정밀수준측량 성과를 이용한 육상 및 해상 수직기준면 변환모델링

Transformation Model of Vertical Datum between Land and Ocean Height System using the Precise Spirit Leveling Results

이동하* · 윤홍식** · 황진상*** · 서용철****

Lee, Dong-Ha · Yun, Hong-Sic · Hwang, Jin Sang · Suh, Yong-Cheol

Abstract

It is difficult to obtain the accurate and homogeneous height information over the whole Korea due to the effect of different vertical datums have been divided into land and sea part. In this study, we tried to unify the different vertical datums using the precise spirit leveling between TBM (tidal bench mark) and BM (bench mark) in order to solve the problems caused by different vertical datums. For this, the vertical datum offsets at observed points which were calculate from leveling results and then transformation model of vertical datum will be modelled using calculated offsets along the coastal line. For suggesting the precise modelling method to vertical datum transformation, we analyzed results from various interpolation methods such as Spline and LSC method. As the results from analysis, the LSC method combined with 4-parameters trend model is more suitable for modelling the offsets between vertical datums. The final transformation model of vertical datum using the combination of LSC and 4-parameter model which provides the transformation accuracies of ± 10.4 cm~ 14.8 cm level. And, the software for vertical datum transformation that was also developed using the final model in order to convert the height information included in various spatial data effectively. Therefore, the transformation model between vertical datums of land and sea part, which is developed in this study, is expected to minimize the confusion caused by mismatch of height information in the use of spatial data, and it also can be minimize economic and time losses in various application fields such as coastal development project, coastal disaster prevention, etc.

Keywords : *different vertical datums, precise spirit leveling, vertical datum offsets, transformation modelling, transformation software*

요 지

현재 우리나라의 국가수직기준체계는 육상과 해상으로 서로 이원화되어 있어 전 국토에 걸쳐 균일하고, 정확한 높이정보를 획득하기 어려운 문제가 있다. 본 연구에서는 국토지리정보원에서 수행한 TBM 및 BM 간 연결 수준측량 성과를 이용하여 육상과 해상으로 이원화된 국가수직기준체계의 문제점을 해결하고자 하였다. 이를 위해 정밀 수준측량으로 결정된 육상과 해상 수직기준면 간 편차를 모델링하여 육상 · 해상 수직기준면 연계를 위한 변환모델을 개발하였다. 보다 정밀한 수직기준면 간 변환모델링 방안을 제시하기 위하여 LSC 및 Spline 방법 등 다양한 보간방법들에 의한 결과를 분석하였으며, 그 결과 비선형의 4-파라미터 경향성 모델과 LSC 방법을 조합하여 개발하는 방안이 가장 적합하였다. 이 방법에 의해 개발된 수직기준면 변환모델의 정확도는 약 $\pm 10.4\text{cm} \sim 14.8\text{cm}$ 수준으로 분석되었으며, 변환모델을 사용하여 다양한 공간정보의 높이정보를 효율적으로 변환할 수 있는 변환 소프트웨어도 함께 개발하였다. 본 연구를 통해 육상 및 해상 국가공간정보의 연계 · 활용 시에 높이정보 불일치로 인한 혼란을 최소화할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 연안지역 개발과 해양방재의 수행에 있어서도 경제적, 시간적 손실을 최소화할 수 있을 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 수직기준 이원화, 정밀 수준측량, 수직기준면 편차, 변환모델링, 변환 소프트웨어

1. 서 론

국가의 수직기준면은 다양한 공간정보에 포함된 높이정보의 기준이 되는 면으로서, 일반적으로 장기간의 조위관측을

통해 계산된 특정한 지점의 평균해수면을 이용한다. 이와 같이 결정된 평균해수면을 기준한 높이정보를 보다 편리하게 획득할 수 있도록 하기 위해서 전 국토에 균일하게 분포될 수 있도록 특정한 형태의 표석을 망 형태로 설치하고, 수준

*정회원 · 성균관대학교 공과대학 겸임교수 (E-mail : dhlee.skku@gmail.com)

**정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 (E-mail : yoonhs@skku.edu)

***정회원 · 성균관대학교 대학원 건설환경시스템공학과 공학박사 (E-mail : gpsboy@skku.edu)

****정회원 · 교신저자 · 부경대학교 공간정보시스템공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : suh@pkn.ac.kr)

측량을 통해 표석의 높이 성과를 결정한 후에 이를 지속적으로 유지·관리하고 있다. 이러한 수직기준면과 이를 기준으로 설정된 수직기준망을 통칭하여 국가의 수직기준체계(이하 국가수직기준체계라고 하고 있으며, 이것은 다양한 분야에서 높이 정보의 활용과 획득을 위한 기준으로 이용된다. 따라서 국가적으로 균일하고, 정확한 국가수직기준체계를 정립하고, 관리하는 것은 정확한 높이 결정이 필요한 건설, 방재, 공간정보 구축과 같은 다양한 분야에서 경제적·시간적 효율성을 확보할 수 있게 할 뿐만 아니라, 다양한 형태의 높이정보 관측자료와 연계되어 최근 급변하는 지구운동(해수면 상승, 지진, 해일 등)에 관한 연구에도 중요한 역할을 수행할 수 있다(Kuroishi 등, 2002).

그러나 현재 우리나라의 국가수직기준체계는 육상과 해상으로 서로 이원화되어 있어 전 국토에 걸쳐 균일하고, 정확한 높이정보를 획득하기 어려운 문제가 있어 이에 대한 기술적이고, 표준적인 해법이 필요하다(국토지리정보원, 2010). 이러한 수직기준체계의 이원화 문제는 육상과 해상 부문에서 서로 다른 수직기준면을 이용하고 있기 때문에 발생하는 문제로서, 현재 우리나라의 높이(표고)의 기준은 국토지리정보원에서 운영하는 수준점(BM: Bench Mark)과 국립해양조사원의 기본수준점(TBM: Tidal Bench Mark)으로 독립적으로 운영되고 있다.

이는 각 부문에서 높이정보를 활용하는 목적이 다르기 때문에 발생하는 문제로서 육상의 높이 기준은 인천의 평균해수면(MSL: Mean Sea Level)이 이용되며, 대부분의 수준점(BM)은 공간정보 구축을 위한 측량의 목적으로 활용된다. 해상의 높이 기준은 해당 지역의 조석 특성에 따라서 결정되는 지역별 조위기준면(약최고고조면, 평균해수면, 약최저저조면)을 혼용하여 사용하고 있는데, 이러한 TBM의 성과들은 선박의 항해·항만운영·파고측정 등의 해양 관련 부문에 활용되고 있다. 따라서 육상과 해상 부문의 공간정보 간에는 높이 정보의 불일치가 필연적으로 발생하고 있으며, 이로 인해 다양한 분야(건설, 토목, 방재, 측량 등)에서 활용·생산되는 국가공간정보 간의 연계와 통합에 많은 어려움이 발생하고 있다(국토지리정보원, 2009; 국립해양조사원, 2009).

국가수직기준체계의 이원화로 인한 대표적인 문제점은 해양방재 및 공간정보 연계·활용에서 빈번하게 발생하고 있다. 일반적으로 해양방재를 위해 이용되는 조석·해일·해수면 상승 등에 대한 자료는 해상의 수직기준면을 기준으로 관측되며, 이러한 관측자료가 연안침수, 해일범람 예측 등에 사용되게 된다. 하지만 이러한 관측자료를 활용한 방재해석 결과를 육상지역과 연계하고자 하는 경우에 높이 정보 간의 불일치 즉, 수직기준체계 이원화로 인해 정확한 방재계획 및 관리 등이 수행되지 못하고 있는 상태이다. 또한, 수직기준체계 이원화로 인한 육상과 해상 높이 정보의 불일치는 연안개발 등에 있어서 공간정보 사용자의 혼란을 초래하고 있으며, 국가공간정보의 연계·통합·관리에 있어서도 다양한 문제점들을 발생시키고 있다.

