

조석격자망을 적용한 수로측량자료 조석불확실도 산출 기법 소개

Introduction of Tidal Uncertainty Calculation Technique of Hydrographic Survey Data using Tidebed

안지혜* · 김용환**

Ji Hye Ahn · Yong Hwan Kim

요약 우리나라는 지리적으로 해양과 밀접한 관계를 가지며, 해저지형조사 및 해상안전을 위한 요구사항을 충족하기 위해 다중빔 음향측심기를 이용한 수로측량이 실시되고 있다. 국제수로기구에서는 2012년 S-102 표준을 통해 수심정보와 함께 불확실도를 포함하도록 규정하였으며, 본 연구는 S-102에서 권고하는 국가해저지형표면을 생산하기 위한 수로측량자료의 조석불확실도 산출 기법을 소개하였다. 이를 위해 수로측량 프로세스를 자료취득, 성과물제작, 기준면변환 공정으로 구분하여 각 공정별 불확실도 요인을 식별하고, 수로측량 방식에 따른 총 불확실도 모델을 제안하였다. 현재의 수로측량 방식에서 수심을 계산하기 위해서는 조석 성분을 제거하는 조석보정 작업이 필수적이며, 본 연구에서는 조석보정 과정에서 발생하는 불확실도를 보다 면밀하게 다루었다. 제시된 불확실도 산출 기법은 향후 유사한 연구의 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

키워드 불확실도, 다중빔 음향측심기, 국가해저지형표면, 수로측량, 조석보정

Abstract Korea has a close geographical relationship with the ocean, and hydrographic survey using multibeam echo sounder is being carried out in order to meet the requirements for seafloor topographic survey and maritime safety. In 2012, the International Hydrographic Organization has regulated in S-102 standard to include uncertainty information in S-102 Bathymetric Attributed Grid file. In study, we introduce the method of calculating the tidal uncertainty of hydrographic survey data to produce the S-102 bathymetric surface. For this, the survey process is divided into the data acquisition process, the gridding process, and the transformation process, and the uncertainty factors for each process are identified. Also, a total uncertainty model based on the survey method is proposed. In order to calculate the water depth in the current survey method, a tidal correction process to remove the tidal component is essential and the uncertainty that occurs in the tidal correction process is dealt with more closely. The proposed uncertainty calculation technique could be used as a reference in a further similar study.

Key words Uncertainty, Multibeam echo sounder, S-102 bathymetric surface, Hydrographic survey, Tidal correction

1. 서론

국제수로업무의 표준화 및 협력 증진을 관장하는 국제수로기구 IHO(International Hydrographic Organization)에서는 2012년 S-102 Bathymetric Surface Product Specification Edition 1.0.0을 시작으로 지속적으로 S-102 표준을 간행하고 있다. S-102는 수로정보 교환 표준인 S-57에서 확장된 범용수로데이터 모델인

S-100 시리즈 중 해저지형표면에 관한 표준을 정의한 것으로, 해저지형 정보관리 및 차세대 전자해도 구현 등을 위한 해저지형 격자데이터 국제표준의 명칭을 일컫는다. 특히 S-102에서는 수심자료와 함께 불확실도(uncertainty)를 포함하도록 규정하였다. 수심정보와 더불어 측량방법 및 장비 등 각 조사단계별로 불확실도 산출이 가능해질 경우 해저지형 자료의 정확도 향상에 기여할 수 있다.

Received: 2018.01.15, Revised: 2018.01.19, Accepted: 2018.01.29

* (주)환경과학기술, 부산광역시 해운대구 센텀중앙로 48, 1111호, ongpong@kesti.co.kr

** (주)환경과학기술, 부산광역시 해운대구 센텀중앙로 48, 1111호, kimyh@kesti.co.kr (교신저자)

우리나라는 지리적으로 해양과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 해저 및 하저의 지형조사를 위한 수심측량을 지속적으로 추진하고 있다. 2000년 이전에는 싱글빔 음향측심기(Singlebeam Echo Sounder)를 이용하여 측량을 수행하였으나 근래에는 컴퓨터, 수심측량장비의 발달과 더불어 다중빔 음향측심기(Multibeam Echo Sounder)를 이용한 정밀 수심측량을 주로 추진하고 있다. 다중빔 음향측심기는 선박의 안전 항해를 위한 해저의 정확한 수심 및 수중 지형현황을 파악하고, 해난 사고의 발생 근원인 해저면 위험요소 조사 등에 널리 사용된다(노정식 외, 2009).

다중빔 음향측심기의 활용이 증가하면서 수집 정보의 성과는 증가하였지만, 기기의 배열 및 오작동 등으로 인한 오측자료 생산의 문제점이 발생하였다. 이러한 오측자료는 정확한 오차요인을 분석하고 보정함으로써 일정부분 제거가 가능하지만 제거가 불가능한 오차는 그 범위를 추정하여 수심 자료를 관리하고 활용하는 데 사용되어야 한다.

본 연구는 S-102에서 권고하는 국가해저지형표면을 생산하기 위한 불확실도 산출 기법을 제시하고자 하였다. 2장에서는 연구의 이론적 배경이 되는 불확실도 정의, 요인, 분류, 연산규칙을 요약하여 기술하였다. 3장에서는 수로측량에 있어 불확실도 선행연구들을 토대로(Calder and Mayer, 2003; Hare, 1995; Hare, 2001; Hare et al., 2011) 우리나라 수로측량에서의 불확실도 산출 방법을 제시하였으며, 특히 측량자료의 조석보정시 발생하는 불확실도에 대해 깊이 있게 검토하였다. 제시된 불확실도 산출 기법은 향후 유사한 연구의 참고자료로 활용될 수 있다.

