

칼만 RTS 필터를 이용한 선상 중력 자료 보정에 관한 연구

황종선* · 한현철

한국지질자원연구원 석유해저연구본부 해저물리탐사연구실

A Study on Shipborne Gravity Data Correction Using Kalman RTS Filter

Jong Sun Hwang* and Hyun-Chul Han

Marine geophysical exploration center, petroleum & marine resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral resources

Gravity anomalies observed in shipborne survey are usually distorted by bad weather conditions and unexpected vessel movement. These distorted data should be removed because they may mislead the data interpretation. However, it is not possible to perfectly remove all erroneous data. Cross-over point correction, which is generally used, only reduces the errors at cross-over points, and thus the data still contain error values. To resolve this drawback, Rauch-Tung-Striebel(RTS) filter was adopted to minimize all errors in the data and at cross-over points. After applying this method, the range of anomaly variation is reduced from 15 mGal to less than 2 mGal, and errors at the cross-over points are minimized from 4.21 mGal to 2.95 mGal. The results imply that RTS filter is very useful to reduce errors in the data and corss-over points.

Key words : Kalman filter, Rauch-Tung-Striebel, shipborne gravity anomaly

선상 중력 이상값은 기상악화 및 조사 선박의 급작스런 움직임에 의해 많이 왜곡된다. 이러한 자료 왜곡은 잘못된 해석을 유발할 수 있어 필히 제거되어야 하지만 완벽하게 모든 오차를 제거할 수는 없다. 일반적으로 사용하는 교차점 오차 보정은 교차점 자체에 대한 국부적인 보정이기 때문에 교차점 오차 보정을 한 후에도 그 자료에는 많은 오차 값들이 포함되어 있다. 이러한 단점을 해소하기 위하여 교차점에서는 물론이고 모든 자료에 포함되어 있는 오차 값들을 최소화하기 위하여 칼만 필터중의 하나인 Rauch-Tung-Striebel(RTS) 필터를 이용하였다. RTS 보정을 수행한 결과 자료 범위 폭이 최대 15 mGal에서 2 mGal 미만으로 감소되었고 교차점에서의 오차는 4.21 mGal에서 2.95 mGal로 줄어들었다. 이 결과는 RTS 방법이 교차점에서는 물론 모든 자료에 포함되어 있는 오차 값을 최소화 하는데 효율적임을 제시하고 있다.

주요어 : 칼만 필터, Rauch-Tung-Striebel, 선상중력

1. 서 론

해양에서 측정된 중력이상은 위성이나 항공기에 의해 측정된 중력이상에 비해 높은 해상도를 가지고 있어 작은 규모의 지질구조 규명에 효과적이다. 그러나 해상에서 중력을 측정하는 경우, 측정 당시의 기상상황과 파도의 영향, 그리고 배의 거동에 의해서 예측하기 어려운 오차 성분들이 존재하게 된다(Park *et al.*, 1999). 이러한 오차는 매우 짧은 파장을 가지므로 장파

장의 위성자료와 통합을 해서 보정하기 어렵기 때문에(You *et al.*, 2001; Hwang *et al.*, 2008) 일반적으로 특정 부근의 값을 그대로 수동으로 제거하거나 단순한 저주파 필터를 사용하는 방법들이 사용되어 왔다. 탐사선에 탑재된 중력계의 위치 정보를 얻기 위해 최근에는 GPS(Global Positioning System)로부터 신호를 받아 그 위치를 측정하지만 이 역시 수 미터 이상의 위치 오차를 갖고 있다. 또한 해상의 경우와 같이 파도에 의해 수평 및 수직적으로 불규칙하게 움직이는

*Corresponding author: estwing@kigam.re.kr

경우 더욱 더 오차가 커질 수밖에 없어 이 값을 그대로 사용하는 경우 잘못된 해석을 유발 할 수 있다.