선진외국의 경우 육상과 해상 간 이원화된 수직기준체계 통합을 위한 노력을 계속적으로 수행하고 있다. 미국국립해양대기청(NOAA)에서는 GNSS에 의한 효율적인 수로측량, 해수면 위험도 평가를 위한 해안침수모델(Coastal Flooding

Model, CFM)개발 등을 목표로 해상과 육상으로 이원화된 수직기준체계를 통합하는 연구를 수행하였다(Roman 등, 2010). 대표적인 연구의 결과로서 공간정보 수직기준면 간의 변환을 수행하는 VDatum 프로그램을 개발하여 육상수직기준인 NAVD88과 각 지역별 수직기준(local tidal datums)에 대해 유기적인 통합을 수행하였다(NOAA, 2004). 이를 통해 육상 지형과 해저지형을 동일 수준면상의 정보로 통일하고, 해안에서 관측된 LIDAR 자료를 이용하여 해안지역의 방재를 효과적으로 수행하고 있는 것으로 알려져 있다(Gesch, 2001). 또한, 인도네시아 국가측지국(NCASM)에서는 전체 17,502개의 도서지역 간 공간정보 통합과 쓰나미(tsunami) 방재를 위해 해상·육상 간 수직기준면을 연계하여 지형도, 해도, 항공사진, 위성영상 등과 같은 다양한 국가공간정보를 구축하였다. 영국의 Ordnance Survey(UKOS)와 Hydrographic Office(UKHO)에서는 해안지역의 경제적 활동성을 높이기 위하여 지형, 지질, 해양지리 자료의 통합을 수행하여 국가적인 개발과 정책 수립을 위한 기반을 마련한 사례가 있으며(Ziebart 등, 2007), 이 외에도 호주, 뉴질랜드, UAE 등에서 해상과 육상 수직기준체계 통합을 위한 다양한 연구의 추진과 정책을 수립하고 있다(국토지리정보원, 2010).

국내에서도 육상 및 해상 간 수직기준체계 이원화로 인한 문제를 해결하기 위해서 2008년과 2009년에 걸친 초기연구를 수행하였다. 2008년도의 연구는 국토연구원에 의하여 국가 GIS 지원 연구의 일환으로 육상·해상 공간정보 통합을 위한 기반 연구(국토해양부, 2008)가 수행되었다. 여기서는 육상과 해양 측량자료의 수직기준면을 효율적으로 통합할 수 있는 방안을 도출하였는데, 인천평균해수면을 각 지역평균해수면에 연결하기 위해서는 기본수준점(TBM)과 수준점(BM) 간의 1등 수준측량을 수행할 필요가 있다고 주장하였다. 또한, 국토지리정보원에서는 이 연구의 결론을 기반으로 2차년도(2009~2010년)에 걸쳐 서해안 및 남해안 일부 지역에 대해 TBM과 BM 간 1등 수준측량 용역사업을 실시하였다. 2009년도에 수행된 수직기준 연계사업의 발전방향 연구(국토지리정보원, 2009)는 경일대학교에 의하여 수행되었으며, 이 연구에서는 2009년도에 수행된 TBM과 BM 간 2등 수준측량 용역사업 결과에 대한 종합적인 분석과 향후 육상·해상 수직기준 연계사업의 발전방향을 수립하였다. 이를 통해 기본수준점(TBM) 성과 산출을 위한 조위관측 시 보다 장기간의 관측기간이 필요하며, 도서지역 수직기준 연결을 위한 GPS수준측량이 고려되어야 할 필요가 있다고 주장하였다. 또한, 현재 이원화된 수직기준체계 내에서 통일된 높이 측량을 수행하고, 국가공간정보 연계·통합하기 위해서는 육상과 해상 수직기준면의 변환모델링이 필요함을 제안하였다.

따라서 상기 연구들의 성과를 토대로 국토지리정보원에서 수행한 TBM과 BM 간 연결 수준측량성적을 이용하여 수직기준면 변환모델링을 수행하고, 이를 통해 국가수직기준체계의 이원화를 해결할 필요가 있다. 더불어 수직기준면 변환모델링 결과를 효율적으로 활용할 수 있는 수직기준면 변환 소프트웨어 개발을 위한 추가적인 연구도 함께 고려되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 2009년부터 2010년까지 국토지리정보원에서 수행된 총 102점의 TBM과 BM 간의 연결을 위한 직접수준측량 사업의 성과 및 이와 관련된 다양

한 기초자료(조위관측 성과, GPS 관측자료 등)를 이용하여 육상과 해상 높이정보 일원화를 위한 수직기준면 최적 변환 모델링 방법을 도출하고, 이를 통한 변환모델을 개발하여 보다 정확하고, 효율적인 수직기준면 간 연계를 도모하였다. 또한, 개발된 육상·해상 수직기준면 변환모델을 공간정보 사용자가 간편하게 활용할 수 있도록 육상·해상 수직기준면 변환 소프트웨어를 개발하였으며, 이에 대한 정확도 평가를 수행하여 공간정보 수직기준면 변환 시 오차범위와 이에 따른 이용방안을 제시하였다.

2. 육상과 해상 수직기준면 간 변환의 개념

완전히 정지한 해면은 중력의 등포텐셜면이 되지만 이러한 상태는 현실에서 실현되지 않기 때문에 이것에 가장 근사한 것으로 평균해수면을 구하고, 이것을 통과하는 등포텐셜면을 높이의 기준면으로 채용하는 것이 일반적이다. 평균해수면은 조위자료로부터 정해지는데 조위관측소가 위치한 지역의 평균해수면은 해양물리 및 기상 영향으로 다른 지역의 평균해수면과 일치하지 않는다. 즉, 지역별 평균해수면의 차이로 인하여 육상에 임의 지점의 표고는 각 지역 평균해수면에 따라 차이가 발생한다. 우리나라는 바다로 둘러싸인 반도국가로 평균해수면의 불일치로 인한 표고의 혼란을 방지하기 위하여 인천만 평균해수면을 표고의 기준으로 채택하였다(국토지리정보원, 2003).

육상과 해양 통합 수직기준면으로 고려할 수 있는 기준면은 전술한 대로 우리나라 육상표고의 기준인 인천만 평균해수면, 해양에서 조석관측을 통하여 계산되는 수심의 기준으로 사용되고 있는 지역의 약최저저조면(기본수준면) 그리고 지역 평균해수면을 고려할 수 있다. 그러나 통합적인 수직기준면 선정의 전제는 전체 지역이 동일한 기준으로 표고를 산정하여야 한다는 것이다(Ziebart 등, 2008). 이러한 기준을 충족하기에 약최저저조면은 지역 단위로 변화하는 기준면으로 해양에서 선박의 안전항해를 고려할 때는 적합한 개념이나 일관성 있는 기준을 제공하지 못하는 한계를 가진다. 지역 평균해수면 역시 조석이 없을 때를 기준으로 한 개념상 동일한 기준이나 해면의 높이는 조석, 기상 및 해상 등의

변동에 따라서 시간적으로 변화하기 때문에 다른 곳의 평균해수면과 불일치하여 지역별 평균해수면의 높이 차이인 해면경사가 발생한다. 인천만 평균해수면은 수준원점에서부터 연결된 각 지역의 수준점과 이들 수준점으로부터 수준측량을 실시하여 임의 지점의 표고값을 계산하기 때문에 측지학적 수준측량의 오차가 없다는 전제하에 이론적으로는 동일한 기준으로부터의 표고값을 결정할 수 있다(국토지리정보원, 2010).

