

심해 잠음인자를 고려한 망간단괴 시험집광기의 채집운용시 주행장치 다구치 강건설계

조수길* · 이민욱* · 임우철* · 최종수*/** · 김형우** · 이창호** · 홍섭** · 이태희*

*한양대학교 대학원 자동차공학과

**한국해양연구원 해양시스템연구부

Taguchi Robust Design of Tracked Vehicle for Manganese Nodule Test Miner in Collecting Operation Considering Deep-sea Noise Factors

Su-gil Cho*, Minuk Lee*, Woochul Lim*, Jong-Su Choi*/**, Hyung-Woo Kim**,
Chang-Ho Lee**, Sup Hong** and Tae Hee Lee*

*Department of Automotive Engineering, Hanyang Univ., Seoul, Korea

**Ocean System Engineering Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Robust Design 강건설계, Taguchi Method 다구치 법, Deep-sea Manganese Nodule Miner 심해저 망간단괴 집광기

ABSTRACT: A deep-sea manganese nodule miner consists of 4 parts: the pickup device, crusher, disposal device, and tracked vehicle. The tracked vehicle is an essential component to keep the self-propelled miner moving across deep-sea soil. The performances of the tracked vehicle are influenced by noise factors: the shear strength of the seafloor, bottom current, seafloor slope, track speed, reaction forces of flexible hose, etc. It is necessary to adopt a robust design method that improves the performances and minimizes the variation caused by noise factors. Taguchi's method, the most widely known robust design method, searches for the robust optimum using an orthogonal array composed of the product of the inner array and outer array. In this paper, we propose a new screening technique to reduce the number of input factors and apply the MRSN (Multi-Response Signal to Noise) ratio to convert multiple performances into single one in order to overcome the difficulties and limitations of using Taguchi's method in a case with many input factors and multiple performances. A test miner was already designed and tested. It has about 1/10 the capacity of a commercial one and was successfully operated at an in-shore area. Taguchi's robust design was applied to the tracked vehicle of the test miner, and design improvements were implemented for the vehicle.

1. 서 론

심해저 망간단괴 집광시스템은 채집장치, 파쇄기, 주행장치, 송출장치 등으로 구성된다. 본 연구의 대상이 되는 주행장치는 해저 연약지반에서 운용되는 집광시스템에 부양성능과 견인성능을 확보하는 기능을 수행하는 장치로써, 무한궤도 방식의 자항식 시스템으로 운행된다. 이러한 무한궤도 주행장치의 성능은 해저면의 지형특성, 지반강도, 저층해류 등의 환경조건에 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 태평양 클라리온-클리퍼톤 (CCFZ : Clarion-clipperton fracture zone) 해역 내 우리나라의 심해저 광구인 KODOS 지역을 탐사하여 획득한 환경인자 분포를 고려한다(최종수 등, 2008a; Choi et al., 2011). 이 지역의 수심은 약 5,000m로서 현재까지의 심해 유전 개발수심의 2배에 달하며, 오랜 세월 동안 형성된 퇴적지반은 매우 연약하고 점착성이 높은 특징을 보임으로써 퇴적표층에 부존 되어있는 망간단괴의 상업적 생산의 관점에서 해결하기 매우 어려운 기술적 문제를 갖고 있다.

따라서 주행장치의 설계사양 결정시 이러한 환경조건에 대한 충분한 고려가 필요하다(Hong et al., 2002). 하지만 이와 같은 조건에서 원격제어와 통합운용이 필요한 심해저 집광기는 실제 실험을 수행하기에 매우 어려운 조건이므로 시뮬레이션 기법을 기반으로 개발되고 있다. 본 연구의 주행차량 시뮬레이션 기법은 해저 연약지반 강도, 해류, 경사도 등의 환경조건을 고려할 수 있는 3차원 비선형 해석 전산모델(TRACSIM)을 사용한다(Hong et al., 2002).