해상에서 측정된 중력값을 보정하려면 조석이나 대기의 영향뿐만 아니라 비교적 빠른 속도로 이동하는 물체에서 중력을 측정할 때 보정해야 하는 에트바스 보정(Eötvös correction)을 반드시 수행하여야 한다. 에트바스 보정은 선박의 움직임에 따라 나타나는 원심력차이에 의한 영향을 제거하는 것으로 다른 보정이 수 mGal 정도의 크기를 가지는데 비해 수십 mGal 이상의 값을 가진다. 그러므로 해상 중력 보정에서 가장 큰 영향을 갖는 에트바스 보정을 위해서는 배의 진행 방향과 속도가 결정되어야 하며 이 값들은 GPS로부터 받은 위치자료를 토대로 계산되어지기 때문에 이 역시 많은 오차를 포함할 수 있다. 이러한 오차 값들이 제거 되어야지만 지질구조에 의한 중력 이상을 정확히 파악할 수 있으나 이러한 오차를 완벽하게 제거하는 것은 쉽지가 않다. 일반적으로는 교차점에서 나타나는 오차만 제거하거나 신뢰성 있는 자료에 맞추어 다른 자료들을 보정하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이러한 방법은 교차점에 대한 국부적인 보정이기 때문에 자료 전체에 포함되어 있는 모든 오차 값을 보정할 수 없어 자료해석 왜곡 요인을 여전히 포함하고 있다. 따라서 모든 자료에 포함되어 있는 오차 값을 최소화시킬 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 1초 단위로 측정된 중력 및 GPS 자료에 칼만 필터의 일종인 Rauch-Tung-Striebel(RTS) 알고리즘을 적용하여 교차점 보정을 수행하지 않고 선상 중력 측정시 발생하는 오차 값을 모든 자료에서 최소화하도록 하였다.

2. 자 료

중력 자료는 한국지질자원연구원 소속 탐사선 탐해 2호에 탑재되어 있는 LaCoste-Romberg사의 S-118 선상중력계를 이용하여 취득되었으며 S-118 선상중력계는 zero-length 스프링을 사용하는 전형적인 빔(beam) 형태의 불안정형 중력계이며 1초 간격으로 자료를 취득하였다(LaCoste and Romberg Gravity Meters Inc., 1996; Nettleton, 1976). 자료 취득 지역은 경상북도 영덕 및 후포 부근으로 위도 36도30분~37도, 경도 127도 30분~127도 48분에 해당하는 지역이다. 연구지역 동남부에는 후포퇴(Hopo Bank)가 발달되어 있어 남북 방향으로 길게 수심이 100미터 보다 얕은 지역이 분포하고 있다(Fig. 1). Fig. 2는 중력 측선을 나

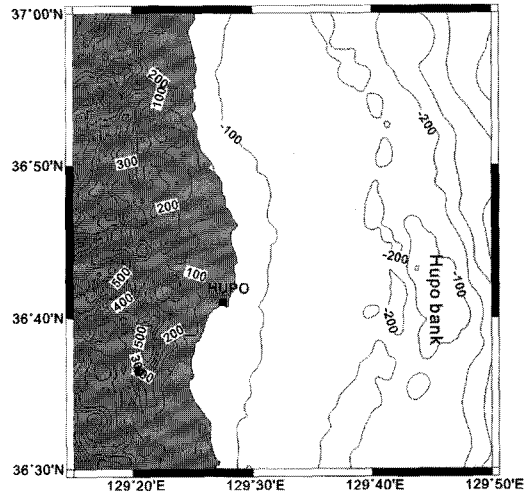


Fig. 1. Topography map around the Hupo Bank. Contour interval is 100 m.

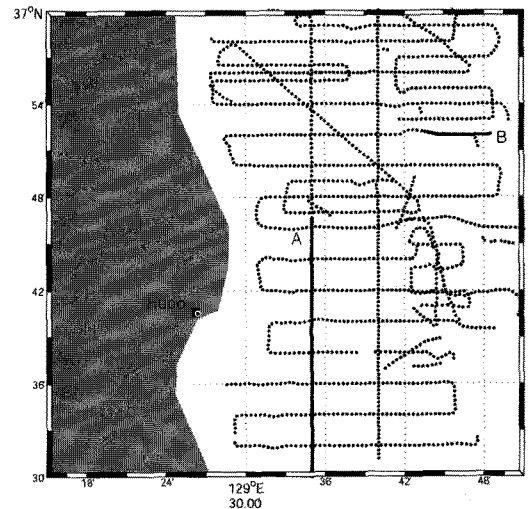


Fig. 2. Shipborne gravity survey tracks around the Hupo Bank(thick dotted lines). A and B with black solid lines represent the survey tracks used for Fig. 4.