지역 평균해수면과 인천만 평균해수면과의 뚜렷한 차이점은 각 지역에서 조석관측을 실시하여 기준면을 결정하므로 지역에 따라서 서로 다른 기준면으로 구성된다는 것이다. 따라서 국립해양조사원의 기본수준점(TBM)과 국토지리정보원의 수준점(BM) 간의 성과 비교는 TBM의 지역평균해수면상 높이와 육상 BM의 인천평균해수면상 높이에 대해 수준측량을 실시하여 비교하는 방법을 사용하게 된다. 따라서, TBM과 BM간의 수준측량을 실시하여 결정된 인천만 평균해수면과 지역별 평균해수면의 차이를 약최저저조면상(해양기준)의 조위에서 지역 평균해수면을 뺀 값에 적용함으로써 인천만 평균해수면상(육상기준) 조위로 변환할 수 있다(그림 1).

본 연구에서는 수행되는 수직기준면 간 변환 모델링은 육상과 해상 수직기준면 간의 편차(offset)를 모델링하는 것이며, 이러한 편차를 지역별 조위관측을 실시하여 주변 상시점 조소와 연보정을 통해 결정된 약최저저조면(기본수준면 : LDL)과 동일지점의 인천만 평균해수면(IMSL)과의 차이로 정의하였다. 이는 LDL을 기준면으로 하는 TBM의 높이성과와 IMSL을 기준으로 하는 BM의 높이성과 간의 차이를 의미하며, 두 성과 간의 정밀한 수준측량을 실시하여 결정할 수 있다(그림 2).

그림 2. 육상과 해상 수직기준면 간 편차의 개념

그림 1. 인천만 평균해수면과 지역 평균해수면의 관계

결국, 육상과 해상 수직기준면 간의 차이는 IMSL과 LDL 간의 차이이지만, IMSL은 평균해수면, LDL은 약최저저조면이므로 이러한 두 기준면은 동일한 등급(level)의 조위면을 나타내는 것이 아니다. 따라서 이 두 기준면 간의 차이를 편차로 가정하고, 모델링을 적용하기에는 무리가 있기 때문에 LDL과 동일한 조위관측을 통해 계산된 지역별 평균해수면(LMSL)을 이용하여 IMSL과의 편차를 계산하게 된다. 여기서, LDL과 LMSL의 차이는 조위관측을 통해 이미 결정된 기지의 값이므로 본 연구에서 설정한 편차(=LMSL-IMSL)는 근본적으로는 해상 수직기준면인 LDL과 육상의 수직기준면인 IMSL과 차이를 나타내는 것이며, 측지/측량 또는 해양 분야에서는 IMSL이 지오이드와 일치한다고 가정하면 이러한 차이를 해면경사(sea surface slope)라고 한다. 따라서 육상과 해상 수직기준면 간의 편차를 모델링하는 것은 바로 지역별로 발생하는 해면경사의 크기를 모델링하는 것이라도 생각할 수 있다(Featherstone, 2000).

3. 자료의 현황 및 분석

3.1 TBM 및 BM 간 연결 수준측량 자료의 현황

국토지리정보원에서는 2008년도에 국토해양부에서 수행된 연구사업(국토해양부, 2008)의 연구성과를 기반으로 2009년과 2010년 2차년도에 걸쳐 서해안과 남해안 일부 지역에 설치된 총 102점의 TBM과 BM 간 연결측량을 수행하고, 육상과 해상 수직기준면 간의 편차를 결정하는 기술용역을 수행하였다. 현재 국립해양조사원이 설치한 기본수준점(TBM)의 수는 247(전체 245개소 중 2개소 망실)개소이며, 이 중

성파가 제공되어 사용이 가능한 TBM의 수는 245개소이다. 국토지리정보원에서는 현재 사용이 가능한 TBM 중에서 서해안과 남해안의 일부 지역을 대상으로 변환 모델링에 적합한 기초자료의 공간분포를 고려하여 TBM을 선정 혹은 신규 설치하고, 각 TBM 조위기준면 성파를 BM 성파와 2등 수준측량을 통해 연결하였다. 연결측량 성과 결정에 사용된 BM 성파는 국토지리정보원의 2006년 1등과 2등 수준망 조정결과를 바탕으로 2007년 11월에 국토지리정보원에 의해 새롭게 고시된 수준점 표고성파를 이용하였다. 국토지리정보원에서 수행한 TBM 및 BM 간 연결측량의 세부적인 내용은 아래와 같으며, 그림 3은 각 사업지구별로 획득한 연결측량 대상지점의 분포를 나타낸 것이다.

국토지리정보원은 2009년도에 ‘국가수직기준연계를 위한 수준측량(국토지리정보원, 2009)’ 사업을 수행하여 국내 14점의 주요 조위관측소에 대하여 2등 수준측량에 의거한 연결측량을 실시하였으며, 후속 사업으로 인천과 보령지구를 선정하여 41점의 TBM을 신규 설치하였다. 각 TBM에 대하여 2개월에 걸친 단기 조위관측을 수행하여 조위기준면을 계산하는 한편, 인접 수준점과의 2등 수준측량에 의한 연결측량을 수행하여 총 51점에 대한 육상과 해상 수직기준면 간의 편차량을 계산하였다.

2010년도에는 ‘국가수직기준연계사업(국토지리정보원, 2010)’을 수행하여 서해와 남해지구를 관측하고, 국립해양조사원에서 설치한 총 47점의 TBM에 대하여 인접 수준점(BM)과의 2등 수준측량에 의거한 연결측량을 수행하고 육상과 해상 수직기준면 간의 편차량을 계산하였다. 2009년과 2010년의 국토지리정보원 용역사업의 관측방식에는 단기 조

그림 3. 사업지구별 연결측량 대상지점(TBM)의 분포도

위관측 수행여부에 따른 차이가 있으나, 각 사업별로 2등 수준측량을 수행하였으며, 모두 동일한 조위기준면 결정방법을 적용한 조위기준면 성과를 이용하여 해상과 육상 수직기준면 간의 정밀한 편차를 구한 것으로 평가받고 있다(국토지리정보원, 2009).

3.2 연결 수준측량 성과를 이용한 편차량의 결정

연결측량을 실시하여 계산된 편차량은 앞서 언급한 바와 같이 이론적으로 해면경사와 일치하기 때문에 일반적인 해면경사의 경향이 위도와 해안선을 따라서 증감하는 비례적인 양상을 나타내게 된다. 따라서 TBM-BM 간 연결측량 결과인 육상과 해상 수직기준면 간의 편차량의 양상을 보다 명확하게 표현하기 위하여 해안선에 따른 거리별 편차량을 도시하였다.

TBM과 BM 간의 연결 수준측량을 실시하여 얻을 수 있는 편차량의 형태는 기본적으로 지역적 평균해수면(LMSL)과 인천만의 평균해수면(IMSL)의 차이이지만 TBM에서 조위관측을 통해 계산된 조위기준면 성과의 경우에 기본수준면(LDL)의 값도 고시가 되어 있으므로 최종적인 편차량으로는 LMSL과 IMSL의 편차, LDL과 IMSL의 편차, LDL과 IDL의 편차의 3가지로 구분하여 획득하였다. 이와 같이 최종적인 편차량을 3가지 형식으로 구분한 이유는 일반적인 해상의 공간정보에서는 높이 기준으로 LMSL과 LDL을 주로 혼용하여 사용하며, 육상 공간정보의 경우에는 IMSL만을 높이의 기준으로 사용하기 때문에 3가지의 편차량을 모델링하는 것만으로도 대부분의 육상과 해상 공간정보의 변환에 적용할 수 있기 때문이다.

그림 4는 국토지리정보원 수직기준연계사업으로부터 결정된 102점의 TBM에 대한 육상과 해상 수직기준면 간의 편차량을 해안선에 따라 누적거리별로 도시한 것으로써 누적거리는 육상의 수직기준면인 인천 상시검조소를 기점으로 하여 우측의 현황도에 표현된 화살표 방향을 따라서 계산한 것이다(그림 4(b)).