본 연구에서는 집광시스템 채집운용시 주행장치 성능을 최대화하도록 설계를 수행한다. 효율적인 운용을 위해 선회운동과 같은 급격한 방향전환이 포함된 운동은 최소화하고, 직진운동이 최대한 많이 수행되도록 주행경로가 설정될 것으로 판단된다. 이에, 채집운용시 주행장치는 좌우 트랙들간의 속도차가 없는 직진주행을 한다고 가정한다.

앞서 언급한 여러 환경조건을 고려한 강건설계기법을 본 연구에 도입한다. 강건설계는 확률론적(Stochastic) 관점에서 환경조건 변화에 대한 성능치의 분산을 최소화 할 수 있는 설계

교신저자 이태희: 서울시 성동구 행당동 17, 02-2220-0449, thlee@hanyang.ac.kr

본 연구는 2009년 거제도에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

변수 값을 구하는 설계방법으로 정의된다(Park et al., 2006). 즉, 강건설계는 외부 환경 조건의 변화에 둔감한 설계라고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 강건설계기법 중 가장 많이 사용되는 방법인 다구치법(Taguchi method)을 이용하여 강건설계를 수행한다. 다구치법은 변수를 제어인자와 잡음인자로 구분한다. 제어인자는 설계변수에 해당하며 잡음인자는 제어 불가능한 환경인자나 제품의 작동 시 변화하는 작동인자를 통칭한다. 제어인자에 대한 내측배열과 잡음인자에 대한 외측배열의 곱으로 직교배열표를 생성하고 제어인자와 잡음인자의 비율로 정의되는 SN(Signal to noise)비를 계산하여 이를 최소화함으로써 잡음인자에 둔감한 강건설계를 수행한다(Taguchi and Wu, 1980). 본 논문에서는 다구치 법에서 정의하는 제어인자, 잡음인자(환경인자와 작동인자)로써 변수를 표현한다.

심해저 망간단괴 집광기의 제어인자와 잡음인자는 다수가 존재하며, 그 주행성능 응답 또한 여러 개가 존재한다(최중수 등, 2004; 최중수 등, 2010). 이에, 다구치 강건설계에 직접 적용하면 제어인자와 잡음인자에 대한 직교배열표의 실험점 개수의 곱만큼 실험이 필요하기 때문에 계산비용이 기존의 설계기법보다 기하급수적으로 커지며, 응답을 로그값인 SN비로 정의하기 때문에 다중응답의 적용이 어렵다(Song et al., 1995). 본 논문에서는 스크리닝 기법을 통하여 중요 인자를 선정하고, 다중응답을 고려한 설계 기법을 적용하였다. 이 기법은 직접적으로 SN비를 계산하지 않고 품질손실(Quality loss)이라는 값을 도입하여 각 응답의 TNQL(Total normalized quality loss)을 구하고 이 값에 설계자가 선정한 각 응답의 중요도를 가중치로 설정하여 MRSN(Multi-response signal to noise)비를 구한다. MRSN비가 큰 값일수록 제어인자에 의한 응답특성이 좋으며 잡음인자에 의한 영향이 적은 설계를 할 수 있다(Tong et al., 1997). MRSN비를 이용하여 잡음인자의 변동에 강건한 제어인자의 최적 조합을 선정하였고, 현재 제작된 시험집광기(Hong et al., 2010)의 응답과 비교하여 제작된 시험집광기의 효용성과 향후 개선방향을 제시한다.

2. 연약지반 차량의 전산모델

심해저의 연약지반 위를 운행하는 주행차량에 대한 동역학해석은 강제모델을 기반으로 수행한다. 강제 동역학 모델은 실제모델을 하나의 강체로 가정하고 모델링하기 때문에 다물체 동역학 모델에 비해 수치해석 시간을 현저히 줄일 수 있다는 장점이 있다.

심해저 퇴적지반은 매우 연약하여 지반의 전단저항력이 전단변위에 따라 민감하게 변하는 비선형 특성을 가지고 있다. 따라서 올바른 지반 추진력을 산정하기 위해서는 트랙의 접지면에서 발생하는 전단변위의 분포가 정확하게 계산되어야 한다. 특히 전단변위는 수직침하를 발생시키고 수직침하는 다시 지면에 가해지는 접지압에 영향을 주기 때문에 이러한 실제 현상이 고려된 비선형 연약지반 모델이 사용된다.

