

Article

중도절단 해류속도자료를 이용한 심해저 시험집광기의
주행성능에 관한 신뢰성 기반 최적설계

박상현¹ · 조수길¹ · 임우철¹ · 김새결¹ · 최성식¹ · 이민욱² · 최종수² · 김형우² ·
이창호² · 홍섭² · 이태희^{1*}

¹한양대학교 공과대학 미래자동차공학과
(133-791) 서울특별시 성동구 왕십리로 222
²한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소
(305-343) 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 32

Reliability-based Design Optimization on Mobility of Deep-seabed Test Miner
Using Censored Data of Current Speed

Sanghyun Park¹, Su-gil Cho¹, Woochul Lim¹, Saekyeol Kim¹, Sung Sik Choi¹, Minuk Lee²,
Jong-Su Choi², Hyung-Woo Kim², Chang-Ho Lee², Sup Hong², and Tae Hee Lee^{1*}

¹Department of Automotive Engineering, College of Engineering, Hanyang University
Seoul 133-791, Korea

²Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KIOST
Daejeon 305-343, Korea

Abstract : Deep-seabed test miner operated by a self-propelled mining system moving on soft soil is an essential device to secure floating and towing performances. The performances of the tracked vehicle are seriously influenced by noise factors such as the shear strength of the seafloor, bottom current, seafloor slope, speed of tracked vehicle, reaction forces of flexible hose, steering ratio, etc. Due to uncertainties related to noise factors, the design of a deep-sea manganese nodules test miner that satisfies target reliabilities is difficult. Therefore, reliability-based design optimization (RBDO) is required to guarantee system reliability under circumstances where uncertainties related to noise factors prevail. Among noise factors, the bottom current, a bimodal distribution, is censored due to the observation limit of measurement devices. Therefore, estimated distribution of the bottom current is inaccurate without considering these characteristics and the result of RBDO cannot be guaranteed. In this paper, we define censored data as unknown values over the limit of observation. If this data is estimated by using Akaike information criterion (AIC) that cannot consider the characteristics of censored data, the distribution of estimated data cannot guarantee accurate reliability. Therefore, censored AIC that can consider the characteristics of data is used to estimate accurate distribution of the bottom current. Finally, RBDO, under circumstances where uncertainties related to noise factors combined censored data are present, is performed on the mobility of a deep-sea manganese nodules test miner.

Key words : deep-seabed test miner, censored data, censored akaike information criterion (censored AIC), reliability-based design optimization

*Corresponding author. E-mail : thlee@hanyang.ac.kr

1. 서 론

심해저 시험집광기는 채집장치, 파쇄기, 주행장치, 송출장치 등으로 구성된다. 본 연구의 대상이 되는 시험집광기의 주행장치는 태평양 클라리온-클리퍼튼 단열대(Clarion-clipperton fracture zone: CCFZ)의 우리나라 심해저 광구인 KODOS 지역 해저 연약지반에서 운용되는 집광시스템의 부양성능과 견인성능 확보하는 기능을 수행하는 장치로서 Fig. 1과 같이 무한궤도 방식의 자항식 시스템으로 운행된다. 이러한 심해저 시험집광기는 해저면의 지형특성, 전단강도, 해류속도 등 환경인자와 유연관 반력, 차량속도 및 선회비 등의 작동인자의 변동에 영향을 받기 때문에 주행장치의 주행 안정성을 확보하기 위해 환경변수를 고려하는 신뢰성기반 최적설계 기법의 도입이 필요하다.

특히 심해저 시험집광기를 설계하는데 있어 환경인자 중 전단강도와 해류속도, 작동인자인 선회비가 설계 시 중요하게 고려되어야 한다. 전단강도의 경우, 오랜 세월 동안 형성된 심해저 퇴적지반은 매우 연약하고 점착성이 높은 특징이 있어 주행 안정성을 확보하는데 어려움이 있기 때문에 설계 시 고려되어야 한다(Choi et al. 2011). 심해저 시험집광기의 선회주행 시 해류속도가 저항으로 작용하게 되어 지반과의 슬립이 증가하여 주행에 필요한 토크가 증가한다. 이러한 토크가 증가함에 따라 연약지반의 침하량도 증가한다. 또한 정상 작동 시 안정적인 직진을 위한 작은 선회, 장애물을 회피하기 위한 일반 선회, 경로 추적을

위해 수행하는 유턴 형태의 큰 선회가 필요하다. 이러한 선회는 연약지반에 대해서 슬립을 많이 발생시키고 주행 안정성에 악영향을 끼치므로 설계 시 고려되어야 한다.

