

반응표면법에 의한 연약지반 차량 거동의 통계적 분석 및 예측

이태희* · 정재준* · 홍섭** · 김형우** · 최종수**

*한양대학교 기계공학부

**한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

Statistical Analysis and Prediction for Behaviors of Tracked Vehicle Traveling on Soft Soil Using Response Surface Methodology

TAE-HEE LEE*, JAE-JUN JUNG*, SUP HONG**, HYUNG-WOO KIM** AND JONG-SU CHOI**

*Hanyang University, School of Mechanical Engineering, Seoul, Korea

**Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Deep-sea ocean mining system 심해저 채광 시스템, Self-propelled mining system 자항식 채광 시스템, Rigid body model of tracked vehicle 무한궤도형 주행차량의 강체모델, Response surface methodology 반응표면법

ABSTRACT: For optimal design of a deep-sea ocean mining collector system, based on self-propelled mining vehicle, it is imperative to develop and validate the dynamic model of a tracked vehicle traveling on soft deep seabed. The purpose of this paper is to evaluate the fidelity of the dynamic simulation model by means of response surface methodology. Various statistical techniques related to response surface methodology, such as outlier analysis, detection of interaction effect, analysis of variance, inference of the significance of design variables, and global sensitivity analysis, are examined. To obtain a plausible response surface model, maximum entropy sampling is adopted. From statistical analysis and prediction for dynamic responses of the tracked vehicle, conclusions will be drawn about the accuracy of the dynamic model and the performance of the response surface model.

1. 서 론

최근 선진국을 중심으로 해양 자원의 독자적인 개발 기술을 확보하여 육상 광물자원의 고갈 문제를 대비하고 장차 도래할 해양자원의 개발 경쟁에서 유리한 위치를 선점하려는 움직임이 구체화되고 있다. 특히 하이테크 산업의 필수 원자재인 니켈, 구리, 코발트 등을 다량 포함하고 있는 망간단괴(Manganese nodule) 개발 사업은 전략금속의 안정적인 공급과 해저 광물 자원의 채광 기술 확보 그리고 해양산업의 큰 파급효과로 인해 그 중요성이 점차 증대되고 있다.

망간단괴는 대부분 3000~5000m의 심해저에 부존해 있기 때문에 이것을 효율적으로 채취하기 위해서는 심해저의 특수한 환경에 적합한 채광시스템을 개발하는 것이 필요하다. 현재 연구되고 있는 채광시스템은 각각 집광시스템(Collector system), 양광시스템(Lifting system), 해상플랫폼 Ocean platform)의 세 가지 모듈화된 시스템으로 구성된 자항식 채광시스템(Self-propelled mining system)이 주종을 이루고 있다. 집광시스템은 심해저의 연약지반 위를 운행하면서 망간단괴를 모으고, 집광된 망간단괴는 분쇄를 거쳐 양광시스템에 의해 해상으

로 이송된다.

집광시스템은 심해저의 연약지반 위를 운행하면서 망간단괴를 모으고, 집광된 망간단괴는 분쇄를 거쳐 양광시스템에 의해 해상으로 이송된다. 해상플랫폼은 분쇄된 망간단괴를 모으고 전체 위치를 이동시키면서 각 시스템을 유기적으로 제어하는 제반 기능을 담당한다.

이러한 자항식 채광시스템에서 집광시스템은 채집기(Pick-up device), 분쇄기, 송출펌프 등이 탑재된 무한궤도형 주행차량(Tracked vehicle)으로써 전단강도가 매우 낮은 심해저의 점착성 지반 위를 운행한다. 따라서 신뢰성과 안정성이 확보된 집광시스템의 설계는 소비 동력을 최소화하면서 집광효율을 높이는 채광시스템 개발의 선결과제라 할 수 있다. 특히 주행차량의 우수한 주행성능은 망간단괴의 집광 효율에 직접적인 영향을 주기 때문에 무한궤도차량의 주행성능에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

Hong과 Choi(2001)는 그라우저(Grouser)의 형상 설계변수들이 주행차량의 견인력과 슬립침하에 미치는 영향을 실험적으로 밝혔고, 최종수 등(2004)은 직교배열(Orthogonal array) 실험으로 주행차량의 견인성능에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 김형우 등(2004)은 점착성 연약지반 주행차량의 동적거동을 해석적으로 예측하기 위한 다물체 동역학모델과 강체모델의 결과를 비교하였다.

