

## 4-Post Road Simulator 를 이용한 농용 트랙터의 유연 다물체 동역학 해석

박지수<sup>\*†</sup> · 이강욱<sup>\*</sup> · 조종윤<sup>\*</sup> · 윤지원<sup>\*</sup> · 신재윤<sup>\*</sup>

\* LS 엠트론 기술개발부문 생산기술센터 CAE

### Flexible Body Dynamics Analysis of Agricultural Tractor Using 4-Post Road Simulator

Ji Soo Park<sup>\*†</sup>, Kang Wook Lee<sup>\*</sup>, Chong Youn Cho<sup>\*</sup>, Ji Won Yoon<sup>\*</sup> and Jai Yoon Shin<sup>\*</sup>

\* R&D Division, Manufacturing Technology Center CAE, LS Mtron Ltd.

(Received February 16, 2015 ; Revised March 31 2015 ; Accepted April 10, 2015)

**Key Words:** Tractor(트랙터), 4-Post Road Simulator(4 축 도로하중 시뮬레이터), MFBD(유연 다물체 동역학), Mode Superposition Method(모드 중첩법)

**초록:** 농용 트랙터는 일반적인 도로 주행이 아닌 논 또는 밭과 같은 험지에서 작업용으로 사용한다. 때문에 정적 하중 뿐만 아니라 동적 하중이 고려된 구조 해석이 진행되어야 한다. 하지만 동적 입력 하중을 계산하기 위해서는 다양한 작업기와 하중조건을 모사해야 하기에 실제 측정에 많은 시간과 노력이 소요된다. 이러한 노력들을 줄이기 위해서 본 연구에서는 상용 자동차와 동일하게 농용 트랙터를 위한 4 축 도로하중 시뮬레이터(4-Post Road Simulator) 모델을 개발하였다. 입력하중을 검증하기 위해 사내 험로 시험장에서 차축의 가속도 값과 바디프레임의 변형률(strain)을 측정하였다. 가속도 값은 동역학 모델의 입력 하중으로 사용하고 모드 중첩 법을 포함한 동역학 해석을 수행하여 변형률을 검증하였다. 이를 통해 험로 프로파일과 유사한 거동을 나타내는 4 축 도로하중을 구할 수 있었으며 신뢰성을 검증하였다.

**Abstract:** Agricultural tractors are utilized on rough road such as rice paddy field. Therefore, static and dynamic load should be considered when simulating structural analysis with finite element analysis (FEA). But it consumes a lot of time and effort to measure dynamic load because of difficulty and complexity in modeling various field working load conditions and kinematics of machinery. In this paper, to reduce the efforts, 4-post road simulator is developed for agricultural tractor like modeling commercial vehicle. In proving ground test in our facility, I measured acceleration of front/rare axle and strain of body frame to validate input loads. The acceleration is used for defining input loads. And strain is validated with dynamics analysis including mode superposition method. As a result, I was able to calculate 4-post input road profiles, which represent similar proving ground profile with good reliability.

## 1. 서 론

농용 트랙터는 일반적인 도로 주행이 아닌 논 또는 밭과 같은 험지에서 작업용으로 사용된다. 때문에 정적 하중만을 고려한 구조 해석은 실제 부품들이 받는 하중에 대한 구조 해석의 신뢰성이 떨어진다. 따라서 정적 하중과 동적 하중이 고려된 구조 해석이 진행되어야 하며 이를 위해 동역학 모델 개발이 필수적이다. 또한 트랙터 설계 변경 및 모델 개발을 할 때마다 시험을 할 수 있는 시간 및 자원은 한정되어 있기 때문에 험지의 작업 환경을 모사한 시험 환경을 구축하고 이를 통해 얻은 결과 값을 이용하여 유연 다물체 동역학(MFBD) 해석 모델을 개발하여야 한다. 하지만 동역학 모델로부터 동적 입력 하중을 계산하기 위해서는 다양한 작업기와 하중조건을 모사해야 하기에 실제 측정에 많은 시간과 노력이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 상용 자동차와 동일하게 농용 트랙터를 위한 4 축 도로하

† Corresponding Author, jspark@lsmtron.com

중 시뮬레이터 모델을 개발하였다. 이를 개발하기 위해서 험지에서 차축 가속도 값과 트랙터 바디 프레임의 변형률에 대한 시험 값들을 측정하였다. 측정된 가속도는 동역학 모델의 입력 하중, 변형률은 동역학 모델을 검증하는 데에 사용하였다. 그리고 개발된 동역학 모델을 통해 바디 프레임의 체결 부 하중을 추출하여 동적 하중이 포함된 구조 해석을 수행하는 것이 목적이다.