본 연구에서 고려된 점착성 연약지반용 강제 동역학모델은 Fig 1과 같다. 여기서 L 은 트랙길이, B 는 트랙간격, D 는 트랙폭, h_c 는 무게중심의 높이, L_1 은 차량 전면부에서 무게중심까지의 거리를 나타낸다. 이외에 주행성능과 관련된 제어인자로 차량질량, 차

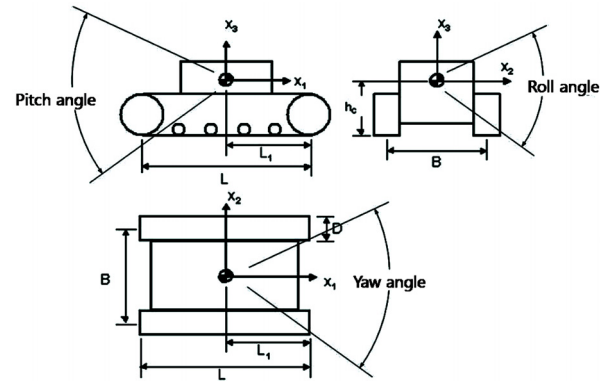


Fig. 1 Configuration and design factors of a tracked vehicle model

량질량 중심위치, 부력재질량, 부력재질량 중심위치 등이 있다.

트랙속도를 작동인자로 선정하였으며, 저충해류, 해저경사각, 해저면 전단강도 등을 환경인자로 선정하였다. 이러한 작동인자와 환경인자는 제어인자의 강건최적값을 구하는 강건설계에 있어, 제어가 불가능한 인자로서 잡음인자로 간주될 수 있다.

주행차량의 동적 응답은 주행 시 차량의 주행자세를 나타내는 피치 각(Pitch angle), 수직침하(Vertical sinkage) 등과 주행효율을 나타내는 좌우트랙의 슬립량(Slip)과 주행토크(Torque)가 있다. 전산모델의 응답은 과도응답이며 본 연구에서는 각 응답들의 대표 값으로 정상상태에서의 시간에 대한 평균값으로 선정한다.

3. 스크리닝 기법을 이용한 유의 인자 선정

심해저 집광기 주행모델은 잡음인자인 환경인자와 작동인자의 영향이 크기 때문에 많은 제어인자와 함께 잡음인자까지 고려해야 한다. 본 연구에서는 제어인자 및 응답에 영향을 미치는 잡음인자를 포함하여 총 13개의 인자를 선정하였다(최중수 등, 2008b). Table 1은 선정된 13개의 인자와 그 구분, 범위를 나타냈다. 이 중, 제어인자의 범위는 시험집광기의 설계제원을 기준 값으로 선정하였으며 기준값은 Table 1에서 볼드체로 나타내었다. 그리고 차량질량, 무게중심의 위치비, 단면적, 트랙간격 등의 제어인자는 구조의 제약조건 상 한쪽 변동만을 선정하였다. 다구치 강건설계에서는 제어인자의 내측배열과 잡음인자의 외측배열의 곱만큼 실험을 실시해야하기 때문에 선정된 13개의 인자를 모두 고려하는 것은 계산비용 측면에서 설계가 불가능 하다. 그러므로 본 연구에서는 효과적인 설계를 위해 스크리닝 기법을 이용하여 응답에 유의한 인자들을 선정한다. 13개의 인자에 대한 3수준의 직교배열표를 이용하여 응답에 대한 인자의 유의성을 알아본다. 직교배열표는 L81을 이용하였으며 분산분석(Analysis of variance)을 통해 인자의 유의성을 살펴보았다. 분산분석이란 특성치의 산포를 제곱함으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 요인 마다의 제곱함으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 인자를 선정하는 분석방법이다.