총 누적거리별 각 편차량의 분포는 인천 상시검조소를 기점으로 약 -60km에서 1,700km의 누적거리를 따라 나타나고 있으나, 각 편차량 모두 해안선을 따라서 일정한 양상을 보

이지 않는 것으로 확인되었다.

그림 4에 표현된 것과 같이 각 TBM 성과를 기준으로 계산된 수직기준면 편차량이 일반적으로 알려진 해면경사와 같이 일정한 누적거리별, 위도별 증감의 형태를 보이지 않기 때문에 이를 보다 정확한 조위관측이 수행되었을 것으로 예상되는 상시검조소 성과와 비교·분석하였다. 국내 상시검조소의 관리 및 조위기준면 성과의 고시는 국립해양조사원에서 담당하고 있다. 그러나 각 상시검조소별로 고시된 성과의 경우 모두 상이한 관측기간과 관측기기를 이용하고 있는 것으로 파악되었다(국토지리정보원, 2008).

본 연구에서는 연결측량이 수행된 TBM 성과를 비교하기 위하여 국토지리정보원의 수직기준연계 사업이 수행된 지역 내의 10개소에 대한 상시검조소 성과를 이용하였다. 이러한 상시검조소 성과와 연결측량에 활용된 TBM 성과 간의 상관관계를 보다 명확하게 분석하기 위하여 그림 4에 표시한 수직기준면 간 편차량에 상시검조소 성과를 누적거리별로 중첩하여 그림 5에 표시하였다.

그림 5에 중첩하여 표시한 국토지리정보원 수직기준연계 사업에서 획득된 편차량과 상시검조소에서 획득된 편차량을 비교한 결과, 두 자료 간의 편차량의 양상이 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 이는 수직기준연계 사업에서 이용한 TBM 성과 계산에 상시검조소를 기준으로 한 연보정값이 적용되었기 때문으로 판단된다. 결국 지역적 해면경사의 양상이 명확하게 드러나지 않는 것은 상시검조소에서 조위기준면 결정성과 자체가 일반적인 해면경사의 양상을 나타내지 않기 때문으로 분석되었다. 이러한 원인은 상시검조소의 조위기준면을 결정 시 관측기간이 서로 다르고 관측기기도 동일하지 않았기 때문인 것으로 판단되며, 이러한 문제를 해결하기 위해서는 상시검조소의 성과 계산 시에 동일한 기간의 관측자료와 관측기기를 이용한 장기간의 조위관측을 수행하여야 한다.

그러나 현재 고시된 상시검조소 성과를 기준으로 해상 공간정보가 작성되어 있기 때문에 이와 비슷한 양상을 보이는 TBM 성과들을 편차모델링에 적용하는 것은 가능한 것으로 분석되었다. 다만, 향후 균질한 수직기준체계를 구축하기 위하여 상시검조소 성과의 검토와 재 정의를 명확하게 수행할 필요가 있다.

그림 4. 누적거리별 육상 및 해상 수직기준면 간 편차량

그림 5. 상시검조소와 TBM 수직기준면 편차량 비교

4. 수직기준면 변환 모델링

상기와 같이 결정된 수직기준면 간의 편차량을 사용하여 다양한 보간법을 적용한 편차모델을 개발하여 육상과 해상 수직기준면 간 변환을 수행하였다. 이를 위해 국토지리정보원 수직기준연계 사업성과 중에서 TBM 점을 대상으로 편차모델링을 수행하였으며, 보간점의 분포를 향상시키기 위하여 동일한 포텐셜면을 가지는 것으로 예상되는 TBM과 인접 BM에 대하여 편차모델링을 적용하는 방안도 고려하였다. 또한, 보다 정확한 편차모델링을 위하여 다양한 보간법들을 적용하고 보간법별로 계산된 편차모델의 정확도를 분석하여야 한다.

본 연구에서는 국토지리정보원이 2009년부터 2010년까지 TBM-BM 연계수준측량을 수행한 사업지역인 서해안과 남해

안 일부 지역을 대상지역으로 설정하고, 연결 수준측량 성과를 이용한 편차모델링 시 선형보간법인 Spline 보간법과 통계학적 방법인 Least Square Collocation(LSC) 보간법을 적용하였다.

최종적으로 개발된 편차모델에 대한 정확도를 평가하기 위하여 대상지역 내에 직접 수준측량과 GPS 측량을 수행하였으며, 검사점의 측량성과와 편차모델로부터 계산된 결과를 비교하여 정확도를 평가하였다.

4.1 모델링 대상지역의 선정

수직기준면 간 편차량 결정이 수행된 기초자료들 중에서 자료의 분포밀도와 정확도를 고려하여 동해항과 남동해 지역(통영~포항)의 기초자료를 제외한 80개소의 자료가 포함된 지역을 모델링 지역으로 선정하였다. 그림 6은 육상과 해상

그림 6. 편차모델링 대상지역과 기초자료 분포 현황

수직기준면 간의 편차 모델링을 위하여 선정된 대상지역과 데이터 분포현황을 나타낸 것이다. 대상지역은 연안지역의 범위를 고려하여 해안선 기준 좌·우 50 km 범위로 결정하였다.

표 1은 모델링 대상지역 내의 기초자료로부터 계산한 각 편차량의 통계값을 나타낸 것이다. 표 1로부터 모델링 대상지역의 LMSL과 LMSL의 편차량(Offset 1)은 최소값 -0.291m에서 최대값 0.385m로 분포하고 있으며, 평균과 표준편차는 각각 0.037m와 ±0.128m로 나타났다. 그러나 LDL과 LMSL의 편차량(Offset 2)은 최소값 1.725m에서 최대값 4.756m로 분포하고 있으며, 평균과 표준편차는 3.099m와 ±0.964m로 나타났다. 또한, LDL과 IMSL의 편차량(Offset 3)도 Offset 2와 유사하게 최소값 1.899m에서 최대값 4.781m로 분포하고 있었으며, 평균과 표준편차는 각각 3.137m와 ±0.914m로 나타났다. Offset 2에 비하여 Offset 3의 편차량이 큰 값을 보이는 것은 Offset 3가 Offset 2에 Offset 1을 포함하고 있기 때문인 것으로 분석되었다.

표 1. 모델링 대상지역 내 수직기준면 편차량 통계치
(단위 : m)

구분	MIN	MAX	MEAN	Std. Dev.	비고
LMSL-IMSL	-0.2911	0.3852	0.0373	±0.1279	Offset 1
LDL-LMSL	1.7520	4.7555	3.0993	±0.9637	Offset 2
LDL-IMSL	1.8985	4.7812	3.1367	±0.9135	Offset 3

그림 7은 각 편차량을 사용하여 수직기준면 간의 편차 모델링을 수행하기 위한 기본 개념을 표시한 것이다. 기본적으로 3개의 수직기준면을 기반으로 편차량(Offset 1, 2, 3)별로 적용하여 상호 간의 변환을 수행하게 된다.

그림 7. 편차모델을 이용한 수직기준면 간의 변환 개념도

4.2 Spline 보간법을 이용한 편차 모델링

4.2.1 Spline 보간법의 개념

최종적으로 결정된 편차량들에 Spline 보간법을 적용하여 편차 모델링을 수행하였다. 공간적으로 분포된 기초자료에 대한 Spline 보간법을 적용하기 위해서 ESRI사의 Arcview 소프트웨어를 사용하였다.

Spline 보간법은 지질 통계학적 분야에서 널리 사용되어온 보간법으로써 현재는 다양한 분야에서 사용되고 있다. Spline 보간법은 관측점이 불규칙한 경우에 등고선이나 곡면을 보간할 때에 유용하며, 자료의 경향성(trend)을 표현할 수 있다. 또한, 자료의 특성을 분산도(variogram)의 분석으로 나타내기 때문에 적절한 분산도 모델이 설정되어 있는 경우에는 보다 향상된 보간 결과를 획득할 수 있다. Spline 보간법에 의한 보간에는 분산도 모델, Drift 모델 및 Nugget 효과 등이 포함되어 있다(Sacks 등, 1989).