환경인자 중 해류속도는 심해저 환경에서 수년간 탐사를 통해 획득된 데이터나 측정장비의 한계로 인해 일정 속도구간 이하에서는 제대로 관측이 되지 않아 데이터의 값이 일정 속도구간에서 정확히 측정되지 못하는 현상이 발견되었다. 측정의 한계로 인해 잘못된 정보를 제공하는 경우의 측정데이터를 중도절단표본(censored sample) 또는 중도절단자료(censored data)라고 정의한다. 신뢰성해석에 사용되는 이산정보의 환경변수에서 이러한 중도절단 자료의 통계적 특성을 기존의 아카이케 정보척도 기법(Akaike information criterion: AIC)을 통해 추정할 경우 측정 한계 부근에 존재하는 부정확한 데이터의 분포가 오차로서 영향을 주게 되어 응답에 대한 신뢰도의 예측 성능을 저하시킨다. 따라서 중도절단자료가 포함된 이산정보의 분포를 추정할 경우 중도절단 특성을 반영하여 정확한 통계적 정보를 확인하는 것이 중요하다. 주행장치의 설계사양 결정 시 이러한 환경조건에 대한 충분한 고려가 필요하다(Hong et al. 2002). 하지만 원격제어와 통합운용이 필요한 심해저 시험집광기는 실제 실험을 수행하기에 매우 어려운 조건이므로 시뮬레이션을 기반으로 개발되고 있다. 본 연구의 주행차량 시뮬레이션 기법은 해저연약지반 강도, 해류 등의 환경조건을 고려할 수 있는 3차원 비선형 해석 전산모델(TRACSIM)을 사용하여 성능을 예측한다(Hong et al. 2002).

본 연구에서는 환경변수인 전단강도와 선회비, 중도절단 해류속도 데이터를 고려하여 시험집광기 주행장치의 신뢰성 기반 최적설계를 수행한다. 태평양 클라리온-클리퍼튼에서 실측한 해류속도의 이산정보에 중도절단 아카이케 정보척도(censored Akaike information criterion: censored AIC) 기법을 적용하여 해류속도의 중도절단 분포를 추정하였다. 따라서 중도절단 해류속도데이터를 고려한 심해저 시험집광기의 신뢰성기반 최적설계를 수행한다.

2. 심해저 시험집광기의 성능

심해저 시험집광기의 성능평가

심해저의 연약지반 위를 운행하는 주행차량에 대한 동역학해석 모델은 강체모델을 기반으로 구성되었다. 강체동역학 모델은 실제 모델을 하나의 강체로 가정하고 모델링하기 때문에 다물체 동역학 모델에 비해 수치해석 시간을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 심해저 퇴적지반은 매우 연약하여 지반의 전단저항력이 전단변위에 따라 민감하게 변하는 비선형 특성을 가지고 있다. 따라서 올바른 지반

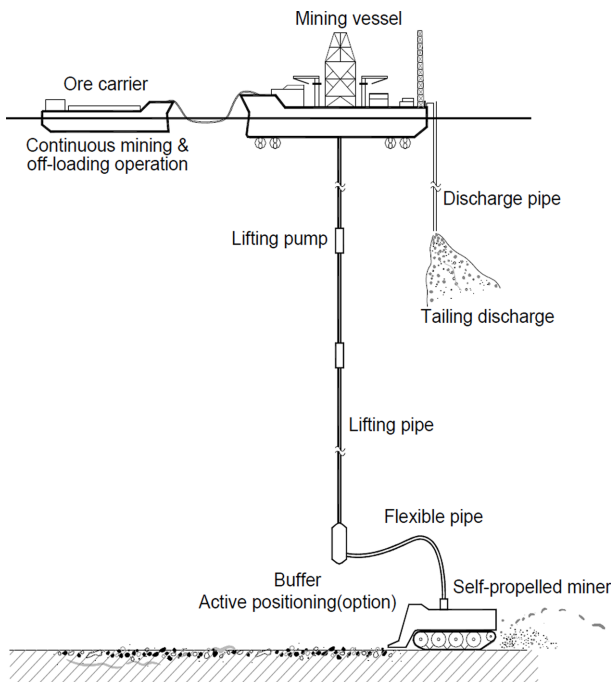


Fig. 1. Concept diagram of continuous mining with a self-propelled miner (Hong et al. 2010)

