

◎ 논문

하이브리드 동력시스템을 적용한 트랙터의 동적 거동 및 내구해석

김병삼* · 임광규**

Behavior and Durability Analysis of Tractor applying a hybrid power system

Byeong Sam Kim*, Gwang Gue Lim**

Key Words : 내구해석 (Durability Analysis), DAFUL, 유한요소해석(FEM), 하이브리드 동력(hybrid power system), ABAQUS

ABSTRACT

This paper described on the motion of hybrid tractor trajectory for powertrain system. The dynamics behavior used to the tractor according to the characteristics of the road surface using Daful[®] analysis. The tractor industry is facing to a big problem about rising gas price and exhaust gas environment. Because it was possible overcoming the past drawback, hybrid vehicle had been decided as the best technical way since it has started operating the internal combustion engine with the electric power as the motive power. The vehicle structures have designed the model of a major power transmission factor. The simulation realized in this paper that motion of tractor being turned by torque and force of each joints. Driving characteristics, especially in recent years, IVHS (Intelligent Vehicle Tractor / System) technology, while receiving a lot of attention because of the tractor and the need to pursue high function is emerging as a more and more.

1. 서론

최근 세계 각국에서는 환경오염의 심각성을 인식하고 온실가스 배출을 제한하는 규정을 제정하여 발표하고 있으며, 자동차산업뿐만 아니라 농업에서도 이에 대응하는 고효율의 차세대 동력전달 시스템의 개발이 필수적인 사항이 되었다. 50 Kw급 하이브리드 트랙터는 고효율 동작이 가능한 전자식 엔진을 기반으로 핵심부품 및 후처리 장치를 추가하여 농작업에 따른 최적 동력 제어 및 배기가스 감소를 목표로 연구하였다.

본 연구에서는 트랙터 작업의 에너지 사용절감하고 PM/NOx의 배기가스를 줄임으로써 TIER-4 등의 환경 규제에 대응 가능하므로 국내기업의 기술력 향상과 세계 시장에서의 제품경쟁력을 강화시켜 적용하고자 한다. 이 연구에서는 유한요소 모델을 구성하여 동역학적 시뮬레이션을 실시 하였고, 결과 분석을 통한 설계 검증 및 개선안을 도출하였으며, 최종 개선안의 피로 수명을 예측하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 동적 거동 해석

2.1 동역학적 거동 분석

하이브리드 기반의 트랙터 주행 특성을 고려한

* 호서대학교 자동차공학과

** 호서대학교 대학원, 기계공학과 자동차공학전공

E-mail : kbs@hoseo.edu

TIER-4 대응으로 플랫폼 모터와 엔진의 동적 특성에 따른 주행 특성에 대한 안정성의 구조강도 및 동 특성이 요구된다. 트랙터의 주행용이성 및 안정성을 확보하기 위한 플랫폼을 구축하기 위하여 차체의 플랫폼은 주행 중에 발생하는 노면의 굴곡에 의한 차체의 흔들림을 적절히 제어하여 운전의 편의성을 만족시킴과 동시에 타이어 접지면에서의 수직 하중을 적절히 유지하여 차량의 안전성을 확보 하였다.