타낸 것으로 기본적으로는 동서, 남북 방향으로 자료를 취득 하였으며 후포퇴 정상부근에서는 수심이 매우 얕아 자료를 취득하지 못했다. 중력 자료의 경우 에트바스 효과를 줄이기 위하여 남북 방향으로 측정하는 것이 좋으나 연구지역에서는 주로 남북 방향으로 구조들이 존재하므로 동서방향의 측선이 더 많이 사용되었다.

위치결정을 위한 GPS로는 Trimble 4000DS DGPS 수신기를 사용하였으며 GPS보정기지국으로부터 RTCM SC104 형태의 DGPS(Differential GPS) 자료를 수신

할 수 있는 비콘수신기를 연결하여 탐사기간 동안 DGPS 보정신호가 수신될 경우 자료를 수신 받아 GPS 수신기 자체에서 위치를 계산하였다.

3. 자료처리

측정된 상대 중력값을 절대 중력값으로 환원한 후 이를 표준중력식을 이용하여 중력 이상값을 구하였다. 산출된 중력 이상값에 기본적인 계기, 조석, 대기보정을 수행 한 후 에트바스 보정을 적용하여 기존의 방법과 같이 중력이상을 계산하였다. 이 결과를 가지고 배의 위치 오차에 의한 에러나 배의 움직임에 의한 중력 값 자체 오차 성분을 제거하기 위하여 RTS 방법을 적용하였다.

3.1. 칼만 RTS 필터

선박에서 측정된 GPS자료의 경우, 하나의 안테나에서 얻는 신호를 가지고 위치를 측정하기 때문에 대기 에 대한 효과와 기계적인 오차 등의 한계로 최대 수십 미터까지의 오차를 가지게 되며, 중력 측정값 역시 날씨와 배의 영향으로 많은 오차값을 포함하게 된다. 이를 보정하기 위해서 본 연구에서는 최근 가장 널리 사용되고 있는 칼만 필터를 이용하여 오차를 제거하여 보다 정확한 위치를 계산하였다. Rudolf Emil Kalman에 의해 제시된 칼만 필터는 화이트 노이즈 (white noise)를 가지고 있는 동적 선형 시스템 (Dynamic linear system)에서 적용하는 최적필터 (optimal filter)의 일종으로 (Grewal and Andrews, 2001) 본 연구와 같이 이동하는 물체에서 오차를 가지고 있는 GPS 신호 처리에 주로 사용되고 있다. 관측방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_k &= Ax_{k-1} + w_{k-1} \\ z_k &= Hx_k + v_k \end{aligned}$$

여기서 w 와 v 는 프로세스 과정과 자료 측정과정에서의 노이즈에 해당하며 서로 독립적 (independent)이며 정규분포를 가지는 화이트 노이즈로서 각각 평균은 0이고 공분산 (covariance) R 과 Q 를 가진다고 가정한다. H 는 관측방정식이며 A 는 차분 (difference)방정식에 해당한다. z_k 는 관측 값이며 x_k 가 추정하려고하는 추정치 (estimate)이다.

\hat{x}_k 를 전 시간에서 구해진 선형적 추정치 (priori state estimate)이라고 하고 \hat{x}_k 를 관측값 z_k 로부터 얻어진 후천적 (posteriori)추정치라고 하면 각각의 추정

에러 값은 다음과 같이 표현되며

$$e_k^- \equiv x_k - \hat{x}_k^-, e_k \equiv x_k - \hat{x}_k$$

각각의 오차공분산(error covariance)값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_k^- &= E[e_k^- e_k^{-T}], P_k = E[e_k e_k^T] \\ P_k^- &= AP_{k-1}A^T + Q, P_k = (I - K_k H)P_k^- \end{aligned}$$

여기서 구하고자 하는 값 \hat{x}_k 는 선형적 추정치 \hat{x}_k^- 에 서 관측값 z_k 와의 관계식으로 나타낼 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-)$$

여기서 K 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$$

상기의 식을 통하여 선형적 추정치로부터 관측값을 이용하여 후천적 추정치 \hat{x}_k 를 계산할 수 있다.

본 연구에서는 칼만 필터를 더욱 효과적으로 적용하기 위하여 RTS(Rauch-Tung-Striebel) 방법을 사용하였다. 이 알고리즘은 1965년에 H. Rauch, K. Tung, 그리고 C. Striebel에 의해 구해진 것으로 시간 순서대로 측정된 자료의 정방향(forward) 및 역방향(backward) 모두에 칼만 필터를 적용한 후, 이 두개의 추정치를 조합하여 결과를 얻는다(Grewal and Andrews, 2001). 이 방법은 앞에서 측정된 자료와 함께 뒤에서 측정된 자료까지 이용하여 보정하기 때문에 기본적으로 칼만 필터에 의한 결과보다 좋은 결과를 보여준다.