교신저자 이태희: 서울특별시 성동구 17번지

02-2290-0449 tleee@hanyang.ac.kr

본 연구에서는 무한궤도형 주행차량의 전산모델에 대한 통계적 분석을 통해 전산모델의 타당성을 검증하고, 주행차량의 초기설계를 위한 기본 설계정보를 도출한다. 이를 위해 반응표면법(Response surface methodology)을 이용한 응답의 이상치 분석(Outlier analysis), 설계변수들 간의 상호관련성 검출, 설계변수의 상대적 유의성(Significance) 파악, 그리고 전역민감도(Global sensitivity) 해석 등이 수행된다. 우수한 반응표면모델을 얻기 위해 최대엔트로피 샘플링(Maximum entropy sampling)이 실험계획법(Design of experiment)으로 채택되었고 (Shewry and Wynn, 1987), 추가적인 전산실험의 결과를 이용하여 반응표면모델의 예측성능을 검증하였다.

2. 연약지반 차량의 전산모델

심해저의 연약지반 위를 운행하는 주행차량에 대한 동역학해석은 강체모델을 기반으로 수행되었다 (김형우 등, 2004). 강체 동역학모델은 실제모델을 하나의 강체로 가정하고 모델링하기 때문에 다물체 동역학모델에 비해 수치해석 시간을 현저히 줄일 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서 고려된 점착성 연약지반용 강체 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. 주행성능과 관련된 추가적인 설계변수로 무게 W 와 트랙속도 V_t 가 있다. 주행차량의 동적응답은 직진주행 시 수직침하(Vertical sinkage), 슬립(Slip), 그리고 차량의 전·후면으로 기울어진 각을 나타내는 피치각(Pitch angle) 등이 있으며 정상상태에서의 시간에 대한 평균값을 취하였다.

심해저 퇴적지반은 매우 연약하여 지반의 전단저항력이 전단변위에 따라 민감하게 변하는 비선형 특성을 가지고 있다. 따라서 올바른 지반 전단력을 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 연약지반 모델이 사용되었다.

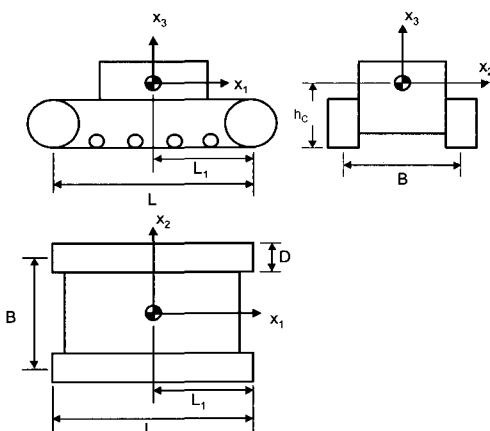


Fig. 1 Configuration of tracked vehicle model

3. 반응표면법

반응표면법은 설계변수와 응답함수 사이의 관련성을 규수학적인 함수로 가정하고, 측정된 데이터로부터 가정된 함수의 계수를 최소자승법으로 추정한 뒤, 구해진 반응표면모델을 유용하게 이용하는 일련의 과정이다 (Neter et al., 1996). 본 연구에서는 다음과 같은 2차 반응표면모델이 사용되었다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n_d} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{n_d} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n_d} \sum_{j \neq i} \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

여기서 x_i 는 설계변수, n_d 는 설계변수의 개수, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 는 최소자승법으로 추정되어야 할 미지의 계수이다.

최소자승법을 이용하여 잔차(Residual)의 제곱합을 최소로 하는 반응표면모델 계수를 구하면 다음과 같다.

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{X} 는 실험점으로 구성되는 설계행렬(Design matrix)이고 \mathbf{Y} 는 응답벡터이다.

3.1 수정 결정계수

반응표면모델을 생성하면 구해진 반응표면모델이 실제 데이터의 변화 특성을 얼마나 잘 반영하고 있는지를 검증해야한다. 이것은 분산분석으로 얻어진 총변동(Total sum of squares)에 대한 회귀제곱합(Regression sum of squares)의 비를 의미하는 결정계수(Coefficient of determination) R^2 ($0 \leq R^2 \leq 1$)을 통해서 알 수 있다. 그런데 결정계수는 n_β 를 증가시키면 데이터의 예측성능과 관계없이 R^2 이 증가하는 특성이 있으므로 이러한 문제점을 해결하기 위해 다음과 같은 수정 결정계수(Adjusted coefficient of determination)가 사용된다.

$$R_a^2 = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n-1}{n-n_\beta} \right) \quad (3)$$

여기서 n 은 반응표면모델을 생성하기 위해 사용된 데이터의 개수이고, n_β 는 미지수의 개수이다. 이때 수정 결정계수는 반응표면모델이 정확할수록 1에 가까운 값을 갖고, 모델의 정확성이 떨어질수록 0에 가까운 값을 갖는다.