2. 이론적 배경

2.1 불확실도 정의

불확실도는 Table 1과 같이 분야별, 문헌별로 다양하게 정의되고 있으며, 이러한 사례들을 종합해보면

Table 1. List of uncertainty definitions

Title	Publisher	Year	Description
S-102	IHO	2016	The interval (about a given value) that will contain the true value of the measurement at a specific confidence level
S-44	IHO	2008	The interval (about a given value) that will contain the true value of the measurement at a specific confidence level. The confidence level of the interval and the assumed statistical distribution of errors must also be quoted. In the context of this standard the terms uncertainty and confidence interval are equivalent.
Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement	Joint Committee for Guides in Metrology	2008	The word ‘uncertainty’ means doubt, and thus in its broadest sense ‘uncertainty of measurement’ means doubt about the validity of the result of a measurement. Because of the lack of different words for this general concept of uncertainty and the specific quantities that provide quantitative measures of the concept, for example, the standard deviation, it is necessary to use the word ‘uncertainty’ in these two different senses.
A beginner's guide to uncertainty of measurement	National Physical Laboratory	1999	Uncertainty of measurement is the doubt that exists about the result of any measurement. It is important not to confuse the terms ‘error’ and ‘uncertainty’. Error is the difference between the measured value and the ‘true value’ of the thing being measured. Uncertainty is a quantification of the doubt about the measurement result.
측정결과의 불확도추정 및 표현을 위한 지침	한국인정기구	2016	사용된 정보를 기초로 하여, 측정량에 대한 측정값의 분산 특성을 나타내는 음이 아닌 파라미터
측정불확도 표현지침	한국표준과학연구원	2010	“불확도”라는 단어는 의심을 의미하며, 따라서 “측정불확도”는 가장 넓은 의미로 측정결과의 타당성에 대한 의심을 나타낸다. 이러한 불확도의 일반적 개념과 표준편차와 같이 그 개념의 정량적 척도를 나타내는 측정량에 대한 다른 적절한 단어가 없기 때문에 서로 다른 이 두개의 의미에 “불확도”라는 용어를 함께 사용할 수 밖에 없다. 측정결과의 불확도를 측정결과가 측정량의 값에 가까이 있다는 가능성의 지표라고 확정적으로 말할 수는 없다. 측정결과의 불확도는 단순히 현재 활용가능한 지식과 일치하는 최량추정값에 근접할 가능성에 대한 추정값일 뿐이다.

불확실성(不確實性)과 불확실도(不確實度)라는 용어는 영어로 uncertainty로 동일한 것을 알 수 있다. 그러나 불확실성은 어떤 현상이 벌어질지 모르는 상태 혹은 확실히 결정할 수 없는 상황을 일컫는 정성적인 의미이다. 따라서 불확실도는 어떠한 척도를 적용하여 불확실성을 정량적인 값으로 산출하여 표현한 것으로 해석할 수 있다.

측정은 장비를 이용하여 현상의 값을 재고, 실제 값과 가장 유사하다고 여겨지는 추정치를 수로 표현하는 것으로, 이러한 측정값에서는 언제나 불확실한 값이 포함되어 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Measurement} = \text{Best estimation} \pm \text{Uncertainty} \quad (1)$$

본 연구에서는 불확실도를 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

- 불확실도(uncertainty): 측정값이 (알 수 없는) 참값과 얼마나 다를지에 대한 통계적 척도

IHO S-44는 수평 불확실도 및 수직 불확실도를 다음과 같이 정의하였다.

- 수평 불확실도: 위치의 불확실도는 측지적인 기준 내에서 수심이나 지형 위치의 불확실도를 말한다. 총 수평 불확실도에서 위치의 불확실도는 여러가지 요소들에 의해 영향을 받으며, 위치측정 장비뿐만 아니라 총 수평 불확실도에 기여하는 모든 영향이 고려되어야 한다. 불확실도에 기여하는 모든 요소를 결합한 통계적인 방법이 사용된다.
- 수직 불확실도: 수직 불확실도를 결정하기 위해서는 불확실도의 개별적인 요소들이 정량화되어야 한다. 모든 불확실도는 통계학적으로 총 수직 불확실도를 얻기 위해 결합된다.

특히 ‘오차(error)’와 ‘불확실도(uncertainty)’라는 용어를 혼동하지 않는 것이 중요하다. 오차는 측정값과 참값(true value)의 차이이며, 불확실도란 측정 결과에 대한 미심쩍은 양(doubt)을 의미한다. 수심측량에서 참값은 알 수 없으므로 ‘오차’라는 용어는 적절하지 않고 ‘불확실도’라는 용어를 사용한다. 불확실도는 다음과 같이 신뢰구간 및 신뢰수준으로 표기할 수 있다.

- 불확실도 표기 예시: 4.2cm ± 0.1cm(신뢰수준 95%)

2.2 불확실도 요인

측정(measurement)의 목적은 측정량의 값, 다시 말하여 측정하고자 하는 특정량의 값을 결정하는 것이다(한국표준과학연구원, 2010). 실제적으로 측정에서는

다음과 같은 불확실도 요인이 존재한다.

- 측정량에 대한 불완전한 정의
- 측정량의 정의에 대한 불완전한 구현
- 대표성이 없는 표본추출
- 환경조건이 측정에 미치는 영향에 대한 지식 부족 및 환경 조건에 대한 불완전한 측정
- 아날로그 기기에서의 개인적인 판독 차이
- 기기의 분해능과 검출 한계
- 측정표준과 표준물질의 부정확한 값
- 외부자료에서 인용하여 데이터 분석에 사용한 상수와 파라미터의 부정확한 값
- 측정방법과 측정과정에서 사용되는 근삿값과 여러 가지 가정
- 외관상 같은 조건에서 측정량의 반복적인 관측값에서 나타나는 변동

이러한 불확실도 요인들은 서로 영향을 줄 수 있고, 몇몇 요인이 복합적으로 다른 요인에 영향을 줄 수도 있다.

2.3 불확실도 분류

측정불확도 표현 지침(한국표준과학연구원, 2010)에서는 불확실도를 다음과 같이 분류한다.

- 표준불확도(standard uncertainty): 표준편차로 표현된 측정결과의 불확도
- 합성표준불확도(combined standard uncertainty): 측정결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때 이 측정결과의 표준불확도를 합성표준불확도라 한다. 합성표준불확도는 각 입력량의 변화가 측정결과에 미치는 영향에 따라 가중된 분산과 공분산의 합의 양(+)의 제곱근과 같다.
- 확장불확도(expanded uncertainty): 구간으로 정의되어 지는 측정결과에 대한 양, 여기서 구간은 측정량에 대한 값의 분포 중 상당 부분이 포함될 것이라고 기대되는 범위이다. 합성표준불확도에 포함인자 k를 곱하여 산출하며, 포함인자 k는 그 구간에 요구되는 포함확률 또는 신뢰수준에 따라 정해지며 보통 2에서 3사이의 값을 갖는다.

2.4 불확실도 연산 기본규칙

캐나다의 Brock University에서는 불확실도 연산의 기본 규칙에 대해 제시한 바가 있으며, 본 연구에서도 이러한 규칙을 기본으로 적용하여 불확실도 산출모형을 수립하였다. 불확실도 유형은 다음과 같이 절대불확실도와 상대불확실도로 구분된다.