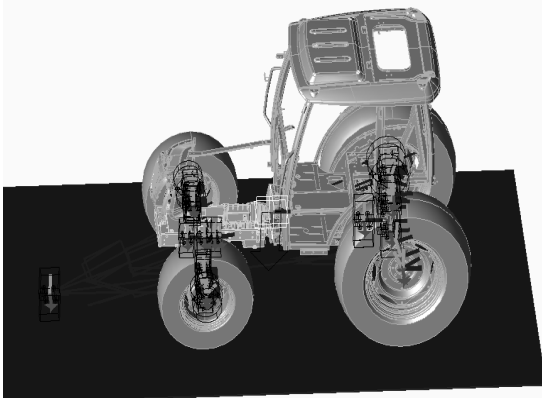


Fig. 1 Hybrid Tractor Structures

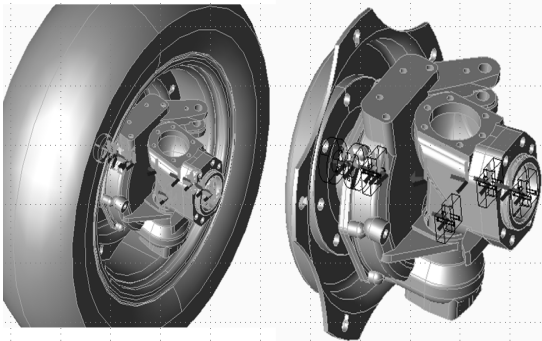


Fig. 2 Front Wheels Part and Joint Modeling

Fig. 1에서는 트랙터 동적 구동을 위하여 모델구성을 하였으며, Fig. 2에서는 전방축의 구성과 구속 조건에 대해서 설정하였다. 또한 전방 구동축의 구속 조건을 설정하기 위하여 각 조인트의 방식을 설정하였다. Fig. 3는 뒤축의 구속조건이며, 전방 축의 구속 조건과 동일 조건을 설정하였다. 동 축에 유한요소 모델을 구성하였다.

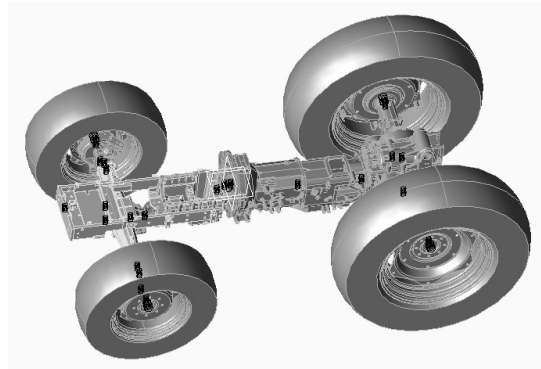


Fig. 3 Upper body analysis of driving performance

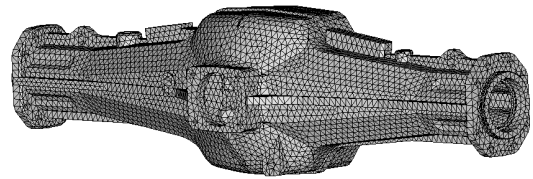


Fig. 4 Front Axle in pre-processing model

2.2 해석조건

트랙터 바퀴와 지면과 마찰을 고려하여 조인트 모델링을 하였다. 조인트 종류는 Fixed Joint 를 사용함으로써 각각에 트랙터 동력전달장치를 구축하고 트랙터 최고시속인 정격회전속도 28 km/로 움직이기 위해 구동 축에 Revolute Joint를 사용하여 주행 중에 발생하는 지면과 접촉하여 움직이도록 모델링 하였다. Fig. 3은 트랙터 하부차체에 대한 전체적인 모델로서 트랙터가 거동 할 수 있도록 모델링 하였다. Fig. 4는 트랙터 하부차체에 서스펜션으로 응력해석에 앞서 Mesh를 생성하여 해석을 진행하였다. 하이브리드(전기+엔진) 기반의 트랙터 주행 특성을 고려한 TIER-4 대응으로 플랫폼 모터와 엔진의 동적 특성에 따른 주행 특성에 대한 안정성의 구조강도 및 동역학적 특성이 요구된다. 조향(Wheel Steering)제어기술, 하이브리드 트랙터의 주행 용이성 및 안정성을 확보하기 위한 트랙터의 횡방향 및 종 방향 운동 제어기술, 그리고 트랙터의 주행실험을 정확하고 안전하게 수행할 수 있는 평벨트형 차량동력계(Flat Belt Chassis Dynamometer) 기술에 대한 성능 특성이 필요하다. 또한 주행 특성인 IVHS (Intelligent Vehicle Tractor/ System) 기술이 많은 주목을 받으면서 트랙터의 고기능화가 추구하고 있기 때

문에 그 필요성은 더욱 더 부각되고 있다. 하이브리드 트랙터의 동력전달 시스템의 구조강도 및 동적 해석을 통해 동력전달 시스템, 조향(Wheel Steering) 제어기술, 트랙터의 주행 용이성 및 안정성을 확보하기 위한 플랫폼을 구축하기 위하여 차체의 플랫폼은 주행 중에 발생하는 노면의 불규칙한 입력을 효과적으로 차단하여 승객에게 안락한 승차감을 제공하며, 운전자의 운전행위나, 노면의 굴곡에 의한 차체의 흔들림을 적절히 제어하여 운전의 편의성을 만족시키고 동시에 타이어 접지면에서의 수직하중을 적절히 유지하여 차량의 안전성을 확보하였다.