## 2. 실차 시험

실차 시험은 실제 트랙터가 사용되고 있는 논 또는 밭 등의 험지에서 이루어져야 하지만 험지에서의 측정은 시험 재현성이 떨어지고 시험하는데 많은 시간이 소요된다. 따라서 Fig. 2 와 같이 험지의 작업 환경을 모사한 험로 시험장을 제작하여 그 곳에서 시험을 수행하였다. 실차 시험에서는 동역학 모델을 구현하기 위해 필요한 값들인 차축의 가속도와 바디 프레임의 변형률을 측정하였다. 차축의 가속도는 동역학 모델의 입력 하중으로 사용되기 때문에 Fig. 3 과 Fig. 4 와 같이 전방(ch1, ch2)과 후방(ch3, ch4)에 있는 차축의 양끝에서 측정하였으며 바디 프레임의 변형률은 Fig. 5 와 같은 위치에서 측정하여 그 결과를 이용하여 동역학 모델을 검증하는 데 사용하였다. 강제 mode 의 가속도를 측정하기 위해 저주파용 가속도 센서를 이용하였으며 LMS 장비를 이용해 계측하였다. 또한 변형률은 HBM 장비를 이용해 계측하였다. Fig. 6 은 실차 시험을 통해 측정된 가속도 값이다.