- 절대불확실도(absolute uncertainty): 관측값과 동

일한 단위를 가지는 불확실도, 기호 “ Δ ”로 표시

- 상대불확실도(relative or percent uncertainty): 단위가 없으며 관측값에 대한 백분율을 표시하는 불확실도, 기호 “ ε ”로 표시

- 예시:

$$m = (3.3 \pm 0.2)kg = (3.3kg \pm 6.1\%) \quad (2)$$

- 절대불확실도:

$$\Delta_m = 0.2kg = (6.1/100) \times 3.3kg \quad (3)$$

- 상대불확실도:

$$\varepsilon_m = 6.1\% = (0.2/3.3) \times 100\% \quad (4)$$

- 덧셈과 뺄셈(가감법)

덧셈과 뺄셈(가감법) 연산에서 다음과 같이 절대불확실도 값을 더한다.

- 규칙:

$$(A \pm \Delta A) + (B \pm \Delta B) = (A+B) \pm (\Delta A + \Delta B) \quad (5)$$

$$(A \pm \Delta A) - (B \pm \Delta B) = (A-B) \pm (\Delta A + \Delta B) \quad (6)$$

- 덧셈:

$$(6.5 \pm 0.5)m + (3.3 \pm 0.1)m = (9.8 \pm 0.6)m \quad (7)$$

- 뺄셈:

$$(6.5 \pm 0.5)m - (3.3 \pm 0.1)m = (3.2 \pm 0.6)m \quad (8)$$

- 곱셈과 나눗셈

곱셈과 나눗셈 연산에서 다음과 같이 상대불확실도 값을 더한다.

- 규칙:

$$(A \pm \varepsilon_A) \times (B \pm \varepsilon_B) = (A \times B) \pm (\varepsilon_A + \varepsilon_B) \quad (9)$$

$$(A \pm \varepsilon_A) / (B \pm \varepsilon_B) = (A/B) \pm (\varepsilon_A + \varepsilon_B) \quad (10)$$

- 곱셈:

$$(5.0m \pm 4.0\%) \times (3.0s \pm 3.3\%) = (15.0m \cdot s \pm 7.3\%) \quad (11)$$

- 나눗셈:

$$(5.0m \pm 4.0\%) / (3.0s \pm 3.3\%) = (1.7m/s \pm 7.3\%) \quad (12)$$

- 거듭제곱(Power)

거듭제곱 연산에서 다음과 같이 상대불확실도 값에 지수를 곱한다.

- 규칙:

$$(A \pm \varepsilon_A)^n = (A^n \pm n\varepsilon_A) \quad (13)$$

- 세제곱:

$$(2.0m \pm 1.0\%)^3 = (8.0m^3 \pm 3.0\%) \quad (14)$$

- 제곱근:

$$(2.0m \pm 1.0\%)^{1/2} = (1.4m^{1/2} \pm 0.5\%) \quad (15)$$

- 상수의 곱하기

상수의 곱하기 연산에서 절대불확실도의 경우 상수를 곱하며, 상대불확실도의 경우 상수를 곱하지 않는다.

- 규칙:

$$c(A \pm \Delta A) = cA \pm c(\Delta A) \quad (16)$$

$$c(A \pm \varepsilon_A) = cA \pm \varepsilon_A \quad (17)$$

- 예시:

$$1.5(2.0 \pm 0.2)m = (3.0 \pm 0.3)m \quad (18)$$

$$1.5(2.0m \pm 1.0\%) = (3.0m \pm 1.0\%) \quad (19)$$

- 비교(Consistency check)

불확실도를 가지는 두 값을 비교할 때, 두 값의 차이가 두 절대불확실도의 합보다 작으면 일관성이 있는 값으로 간주한다.

- 규칙:

$$|A - B| \leq |\Delta A + \Delta B| \quad (20)$$

$$\begin{cases} \text{consist, true} \\ \text{discrepant, false} \end{cases}$$

- 예시:

두 값 $(3.3 \pm 0.2)m$, $(3.1 \pm 0.1)m$ 비교

$$|3.3 - 3.1|m \leq |0.2 + 0.1|m \quad (21)$$

$$|0.2|m \leq |0.3|m \quad (22)$$

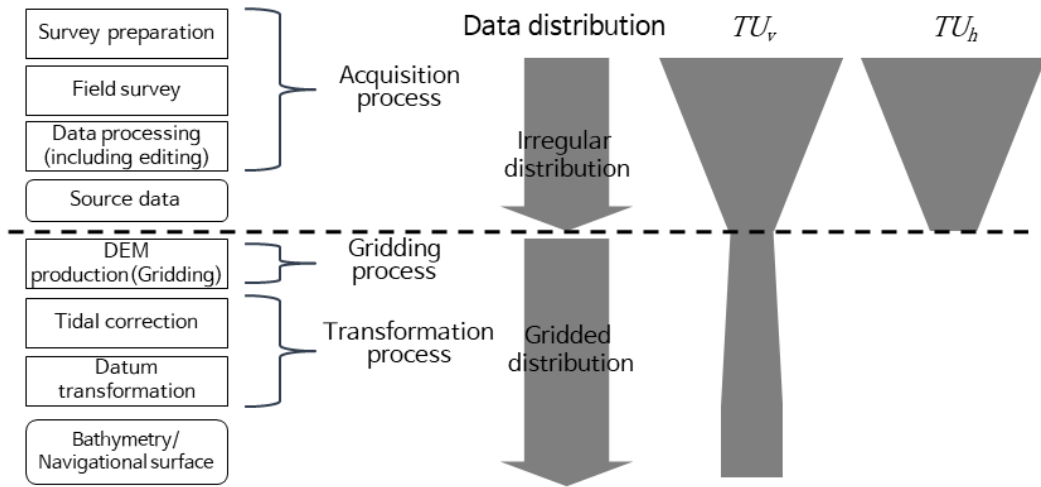
\therefore Consistent Values

3. 수로측량에서의 불확실도

3.1 수로측량 프로세스와 불확실도

S-102에서 권고하는 국가해저지형표면을 구축하기 위해서는 각 수로측량 프로세스에 따른 불확실도를 산출해야 할 필요가 있다. Fig. 1은 수로측량 프로세스에 따른 불확실도를 나타낸 것으로, 수로측량 프로세스는 크게 소스 데이터를 획득하고, 편집 등 자료처리를 수행하는 자료취득 공정(Acquisition process), 해저지형 표면을 생산하기 위해 소스 데이터로부터 그리딩을 통해 DEM을 만드는 성과물제작 공정(Griding process), 조석 보정 및 연속해양기준면 변환을 수행하는 기준면 변환 공정(Transformation process)으로 구분할 수 있다.