본 연구에서는 여러 가지의 응답을 동시에 고려해야 한다. 따

Table 1 Control factors, driven factor and environmental factors of tracked vehicle

No.		Factor	Unit	Low level	Medium level	high level	Deviation
1	C	Weight of track	ton	7.07	7.64	8.13	+15%
2	C	Position ratio of CG(X)		0.5	0.5125	0.525	-5%
3	C	Position ratio of CG(Y)	m	0.534	0.561	0.587	+10%
4	C	Contact area of track	m ²	3.41	3.52	3.63	-6%
5	C	Aspect ratio of track		0.283	0.333	0.383	±15%
6	C	Interval between left and right track	m	2.24	2.43	2.63	-15%
7	C	Weight of buoyancy	ton	1.23	1.39	1.54	-20%
8	C	Position ratio of CG(X) of buoyancy		0.44	0.489	0.538	±10%
9	C	Position ratio of CG(Y) of buoyancy	m	1.456	1.618	1.780	±10%
10	O	Track velocity	m/s	0.25	0.375	0.5	
11	E	Bottom current	m/s	0	0.0838	0.1836	
12	E	Seafloor slope	deg	2.524	6.6814	13.3628	
13	E	Shear strength of deep-sea bed	kPa	4.5	5.5	6.5	

C : Control factor O : Operation factor E : Environment factor

라서 각 응답마다 F분포를 이용하여 분산분석을 실시하고 유의 수준(95%)에 유의한 인자를 선정하였다. 선정된 인자와 그 과정은 Table 2에 나타났다. 스크리닝 기법을 통하여 총 13개의 인자 중 6개의 제어인자와 4개의 잠음인자가 선정되었다.

4. 심해 잠음인자를 고려한 다구치 강건설계

Table 2에서 선정한 제어인자와 잠음인자를 고려하여 다음 Table 3과 같은 직교배열표를 생성한다. 제어인자는 6인자 3수준의 L18 직교배열표를 사용하고, 잠음인자는 4인자 3수준의 L9 직교배열표를 사용한다. 잠음인자에 의해 외측배열이 존재하는 강건설계의 경우 내측배열과 외측배열 실험점 개수의 곱만큼 총 162번의 실험을 실시한다.

앞에 언급한 바와 같이 주행성능 평가를 위해 자세제어와 예

너지 효율에 관련된 여러 가지 응답을 고려해야 하기 때문에 일반적인 다구치 강건설계에 적용하기 어려움이 존재한다(Song et al., 1995). 그래서 본 논문에서는 다중응답을 고려한 다구치 강건설계 기법을 적용하였다. 이 기법은 직접적으로 SN비를 계산하지 않고 품질손실이라는 값을 도입한다. 이는 SN 비와 같은 잠음 대비 신호의 비라는 개념을 가지고 있지만 로그 값을 취하지 않는 점에서 차이가 있다. 이러한 품질손실에서 각 응답의 TNQL (Total normalized quality loss)을 구하고 이 값에 설계자가 선정한 각 응답의 중요도를 가중치로 설정하여 MRSN비를 구한다. MRSN비가 큰 값일수록 제어인자에 의한 응답특성이 좋으며 잠음인자에 의한 영향이 적은 설계를 할 수 있다(Tong et al., 1997). 사용된 수식은 식 (1)과 같다.

$$L_{ij} = k \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} y_{ijk}^2 \quad : \text{The smaller-the-better response} \quad (1)$$

Table 2 Proposed screening technique for multi-response system

No.	Factor	Pitch	Sinkage	Slip	Torque	Selected variables
1	Weight of track		O		O	O
2	Position ratio of CG(X)	O	O			O
3	Position ratio of CG(Y)					
4	Contact area of track		O	O		O
5	Aspect ratio of track		O			O
6	Interval between left and right track					
7	Weight of buoyancy	O	O	O		O
8	Position ratio of CG(X) of buoyancy	O	O			O
9	Position ratio of CG(Y) of buoyancy					
10	Track velocity		O	O	O	O
11	Bottom current			O	O	O
12	Seafloor slope	O		O	O	O
13	Shear strength of deep-sea bed		O	O		O