3.2. Synthetic 자료를 이용한 칼만 RTS 필터의 유용성 평가

칼만 RTS 필터의 유용성을 알아보기 위하여 임의로 무작위적인(random) 오차를 포함하는 신호를 만든 후, 이 결과를 칼만 필터와 기존의 평균값을 이용한 노이즈 제거 방법과 비교하였다. 1초 간격으로 200초 동안 지속되는 노이즈의 평균을 0, 표준편차를 1 이라고 가정하고 노이즈를 포함한 신호를 만들었으며 주변의 10, 20, 50개의 값을 평균하여 자료를 처리하는 방법과 칼만 필터 방법을 각각 적용하였다. 시간 영역에서 주위 값을 평균하여 자료를 처리하는 방법은 푸리에 영역에서의 저주파 필터를 적용하는 것과 같으며 본 연구에서는 시간영역에서 자료를 처리하여 그 결과를 도시하였다. Fig. 3에서 검은색 실선이 노이즈가 존재하지 않는 경우에 측정되는 값이며 회색 점선이 노이즈가 포함된 실제 경우에서 측정되는 값, 검은색 점선이 주변

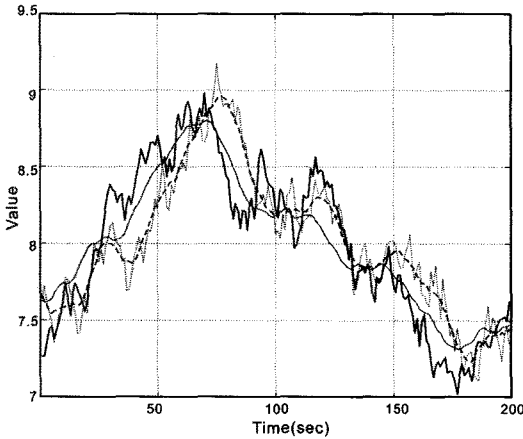


Fig. 3. Diagrams showing the result of filtering with synthesized data. Measured value(dotted gray color), true values(black line), smooth filter results(dashed black line) and kalman filter results(gray line) are shown.

의 10개의 값을 평균하여 보정한 결과이며 회색 실선이 칼만 필터를 적용한 결과이다. Fig. 3에서 보는 것과 같이 10개의 평균을 이용하여 저주파 필터를 적용한 결과에 비하여 칼만 필터를 이용한 방법은 원래의 참값에 매우 근접하는 것을 볼 수 있다. 정량적으로 값을 비교하기 위하여 노이즈가 존재하지 않는 값(검은색 실선)과 주변의 10, 20, 50개의 값을 평균한 결과와의 RMS 오차 값을 구하였으며 각각 0.262, 0.258, 0.265로 나타났다. 이에 비해 칼만 RTS 필터의 RMS 오차값은 0.187로 나타났으며 이 결과로부터 칼만 필터가 노이즈를 제거하는데 매우 효과적이며 칼만 필터와 일반적으로 사용되는 저주파 필터와의 차이를 볼 수 있어 칼만 필터의 우수성을 확인 할 수 있다.

4. 연구결과

배의 이상 거동으로 인한 영향을 파악하기 위하여 남북 방향의 축선을 선정하여 RTS방법을 적용하였다. 탐사축선 중에서 임의로 남북 방향의 한 개 축선을 선정하여(Fig. 2에서 A로 나타낸 실선; 위도 36도 30분에서 36도 46분, 경도 129도 35분) 분석한 결과 Fig. 4(a)에서 보는 것과 같이 중력 이상 값의 변위 폭이 최대 15 mGal 정도의 차이를 보이면서 매우 불규칙하게 변하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 불규칙한 변화는 탐사 범위 및 허부지질구조를 고려할 때 지질학적인 현상에 기인하는 것이 아니고 탐사 시 조사선박의 선수가 불규칙하게 좌우로 흔들리면서 야기된 오차