3.2 이상치 분석

반응표면모델을 구성하는 데이터들 중에는 종종 특이하거나 극단적인 관측값을 갖는 경우가 있다. 이러한 데이터를 이상치(Outlier)라고 하며 이 값들은 관측된 데이터들로부터 동떨어져 있기 때문에 잔차가 큰 경향이 있고 반응표면모델의 적합과정에서 모델을 왜곡시킬 가능성이 있다. 이러한 데이터는 다음 식과 같은 스튜던트화제외잔차(Studentized deleted residual)를 이용하여 구별해낸다(Neter et al., 1996).

$$t_i = e_i \left(\frac{n-n_\beta-2}{SSE(1-h_{ii})-e_i^2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

여기서 SSE 는 모든 데이터를 이용하여 적합시킨 반응표면모델의 오차제곱합(Error sum of squares)이고, h_{ii} 는 헤트행렬(Hat matrix) $H = X(X^T X)^{-1}X^T$ 의 i 번째 대각원소, 그리고 e_i 는 잔차를 나타낸다. 스튜던트화제외잔차는 개념적으로 제외잔차(Deleted residual)를 이것의 추정된 표준편차로 나눈 값이다. 여기서 제외잔차란 i 번째 데이터를 제외한 나머지 데이터들로 반응표면모델을 생성한 뒤, 이 모델의 예측값과 i 번째 관측값과의 차이를 말한다. 만약 i 번째 데이터가 이상치라면 i 번째 데이터의 제외잔차는 이 데이터를 포함해서 생성한 반응표면모델의 i 번째 잔차보다 현저히 커지는 경향이 있다. 왜냐하면 i 번째 제외잔차는 i 번째 데이터를 제외하고 반응표면모델을 적합시킨 결과 이 데이터의 영향을 받지 않기 때문이다. 따라서 n 개의 데이터에 대해서 스튜던트화제외잔차를 구한 뒤, 그 절대값이 큰 데이터를 이상치로 간주할 수 있다. 식 (4)는 매번 새로운 반응표면모델을 생성하는 번거로움을 피하기 위해 모든 데이터로 생성한 반응표면모델의 오차제곱합, 헤트행렬값, 그리고 잔차로 변환한 식이다. 이때 스튜던트화제외잔차는 자유도 $n - n_\beta - 2$ 를 가지는 t-분포를 따르기 때문에 본페로니(Bonferroni) 기각값 $t_{(n-n_\beta-2,\alpha/2n)}$ 이 사용되었다.

3.3 설계변수들의 유의성 판별

반응표면모델은 응답함수와 설계변수의 관계가 다항식의 형태로 표현될 수 있다고 가정하고, 주어진 차수(Order)에 대해 고려될 수 있는 모든 조합을 사용한다. 이러한 변수들 중에는 응답함수의 변동을 표현하는데 의미가 있는 변수도 있고, 그렇지 않은 변수도 있다. 따라서 실제로 유의한 설계변수들을 판별하기 위해 다음 식과 같은 추정된 계수의 t-통계량이 사용된다.

$$t^* = \frac{b_i}{\sigma\{b_i\}} \quad (5)$$

여기서 b_i 는 최소자승법에 의해서 추정된 β_i 의 추정치이며, $\sigma\{b_i\}$ 는 추정된 계수 b_i 의 표준편차이다. 반응표면모델에서 계수의 표준편차 $\sigma\{b_i\}$ 가 작을수록 그 값과 모델이 주는 신뢰도는 높아진다. 또한 식 (1)에서 계수의 추정치 b_i 가 상대적으로 큰 항은 다른 항에 비해 응답의 변동에 대한 영향도가 크다. 따라서 t-통계량은 계수의 표준편차와 역수의 관계가 있고 계수의 추정치와는 비례 관계에 있으므로 t-통계량이 클수록 그 변수는 반응표면모델에 포함시켜야 하는 유의한 변수가 된다.

3.4 설계변수들 간의 상호 관련성 파악

반응표면모델을 나타내는 식 (1)에서 $x_i x_j$ 와 같은 교호작용(Interaction)은 설계변수들의 상호 관련성을 나타낸다.

설계변수들 간의 교호작용의 존재 여부는 Fig. 2와 같은 교호작용 그림에서 확인할 수 있다.

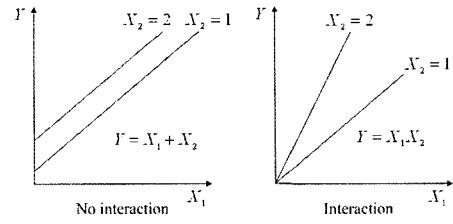


Fig. 2 Interaction plots between design variables

Fig. 2에서 교호작용이 없으면 응답과 설계변수 간의 합법칙(Additive rule)이 성립하기 때문에 두 직선은 나란하게 나타난다. 반대로 설계변수들 사이에 교호작용이 존재하면 설계변수에 대한 응답의 기울기는 서로 나란하지 않은 형태로 나타난다.