Table 3 Taguchi orthogonal inner and outer array

		Outer array									
	Array	L01	L02	L03	L04	L05	L06	L07	L08	L09	
	Array	Pattern	0000	0112	0221	1011	1120	1202	2022	2101	2210
Inner array	L01	000000	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	L02	111111	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	L03	222222	19	.	.	.	.	.	.	.	27
	L04	001212	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	L05	112020	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	L06	220101									
	L07	010221									
	L08	121002									
	L09	202110					~				
	L10	022011									
	L11	100122									
	L12	211200	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	L13	012102	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	L14	120210	118	.	.	.	.	.	.	.	126
	L15	201021	127	128	.	.	.	.	.	134	135
	L16	021120	136	137	138	139	140	141	142	143	144
	L17	102201	145	146	147	148	149	150	151	152	153
	L18	210012	154	155	156	157	158	159	160	161	162

Table 4 Quality loss and MRSN ratio of orthogonal array

No.	Weight of track	Position ratio of CG(X)	Area of track	Aspect ratio of track	Weight of buoyancy	Position ratio of CG(X) of buoyancy	Quality loss				MRSN ratio
							Pitch	Sinkage	Slip	Torque	
							0.7	1	1	0.5	
L01	0	0	0	0	0	0	0.203	0.009	0.330	2.187	-2.551
L02	1	1	1	1	1	1	0.177	0.011	0.365	2.358	-2.896
L03	2	2	2	2	2	2	0.164	0.013	0.442	2.560	-3.381
L04	0	0	1	2	1	2	0.349	0.007	0.460	2.451	-3.566
L05	1	1	2	0	2	0	0.120	0.008	0.258	2.140	-1.689
L06	2	2	0	1	0	1	0.085	0.023	0.446	2.480	-3.923
L07	0	1	0	2	2	1	0.193	0.007	0.438	2.168	-2.773
L08	1	2	1	0	0	2	0.149	0.013	0.322	2.326	-2.735
L09	2	0	2	1	1	0	0.199	0.014	0.379	2.625	-3.416
L10	0	2	2	0	1	1	0.128	0.006	0.238	2.014	-1.181
L11	1	0	0	1	2	2	0.368	0.012	0.467	2.606	-4.109
L12	2	1	1	2	0	0	0.126	0.019	0.524	2.654	-4.072
L13	0	1	2	1	0	2	0.240	0.006	0.314	2.292	-2.422
L14	1	2	0	2	1	0	0.065	0.014	0.446	2.176	-2.975
L15	2	0	1	0	2	1	0.265	0.015	0.382	2.643	-3.726
L16	0	2	1	1	2	0	0.084	0.006	0.275	1.907	-1.133
L17	1	0	2	2	0	1	0.285	0.011	0.470	2.692	-3.787
L18	2	1	0	0	1	2	0.243	0.020	0.449	2.719	-4.269

$$TNQL_j = \sum_{i=1}^m w_i \frac{L_{ij}}{L_i^*} \quad (2)$$

$$MRSN_j = -10 \log(TNQL_j) \quad (3)$$

여기서 L_{ij} 는 i 번째 응답에서 j 번째 내측배열의 품질 손실을 나타내며, y_{ijk} 는 i 번째 응답, j 번째 내측배열에서 k 번째 반복실험의 값을 나타낸다. n_i 는 i 번째 응답의 반복실험 횟수를 나타내며, k 는 품질 손실의 계수이다. 또한 L_i^* 는 i 번째 응답에서 생성된 j 번째까지의 내측배열 중 최대값을 나타내고 w_i 는 응답간의 가중치를 나타내는 값이다. 한편, 식 (2)과 식 (3)은 각각 j 번째 내측배열의 TNQL과 MRSN을 나타낸다.