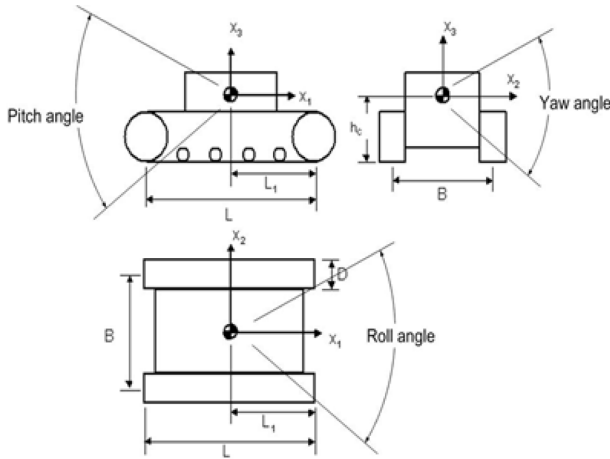


Fig. 2. Configuration and design variables of a tracked vehicle model

추진력을 산정하기 위해서는 주행차량 트랙의 접지 면에서 발생하는 전단변위의 분포가 정확하게 예측되어야 한다. 특히 전단변위는 수직침하를 발생시키고 수직침하는 다시 지면에 가해지는 접지압에 영향을 주기 때문에 이러한 실제 현상이 고려된 비선형 연약지반 모델이 사용되었다. 본 연구에서 고려된 점착성 연약지반용 강제 동역학모델은 Fig. 2와 같다. 여기서 L은 트랙길이, B는 트랙간격, D는 트랙폭, h_c 는 무게중심의 높이, L_1 은 차량 전면부에서 무게중심까지의 거리를 나타낸다. 이외에 주행성능과 관련된 설계변수로 차량질량, 차량질량 중심위치, 부력재 질량, 부력재 질량의 중심위치, 트랙속도 그리고 선회비 등이 있다. 주행차량의 동적 응답 변수는 주행 시 차량의 주행 자세를 나타내는 롤 각(roll angle), 피치 각(pitch angle), 수직침하(vertical sinkage) 등과 주행효율을 나타내는 좌우트랙의 슬립(slip)과 주행토크(torque) 등이 있다. 전산모델의 응답은 과도응답이기 때문에 하나의 수치로 나타내기 어렵다. 따라서 정상상태에서의 시간에 대한 평균값을 대표 응답값으로 선정하였다.

환경변수의 영향

심해저 환경은 기존의 환경과 다르게 매우 가변적이고 극한의 환경이기 때문에 심해저 시험집광기의 주행성능을 만족시키기 어렵다. 주행성능은 지반의 전단강도에 영향을 받으며 선회주행을 하는 동안 계속 변하는 선회비의 영향을 받는다(Choi 2013). 또한 해저 저층에서 발생하는 해류속도 역시 주행성능에 영향을 끼친다. 기존 연구에서는 심해저 시험집광기에 대해 전단강도와 선회비 및 설계변수가 주행성능에 미치는 영향도를 분석하였다. 본 연구에서는 기존의 환경변수와 중도절단 특성을 보이는 해류속도 그리고 설계변수가 주행성능에 미치는 영향도를 분석한다. 영향도 분석을 위해 기존의 연구에서 유의성을 가진 3개의 설계변수인 장단비, 차량 접지 간격, 부력재 질량과 3개의 환경변수인 선회비, 전단강도, 해류속도를 27개의 직교배열 실험계획법을 실시하여 주행성능을 나타내는 침하량과 슬립에 대해 평균분석(analysis of mean: ANOM)과 분산분석(analysis of variance: ANOVA)을 수행하였다. 침하량에 대한 평균분석 및 분산분석을 Fig. 3

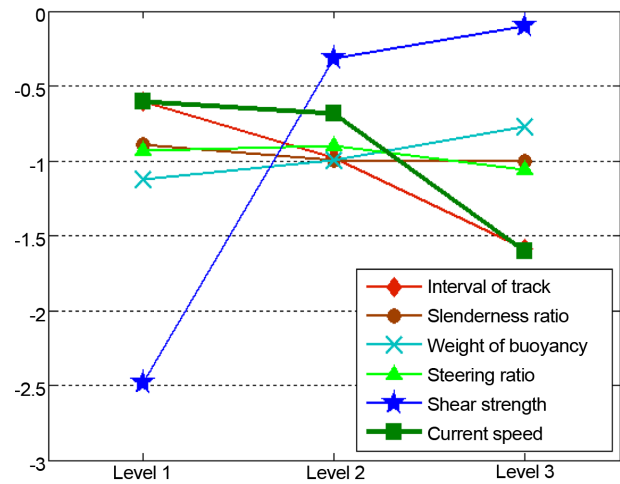


Fig. 3. Analysis of mean for sinkage by using L27 orthogonal array

Table 1. Analysis of variance for sinkage

Factors	DOF	Level 1	Level 2	Level 3	Square sum	Average square sum	Contribution (%)
Interval of tracks	2	-0.6064	-0.9802	-1.5845	4.3847	2.1923	8.9388
Slenderness ratio	2	-0.8916	-0.9921	-1.0073	0.0712	0.0356	0.1451
Weight of buoyancy module	2	-1.1235	-0.9922	-0.7754	0.5562	0.2781	1.1338
Steering ratio	2	-0.9301	-0.8984	-1.0625	0.1365	0.0682	0.2782
Shear strength	2	-2.4807	-0.3137	-0.0967	31.2789	15.6394	63.7666
Current speed	2	-0.6024	-0.6879	-1.6007	5.5121	2.7561	11.2372
Error	14				7.1127	0.5080	
Total	26				49.0522		