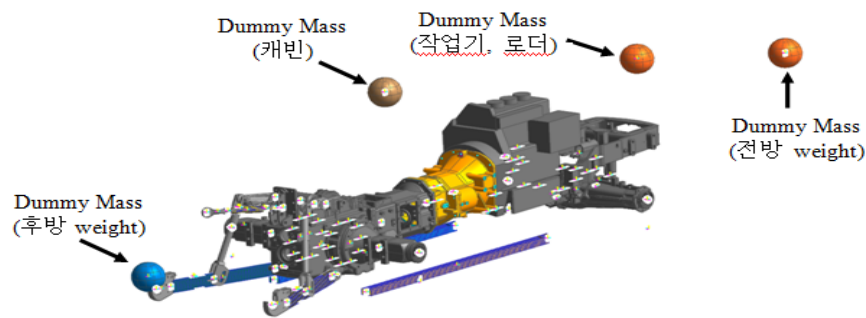


Fig. 1 Multi flexible body model of agricultural tractor



Fig. 2 Tractor test model at proving ground

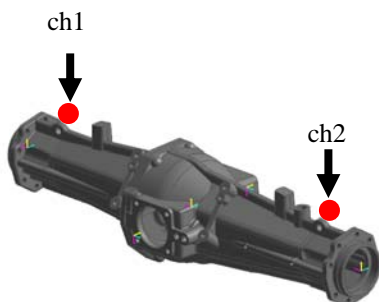


Fig. 3 Measuring point of acceleration at front axle



Fig. 4 Measuring point of acceleration at rear axle

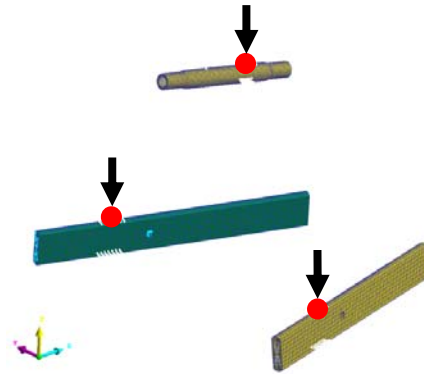


Fig. 5 Measuring point of strain at 3point linkage

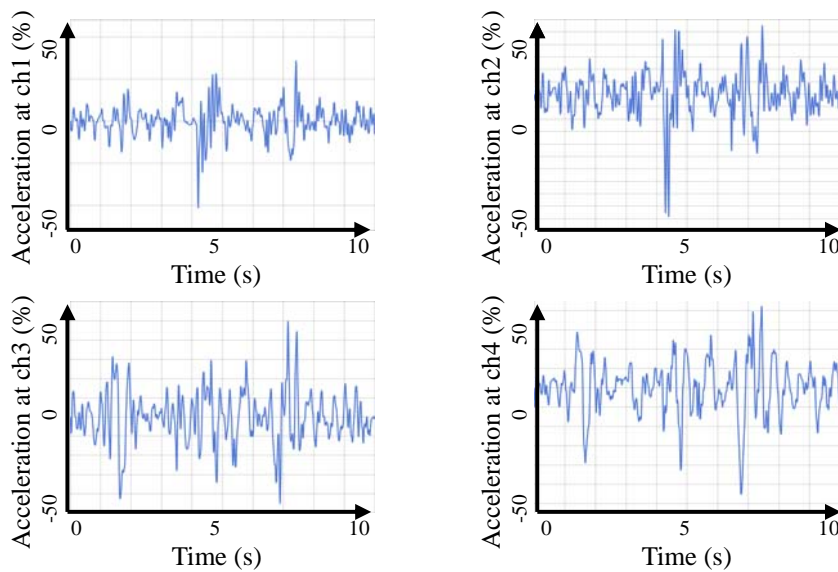


Fig. 6 Acceleration of front and rear axle in bump test model

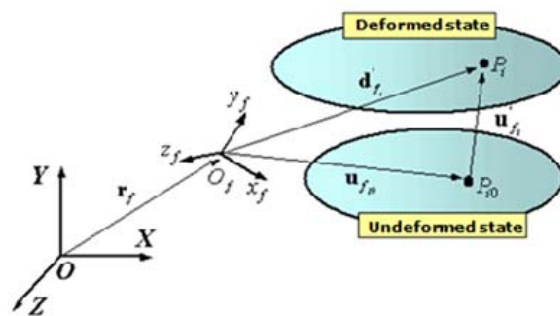


Fig. 7 Configuration of a flexible body

### 3. 유연 다물체 동역학 모델

#### 3.1 모드 중첩법(Mode Superposition Method)

Fig. 7 은 유연체  $f$ 의 변형이 이루어지기 전과 후의 상태를 나타낸 그림이다. 여기서  $XYZ$  는 관성 기준 좌표계,  $x_f y_f z_f$ 는 유연체  $f$ 의 기준 좌표계,  $P_{i0}$ 는 변형이 되기 전 상태의 Node  $i$ ,  $P_i$ 는 변형이 된 상태의 Node  $i$ ,  $d'_i$ 는  $O_f$ 에서  $P_i$ 까지의 위치 벡터 이다. 유연체  $f$ 의 임의의 node  $i$ 에 대해서 위치 벡터는 다음과 같다.

$$r_{f1} = r_f + A_f d'_{f1}, \text{ 여기서 } d'_{f1} \cong u'_{i0} + \Phi_T^{f1} a_f$$

위의 식에서  $\Phi_T^{f1}$ 를 node  $i$ 의 Translational modal matrix라 한다. 가상 일 법칙을 이용해서 운동방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$B^T \left( M \begin{Bmatrix} \dot{Y} \\ \ddot{a} \end{Bmatrix} + C_{zc}^T \lambda_1 - Q^c - Q^E - Q^G - Q^D - Q^F \right) + C_{qc}^T \lambda_2 - Q^J = 0$$

여기서  $z$ 는 직교 좌표계,  $a$ 는 modal 좌표계,  $q$ 는 상대 좌표계,  $M$ 은 질량 행렬,  $\dot{Y}$ 는 직교 좌표계에서의 Local 가속도,  $C_{zc}^T$ 는  $zc$ 에 관한 구속 방정식의 편미분,  $C_{qc}^T$ 는  $qc$ 에 관한 구속 방정식의 편미분,  $\lambda_1$ 는 Lagrangian multipliers,  $\lambda_2$ 는 Lagrangian multipliers (Driving constraint of a joint),  $Q^c$ 는 이차 속도항,  $Q^E$ 는 탄성력,  $Q^G$ 는 중력에 의한 힘,  $Q^D$ 는 감쇠에 의한 힘,  $Q^D$ 는 모달에 의한 힘, 접촉력 등에 의한 힘,  $Q^J$ 는 Joint에 생기는 마찰력이다.<sup>(1,2)</sup>