데이터 분포(Data distribution)의 경우 자료취득 공정에서는 자료를 획득한 위치에 따라 불규칙적인 분포



✓ Total Uncertainty = Acquisition process U + Gridding process U + Transformation process U

Figure 1. Uncertainty in hydrographic surveys

(Irregular distribution)를 보이며, 그리딩 과정을 통해 격자화된 규칙적인 분포(Gridded distribution)를 보이게 된다.

각 공정이 진행됨에 따라 불확실도 크기의 변화 양상은 총 수직 불확실도(Total Vertical Uncertainty, TU_v)와 총 수평 불확실도(Total Horizontal Uncertainty, TU_h)로 구분하여 나타낼 수 있다. 총 수직 불확실도의 경우 자료취득 후 처리 과정이 진행되면서 그 크기가 점 점 감소하게 된다. 그러나 그리딩 과정을 거치면서 수평 불확실도의 의미가 없어지게 되므로 수직 불확실도로 변환하여야 하고, 내삽에 의한 불확실도의 전파로 인해 총 수직 불확실도 크기가 다소 증가하게 된다.

수심이나 지형 위치에서의 불확실도를 의미하는 총 수평 불확실도의 경우 총 수직 불확실도와 마찬가지로 자료 취득 후 처리 과정이 진행되면서 그 크기가 점 점 감소한다. 그러다 자료의 노드를 정의하는 그리딩 과정이 시작되는 순간 수평 불확실도의 개념은 사라지게 되고 수평 불확실도를 수직 불확실도로 변환하여 고려해야 한다.

총 불확실도(Total uncertainty)는 이러한 자료취득 공정, 성과물제작 공정, 기준면변환 공정에서 발생하는 불확실도의 합으로 나타낼 수 있으며, 각 각의 공정에서 발생할 수 있는 불확실도 요소를 식별함으로써 산출할 수 있다.

3.2 수로측량 방식에 따른 불확실도 모델

본 연구에서 제안하는 총 불확실도 모델의 계층구조는 Fig. 2와 같다. 총 불확실도($U_{cell,f}$)는 자료취득 공

정에서의 불확실도(U_{acc}), 기준면변환 공정에서의 불확실도(U_{datum}), 성과물제작 공정에서의 불확실도(U_{grd})를 모두 포함한다. 각 하위 항목에 대한 설명은 다음과 같다.

- Depth uncertainty(U_d): 다중빔 음향측심기 시스템을 사용하는 선박을 통해 깊이 관측 시 발생하는 불확실도
- Measurement uncertainty(U_m): Range, Beam angle, Roll, Pitch, Beam opening angle, Heave, Refraction에 의한 불확실도로 인해 발생하는 Depth uncertainty
- Dynamic draft uncertainty(U_{DD}): 선박의 흘수(Draft), 스쿼트(Squat), 로딩>Loading)에 의해 발생하는 불확실도
- Position uncertainty(U_p): 위치에 의해 발생하는 수평 불확실도
- Distance root mean square uncertainty(U_{drms}): GNSS system의 측위 오차인 Radial positioning system uncertainty
- Sounder system position uncertainty(U_{PS}): Sounding과 Transducer의 상대 위치를 측정하는 데에서 발생하는 Sounder system positioning uncertainty. U_{PS} 는 선체에 부착된 조향장치인 Gyrocompass 및 Motion sensor로부터 유발되는 Range error에 의한 Position error, Heading error에 의한 Position error, Beam angle error에 의한 Position error, Pitch error에 의한 Position error로 구성됨

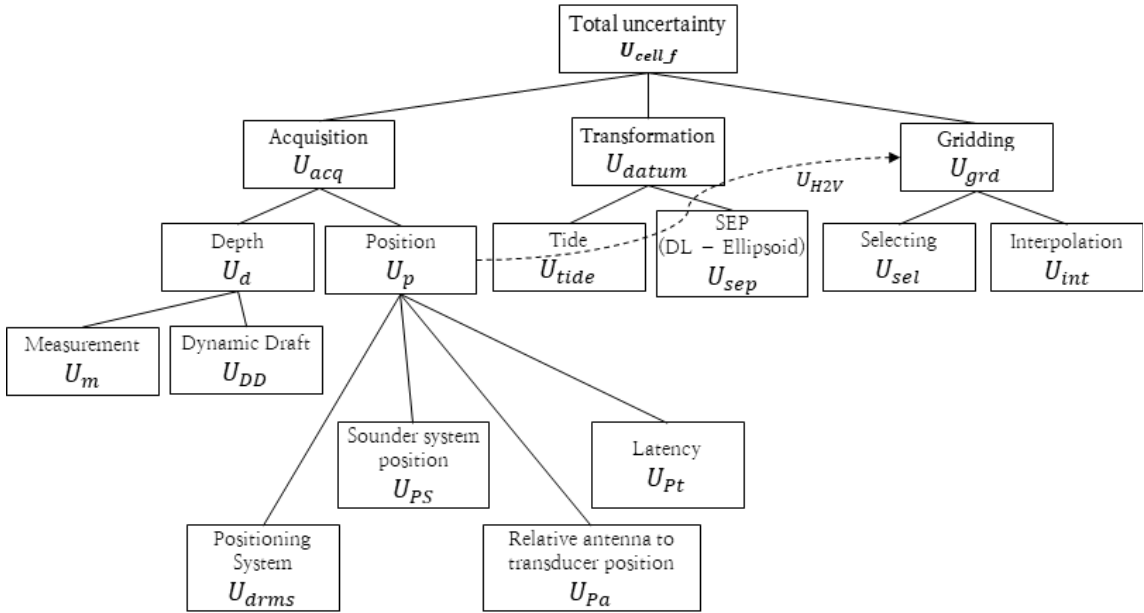


Figure 2. The hierarchy of the total uncertainty model

- Relative antenna to transducer position uncertainty (U_{Pa}): Transducer와 GNSS antenna의 상대 위치를 측정하는 데에서 발생하는 Relative transducer position uncertainty
- Position time displacement(latency) uncertainty (U_{Pt}): Transducer와 GNSS의 시간 차이에 의해 발생하는 Latency induced uncertainty
- TideBed model uncertainty(U_{tide}): 조석보정 과정에서 발생하는 불확실도(3.3절 참조)
- SEP model uncertainty(U_{sep}): 연속해양기준면 변환 공정에서 발생하는 불확실도
- Selecting uncertainty(U_{sel}): 해저지형 표면 제작 시 수심 대푯값 Selecting 과정에서 발생하는 불확실도
- Interpolation uncertainty(U_{int}): 해저지형 표면 제작 시 공간내삽 과정에서 발생하는 불확실도
- Horizontal to vertical uncertainty(U_{H2V}): 수평 불확실도를 수직 불확실도로 변환한 값. 위치에 의해 발생하는 수평 불확실도(U_p) 값을 그리딩을 통해 DEM을 만드는 과정에서 수직 불확실도로 변환하여야 하고, 이는 성과물제작 공정에서의 불확실도(U_{grd}) 값에 영향을 미치게 됨