Table 2. Analysis of variance for slip

Factors	DOF	Level 1	Level 2	Level 3	Square sum	Average square sum	Contribution (%)
Interval of tracks	2	0.4769	0.8083	2.6660	25.0590	12.5295	17.2877
Slenderness ratio	2	1.1040	1.3357	1.5114	0.7519	0.3759	0.5187
Weight of buoyancy module	2	1.4625	1.4769	1.0117	1.2599	0.6299	0.8692
Steering ratio	2	1.0121	1.0782	1.8608	4.0112	2.0056	2.7672
Shear strength	2	3.2717	0.4037	0.2756	51.6556	25.8278	35.6362
Current speed	2	0.4226	0.7426	2.7859	29.5875	14.7938	20.4119
Error	14				32.6275	2.3305	
Total	26				144.9526		

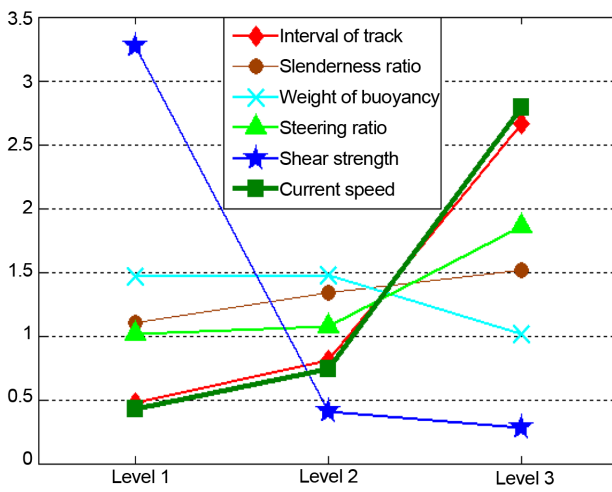


Fig. 4. Analysis of mean for slip by using L27 orthogonal array

과 Table 1에 나타냈고, 슬립에 대한 평균분석 및 분산분석을 Fig. 4와 Table 2에 나타냈다. 환경변수의 영향이 다른 설계변수들보다 상대적으로 많은 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 심해저 시험집광기를 설계할 때 환경변수의 영향을 고려할 설계의 유효성을 확인하였다.

3. 신뢰성 기반 최적설계

신뢰성 기반 최적설계의 정식화

실제 공학 문제에서 설계변수는 임의성(randomness), 불확실성(uncertainty)을 내포하고 있어 설계변수들이 고정된 일정한 값을 갖는다는 전제하에 해석을 수행하는 확정론적인 관점에서 시스템의 성능을 정확하게 예측하는 것은 어려움이 있다. 시스템의 신뢰도는 시스템이 원하는 성능에 얼마나 만족하는가를 성능지수로 나타낸 것이며, 요구하는 설계 영역을 만족할 확률로 표현한 것이다. 다음과 같은 식 (1)로 정의한다.

$$R = \Pr\{Y(\mathbf{X}) \leq y^t\} = \int_{-\infty}^{y^t} f_Y(y) dy \quad (1)$$

여기서 $Y(\mathbf{X})$ 는 확률변수 X 에 대한 응답의 함수, $f_Y(y)$ 는 Y 의 확률밀도함수를 의미하고, y^t 는 목표성능이다. 구조물의 설계 분야에서는 설계점에서 제한조건의 안전영역을 넘는가의 여부를 결정함으로 구조물의 신뢰도를 평가하는 과정을 신뢰성해석이라고 정의한다. 신뢰성 기반 최적설계는 목적함수 $c(\mathbf{X})$ 를 최소화 시키면서 제한조건 $G(\mathbf{X})$ 를 만족할 확률인 신뢰도 R^{target} 을 만족하는 설계변수 \mathbf{X} 를 찾는 문제로서 다음 식 (2)와 같이 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{\mathbf{X}} c(\mathbf{X}) \\ & \text{s.t. } \Pr\{G(\mathbf{X}) \leq 0\} \geq R^{target} \end{aligned} \quad (2)$$

중도절단 아카이케 정보척도(censored AIC)

아카이케 정보척도를 이용한 분포 추정

아카이케 정보척도(Akaike Information Criterion: AIC) (Akaike 1973)는 확률밀도함수의 곱인 우량함수와 모수의 개수를 이용한 수식을 통한 설계자가 정한 후보 확률밀도함수 중에서 주어진 이산정보를 가장 잘 추정하는 분포를 결정하는 기법이다. 아카이케 정보척도는 설계자가 정한 후보 확률밀도함수들의 최대우량값(maximum log likelihood value, l_m)과 모수의 개수(n_{free})를 이용하여 다음 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\varphi = -2(l_m - n_{free}) \quad (3)$$

여기서 최대우량값은 우량함수에 대수함수를 적용한 형태로, 주어진 모수에서 발생 확률이 가장 높은 추정치를 의미하며, φ 가 가장 작은 후보 확률밀도함수가 데이터를 가장 잘 표현한 분포이며 이를 이용하여 시스템의 신뢰도를 예측한다(Lim and Lee 2012a).

