

# 궤도 차량 로드 휠 강도평가와 잔류 변형에 관한 연구

신국식\*, 강성기#

## A Study for Residual Deformation and Strength Evaluation on Road Wheel of a Tracked Vehicle

Kuk-Sik Shin\*, Seong-Ki Kang#

(Received 2 March 2011; received in revised form 31 May 2011; accepted 20 June 2011)

### ABSTRACT

A tracked vehicle is dependent on performance of power pack and suspension systems. Especially, road wheels which are components of suspension system contribute distributing vehicle weight on soil and preventing from misguiding tracks. In this study, the maximum force was calculated that a tracked vehicle is driven on the worst condition. And then, FE analyses were carried out to evaluate strength road wheel under maximum force condition. In standard of quality evaluation for road wheel, FE simulations and experimental works were carried out under thirty degree slant load of normal direction of shaft. And then, A relationship residual deformation for slant load was investigated. The result of this research is applicable to evaluate strength and to make use of basis data.

**Key Words** : Tracked Vehicle(궤도차량), Stress Analysis(응력해석), Road Wheel(로드 휠), Residual Deformation(잔류 변형), Strength Evaluation(강도평가), Flow Stress(유동응력)

### 1. 서 론

로드 휠은 궤도차량 현수장치의 핵심 구성품으로 차량하중을 분산시키고 궤도 이탈 방지 등의 역할을 수행하며, 차량의 중량뿐 아니라 견인적재 중량까지 지지할 수 있어야 한다. 현재까지 로드 휠에 대한 설계 방법과 강도평가에 대한 연구와 복합소재를 사용하여 로드 휠을 제작하는 연구도 진행되고 있지만 궤도차량이 경사면 수직 등판과 측면 주행이 동시에 이루어진 경우에 대한 로드 휠의 작용 응력을 분석한 연구나

항복 하중 이상의 경사 하중에 대해 잔류 변형의 연관성을 규명한 연구는 적은 것으로 알고 있다<sup>[1]</sup>.

본 연구에서는 앞차와 뒤차가 연결된 궤도차량이 경사면 수직 등판과 동시에 측면 경사 주행 시 로드 휠의 최대 부하가 작용하는 순간에 작용될 수 있는 최대하중을 고려하여 응력해석을 수행하고 강도를 평가하였다<sup>[2-4]</sup>.

또한, 로드 휠의 품질 평가기준에 의해 30° 경사면에 부하가 가중 작용될 때 발생하는 축선 방향의 변형량과 하중 제거 시 잔류 변형량을 해석 시 물레이션을 통하여 실 제품의 실험을 비교 분석함으로써 작용 하중과 잔류 변형의 관계를 규명하였다<sup>[5,6]</sup>. Fig. 1은 다목적 궤도차량을 나타낸 것이다.

\* 한국폴리텍VII대학 진주캠퍼스 컴퓨터응용기계과  
# 교신저자 : 한국폴리텍VII대학 컴퓨터응용기계설계과  
E-mail : kskjh114@yahoo.co.kr

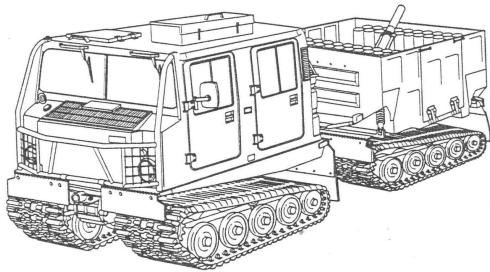


Fig. 1 Road wheel shape of a tracked vehicle

## 2. 로드 휠의 특성

궤도차량이 경사면을 등반할 때 최대 통과 경사각은 31°이며, 일반적으로 전체의 로드 휠이 궤도 트랙에 의해 지면과 접촉하여 운행되나, 최악의 조건하에서 운행될 경우에는 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 앞차의 로드 휠 바퀴 한 축이 앞 차량 전체의 중량뿐만 아니라 견인 차량의 중량까지 지지할 수 있어야 한다. 궤도차량의 앞차( $W_1$ )와 뒤차( $W_2$ )의 중량을 합친 차량 총 중량은 70kN(자체중량 52kN, 최대 적재중량 18kN)으로서 뒤차에 하중 적재 시 앞차와 뒤차의 하중은 각각 35kN으로 볼 수 있다. 이때 앞차의 중량  $W_1$ 은 로드 휠에 그대로 전달되고, 견인 차량의 경우 로드 휠에 직접 전달되는 경사면 하중은  $W_2 \cdot \sin 31^\circ = 18.025\text{kN}$ 이 된다. 두 힘의 교차 각  $\alpha = 59^\circ$  이므로, 두 힘을 합성한 최대 하중은 다음 식 (1)과 같이 계산된다.