수로측량 방식에 따라 총 불확실도는 다르게 나타나며, 기존의 방식과 타원체고 기반(Ellipsoidally Referenced

Survey, ERS) 방식으로 구분할 수 있다. 기존 방식의 경우 현장 작업을 통해 자료처리/편집 과정을 거친 측량자료에 조석보정이 적용되고, 공간내삽, 기준면 변환 과정을 거쳐 최종적으로 국가해저지형표면이 생성되게 된다(Table. 2(a)). ERS 방식은 기존의 조석보정 과정 없이 연속해양기준면을 통해 기준면 변환이 이루어지고, 이렇게 편집 완료된 자료는 공간내삽을 거쳐 국가해저지형표면이 생성되게 된다(Table. 2(b)).

3.3 조석보정 불확실도

조석기준면 변환은 수로측량 방식에 따라 그 절차가 결정되며, 기존의 방식과 타원체고 기반의 ERS 방식에 따라 Fig. 3과 같이 Depth를 산출할 수 있다.

기존의 TideBed를 이용한 조석기준면 변환 방식에서는 추정위치 인근의 기준향 조위 시계열 자료에 TideBed DB로부터 획득한 조고비, 조시차, 평균해면값을 적용하여 조석추정값을 구한다.

이를 수식으로 표현하면 다음과 같으며, 이 때 추정 위치와 기준향에서의 조위 시계열 형태가 매우 유사하다는 가정이 포함되어 있다. 다음 수식에서 Z_0 , C_h , C_t 값은 TideBed DB로부터 구할 수 있다.

$$H_t = C_h (H'_{(t-C_t)} - Z'_0) + Z_0 \quad (23)$$

H_t : 추정위치의 시간 t 에서의 추정 조위

H'_t : 기준향 시계열 자료에서 시간 t 에서의 조위

Table 2. Uncertainty models according to the hydrographic survey method

<p>(a) $U_d = \sqrt{U_m^2 + U_{DD}^2}$, $U_P = \sqrt{U_{drms}^2 + U_{PS}^2 + U_{Pa}^2 + U_{Pt}^2}$</p> <p>(b) U_{tide}</p> <p>(c) $U_{acq} = \sqrt{U_d^2 + U_{tide}^2 + U_{H2V}^2}$, $U_{H2V}^2 = U_P^2 + \tan^2\theta$</p> <p>(d)</p> $U_{grd} = \begin{cases} f(U_{acq} \times \gamma(\text{distance})) \\ \rightarrow \text{interpolation} \\ U_{acq} + 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \text{Prob}(d_i < d_{\min})_i) \\ \rightarrow \text{selecting} \end{cases}$ <p>(e) U_{sep}</p> <p>(f) $U_{cell-f} = \sqrt{U_{grd}^2 + U_{sep}^2}$</p>	<p>(a) $U_d = \sqrt{U_m^2 + U_{DD}^2}$, $U_P = \sqrt{U_{drms}^2 + U_{PS}^2 + U_{Pa}^2 + U_{Pt}^2}$</p> <p>(b) U_{tide}, U_{sep}</p> <p>(c) $U_{acq} = \sqrt{U_d^2 + U_{tide}^2 + U_{sep}^2 + U_{H2V}^2}$, $U_{H2V}^2 = U_P^2 + \tan^2\theta$</p> <p>(d)</p> $U_{grd} = \begin{cases} f(U_{acq} \times \gamma(\text{distance})) \\ \rightarrow \text{interpolation} \\ U_{acq} + 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \text{Prob}(d_i < d_{\min})_i) \\ \rightarrow \text{selecting} \end{cases}$ <p>(e) $U_{cell-f} = U_{grd}$</p>
<p>(a) Current method</p>	<p>(b) ERS method</p>

- Z_0 : 추정위치의 (DL로부터) 평균해면값
- Z'_0 : 기준향의 (DL로부터) 평균해면값
- C_h : 추정위치의 (기준향에 대한) 조고비
- C_i : 추정위치의 (기준향에 대한) 조시차

이상의 내용을 정리하면 조석기준면 변환 불확실도를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U_{tide} \cong \sigma_{tide} = \sqrt{\sigma_{TB}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{con}^2} \quad (24)$$

σ_{TB} : TideBed DB로부터 기인한 불확실도

σ_{th} : 조위 관측자료에 내재된 불확실도

σ_{con} : 추정위치의 조위 시계열과 기준향 조위 시계열의 형태가 불일치함으로써 발생하는 불확실도

3.3.1 조위 관측자료의 불확실도

조위 관측자료에 내재된 불확실도를 추정하기 위한 과정은 다음과 같다. 해저면에 설치된 압력식 조위관측계는 압력과 수온을 측정하는데, 측정된 압력은 다음 [식 25]로 정리할 수 있다. 관측을 통해 얻고자 하는 값은 조위값인 $h(t)$ 이지만, 우선 해수의 수주 높이(바닥에서부터 해수면까지의 높이)를 구해야 하므로 다음 [식 26]의 형태로 변형할 수 있다.

$$p(t) = p_a(t) + \rho g[H+h(t)] \quad (25)$$

$$[H+h(t)] = \frac{p(t) - p_a(t)}{\rho g} \quad (26)$$

H : (평균) 해수면까지의 높이

$h(t)$: 시간에 따른 해수면의 변동량(조위)