중도절단 아카이케 정보척도를 이용한 분포 추정

이산정보에 중도절단자료가 포함되어 있는 경우의 중도

절단 아카이케 정보척도(Choi 2014)는 아래 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\varphi_c = -2(l_{m,c} - n_{free}) \quad (4)$$

구간중도절단자료의 우량함수는 확률분포함수와 누적 분포함수의 곱으로 정의되는데, 이 때 중도절단 아카이케 정보척도의 최대우량값을 구하기 위한 대수우량함수는 중도절단자료의 특성에 따라 다음 식 (5)~(7)과 같이 3가지의 형태로 분류된다.

좌중도절단자료가 포함된 경우는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$l_{m,left_c} = \left\{ \sum_{i=1}^k \log(f(x_i|\theta)) \right\} + (n-k)\log(F(x_T|\theta)) \quad (5)$$

구간중도절단자료가 포함된 경우는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$l_{m,interval_c} = \left\{ \sum_{i=1}^k \log(f(x_i|\theta)) \right\} + (n-k)\log(F(x_a|\theta) - F(x_b|\theta)) \quad (6)$$

우중도절단자료가 포함된 경우는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$l_{m,right_c} = \left\{ \sum_{i=1}^k \log(f(x_i|\theta)) \right\} + (n-k)\log(1 - F(x_T|\theta)) \quad (7)$$

아카이케 정보척도와 마찬가지로 φ_c 값이 가장 작은 확률분포가 이산정보의 통계적 특성을 가장 잘 표현한 연속 확률분포이다. 한편 두 개의 모드를 갖는 이산정보(바이모달)의 경우, 아카이케 정보척도나 중도절단 아카이케 정보척도로 분포를 추정하는 것은 한계가 있다(Lim and Lee 2012b). 환경변수의 측정데이터 자체가 바이모달이거나 응답의 분포가 비선형성이 매우 큰 원인에 의해 바이모달을 갖는 경우에는 다중모드를 고려하지 않고 분포를 추정하면 신뢰성해석의 정확도를 보장할 수 없다. 이산정보가 바이모달 분포를 갖는 경우 이를 고려하기 위해 유한혼합 모델을 사용하여 아래 식 (8)과 같이 연속확률분포의 가중합으로 유한혼합모델을 정의한다.

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^M w_m f_m(\mathbf{x}), \quad \sum_{m=1}^M w_m = 1 \quad (8)$$

여기서 w_m 은 가중치를 의미하고 $f_m(\mathbf{x})$ 는 연속확률분포를 의미한다.

바이모달은 $M=2$ 인 유한혼합모델에 해당되며 정규(normal), 대수정규(log-normal), 감마(gamma), 와이불(Weibull), 지수(exponential) 분포 등 5개의 연속확률분포를 사용하여, 15개의 바이모달 유한혼합모델과 5개의 유

니모달을 포함한 총 20개의 후보 확률밀도함수를 구성하였다(Lim and Lee 2012b).

4. 중도절단 해류속도데이터를 고려한 심해저 시험집광기의 신뢰성 기반 최적설계

설계변수 및 환경변수 설정

심해저 시험집광기는 기존의 연구를 통하여 유의한 3개의 설계변수로서 장단비, 차량 접지 간격, 부력재 질량으로 선정하였다(Choi 2013). 이러한 설계변수 역시 제작공차가 존재하지만 대량 생산이 아닌 정밀가공으로 설계되어 그 공차가 매우 작기 때문에 환경인자의 변화에 비해 무시할 수 있다고 판단되어 본 연구에서 설계변수의 분포