$$F = \sqrt{35^2 + 18.025^2 + 2 \cdot 35 \cdot 18.025 \cdot \cos 59^\circ} = 46.9 \text{ kN} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, 로드 휠 한 축은 4개로 구성되어 있으므로, 수직 경사면(31°) 등판 시 로드 휠 하나에 전달되는 최대 하중은 11.73kN이 되나, 궤도 차량이 측면 경사면을 통과할 때 설계 기준상 최대 통과 경사각은 22°이다.

본 연구에서는 최악의 조건을 설정하기 위해 31° 수직 경사면 등판과 22° 측면 경사면 주행이 동시에

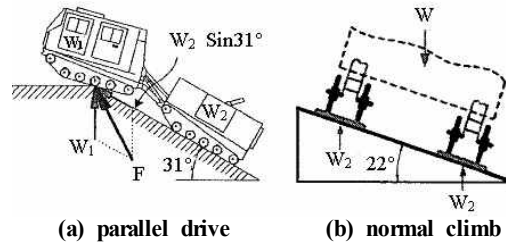


Fig. 2 Reactive force of the road wheel on slant road

이루어지는 경우를 고려하였다. Fig. 2(a)에서 보는바와 같이 경사면에 놓여있는 궤도 차량에 있어서 차량의 무게 중심점이 적재물의 형상에 따라 다르므로 경사면 위쪽 로드 휠과 아래쪽 로드 휠에서 받는 작용 하중은 계산하기에 어려움이 따른다. 따라서 유사 형상의 적재물을 실제 차량에 탑재한 상태에서 측면 경사 22° 및 수직 등판 31°에 고정하고 양쪽 가장자리의 로드 휠 아암을 기준으로 측정한 결과 아래쪽에 58.6%, 위쪽에 41.4%의 부하가 걸리는 것으로 측정되었다. 이를 근거로 식 (1)에서 구한 하중에 58.6%의 최대부하를 계산하면, 27.4kN이 되며, 아래쪽 로드 휠 2개가 지지되므로 로드 휠 하나에 각각 걸리는 최대 사용 하중은 13.7kN이 된다.

## 3. 로드 휠의 강도 해석

### 3.1 조건 및 해석

로드 휠은 부싱, 슬리브, 볼베어링 등과 결합되어 하부 프레임에 부착되어 회전운동에 의해 궤도 트랙에 하중을 전달하여 차량이 움직일 수 있도록 한다. 따라서 중앙부 홀은 부싱과 완전 결합되어 고정되어지므로, 로드 휠의 홀 부에 대해 x, y, z 방향 자유도를 구속하여 주었다. 로드 휠은 축대칭 형상이지만 지면과 접촉되는 면에만 하중이 작용되므로, 3차원으로 형상을 구현하고 궤도에 접촉되는 표면에 하중을 작용시켜 주었다. 로드 휠 응력 해석을 위한 하중의 적용에서 궤도 차량이 경사면 수직 등판 시의 경우에는 축선 방향에 직각으로 하중 조건을 부여하였고, 경사면 측면 주행과 수직 등판이 동시에 이루어지는 경우에 대하여 하중의

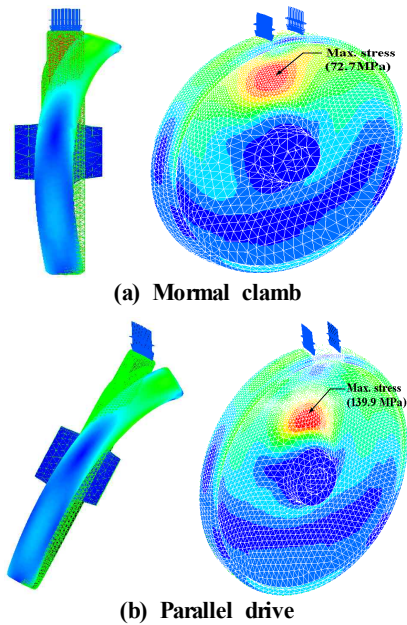
각도를 22° 기울어지게 적용하였다. 응력이 집중되어 작용될 것으로 예측되는 부분에 메쉬를 보다 조밀하게 분할하여 응력해석을 수행하였다. Table 1은 로드 휠 소재의 기계적 물성치를 나타내었다.