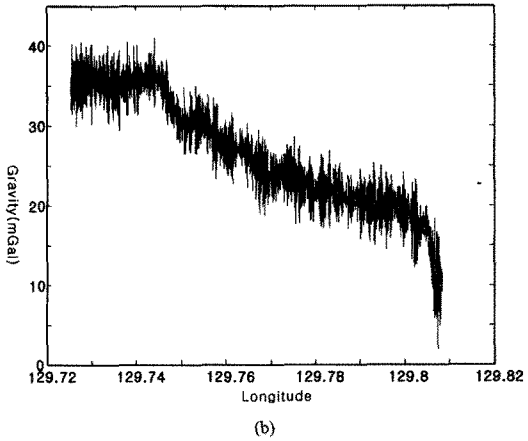
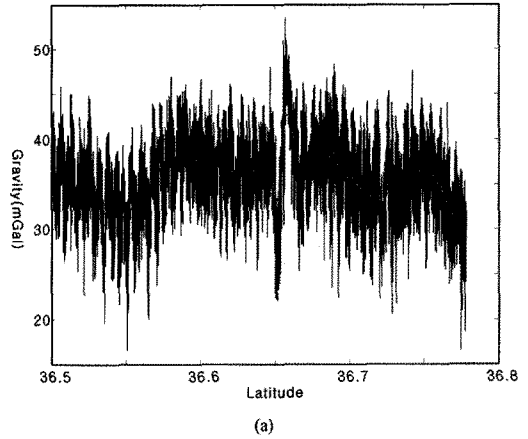


Fig. 4. Diagrams showing the data variation amplitude before (black color) and after (gray color) applying the RTS method on survey tracks with the direction of NS (a) and EW (b). See Fig. 2 for locations.

가 반영된 것이라 판단된다. 이러한 자료에 RTS 방법을 적용한 결과(Fig. 4(a)의 회색 실선) 중력 이상 값의 변화 범위가 2~3 mGal 이내로 매우 안정적으로 변하는 것을 알 수 있으며 일반적으로 사용하는 저주파 필터에 비해 고주파의 상세한 신호 손실을 줄일 수 있었다. 또한 부정확한 에트바스 보정을 야기하는 조사선박의 속도 및 진행 방향을 파악하기 위하여 에트바스 영향이 가장 크게 나타나는 동서 방향의 축선(Fig. 2에서 B로 나타낸 실선; 경도 129도 43분에서 129도 48분, 위도 36도 52분)을 선택하여 RTS 보정을 수행하였다. Fig. 4(b)에서 보는 것과 같이 NS 방향의 축선에 비해 EW 축선의 중력 이상 값 변화 범위는 최대 10 mGal 정도로 다소 안정적이기는 하지만 이 역시 교차점 오차(cross-over error)를 유발할 수

있고 정확한 에트바스 보정을 수행하기에는 비교적 큰 변화 값이다. 따라서 교차점 오차를 최소화하고 보다 정확한 중력 이상 값을 도출하기 위해 RTS 보정을 수행한 결과 변화 값이 2 mGal 미만으로 매우 안정적인 을 알 수 있다(Fig. 4(b)의 회색 실선).

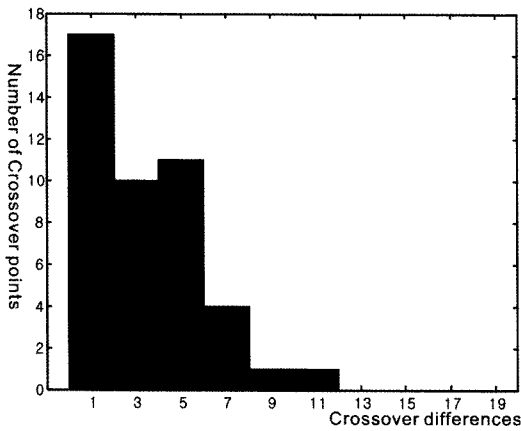
보정된 방법을 기존 자료와 비교하기 위하여 총 45

Table 1. Statistical comparison of cross-over points (unit=mGal)