$p(t)$: 조위계가 측정한 압력

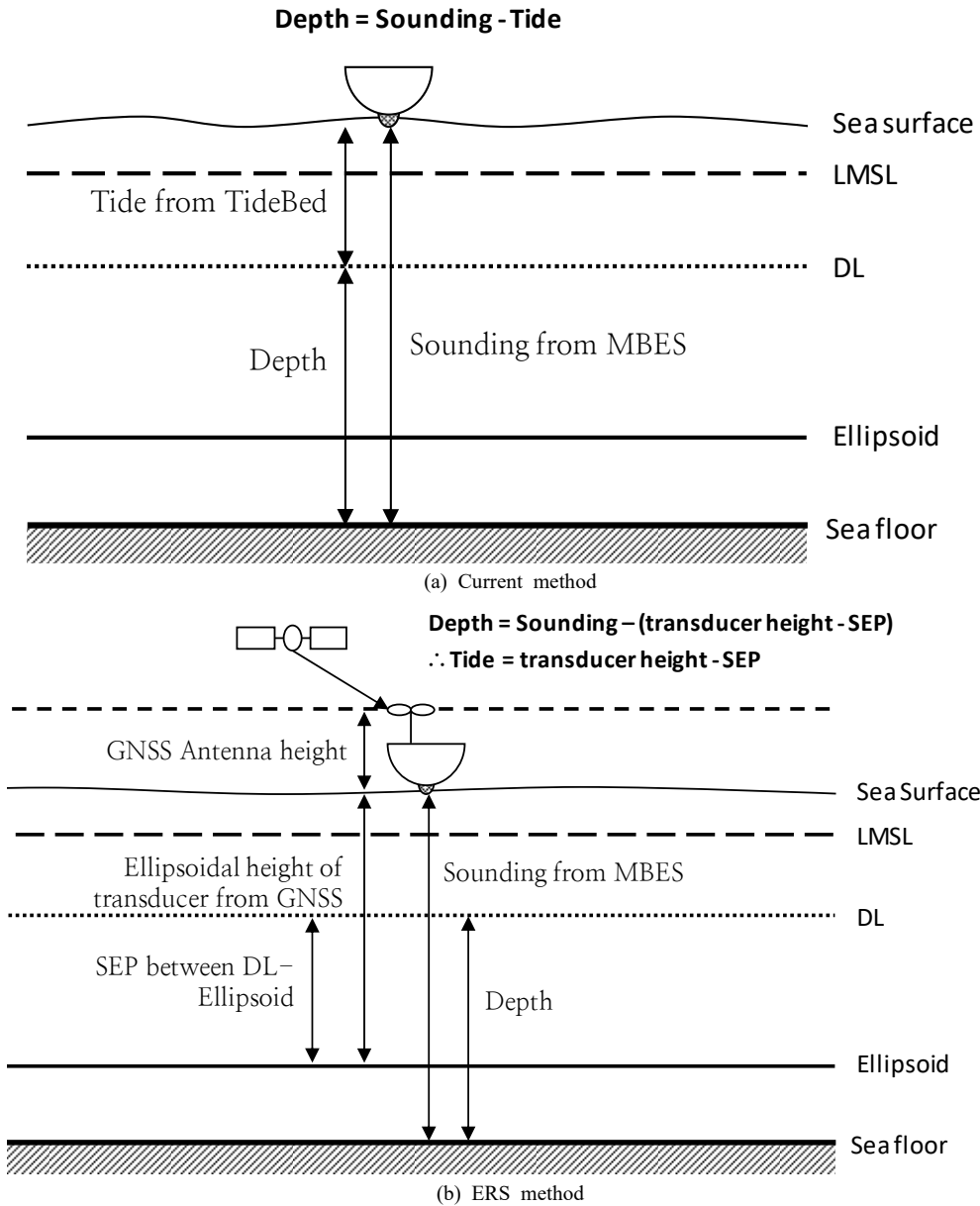


Figure 3. Datum transformation according to the hydrographic survey method

$p_a(t)$: 해수면의 대기압

$\bar{\rho}$: 해수의 밀도

g : 중력가속도

위의 식에서 실제 측정해야 하는 요소는 조위계가 측정한 압력($p(t)$), 해수면의 대기압($p_a(t)$), 해수의 밀도($\bar{\rho}$)이다. 이 때 해수의 밀도는 직접 측정하지 않고 수온과 염분의 함수로 나타낼 수 있기 때문에 수온

과 염분을 실제 측정해야 한다.

따라서 조위계로 조위를 측정할 때 발생하는 불확실도에 영향을 미치는 요인들은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\sigma_{th} = f(\sigma_p, \sigma_{ap}, \sigma_{den}) \tag{27}$$

$$\sigma_{den} = f(\sigma_{temp}, \sigma_{sal}) \tag{28}$$

σ_p : 조위계 압력 측정시 발생하는 불확실도. 조위계

장비 사양에 따름

σ_{ap} : 해수면에서의 대기압 측정시 발생하는 불확실도. 보통의 조위계는 대기압을 관측할 수 없으므로 인근 관측소의 자료를 활용함

σ_{den} : 해수의 밀도 불확실도. 수온 및 염분 불확실도로부터 산출

σ_{temp} : 조위계 수온 측정시 발생하는 불확실도. 조위계 장비 사양에 따름

σ_{sal} : 염분 측정 불확실도. 조위계는 염분을 관측하지 않으므로 보통 추정치를 사용함

3.3.2 TideBed DB의 불확실도

조석격자망(TideBed)은 수로측량자료의 조석보정을 지원하기 위해 국립해양조사원에서 제작한 소프트웨어 시스템으로서 우리나라 연근해의 조석특성 정보를 수록하고 있다. TideBed DB 항목 중 조석보정에 사용되는 항목은 조고비, 조시차, 평균해면 값이다. 조석보정 수행시에는 TideBed DB의 항목 외로도 기준항의 조위 시계열자료, 대조차, M₂ 분조의 평균고조간격과 평균해면 자료도 같이 입력되어야 한다. 보정용 조위값을 산출할 때에는 상기 항목들이 비선형적으로 적용되므로 사전에 미리 불확실도를 산정하여 둘 수 없으며, 매번 보정값을 산출할 때마다 산출된 조위 보정값의 불확실도가 같이 계산되어야 한다.