**Table 1 Mechanical properties of the road wheel**

| Material | Elastic modulus (GPa) | Poisson's ratio | Y.S. (MPa) | T.S. (MPa) | Elongation (%) |
|----------|-----------------------|-----------------|------------|------------|----------------|
| A356-T6  | 32                    | 0.33            | 178        | 267        | 9.2            |

### 3.2 강도해석 결과 분석

Fig. 3은 로드 휠의 경사면 등판과 경사 측면 통과 할 때 대한 강도해석 결과이며, Fig. 3(a)은 경사면 수직 이동시 최대 하중이 작용되는 경우에 대한 해석 결과로 최대 응력은 하중 작용 위치 부근의 디스크 안쪽 면에 나타났으며, 최대 변위는 하중이 작용되는 림 위치에서 축선 방향으로 발생하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 3(b)은 경사 측면 주행과 수직 등판이 동시에 이루어질 경우 해석결과이며 최대응력과 최대 변위의 발생 위치는 수직 이동시의 경우보다 중심축에 가깝게 발생됨을 볼 수 있었다.

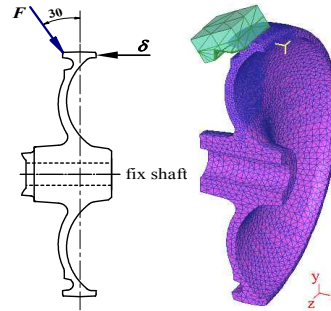


**Fig. 3 Result of FE simulation for the rod wheel on slant road**

## 4. 로드 휠의 잔류변형 평가

### 4.1 평가 기준

레도차량이 최대 적재 중량 이상의 하중을 받고 최대 경사각 22°의 경사면을 통과할 경우, 로드 휠은 탄성 범위를 벗어나 소성변형이 발생하게 되고 하중이 제거되면 일정한 량의 잔류 변형이 남게 된다. 항복응력 이상의 하중이 작용될 때에 대한 로드 휠의 품질 관리 기준에 의한 시험 방법은 Fig. 4에 나타내고 있다.



**Fig. 4 Evaluation method of road wheel on residual deformation**

품질관리 시험에서는 최대 경사각 보다 큰 30° 경사진 하중을 로드 휠 림부에 가한 후 제거하였을 때 축선 방향의 잔류 변형을 측정하여 일정 기준치 이하를 만족하도록 규정되어 있다. 이때 작용 하중과 잔류 변형은 25kN의 하중을 가한 후 제거하였을 때 잔류 변형량 1.5mm 이하, 40kN에서는 파손이 되지 않는 조건이 규정되어 있다.

### 4.2 유한요소 해석

로드 휠에 항복 하중 이상의 과도 하중이 작용될 때 발생하는 축 방향 변형량( $\delta$ )과 하중 제거 시 잔류 변형량을 예측하기 위한 시뮬레이션은 상용 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 사용하였다. 로드 휠은 축대칭 형상이지만 하중이 한쪽에서만 작용되므로 전체적으로 좌우 대칭으로 변형된다. 이를 감안하여 로드 휠의 형상 모델을 1/2로 하였고, 좌우 대칭면을 z방향으로 자유도를 구속하여 주고, 중심부 홀에 대해서는 x, y, z 방향 자유도를 구속하여 주었다.

실험 조건과 동일한 하중을 부여하기 위해 로드 휠의 림부에 펀치가 접촉되도록 하였으며, 이때 로드 휠은 탄소성체로 두고 펀치는 강체로 가정하였다.

펀치에 작용되는 하중은 x, y 방향에 대해 0.5, -0.886인 단위 벡터 방향을 지정하여 적용하였고, 펀치와 로드 휠의 마찰계수는 쿨롱 마찰계수 0.05로 가정하였다.

탄소성 문제를 해석하기 위한 로드 휠 소재 (A356-T6)의 탄성 범위 물성치는 Table 1에 나타내었으며, 소성구간에 대한 유동응력(flow stress)의 식은  $\bar{\sigma} = 328\epsilon^{0.114}$ 이다.