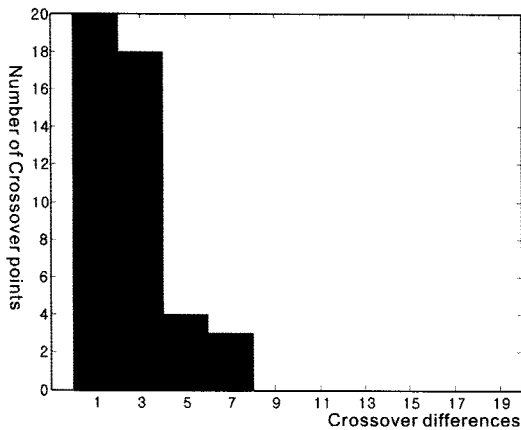
	(Min, Max)	Mean	Std	RMS error
Original	(0.07, 10.86)	3.38	2.55	4.21
RTS	(0.03, 7.54)	2.34	1.81	2.95

*Original=gravity anomaly calculated by conventional correction method

RTS=gravity anomaly filtered by RTS method



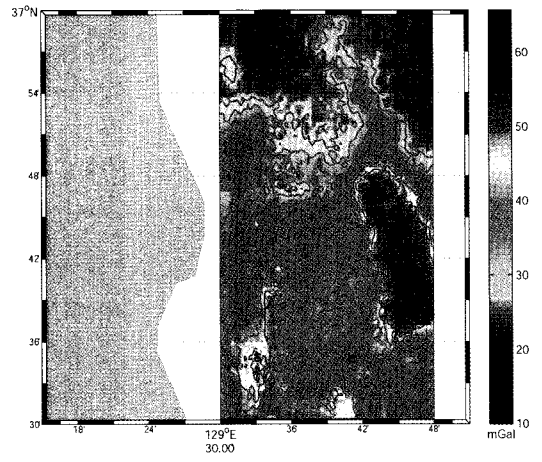
(a)



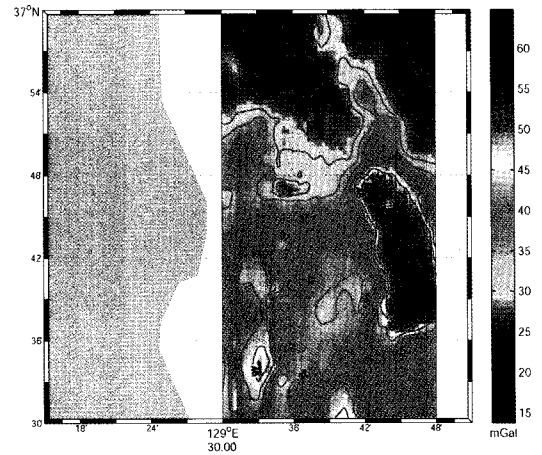
(b)

Fig. 5. Cross-over difference histograms before (a) and after (b) applying the RTS method.

개의 교차점에서의 오차 값을 구하였으며 그 결과를 Table 1과 Fig. 5에 나타내었다. 기존 자료를 이용했을 경우에는 교차점에서 RMS 오차 값이 평균적으로 4.21 mGal의 차이를 보이며 RTS 방법을 중력 이상 값에 적용했을 때 RMS 오차 값이 평균 2.95 mGal의 차이를 보여 본 연구에서 사용된 방법이 교차점 오차를 제거하는 데도 매우 유용하다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 5의 히스토그램에서 보는 것과 같이 기존 자료의 경우 교차점 오차 값이 대부분 5 mGal 이상의 값을 보이고 있지만 RTS 적용 후에는 4 mGal 미만의 값을 갖고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 RTS 방법을 이용하여 중력 이상을 보정한 결과 보정 전의 결과에 비해 축선에서 나타나는 잡음이 감소하고 교차점에서의



(a)



(b)

Fig. 6. Original (a) and RTS filtered (b) gravity anomaly map around the Hupo Bank. Contour interval is 3 mGal.

오차가 줄어들어 신뢰할 만한 자료를 구할 수 있었다.

이러한 보정된 자료와 기존의 자료를 가지고 중력 이상도를 작성하였으며 등고선 간격은 보정된 자료의 RMS 오차보다 큰 3 mGal로 결정하였다(Fig. 6). 기존 자료의 경우, 많은 곳에서 소규모 지질구조에 의한 중력 이상이 존재하는 것처럼 불규칙한 등고선 및 작은 독립된 이상대가 나타나고 있다. 특히 남북 방향 축선에서는 선박의 진행에 따라 선형의 이상대가 존재하는 것을 볼 수 있다(Fig. 6(a)). 그러나 RTS 방법을 이용하여 보정된 자료에서는 언급된 것과 같은 축선 노이즈나 교차점 오차에 기인하는 자료 왜곡 현상이 많이 감소되어 해저면 발달 상황과 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다(Fig. 6(b)). 이러한 결과는 또한 별도의 교차점 오차 보정을 수행하지 않고 RTS 보정만으로도 안정적인 신뢰할 수 있는 자료를 얻을 수 있다는 것을 제시하고 있다.