Spline 보간법은 기본적으로 기준값의 오차가 독립적이지 않고, 상호 연관성을 가진다는 가정으로부터 시작된다. 만약,

최소제곱법에 의한 회귀모델을 생성하였을 경우에 추정값 $\hat{y}$ 와 실제값 사이에 큰 오차가 있다면 그 추정값에서 매우 가까운 지점에서의 추정값 또한 실제값 y 와 같이 큰 오차를 가질 것이라고 예상할 수 있다. 이것은 최소제곱법에 의한 회귀모델 $\hat{y}$ 가 계통오차를 가지기 때문이다. Spline 모델에서는 확정론적인 응답을 회귀모델을 포함하는 임의 모델의 구현으로 처리하고 있다(Sacks 등, 1989).

$$y(x) = f(x) + Z(x) \quad (1)$$

식 (1)에서 $y(x)$ 는 최종적인 미지 함수이며, $f(x)$ 는 주어진 데이터를 사용하여 얻어낼 수 있는 전체 설계영역에서의 전역모델(global model)이다. 이러한 전역모델은 반응표면모델과 유사한 다항함수로 표현되며, 많은 경우에 상수항으로 처리하고 있다. $Z(x)$ 는 평균이 0이고, 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르며, Spline 모델이 각 데이터 점들을 로 보간할 수 있도록 국소적인 변화를 일으키는 부분으로 응답모델의 불확실성을 나타낸다. 이를 통하여 n 개의 기준값들을 적절하게 보간할 수 있다. 식 (2)는 $Z(x)$ 의 공분산(covariance)을 나타낸 것이다.

$$\text{Cov}[z(X^i), z(X^j)] = \sigma^2 R([R(X^i, X^j)]), \quad i, j = 1, \dots, n \quad (2)$$

식 (2)에서 R 은 상관행렬이고, $R(X^i, X^j)$ 는 기준데이터 내의 임의의 두 점 X^i 와 X^j 사이의 상관함수이다. R 은 대칭이며, 대각 요소가 모두 1인 $n \times n$ 의 행렬이다.

4.2.2 TBM 성과만을 이용한 편차모델링

육상과 해상 수직기준면 간의 기초자료들 중에서 80개소의 TBM에 대해서 계산된 편차량만을 이용하여 Spline 보간법으로써 편차 모델링을 수행하였다. 보간을 위해서 보간점에서 가장 근접한 12개소의 편차량을 기준값으로 이용하였으며, 보간의 가중치(power)는 동일하게 2를 지정하였다.

편차모델의 격자간격은 기초자료의 분포밀도와 기준값들 간의 편차량의 경사(거리에 따른 변동량)를 고려하여 0.01° (약 1km)로 설정하였다. 그림 8은 대상 지역에 분포하는 80개소의 TBM에 대한 편차량을 Spline 보간법으로 보간하여 개발한 편차모델을 표시한 것이다.

그림 8에서 알 수 있듯이 Spline 보간법을 적용하여 개발한 편차모델은 일정한 경향성을 보이지 않고 있어 80개소만으로는 그림 5에 표시한 TBM과 BM 간의 연결성분에 존재하는 불규칙 변동으로 인한 영향을 효과적으로 모델링할 수 없는 것으로 분석되었다.

4.2.3 TBM과 BM 성과를 통합한 편차모델링

Spline 보간법으로써 편차모델을 개발한 결과에서 일정한 경향성이 나타나지 않은 원인은 보간의 기준값으로 사용되는 대상지역 내의 TBM 성과가 부족하여 Spline 보간법의 특성이 잘 반영되지 않은 것으로 보인다.

따라서 기준값의 부족으로 인한 영향을 줄이기 위하여 TBM 80개소와 TBM과의 연결을 위하여 사용된 BM 69개소를 더하여 기준값의 공간분포 밀도를 높였다. TBM의 편차량을 계산하기 위해 사용된 BM들은 연결된 TBM과는 동일한 기준면 상에 위치한 편차량을 가지므로 이들을 사용하

그림 8. Spline 보간법을 적용한 편차모델(TBM 80개소 이용)

는 것은 기준값의 공간분포를 높일 수 있는 방법이다.

육상과 해상 수직기준면 간의 편차를 모델링하기 위하여 기초자료들 중에서 TBM 80개소와 각 TBM과 연결된 BM 69개소에 대하여 동일한 편차량을 할당하고, 전체 149개소의 기준값을 사용하여 Spline 보간법으로 편차 모델링을 수행하였다. 보간을 위해서 기준값에서 가장 근접한 12개소의 편차량을 사용하였으며, 보간의 가중치는 동일하게 2를 지정하였다.

최종적으로 격자화된 편차모델의 해상도는 기초자료의 분포밀도와 기준값들 간의 편차량의 경사(거리에 따른 변동량)를 고려하여 0.01°(약 1km)로 설정하였다. 그림 9는 대상 지역에 분포하는 149개소의 TBM과 BM의 편차량에 대하여 Spline 보간법을 적용하여 개발한 편차모델을 표시한 것이다.

보간에 사용된 기준값의 분포밀도를 높여 편차의 경향성을 분석하였으나, 그림 10에서 나타난 것과 같이 경향성이 나타나지 않았다. 따라서 편차 모델링을 위해서 사용한 Spline 보간법은 기준값의 분포밀도와 관계없이 TBM과 BM을 연결한 성과의 불규칙한 변동에 대한 영향을 효과적으로 모델링할 수 없는 것으로 판단되었다.

4.3 LSC 보간법을 이용한 편차 모델링

Spline 보간법에 의한 편차모델링의 부적합성으로 인해 기준값의 분포밀도에 따른 영향을 최소화할 수 있는 통계학적인 방법인 LSC 보간법을 적용하여 모델링을 수행하였다.

LSC 보간법은 관측자료에서 주어지는 실제 신호와 잡음간의 상호관계를 파악한 후에 이것을 이용하여 관측이 수행되지 않은 점의 결과값을 예측하는 방법이다. 일반적으로 실제 신호와 잡음 간의 관계는 공분산 함수로써 표현되며, 결정된 공분산 함수를 구면근사에 의하여 선형화함으로써 정의되는 관계식에 대입하여 예측하고자 하는 점을 보간하는 방법이다.

최소제곱콜로케이션 보간법은 고전적인 보간방법(Spline, Kriging, IDW 등)에 비하여 모델링 오차를 직접 확인할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 또한 관측자료에 포함된 과대오차(gross-error)의 검출과 수직기준체계 정확도 향상을 위한 상시검조소 또는 TBM 분포밀도의 결정 등과 같은 다양한 부분에 있어서도 적용이 가능한 것으로 알려져 있다 (Tscherning, 1994).

4.3.1 편차 모델링을 위한 LSC 방법의 개념

수직기준면 간 편차 모델링을 위한 LSC 방법의 적용은 육상과 해상의 수직기준면이 지오이드와 같이 특정한 포테셜면에 각각 위치한다고 가정하고, 이들을 각각 기준포텐셜과 정규포텐셜로 설정하면 이론적으로 잔여지오이드 모델링을 위한 LSC 방법의 적용과 동일한 형태로 해석될 수 있으며, 자세한 내용은 Moritz(1980), Tscherning(1994) 및 이동하(2008)를 참조할 수 있다.