### 4.3 잔류 변형 시험

로드 휠의 하중에 대한 잔류 변형량을 측정하기 위해 Fig. 5에서 보는바와 같이 시뮬레이션에서 적용한 동일한 형상의 펀치를 제작하고, 로드 휠의 용량은 20ton인 INSTRON 기계식 만능 인장 시험기를 사용하여 실험하였다.

초기 하중을 0.1kN으로 설정하고 일정한 속도로 하중을 가한 후 초기 하중으로 복귀시켜 변형량을 측정하였다. 하중은 1kN에서부터 45kN까지 15단계로 나누어 3kN씩 점차적으로 하중을 증가시킨 후 하중을 제거하는 방식으로 반복하여 수행하였다. 축선 방향의 잔류 변형량을 측정하기 위해 축선 방향과 평행하게 다이얼 게이지를 설치하여 하중 작용 시 변형량과 하중 제거 시의 변형량을 측정하였다.

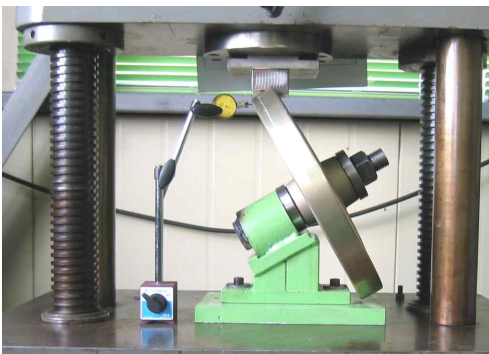


Fig. 5 Evaluation equipment of residual deformation for a road wheel

## 5. 실험 결과 분석

시뮬레이션 결과에서 최대 하중인 45kN을 가하였을 때 로드 휠의 변형량과 힘을 제거한 후의 변형 상태를 Fig. 6에 나타내었다. 로드 휠의 축선방향 변형은 힘이 직접 접촉되는 지점에서 가장 크게 나타났으며, 하중을 가하는 위치로부터 멀어질수록 감소되는 경향을 나타내고 있다.

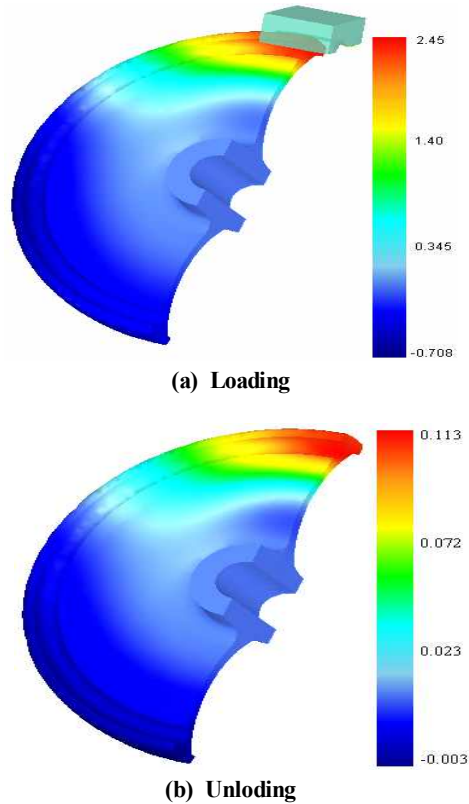


Fig. 6 Deformation of x-direction of the road wheel

Fig. 7은 시뮬레이션 결과와 실험 결과에 의한 축선 방향 변형-작용 하중 곡선을 나타낸 것이다.

시험하중의 선형적 증가에 대해 축선방향 변형량은 하중이 커짐에 따라 2차 곡선의 형태로 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 재료의 가공경화 법칙에 따라 소성 변형시 하중이 증가할수록 저항력이 국부변형상태에서 점점 변형 저항점이 로드 휠 몸체 전체로 확산하는 특성으로 나타났다.

