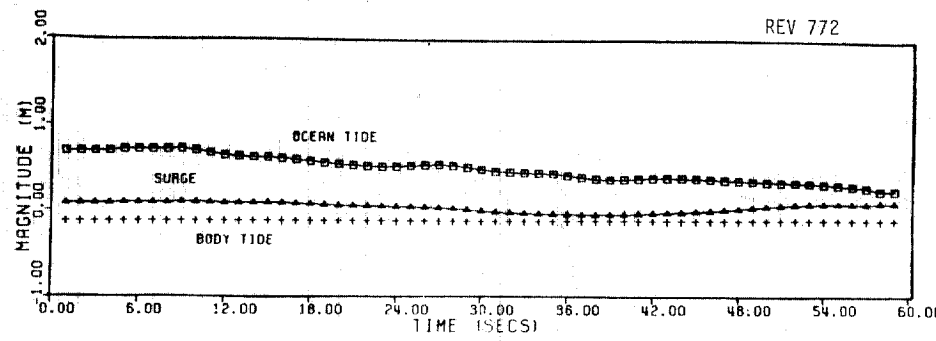


그림 3(8)

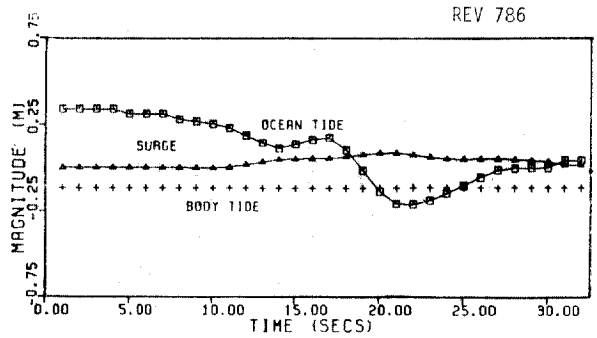


그림 3(9)

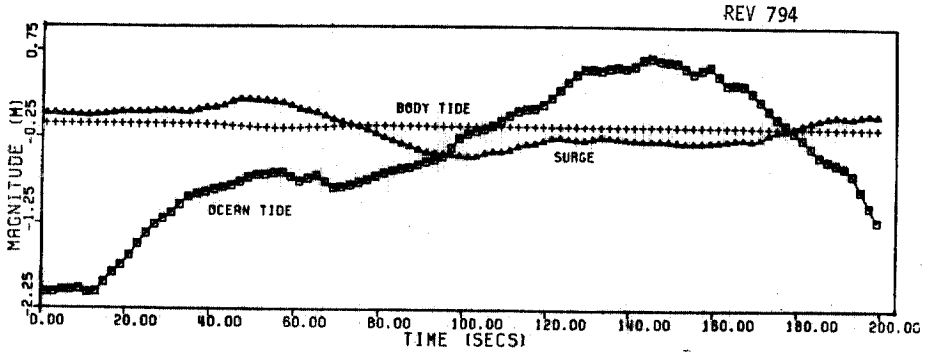


그림 3(10)

그림 3. 그림 2에 제시된 地上軌道에 대한 海洋潮汐, 海溢 및 body tide의 更正

潮汐, 氣象影響에 의한 海溢 및 body tide에 대한 更正値의 상대적인 크기들이 그림 3(1)~그림 3(10)에 提示되어 있다. 提示된 바와 같이 海洋潮汐이 이 海域의 高度計 資料更正에 있어 가장 重要하다. 海溢이 50 cm 以內로 局限된 것은 地上軌道를 衛星이 通過할 때 颱風移動에 의한 氣象影響이 海面變化에 큰 影響을 주지 못한 것 같다. 勿論 全颱風期間에는 長江河口 및 中國南部沿岸에는 1 m 以上의 海溢이 算定되었다[24]. 軌道番號 456(그림 3(1))과 軌道番號 499(그림 3(4))의 地上軌道를 따른 海面變化는 그림 2에 제시된 대로 山東半島 및 濟州島에 의해 攪亂되어 있다.