2.3 유한요소 모델링

트랙터 동력전달장치의 응력 및 변형 해석을 위해 앞 바퀴와 뒤 바퀴 구동 축에 유한요소 모델을 구성하였다.

사용된 요소(element)는 사면체(Tetrahedron) 요소로 구성 하였으며 재질은 KS규격 GCD450로써 탄성계수가 172 GPa, 항복응력이 280 MPa, 포아송 비 0.275, 밀도가 7200 kg/m³이다⁽¹⁾.

Table 1 TRACTOR CHARACTERISTICS

	Values
Total weight	2296 kg (engine weight)
Wheel weight	994 kg
Rear wheel weight	1302 kg
Distribution ratio, Wheelbase	43.3: 56.7
Front	2047 mm
Rear	1410 mm
Thai standards	1397 mm
Front	11.2 - 20 8 PR
Rear	14.9 - 28 8 PR
Maximum speed	28km / h

2.4 동적거동해석

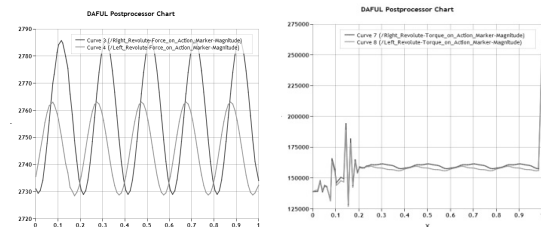


Fig. 5 Result of front wheels analysis : Tire revolved joint connection

타이어의 노면 특성에 따른 동적 거동 분석을 Daful[®]를 사용하여 해석한 내용이다. 타이어 전방 앞 바퀴의 각 2개 조인트 특성에 따라, 위 Fig. 2와 3과 같은 특성으로 연결하여 해석하였다. 앞 바퀴축의 구동 조인트 Marker의 Z축에 대한 회전 자유도를 제외한 모든 자유도를 구속하여 타이어의 동적 구동해석을 수행하였다.

$$\dot{m}_{eqv} = \dot{m}_f + \dot{m}_{ress} = \dot{m}_f + \frac{SP}{P_{ress}} \quad (1)$$

actual fuel consumption
virtual fuel consumption due to the use of electrical energy
equivalency factor

이 해석은 다음과 같은 트랙터의 부하 조건에 따라 결정 하였다⁽²⁾. 부하 특성에 따라 단순화 된 차량 통합을 제어하며, 이 해석의 결과에 따라 특성화를 단순화 보조 부하 (에어컨, PTO 전력, 승객 변동 등)의 구동 상태에 기초 하였다. 또한 Fig. 6은 도로의 주행 조건을 나타내었다.

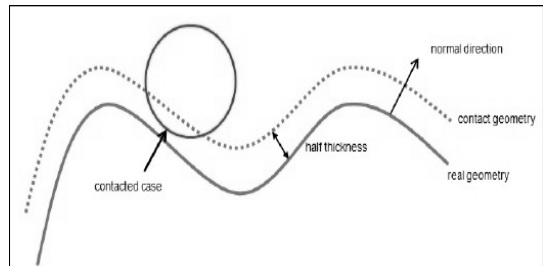
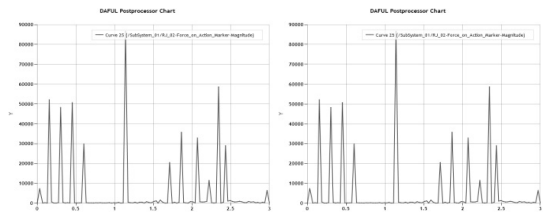


Fig. 6 Road surface characteristics



(a) Results of right revolute joint (Force) (b) Results of right revolute joint (Torque)

Fig. 7 Result of full vehicle analysis on right side wheel

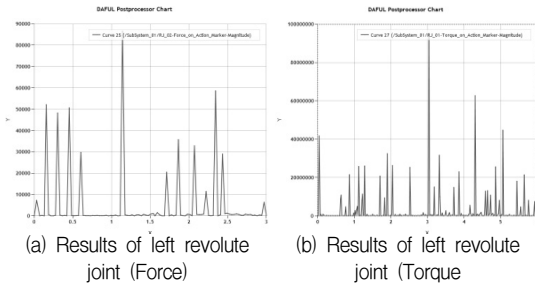


Fig. 8 Result of full vehicle analysis on left side wheel

Fig. 7과 Fig. 8은 타이어의 구동 특성 중에서 각 조인트간의 토오크 값에 대한 해석 결과로서 트랙터의 구동 토오크를 얻기 위한 타이어의 노면 특성에 대한 해석을 수행하였다.