### 3.2 입력 data

유연체 동역학 해석을 위해 RecurDyn의 RFlex를 이용하였으며 이를 해석하기 위해서는 CAD 파일, 재료의 물성치 이외에 rfi 파일이 추가적으로 필요하다. Rfi 파일은 구조 및 내부해석을 할 수 있는 상용 소프트웨어의 Modal 해석을 통하여 얻을 수 있다. Ansys, NX/Nastran, MSC/Nastran, I-DEAS 등 많은 구조 해석프로그램들이 있지만 본 연구에서는 NX/Nastran을 이용하여 Fig. 8과 같이 강체를 유연체로 변환하였다. 또한 모드 중첩 법을 사용하기 위해서 Nastran 해석을 할 때 CMS(Component Mode Synthesis) 방법을 이용하였다. Rfi 파일 생성 시 주의 할 점은 동역학 해석에 사용할 Mode의 수를 정하는 것이다. Nastran 해석을 할 형상의 지배적인 mode가 포함되게 해석을 해야 하는데 보통 모르는 경우가 대부분이기 때문에 본 연구에서는 체결되는 주변의 node들을 rbe2 요소로 구속하여 총 생성되는 rbe2 개수의 6배(1개의 node에 6자유도)를 하고 추가적으로 rigid mode 6개를 추가하여 Nastran 해석을 통해 구해야 하는 mode 수를 계산하였다. 또한 동역학 모델의 입력하중으로 사용된 가속도 값은 선형 성분이 포함되어 있어 이를 제거하기 위해 고역 필터와 저역 필터를 이용하여 data를 가공을 한 후 적용하였다.<sup>(5)</sup>

### 3.3 해석 모델 구성

트랙터 바디 프레임의 경우 앞 차축의 왼쪽과 오른쪽, 후방 차축의 왼쪽과 오른쪽 총 4곳에서 노면과 타이어를 통해 하중이 바디 프레임에 전달된다. 각각의 point에 대해 총 6방향(Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz)의 하중이 발생하지만 Fz(중력 방향)이 트랙터에 가장 큰 하중을 전달하고 지배적인 하중이기 때문에 Fz만을 고려한 4축 도로하중 시뮬레이터를 동역학 해석 모델로 구현하였다. 또한 4축 도로하중 시뮬레이터

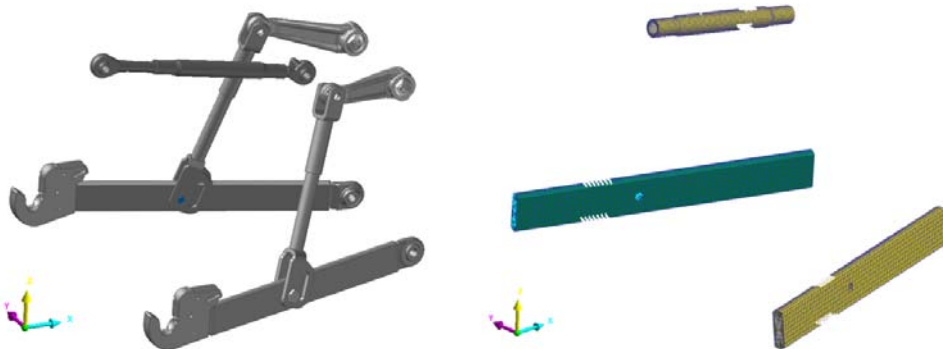


Fig. 8 Transformation of rigid body to rflex body

3.4 해석 결과 분석 및 비교

시험을 통해 계측된 변형률과 해석을 통해 얻은 변형률을 비교하였다. 그 결과 3Point-Linkage 의 3 파트인 top link, left link 와 right link 의 deformed mode 가 일치하는 것은 확인 하였고 peak to peak 값도 top link 는 87%, left link 는 84%, right link 는 81%로 평균 적으로 84%의 정확도를 갖는다. 또한 RMS 의 경우 top link 는 93%, left link 는 85%, right link 는 95%로 평균 적으로 91%의 정확도를 갖는 유연 다물체 동역학 모델을 개발하였다. Right link 의 경우 RMS 값의 정확도는 높지만 peak to peak 의 정확도가 다른 part 들에 비해 떨어지는 데 이는 right link 와 left link 의 위치를 조정해주는 유압 실린더가 right link 에 적용 되어 있는데 이를 고려하지 않았기 때문에 peak to peak 의 정확도 떨어진 것이라고 판단된다. 하지만 RMS 의 정확도가 높기 때문에 right link 가 받는 하중의 크기는 구조 해석을 하는 데에 있어 큰 오차를 나타내지 않을 것으로 판단된다.