地球潮汐의 境遇는 算定된 loading tide의 값

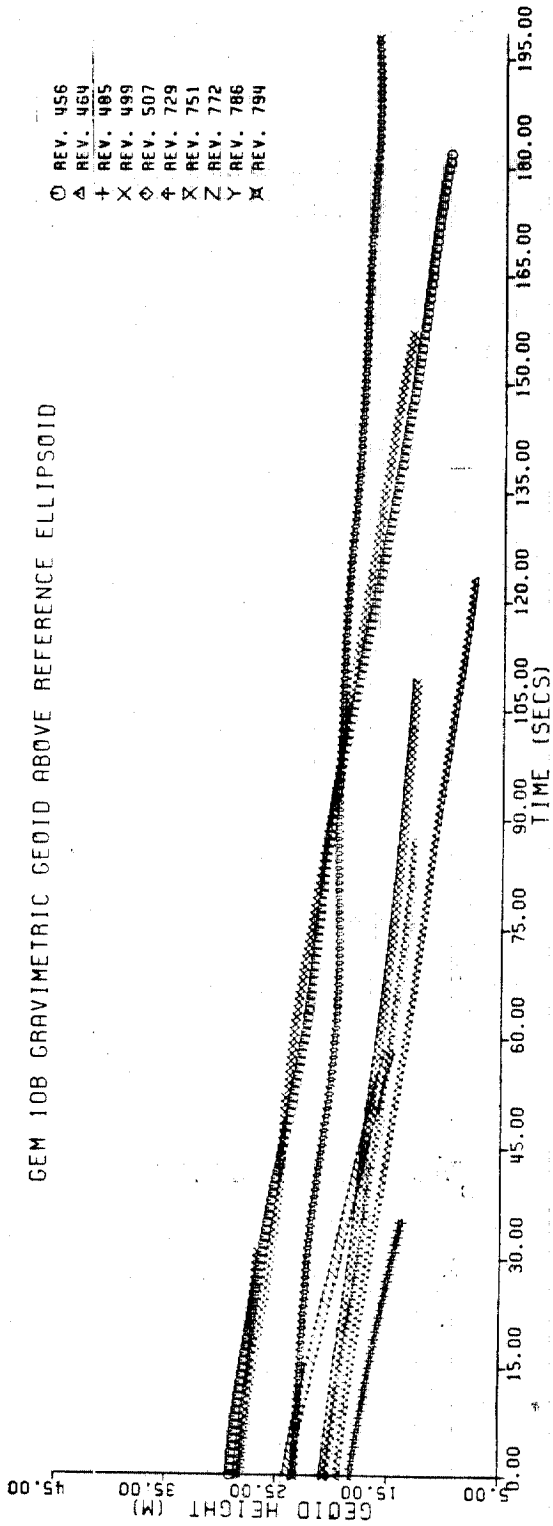


그림 4. 그림 2의 지상궤도에 따른GEM 10B 중력계오이드

이 body tide 보다 적은 점과 Hosoyama[26]의 報告를 根據로 本 硏究에서는 一次的으로 除外하였다. 그러나 loading tide를 瞬間潮位의 百分率로 算定할 때 地上軌道가 潮位變化가 큰 海域을 通過할 때는 考慮되어야 하므로 追後의 硏究에서는 適切히 分析되어야 할 것이다. 本 硏究에서는 除外되었지만 有意波高가 클 때 波浪效果에 의한 EM bas에 대한 更正은 여전히 問題點으로 남아있는 데 5 m 보다 작은 有意波高에 대해서는 6.4%를 更正할 것은 Douglas와 Agreen[27]은 提示한 바 있다. 그림 4는 10回의 地上軌道에 대한 GEM 10 B 地球重力 모델에 의한 제오이드의 變化를 提示하고 있는 데 이 모델의 誤差는 Marsh와 Martin[14]에 의하면 數 m 에 이른다. 따라서 Marsh는 SS 3 海面資料를 GEM 10 B에 代置할 수 있는 參照제오이드로 提示하였으나 局地的인 適用을 위한 精密度는 갖고 있지 않다. 現在로서는 前述된 各 更正量에 대한 誤差評價가 獨立的으로 이루어지기 어려운 데 이는 黃海와 東支那의 海洋力學硏究가 비로소 시작되는 段階에 있기 때문이다.

7. 結 言

本 硏究에서 東支那海의 等포텐셜 海面에 漸近하는 海面을 SEASAT 衛星 高度計資料에 의해 구하기 위한 初期努力이 이루어진 바 海洋潮汐, 氣象影響에 의한 海面變化, 地球潮汐을 滿足스럽게 除去시킬 수 있음이 提示되었다. 東支那海陸棚海에 대한 海洋力學的인 硏究가 近年에 活潑한데 追後 中國沿岸의 資料를 包含하는 廣範圍한 海洋觀測資料가 利用可能하면 이 海域의 信賴性있는 海面變位(Sea Surface Topography)의 糾明이 可能하다. 高度計資料 更正過程에서 가장 重要한 潮位更正의 精度를 改善하기 위해서는 모델을 위한 陸棚端에서의 潮汐觀測이 窮極的으로 이루어져야 한다.