3.5 설계변수의 변화에 따른 응답함수의 변화 경향성

반응표면모델은 설계변수의 변화에 따른 응답함수의 전역적인 변화 경향성, 즉 전역 민감도에 대한 정보를 제공한다. 이러한 정보는 각 설계변수에 대해서 동일한 수준(Level)의 응답에 대한 평균을 구함으로써 얻어진다.

전역민감도 정보는 설계변수들 간의 상충관계(Trade-off)를 명확하게 파악하는데 활용될 수 있을 뿐 아니라 설계개선을 위한 설계정보로써 사용될 수 있다.

4. 반응표면법에 의한 연약지반 차량 거동의 통계적 분석

반응표면모델을 이용하여 연약지반용 전산모델에 대한 효과적인 분석을 수행하기 위해서는 전산모델의 응답특성을 정확하게 반영할 수 있는 반응표면모델을 생성하는 것이 필수적이다. 이를 위해서는 설계영역 전반의 다양한 응답 특성을 고려할 수 있는 전산 실험계획이 수행되어야 한다.

전산모델의 응답은 실제 물리적인 실험과 달리 같은 입력에 대해서 항상 동일한 값을 주는 결정적(Deterministic)인 특성이 있다. 따라서 랜덤오차의 영향을 줄이기 위해 개발된 직교배열이나 중심합성계획법(Central composite design) 등과 같은 기준의 실험계획법은 전산 실험에서는 적합하지 않다.

본 연구에서는 설계영역을 실험점들로 고르게 채우는 최대 엔트로피 샘플링(Maximum entropy sampling)이 적용되었다. 최대엔트로피 샘플링은 자연계의 무질서도 개념과 유사하게 엔트로피가 클수록 실험점들이 설계영역에 고르게 분포된다는 원리를 이용한 샘플링 방법이다. 최대엔트로피 샘플링에서는 전산 실험점들의 공간적인 상관관계(Spatial correlation)를 표현하는 상관행렬의 행렬식(Determinant)을 엔트로피로 정의하고 이것을 최대화한다. 만약 전산 실험점들이 겹치면, 그 행렬식은 특이행렬이 되어 행렬식이 0이 되지만 고르게 분포된 실험점들에 대해서는 최대 1의 값을 갖는다.

본 연구에서는 최대엔트로피 샘플링을 바탕으로 연약지반 차량의 전산모델에 대한 108번의 동역학 해석이 수행되었다. 여기서 108개의 전산 실험횟수는 7개의 설계변수를 가지고 2

차 반응표면모델을 만들기 위한 최소한의 실험수 36의 3배에 해당한다. 이러한 실험횟수는 7인자 2수준의 전조합설시법(Full factorial design)으로 실험할 경우의 $2^7 = 128$ 과 비교해 볼 때 적절한 샘플링 개수로 판단된다.

상용 통계프로그램인 JMP 5.0을 사용하여 반응표면모델을 생성한 결과, 수직침하, 슬립, 피치각에 대한 수정 결정계수 R_a^2 가 각각 0.8289, 0.7598, 0.8467로 나왔다. 슬립에 대한 반응표면모델이 응답의 변동을 효과적으로 표현하지 못하는 것으로 판단되어 이상치 분석을 수행하였다. 본페로니 양측검증에 의해 95% 신뢰수준에서 13, 101, 108, 1, 57, 87번의 데이터들이 차례대로 이상치로 판명되었다. 6개의 이상치 데이터를 제거하고 반응표면모델을 생성한 결과 Table 1과 같은 정확성이 향상된 반응표면모델이 얻어졌다. Table 1은 이상치를 제거한 2차 반응표면모델이 세 개의 응답에 대해서 데이터 변동의 약 95.9% 이상을 설명할 수 있는 정확한 모델임을 나타낸다.

Table 2는 이상치로 판별된 데이터를 순차적으로 제외시켜 가면서 총 4번의 반응표면모델을 생성하고 슬립에 대한 스튜던트화제외잔차와 본페로니 기각값을 나타낸 것이다. 각 데이터의 스튜던트화제외잔차가 본페로니 기각력의 기준값보다 크므로 선택된 6개의 실험점은 95%신뢰도에 대해서 이상치로 판단할 수 있다.

Fig. 3의 좌측과 우측의 그림은 각각 피치각, 슬립, 수직침하의 반응표면모델값에 대한 실제값의 산점도를 나타낸 것이다. 여기서 좌측은 이상치를 포함한 반응표면모델에 대한 산점도이고, 우측은 이상치가 제거된 반응표면모델에 대한 산점도를 나타낸다. 직선은 반응표면모델과 실제 시뮬레이션 결과가 일치하는 선을 나타내는 것으로 데이터들이 이 직선 위에 많이 분포할수록 모델은 정확하다는 의미를 갖는다.