LSC 방법을 이용하여 수직기준면 간의 편차를 공간적으로 결정하기 위한 기본적인 가정은 두 기준면 간의 편차인 포텐셜 이상(T)이 라플라스 방정식을 만족하는 조화함수라는 것이므로, 이 가정에 따르면 특정한 지점(T) 상의 포텐셜 이

그림 9. Spline 보간법을 적용한 편차모델(TBM과 BM 149개소 이용)

상은 동일한 지점(Q)에 대한 특정한 지구중력장 모델(EGM2008 등)의 포텐셜 이상과 동일해야 한다. 하지만 실제로 평균해수면은 지오이드면과 근사한 면으로 가정된 것이므로, 이러한 원인에 의해 P 와 Q 는 동일한 법선 상에 위치하게 되고, 이는 실제 수직기준면 편차와 선형의 관계로 표현되는 포텐셜 이상의 차이를 나타내게 된다. 이러한 포텐셜 이상의 차이를 오차로 간주하고 이러한 오차가 공간상에서 최소화되게 배분하는 방법, 즉 평균제곱오차가 최소화되는 면을 결정하는 것이 바로 LSC 방법을 이용한 수직기준면 편차 모델링의 전체적인 개념이다.

다만, 이렇게 결정되는 면은 구면조화로 표현되는 다음의 식 (3)을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} K(P, Q) &= \sum_{n=2}^{\infty} (2n+1)a^2 \sigma_n \sum_{m=-n}^n Y_{nm}(P)Y_{nm}(Q) \\ &= \sum_{n=2}^{\infty} \sigma_n \left(\frac{a}{r_P}\right)^{2i+n} P_n(\sin \psi) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, ψ 는 점 P 와 점 Q 간의 구면거리, P_n 은 르장드르 다항식이며, σ_n 은 포텐셜의 차수-분산(degree-variance)이라고 부르는 양의 값을 갖는 상수이다. 따라서, 상기의 식 (3)을 만족하면서 평균제곱오차를 최소화하기 위해서는 다음의 식 (4)에 적용되는 기준포텐셜(EGM2008 지오이드면)과 수직기준면 편차 간의 공분산의 정도를 명확하게 결정하여야 한다.

$$L(\hat{T}) = \sum_{i=1}^n b_i \text{COV}(L, L_i), \quad \{b_i\} = \overline{C}^{-1} \cdot \{y_i\} \quad (4)$$

또한, LSC 방법에 의한 최종적인 모델링 오차는 다음의 식으로 평가될 수 있다.

$$\sigma(L)^2 = \text{COV}(L, L) - \{\text{COV}(L, L_i)\}^T \overline{C}^{-1} \{\text{COV}(L, L_j)\} \quad (5)$$

4.3.2 LSC 보간법의 적용을 위한 공분산 함수의 결정

LSC 방법에 의한 보간법의 적용 시 포텐셜 이상의 차수-분산은 특정한 포텐셜모델의 구면조화전개에 사용되는 최대 차수 N 에 따라 변화하게 된다고 가정되는데, 만약 특정한 포텐셜모델의 개발 시 대상지역에 대한 자료가 포함되지 않아 LSC 방법에 이용되는 실제 편차와 포텐셜모델이 잘 부합되지 않는다면 매우 불규칙적으로 변화하게 된다. 이는 결정되는 포텐셜이상의 차수-분산의 첫 차수가 포텐셜모델 계수의 오차와 매우 밀접한 관련이 있기 때문이다. 따라서 차수-분산 σ_n 은 다음과 같이 포텐셜모델의 오차-차수-분산(error-degree-variance)인 σ_n^E 과 최소한의 비례적 관계를 가지고 있다고 가정할 수 있다(Tscherning, 1994).

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \alpha \sigma_n^E \\ \sigma_n^E &= \sum_{m=-n}^n \varepsilon_{nm}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, ε_{nm} 은 $GM/a\overline{C}_{nm}$ 의 표준편차를 의미한다. α 는 스케일 팩터(scale factor)로서 관측치를 통하여 필수적으로 결정되어야 한다.

결국 포텐셜이상의 차수-분산을 결정할 수 있으면, 수직기준면 편차에 대한 차수-분산도 역시 비례적인 관계를 통하여

결정할 수 있다는 것을 알 수 있지만, 포텐셜이상에 대한 공분산함수를 결정하기 위해서는 수많은 차수-분산값에 대한 무한한 결정이 이루어져야 한다.

이러한 문제의 해결을 위하여 차수와 차수-분산 간에 함수적인 관계로 이루어진 차수-분산 모델을 이용하게 된다(Tscherning, 1994). 다양한 차수-분산 모델이 존재하지만, 본 연구에서는 LSC 보간법을 위한 수직기준면 편차 간의 해석적인 공분산함수로 다음과 같은 2차 Markov 공분산 모델(IIliffe 등, 2003)을 사용하였다.

$$C_{ss} = C_o(1 + \alpha s)e^{-\alpha s} \quad (7)$$

여기서, s 는 상관거리, C_o 는 0에서의 분산이며, α 는 기하학적 지오이드고의 오차-분산과 중력 지오이드고의 오차-분산 간의 관계를 정의하는 스케일 팩터(scale factor)로서, C_o 와 α 는 자동적으로 결정되며, 상관거리 s 는 사용자에게 경험적으로 결정된다.

그림 10은 2차 Markov 공분산 모델을 통하여 결정된 수직기준면 간 각 편차에 대한 경험적 및 해석적 공분산을 표현한 것이다. 상기에서도 언급하였지만 LSC 방법에 의한 편차 모델링을 위해서는 특정한 기준면과 편차 간의 상관성을 결정해야 하는데, 본 연구에서는 지역적 평균해수면이 근사적으로 지오이드와 같다고 가정하고 최신의 중력장 모델인 EGM2008 모델을 기준면으로 하여 모델링 되는 각 편차(offset 1, 2, 3)와의 상관성을 2차 Markov 공분산 모델 이용하여 분석하였다.

이렇게 특정한 기준면과의 상관성을 나타내는 공분산 함수를 결정하여 LSC 편차모델링에 이용되는 최적 상관거리 및 기준분산 등을 결정할 수 있으며, 결정된 공분산 함수를 분석하여 각 편차의 신뢰성 및 오차원인 등을 분석하는 것도 가능하다.

실제로 상기와 같이 해석된 공분산 함수를 분석해 보면 그림 10의 (a), (b), (c)에 걸쳐 초기 분산값에 다소 큰 오차 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 앞서 상시검조소 성과 분석 결과와 동일하게 상시검조소 성과의 오류로 인하여 TBM 검조성과에 오차가 존재하는 것을 의미하고 있다. 또한, 구면거리 0.3°(약 30km) 이후의 범위에서는 기준면과 수직기준면 편차 간의 상관성을 찾을 수가 없는데 이는 평균적으로 약 30km 이상의 분포밀도를 보이는 상시검조소의 배치에 기인하였을 것으로 판단된다. 결국 이러한 결과들은 정확한 수직기준면 간 편차 모델링을 위해서는 연보정 기준인 상시검조소 성과가 먼저 정확하게 결정되어야 한다는 것을 의미하고 있다.

또한 구면거리 약 0.10°에서 약 0.30° 간의 범위에서 실제적인 공분산과 해석적 모델에 의한 공분산이 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 분석을 통하여 LSC 편차 모델링 시 보간되는 수직기준면 간 편차의 완만함과 높은 적합도를 위한 상관거리를 결정하여 적용하여야 하는데(윤홍식 등, 2005), 본 연구에서는 수직기준면 편차의 LSC 모델링을 위한 상관거리를 각 편차별로 약 47km(Offset 1), 56km(Offset 2), 54km(Offset 3)으로 각각 결정하여 모델링에 사용하였으며, 최종적인 LSC 해석 결과의 Noise 수준을 약 3cm로 가정하였다.

그림 10. 수직기준면 간 편차에 대해 해석된 공분산 함수

4.3.3 LSC 보간법에 의한 편차모델링

육상과 해상 수직기준면 간의 편차모델을 개발하기 위하여 기초자료들 중에서 80개소의 TBM과 TBM과 연결된 69개소의 BM에 대하여 동일한 편차량을 할당하고, 전체 149개소의 기준값을 사용하여 LSC 보간법에 의한 편차모델링을 수행하였다.