• 격자점의 불확실도

TideBed DB는 조위관측점과 전구조석모델의 값을 이용하여 내삽을 통해 제작된 것이므로 다음과 같이 내삽에 의한 불확실도 전파 모델을 적용해야 한다.

$$\sigma_{TB} = \sigma_{TB_{grid}} = f(\sigma_{TB_{pt}} + \gamma(\text{distance})) \quad (29)$$

$\sigma_{TB_{pt}}$: TideBed DB를 구성하기 위해 입력된 관측값과 조석모델 값에 내재되어 있는 불확실도
 γ : 내삽 수행시 거리에 따른 변이를 규정하는 Variogram 함수

distance: 입력 자료점과 내삽 격자점 사이의 거리
 $\sigma_{TB_{grid}}$: TideBed DB의 각 격자에서의 불확실도, 격자 간격이 충분히 조밀하다고 가정할 때 각 격자의 불확실도가 추가적인 조정없이 그대로 사용되므로 σ_{TB} 와 동일한 의미가 됨

• 개정수의 불확실도

TideBed DB는 조시차와 조고비에 대한 정보를 수록한 것인데, 조시차와 조고비를 계산하기 위해서는 각 격자 위치에서의 대조차, M₂ 분조 평균고조간격 자

료가 필요하다. 조석추정을 위해서는 조시차, 조고비 외에도 평균해면고 값이 필요하며, 기준항의 평균해면고 값도 사용하여야 한다. 조시차와 조고비를 계산하는 공식은 다음과 같다.

$$C_h = \frac{2(H_m + H_s)}{2(H'_m + H'_s)} \quad (30)$$

$$C_t = \frac{g_m - g'_m}{29} \quad (31)$$

C_h : 추정위치의 (기준항에 대한) 조고비

C_t : 추정위치의 (기준항에 대한) 조시차(단위: hour)

H_m, H'_m : 추정위치와 기준항에서의 M₂ 분조의 반조차

H_s, H'_s : 추정위치와 기준항에서의 S₂ 분조의 반조차

g_m, g'_m : 추정위치와 기준항에서의 M₂ 분조의 지각 (단위: degree)

각 분조의 조화상수 값은 입력 시계열 자료의 조화분해를 통해 얻는 것이므로, 이들의 불확실도 값이 조위관측값의 불확실도로부터 전파되는 것은 명확하지만 그 과정을 수학적으로 정리하기란 매우 어렵다. 따라서 불확실도 전파와 관련된 몇 가지 정리와 가정을 통해 조석개정수의 불확실도 산출방법을 단순화할 필요가 있다. 다만, 각 분조의 불확실도 값의 합이 조위관측값의 불확실도와 같은지에 대해서는 추가적인 검토가 필요할 것이다.

해상의 두 지점에서 개정수를 적용하기 위해서는 두 지점의 조석 형태가 매우 유사하다는 선결조건이 있어야 한다. 조석 형태의 유사성은 각 분조의 반조차 값의 비율이 유사하다는 것이므로, 두 지점의 대조차의 비율과 평균해면고의 비율도 유사한 값을 가지게 된다.

$$C_h = \frac{2(H_m + H_s)}{2(H'_m + H'_s)} \cong \frac{Z_0}{Z'_0} \quad (32)$$

여기서 Z_0 와 Z'_0 은 각각 추정 위치와 기준항 위치의 평균해면고 값이다. 위의 식을 이용하면 다음과 같이 조고비의 불확실도 값을 계산할 수 있다.

$$C_h \cong \frac{Z_0}{Z'_0} = \frac{\hat{Z}_0 \pm \epsilon_{z_0} \hat{Z}_0}{\hat{Z}'_0 \pm \epsilon_{z'_0} \hat{Z}'_0} \quad (33)$$

$$= \frac{\hat{Z}_0}{\hat{Z}'_0} \pm \frac{\hat{Z}_0}{\hat{Z}'_0} (\epsilon_{z_0} + \epsilon_{z'_0})$$

위의 식에서 ϵ_{z_0} 와 ϵ_{z_0} 은 각각 추정 위치와 기준항 위치의 조석관측 상대불확실도를 의미한다.

조시차 값의 불확실도는 추정위치와 기준항에서의 조위 관측시간 불확실도의 함수로 나타낼 수 있으며, 조시차 산출 역시 두 개의 불확실도가 명백한 상관관계를 가지며 독립적이지 않으므로 다음과 같이 제곱합이 아닌 합으로 불확실도를 산출해야 한다.

$$\sigma_{C_t} = f(g_m - g'_m) \cong \sigma_{t_g} + \sigma'_{t_g} \quad (34)$$

σ_{t_g} : 추정위치의 M₂ 분조 평균고조간격 산출시 발생하는 불확실도

σ'_{t_g} : 기준항에서의 M₂ 분조 평균고조간격 산출시 발생하는 불확실도

조시차 값의 불확실도는 시간 측정에 대한 불확실도이므로, 조석값의 불확실도로 환산할 수 있어야 한다. 우리나라 인근에서 우세한 반일주조를 기준으로 할 때, 조석을 주기 12.25 시간의 정현파로 가정하면 파고는 $2Z_0$ 에 해당한다. 조시차의 불확실도에 의해 유발되는 조위의 불확실도는 조석의 위상에 의해 다르게 나타난다. 고조 또는 저조일 때 가장 작은 조위불확실도 값을 보이며, 그 중간 시점에서 가장 큰 조위불확실도를 가진다. 이 때 유도되는 조위불확실도 값을 다음과 같이 정리할 수 있다.

먼저 조시차의 불확실도 값은 시간으로 표현되는데 이를 각도로 바꾸어 표현하면 다음과 같다.

$$\theta = 2\pi \frac{\sigma_{C_t}}{12.25} \quad (35)$$

Fig. 4에서 보는 것처럼, 고조와 저조의 중간 시점에서 조위의 변화가 가장 크게 나타나며, 이 때 조시차의 불확실도에 의한 조위의 불확실도의 최대값(σH_{max})은 다음과 같다.

$$\sigma H_{max} = 4Z_0 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (36)$$

개정수가 주어졌을 때 조위는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$H_t = C_h(H'_{(t-C_t)} - Z'_0) + Z_0 \quad (37)$$

위의 식 중에서 $H'_{(t-C_t)}$ 는 조시차를 적용한 기준항 시계열 자료를 의미하고, Z'_0 는 기준항의 평균해면고를 의미한다. 그리고 두 값은 서로 독립적이라고 할 수 있으므로 $H'_{(t-C_t)} - Z'_0$ 의 불확실도는 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\sigma(H'_{(t-C_t)} - Z'_0) = \sqrt{\sigma H_{max}^2 + \sigma_{Z'_0}^2} \quad (38)$$