Table 1 Comparison between RSM included outliers and improved RSM without outliers

| | RSM included outliers | RSM without outliers |
|------------------|-----------------------|----------------------|
| | R_a^2 | R_a^2 |
| Vertical sinkage | 0.8289 | 0.9598 |
| Slip | 0.7598 | 0.9792 |
| Pitch angle | 0.8467 | 0.9793 |

Table 2 Comparison between studentized deleted residual and Bonferroni critical value

| Number of simulation | Studentized deleted residual $ t_i $ | Bonferroni critical value $t_{(n - n_g - 2, \alpha/2n)}$ |
|----------------------|--------------------------------------|--|
| 13 | 6.0713 | 3.6744 |
| 101 | 7.1391 | 3.6744 |
| 108 | 7.1135 | 3.6740 |
| 1 | 3.7020 | 3.6739 |
| 57 | 9.7951 | 3.6739 |
| 87 | 4.8408 | 3.6737 |

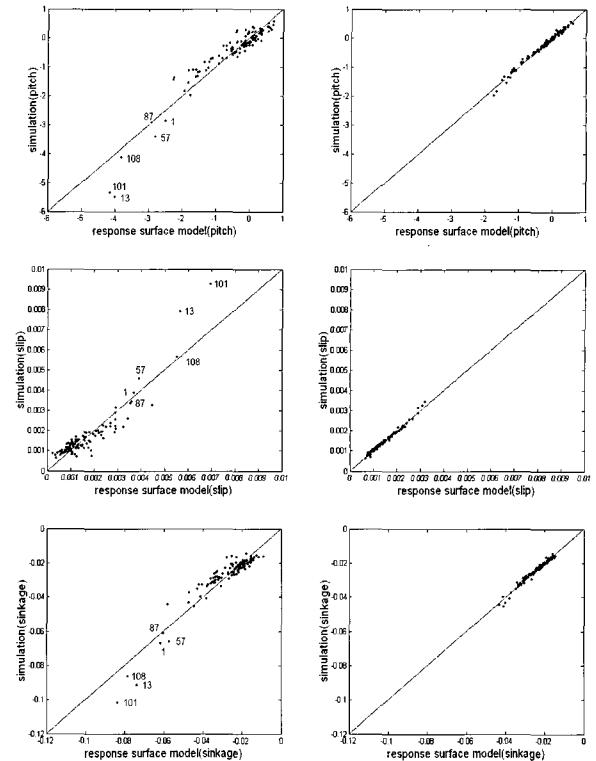


Fig. 3 Scatter plots of simulation responses with respect to response surface model: RSM included outliers(LHS) and RSM without outliers (RHS)

Fig. 3의 좌측 그림은 이상치들이 평균으로부터 확연하게 벗어나 있을 뿐 아니라 전체 데이터의 경향성을 왜곡하고 있는 것을 알 수 있다. 반면 개선된 반응표면모델은 좌측의 반응표면모델과 비교할 때 직선에 가까운 형태로 실제 데이터와 매우 근접한 모델임을 알 수 있다.

동역학 해석 결과 중에서 6개의 이상치는 심해져 지반으로 모델링된 지반역학 모델이 매우 연약하기 때문에 동역학 해석 과정에서 수치적인 오차가 다소 포함되어 나타나는 것으로 판단된다. 실제로 지반역학 모델은 전단강도가 매우 낮기 때문에 설계변수의 특정 영역에서는 과도한 수직침하와 슬립이 발생할 수도 있다. 이러한 동적응답은 최악조건 설계를 위해서는 중요한 정보가 될 수 있지만 본 연구에서와 같이 집광효율을 최대화하기 위한 설계에서는 반응표면모델 정확도를 위해서 제거하는 것이 바람직하다.

Table 3은 이상치 분석으로 6개의 데이터를 제거하고 생성한 피치각, 슬립, 수직침하에 대한 2차 반응표면모델의 계수들을 나타낸다. 각각의 반응표면모델들은 하나의 상수항과 35개의 계수를 갖는 것을 알 수 있다.

다음으로 이상치가 제거된 반응표면모델을 이용하여 설계변수들의 상호 관련성을 파악하기 위해 Fig. 4의 교호작용 그림에서 두 개의 선이 나란하지 않는 조합을 찾아보았다. 수직침하에 대해서 무게(W)-트랙길이(L), 트랙길이(L)-트랙폭(D), 트랙길이(L)-무게중심의 위치(L_1) 등에서 교호작용이 발견된다.