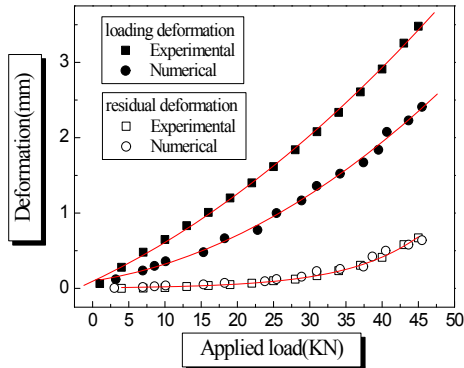


Fig. 7 Deformation-load graph of x-direction of the road-wheel

시험하중의 선형적 증가에 대해 축선방향 변형량은 하중이 커짐에 따라 2차 곡선의 형태로 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 재료의 가공경화 법칙에 따라 소성 변형 시 하중이 증가할수록 저항력이 국부변형상태에서 점점 변형 저항점이 로드 휠 몸체 전체로 확산하는 특성으로 나타났다.

하중의 선형적 증가에 대해 변형량은 만능시험기에서 실제 하중을 가하여 나타나는 값이 시뮬레이션 결과보다 미소하게 높게 나타나는 것은 직접 가할 때 실험과정에서는 로드 휠 자체의 변형뿐만 아니라 접촉식 받침대 치구에서의 탄성변형도 함께 포함된 수치로 기록되기 때문으로 변형량이 추가되어 나타나는 것으로 판단된다.

시뮬레이션과 실험 결과에서 25kN의 하중 지점에서는 잔류 변형이 0.121mm로 나타났으며, 해석 결과에서는 0.123mm로서 2미크론 차이로 유사하게 나타났다. 직접 가하는 45kN의 극한 하중을 가하고 난후 초기하중으로 되돌아왔을 때의 잔류 변형량은 0.7mm로 나타났으며, 파손이나 크랙 흔적의 유무는 PT방식의 침투액으로 확인해 본 결과 Fig. 8 과 같이 파손이나 크랙 흔적은 나타나지 않았다.



Fig. 8 PT test result

## 6. 결론

본 연구에서는 궤도차량의 경사 수직면 및 측면 주행 시 로드 휠에 작용되는 최대하중을 차량 중량과 적재물의 무게 중심을 고려하여 실험과 이론을 접목하여 분석하였으며, 궤도차량의 운행 조건과 로드 휠 품질관리 규정에 의한 조건을 적용하여 응력 해석과 로드 휠의 강도평가에 대해 분석하고 작용 하중에 대한 잔류 변형량의 관계를 규명하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 계산된 최대하중으로 시뮬레이션에 적용하여 강도 해석을 수행하였고 경사면 수직 등판과 경사면 측면 주행이 동시에 이루어질 경우 최대 작용 응력은 139.88MPa로 강도면에서 안전한 것으로 확인되었다.
2. 시뮬레이션과 실험 결과에서는 25kN의 하중 작용 시 0.121mm의 잔류 변형이 일어났으며, 45kN의 최대하중 작용 시에는 0.7mm로 나타났고, 45 kN의 최대 하중 작용 결과 때 파손이나 크랙의 흔적은 일어나지 않아 로드 휠의 품질 평가 기준에 만족하고 있었다.
3. 로드 휠 30° 이상 경사면에 항복하중을 가한 후 제거하였을 때 하중 작용점의 축선 방향 변형은 하중이 커짐에 따라 2차 곡선의 형태로 증가하는 것을 알 수 있었으며, 로드 휠 관리 규정에 의한 잔류 변형보다 훨씬 낮은 변형을 나타내어 충분한 강성을 가진 것으로 판단되었다.

## 참고문헌

1. Defense Standard Specification, Quality Assurance Requirement, Required Operational Capability (61214134), Agency for Defense Development, 1996.
2. Lee, W. S. and Kang, T. O. Kim, Y. T. Lee, K. S. Han, S. H., "궤도차량의 자동변속기 모델링 및 기동성능 예측 동적 시뮬레이터 개발", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 춘계학술대회논문집, pp. 299-305, 1984.
3. Atrin, R. L. and Crown, P. L., "Trends in Road wheel Design", American Ordnance Association Seminar, Jun., 1962.

4. Keith Burgess, John Pepin and Stephen. Biddle., "Design and Analysis of Composite Roadwheel for LVTP7 and M113K1", AD-A151467, pp. 1-18, 1984.
5. David P, Kihl Richard A, Swanek., "Investigation of Small Road Wheel For Use on Tracked Vehicles", David W, Tayler Naval Ship Research and Development Center, AD-A-111513, 1982.
6. Lee, S. C. and Kang, S. Y., "A Study on the Bending Collapse at the Open Cross-Section Members with Experiment and Analysis", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 132-139, 2004.