3. 구조 및 내구해석

3.1 구조강도 해석 및 결과

해석조건과 유한요소 모델이 반영된 모델을 구성하기 위해 Fig. 9와 같이 Hyper mesh 11을 이용하여 모델링 하였다. 그림과 같이 Node를 생성 후 동역학적 시뮬레이션 에서 얻어진 경계조건 과 Load 데이터를 입력 하였고 Fig. 10과 같이 구조해석 프로그램인 ABAQUS 6.10.1 을 이용하여 시뮬레이션 해석을 실시 하였다. 시뮬레이션 해석 결과 169.3MPa 의 응력이 발생하였다.

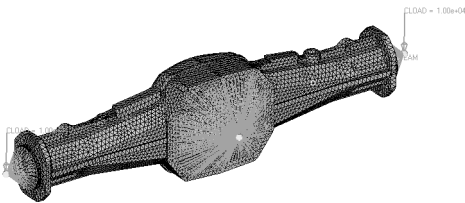


Fig. 9 Hyper mesh Modeling and Boundary Condition

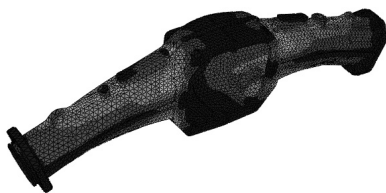


Fig. 10 Abaqus Simulation stress analysis result

Table 2 S TRUCTURAK ANALYSIS RESULTS

	Maximum Von-Mises Stress (Mpa)	Max. displacement (mm)
Front body	701.5	10.18
Rear Body	227.6	10.0
Suspension	7624.0	10.2

Fig. 10은 서스펜션의 구조 해석을 수행한 결과이며, 서스펜션의 양쪽 힘이 집중된 부위에 변형이 가장 크게 발생 하였으며, 트랙터 바디와 연결된 부위에 가까워질수록 스트레스가 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

3가지 트랙터 하부 트랜스 미션 부위의 내구 강성 해석을 수행하였다. 트랙터 차체 프레임 구조의 세 가지 분석 모델로 나누어. 전면 프런트차체, 후방 차체 및 서스펜션에 대한 구조해석의 결과를 수행하였으며, 이를 통해 최대 하중을 가하여 각 부분의 데이터에 기초하여 얻은 결과를 나타내었다. 최종 구조 강성의 결과를 Table 2에 제시하였다. 이를 통해 피로 해석을 수행하여 구조강성의 피로 해석을 수행하였다.

3.2 피로해석

피로해석에 대한 방법 중에서 본 연구에서는 정적 및 반복 응력-변형 곡선은 재료 경화의 효과로 지역의 소성 변형에 의한 방법을 채택하였다. 변형 물질의 행동을 설명하기 위해 구체적으로 분석 식 SN-곡선이 Palmgren-Miner의 규칙에 따라 선형 손상의 축적에 사용되는 소프트웨어 FEMFAT의 V4.6에 구현 맞게 조정되었다. 추정 사이클의 해석은 아래 식 (2)에 따라 상대적으로 응력 구배를 급함과 높은 사이클 피로에 주어진 평균하여 Palmgren-Miner 진폭 FEMFAT V4.6을 사용하였다⁽³⁾.

$$f_{genDurance} = 1 + \frac{(\sigma_{altben} / \sigma_{altTC} - 1)}{(2/b)^v} \chi^v \quad (1)$$

트랙터 구동 축 은 주행에서 반복적인 하중을 받는 장치이다. 그러므로 구동 축 에 대한 구조강도 해석과 함께 피로해석을 통한 피로수명에 대한 해석이 필요하다^(4,5). 구조강도 해석에서 얻어진 값을 피로해석 프로그램인 FEMFAT에 Input 값으로 Abaqus ODB 파일을 사용하여 항복응력 및 해석에 필요한 요구조건을

설정해준다^(6,7).