Table 3 Coefficients of response surface models for pitch angle, slip and vertical sinkage

| Term | Pitch angle | Slip | Vertical sinkage |
|-----------|-------------|-------------|------------------|
| Intercept | -2.0855E-01 | 1.5065E-03 | -2.5409E-02 |
| W | -6.1326E-02 | 9.2908E-05 | -1.0067E-02 |
| L | 1.9266E+00 | -2.0671E-03 | 1.9015E-02 |
| B | -1.1076E-02 | 4.7615E-05 | -8.0588E-04 |
| D | 7.5874E-02 | -4.2357E-04 | 1.0845E-02 |
| h_c | -1.0873E-01 | 8.7534E-05 | -1.5478E-03 |
| L_1 | -1.3998E+00 | 9.0093E-04 | -6.8669E-03 |
| V_t | -2.0705E-01 | 8.7937E-04 | -6.1629E-04 |
| W^2 | -6.8867E-02 | 5.6575E-05 | -2.5456E-03 |
| WL | 5.4550E-01 | -4.4540E-04 | 5.4925E-03 |
| WB | -9.2784E-02 | 1.0146E-04 | -1.0199E-03 |
| WD | -9.6895E-02 | 8.3425E-05 | 1.8862E-03 |
| Wh_c | 4.8519E-02 | -6.1775E-05 | 7.7436E-04 |
| WL_1 | -4.0617E-01 | 2.7675E-04 | -6.2812E-04 |
| WV_t | -2.4968E-02 | 2.6582E-05 | 4.5640E-04 |
| L^2 | -1.3352E+00 | 1.3575E-03 | -1.7349E-02 |
| LB | 1.8237E-01 | -1.9903E-04 | 3.0615E-03 |
| LD | -6.5232E-01 | 7.3087E-04 | -7.5282E-03 |
| Lh_c | 1.5120E-01 | -1.2634E-04 | 2.4570E-03 |
| LL_1 | 9.7687E-01 | -7.6567E-04 | 2.0582E-02 |
| LV_t | 2.9518E-01 | -6.0017E-04 | 2.6305E-03 |
| B^2 | -1.6881E-01 | 1.5209E-04 | -2.4812E-03 |
| BD | 1.4932E-01 | -1.5920E-04 | 2.1364E-03 |
| Bh_c | 4.6031E-02 | -5.9600E-05 | 5.4945E-04 |
| BL_1 | 6.7377E-03 | -1.6121E-05 | 2.3935E-05 |
| BV_t | -1.8782E-02 | 2.3016E-05 | 3.2827E-04 |
| D^2 | 9.9530E-02 | -2.5119E-05 | -1.4994E-03 |
| Dh_c | 6.0357E-02 | -5.1591E-05 | 9.6827E-04 |
| DL_1 | 4.0940E-01 | -3.1234E-04 | 1.8154E-03 |
| DV_t | 1.2410E-01 | -2.8364E-04 | 5.1988E-04 |
| h_c^2 | -1.0127E-01 | 1.0904E-04 | -1.1080E-03 |
| $h_c L_1$ | -3.6841E-02 | 1.5859E-05 | -1.0810E-03 |
| $h_c V_t$ | -5.4011E-02 | 4.7174E-05 | -3.4031E-04 |
| h_c^2 | -9.8986E-02 | 7.0594E-05 | -8.4653E-03 |
| $h_c V_t$ | -3.1563E-02 | 5.8054E-05 | -1.2214E-03 |
| V_t^2 | -7.7539E-02 | 1.7107E-04 | -1.2996E-03 |

이러한 결과는 수직침하가 접지압($P = W/(2DL)$)과 밀접한 관련이 있기 때문에 이와 관련한 설계변수들인 무게(W), 트랙길이(L), 트랙폭(D) 등이 서로 관련성이 있다. 그리고 트랙길이(L)와 무게중심의 위치(L_1)는 트랙길이가 길어질 경우, 상대적으로 무게 중심의 위치는 앞으로 이동하는 역의 관계가 있기 때문에 교호작용이 존재한다.