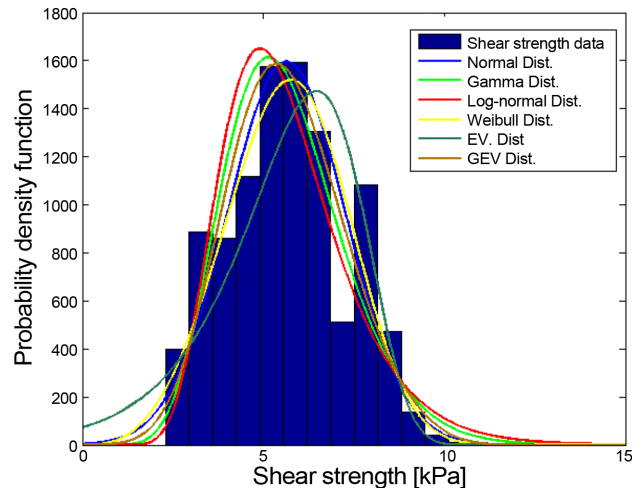


Fig. 5. Estimated distribution of shear strength data at 10 cm

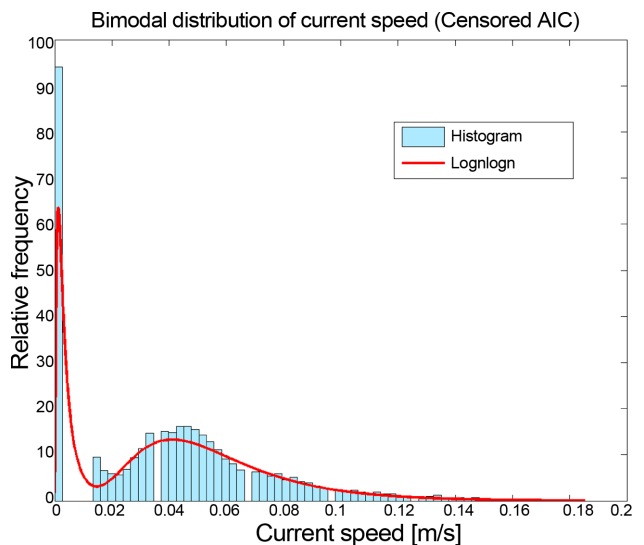


Fig. 6. Bimodal distribution of current speed using censored AIC

Table 3. Results of bimodal distribution estimation about current speed

Type	Distribution of X_{p1}	Parameters	Distribution of X_{p2}	Parameters
Censored AIC	Lognormal	$w = 0.2870$ $\alpha = -5.8162$ $\beta = 0.9385$	Lognormal	$w = 0.7130$ $\alpha = -2.9696$ $\beta = 0.4677$

는 고려하지 않는다. 환경변수는 데이터 기반이며 설계변수의 값이 변하더라도 변하지 않는 분포의 형태로서 선회비, 전단강도, 해류속도를 선정한다. 작동인자인 선회비는 주행특성을 고려하여 지수분포로 가정한다. 환경인자인 전단강도, 해류속도는 실측을 통하여 얻은 환경데이터의 비모수 추정을 통해 분포를 추정한다. 다음 Fig. 5는 10 cm에서의 전단강도에 대한 데이터를 나타냈다. 해류속도는 구간중도절단자료를 고려하여 추정된 결과를 Fig. 6에 나타냈고 추정된 분포의 통계적 정보를 Table 3에 나타냈다. 해류속도는 대수정규와 대수정규분포의 혼합모델인 바이모달 분포의 특성을 가지고 있다.

크리깅 대체모델의 구성

본 연구에서는 효율적인 신뢰성 해석을 수행하기 위해 대체모델 기법 중 크리깅 대체모델을 도입한다. 크리깅 대체모델의 예측능을 향상시키기 위하여 충진 실험계획법으로 알려진 최적 라틴방격법과 최소거리 최대화법을 혼용하여 사용한다(Lee et al. 2007). 최적 라틴방격법을 이용하여 설계 영역의 내부에 중첩 없이 고르게 충진시켜 초기 표본점을 생성했고 초기 표본점의 수는 2차 전역모델을 만들기 위한 최소 실험점 2배인 $2(n_d+1)(n_d+2) = 112$ 개로 크리깅 대체모델을 구성한다. 구성된 크리깅 대체모델의 정확성을 검증하기 위해, 순차적인 실험계획인 최소거리 최대화법을 이용하여 검증점을 추출하였다. 최적 라틴방격법의 특성상 각 설계변수 축의 모든 수준에 대하여 1개의 표본점을 얻기 때문에, 경계부근에도 1개의

표본점이 존재하여 충진성이 떨어진다. 따라서 설계 영역의 경계부 혹은 상대적으로 표본점이 밀도가 낮은 부분에 검증점을 추가하기 위하여 최소거리 최대화법을 이용하였다. 순차적 추가 표본점은 2차 전역모델을 만들기 위한 최소 실험점인 $(n_d+1)(n_d+2) = 56$ 개씩 추가했고 추가점의 해석 데이터와 크리깅 대체모델 예측값의 편차를 이용한 검증법으로서 R-square를 이용하여 정확성을 검증한다. 주행장치의 응답에 대한 크리깅 대체모델의 정확도를 Table 4에 나타냈다. 표본 수가 504개일 때 침하량, 슬립, 토크에 대한 R-square는 95% 이상을 만족하였고 주행장치의 응답에 대해 정확한 크리깅 대체모델을 구성하였다.