계산된 MRSN비를 이용하여 잠음인자에 강건한 제어 가능한 인자의 조합, 즉 제어인자의 최적 조합을 선정하였다. Table 4는 내측배열에 따른 제품 손실과 MRSN 비를 나타내었고 L16 배열에서 가장 개선된 조합이 생성되었다. MRSN 비를 이용해 다시 분산분석을 실시한 결과는 Table 5와 같다. 분산분

석을 통해 Table 6과 같은 최적 조합을 얻을 수 있었고, 이 조합은 직교 배열표에 없는 조합이기 때문에 새로운 실험을 수행하여 Table 7과 같이 MRSN 비의 평균값과 각 응답의 평균, 분산을 비교하였다. 최적값은 전체평균 대비 평균과 분산이 각각 38.5%, 46.2% 향상되었음을 확인할 수 있었다. 또한 기존에 설계되었던 시험집광기의 성능에 비해 평균과 분산이 각각 7%, 2.4% 향상되었음을 확인할 수 있었다. 응답 중 Pitch의 경우 최적해의 평균은 기존의 시험집광기의 평균에 비해 우수한 성능이지만 분산의 경우 기존의 시험집광기가 더 우수함을 알 수 있다. 이는 다구치 강건설계가 분산을 최소화하는 설계이지만 평균과 분산을 가중합하여 고려하기 때문에 다음과 같은 상충작용(Trade-off)이 발생한 것으로 생각된다.

5. 결 론

제어인자와 잠음인자가 다수 포함되어 있는 심해저 시험 집

Table 5 ANOVA (Analysis of variance) of design factors

Factor	Degree of freedom	Level			Sum of square	Mean of square sum	Contribution (%)	F ratio	p-value
		0	1	2					
Weight of track	2	-2.271	-3.032	-3.798	6.994	3.497	44.30	279.01	1E-13
Position ratio of CG(X)	2	-3.526	-3.020	-2.555	2.831	1.416	17.93	112.94	1.52E-10
Contact area of track	2	-3.433	-3.021	-2.646	1.861	0.931	11.79	74.24	3.98E-09
Aspect ratio of track	2	-2.692	-2.983	-3.426	1.638	0.819	10.38	65.34	1.05E-08
Weight of buoyancy	2	-3.248	-3.051	-2.802	0.6017	0.301	3.81	23.98	1.13E-05
Poistion ratio of CG(X) of buoyancy	2	-2.639	-3.048	-3.414	1.801	0.901	11.41	71.85	5.1E-09
Error	5				0.063	0.013			
Total	17				15.789				

Table 6 Comparison between designed test miner and optimum conditions of Taguchi robust design

	Weight of track	Position ratio of CG(X)	Area of track	Aspect ratio of track	Weight of buoyancy	Poistion ratio of CG(X) of buoyancy
Designed test miner	0	2	2	1	2	1
Optimum	0	2	2	0	2	0

Table 7 Optimum result

Estimation	Average				Deviation			
	Pitch [deg]	Sinkage [m]	Slip [%]	Torque [kN/m]	Pitch [deg]	Sinkage [m]	Slip [%]	Torque [kN/m]
Total average	-0.0688	0.0324	0.00185	0.4578	0.2381	0.0167	0.00105	0.239
Designed test miner	-0.1912	0.0211	0.00150	0.4176	0.1187	0.0109	0.00089	0.235
Optimum	-0.3259	0.0202	0.00136	0.4026	0.1643	0.00922	0.000825	0.233
Improvement(%)		38.5				46.2		

광기 주행장치의 강건설계를 수행하였다. F분포를 이용하여 다중응답을 가진 문제의 스크리닝을 수행하였고 13개의 인자 중 6개의 제어인자와 4개의 잡음인자를 유의인자로 선정하였다. 또한 제어인자(설계변수)와 잡음인자(환경인자와 작동인자)를 구분하여 내측배열과 외측배열이 있는 직교배열표를 생성하였고 이를 이용하여 다중응답을 고려한 다구치 강건설계를 수행하였다. 다구치 강건설계를 통해 환경변화에 강건한 심해저 시험 집광기 제어인자의 최적 조합을 선정하였고 평균과 분산 모두 약 30% 이상의 개선효과가 나타났다. 선정된 조합은 차량질량이 가볍고 차량 무게중심의 위치가 앞쪽에 있으며, 단면적은 크고 최적의 장단비를 도출하였고, 부력재 질량이 크며, 부력재 무게중심의 위치가 뒤쪽에 있는 조합이다. 이를 기존에 설계된 시험집광기의 제원과 비교하였을때 장단비와 부력재의 무게중심의 위치를 제외하고 모두 일치함을 알 수 있다. 그러므로 본 논문을 통하여 현재 설계된 시험집광기는 차량안정성과 에너지 효율 측면에서 잘 설계되었다고 볼 수 있고, 향후 시험집광기의 성능을 개선하기 위하여 장단비와 부력재 무게중심의 위치비를 변경할 필요가 있다고 판단된다. 하지만 장단비는 선회주행에서 매우 큰 영향을 주는 제어인자라고 판단되기 때문에 향후 선회주행을 고려한 강건설계를 수행하여 장단비를 고려해야 한다.