LSC 방법에 의한 정확한 편차 모델링을 수행하기 위해서 우선 해상 수직기준면과 육상 수직기준면 간의 편차에 대한 경향성을 제거하였다. 그 후 경향성을 제거하고 남은 통계학적 시그널들을 모델링하였다. LSC 방법을 사용할 경우에는 일반적으로 경향성 모델로 선형을 사용하지만 본 연구의 대상지역과 같이 공간적으로 불규칙하고, 구면상에 위치한 자료를 사용하는 경우에는 특별한 구면형태의 경향성 제거 모델을 사용하기도 한다. 본 연구에서는 2가지 경우를 적용하여 보다 정밀한 수직기준면 간의 편차 모델링 방안을 제시

하였다.

그림 11은 선형의 경향성 모델을 제거하여 최소제곱콜로케이션 방법으로 추정한 육상과 해상 수직기준면 간의 통계학적 시그널을 표시한 것이고 그림 12은 그림 11의 통계학적 시그널과 경향성 모델을 더하여 결정된 편차모델을 표시한 것이다. LSC 모델링 방법으로써 결정한 격자화된 편차모델의 해상도는 기초자료의 분포밀도와 각 기준점들 간의 편차량의 경사(거리에 따른 변동량)를 고려하여 0.01°(약 1km)로 설정하였다.

LSC 방법을 사용하여 보다 정확한 편차모델을 개발하기 위하여 비선형의 4-파라미터 모델(Heiskanen 등, 1967)을 사용하여 수직기준면 간의 편차에 대한 경향성과 통계학적 시그널(ε')을 모델링하였다.

$$\varepsilon = a_1 \cos \psi \cos \lambda + a_2 \cos \psi \sin \lambda + a_3 \sin \lambda + a_4 + \varepsilon' \quad (8)$$

그림 11. 수직기준면 간의 통계학적 시그널(선형 경향성 제거)

그림 12. LSC 방법에 의한 수직기준면 간의 편차모델(선형 경향성 제거)

여기서, $a_1 \sim a_4$ 는 경험적인 파라미터들이고, ε 는 LSC 방법으로 모델링되는 통계학적 시그널은 식 (9)를 사용하여 추정할 수 있다.

$$\hat{\varepsilon}' = C_{ss}^{-1} C_{sc}(\varepsilon') \quad (9)$$

그림 13은 비선형의 경향성을 제거한 후에 LSC 방법으로 추정한 육상과 해상 수직기준면 간의 통계학적 시그널을 표시한 것이며, 그림 14는 그림 13의 통계학적 시그널에 경향성 모델을 더하여 최종적으로 결정된 편차모델을 표시한 것이다. LSC 모델링 방법에 의해 최종적으로 격자화된 편차모델의 해상도는 기초자료의 분포밀도와 각 기준값 간의 편차량의 경사(거리에 따른 변동량)를 고려하여 0.01°(약 1km)로 동일하게 설정하였다.

LSC 방법을 적용하였을 때 수직기준면 간 편차의 공간적 분포의 경향성이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 수직기준면 간 편차 모델링을 위해서는 Spline 보간법보다 LSC 보간법이 상대적으로 우수한 성능을 확인할 수 있었다.

또한, 그림 11과 그림 13에 계산된 수직기준면 간 편차에 대한 통계학적 시그널은 TBM과 BM 자료를 중심으로 계산된 것으로써 이러한 기초자료가 없는 곳에 대하여는 명확한 해석이 어렵다는 것을 알 수 있다. 이것은 각 지점별 수직기준면 편차의 공분산이 상관거리가 짧기 때문에 나타나는 당연한 결과이며, 가장 큰 원인은 상시검조소 성과 자체의 오류와 상시검조소의 분포밀도가 낮기 때문인 것으로 분석되었다.

그리고 선형과 비선형의 경향성을 제거하더라도 편차모델

에는 커다란 영향을 주지 않았는데, 이것은 기초자료의 분포가 해안선을 따라서 선형 형태로 분포되어 두 경우의 경향성 모델이 모두 동일하게 계산된 것이 주된 원인 것으로 분석되었다.

4.4 편차모델의 정확도 분석

앞에서 설명한 4가지 방법으로 모델링한 편차모델들에 대한 정확도를 분석하여 육상과 해상 수직기준면 변환을 위한 최적의 편차모델을 선정하고, 이를 토대로 변환 정확도를 분석하였다.

변환 정확도 분석을 위하여 연구에 활용된 TBM 이외에 추가적으로 검조성과를 획득할 수 있는 총 25개소의 TBM에 대하여 직접 수준측량과 GPS 측량을 수행하였다. 25개소의 검사점을 이용하여 검사점 측량성과와 편차모델들로부터 구한 결과와의 차이를 비교·분석하였으며, 그 결과는 표 2~표 4에 표시한 바와 같다. 표 2는 LMSL과 IMSL 간의 편차량(Offset 1)을 사용하여 개발한 편차모델의 정확도를 보간법들의 적용방법에 따라서 분석한 결과를 표시한 것이고, 표 3은 LDL과 LMSL 간의 편차량(Offset 2)을 사용하여 개발한 편차모델의 정확도를 분석한 결과를 표시한 것이다. 또한, 표 4는 LDL과 IMSL 간의 편차량(Offset 3)을 사용하여 개발한 편차모델의 정확도를 분석한 결과를 나타낸 것이다.

표 2~표 4의 결과로부터 비선형의 경향성 모델인 4-파라미터 모델을 적용하여 LSC 보간법으로 개발한 편차모델의 변환 정확도를 타나내는 표준편차가 Offset 1에 대해서는 약 $\pm 0.131m$, Offset 2에 대해서는 약 $\pm 0.104m$, Offset 3에 대

그림 13. 수직기준면 간의 통계학적 시그널(비선형 경향성 제거)

그림 14. LSC 방법에 의한 수직기준면 간 편차모델(비선형 경향성 제거)

표 2. Offset 1 편차모델에 대한 보간법 적용방안별 변환 정확도

(단위 : m)

구 분	MIN	MAX	MEAN	STD
TBM(80점) + Spline 보간	-0.390	0.405	-0.010	± 0.203
TBM(80점) + BM(69점) + Spline 보간	-0.250	0.419	0.010	± 0.175
TBM(80점) + BM(69점) + LSC 해석(선형 경향성 모델)	-0.210	0.239	0.013	± 0.131
TBM(80점) + BM(69점) + LSC 해석(4-파라미터 경향성 모델)	-0.217	0.231	0.011	± 0.131

표 3. Offset 2 편차모델에 대한 보간법 적용방안별 변환 정확도

(단위 : m)

구 분	MIN	MAX	MEAN	STD
TBM(80점) + Spline 보간	-0.650	0.480	-0.029	0.193
TBM(80점) + BM(69점) + Spline 보간	-0.502	0.400	-0.011	0.178
TBM(80점) + BM(69점) + LSC 해석(선형 경향성 모델)	-0.229	0.203	-0.030	0.101
TBM(80점) + BM(69점) + LSC 해석(4-파라미터 경향성 모델)	-0.242	0.205	-0.033	0.104

표 4. Offset 3 편차모델에 대한 보간법 적용방안별 변환 정확도

(단위 : m)

구 분	MIN	MAX	MEAN	STD
TBM(80점) + Spline 보간	-0.481	0.431	-0.105	0.224
TBM(80점) + BM(69점) + Spline 보간	-0.480	0.389	-0.059	0.209
TBM(80점) + BM(69점) + LSC 해석(선형 경향성 모델)	-0.320	0.184	-0.069	0.156
TBM(80점) + BM(69점) + LSC 해석(4-파라미터 경향성 모델)	-0.295	0.181	-0.039	0.148

해서도 약 $\pm 0.148\text{m}$ 로 상대적으로 높게 나타나 Spline 보간법을 적용한 2가지 방법에 비해서 약 $\pm 7\sim 9\text{cm}$ 정도의 정확도가 향상된 것을 알 수 있다.