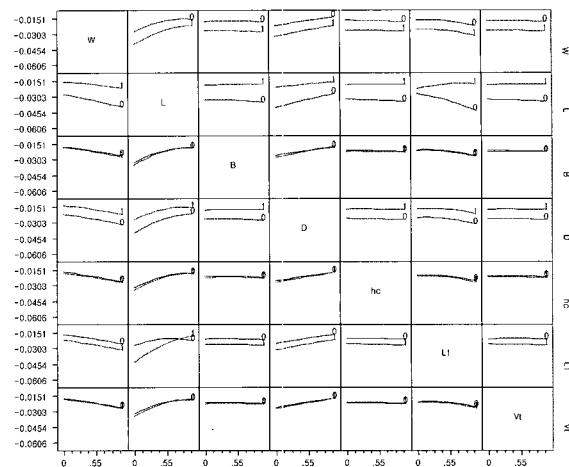


Fig. 4 Interaction of design variables for vertical sinkage

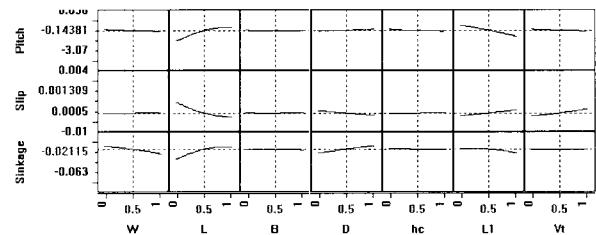


Fig. 5 Global sensitivity for responses with respect to design variables

반면 트랙간격(B)과 무게중심의 높이(h_c)는 다른 설계변수들과 관련성이 거의 없었다. 정량적인 차이는 있지만 동일한 교호작용 결과가 슬립과 피치에서도 관찰되었다.

반응표면모델에서 유의한 설계변수들을 파악하기 위해서 90% 신뢰수준에서 t-통계량을 이용하여 분석을 수행하였다. 그 결과, 수직침하에 대해서는 무게(W), 접지길이(L), 트랙폭(D), 무게중심까지의 거리(L_1) 등의 설계변수들이 유의한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 접지압과 수직침하의 밀접한 관련성을 말해준다. 슬립에 대해 영향력 있는 설계변수들은 접지길이(L), 트랙속도(V_t), 트랙폭(D), 무게중심까지의 거리(L_1) 등으로 나타났다. 슬립은 무한궤도의 형상과 속도에 영향을 받기 때문에 이와 관련된 설계변수들이 유의하게 나타났다. 피치는 차량 앞뒤로 기울어지는 각을 의미하므로 접지길이(L)와 무게중심까지의 거리(L_1)가 가장 영향력 있는 설계변수로 평가되었다.

이상의 교호작용과 유의성 평가를 통해서 전산실험을 바탕으로 생성한 반응표면모델이 실제적인 물리적 현상을 매우 근접하게 설명하고 있음을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 사용된 전산모델이 연약지반에서의 주행특성을 효과적으로 예측할 수 있는 모델임을 반증한다.

설계변수들의 변화에 따른 수직침하, 슬립, 피치의 변화 경향성은 Fig. 5에 나타내었다. 유의하지 않은 설계변수들은 Fig. 5에서 수평선에 가깝게 표현된다. 따라서 트랙간격(B)과 무게중심의 높이(h_c)는 공통적으로 직진주행의 세 가지 응답에 영향을 거의 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 5에서 수직침하를 줄이기 위해서는 무게(W)는 줄이고, 트랙길이(L)와 트랙폭(D)은 늘여야 한다는 설계정보를 얻을 수 있다. 즉, 수직침하를 줄이기 위해서는 집광차량의 접지면적은 넓히고 무게는 줄여야 함을 의미한다. 무게중심의 위치(L_1)는 트랙길이(L)와는 서로 상반된 경향성을 나타내며, 무게중심은 앞으로 들수록 수직침하가 작게 발생하는 것으로 관찰되었다. 한편 트랙길이(L)는 수직침하와 비선형 관계에 있고 무게(W), 트랙폭(D), 무게중심의 위치(L_1)는 비교적 선형 관계에 있다. 또한 차량의 길이를 결정하는 트랙길이(L)가 가장 민감한 설계변수로 관찰되었다.

슬립을 줄이기 위해서는 무게(W)를 줄이고, 트랙길이(L)와 트랙폭(D)은 늘이며 무게중심(L_1)을 앞으로 두고, 트랙속도(V_t)를 줄여야 한다는 설계정보를 얻을 수 있다. 이러한 결과는 수직침하를 줄이기 위한 설계변수의 경향성과 유사하다. 다만 수직침하와 달리 슬립에서는 트랙속도(V_t)의 영향력이 확실하게 나타난 것을 알 수 있다. 실제로 슬립은 트랙속도(V_t)와 직접적으로 관련이 있으므로 반응표면모델이 이러한 경향성을 잘 반영하고 있다고 볼 수 있다. 슬립에서도 가장 민감한 설계변수는 트랙길이(L)이다.