여기서, 표기의 편의를 위해서 $H'_{(t-C_t)} - Z'_0$ 를 A 라고 하면 [식 37]은 다음과 같이 간단히 표기할 수 있다.

$$H_t = C_h A + Z_0 \quad (39)$$

여기서, 조고비와 A 를 곱한 값의 상대불확실도는

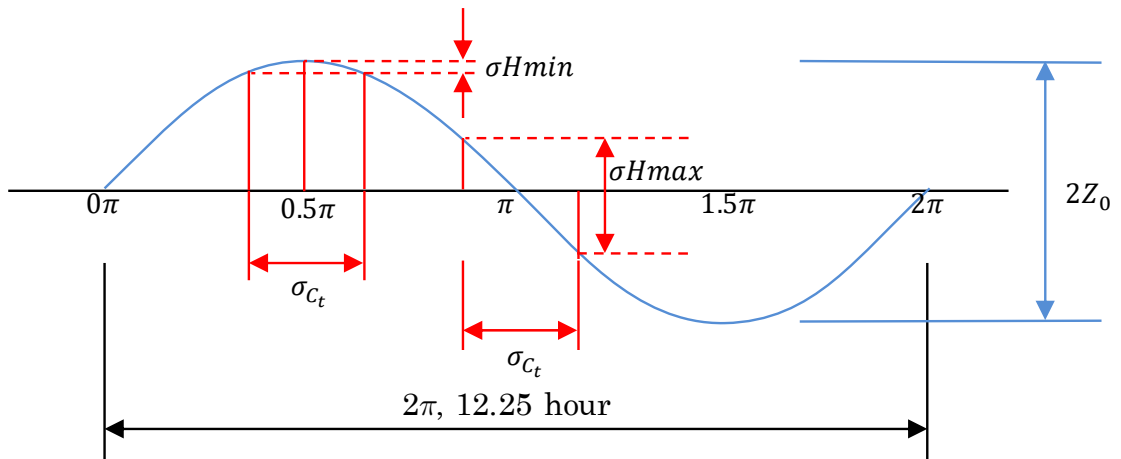


Figure 4. Schematic illustrating the tidal height uncertainty propagation from the uncertainty of the time corrector

두 값의 상대불확실도를 더한 값이 되므로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\epsilon_{c_h} = \epsilon_{z_0} + \epsilon_{z_0'} \quad (40)$$

$$\epsilon_A = \frac{\sigma_A}{A} = \frac{\sqrt{\sigma_{Hmax}^2 + \sigma_{z_0'}^2}}{A} \quad (41)$$

$$\epsilon_{C_hA} = \epsilon_{z_0} + \epsilon_{z_0'} + \epsilon_A \quad (42)$$

$$\sigma_{C_hA} = A \times \epsilon_{C_hA} \quad (43)$$

최종적으로 개정수를 이용한 조위추정값 H_t 의 불확실도는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{H_t} = \sqrt{\sigma_{C_hA}^2 + \sigma_{z_0}^2} \quad (44)$$

4. 결론

본 연구는 산업표준에서 주로 활용되는 불확실도 지침 및 선행연구들을 기반으로 S-102에서 권고하는 국가해저지형표면을 생산하기 위한 수로측량자료의 조석불확실도 산출 기법을 제시하였다.

2장에서는 각 문헌별로 다양하게 나타나는 불확실도 정의를 정리하고, 수심 측정에 있어 불확실도의 정의를 제시하였다. 또한 선행연구들을 토대로 실제 측정에 있어 불확실도를 유발하는 요인, 불확실도의 분류, 불확실도 연산의 기본규칙을 정리하여 기술하였다.

3장에서는 수로측량 각 프로세스에서 전과되는 불확실도를 설명하고, 기존의 측량 방식과 타원체고 기반의 측량 방식으로 구분하여 불확실도 모델을 제안하였다. 특히 조석보정 과정에서 발생하는 불확실도를 조위 관측자료의 불확실도와 TideBed DB의 불확실도로 구분하여 보다 면밀하게 다루었다.

추후 본 연구에서 제시한 조석불확실도 산출 기법을 기반으로 각 공정별 요소별로 불확실도 산출에 대한 수학적 기반을 정비하고, 통계학적 검토를 통해 보다 세부적인 불확실도 모델을 수립할 필요가 있다.

무엇보다도 불확실도를 정확하게 산출하기 위해서는 야장, 일지 등을 통해 수로측량 현장에서 불확실도를 유발할 수 있는 요인들을 충실하게 정리하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 필수 메타데이터의 확보 및 정리, 입력 과정에 대한 지침이 마련되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 노정식, 최윤수, 윤하수, 이유정, 2009. 멀티빔(MBES)의 오차보정에 관한 연구. The Journal of GIS Association of Korea, 17(3):351-359.
2. 한국표준과학연구원, 2010. 측정불확도 표현지침.
3. 한국인정기구, 2016. 측정결과의 불확도추정 및 표현을 위한 지침.
4. Bell S., 1999. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement. National Physical Laboratory, Measurement Good Practice Guide No.11(Issue 2).
5. Calder B. and Mayer L., 2003. Automatic Processing of High-Rate, High-Density Multibeam Echosounder Data. Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(6).
6. Hare R., 1995. Depth and position error budgets for multibeam echosounding. International Hydrographic Review, LXXII(2):37-69.
7. Hare R., 2001. Error Budget Analysis for US Naval Oceanographic Office(NAVOCEANO) Hydrographic Survey Systems. University of Southern Mississippi, Hydrographic Science Research Center for the Naval Oceanographic Office, Final Report for Task 2.
8. Hare R., Eakins B., Amante C., 2011. Modelling bathymetric uncertainty. International Hydrographic Review, 6:31-42.
9. Basic Rules for Uncertainty Calculation. Brock University.
10. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008. Joint Committee for Guides in Metrology.
11. S-44 - Standards for Hydrographic Surveys, 2008. International Hydrographic Organization.
12. S-102 - Bathymetric Surface Product Specification, 2016. International Hydrographic Organization.

**안 지 혜**

2013년 부경대학교 공간정보
시스템공학과 공학사

2015년 부경대학교 공간정보
시스템공학과 공학석사

2015년~현재 (주)환경과학기술

관심분야는 해양/공간자료 분석, 공간정보

**김 용 환**

1990년 서울대학교 해양학과
이학사

1992년 서울대학교 해양학과
이학석사

2014년 숭실대학교

IT정책경영학과 공학박사

1997년~현재 (주)환경과학기술

관심분야는 해양정보시스템