결과적으로 4-파라미터 경향성 모델을 적용한 LSC 보간법으로 개발한 편차모델의 정확도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이 편차모델을 이용하여 육상과 해상 공간정보의 높이정보를 변환하면 육상 및 해상의 각 수직기준면에 대해 약 $\pm 10.4\text{cm}\sim 14.8\text{cm}$ 범위의 변환 정확도를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 편차모델을 이용한 수직기준면 변환 소프트웨어 개발

본 연구에서는 비선형의 4-파라미터 경향성 모델을 적용한 LSC 방법으로 개발한 편차모델을 이용하여 육상과 해상의 공간정보 중에서 높이정보를 효과적으로 변환할 수 있는 수직기준면 변환 소프트웨어를 개발하였다. WINDOWS O/S를 기반으로 개발하였으며, 다양한 공간정보의 형식을 통합적으로 변환할 수 있도록 하기 위해서 공간정보 분야에서 주로 활용되는 ASCII 포인트 포맷, DXF 포맷, SHP 포맷 및 GRID 포맷을 모두 지원할 수 있도록 개발하였다.

또한, 해상 공간정보(해도, 수심자료 등)의 경우 대부분 UTM 좌표체계에 기준하고 있고, 육상 공간정보(수치지형도, 계획도 등)는 대부분 TM 좌표체계를 기준하고 있기 때문에 서로 다른 공간정보 간의 좌표체계를 변환할 있는 기능도 포함하였다. 본 연구에서 개발된 편차모델은 GRS80 타원체 기준의 경·위도 지리좌표를 사용하고 있으므로 편차모델이 다양한 좌표체계의 공간정보와도 연동될 수 있도록 다양한 좌표변환 기능을 수직기준면 변환 소프트웨어에 추가하여 개발하였다.

그림 15. 육상 및 해상 수직기준면 변환 소프트웨어의 기본 구성

종적으로 개발된 수직기준면 변환 소프트웨어는 GIS 엔진 기반의 GUI 프로그램으로 구현하였고, 포인트와 벡터데이터 (DXF, SHP)의 높이정보 변환은 GIS 엔진인 SharpMap (SharpMap, 2009)으로 개발하였다. 또한, GRID 데이터에 포함된 높이정보 변환은 FWTools(FWTools, 2009)를 이용하였으며, Visual C++ 언어를 기반으로 개발되었다.

그림 15는 개발된 변환 소프트웨어의 기본구성을 표시한 것이며, 기본설정으로 본 연구에서 개발된 편차모델과 좌표계를 적용하면 육상 및 해상 분야에서 제작된 공간정보의 수직기준면 변환에 직접적인 사용이 가능하다. 소프트웨어에서는 지점변환과 지도변환, 그리고 그리드 변환을 제공하고 있으며, 변환이 가능한 범위를 제시함에 따라 적용지역을 구분하여 사용할 수 있다.

변환 소프트웨어는 약 $\pm 10\sim 15\text{cm}$ 정도의 변환 정확도를 가지는 편차모델과 함께 제공되기 때문에 연안개발, 해양방재, 공간정보 구축 및 학술연구 등의 다양한 분야에서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 국토지리정보원에서 수행한 TBM 및 BM 간 연결 수준측량 성과를 이용하여 육상과 해상으로 이원화된 국가수직기준체계의 문제점을 해결하고, 정확하고, 일관성 있는 국가수직기준체계를 수립하기 위해 육상·해상 수직기준면 연계를 위한 변환모델 및 이를 이용한 변환 소프트웨어 개발을 수행하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 육상 및 해상 수직기준면 간 변환모델 개발을 위하여 연구대상지역(서해 및 남해 일부 지역)에 위치한 80개소의 TBM 및 BM점 간의 연결 수준측량 성과를 사용하였으며, 다양한 보간방법들을 분석하여 최적의 변환모델링 방안을 제시하였다.
2. 수직기준면 간의 변환모델은 비선형의 4-파라미터 경향성 모델과 LSC 방법을 조합하여 개발하는 방안이 가장 적합하였다. 이 방안에 의한 연구대상지역 내 육상과 해상 수직기준면 간 변환모델링(Offset 1, Offset 2 및 Offset 3)의 적합도는 각각 $\pm 8.4\text{cm}$, $\pm 6.6\text{cm}$ 및 $\pm 8.8\text{cm}$ 로 나타났으며, 최종적으로 개발된 변환모델들의 정확도는 각각 $\pm 13.1\text{cm}$, $\pm 10.4\text{cm}$ 및 $\pm 14.8\text{cm}$ 수준으로 분석되었다.
3. 본 연구에서 개발한 변환모델을 사용하여 육상·해상 공간정보의 높이정보 변환을 위한 소프트웨어를 개발하였으며, 변환 소프트웨어는 GIS 엔진 기반의 GUI 프로그램으로 다양한 공간정보 포맷(ASCII 포인트, DXF, SHP, GRID)을 편리하게 변환할 수 있도록 개발하였다.

본 연구의 수행을 통해 육상 및 해상 국가공간정보의 연계·활용 시에 높이 정보 불일치로 인한 혼란을 최소화할 수 있을 것으로 기대되며, 연안지역 개발과 해양방재의 수행에 있어서도 경제적, 시간적 손실을 최소화할 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 연구사업(11-1611265-000041-01)의

지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 국립해양조사원(2009) 무인도서의 조석기준면 결정을 위한 기본전략 수립.
- 국토지리정보원(2003) 측량 및 지형공간정보 백서.
- 국토지리정보원(2009) GNSS에 의한 수직기준의 재정립을 위한 연구.
- 국토지리정보원(2010) 국가 수직기준체계 수립을 위한 연구.
- 국토해양부(2008) 육상·해상 공간정보 통합을 위한 기반 연구.
- 윤홍식, 이동하(2005) Least Square Collocation에 의한 GPS/Levelling의 정확도 개선, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 23권 제4호, pp. 385-392.
- 이동하(2008) 한국의 고정밀 합성지오이드 모델의 개발, 박사학위논문, 성균관대학교.
- Featherstone, W. E. (2000) Towards unification of the Australian height datum between the Australian mainland and Tasmania using GPS and the AUSGeoid98 geoid model, *Geomatics Research Australasia*, Vol. 73, pp. 33-54.
- Gesch, D. (2001) Development of a seamless multisource topographic/bathymetric elevation model, *Proceedings from ESRI Users Conference 2001*.
- Heiskanen, W. A. and Moritz, H. (1967) *Physical Geodesy*, San Francisco: W.H. Freeman and Co..
- Kuroishi, Y., Ando, H., and Fukuda, Y. (2002) A new hybrid geoid model for japan, GSIGEO2000, *Journal of Geodesy*, Vol. 76, No. 8, pp. 428-436.
- NOAA (2004) Documentation for VDatum (and the Datum Tutorial) Vertical Datum Transformation Software Version 1.06.
- Moritz, H. (1980) *Advanced Physical Geodesy*, H. Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Roman, D. R., Wang, Y. M., Saleh, J., and Li, X. (2010) Geodesy, Geoids and Vertical Datums : A Perspective from the U.S. National Geodetic Survey, FIG Congress 2010, Sydney, Australia, pp. 11-16.
- Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J., and Wynn, H. P. (1989) Design and analysis of computer experiments, *Statistical Science*, Vol. 4, No. 4, pp. 409-423.
- Tscherning, C. C. (1984) Local approximation of the gravity potential by least-squares collocation, *Proceedings of the international summer school on local gravity field approximation*, Beijing, China, August 21 - September 4.
- Ziebart, M. K., Iliffe, J. C., Forsberg, R., and Strykowski, G. (2008) Convergence of the UK OSGM05 GRACE-based geoid and the UK fundamental benchmark network, *J. Geophys. Res.*, Vol. 113, No. B12, pp. 1-8.

(접수일: 2011.11.11/심사일: 2011.12.27/심사완료일: 2012.5.4)