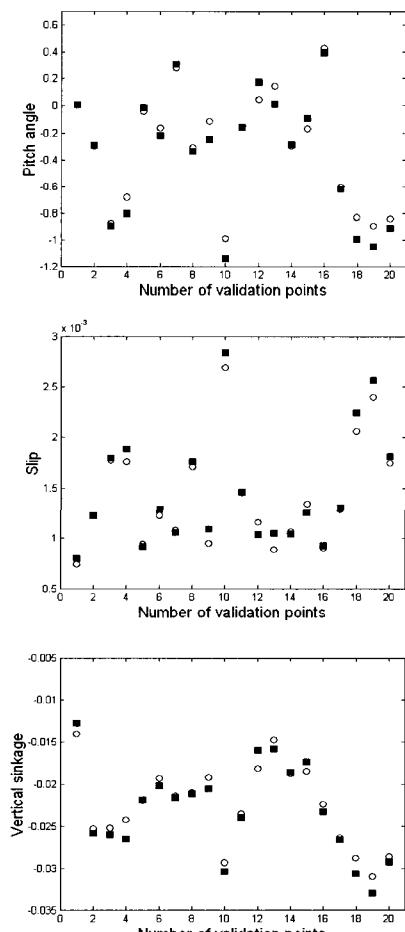


Fig. 6 Comparison of responses obtained by RSM with simulation results

피치는 양수가 되는 것이 선호되는데 이것은 집광차량이 앞으로 기울어지는 것을 의미한다. Fig. 5에서 피치에 대해서는 무게중심을 앞으로 두어야 하고, 트랙길이(L)와 트랙폭(D)은 늘이고 트랙속도(V_t)는 낮추어야 좋은 설계안을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이상치 분석을 통해 생성된 반응표면모델의 실제 예측성능을 평가하기 위해서 20개의 추가적인 전산실험 결과와 반응표면모델의 예측값을 비교하였다. 20개의 검증 데이터는 최적화를 통해서 기존의 전산 실험점들로부터 가장 멀리 떨어져 있는 점들을 선택하는 최소거리최대화방법(Maximin distance sampling)이 사용되었다 (Johnson et al., 1990). Fig. 6은 피치, 슬립, 수직침하에 대한 20개의 시뮬레이션 응답과 반응표면모델의 예측값을 도시한 것이다. 여기서 ■는 반응표면모델의 예측값을 나타내고, ○는 주행차량의 시뮬레이션 응답을 나타낸다. 반응표면모델의 예측결과가 시뮬레이션 결과의 경향성을 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 구해진 반응표면모델은 주행차량의 전산모델에 대한 근사모델로써 효과적으로 활용될 수 있음이 입증되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 무한궤도형 주행차량의 전산모델에 대한 통계분석을 통해 전산모델의 타당성을 검증하였다. 이상치 분석으로 반응표면모델을 왜곡할 수 있는 데이터를 제거하였고, 분산분석을 통해 이상치를 제거한 반응표면모델이 전산모델의 응답을 효과적으로 근사화하고 있음을 확인하였다. 설계변수들의 교호작용과 유의성을 판별한 결과, 개발된 반응표면모델이 주행차량의 실제적인 물리현상을 매우 잘 반영하고 있음을 관찰되었다. 이러한 결과는 반응표면모델을 생성하기 위해 사용된 전산 동역학모델이 해석 결과의 신뢰성을 보장할 수 있는 주행차량모델임을 반증한다. 한편, 반응표면모델을 이용한 전역민감도해석에서는 집광시스템의 직진 주행성능을 개선하기 위한 설계정보를 제공하였다. 반응표면모델의 예측성능을 살펴보기 위해 반응표면모델의 예측값과 시뮬레이션 응답을 비교해 본 결과, 반응표면모델의 예측값이 실제 시뮬레이션 응답과 거의 일치하는 것을 확인하였다. 따라서 개발된 반응표면모델은 향후 전체 채광시스템의 최적화 과정에서 주행차량 모델의 근사모델로써 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 해양수산부 특정 연구과제인 ‘심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발’ 과제와 기본 연구 과제인 ‘해양 개발 설계엔지니어링 기술 고도화’의 일부분으로 수행되었다.

참 고 문 헌

Hong, S. and Choi, J.S. (2001). "Experimental Study on Grouser Shape Effects on Trafficability of Extremely Soft

- Seabed," Proceedings of the 4th Ocean Mining Symposium. Szczecin, pp 115-121.
- Johnson, M.E., Moore, L.M. and Ylvisaker, D. (1990). "Minimax and Maximin Distance Designs," Journal of Statistical Planning and Inference, Vol 26, No 2, pp 131-148.
- Neter, J., Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J. and Wasserman, W. (1996). Applied Linear Statistical Models, McGraw-Hill.
- Shewry, M.C. and Wynn, H.P. (1987). "Maximum Entropy Sampling," Journal of Applied Statistics, Vol 14, No 2, pp 165-170.
- 김형우, 홍섭, 최종수 (2004). "점착성 연약지반 주행차량의 동적 거동 연구", Ocean and Polar Research, Vol 26, No 2, pp 323-332.
- 최종수, 홍섭, 김형우, 이태희 (2004). "직교배열표 실험계획법에 의한 심해 연약지반용 무한궤도차량의 견인성능에 대한 실험적 연구", Ocean and Polar Research, Vol 26, No 2, pp 333-339.

2006년 1월 24일 원고 접수

2006년 5월 24일 최종 수정본 채택