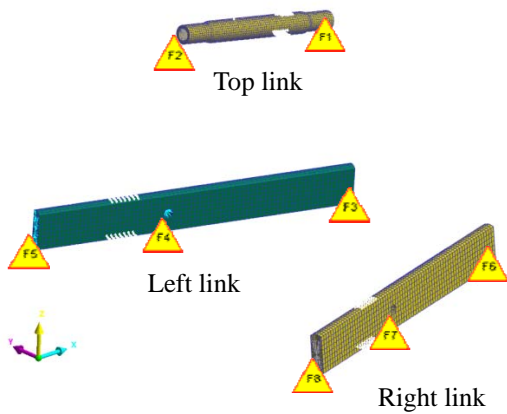


Fig. 9 Rflex model of 3Point-Linkage

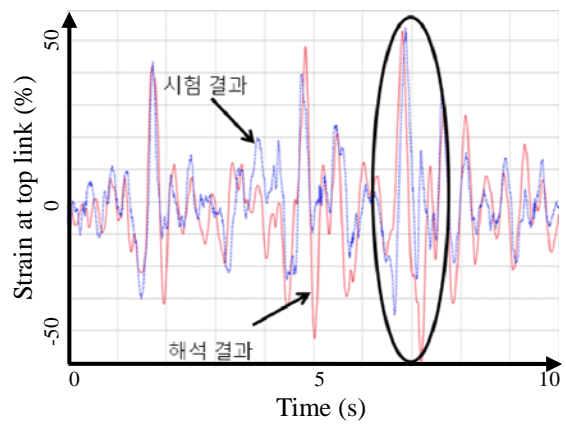


Fig. 10 Result of top link

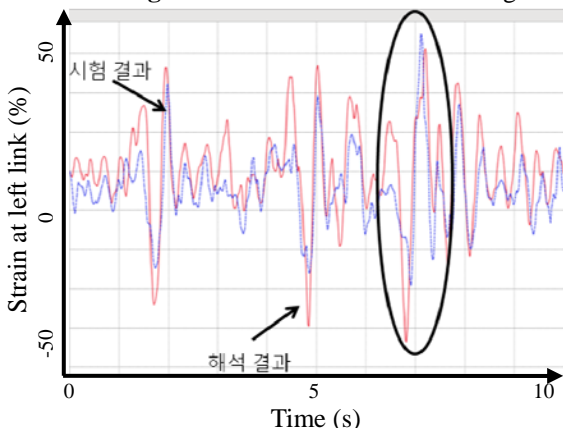


Fig. 11 Result of left link

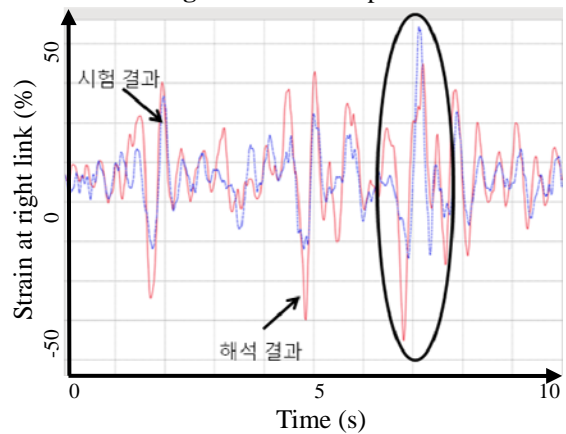


Fig. 12 Result of right link

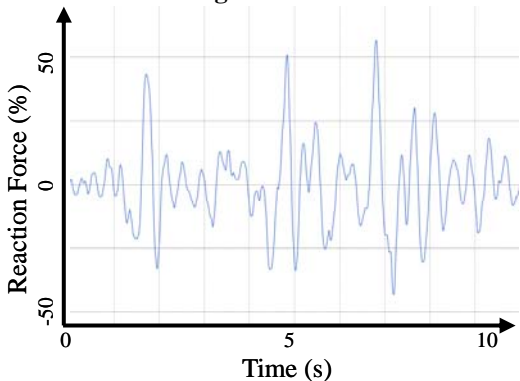


Fig. 13 Reaction Force of F1\_X

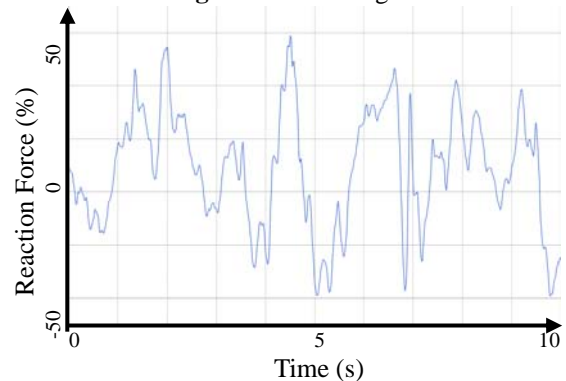


Fig. 14 Reaction Force of F1\_Y

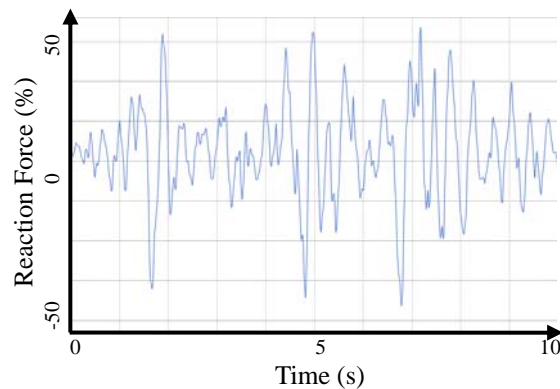


Fig. 15 Reaction Force of F1\_Z

#### 4. 결 론

농용 트랙터는 일반적인 도로 주행이 아닌 논 또는 밭과 같은 험지에서 작업용으로 사용한다. 때문에 정적 하중 뿐만 아니라 동적 하중이 고려된 구조 해석이 진행되어야 한다. 하지만 동적 입력 하중을 계산하기 위해서는 다양한 작업기와 하중조건을 모사해야 하기에 실제 측정에 많은 시간과 노력이 소요된다. 이러한 노력들을 줄이기 위해서 본 연구에서는 상용 자동차와 동일하게 농용 트랙터를 위한 4 축 도로하중 시뮬레이터(4-Post Road Simulator) 모델을 개발하였다. 또한 동역학 모델 및 입력하중을 검증하기 위해 사내 험로 시험장에서 차축의 가속도 값과 바디프레임의 변형률(strain)을 측정하였다. 가속도 값은 동역학 모델의 입력 하중으로 사용하고 모드 중첩 법을 포함한 동역학 해석을 수행하여 변형률을 검증하였다. 시험을 통해 측정한 변형률과 해석을 통해 얻은 변형률을 비교하였다. 