심해저 시험집광기의 신뢰성 기반 최적설계 정식화

신뢰성 기반 최적설계 정식화는 다음 식 (9)와 같다. 소비동력을 최소화 하는 것을 목적함수로 하며 소비동력은 토크와 주행속도의 함수로 표현된다. 제한조건은 자세 제어에 해당하는 성능인 침하량과 동력에 대한 성능인 슬립이며 이 두 제한조건을 요구 신뢰도를 99.9%를 만족시키는 것이다. 요구성능치는 각각 a_1 과 a_2 로 정의한다. 이러한 제한조건을 만족시키며 목적함수를 최소화시키는 설계변수를 찾는 문제로 정의된다. 여기서 설계변수 \mathbf{d} 는 장단비, 차량 접지 간격, 부력재 질량이고 실제 심해저 시험집광기의 제원을 기준으로 각 변수의 특성을 고려하여 설계영역을 정의하였다. 본 논문에서는 설계 영역의 하한치를 0으로, 상한치를 1로 정규화하여 표현하였다. 또한 환경변수 \mathbf{X} 로서 선회비, 전단강도, 해류속도를 고려하였다.

Table 4. Accuracy of kriging surrogate model according to the number of sampling

The number of sample	R-square		
	Sinkage	Slip	Torque
112	0.9551	0.8502	0.9513
168	0.9591	0.9278	0.9693
224	0.9477	0.9175	0.9887
280	0.9757	0.9497	0.9503
336	0.9619	0.9323	0.9806
392	0.9679	0.9378	0.9856
448	0.9700	0.9449	0.9841
504	0.9688	0.9573	0.9869

$$\text{Min}_{\mathbf{d}} c(\mathbf{d}) = \frac{\text{Torque}}{R} V_i$$

$$\text{s.t. } G_1(\mathbf{d}, \mathbf{X}) = \Pr[\text{Sinkage}(\mathbf{d}, \mathbf{X}) - a_1 \leq 0] \geq 0.999$$

$$G_2(\mathbf{d}, \mathbf{X}) = \Pr[\text{Slip}(\mathbf{d}, \mathbf{X}) - a_2 \leq 0] \geq 0.999 \tag{9}$$

where $\mathbf{d} = [d_1, d_2, d_3]$
 $\mathbf{X} = [X_1, X_2, X_3]$

심해저 시험집광기의 신뢰성 기반 최적설계의 결과

신뢰성 해석은 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation: MCS) 기법을 이용하여 신뢰도를 평가하였으며 상용소프트웨어로 알려진 MATLAB 2012a에 있는 민감도 기반 알고리즘인 순차이차계획법(Sequential Quadratic

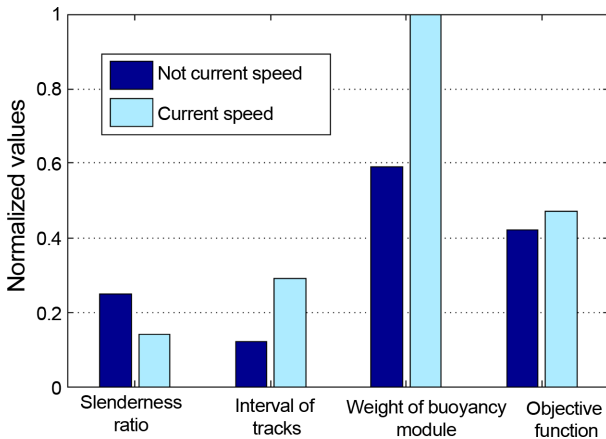


Fig. 7. Normalized optimum point and objective function

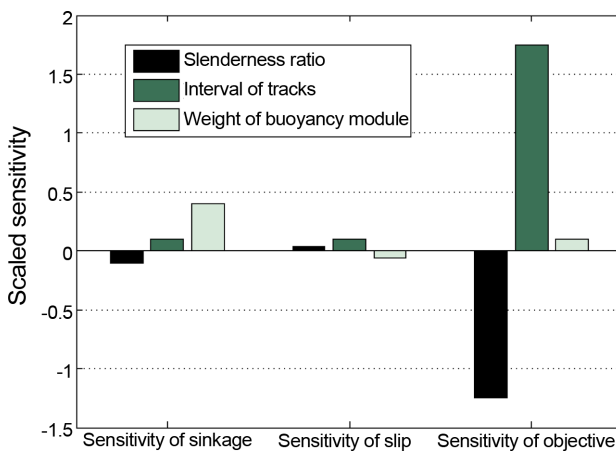


Fig. 8. Results of scaled sensitivity analysis

Programming: SQP)의 최적화 알고리즘을 통해 신뢰성 기반 최적설계의 최적점을 도출하였다. 요구 신뢰도인 99.9%를 모두 만족했으며 Fig. 7은 해류속도의 고려여부에 따른 최적점과 목적함수의 값을 나타낸 것이다. 해류속도의 고려여부에 따라 서로 다른 최적점이 도출되었고 목적함수는 해류속도의 영향으로 인해 고려하지 않은 경우보다 소비에너지가 약 9.9% 증가한 결과를 나타냈다. 기존 설계 대비 해류속도를 고려했을 때 부력재 질량과 차량 접지 간격은 증가하고 장단비는 감소한다. Fig. 8은 최적화 수행 후 최적점에서 설계변수들의 신뢰도에 대한 민감도 해석 결과를 보여준다. 결과를 통해 목적함수에 장단비와 차량 접지 간격이 영향을 미치고 주행성능인 침하량과 슬립은 각각 부력재 질량과 차량 접지 간격이 지배적으로 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 해저면의 진단강도, 해류속도, 선회비 등

과 같은 환경변수에 의해 영향을 받는 주행장치의 주행 안정성을 확보하기 위한 신뢰성 기반 최적설계를 수행하였다.