5. 토의 및 결론

선상 중력계를 이용하여 취득하는 중력 값에는 기상 악화 및 부정확한 위치 값에 따른 오차 값들을 포함하고 있다. 또한 서로 다른 기관에서 취득한 자료를 통합하여 사용하는 경우에는 이러한 오차가 더욱 커지기 때문에 잘못된 해석을 유도할 수 있다. 이러한 자료 왜곡 현상을 최소화하기 위하여 일반적으로 수행하는 것이 교차점 오차 보정과 신뢰할 만한 조사 축선을 기준으로 다른 축선을 맞추는 방법 등을 사용하고 있으나 이러한 방법은 주관적이거나 교차점에서의 값만 보정되기 때문에 정확한 자료해석에는 한계가 있다. 그러나 RTS 방법은 시간 순서대로 앞에서 측정된 자료와 함께 뒤에서 측정된 자료까지 이용하여 보정하기 때문에 취득된 자료에 나타나는 모든 오차 값들의 전반적인 보정이 가능해 별도의 교차점 오차에 대한 보정 없이 자료처리를 할 수 있는 장점은 있으나 소규모 지질 현상에 기인하는 이상대 값을 무시할 가능성이 있어 자료 보정을 하기 전에 탄성과 반사 자료 등과 같은 보조적인 자료를 이용하여 소규모 지질구조에 대한 검토가 필요하다.

GPS 자료 및 측정된 상대 중력값의 오차를 최소화하기 위하여 칼만 필터의 하나인 RTS 방법을 사용

하였다. RTS 보정을 수행한 결과 배의 이상 거동 및 부정확한 GPS 자료에 기인하는 오차(최대 15 mGal)가 거의 제거(1~2 mGal)되었으며 교차점에서의 평균 오차 역시 50% 가까이 줄어들었다. 이러한 결과는 RTS 방법이 선상에서 취득한 중력 이상의 오차 성분을 제거하는 데 매우 유용하다는 것을 보여주고 있다. 이러한 보정된 자료를 이용하여 중력 이상도를 작성한 결과 NNW 방향성을 갖는 양의 중력 이상은 후포퇴를 잘 반영하고 있으며 후포퇴 좌측 및 우측에서 나타나는 음의 중력 이상은 후포분지와 삼척분지에 기인함을 알 수 있다. 또한 36도 42분 부근에서 가장 높은 양의 중력 이상 값은 화산암으로 구성된 왕돌초(수심 5.4 m)에 의한 것으로 RTS 방법에 의한 자료 처리 결과가 소규모 및 비교적 큰 규모의 지질구조 모두를 잘 반영하고 있음을 보여주고 있다.

사 사

본 연구는 2010년 국토해양부의 ‘연안지질 위험요소 연구’(MLTM-10-9106)로 수행된 연구임.

참고문헌

- Hwang, J.S., Han, H.C., Kim, K.O., Kim, J.H. and Kang, M.H. (2008) The study on the integration of gravity data in the ocean, Proceeding of Econ. Environ. Geol. 2008 spring meeting, Seoul.
- Grewal, M.S. and Andrews, A.P. (2001) Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB, Prentice-Hall.
- LaCoste and Romberg Gravity Meters Inc. (1996) LaCoste and Romberg Air-Sea Dynamic Gravity Meter with Seasys digital Control System: LaCoste and Romberg Gravity Meters Inc.
- Nettleton, L.L. (1976) Gravity and Magnetism in Oil Prospecting: McGraw-Hill Book Co.
- Park, C.H., Kim, J.W., Huh, S., Won, J.S., Suk, B.C. and Yoo, H.S. (1999) High resolution Gravity Mapping and its interpretation from both shipborne and satellite gravity data in the Ulleung Basin, Journal of Korean geophysical society, v.2, n1, 27-38.
- You, S.H., Hwang, J.S., Park, J.W., Min, K.D. and Park, C.-H. (2001) Integration of shipborne and satellite gravity data in the East Sea(Japan Sea), proceeding of 2001 ISRS, p.22-25.