$$d\delta = \sum_{i=0}^{n-1} \delta_i \text{ where, } \delta_i = \frac{1}{K_s} \cdot S_{a_i}^b \quad (2)$$

or

$$d\delta = \frac{1}{K_s} \sum_{i=0}^{n-1} S_{a_i}^b \quad (3)$$

헤이그도의 구성은 응력 범위를 가정하여 일정한 진폭의 진동 하중 하에서 부품의 피로 수명을 제어 계산한다. Stress-Life방법, Wohler, 또는 S-N구조(또는 변형이나 응력 확대 계수)선도에 SN의 도표에서 공칭 응력 진폭 S는 가변 진폭 하중을 처리하기 위해 평균하여 Palmgren-Miner의 누적 손상 법칙과 함께 사용된다. 이 모델에서는 부하 사이클 당 구조에 손상이 주어진 응력 범위에서 일정하다고 가정한다. 진폭의 N 사이클 동안 누적 총 손상에 의해 주어진다. 응력 범위를 가정하여 일정한 진폭의 진동 하중 하에서 부품의 피로 수명을 제어 계산한다. DAFUL을 이용한 동역학적 시뮬레이션과 Abaqus를 이용하여 구조해석을 통해 재료에 어느 부분에 가장 크게 응력이 작용하는지 검토하였다. GCD450에 대한 재료의 피로물성을 입력하여 구조해석을 통해 얻어진 결과 값을 입력하여 위 재료에 대한 피로수명을 예측하였다. 범용 유한요소해석 프로그램인 FEMFAT 5.0을 사용해 피로해석을 진행하였다.

3.3 피로해석 결과

피로해석을 수행한 결과 시뮬레이션 결과와 같은 위치에서 최대 응력이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 또한 Fig. 11에서는 S-N 곡선을 통해 수명이 대략적으로 10^5 Cycle에서 안전율을 확인할 수 있었으며, Fig. 12에서는 Local Haigh Diagram에서 확인할 수 있듯이 Criticla Point가 Diagram 안쪽에 존재하므로 본 재료는 안정성 범위 안에 존재함을 보장할 수 있는 결과가 측정되었다.

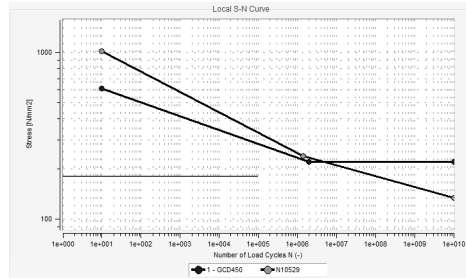


Fig. 11 S-N curve in suspension

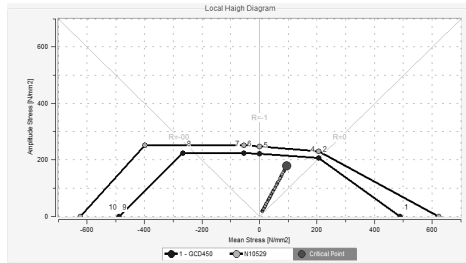


Fig. 12 Haigh diagram of suspension

4. 결론

본 논문은 트랙터 거동 시 구동 축 대한 응력을 측정하기 위해 동역학적 해석을 진행 하였고, 여기서 나온 결과를 이용하여 피로해석을 위해 구조강도 해석을 진행하였으며, 여기서 나온 결과를 이용해 최대 응력에 대한 재료에 피로수명을 분석하였다. 10^5 Cycle의 수명은 안전하다고 판단되나, 구조강도 해석에서 확인할 수 있는 취약부분의 응력집중을 분산할 수 있는 형상개선을 반영한 설계를 한다면 더욱 안전한 재료 설계가 가능할 것이다.

참고문헌

- (1) K. Miller, G. Joldes, D. Lance, and A Wittek, 2007, "Total Lagrangian explicit dynamics finite-element algorithm for computing soft tissue deformation", Communications in numerical methods in engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 121~134.
- (2) Halaszi C, Gaier C, Dannbauer H, 2007, "Fatigue life prediction of hermo-mechanically loaded engine components", 11th European automotive congress, Budapest.

- (3) FEMFAT User's Manual Ver. 4.6 (2007), AGNA Prowetrain Inc.
- (4) K.H. Moon, S.D. Lee and all., The Contact Fatigue Life Analysis of Transmission Gear considering Running-in, KSAE, v.15, no.5, 2007, pp.133-138.
- (5) Frank Kreith, Mark S. Bohn, 2001, "Principles of Heat Transfer", Thomson, New York, pp.165~611
- (6) ABAQUS Analysis User's Manual, Volume IV, Ver. 6.6(2007)
- (7) ABAQUS Example Problems Manual, Volume I, Version 6.6(2007).