후 기

본 논문은 국토해양부 특정연구과제인 "심해저 광물자원 집광시스템 및 채광운용기술 개발" 과제의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구에 대해 전폭적으로 지원해주신 국토해양부 관계자들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Choi, J.S., Hong, S., Chi, S.B., Lee, H.B., Park, C.K., Kim, H.W., Yeu, T.K. and Lee, T.H. (2011). "Probability Distribution for The Shear Strength of Seafloor Sediment in The KR5 Area for The Development of Manganese Nodule Miner", *Ocean Engineering*, doi:10.1016/j.oceaneng.2011.09.011, pp 2033-2041.
- Hong, S., Kim, H.W. and Choi, J.S. (2002). "Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive Soil", *Proc. of 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Sym. PACOMS-2002*, Daejeon, Korea, ISOPE, pp 100-107.
- Hong, S., Kim, H.W., Choi, J.S., Yeu, T.K., Park, S.J., Lee, C.H. and Yoon, S.M. (2010). "A Self-propelled Deep-seabed Miner and Lessons from Shallow Water Test", *Proc. of 29th ASME Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Shanghai, China, OMAE2010-20313.
- Park, G.J., Lee, T.H., Lee, K.H. and Hwang, K.H. (2006). "Robust Design: An Overview", *AIAA Journal*, Vol 44, No 1, pp 181-191.
- Song, A.A., Mathur, A. and Pattipati, K.R. (1995). "Design of Process Parameters Using Robust Design Techniques and Multiple Criteria Optimization", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol 25, No 11, pp 1437-1446.
- Taguchi G. and Wu Y. (1980). *Introduction to Off-Line Quality Control*, Central Japan Quality Control Association (available from American Supplier Institute, 32100 Detroit Industrial Expressway, Romulus, MI 48174).
- Tong, L.I., Su, C.T. and Wang, C.H. (1997). "The Optimization of Multi-response Problems in The Taguchi Method", *International Journal of Quality&Reliability Management*, Vol 14, No 4, pp 367-380.
- 최중수, 여태경, 김형우, 박성재, 윤석민, 홍섭 (2010). "심해저 망간단괴 시험집광기의 근해역 집광성능 분석", *Ocean and Polar Research*, 제32권, 4호, pp 463-473.
- 최중수, 이태희, 홍섭, 고영탁, 지상범, 신희열, 김형우, 여태경 (2008a). "심해저 망간단괴 집광기 주행장치의 강건최적설계를 위한 북동태평양 KODOS 지역 환경인자의 통계 분석", *한국해양공학회 2008년도 추계학술대회 논문집*, pp 283-286.
- 최중수, 홍섭, 김형우, 여태경, 이태희 (2008b). "공리적 설계를 적용한 심해저 망간단괴 집광시스템의 설계평가", *한국해양학회지*, 제13권, 3호, pp 246-251.
- 최중수, 홍섭, 김형우, 이태희 (2004). "직교배열표 실험계획법에 의한 심해 연약지반용 무한궤도차량의 견인성능에 대한 실험적 연구", *Ocean and Polar Research*, 제26권, 2호, pp 333-339.

2011년 11월 25일 원고 접수

2012년 1월 9일 심사 완료

2012년 2월 13일 게재 확정