신뢰성 기반 최적설계를 수행하기에 앞서 환경변수들인 진단강도와 해류속도는 비모수 추정을 하고 선회비는 특성을 고려하여 분포를 가정하였다. 하지만 환경변수 중 해류속도는 심해저 환경에서 측정장비의 한계로 인해 일정 속도구간 이하에서 제대로 관측이 되지 않아 데이터의 정확한 실제 값을 알기 어렵다. 해류속도의 데이터 특성을 고려할 수 없는 기존의 추정방법은 측정한계 부근에 부정확한 데이터의 영향으로 응답에 대한 신뢰도의 예측을 정확하게 하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 해류속도의 데이터 특성을 고려할 수 있는 중도절단 아카이케 정보척도를 이용하여 정확한 통계적 정보를 얻고 이를 반영해 신뢰성 기반 최적설계를 수행하였다.

해류속도의 고려여부에 따른 최적설계를 수행하여 도출한 결과를 비교하였다. 두 설계 모두 요구 신뢰도인 99.9%를 만족하였고 목적함수인 소비에너지는 해류속도를 고려하지 않을 때보다 약 9.9%가 증가하였다. 설계변수는 기존 설계 대비 부력재 질량과 차량 접지 간격은 증가하고 장단비는 감소하였다.

지금까지는 구조물의 물성치나 작용 하중의 임의성을 보다 합리적으로 고려하기 위해 안전계수를 도입하여 설계의 신뢰성을 확보하였다. 향후에는 심해저 시험집광기와 같이 환경변수의 영향과 제작과정에서 발생하는 공차, 재료의 물성치의 변동 등 불확실성을 논리적인 확률 및 통계 이론을 적용하여 구조물의 안정성을 보다 정확하고 합리적으로 다룰 수 있는 신뢰성 기반 최적설계를 이용한다면 높은 신뢰도를 보장하는 설계를 진행할 수 있다. 또한 신뢰성 기반 최적설계에 사용되는 해류속도와 같은 환경분포가 중도절단된 특성을 보이는 심해환경의 데이터가 있다면 중도절단 아카이케 정보척도 기법을 이용하여 비교적 정확한 통계적 정보를 얻어낼 수 있다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 “심해저 광물 자원 통합 채광시스템 개발 연구(PMS2870)” 과제의 연구 결과 중 일부임을 밝힙니다.

참고문헌

Akaike H (1973) Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: Proceedings of the second international symposium on information theory, pp 267-281

- Choi JS, Hong S, Chi SB, Lee HB, Park CK, Kim HW, Yeu TK, Lee TH (2011) Probability distribution for the shear strength of seafloor sediment in the KR5 area for the development of manganese nodule miner. *Ocean Eng* **38**(17-18):2033-2041. doi:10.1016/j.oceaneng.2011.09.011
- Choi JS (2013) Reliability-based design on mobility of a tracked vehicle for deep-seabed mining. Ph.D. Thesis, Hanyang University, 113 p
- Choi SS (2014) Estimation of censored current speed data for reliability-based design optimization on mobility of deep-seabed test niner. M.S. Thesis, Hanyang University, 39 p
- Ditlevsen O, Madsen HO (2007) *Structural reliability methods*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, pp 263-299
- Lee TH, Jung JJ, Hong S, Kim HW, Choi JS (2007) Prediction for motion of tracked vehicle traveling on soft soil using kriging metamodel. *Int J Offshore Polar Eng* **17**(2):132-138
- Lim W, Lee TH (2012a) Reliability-based design optimization using Akaike information criterion for discrete information. *Trans Korean Soc Mech Eng A* **36**(8):921-927
- Lim W, Lee TH (2012b) Akaike information criterion-based reliability analysis for bimodal discrete information. *Trans Korean Soc Mech Eng A* **36**(12):1605-1612
- Hong S, Kim HW, Choi JS (2002) Transient dynamic analysis of tracked vehicles on extremely soft cohesive soil. In: *Proceedings of 5th ISOPE Pacific/Asia offshore mechanics symposium*. PACOMS-2002, Daejeon, Korea, ISOPE, pp 100-107
- Hong S, Kim HW, Choi JS, Yeu TK, Park SJ, Lee CH, Yoon SM (2010) A self-propelled deep-seabed miner and lessons from shallow water tests. In: *Proceedings of 29th ASME Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, China, OMAE2010-20313

Received Oct. 21, 2014

Revised Nov. 24, 2014

Accepted Dec. 16, 2014