●參 考 文 獻

1. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, OE-5, 1980.
2. SEASAT Special Issue I, *Journal of Geophysical Research, Vol. 87, No. C5*, 1982.
3. Oceanography from Space, (ed. J.F.R. Gower), Plenum, 1981.
4. Maul, G.A. and A. Yanaway, *Deep sea tides determination from GEOS 3*. Rep. 141435, NASA Wallops Flight Center, Wallops Islands, Va., 1978.
5. Brown, R.D. and M.K. Hutchinson, *Ocean tide determination from satellite altimetry*. in Oceanography from space(ed. J.F.R. Gower), pp. 897~905, Plenum, 1981.
6. Cartwright, D.E. and G.A. Alcock, *On the precision of sea surface elevations and slopes from Seasat altimetry of the Northeast Atlantic Ocean*. in Oceanography from space(ed. J. F.R. Gower), pp. 885~895, Plenum, 1981.
7. Le Provost, C., An Analysis of SEASAT altimer measurements over a coastal area: the English Channel. *J. Geophys. Res., Vol. 88, No. C3*, pp. 1647~1654, 1983.
8. Joint Oceanographic Institutions Incorporated, *Oceanography from space:* A research strategy for the decade 1985~1995, 1984.
9. 韓國測地學會, 우리나라 精密水準網에 관한 硏究. 國立地理院, 1983.
10. Lorell, J., M.E. Parke and J.F. Scott, *Geophysical Data Record(GDR) User's Handbook*. Rep. 622~97, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Ca., 1980.
11. Lerch, F.J., C.A. Wagner, S.M. Klosko and B. H. Putney, *Goddard earth models for oceanographic applications*(GEM 10B and 10C). Marine Geodesy, 5(2), pp. 2~43, 1981.
12. Schwiderski, E.W., *On charting global ocean tides. Rev. Geophys. Space Phys.*, 18, pp. 243 ~268, 1980.
13. Parke, M.E. and M.C. Hendershott, M_2, S_2, K_1 models of the global ocean tide on an elastic earth. *Marine Geodesy, Vol. 3*, pp. 379~408, 1980.
14. Marsh, J.G. and T.V. Martin, The SEASAT altimeter mean sea surface model. *J. Geophys. Res., Vol. 87, No. C5*, pp. 3269~3280, 1982.
15. Marsh, J.G. and R.G. Williamson, Precision orbit analysis in support of the SEASAT altimeter experiment. *J. Astronaut. Sci., 28(4)*, pp. 345~369, 1980.
16. Tapley, B.D., G.H. Born and M.E. Parke, The SEASAT altimeter data and its accuracy assessment. *J. Geophys. Res., Vol. 87, No. C5*, pp. 3179~3188, 1982.
17. Alcock, G.A. and D.E. Cartwright, *Computation of the sea surface topography*. Mitt. d. IfAG Nr. 166 Dt. Geod. Kommiss. bei der Bayer. Akad. d. Wiss. Reihe B: Angewandte Geodäsie-Heft Nr. 263, pp. 29~38, 1982.
18. Melchior, P., *The earth tides of the planet earth*. Pergamon Press, 1978.
19. Accad, Y. and C.L. Pekeris, *Solutions of the tidal equations for the M_2 and S_2 tides in the world oceans from a knowledge of the tidal potential alone*. Phil. Trans. R. Soc. London, A290, pp. 235~266, 1978.
20. Schwiderski, E.W., *NSWC ocean tide program*. presented at the NASA SEASAT ALT/POD calibration workshop, Austin, Texas, June 11~ 15, 1979.
21. Schwiderski, E.W. and L.T. Szeto, *The NSWC global ocean tide data tape(GOTD), its features and application*, random-point tide program. NSWC TR 81~254, 1981.
22. Schwiderski, E.W. and L.T. Szeto, *On computing instantaneous geocentric tides along satellite tracks*. NSWC TR 81~264, 1982.
23. Choi, B.H., *A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea*. Korea Ocean Research and Development Institute Rep. 80-02, 1980.
24. 崔秉昊, 東支那海의 1978年 夏季 颱風海溢의 算定, 韓國海洋學會誌, 第*20*卷 第*1*號, 1985.
25. Larsen, L.H., G.A. Cannon and B.H. Choi, East China sea currents. *Continental Shelf Res. Vol. 4, Nos. 1/2*, pp. 77~103, 1985.
26. Hosoyama, K., The Oceanic effects on the earth tides. 日本測地學會誌, 第*16*卷 第*3*號 pp. 99~110, 1970.
27. Douglas, B.C. and R.W. Agreen, The sea state correction for GEOS 3 and SEASAT satellite altimeter data. *J. Geophys. Res., Vol. 88, No. C3*, pp. 1655~1661, 1983.

(接受 : 1985. 7. 23)