그 결과 deformed mode 는 시험과 해석이 일치하는 것을 확인하였으며 3Point-Linkage 의 3 가지 part 에 대한 결과 값이 peak to peak 값은 약 84%, RMS 는 약 91% 정도의 정확도를 갖는 모델을 개발하였다. 이를 통해 험로 프로파일과 유사한 거동을 나타내는 4 축 도로하중을 구할 수 있었으며 신뢰성을 검증하였다. 또한 동역학 모델을 통해 구한 바디 프레임의 체결 부 하중을 통해 동적 하중이 고려된 구조 해석에 적용할 수 있었다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Haug, E. J., 1989, "Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems Volume 1 : Basic Method," ALLYN AND BACON.
- (2) FunctionBay, Inc 2014, RecurDyn User Manual, <http://eng.functionbay.co.kr/>.
- (3) Fischer, P. and Witteveen, W., 2000, "Integrated MSD-FE-Durability Analysis of Truck Frame Components by Modal Stresses," ADAMS User Meeting 2000.
- (4) Mattetti, M., Molari, G. and Vertua, A., 2014, "New Methodology for Accelerating the Four-Post Testing of Tractors Using Wheel Hub Displacements," Biosystems Engineering, Volume 129, January 2015, Pages 307-314.
- (5) Do, T.M. and Le, T.C., 2013, "Performance analysis of FFT Filter to Measure Displacement Signal in Road Roughness Profiler," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol 5, No 4, August 2013.